

# Κεφάλαιο 6

## Καθαρισμός των Απαιριών

---





## 6.1 Εισαγωγή

---

- Το αέριο προϊόν της καύσης ή της αεριοποίησης περιέχει συστατικά όπως: τέφρα, οξειδία του θείου, οξειδία του αζώτου, υδρόθειο, αμμωνία, πίσσες, και ιχνοστοιχεία, τα οποία εκλύονται στην ατμόσφαιρα → ρύπανση
- Ρυπαντές προκαλούν→τοξίνες στον αέρα, όξινη βροχή, υποβάθμιση ορατότητας, φαινόμενο του θερμοκηπίου και καταστροφή του όζοντος στην στρατόσφαιρα--> καταστροφή στα υδάτινα και χερσαία οικοσυστήματα: επίδραση σε ανθρώπους, ζώα, βλάστηση και υποδομή
- Θέσπιση αυστηρότερων περιβαλλοντικών προτύπων → καθιστούν τις τεχνολογίες ελέγχου ένα κύριο στοιχείο του σχεδιασμού και του κόστους των νέων θερμοηλεκτρικών μονάδων
- Στόχος κεφαλαίου: η παρουσίαση και σύγκριση των υφιστάμενων και των αναπτυσσόμενων τεχνολογιών ελέγχου των ρυπαντών. Η ταξινόμηση των τεχνολογιών ως: τεχνολογίες καθαρισμού σωματιδιακής ύλης, τεχνολογίες καθαρισμού οξειδίων του θείου, τεχνολογίες καθαρισμού οξειδίων του αζώτου, συνδυασμένες τεχνολογίες καθαρισμού  $SO_2/NO_x$ , τεχνολογίες καθαρισμού άλλων ρυπαντών και τεχνολογίες καθαρισμού θερμών αερίων.

## 6.2 Τεχνολογίες Καθαρισμού Σωματιδιακής Ύλης

- Διεργασίες καύσης και μετατροπής του γαιάνθρακα: σωματιδιακή μάζα, αποτελούμενη από λεπτά σωματίδια ανόργανης ύλης (ιπτάμενη τέφρα), άκαυστη στερεά καύσιμη ύλη (καπνό) και ατμοσφαιρικά κολλοειδή (προκύπτουν από συμπύκνωση H/C) συμπαρασύρονται στα απαέρια → δύσκολος έλεγχος λόγω της σύνθεσης των ρυπαντών → απαίτηση απομάκρυνσής τους
- Ανάπτυξη στρατηγικής ελέγχου: εξαρτάται από την ποσότητα και την φύση της παραγόμενης σωματιδιακής ύλης και τις απαιτήσεις απομάκρυνσής της. Η ποσότητα και η φύση αυτής της ύλης εξαρτάται από τις ιδιότητες της τέφρας του γαιάνθρακα, τον τύπο του αντιδραστήρα και τις συνθήκες λειτουργίας.
- Κρίσιμες παράμετροι για την απόδοση των συσκευών ελέγχου: σύνθεση της ιπτάμενης τέφρας και η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων της
- Η τελική επιλογή του συστήματος ελέγχου βασίζεται σε έναν αριθμό επιπρόσθετων χαρακτηριστικών, όπως η πτώση πίεσης, η ταχύτητα των απαερίων και το κόστος
- Το Πρότυπο New Source Performance (NSPS) θέτει ως όρια τα 0.03 lb/106 Btu (13ng/MJ)

**Πίνακας 6.2** Χαρακτηριστικά και κατανομή μεγεθών της ιπτάμενης τέφρας για διαφόρους τύπους κλιβάνου

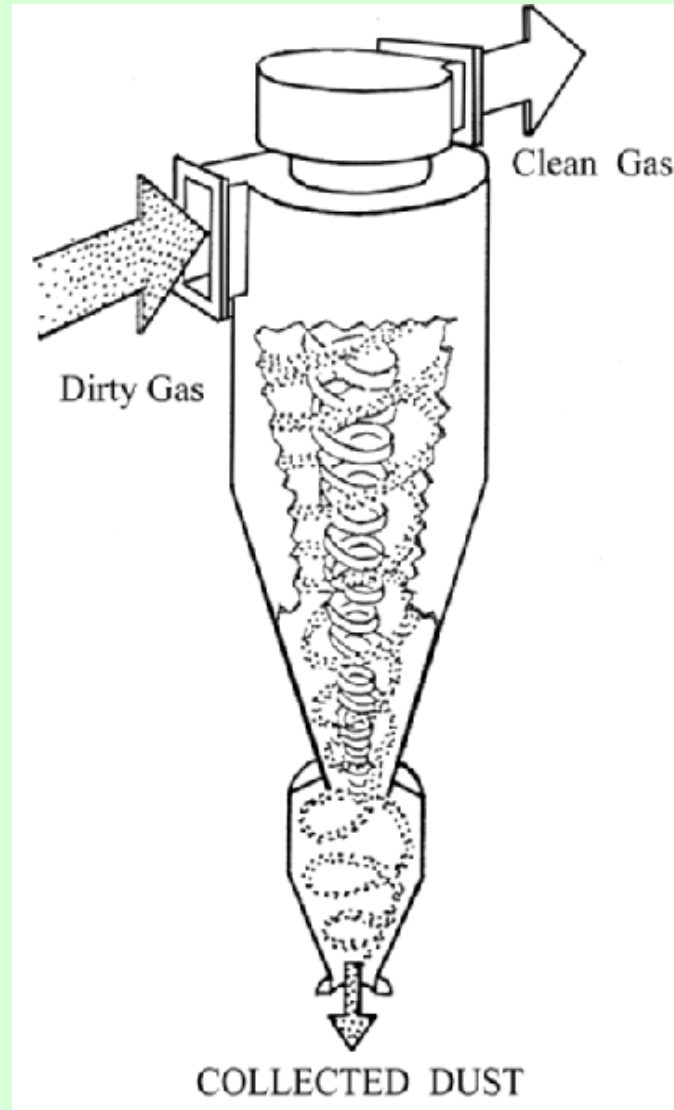
	Εστία Τροφοδοσίας από Κάτω	Εστία Διασποράς	Κλιβανοί Κονιοποιημένου Γαϊάνθρακα		Κλιβανοί Κυκλώνα
			Ξηρού Πυθμένα	Ρευστής Σκωρίας	
Ποσοστό παράσυρσης τέφρας στον γαϊάνθρακα , % <sup>1</sup>	20-30	30-80	55-85	45-55	10-30
Περιεκτικότητα καύσιμης ύλης, %	10-50	20-60	5-10	5-10	5
Φορτίο σκόνης, lb. 1000 lb. gas <sup>2</sup>	0.5-4	1.5-10	6-9	4-6	0.6-1.5
Τυπικό μέγεθος, αθροιστικό ποσοστό σε μικρόμετρα					
<10	7	11	40		86
<20	15	23	70		91
<44	30	42	80		95
<74	38	56	97		98
<149	57	73	100		100

1 Συμπεριλαμβάνει καύσιμη ύλη.

2 Βασιζόμενο σε γαϊάνθρακα περιεκτικότητας 15% σε τέφρα. Σκόνη στο αέριο που εγκαταλείπει τον κλιβανο πριν οποιοδήποτε συλλέκτη. Διόρθωση για περίσσεια αέρα 50%.

## 6.2.1. Κυκλώνες

- Απλοί και οικονομικοί για την απομάκρυνση σωματιδιακής ύλης από αέρια → περιορισμός εφαρμογής σε σωματίδια μεγάλου μεγέθους ( $>10\mu\text{m}$ )
- Απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 80-90%, ανάλογα με την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Τα μεγαλύτερα σωματίδια, με την μεγαλύτερη μάζα, απομακρύνονται αποδοτικότερα
- Η αποδοτικότητα  $\uparrow$  αν  $\uparrow$  η ταχύτητα του αερίου, ή αν  $\downarrow$  η διάμετρος του κυκλώνα --> τότε  $\uparrow$  κόστους και  $\downarrow$  της δυναμικότητάς της μονάδας
- Η χρήση πολλών κυκλώνων μικρής διαμέτρου, σε μία διάταξη σωληνώσεων εισροής και εκροής, κυκλώνες διατεταγμένοι εν σειρά ή κυκλώνες σε συνδυασμό με περισσότερο αποτελεσματικές και δαπανηρές συσκευές βελτιώνουν την απόδοση

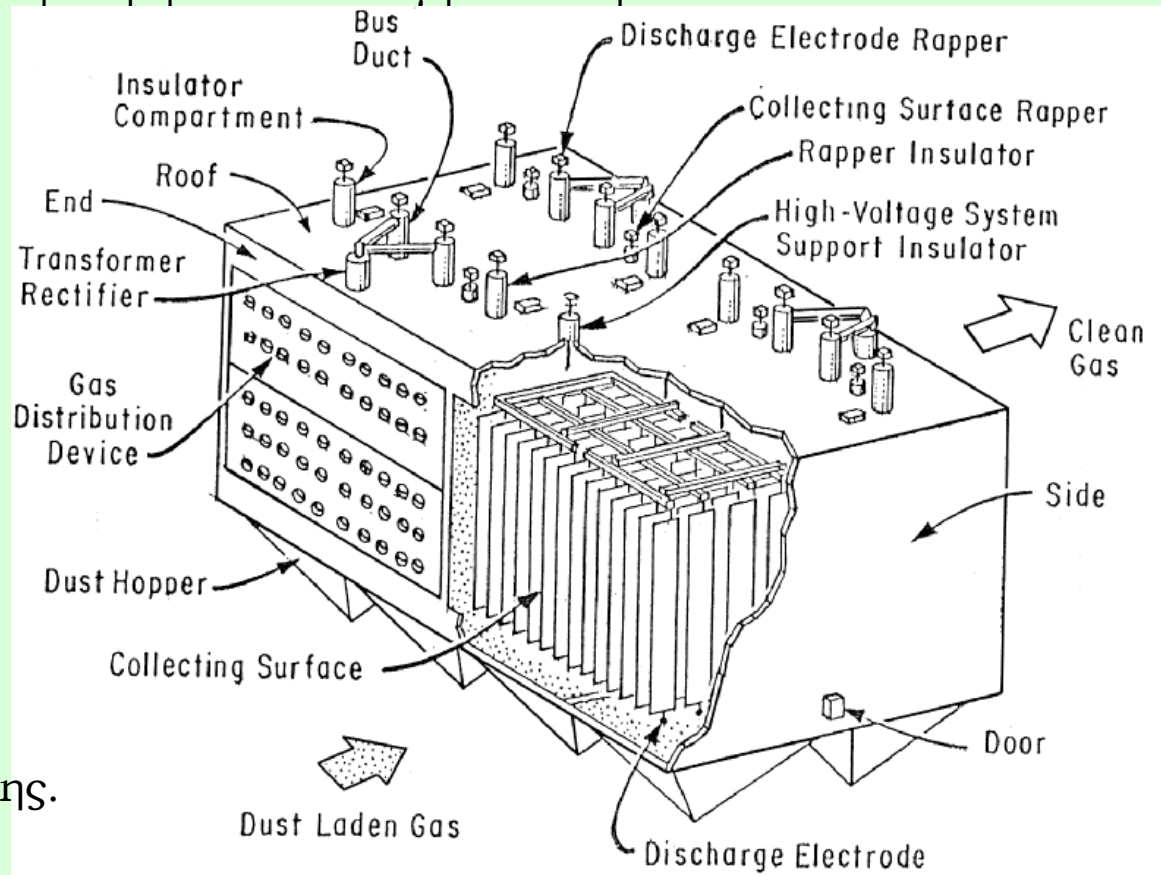


**Σχήμα 6.1** Συμβατικός φυγοκεντρικός διαχωριστής (κυκλώνας).

## 6.2.2 Ηλεκτροστατικές Συσκευές Καθίσης

### I. Περιγραφή Εξοπλισμού

- Επενεργούν μόνο στα σωματίδια, και όχι σε όλη την αέρια ροή → η απώλεια πίεσης αερίου κατά την διέλευσή είναι ελάχιστη
- Αρχή λειτουργίας: μία κάθοδος εκκένωσης (σειρά λεπτών συρμάτων) αιωρείται μεταξύ θετικά φορτισμένων κάθετων παράλληλων πλακών μέσα στο αέριο ρεύμα. Μεταξύ των ηλεκτροδίων εφαρμόζεται ένα δυναμικό 30-75kV. Το αέριο που περνά ανάμεσα από τις πλάκες ιονίζεται → ανάπτυξη φορτίου στα σωματίδια και την μετακίνησή τους προς τις πλάκες συλλογής (θετικά φορτισμένες) αποκόλληση με μικρά σφυριά και συλλογή σε χοάνη



**Σχήμα 6.2** Ηλεκτροστατική συσκευή καθίσης.

## II. Θέματα Απόδοσης και Σχεδιασμού

- Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των ηλεκτροστατικών συσκευών καθίζησης: η αναλογία επιφάνειας της πλάκας ως προς την αέρια ροή, το φορτίο της σωματιδιακής ύλης, η ταχύτητα του αερίου, η ένταση του πεδίου, ο χρόνος έκθεσης των σωματιδίων στο ηλεκτρικό πεδίο, η θερμοκρασία, η ειδική αντίσταση των σωματιδίων, η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο και η περιεκτικότητα της σωματιδιακής ύλης σε άνθρακα.

**Πίνακας 6.3** Τυπικές παράμετροι σχεδιασμού ηλεκτροστατικών συσκευών καθίζησης

<b>Παράμετρος</b>	<b>Εύρος Τιμών</b>
Ρυθμός καθίζησης (πραγματική ταχύτητα μετακίνησης)	0.1-0.7 ft/sec
Απόσταση μεταξύ πλακών	8-11 in.
Ταχύτητα αερίου	2-8 ft/sec
Υψος πλάκας	12-45 ft
Μήκος πλάκας	0.5-2.0 επί ύψος
Εφαρμοζόμενη τάση	30-75 kV
Ένταση ρεύματος	0.01-1.0 mA/ft σύρματος
Ένταση πεδίου	7-15 kV/in.
Χρόνος παραμονής (κατεργασίας)	2-10 sec
Πτώση πίεσης αερίου	0.1-0.5 in. ύδατος
Αποδοτικότητα	μέχρι 99.9+%
Θερμοκρασία αερίου	μέχρι 300°F (κανονική θερμοκρασία) 700°F (υψηλή θερμοκρασία) 1,300°F (ειδική θερμοκρασία )

## Παράγοντες Σχεδιασμού

- “*Ειδική Επιφάνεια Συλλογής*”: το εμβαδόν επιφάνειας της πλάκας ( $m^2$ ) επί  $28.3 m^3$  ανά λεπτό διέλευσης αερίων. Σχετίζεται με την αποδοτικότητα συλλογής που εκφράζεται από την εξίσωση Deutsch:

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{A}{V}W\right)$$

$E$  = αποδοτικότητα μερικής συλλογής,  $A$  = εμβαδόν επιφανείας ( $m^2$ ),  $V$  = ρυθμός ροής αερίου  $28.3 m^3/min$ ,  $W$  = πραγματική ταχύτητα σωματιδίων  $m/s$ .

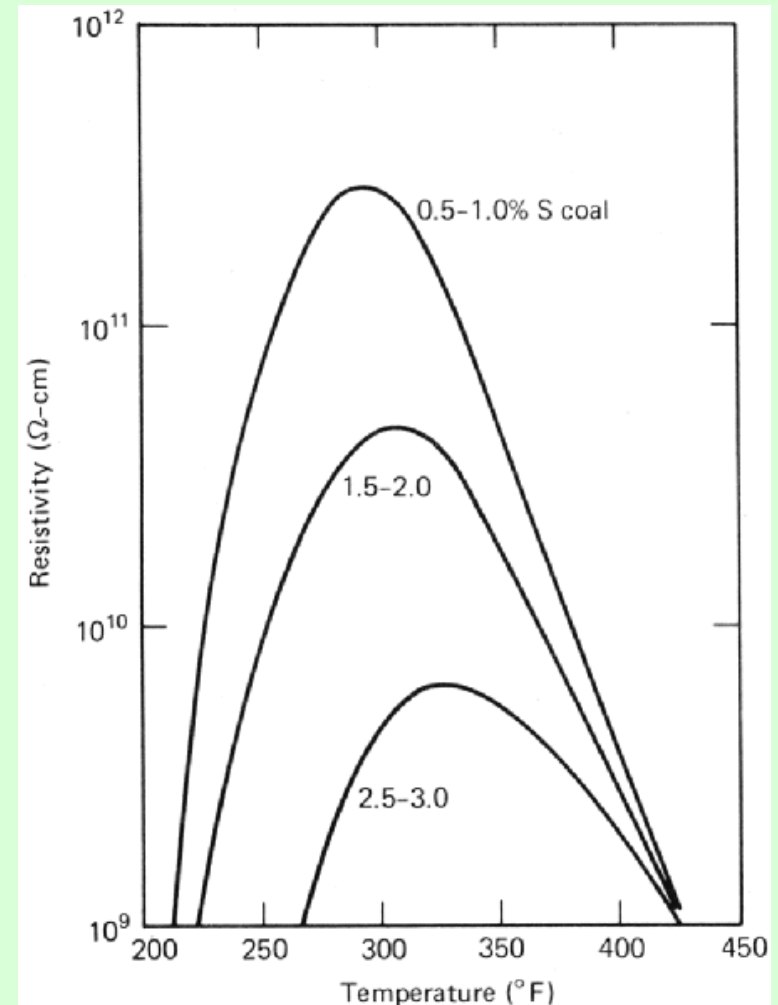
Για πολύ υψηλά επίπεδα αποδόσεων χρησιμοποιείται συντελεστής διόρθωσης ( $k \sim 0.5$ )

- “*Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση των Σωματιδίων Τέφρας*”: εάν  $> 2 \times 10^{10} \Omega \cdot cm \rightarrow$  ταχύτητα μετακίνησης σωματιδίων  $\downarrow$ , λόγω της πτώσης δυναμικού στα ηλεκτρόδια εκκένωσης: φαινόμενο αντίστροφης κορώνας  $\rightarrow$  συσκευές καθίζησης είναι ανταγωνιστικές για γαιάνθρακες μέσης και υψηλής περιεκτικότητας σε S, με μέση έως χαμηλή ειδική αντίσταση της τέφρας  $\rightarrow$  απομάκρυνση της σωματιδιακής ύλης  $> 99.5\%$ .
- Παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση είναι: η T και η σύνθεση της ιπτάμενης τέφρας (περιεκτικότητά σε θείο S)
  - Γαιάνθρακες υψηλής περιεκτικότητας σε S ( $> 1.5\%$ ): το  $SO_3$  αντιδρά με την υγρασία των αερίων προς  $H_2SO_4 \rightarrow$  συμπύκνωση στην επιφάνεια των σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας  $\rightarrow$  σχηματισμός ηλεκτρικά αγώγιμης μεμβράνης  $\rightarrow$   $\uparrow$  ροής ηλεκτρικού ρεύματος στην συσκευή καθίζησης  $\rightarrow$   $\uparrow$  απόδοσης συλλογής



## Παράγοντες Σχεδιασμού

- Γαιάνθρακες χαμηλής περιεκτικότητας σε S: επιλογές για την ↑ απόδοσης συλλογής:
1. Τοποθέτηση της συσκευής καθίζησης πιο κοντά στον κλίβανο, πριν τον προθερμαντήρα του αέρα, όπου T απαερίου  $\sim 300^{\circ}\text{C}$  (θερμή πλευρά). Μειονεκτήματα: επεξεργασία αυξημένων όγκων αερίου κατά 50-100%, ανάγκη ενισχυμένης επένδυσης (↑κόστος).
  2. Χρήση συσκευών καθίζησης μετά τον προθερμαντήρα του αέρα, όπου T απαερίου  $\sim 150^{\circ}\text{C}$  (ψυχρή πλευρά) με μία μεγάλη επιφάνεια συλλογής
  3. Έγχυση κατάλληλου ρυθμιστικού μέσου στο απαέριο, που θα μεταβάλλει την ειδική αντίσταση της τέφρας. Προσθετικά, που έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς, είναι τα  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NH}_3$  και η υγρασία. Το κύριο ρυθμιστικό μέσο είναι το  $\text{SO}_3$ .



**Σχήμα 6.3**

Οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας του αερίου και της περιεκτικότητας του γαιάνθρακα σε θείο στην ειδική αντίσταση της τέφρας

### III. Αξιοπιστία

Παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία μίας συσκευής καθίζησης:

- Η κατάλληλη διαστασιολόγηση: πολύ σημαντικός παράγοντας
- Η διαίρεση της μονάδας σε τομείς: εμποδίζει τις μεταβολές θερμοκρασίας και φορτίου σκόνης, αλλά παράλληλα είναι αδύνατον να κλείσει ένας τομέας για συντήρηση, ενώ το υπόλοιπο τμήμα θα παραμένει σε λειτουργία. Ο σύγχρονος σχεδιασμός δίνει επίσης μεγαλύτερη προσοχή στην ομοιομορφία της ροής του αερίου, η οποία είναι σημαντική για την διατήρηση της αποδοτικότητας.
- Η ανεπάρκεια των ηλεκτροδίων εκκένωσης λόγω ηλεκτρικής διάβρωσης
- Η ανεπάρκεια του συστήματος των σφυριών
- Η ανεπάρκεια λόγω κόπωσης και διάβρωσης των πλακών συλλογής

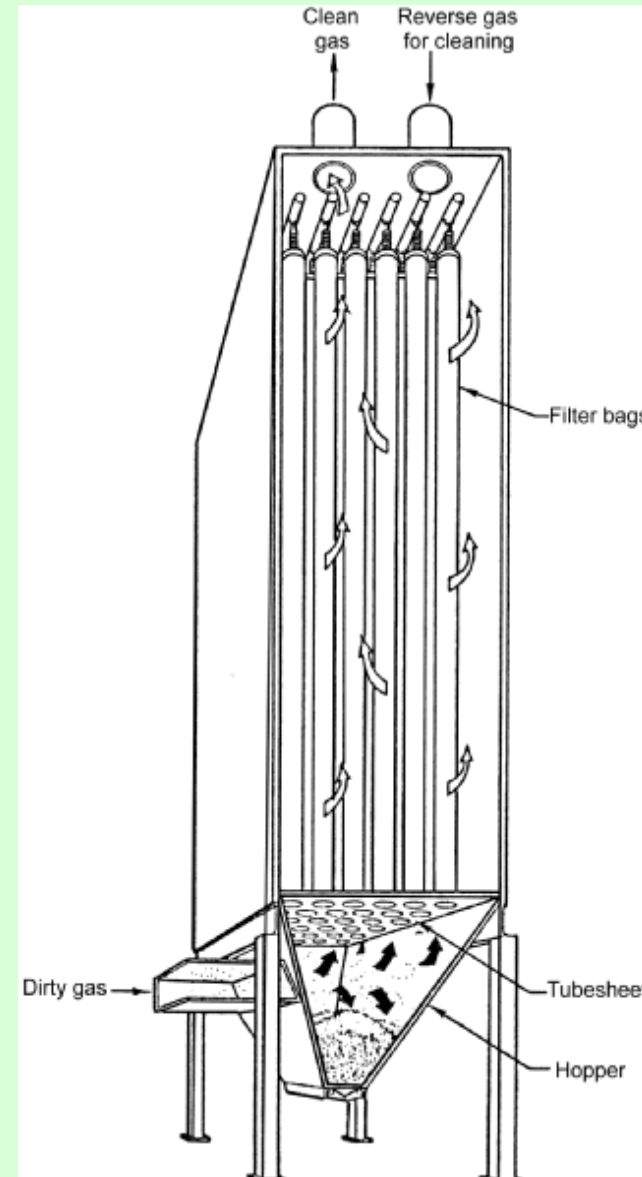
## 6.2.3 Υφασμάτινα Φίλτρα

### I. Περιγραφή Εξοπλισμού

- Υφασμάτινα φίλτρα (σακκόφιλτρα): κατακρατούν πολύ λεπτά σωματίδια και καθαρίζουν τα αέρια του γαιάνθρακα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο. Ικανοποιούν τους περισσότερο απαιτητικούς σύγχρονους κανονισμούς εκπομπών. Όταν  $\Delta P$  φθάνει σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο, απαιτείται καθαρισμός → επίδραση στην λειτουργία και οικονομική απόδοση (μεγάλα μεγέθη)

#### Οι κυριότερες μέθοδοι καθαρισμού είναι:

- α) Μηχανική ανατάραξη ή καθαρισμός με αέρα: αποδοτική, αξιόπιστη & οικονομική
- β) Καθαρισμός με φούσκα: απαιτεί μεγάλη ποσότητα συμπιεσμένου αέρα.
- γ) Καθαρισμός με αναστροφή της ροής του αέρα: αποδοτική, αλλά απαιτεί μεγάλη δυναμικότητα για τον χειρισμό του ανακυκλούμενου αερίου.
- δ) Καθαρισμός με ήχους: δεν είναι αποδοτική, απαιτείται επιπρόσθετα καθαρισμός με αναστροφή ροής του αέρα ή με διατάραξη.



## II. Θέματα Απόδοσης και Σχεδιασμού

- Τα υφασμάτινα φίλτρα υποβαθμίζονται από την επαφή με υγρασία. Αποφυγή: λειτουργία σε  $T >$  σημείου δρόσου  $H_2SO_4 \rightarrow$  όμως αυξημένη θερμοκρασία στον θερμαντήρα αέρα μπορεί να καταστρέψει τους σάκκους, αφού ο υαλοβάμβακας, που χρησιμοποιείται συνήθως, δεν αντέχει σε υψηλές  $T$ .
- Τυχαία σκισίματα μπορούν να αποτελέσουν πρόβλημα  $\rightarrow$  μεγάλο  $\Delta P$
- Μπορεί να προκληθεί έκρηξη από καύσιμο που δεν έχει καεί, λόγω ανάπτυξης ηλεκτροστατικών φορτίων.
- Μεγάλες απαιτήσεις σε χώρο: πχ. μονάδα δυναμικότητας 1000MW χρειάζεται 40 σακκόφιλτρα, μεγέθους 2m επί 13m επί 8m.
- Σακκόφιλτρα δεν επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά τέφρας γαιάνθρακα
- Απαλείφουν πολλά μειονεκτήματα των συσκευών ηλεκτροστατικής καθίζησης.
- Ικανά για την απομάκρυνση πολύ λεπτών σωματιδίων. Για σωματίδια  $0.5\mu m$  η αποδοτικότητα: 90%, ενώ για σωματίδια  $0.1\mu m$  ή  $10\mu m$ , η αποδοτικότητα συλλογής: 99%. Οικονομικά συμφέρουσα επιλογή, όταν τα επιτρεπτά επίπεδα εκπομπής πέσουν κάτω από  $0.11b/10^6 Btu$  ( $45ng/MJ$ )
- Παράμετροι σχεδιασμού υφασμάτινων φίλτρων: **α)** όγκος τροφοδοσίας αερίου, **β)** αναλογία αέρα προς ύφασμα (1.81), **γ)** μέθοδος καθαρισμού (αναστροφή αέρα), **δ)** ύφασμα (υαλοβάμβακας με επίστρωση Teflon), **ε)** συνολική επιφάνεια υφάσματος ( $100985m^2$ ), **στ)** κανονική θερμοκρασία λειτουργίας ( $150^\circ C$ ), **ζ)** μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας ( $290^\circ C$ ), **η)** κανονική πώση πίεσης σε λειτουργία ( $0.98kPa$ ), **θ)** διάρκεια κύκλου καθαρισμού (30 min)

## 6.2.4. Υγρές Πλυντρήδες Αερίων

Υγρή απογύμνωση αερίων για την απομάκρυνση σωματιδιακής ύλης από τα απαέρια

### Πλεονεκτήματα:

- Μπορούν να απομακρύνουν την ιπτάμενη τέφρα & το SO<sub>2</sub> --> ↓κόστους λειτουργίας

### Μειονεκτήματα:

- (α) Μεγάλη πτώση πίεσης--> κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για την αποδοτική συλλογή λεπτών σωματιδίων.
- (β) ↑ κόστους λειτουργίας από την διαχείριση και απόθεση του υγρού πολτού της ιπτάμενης τέφρας.
- (γ) Προβλήματα από: επικαθίσεις, διάβρωση, αποσάθρωση και φράξιμο των υγραμένων επιφανειών, καθώς και παράσυρση του εκνεφώματος στα απαέρια
- (δ) Πιθανή ανάγκη αναθέρμανσης του κατεργασμένου αερίου καπνοδόχου.

### Ταξινόμηση ανάλογα με τον μηχανισμό συλλογής των αερίων:

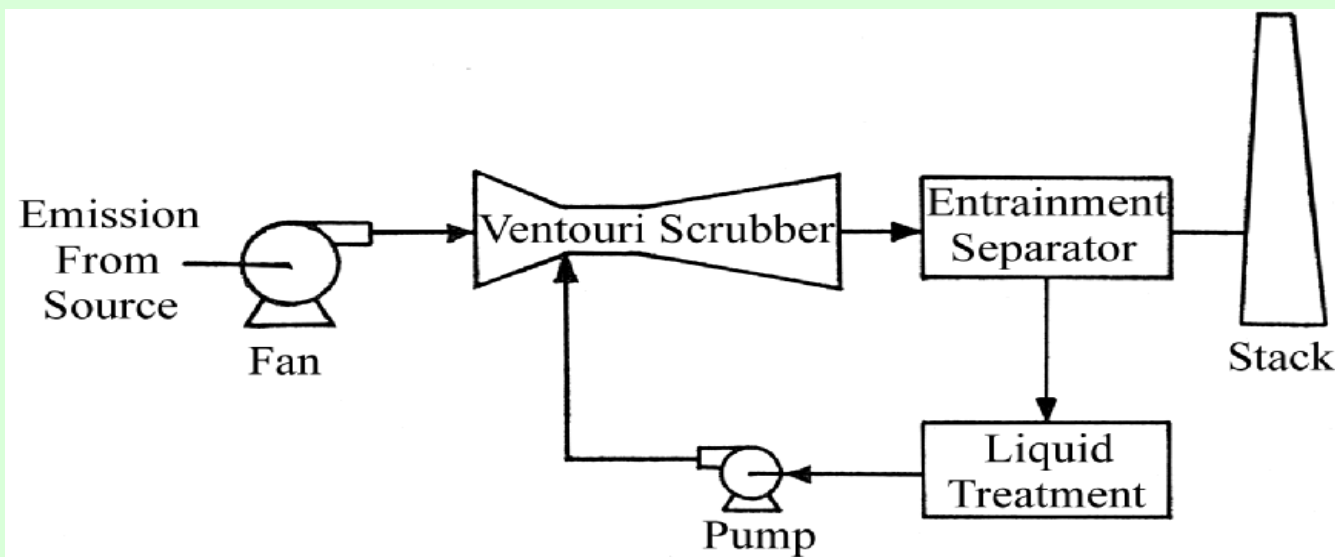
- Πρόσκρουση λόγω αδράνειας, διάχυση, ικανότητα αναχαίτισης, ηλεκτροστατική έλξη, φόρηση με διάχυση, θερμοφόρηση και συμπύκνωση.

### Τύποι σε χρήση σήμερα:

- Πλυντρήδες στήλης με δίσκους, κλίνης πληρωτικών μέσων, προσχηματισμένου ψεκασμού, Venturi, φυγοκεντρικές και κινητής κλίνης.

## Συσκευή Venturi

- Το απαέριο έρχεται σε επαφή με  $H_2O$  και προωθείται στις σωληνώσεις. Οι υψηλές ταχύτητες στον αυχένα του Venturi (60-120m/s) προξενούν σχηματισμό σταγόνων  $H_2O$  που παγιδεύουν τα σωματίδια της τέφρας → το  $H_2O$  εισέρχεται στην περιοχή απόκλισης → συσσώρευση των υγραμένων σωματιδίων. Το  $H_2O$  και η ιπτάμενη τέφρα απομακρύνονται από το αέριο και συλλέγονται
- Πλεονεκτήματα: Απλή & φθηνή κατασκευή. Λόγω απουσίας κινούμενων τμημάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συλλογή κολλωδών σωματιδίων.
- Μειονεκτήματα: για αποδοτικότητα συλλογής λεπτών σωματιδίων >99% → μεγάλη κατανάλωση ενέργειας (λειτουργεί με βάση την αρχή της αδράνειας) και  $\Delta P$  μέχρι και 24.5kPa. Αντιμετώπιση: με ρύθμιση της πτώσης πίεσης και μεταβάλλοντας την ροή των υγρών ή την ταχύτητα των αερίων



**Σχήμα 6.5** Σύστημα απογύμνωσης αερίων Venturi

## 6.2.5 Σύγκριση Συσκευών Ελέγχου Σωματιδιακών Εκπομπών

	<b>Υφασμάτινα φίλτρα</b>	<b>Ηλεκτροστατικές συσκευές καθίζησης</b>	<b>Πλυντήρες αερίων</b>
<b>Διακυμάνσεις τροφοδοσίας</b>	Δεν επηρεάζονται	Επηρεάζονται	Δεν επηρεάζονται
<b>Γαϊάνθρακες υψηλής περιεκτικότητας σε νάτριο</b>	Παράγουν σωματίδια τέφρας, τα οποία μπορούν να σχηματίσουν επικάθιση και να προσκολληθούν ισχυρά στο ύφασμα. Αυτό προξενεί προβλήματα στον καθαρισμό και μειώνει την αποδοτικότητα		
<b>Γαϊάνθρακας χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο</b>	Πιο ελκυστικά στην περίπτωση καύσης και αποτελεσματικά στην συγκράτηση ιχνοστοιχείων της τέφρας. Πιο οικονομική επιλογή		Οικονομικά
<b>Γαϊάνθρακας υψηλής περιεκτικότητας σε θείο</b>	Αρκετά οικονομικά	Περισσότερο οικονομικές από ότι οι πλυντήρες αερίων Venturi	Όχι ιδιαίτερα οικονομικά
<b>Κόστος εγκατάστασης</b>	Όσο το μέγεθός τους αυξάνεται, τα υφασμάτινα φίλτρα είναι λιγότερο οικονομικά από ότι οι συσκευές καθίζησης (ανάγκη για καθαρισμό)	Υπερβαίνει το κόστος εγκατάστασης ενός υφασμάτινου φίλτρου, της ίδιας δυναμικότητας, κατά 20-30% και είναι 3 έως 4 φορές υψηλότερο από αυτό μίας πλυντήρας αερίων.	Χαμηλό
<b>Κόστος λειτουργίας</b>	Αρκετά υψηλό	Μόνο το 10% αυτού που απαιτείται για το υφασμάτινο φίλτρο, ή το 20% αυτού που απαιτείται για μία υγρή πλυντήρα αερίων.	
<b>Κόστος συντήρησης και αντικατάστασης</b>	Υψηλότερο	Χαμηλότερο	Υψηλότερο

## 6.2.6 Καινοτομικά Συστήματα Ελέγχου Εκπομπών Σωματιδιακής Ύλης

---

- **Εκπομπές μικρών σωματιδίων:** περισσότερο επιβλαβή στην υγεία από τα μεγαλύτερα σωματίδια → περιβαλλοντικοί κανονισμοί θέτουν μεγάλη έμφαση στον έλεγχο
- **Συσκευές ελέγχου:** βελτίωση του συμβατικού εξοπλισμού απομάκρυνσης σωματιδιακής ύλης για αποδοτική συλλογή των μικρών σωματιδίων (<1 $\mu$ m) → υψηλό κόστος και δυσκολία διατήρησης υψηλής αποδοτικότητας
- **Πλυντήρα αερίων φορτισμένου σταγονιδίου:** η συλλογή των μικρών σωματιδίων γίνεται με σταγονίδια χρησιμοποιώντας δυνάμεις αδράνειας και ηλεκτρικές. Το σύστημα συνδυάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροστατικών συσκευών καθίζησης και των πλυντηρίων αερίων που χρησιμοποιούν ύδωρ. Απαιτεί μικρότερο κόστος επένδυσης, αλλά μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας από μία συσκευή ηλεκτροστατικής καθίζησης
- **Άλλες συσκευές:** καθίζησης φορτισμένων σταγονιδίων, ηλεκτρική πλυντήρα αερίων αδράνειας, ηλεκτρο-ρευστοστερεές κλίνες, κλίνες “electropacked”, ηλεκτροστατικά υφασμάτινα φίλτρα, κεραμικά φίλτρα μεμβράνης, μαγνητικοί διαχωριστές για απομάκρυνση του αφρού και ηλεκτροστατικές συσκευές καθίζησης πλάσματος



## 6.3. Τεχνολογίες Καθαρισμού Διοξειδίου του Θείου

- Καύση: S γαιάνθρακα → οξείδωση προς  $\text{SO}_2$ . Συνήθης σύνθεση του αερίου της καπνοδόχου: άζωτο, 500-5000ppm  $\text{SO}_2$ , 15-20%  $\text{CO}_2$ , 3-10%  $\text{O}_2$  και 5-10%  $\text{H}_2\text{O}$
- Όρια τιμών ρυθμού εκπομπών με βάση την περιεκτικότητα σε  $\text{SO}_2$  και την θερμογόνο δύναμη του γαιάνθρακα (Πράξη Clean Air Act του 1980, ΗΠΑ):

γαιάνθρακας	απαιτούμενη μείωση των εκπομπών μη ελεγχόμενου $\text{SO}_2$	μέγιστη επιτρεπτή τιμή εκπομπών $\text{SO}_2$
υψηλής περιεκτικότητας σε S (>1.5%)	κατά 90%	520mg/10 <sup>6</sup> J (1.2lb/10 <sup>6</sup> Btu)
χαμηλής περιεκτικότητας σε S	κατά 70%	287mg/10 <sup>6</sup> J (0.6lb/10 <sup>6</sup> Btu)

### 2 κύριοι τρόποι κατεργασίας των απαερίων για την απομάκρυνση του $\text{SO}_2$

- (1) Μη αναγεννήσιμες διεργασίες καθαρισμού, όπου το  $\text{SO}_2$  εξουδετερώνεται με ασβεστόλιθο ή υδροξείδιο του ασβεστίου και σχηματίζεται ένα πυκνό αιώρημα θειϊκών και θειωδών αλάτων, το οποίο χρειάζεται απόθεση, και
- (2) Αναγεννήσιμες διεργασίες καθαρισμού, όπου το  $\text{SO}_2$  εξάγεται και συγκεντρώνεται, ή όπου σχηματίζεται  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , θειϊκό αμμώνιο ή διθειώδες αμμώνιο, χρησιμοποιώντας ένα μέσο προσρόφησης, το οποίο μπορεί να διατεθεί στην αγορά

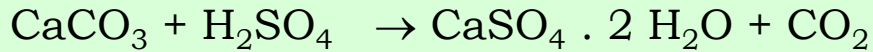
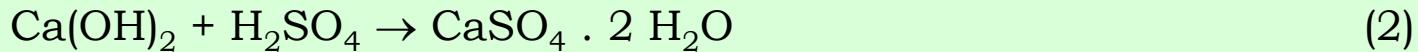
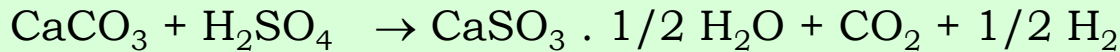
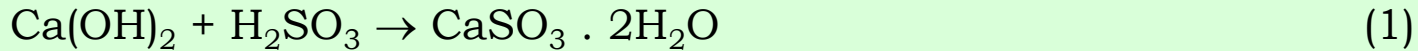
## Πίνακας 6.5. Διεργασίες απομάκρυνσης διοξειδίου του θείου

	Μη Αναγεννήσιμες	Αναγεννήσιμες
Υγρές	Πυκνό Αιώρημα Οξειδίου του Ασβεστίου/Ασβεστόλιθου	Wellman-Lord
	Με Δύο Αλκάλια Αλκαλικής Τέφρας Υδατικού Νατρίου	Οξείδιο του Μαγνησίου
	Υδατικού Διαλύματος Αμμωνίας	
	Chiyoda 101 και 121	
	Κιτρικών	
	Υδατικού Ανθρακικού	
	Καταλυτική Οξειδωση	
	Οξείδιο του Ασβεστίου	Ενεργός Ανθρακας
	Νάτριο	Προσρόφηση Οξειδίου του Χαλκού
	Ξηρές	

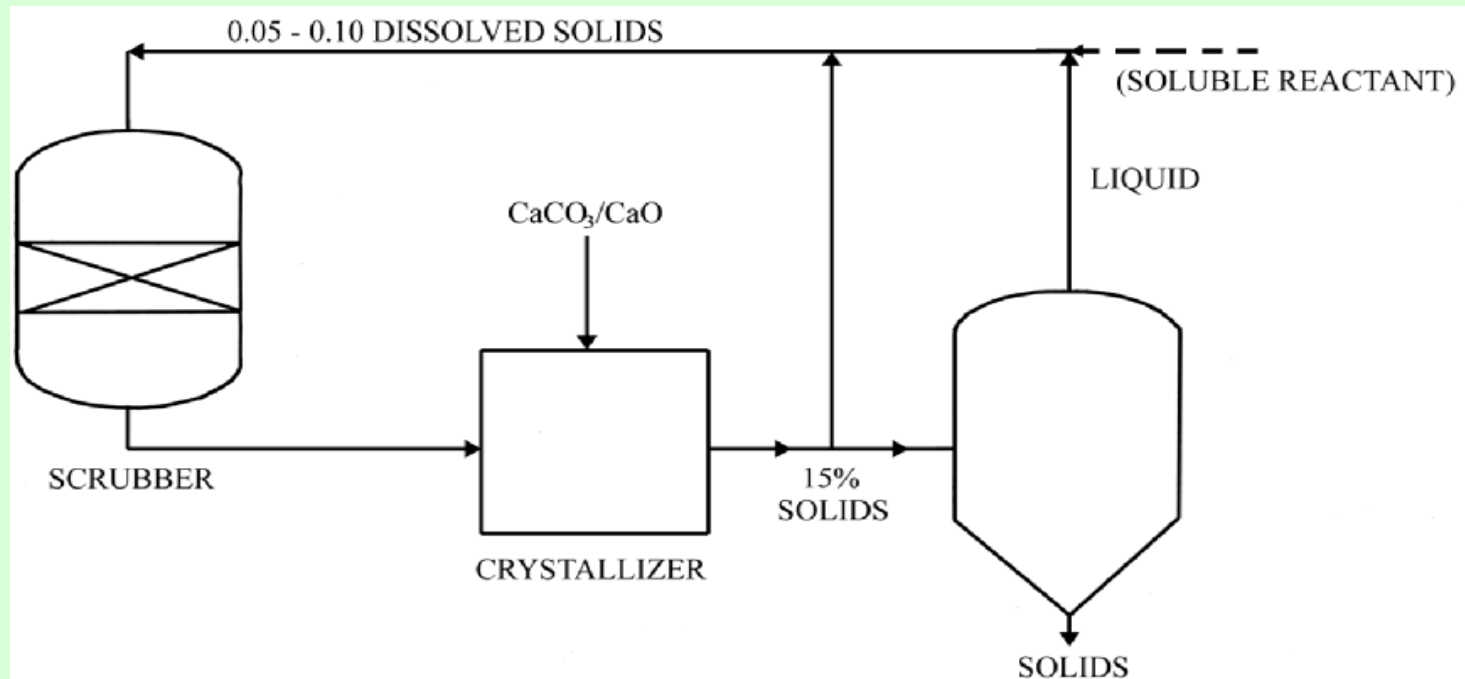
## 6.3.1 Μη Αναγεννήσιμες Διεργασίες

### I. Υγρές Διεργασίες

#### Απογύμνωση με Πυκνό Αιώρημα Οξειδίου του Ασβεστίου / Ασβεστόλιθου



CaO αντιδραστικότερο, CaCO<sub>3</sub> οικονομικότερο



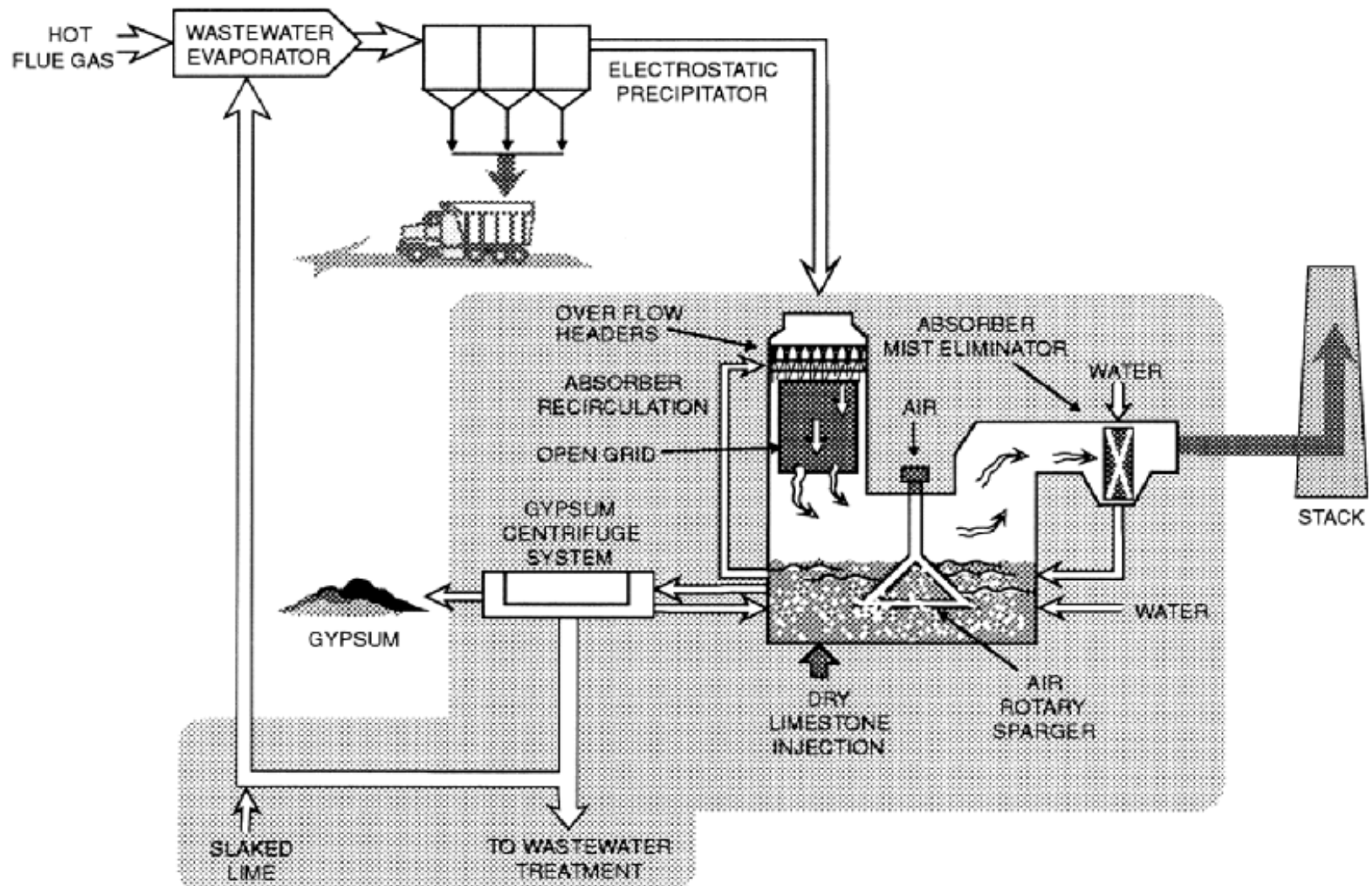
**Σχήμα 6.6** Απογύμνωση αερίων με ανακυκλούμενο πυκνό αιώρημα

## Πλεονεκτήματα:

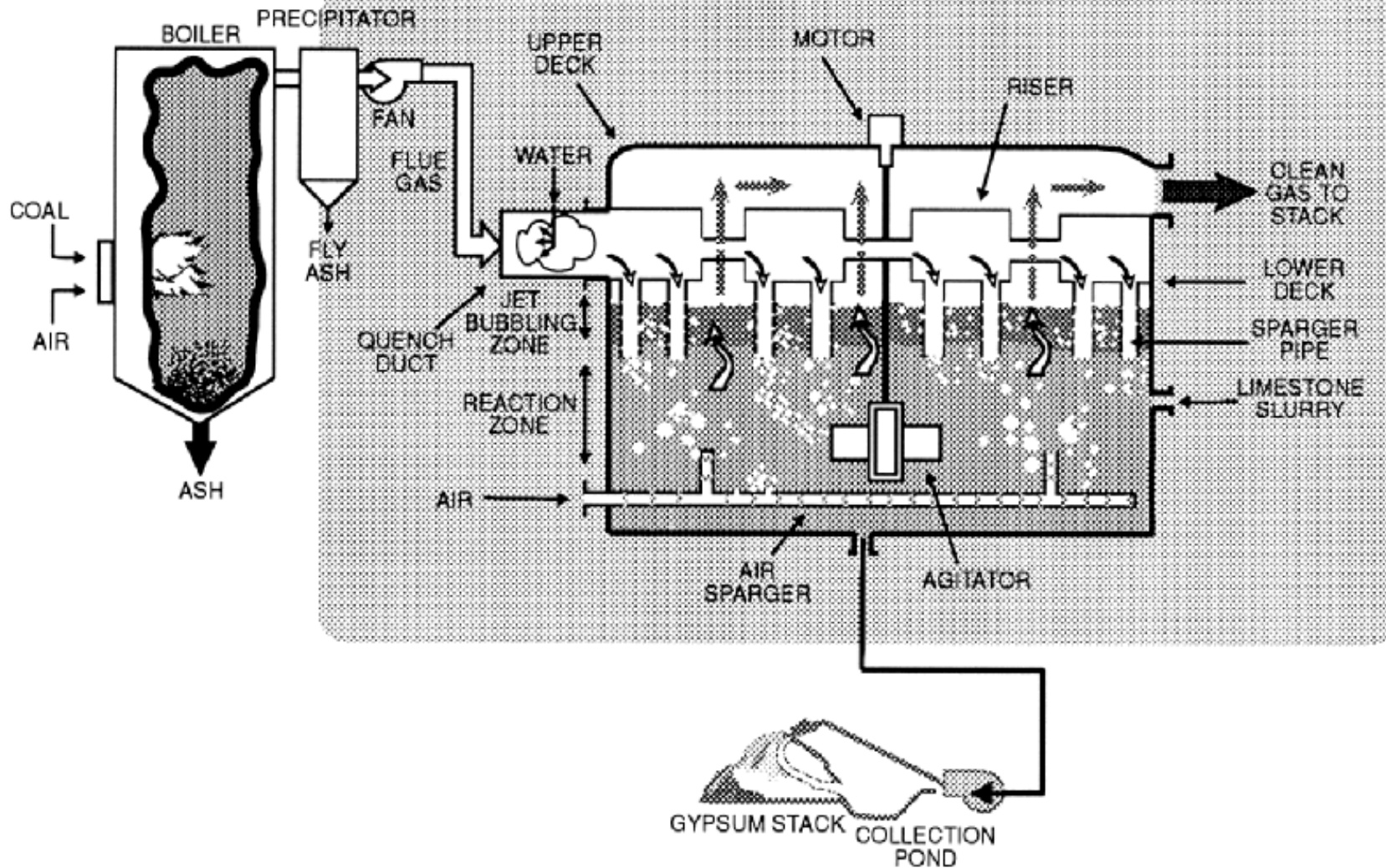
- η σχετική τους απλότητα
- η ανοχή στην ύπαρξη ιπτάμενης τέφρας
- η ικανότητά να διαχειρισθούν ένα μεγάλο εύρος ροών απαερίων
- η μεγάλη αποδοτικότητα όσον αφορά στην απομάκρυνση SO<sub>2</sub> (έως 98%)
- λόγω της χαμηλότερης απαίτησής σε απορροφητικά μέσα είναι οικονομικότερα των συστημάτων έγχυσης προσροφητών και των ξηρών πλυντηρίδων αερίων (για γαιανθράκες με S>1.5%) καθώς και λεβήτων μεγάλων διαστάσεων

## Μειονεκτήματα:

- απαιτούνται υψηλές αναλογίες υγρού–αερίου
- το αέριο καπνοδόχου πρέπει να αναθερμανθεί
- παράγονται μεγάλες ποσότητες στερεών αποβλήτων και ο εξοπλισμός υφίσταται διάβρωση και επικαθίσεις. Μείωση των επικαθίσεων με: έλεγχο του χρόνου παραμονής στον κρυσταλλοποιητή, της συγκέντρωσης στερεών αλάτων CaSO<sub>4</sub> και του ρυθμού ανακύκλωσης του υγρού, και περιορισμού της ποσότητας CaSO<sub>4</sub> που δεν έχει αντιδράσει και επιστρέφει στην πλυντηρήδα αερίων, ή μεταφέρει μία σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα σε Mg<sup>2+</sup> στο πυκνό αιώρημα ανακυκλοφόρησης (η ένωση Mg(HSO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> που σχηματίζεται έχει μία σημαντικά μικρότερη τάση <sup>20</sup> για επικαθίσεις, από ότι το CaSO<sub>4</sub> ή το CaSO<sub>3</sub> )



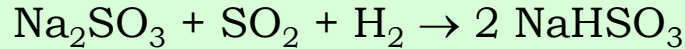
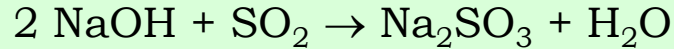
**Σχήμα 6.7** Διεργασία “Προηγμένη Αποθείωση Απαερίων”



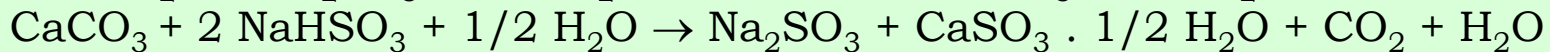
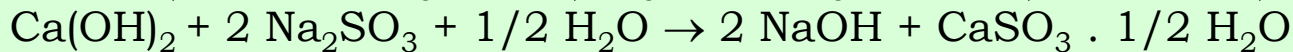
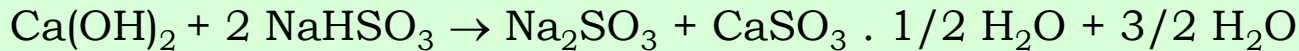
**Σχήμα 6.8** Διεργασία “Προηγμένη Αποθείωση Απαιριών” (FGD) Chiyoda Thoroughbred-121(CT-121)

## Η Διεργασία με Δύο Αλκάλια

- Η διεργασία δύο αλκαλίων απορροφά το SO<sub>2</sub> σε ένα καθαρό διάλυμα NaOH/Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Το διάλυμα απογύμνωσης αναγεννάται με οξείδιο του ασβεστίου ή ασβεστόλιθο, με την συνεπακόλουθη κρυσταλλοποίηση των στερεών του θειώδους ασβεστίου:



### Πλεονεκτήματα:

- Είναι πιο αποδοτική και αξιόπιστη από την διεργασία απογύμνωσης με πυκνό αιώρημα οξειδίου του ασβεστίου / ασβεστόλιθου και αντιμετωπίζει ελάχιστα προβλήματα επικάθισης και διάβρωσης.

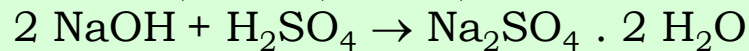
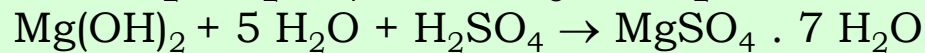
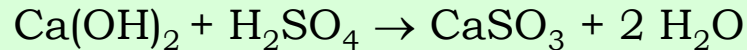
### Μειονεκτήματα:

- Το σύστημα διαχωρισμού υγρού / στερεού είναι σύνθετο και οδηγεί σε απώλειες νατρίου το οποίο πρέπει να αντικατασταθεί

Η τεχνολογία αυτή έχει εφαρμοσθεί σε μονάδες <600MW με υψηλό επίπεδο διαθεσιμότητας, αλλά δεν είναι τόσο διαδεδομένη όσο η διεργασία απογύμνωσης με CaO/ασβεστόλιθο, πιθανόν λόγω των επιπλέον δαπανών που συνεπάγεται.

## Η Διεργασία Αλκαλίων Τέφρας

- αποδοτικός τρόπος χρησιμοποίησης των αλκαλίων της ιπτάμενης τέφρας με στόχο την απομάκρυνση του SO<sub>2</sub> από το απαέριο.
- το απαέριο περνά από πλυντήρδα Venturi, όπου η ιπτάμενη τέφρα απομακρύνεται και το αλκαλικό περιεχόμενο εκχυλίζεται. Το SO<sub>2</sub> απορροφάται στο υγρό ανακύκλωσης και οξειδώνεται προς H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, το οποίο με την σειρά του αντιδρά με τις ενυδατωμένες αλκαλικές ουσίες, σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:



### Πλεονεκτήματα:

- είναι πολύ απλή και απαιτεί μικρότερες επιφάνειες διάθεσης αποβλήτων & οι ιδιότητες καθίζησης της λάσπης είναι άριστες.

### Μειονεκτήματα:

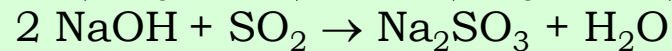
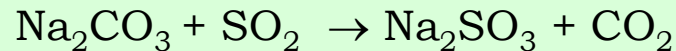
- προβλήματα από επικαθίσεις και χαμηλή αποδοτικότητα (70-80%): ↑ συγκέντρωσης Na ή Mg στο υγρό πλυντήρδας → ↑ αποδοτικότητας

Η χρησιμότητα της διεργασίας εξαρτάται κυρίως από την αναλογία του CaO και άλλων αλκαλικών υλικών στην τέφρα, ως προς το S. Οι συνθήκες λειτουργίας αναλογία αερίου/υγρό και pH επιδρούν στην αποδοτικότητα της διεργασίας. Όσο αυτή η αναλογία ↑, το pH ↓ → διαλυτοποίηση των συστατικών της αλκαλικής ιπτάμενης τέφρας, αλλά και αύξηση κόστους διεργασίας.



## Η Διεργασία Υδατικού Νατρίου

- η περισσότερο διαδεδομένη διεργασία για αποθείωση απαερίων στην βιομηχανία
- τα θερμά απαέρια περνούν μέσω ενός συλλέκτη σκόνης, για την απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους της ιπτάμενης τέφρας και στην συνέχεια μέσω μίας πλυντήρας αερίων Venturi έρχονται σε επαφή με NaOH. Εκεί, μέρος του SO<sub>2</sub> απομακρύνεται, σύμφωνα με τις αντιδράσεις, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται σε έναν πύργο με διάτρητο δίσκο.



### Πλεονεκτήματα:

- είναι εξαιρετικά απλή, επιτυγχάνει αποδοτικότητα απομάκρυνσης μέχρι και 99%, απαιτεί χαμηλή αναλογία υγρού/αέριο, μπορεί να ανεχθεί μεταβολές στην τροφοδοσία SO<sub>2</sub> και ιπτάμενης τέφρας στο σύστημα και έχει ελάχιστα προβλήματα επικαθίσεων

### Μειονεκτήματα:

- το ανθρακικό νάτριο και το υδροξείδιο του νατρίου είναι δαπανηρά, τα διαλυτά άλατα νατρίου απαιτούν απόρριψη, ενώ απαιτείται και επαναθέρμανση του απαερίου



## II. Ξηρές Διεργασίες

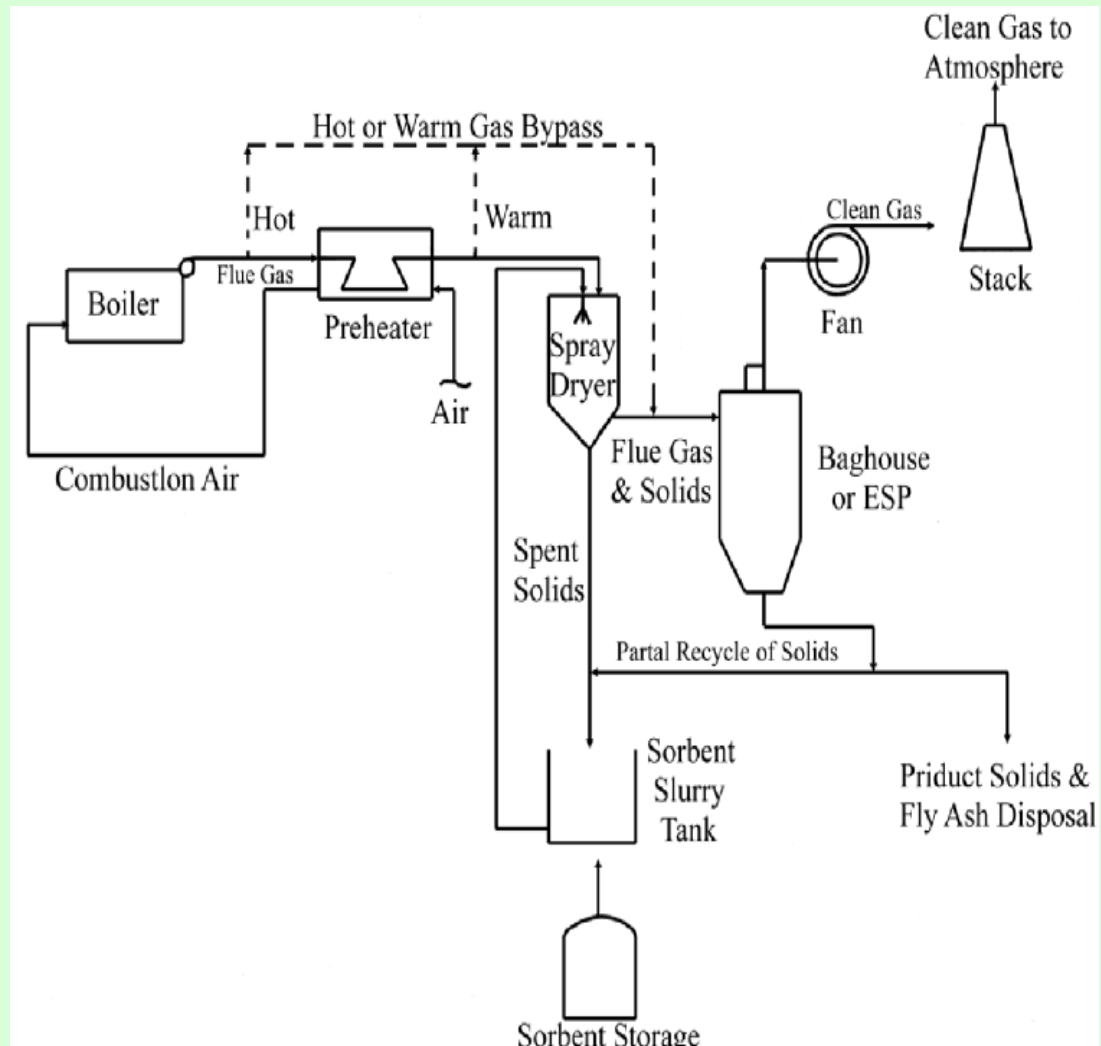
- κατάλληλες ειδικά για περιοχές όπου οι υδάτινοι πόροι είναι ανεπαρκείς και επικρατούν γαιάνθρακες χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο-->μπορούν να απομακρύνουν το SO<sub>2</sub> σε ποσοστό 70-90% μόνο. Αναγκαστικά, λοιπόν, ολοκληρώνονται με απομάκρυνση της σωματιδιακής ύλης και είναι περισσότερο ελκυστικές σε συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν υφασμάτινα φίλτρα.

### Πλεονεκτήματα των ξηρών έναντι των υγρών διεργασιών είναι:

- αντιμετωπίζουν ελάχιστα προβλήματα διάβρωσης, αποσάθρωσης και επικαθίσεων άρα ↓ κόστους εξοπλισμού, απαιτούν μόνο το 25-50% της ενέργειας
- δεν απαιτείται επαναθέρμανση των αερίων, καταναλώνουν πολύ λιγότερο ύδωρ, μειώνουν τον όγκο των αερίων στον συλλέκτη σωματιδιακής μάζας και την ειδική αντίσταση της τέφρας→ βελτίωση λειτουργίας συλλέκτη. Απαιτούν λιγότερες ανθρωπόωρες εργασίας για να λειτουργήσουν και παράγουν ένα υλικό ξηρής ιλύος για απόθεση

## Η Διεργασία Οξειδίου του Ασβεστίου

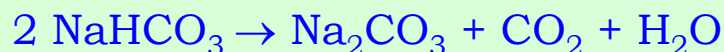
- η χημεία της διεργασίας CaO είναι ουσιαστικά η ίδια με αυτήν της υγρής διεργασίας.
- πυκνό αιώρημα CaO τροφοδοτείται με αντλία σε ένα θάλαμο ξήρασης--> χρησιμοποιώντας περιστροφικούς δίσκους υψηλής ταχύτητας, ή ακροφύσια ψεκασμού υψηλής πίεσης, σταγονοποιείται. Το SO<sub>2</sub> των απαερίων απορροφάται στα σταγονίδια του ύδατος και αντιδρά με το CaO. Τα ξηρά στερεά και η ιπτάμενη τέφρα απομακρύνονται στην συνέχεια με ένα υφασμάτινο φίλτρο, ή με μία ηλεκτροστατική συσκευή καθίζησης.
- χρησιμοποιείται περίσσεια CaO σε ποσοστά 20-100%. Ελέγχοντας την υγρασία των απαερίων και τον τύπο ψεκασμού του προσροφητή--> απομάκρυνση του SO<sub>2</sub> κατά 50-70%. Η χρήση εκλεκτικών προσθετικών, όπως το αδιπικό οξύ, βελτιώνει την απομάκρυνση μέχρι ~90%



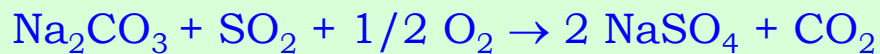
Σχήμα 6.9 Ξηρή/Υγρή απογύμνωση αερίων

## Η Διεργασία Νατρίου

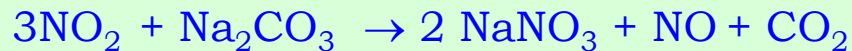
- Οι ενώσεις του Na που χρησιμοποιούνται είναι: το διανθρακικό νάτριο ( $\text{NaHCO}_3$ ), τα ένυδρο ανθρακικό νάτριο ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), το ανθρακικό νάτριο τέφρας ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), η τρόνα ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) και ο νακολίτης (φυσικώς απαντούμενη μορφή του  $\text{NaHCO}_3$ ).
- Η πλέον ελπιδοφόρα ένωση είναι ο νακολίτης → υψηλή αποδοτικότητα στην απομάκρυνση του  $\text{SO}_2$ . Στους  $270^\circ\text{C}$  αποσυντίθεται σύμφωνα με την αντίδραση:



Το  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  τέφρας, που προκύπτει, αντιδρά με το  $\text{SO}_2$  του απαερίου:



Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα από την χρήση αυτής της ένωσης είναι ότι απορροφά το  $\text{NO}_2$  σχετικά καλά, μέσω της αντίδρασης:

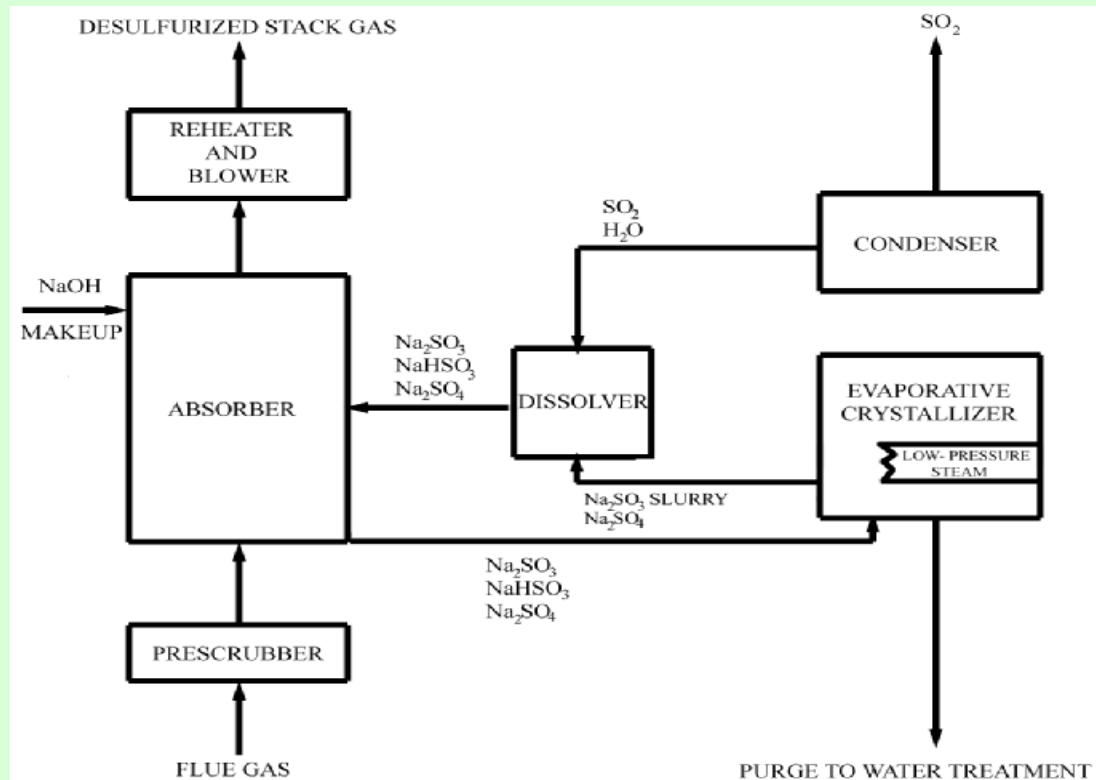


## 6.3.2 Αναγεννήσιμες Διεργασίες

### I. Υγρές Διεργασίες

#### Η Διεργασία Wellman-Lord

- το  $\text{SO}_2$  απορροφάται σε πυκνό διάλυμα  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ :  $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow 2 \text{NaHSO}_3$
- τα στερεά  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  επαναδιαλύονται & ανακυκλώνονται στην συσκευή απορρόφησης, ενώ το  $\text{SO}_2$  μετατρέπεται σε S υψηλής ποιότητας,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ή υγρό  $\text{SO}_2$
- συνήθως το απαέριο υφίσταται κατεργασία σε μία πλυντήρα αερίων για την απομάκρυνση της σωματιδιακής ύλης ή του  $\text{SO}_3$ . Στην συσκευή αυτή, η οιαδήποτε ποσότητα  $\text{O}_2$  στο απαέριο αντιδρά σύμφωνα με την αντίδραση:  $\text{Na}_2\text{SO}_3 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NaHSO}_4$
- οι δαπάνες κεφαλαίου και οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι υψηλές και τα χημικά συστήματα τα οποία εμπλέκονται είναι σύνθετα. Δεν εφαρμόζεται σε μεγάλη έκταση σε μονάδες γαιάνθρακα.

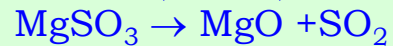
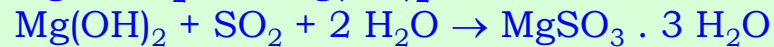
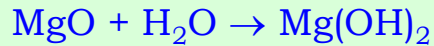


**Σχήμα 6.11**

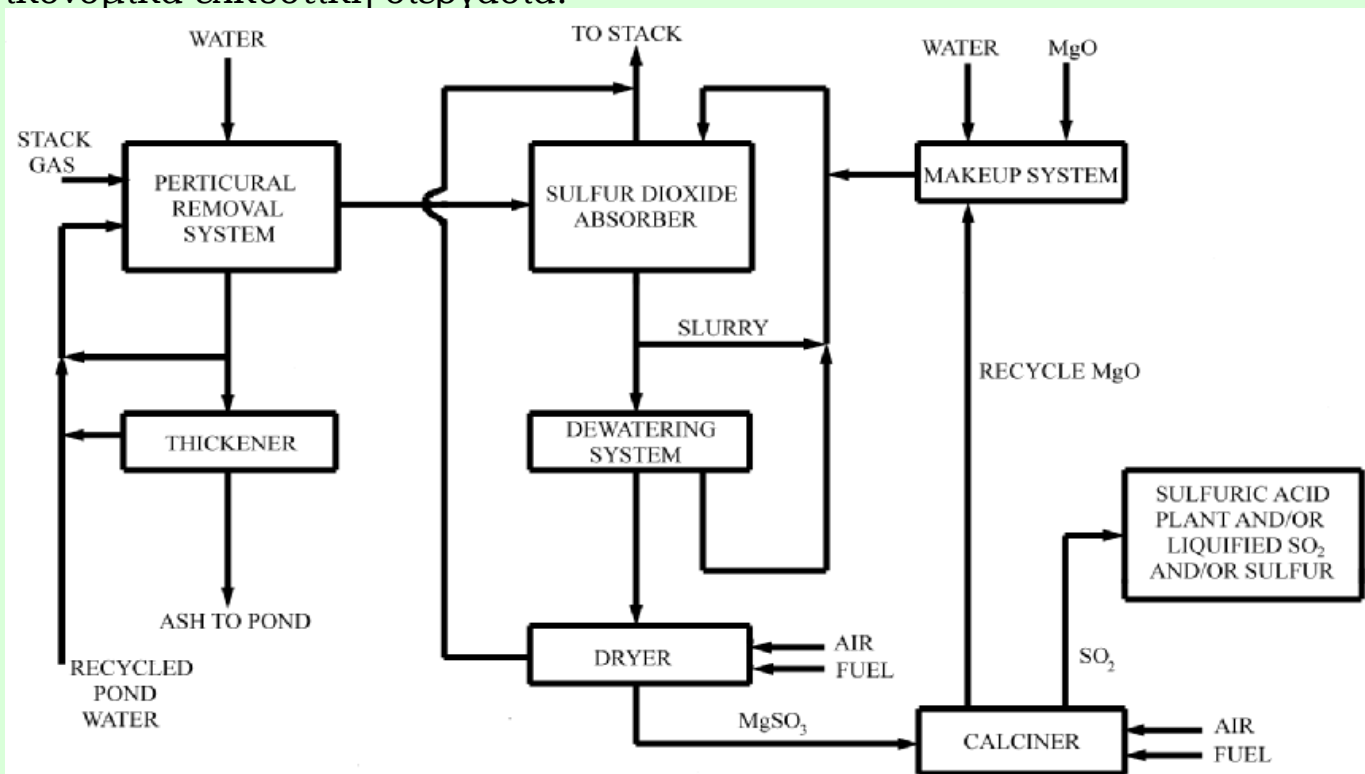
Διεργασία Wellman-Lord

## Η Διεργασία Οξειδίου του Μαγνησίου

- το SO<sub>2</sub> του απαερίου (ελεύθερου σωματιδιακής ύλης) απορροφάται σε ένα πυκνό αιώρημα MgO, σε πλυντήρα αερίων Venturi. Τα στερεά MgSO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O ή MgSO<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O διαχωρίζονται σε φυγόκεντρο και ξηραίνονται. Το MgSO<sub>3</sub> → αναγέννηση προς MgO και SO<sub>2</sub> στους 815-1095°C, με θέρμανση σε περιστροφικό κλίβανο, ή ρευστοστερεά κλίνη. Οι βασικές αντιδράσεις:



- αποδοτικότητα απομάκρυνσης του SO<sub>2</sub>: 90%-99.5%. Μικρή τάση συστήματος για επικαθίσεις. Οικονομικά ελκυστική διεργασία.



Σχήμα 6.12 Διεργασία απογύμνωσης οξειδίου του μαγνησίου

## II. Ξηρές Διεργασίες

### ➤ Διεργασία Ενεργού Άνθρακα

Από τις κυρίαρχες ξηρές διεργασίες. Ο ενεργός C προσροφά  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$  και υγρασία από τα απαέρια και καταλύει την αντίδρασή τους, σχηματίζοντας  $\text{H}_2\text{SO}_4$  στους πόρους του C. Μία σημαντική ποσότητα  $\text{NO}_x$  απορροφάται επίσης. Όταν ο ενεργός C κορεσθεί, θερμαίνεται στους  $650^\circ\text{C}$  σε αδρανή ατμόσφαιρα, όπου ανάγεται το  $\text{H}_2\text{SO}_4$  σε  $\text{SO}_2$ . Το  $\text{SO}_2$  που εκλύεται είναι κατάλληλο για μετατροπή σε στοιχειακό S.

Η διεργασία έχει δοκιμασθεί σε μεγάλη έκταση και έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να αφαιρεθούν ποσοστά μέχρι 80% των  $\text{NO}_x$  και 90% του  $\text{SO}_2$ . Σύνθετη διάταξη, υψηλές λειτουργικές δαπάνες.

### ➤ Η Διεργασία Απορρόφησης Οξειδίου του Χαλκού

Το  $\text{CuO}$  απορροφά σε υψηλή θερμοκρασία το  $\text{SO}_2$  και μετατρέπεται σε  $\text{CuSO}_4$ . Το  $\text{CuSO}_4$  αντιδρά με  $\text{H}_2$  για την έκλυση  $\text{SO}_2$ . Η συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου στο αναγεννημένο απαέριο αυξάνεται με την απομάκρυνση του ύδατος και των ακαθαρσιών, σε ένα σύστημα απορρόφησης / απογύμνωσης. Το πυκνό διοξείδιο του θείου, στην συνέχεια, μετατρέπεται είτε σε στοιχειακό θείο, είτε σε θειϊκό οξύ.

Η διεργασία έχει εφαρμοσθεί σε σχετικά μικρές μονάδες. **Πλεονέκτημα:** μπορεί να προσαρμοσθεί για απομάκρυνση  $\text{NO}_x$ . **Μειονέκτημα:** μεγάλες και σύνθετες συσκευές και το υδρογόνο που απαιτείται για την αντίδραση με τον θειϊκό χαλκό είναι δαπανηρό.

## 6.3.3 Οικονομικές Θεωρήσεις

- Η σύγκριση των οικονομικών στοιχείων των διεργασιών απομάκρυνσης SO<sub>2</sub> είναι πολύπλοκη
- Το σχετικά χαμηλό κόστος λειτουργίας των υγρών πλυντηρίδων αερίων & η υψηλή αποδοτικότητα απομάκρυνσης του S, καθιστά το συνολικό κόστος απομάκρυνσης < από ότι στις διεργασίες έγχυσης προσροφητών
- Οι ενεργειακές απαιτήσεις των διεργασιών αποθείωσης απαερίων είναι 1-4% της δυναμικότητας παραγωγής ενέργειας της θερμοηλεκτρικής μονάδας
- Το προστιθέμενο κόστος αυτών των διεργασιών, εξαρτάται από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, την ποσότητα S στον γαιάνθρακα, την μέθοδο απόθεσης αποβλήτων και το όφελος από την παραγωγή S ή άλλων υπο-προϊόντων
- Επένδυση κεφαλαίου 20-30%

**Πίνακας 6.7 Σύγκριση οικονομικών στοιχείων διεργασιών FGD**

	Κεφαλαιουχική Δαπάνη σε Σταθερές Μέσες Τιμές 1979, \$/kW	Απαιτήσεις Εσόδων Πρώτου Ετους Λειτουργίας σε Σταθερές Μέσες Τιμές 1980, mills/kwh
Διεργασίες που παράγουν απόβλητα		
Ασβεστόλιθος	98	4.02
Οξείδιο του ασβεστίου	90	4.25
Δύο Αλκαλίων	101	4.19
Διεργασίες που παράγουν θειϊκό οξύ		
Οξειδίου του Μαγνησίου	132	5.08
Wellman-Lord/ Θειϊκό Οξύ	131	5.11
Διεργασίες που παράγουν θείο		
ACP	119	4.81
Wellman-Lord/Resox	138	6.03
Wellman-Lord/Allied	141	5.94
Κιτρικών	143	6.44



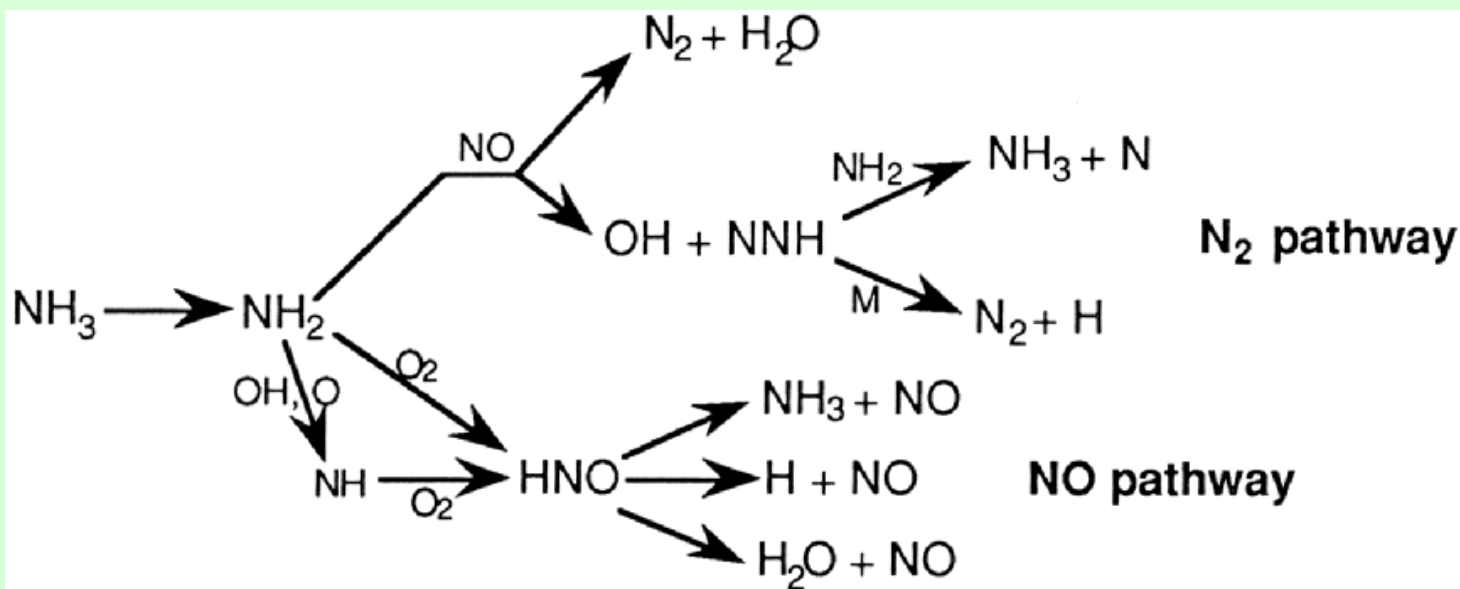
## 6.4 Τεχνολογίες Καθαρισμού Οξειδίων του Αζώτου

- Τα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) προέρχονται κυρίως από 3 πηγές:
  - (1) οξείδωση του μοριακού N στον αέρα της καύσης σε υψηλές θερμοκρασίες (θερμικά παραγόμενα  $\text{NO}_x$ )
  - (2) οξείδωση του N το οποίο είναι χημικά δεσμευμένο στον γαιάνθρακα ( $\text{NO}_x$  καυσίμου) και
  - (3) προσβολή του μοριακού N από ελεύθερες ρίζες υδρογονανθράκων παράγοντας έτσι προδρόμους των  $\text{NO}_x$  (άμεσου σχηματισμού  $\text{NO}_x$ )
- Το N στον γαιάνθρακα (1-2% κβ.) είναι υπεύθυνο για το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών  $\text{NO}_x$  (μέχρι και το 80%, ανάλογα με τις συνθήκες καύσης)
- $\text{NO}_x$ : τοξικά, επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον (όξινη βροχή, φωτοχημική αιθαλομίχλη). Όρια εκπομπών: 0.6lb/10<sup>6</sup>Btu (272ng/MJ) για ασφαλτούχους και 0.5lb/10<sup>6</sup>Btu (227ng/MJ) για γαιάνθρακες χαμηλής τάξης
- Οι κύριες διεργασίες κατεργασίας απαερίων για τον έλεγχο εκπομπών  $\text{NO}_x$  από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς είναι:
  - (1) Εκλεκτική Μη- Καταλυτική Αναγωγή (Selective Non-Catalytic Reduction, SNR)
  - (2) Εκλεκτική Καταλυτική Αναγωγή (Selective Catalytic Reduction, SCR)
  - (3) Υγρή Απογύμνωση (Wet Scrubbing).

## 6.4.1 Διεργασίες Εκλεκτικής Μη Καταλυτικής Αναγωγής SNR

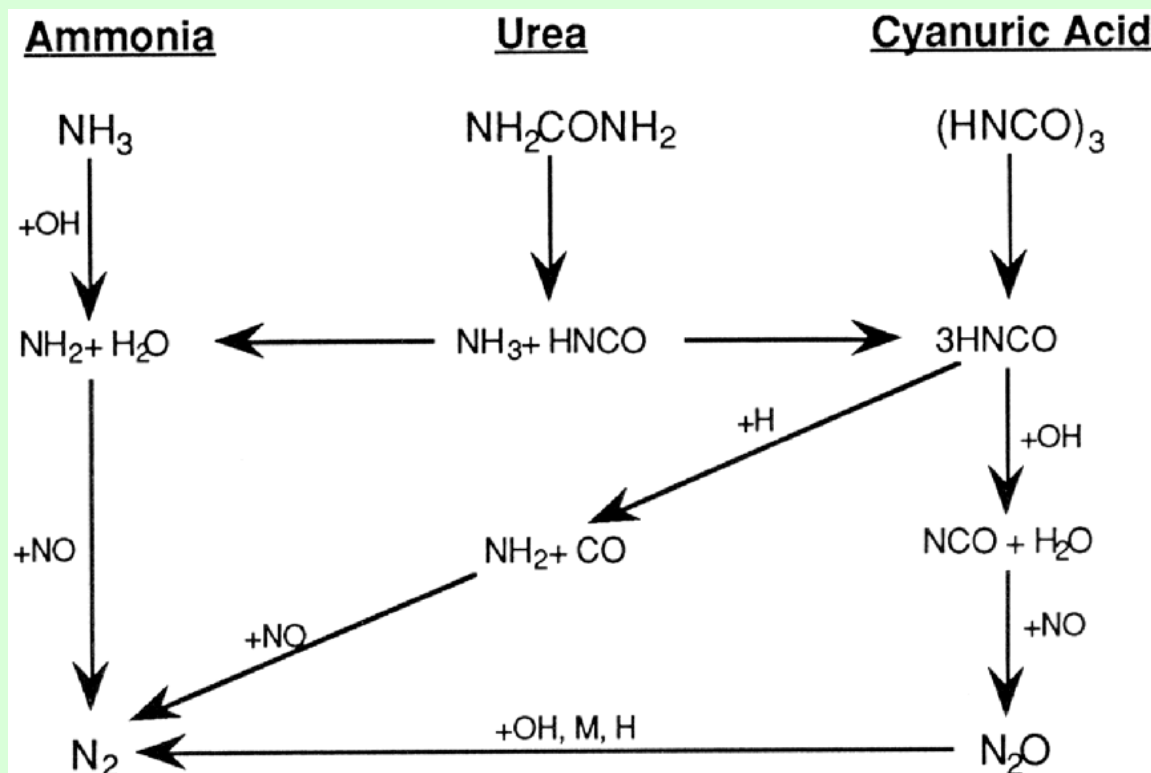
### I. Διεργασία Έγχυσης Αμμωνίας

- Η βέλτιστη θερμοκρασία για εκλεκτική αναγωγή των  $\text{NO}_x$  είναι μεταξύ 1500-1100°C. Σε μεγάλους λέβητες, η βέλτιστη θερμοκρασία απαντάται στο τμήμα του υπερθερμαντήρα. Η  $\text{NH}_3$  συνήθως εγχύεται μέσω πολλαπλών ακροφυσίων, ανάμεσα στους σωλήνες του υπερθερμαντήρα. Υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία παράγει επιπρόσθετα  $\text{NO}_x$ , ιδιαίτερα χαμηλή θερμοκρασία επιτρέπει διαφυγή  $\text{NH}_3$
- Ο βαθμός μετατροπής των  $\text{NO}_x$  επηρεάζεται από την μοριακή αναλογία  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  & από την περιεκτικότητα σε υγρασία των αερίων. Για  $\text{NH}_3/\text{NO}_x = 1$  η μέγιστη μετατροπή είναι 50-60%. Εάν  $\text{NH}_3/\text{NO}_x = 2$ , η μετατροπή αυξάνεται σε 80-90%, αλλά αυξάνεται και η ποσότητα της υπολειμματικής  $\text{NH}_3$

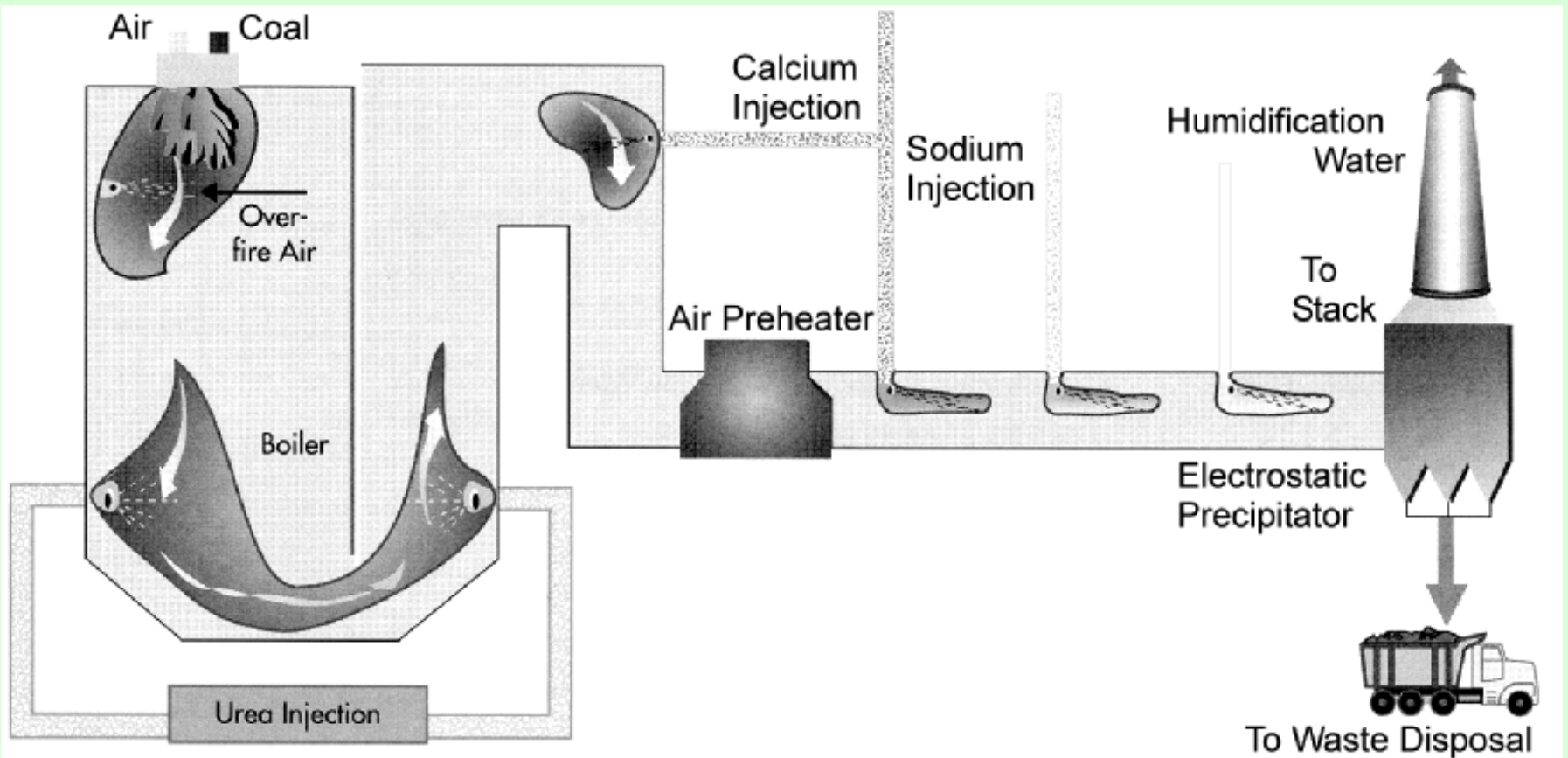


## II. Διεργασία Έγχυσης Κυανουρικού Οξέος και Ουρίας

- Όταν χρησιμοποιείται κυανουρικό οξύ, αποσυντίθεται γρήγορα και σχηματίζει ισοκυανικό οξύ (HN(O)), το οποίο σε υψηλότερες θερμοκρασίες σχηματίζει NH, NH<sub>2</sub> και N<sub>2</sub>O. Η βέλτιστη θερμοκρασία είναι μεταξύ 730-930°C.
- Όταν χρησιμοποιείται ουρία αποσυντίθεται σε αμμωνία και ισοκυανικό οξύ και στην συνέχεια, ακολουθείται η διαδρομή αντιδράσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.15. Ένα σύστημα έγχυσης ουρίας είναι σε θέση να απομακρύνει το 40-50% των σχηματιζόμενων NO<sub>x</sub> από την διεργασία καύσης.



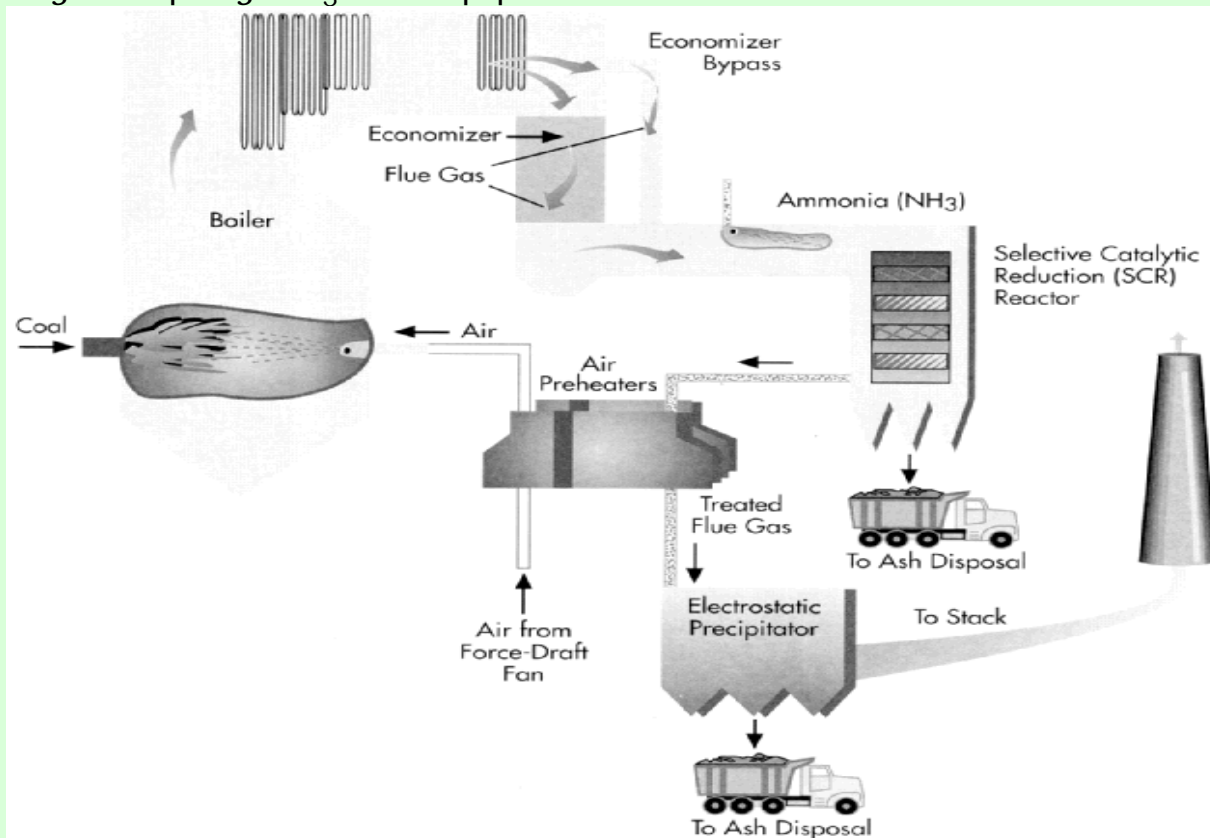
**Σχήμα 6.15** Κύριες διαδρομές για SCR των NO<sub>x</sub> με χημικά αναγωγικά που εγχύονται στα απαέρια



**Σχήμα 6.16** Διάγραμμα ροής του συστήματος SNCR ουρίας του θερμοηλεκτρικού σταθμού Ararathoe στο Denver

## 6.4.2 Εκλεκτική Διεργασία Καταλυτικής Αναγωγής (SCR)

- Η πιο αποτελεσματική τεχνολογία απομάκρυνσης  $\text{NO}_x$  (αποδοτικότητα > 80%)
- Εγχύεται  $\text{NH}_3$  στο απαέριο το οποίο περνά μέσω μίας κλίνης καταλύτη, όπου  $\text{NO}_x$  και  $\text{NH}_3$  αντιδρούν για να σχηματίσουν αβλαβές άζωτο και υδρατμούς. Η διεργασία διεξάγεται μεταξύ του λέβητα και των συσκευών απομάκρυνσης του διοξειδίου του θείου και της σωματιδιακής ύλης.
- Επίπεδα αναγωγής  $\text{NO}_x \sim 80\%$ . Η αποδοτικότητα αναγωγής των  $\text{NO}_x$  είναι ευθέως ανάλογη με την αναλογία  $\text{NH}_3:\text{NO}_x$ , αλλά μεγαλύτερη ποσότητα της  $\text{NH}_3$  δεν πρέπει να χρησιμοποιείται γιατί αυξάνει τις εκπομπές  $\text{NH}_3$  στο περιβάλλον.

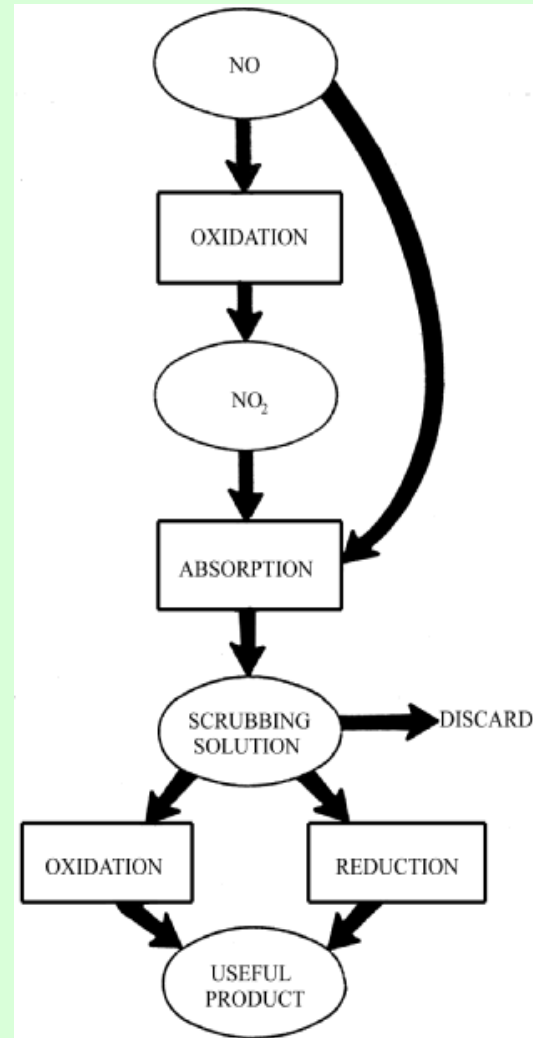


**Σχήμα 6.17** Διάγραμμα ροής τυπικής εγκατάστασης της διεργασίας SCR σε θερμοηλεκτρική μονάδα γαιάνθρακα

- Οι βασικοί τύποι καταλυτών είναι ευγενή μέταλλα (Pt, Id, Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), οξειδία μετάλλων (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/MoO<sub>3</sub>/WO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) και ζεόλιθοι (συνθετικοί μορντενίτες). Το πεντοξείδιο του βαναδίου είναι από τους καλύτερους καταλύτες. Οι φορείς τιτάνιας είναι ανθεκτικοί στο SO<sub>3</sub>
- Εμπορικές μορφές καταλύτη: 2 βασικά γεωμετρικά σχήματα, πλάκας και πλέγματος κυψέλης. Το τελευταίο επιτρέπει μεγαλύτερες γραμμικές ταχύτητες και χρήση μικρότερου αντιδραστήρα
- Κάθε καταλύτης παρουσιάζει μία συγκεκριμένη βέλτιστη T, μεταξύ 230–430°K. Σε χαμηλότερες T η αποδοτικότητα της αντίδρασης ↓ ενώ σε υψηλότερες T ο καταλύτης έχει προδιάθεση πυροσυσσωμάτωσης.
- Οι περισσότεροι απενεργοποιούνται από κάποιες ενώσεις που υπάρχουν σε μερικούς γαιάνθρακες, όπως τα οξειδία αλκαλίων, τα οξειδία αλκαλικών γαιών και τα SO<sub>x</sub>. SO<sub>3</sub> και NH<sub>3</sub> μπορεί να σχηματίσουν υγρά θειϊκά άλατα που προκαλούν διάβρωση. Η παρουσία ιπτάμενης τέφρας προκαλεί επικαθίσεις.
- Παρά τα προβλήματα διάρκειας ζωής και κόστους καταλύτη, η διεργασία SCR παραμένει η πιο προηγμένη διαθέσιμη διεργασία για αναγωγή NO<sub>x</sub>.
- Έχει εφαρμοσθεί σε εμπορικό επίπεδο σε Ιαπωνία, Γερμανία και ΗΠΑ. >200 μονάδες SNR λειτουργούν σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς γαιάνθρακα, με συνολική δυναμικότητα > 65GWe.
- Εξελίσσονται δοκιμές για την ανάπτυξη καταλυτών οι οποίοι θα είναι οικονομικότεροι και θα διαρκούν περισσότερο

## 6.4.3 Υγρές Διεργασίες Απογύμνωσης Αερίων

- **Στόχος:** απομάκρυνση  $\text{NO}_x$  --  
-> απορρόφηση του  $\text{NO}$  στο διάλυμα απογύμνωσης, επειδή αυτό είναι ουσιαστικά μη υδατοδιαλυτό
- **Αποδοτικότητες απομάκρυνσης** μέχρι και 90%. Μειονεκτήματα όταν εφαρμόζονται σε μεγάλες θερμοηλεκτρικές μονάδες: η υδάτινη φύση των διεργασιών  $\downarrow$  την  $T$  απαερίων στο αδιαβατικό σημείο κορεσμού, με αποτέλεσμα την σημαντική κατανάλωση ύδατος. Συνήθως το  $\text{SO}_2$  δηλητηριάζει το διάλυμα απογύμνωσης, ενώ οι ρυθμοί αντικατάστασης του προσροφητή και οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι υψηλές.



**Σχήμα 6.18** Διεργασίες που χρησιμοποιούνται σε υγρά συστήματα απογύμνωσης  $\text{NO}_x$

## 6.4.4 Οικονομικές Θεωρήσεις

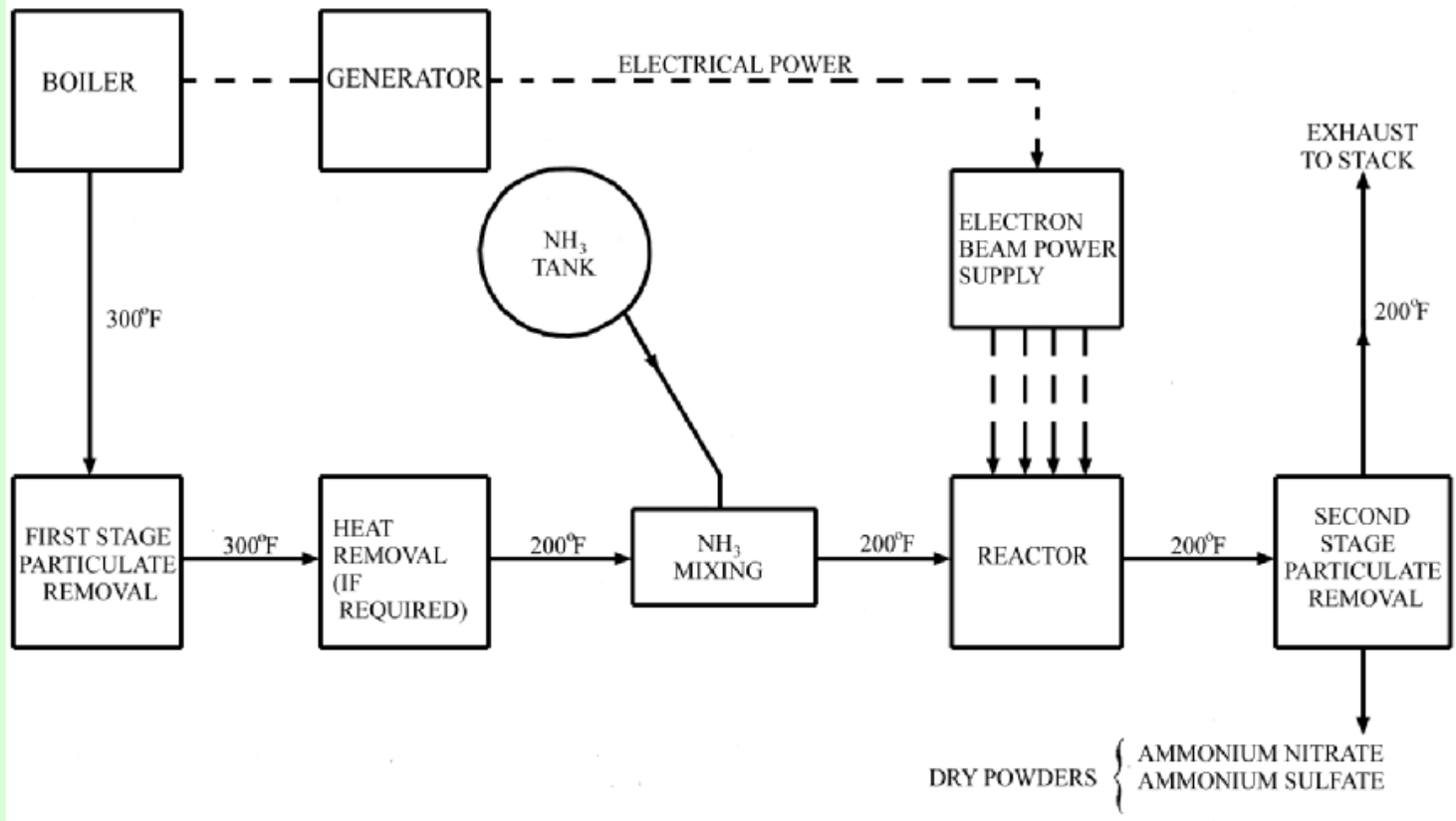
- Το κόστος των τεχνολογιών ελέγχου  $\text{NO}_x$  εξαρτάται από το ειδικό καύσιμο, τον σχεδιασμό του λέβητα κ.α.
- Είναι δύσκολο να γίνει οικονομική σύγκριση με ακρίβεια για την επιλογή της πιο αποτελεσματικής επιλογής για μεγάλες εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής.
- Οι τεχνολογίες καθαρισμού μετά την καύση είναι περισσότερο δαπανηρές από τις μεθόδους τροποποίησης των διεργασιών καύσης. Έτσι, η κατεργασία των απαερίων, για απομάκρυνση των  $\text{NO}_x$ , χρησιμοποιείται μόνο όταν τα περιβαλλοντικά πρότυπα δεν ικανοποιούνται
- Η διεργασία εκλεκτικής, μη καταλυτικής αναγωγής είναι πιθανόν η οικονομικότερη, αλλά δεν απομακρύνει ποσοστό μεγαλύτερο από το 60% των  $\text{NO}_x$
- Η εκλεκτική καταλυτική αναγωγή και οι υγρές διεργασίες απογύμνωσης αερίων, αν και πολύ αποτελεσματικές, είναι ιδιαίτερα δαπανηρές. Γίνονται οικονομικά αποδεκτές, μόνο σε συνδυασμό με την απογύμνωση του  $\text{SO}_2$
- Στα υγρά συστήματα, αν χρησιμοποιηθεί ένα οξειδωτικό μέσο, το κόστος παραγωγής του είναι υψηλό. Αν χρησιμοποιηθεί άμεση απορρόφηση των  $\text{NO}_x$ , η δαπάνη του οξειδωτικού εξαλείφεται, αλλά απαιτείται μία πολύ μεγαλύτερη πλυντήρδα και υψηλότερη πτώση πίεσης
- Πρόσφατες βελτιώσεις στην ανάπτυξη καταλυτών έχουν καταστήσει την εκλεκτική καταλυτική αναγωγή την βέλτιστη διαθέσιμη τεχνολογία καθαρισμού  $\text{NO}_x$ .



# 6.5 Συνδυασμένες Τεχνολογίες Καθαρισμού SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>

## 6.5.1 Βασικές Υγρές και Ξηρές Διεργασίες

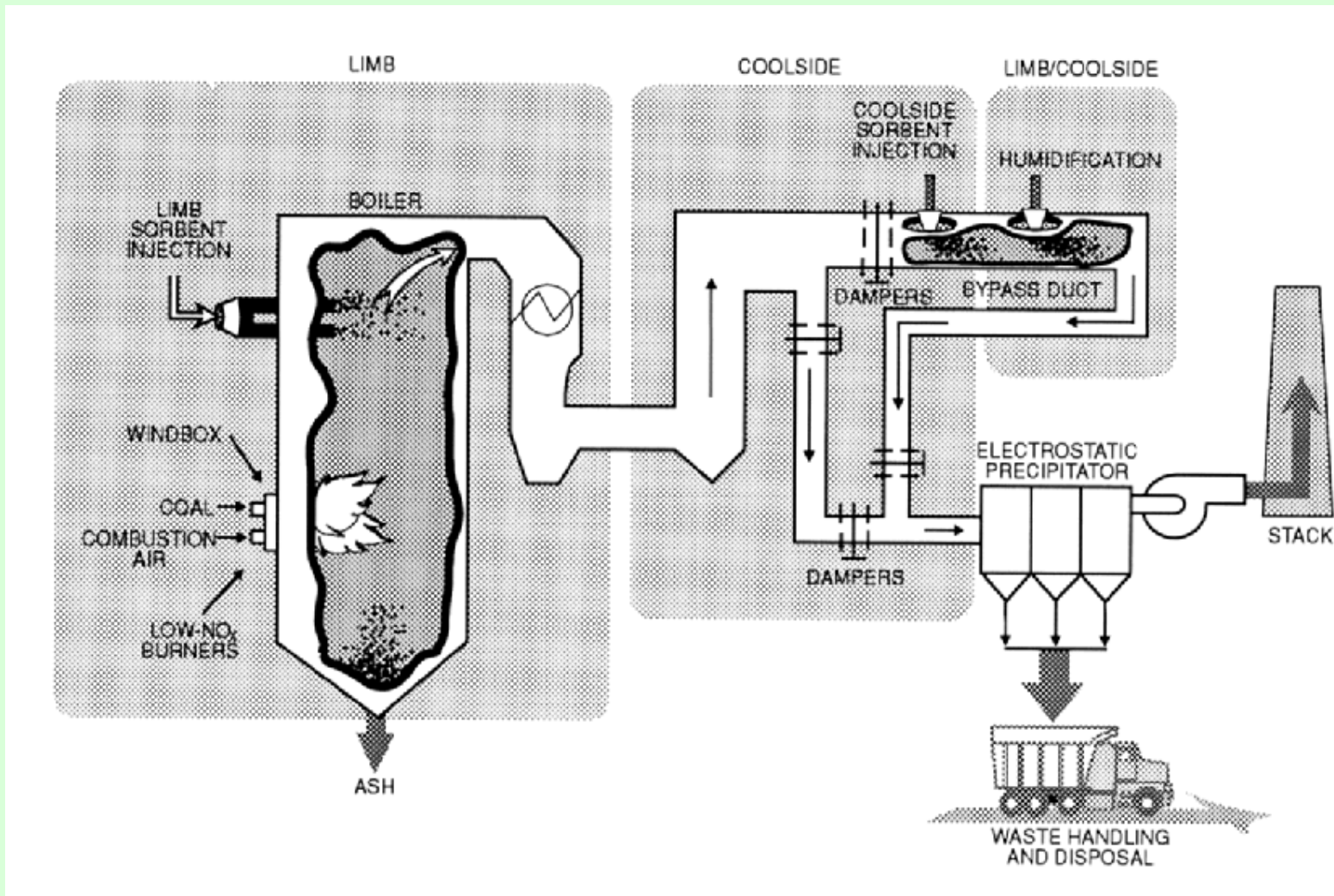
- Έχουν προταθεί πολλές συνδυασμένες διεργασίες αποθείωσης και απονίτρωσης για τον καθαρισμό των απαερίων της καύσης--> όμως είναι δαπανηρές & χρησιμοποιούνται μόνο όταν τα περιβαλλοντικά πρότυπα είναι αυστηρότερα.
- Υγρές: απορρόφηση με συμπλοκοποίηση και χημικές αντιδράσεις οξείδωσης ή αναγωγής. Ξηρές: ξήρανση με ψεκασμό, απορρόφηση σε κλίνες ενεργού άνθρακα, αποσύνθεση του καταλύτη και ακτινοβολία με δέσμη ηλεκτρονίων.
- Διεργασίες οξείδωσης και αναγωγής: αποδοτικότητες απομάκρυνσης SO<sub>2</sub> ≤98% και των NO<sub>x</sub> ≤80%. Μειονέκτημα διεργασιών οξείδωσης το υψηλό κόστος του μέσου οξείδωσης, ενώ των διεργασιών αναγωγής: η υψηλή αναλογία υγρού/αέριο και η μεγάλη πλυντήρα αερίων που απαιτείται για την απορρόφηση
- Διεργασία ενεργού άνθρακα: αποδοτικότητες απομάκρυνσης SO<sub>2</sub> ≤90% και NO<sub>x</sub> ≤80%. Πλεονέκτημα: η αποφυγή αναθέρμανσης των απαερίων. Μειονέκτημα: η διάταξη είναι σύνθετη και οι λειτουργικές δαπάνες υψηλές. Η μεγαλύτερη μονάδα που λειτουργεί εμπορικά έχει δυναμικότητα 350MWe
- Διεργασία απορρόφησης διοξειδίου το χαλκού: σύστημα εκλεκτικής καταλυτικής αναγωγής, όπου ο καταλύτης δημιουργείται μέσω της αντίδρασης Cu με το SO<sub>2</sub> του απαερίου. Αν χρησιμοποιηθεί μόνο για αναγωγή των NO<sub>x</sub>: ποσοστό απομάκρυνσης NO<sub>x</sub> ~85%, σε μία αναλογία NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub>=1. Για ταυτόχρονη αναγωγή NO<sub>x</sub> και SO<sub>2</sub>: η κλίση του καταλύτη δεν είναι ποτέ πλήρως θειωμένη και η αναγωγή των NO<sub>x</sub> διαφέρει ανάλογα με τον χρόνο. Η συνολική μέση αναγωγή SO<sub>2</sub> ~ 88%. Το μέσο ποσοστό αναγωγής NO<sub>x</sub> για αναλογία NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub><sup>41</sup>=1 είναι 65%



**Σχήμα 6.19** Διάγραμμα της διεργασίας δέσμης ηλεκτρονίων για απομάκρυνση  $\text{NO}_x/\text{SO}_x$

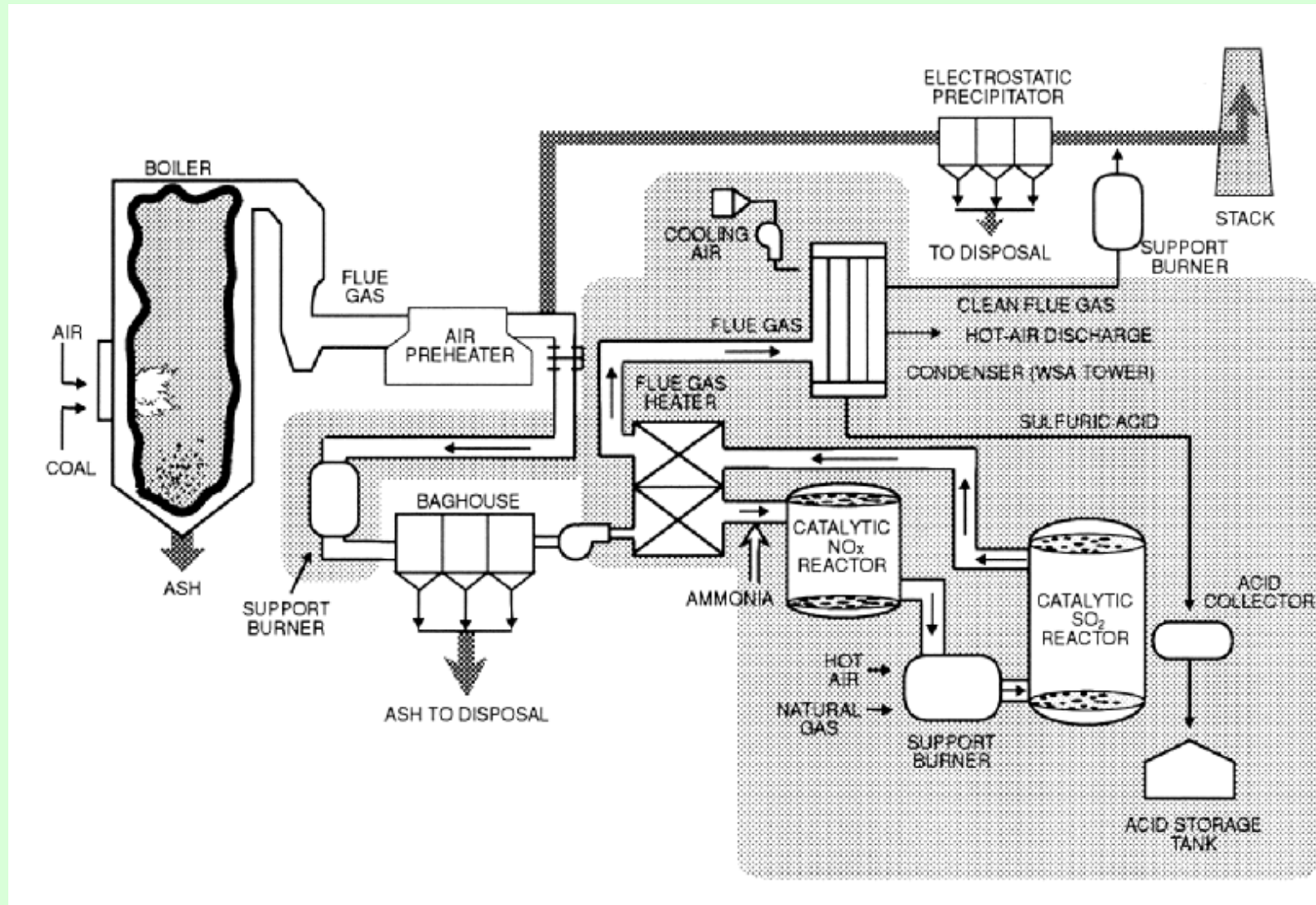
- οι χημικές αντιδράσεις βασίζονται πάνω στην αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με μοριακές ουσίες από τα απαέρια, δημιουργώντας ατομικό οξυγόνο, άζωτο και ρίζες αμινών. Με την παρουσία αμμωνίας και ύδατος, οι ρίζες οδηγούν προς την αναγωγή των  $\text{NO}_x$  και του  $\text{SO}_2$
- αποδοτικότητες απομάκρυνσης  $\text{SO}_2$  και  $\text{NO}_x \geq 99\%$ . Η κατεργασία απαερίου καύσης λιγνίτη, που περιέχει 4800ppm  $\text{SO}_2$ , 3200ppm  $\text{NO}$  και 22%  $\text{H}_2\text{O}$ , είχε αποδοτικότητες απομάκρυνσης  $\text{SO}_2$  και  $\text{NO}_x$  97% και 88% κ.β., στους 70°C, και 74% και 85% αντίστοιχα, στους 80°C, με δόση 10.3kGy, χωρίς διαφυγή  $\text{NH}_3$

## 6.5.2 Έργα Επίδειξης “Καθαρής Τεχνολογίας Γαιάνθρακα”



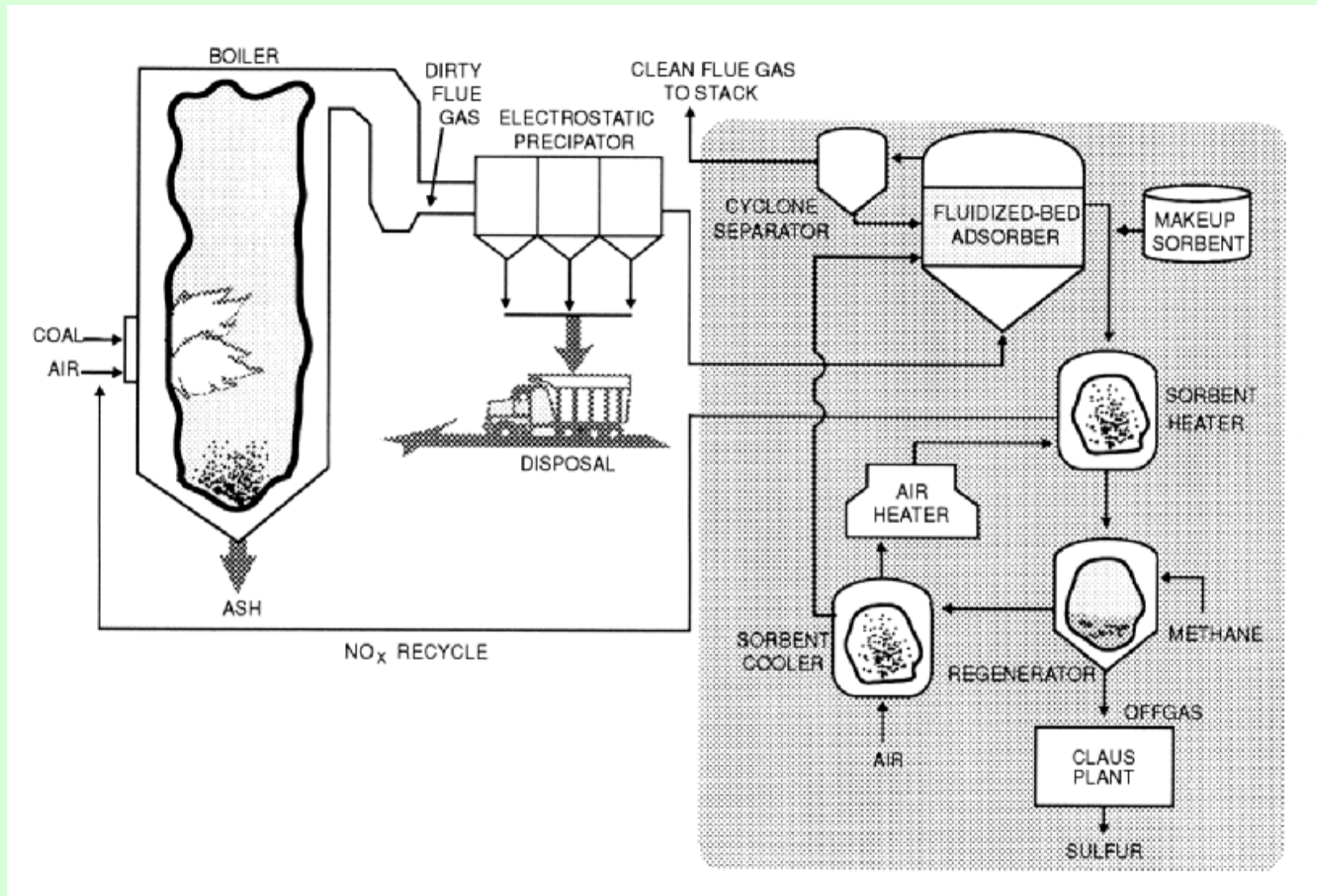
Σχήμα 6.20 Η Διαδικασία LIMB

## 6.5.2 Έργα Επίδειξης “Καθαρής Τεχνολογίας Γαιάνθρακα”



Σχήμα 6.21 Διεργασία καθαρισμού αερίων SNOX™

## 6.5.2 Έργα Επίδειξης “Καθαρής Τεχνολογίας Γαιάνθρακα”



Σχήμα 6.22 Αναγεννήσιμη διεργασία καθαρισμού απαερίων NO<sub>x</sub>SO<sub>2</sub>

# 6.6 Τεχνολογίες Καθαρισμού Άλλων Ενώσεων Ρυπαντών

- Το ακατέργαστο προϊόν της μετατροπής του γαιάνθρακα, πέρα από την σωματιδιακή ύλη, περιέχει διάφορους ρυπαντές όπως: βαρέα πολυκυκλικά και ετεροκυκλικά αρωματικά έλαια, HCl, NH<sub>3</sub>, HCN, H<sub>2</sub>S, COS, CS<sub>2</sub>, μερκαπτάνες και τοξικά ιχνοστοιχεία, όπως Be, As, Se, Cd, Hg και Pb: καρκινογόνες ενώσεις με επιπτώσεις μετάλλαξης και τερατογένεσης.
- Η συγκέντρωση αυτών των συστατικών στο απόβλητο αέριο διαφέρει ανάλογα με την σύνθεση του γαιάνθρακα και τον τύπο της διεργασίας που χρησιμοποιείται.
- **Αεριοποιητές σταθερής και ρευστοστερεάς κλίνης:** η T εξόδου είναι σχετικά χαμηλή & παράγουν πίσσης και χημικές ενώσεις οι οποίες καθιστούν την διεργασία καθαρισμού των ακατέργαστων αερίων πιο σύνθετη, ενώ το αντίθετο ισχύει για τους αεριοποιητές παράσυρσης.
- **Συστήματα υγροποίησης:** παράγουν υγρά πλούσια σε πολυπύρηνους αρωματικούς H/C και ιχνοστοιχεία.
- Αν το αέριο ψυχθεί πριν τον καθαρισμό του, η σωματιδιακή ύλη, οι πίσσης, το HCl, η NH<sub>3</sub>, το HCN, καθώς και οι ατμοί μετάλλων μπορούν να αφαιρεθούν και να ανακτηθούν από το ύδωρ ψύξης
- **Οι ενώσεις του S**, όπως το σουλφίδιο του καρβονυλίου, ο διθειούχος άνθρακας και μερκαπτάνες μπορούν να υδρολυθούν ή να υδρογονωθούν καταλυτικά: μετατροπή σε H<sub>2</sub>S και H/C →έλεγχος των εκπομπών με απομάκρυνση του H<sub>2</sub>S
- **H<sub>2</sub>S και CO<sub>2</sub>: όξινα αέρια** →πρέπει να υποστούν αναγωγή. Τυπικές προδιαγραφές για H<sub>2</sub>S και CO<sub>2</sub> στις διεργασίες αεριοποίησης είναι <2ppm και <500ppm, αντίστοιχα, ενώ στις διεργασίες υγροποίησης είναι <10ppm και <2500ppm, αντίστοιχα.

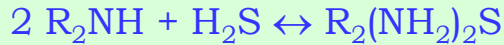
**Πίνακας 6.11** Ταξινόμηση διεργασιών απομάκρυνσης όξινων αερίων

Χημική Απορρόφηση			Φυσική Απορρόφηση	Φυσική/Χημική Απορρόφηση	
Αλκανολαμίνες MEA	Stretford (βαναδικό νάτριο με ADA)	Θερμό ανθρακικό κάλιο	Διαλύματα αλκαλικών αλάτων	Selexol (διμεθυλικός αιθέρας της γλυκόλης πολυαιθυλενίου)	Μοριακά κόσκινα Haines
SNPA:DEA (DEA)	Takahax (βαναδικό νάτριο with I-4 ναφθακινόνη, 2 σουλφονικό νάτριο)	Catacarb (βορικές αμίνες)	Υπερμαγγανικές	Rectisol (Μεθανόλη)	Σφουγγάρι σιδήρου
UCAP (TEA)	Ferrox	Benfield (DEA)	Διχρωμικές	Purisol (N-μεθυλ-2-πυρολιδόνη)	Ενεργός άνθρακας
Σελεκταμίνη (MDEA)	Manchester (οξειδίο σιδήρου σε ανθρακικό νάτριο)	Giemmarco-Vetrocoke (ανθρακικό κάλιο με αρσενικόδη, αρσενικά άλατα)	Αμμωνίας	Σουλφινόλη (DIPA και Σουλφολάνιο)	Αποδέκτης δολομίτη
Εκοναμίνη(DGA) ADIP (DIPA)	Thylox (διάλυμα ανθρακικού νατρίου / αμμωνίου)	Alkacid (άλας του καλίου με οξικό οξύ διαιθυλαμίνης)	Καυστικές	Διαλύτης Fluor (ανθρακικό προπυλάνιο)	
Μη αναγεννήσιμες	Townsend (γλυκόλη τριαιθυλενίου)	Ανθρακικά κενού (ανθρακικό νάτριο)	Φωσφορικά κάλια		

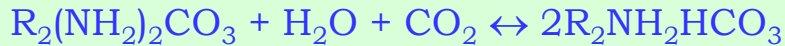
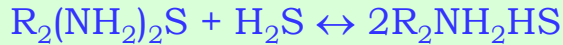
## 6.6.1. Διεργασίες Χημικής Απορρόφησης

### I. Διεργασίες με Αλκανολαμίνες

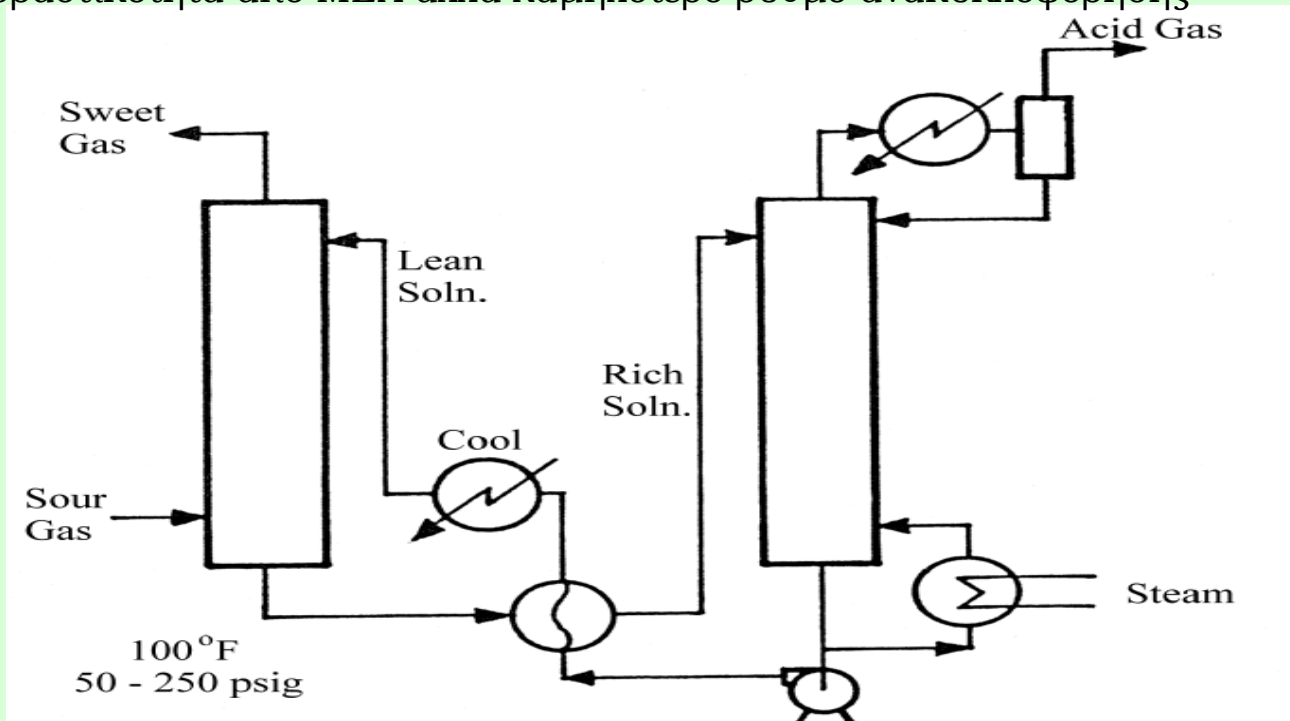
- Παράδειγμα: η χημεία της αντίδρασης με αμίνη DEA για χαμηλές μερικές πιέσεις του  $H_2S$  και του  $CO_2$ , μπορεί να παρουσιασθεί ως εξής:



Σε μεγάλες μερικές πιέσεις αερίου, οι αντιδράσεις αυτές προχωρούν ως εξής:



- MEA και DEA μη εκλεκτικοί χημικοί διαλύτες, MDEA και TEA «εκλεκτικές», DEA και MDEA λιγότερο αντιδραστικές, αποσυντίθενται λιγότερο και έχουν μικρές απώλειες, DGA (διγλυκολαμίνες) διπλάσια αντιδραστικότητα από MEA αλλά χαμηλότερο ρυθμό ανακυκλοφόρησης



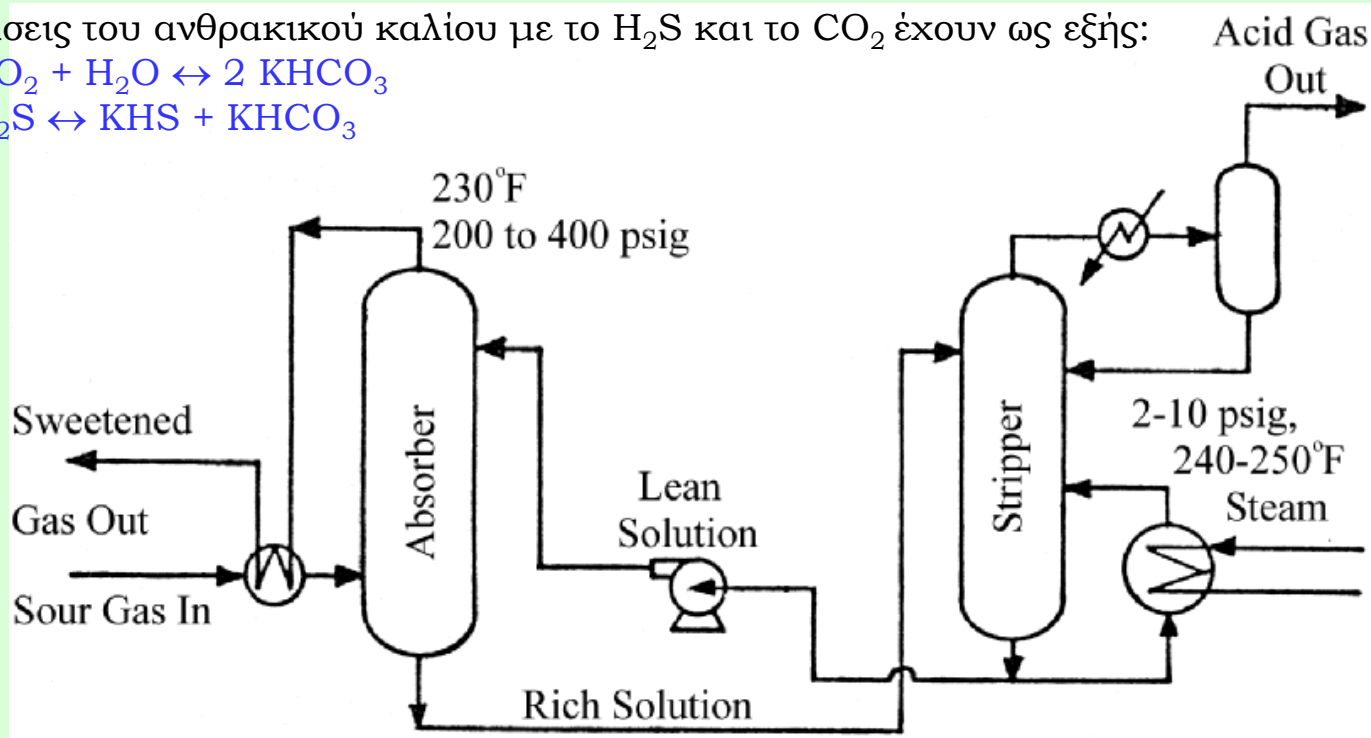
**Σχήμα 6.23** Διάγραμμα ροής βασικής διεργασίας απομάκρυνσης όξινου αερίου με αμίνες



## II. Διεργασίες Διαλυμάτων Αλκαλικών Αλάτων

- Ταξινομείται σαν “μη Εκλεκτική” διεργασία και είναι παρόμοια με την διεργασία ΜΕΑ
- Πλεονεκτήματα: [1]η Τ απορρόφησης είναι > από ότι στην διεργασία ΜΕΑ (110°C)→επιτρέπει χρήση διαλύματος υψηλότερης συγκέντρωσης (30-40%) →αύξηση της συγκέντρωσης του όξινου αερίου/μονάδα όγκου διαλύματος το οποίο κυκλοφορεί. [2]επειδή η απορρόφηση διεξάγεται στην ίδια Τ με την αναγέννηση, δεν χρειάζονται εναλλάκτες θερμότητας. [3]η χαμηλή πιητικότητα του  $K_2CO_3$  και η απομάκρυνση του  $COS$  αποτρέπει τις δυσκολίες κατεργασίας για την ανάκτηση του θείου. Μείωση  $CO_2$  και  $H_2S$  στο απαέριο σε 0.5% και 30ppm, αντίστοιχα
- Πιθανά λειτουργικά προβλήματα είναι: διάβρωση, αποσάθρωση και αστάθεια της στήλης απορρόφησης

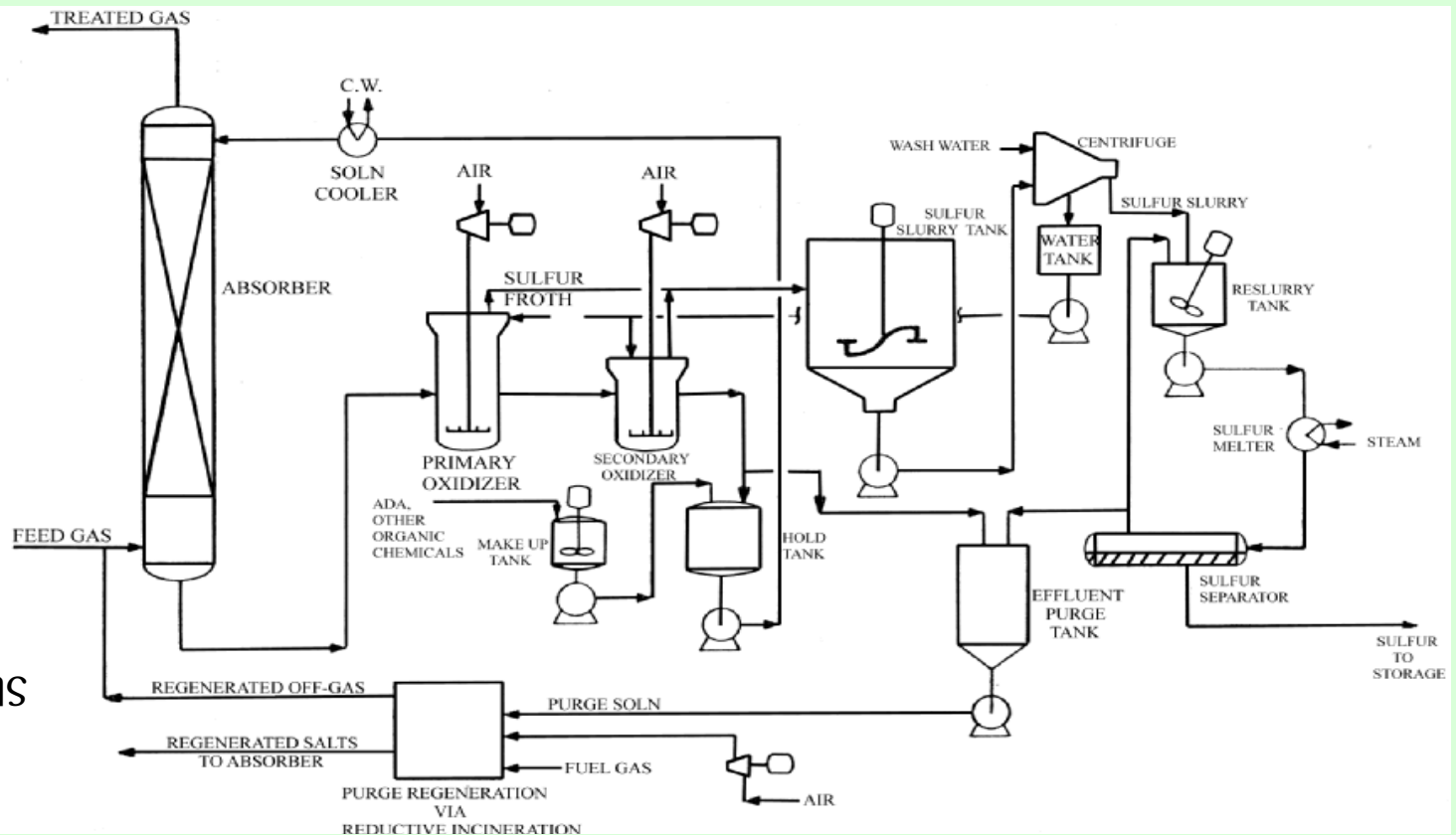
- Οι αντιδράσεις του ανθρακικού καλίου με το  $H_2S$  και το  $CO_2$  έχουν ως εξής:



**Σχήμα 6.24** Σχηματικό διάγραμμα ροής για μία συμβατική διεργασία θερμού ανθρακικού καλίου

### III. Η Διεργασία Stretford

- **Διάλυτης:** ανθρακικού νατρίου, ανθρακικού βαναδίου και το δισοδικό άλας του δισουλφονικού οξέος ανθρακινόνης (ADA), T:25- 55°C, P:>0
- **Πλεονεκτήματα:** πλήρης εκλεκτικότητα για H<sub>2</sub>S παρουσία CO<sub>2</sub>, δυνατότητα κατεργασίας αερίων με H<sub>2</sub>S 300ppm-95% κ.ο, απομάκρυνση H<sub>2</sub>S μέχρι 1ppm και άμεση παραγωγή εμπορικά εκμεταλλεύσιμου θείου.
- **Μειονεκτήματα:** υψηλό κόστος χημικών ουσιών, διεργασία οικονομικά συμφέρουσα μόνο για μικρές συγκεντρώσεις H<sub>2</sub>S και CO<sub>2</sub>. Πιθανά προβλήματα διάβρωσης και χρωματισμού από S, λόγω της παρουσίας ακαθαρσιών. Οι ενώσεις COS και CS<sub>2</sub> δεν απομακρύνονται (αναγκαία 1 επιπλέον μονάδα κατεργασίας του απαερίου (tail gas)).

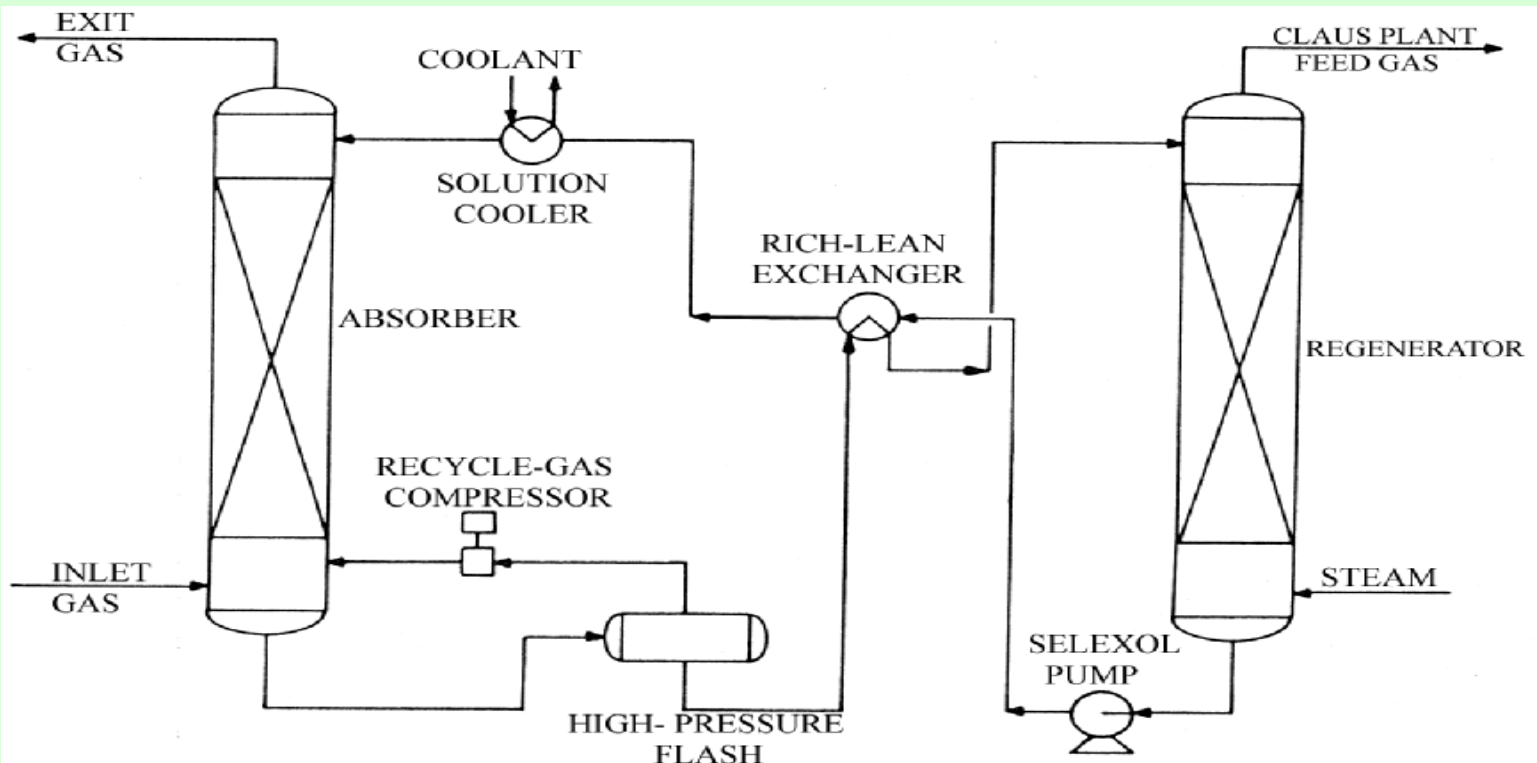


**Σχήμα 6.25**  
Διάγραμμα Ροής  
της Διεργασίας  
Stretford

## 6.6.2. Διεργασίες Φυσικής Απορρόφησης

### I. Η Διεργασία Selexol

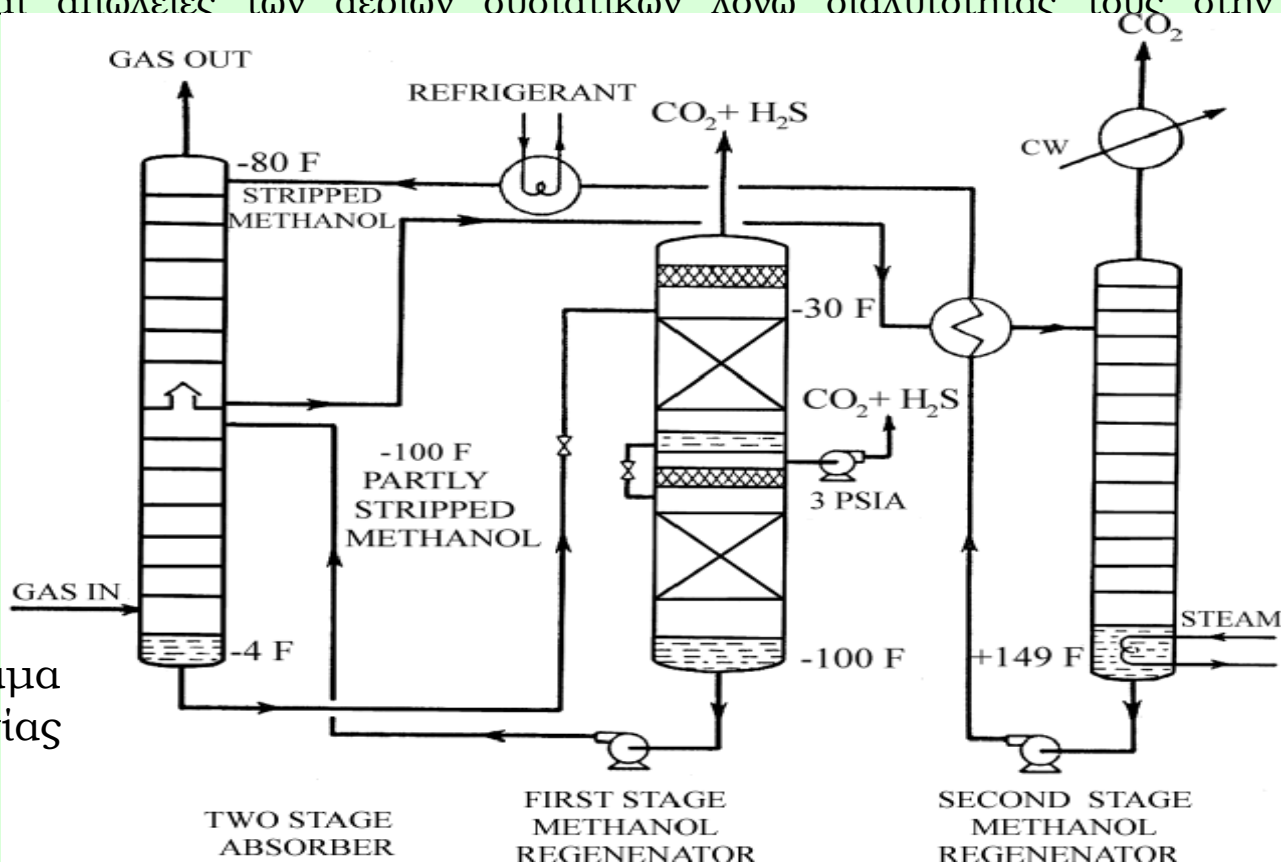
- **Διαλύτης:** διμεθυλικός αιθέρας του πολυαιθυλενίου γλυκόλης (ακριβός). P: υψηλή και T: χαμηλή (3.3-6.7MPa & 25°C). Διαλύτης αρκετά σταθερός με χαμηλή πίεση ατμών, δεν δημιουργεί αφρό, δεν είναι τοξικός, δεν προξενεί διάβρωση και είναι συμβατός με χαμηλά επίπεδα ακαθαρσιών του αερίου. Βαρείς H/C δεν απομακρύνονται.
- Η διεργασία Selexol εφαρμόζεται στην εκλεκτική απομάκρυνση H<sub>2</sub>S και στην μαζική απομάκρυνση μεγάλων ποσοτήτων CO<sub>2</sub>.
- Όταν πρέπει να απομακρυνθούν τόσο το H<sub>2</sub>S, όσο και το CO<sub>2</sub> προστίθεται μία 2η ομάδα συσκευών απορρόφησης και αναγέννησης μετά την απομάκρυνση του H<sub>2</sub>S



Σχήμα 6.26 Διεργασία εκλεκτικής απομάκρυνσης H<sub>2</sub>S Selexol

## II. Η Διεργασία Rectisol

- Απομάκρυνει το  $H_2S$  και το  $CO_2$ , μαζί με άλλες οργανικές ενώσεις του S και βαρείς H/C. Μπορεί να διατηρεί ένα επίπεδο καθαρότητας  $<0.1\text{ppm}$  συνολικού S στο αέριο προϊόν με τροφοδοσία 95% της χωρητικότητας της διεργασίας
- Χρησιμοποιεί οργανικούς διαλύτες (μεθανόλη) σε συμβατικές στήλες με δίσκους ή πληρωτικά υλικά. Η δυνατότητα διάλυσης των αερίων  $\uparrow$  όσο η  $T \downarrow$ , όσο η μερική πίεση στο αέριο τροφοδοσίας  $\uparrow$  και το υπολειμματικό περιεχόμενο στον αναγεννημένο διαλύτη  $\downarrow$ . Το σύστημα λειτουργεί μεταξύ  $-1$  και  $-40^\circ\text{C}$  και είναι ελκυστικό για τα όξινα αέρια τα οποία είναι διαθέσιμα σε υψηλές πιέσεις
- Υψηλή επένδυση κεφαλαίου για τα τμήματα που λειτουργούν σε χαμηλές T, απώλειες διαλύτη (υδρατμών μεθανόλης) και απώλειες των αέριων συστατικών λόγω διαλυτότητάς τους στην μεθανόλη



**Σχήμα 6.28**  
ροής της  
Rectisol

Διάγραμμα  
διεργασίας

### III. Η Διεργασία Purisol

- Παρόμοια με την Rectisol. Χρησιμοποιεί σαν διαλύτη N-μεθυλο 2-πυρρολιδόνη, σε T περιβάλλοντος για τον καθαρισμό των αερίων σε υψηλή πίεση
- Πλεονεκτήματα: δυνατότητα χειρισμού υψηλών φορτίων όξινου αερίου, λειτουργία σε T περιβάλλοντος και χαμηλές απώλειες διαλύτη. Μπορεί να επιτύχει καθαρισμό των αερίων σε επίπεδα συγκέντρωσης  $\text{CO}_2 < 0.1\%$ , και  $\text{H}_2\text{S}$  ολίγων ppm. Υψηλότερη εκλεκτικότητα για το  $\text{H}_2\text{S}$  από ότι στην διεργασία Rectisol

### IV. Η Διεργασία Διαλύτη Fluor

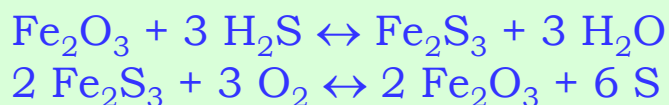
- Χρησιμοποιεί διάφορους διαλύτες για τον καθαρισμό των όξινων αερίων, όπως είναι το ανθρακικό προπυλένιο, ο τριοξικός εστέρας γλυκερόλης, ο οξικός εστέρας της βουτοξυδιαιθυλογλυκόλης και ο οξικός εστέρας της μεθοξυ-τριαιθυλογλυκόλης. Οι διαλύτες αυτοί είναι περισσότερο εκλεκτικοί για την απομάκρυνση του  $\text{CO}_2$ . Το ανθρακικό προπυλένιο είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την επεξεργασία αερίων υψηλής πίεσης

## 6.6.3 Διεργασίες Φυσικο–Χημικής Απορρόφησης

- Μεταξύ των διεργασιών απορρόφησης ξηρής κλίνης, οι διεργασίες «Οξειδίου του Σιδήρου» και «Αποδέκτη Δολομίτη», είναι πιθανόν οι πιο σημαντικές από απόψεως εμπορικής εφαρμογής
- Τα μοριακά κόσκινα είναι κατάλληλα για την κατεργασία αερίων ροών με υψηλές συγκεντρώσεις  $H_2S$ . Τέτοιες συγκεντρώσεις απαιτούν βραχύτερους χρονικά κύκλους μεταξύ απορρόφησης και αναγέννησης → κόστος διεργασίας αυξάνει.
- Ομοίως, η διεργασία ενεργού άνθρακα είναι δαπανηρή, όταν πρέπει να απομακρυνθούν μεγάλες ποσότητες  $H_2S$
- Τεχνολογία «Διαχωρισμού Μεμβράνης» : εναλλακτική λύση αντί για την φυσική ή την χημική απογύμνωση του αερίου. Δυνατότητα συνδυασμού με μετάπτωση ύδατος–αερίου και ένταξη σε μονάδες IGCC με πλεονεκτικά αποτελέσματα. Οι τεχνολογίες μεμβράνης βρίσκονται σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης. Η δημιουργία υπο-μονάδων μεμβράνης με διαστάσεις κατάλληλες για τα μεγέθη θερμοηλεκτρικού σταθμού, φαίνεται ότι είναι εφικτή

# I. Η Διεργασία Οξειδίου του Σιδήρου

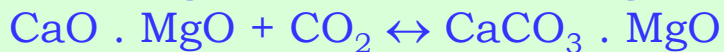
- Χρησιμοποιείται στην βιομηχανία τεχνητού αερίου. Αποτελεσματική στη μείωση υπολειμματικού  $H_2S$  σε επίπεδα ppm , όταν η αφαίρεση του κύριου όγκου έχει ήδη γίνει με οικονομικότερο τρόπο από άλλες διεργασίες.
- Το αέριο τροφοδοσίας ρέει πάνω από μία κλίνη ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, όπου το  $H_2S$  αφαιρείται με οξείδωση. Μετά την διεργασία θείωσής του, το οξείδιο του σιδήρου αναγεννάται με οξυγόνο, παράγοντας στοιχειακό θείο:



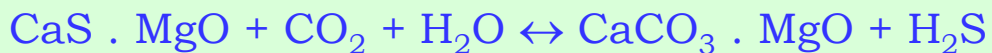
- Το παραγόμενο θείο δεν είναι εμπορεύσιμο, αλλά η διεργασία έχει πλεονεκτήματα λόγω της απλότητας λειτουργίας της και του χαμηλού κόστους εγκατάστασης.
- Τυπικές θερμοκρασίες της κλίνης: 15-50°C. Η λειτουργία υπό υψηλή πίεση είναι εφικτή. Για χαμηλά φορτία θείου (<100ppm), η διεργασία είναι αρκετά ελκυστική από οικονομική άποψη, σε σύγκριση με τις διεργασίες απογύμνωσης αερίων με υγρά

## II. Η Διεργασία Αποδέκτη Δολομίτη

- Ο διαπυρωμένος δολομίτης έχει προταθεί για χρησιμοποίηση στον καθαρισμό του  $H_2S$  σε υψηλή θερμοκρασία: ελκυστικό για αεριοποίηση χαμηλής θερμοκρασίας με συνδυασμένο.
- Οι παρακάτω αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στους  $790^\circ C$ :



Η αναγέννηση ενός καταναλωμένου αποδέκτη συμπληρώνεται με αντίδραση με ατμό και διοξείδιο του άνθρακα:

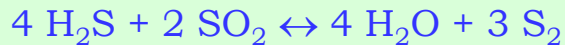
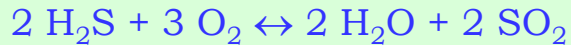


- Σαν συσκευές αποθείωσης, αναγέννησης και διαπύρωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντιδραστήρες ρευστοστερεάς κλίνης, ενώ ένα σύστημα απογύμνωσης αερίων με θερμά ανθρακικά άλατα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση του  $CO_2$  από το αέριο εξόδου του αναγεννητή αερίων.



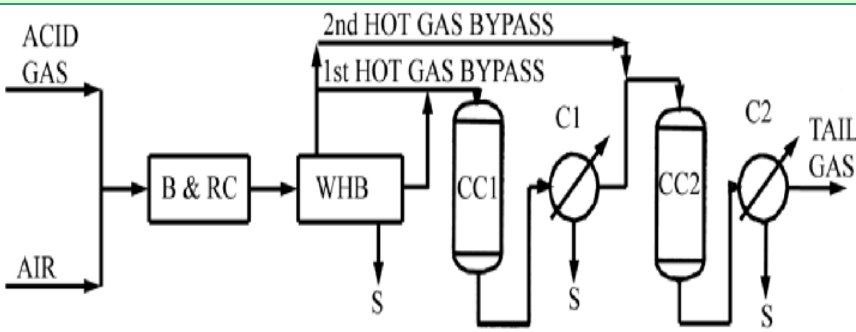
## 6.6.4 Ανάκτηση Θείου από την Διεργασία Claus

- **Διεργασία Claus:** κυρίαρχη διεργασία για ανάκτηση στοιχειακού S από πλούσια σε H<sub>2</sub>S αέρια.
- Περιλαμβάνει οξείδωση με φλόγα του H<sub>2</sub>S που θα πρέπει να βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις για να υποστηρίξει ένα μέτωπο φλόγας (>15% κ.ο.).
- **Αντιδράσεις διεργασίας Claus:**[1]καύση του ~1/3 του H<sub>2</sub>S σε ελεγχόμενη ποσότητα αέρα.  
[2]αντίδραση του SO<sub>2</sub> με το υπόλοιπο H<sub>2</sub>S, πάνω από καταλύτη βωξίτη σε T 250-300°C:

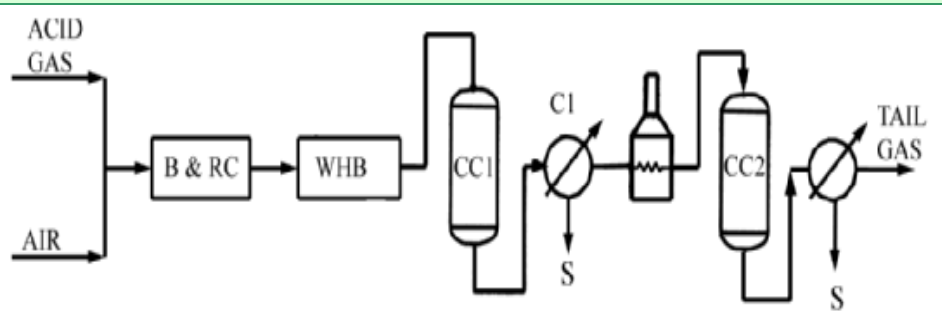


Οι αντιδράσεις είναι εξώθερμες. Ποσοστό μετατροπής του H<sub>2</sub>S σε στοιχειακό θείο ~95%. Το στοιχειακό θείο συμπυκνώνεται και εξάγεται σαν υγρό στους ~150°C.

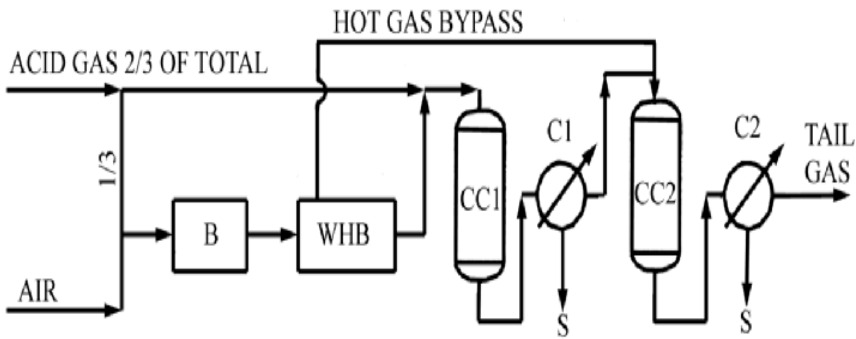
- Αέρια με H<sub>2</sub>S σε σχετική αραιή μορφή: γίνονται τροποποιήσεις για να επιτευχθεί υψηλότερος βαθμός ανάκτησης του προϊόντος S. Οι τροποποιήσεις περιλαμβάνουν: εκτέλεση των αντιδράσεων H<sub>2</sub>S-SO<sub>2</sub> σε στάδια, με ψύξη και ανακύκλωση των αερίων ροών μεταξύ των σταδίων.
- **4 κύρια σχήματα ροής της διεργασίας** (διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται το ισοζύγιο θερμότητας): (1) διεργασία 1 σταδίου, (2) διεργασία διαιρούμενης ροής, (3) διεργασία 1 σταδίου με εξωτερικό θερμαντήρα στην είσοδο του 2ου αντιδραστήρα και (4) διεργασία 1 σταδίου με 1 καυστήρα εν σειρά στην είσοδο του 2ου αντιδραστήρα
- Η διεργασία είναι **κατάλληλη για χρήση σε εγκαταστάσεις αεριοποίησης χαμηλής θερμοκρασίας**. Η τροφοδοσία προετοιμάζεται με μία διεργασία απομάκρυνσης οξέος, με στόχο την αύξηση της συγκέντρωσης του H<sub>2</sub>S. Η διεργασία επηρεάζεται αρνητικά από την παρουσία αρωματικών H/C.



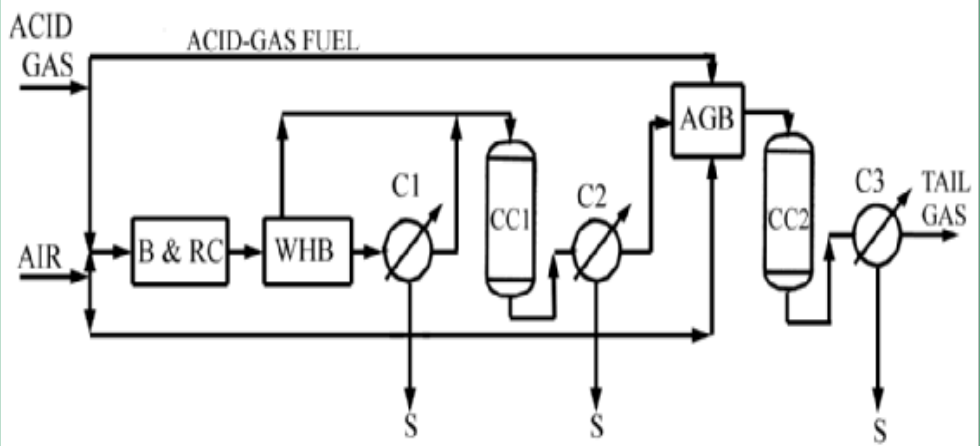
(a).



(c).



(b).



(d).

**Legend**

- |     |                       |     |                                |
|-----|-----------------------|-----|--------------------------------|
| B   | Burner                | C2  | Condenser No.2                 |
| RC  | Reaction chamber      | C3  | Condenser No.3                 |
| WHB | Waste heat boiler     | H   | Indirect fuel gas-fired heater |
| CC1 | Catalytic converter 1 | AGB | In-line acid gas burned        |
| CC2 | Catalytic converter 2 | S   | Liquid sulfur                  |
| C1  | Condenser No.1        |     |                                |

**Σχήμα 6.30** Διάγραμμα ροής της διεργασίας Claus

## 6.6.5. Οικονομικές Θεωρήσεις

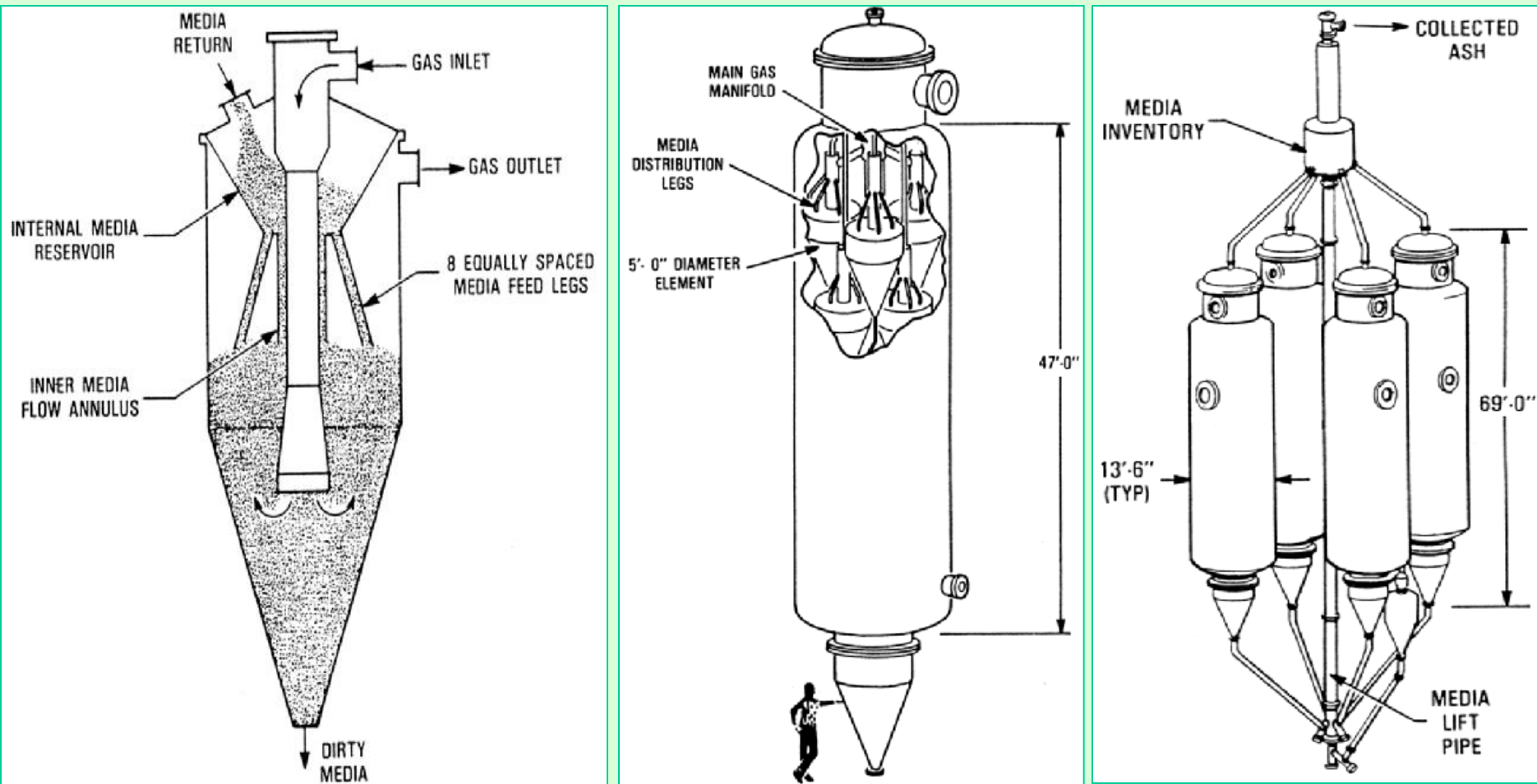
- Το κόστος μίας διεργασίας εξαρτάται από την σύνθεση του αερίου, τις προδιαγραφές των προϊόντων, της απαιτήσεως χρήσης και τις συνθήκες λειτουργίας (ιδιαίτερα την πίεση).
- Είναι δύσκολο να διενεργηθούν γενικευμένες συγκρίσεις κόστους μεταξύ των διαφόρων εναλλακτικών διεργασιών
- Διεργασίες που προτιμώνται: MDEA, Θερμών Ανθρακικών, Selexol και Rectisol. Οι επιτεύξιμες προδιαγραφές επιπέδων  $H_2S$  και  $CO_2$  στο καθαρό απαέριο είναι 10ppm και 350ppm (για την MDEA), 50ppm και 20ppm (για την Benfield), 8ppm και 350ppm (για την Selexol) και 2ppm και 350ppm (για την Rectisol), αντίστοιχα.
- Η Benfield είναι οικονομικότερη όσον αφορά στην επένδυση κεφαλαίου. Η κατανάλωση ατμού και ισχύος (κυρίως λόγω ανακυκλοφορίας του διαλύτη είναι μεγαλύτερη για τις MDEA και Benfield και χαμηλότερη για την Rectisol):

## 6.7. Τεχνολογίες Καθαρισμού Θερμών Αερίων

- Μερικοί σύγχρονοι αεριοποιητές γαιάνθρακα εκλύουν απαέρια σε  $T > 1100^{\circ}\text{C}$ . Οι τεχνολογίες όμως καθαρισμού των αερίων λειτουργούν σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες,  $40-95^{\circ}\text{C}$ . Άρα, τα αέρια θα πρέπει να ψυχθούν → να καθαρισθούν → να επαναθερμανθούν στην  $T$  εισόδου των αεριοστροβίλων  $1000-1400^{\circ}\text{C}$ .
- Το βήμα ψύξης-επαναθέρμανσης απαιτεί δαπανηρό εξοπλισμό, αυξάνει την συνθετότητα της μονάδας και μειώνει την συνολική αποδοτικότητα : ακριβή παραγωγή ενέργειας
- Η επόμενη γενιά θερμοηλεκτρικών σταθμών αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου θα χρησιμοποιεί, κατά πάσα πιθανότητα, τεχνικές καθαρισμού θερμών αερίων, για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών από τις ροές αερίων καυσίμων.
- Μελέτες (διεργασία Topping Cycle της British Coal) έχουν δείξει ότι είναι δυνατή μία βελτίωση της συνολικής θερμικής αποδοτικότητας κατά  $\sim 20\%$ , υιοθετώντας ένα σύστημα καθαρισμού απαερίων που λειτουργεί σ' ένα εύρος  $T = 400-600^{\circ}\text{C}$
- **Καθαρισμός θερμών αερίων:** στόχος η μείωση όλων των ρυπαντών που δηλητηριάζουν τους αεριοστροβίλους, αλλά και το περιβάλλον:  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , σωματιδιακή ύλη, αλκάλια, ικνοστοιχεία, υδρογονάνθρακες και χλώριο. Οι τεχνολογίες καθαρισμού των θερμών αερίων είναι εφαρμόσιμες μόνο για μερικούς από αυτούς τους ρυπαντές, συνήθως της σωματιδιακής ύλης, των αλκαλίων και των ενώσεων του θείου. Η σωματιδιακή ύλη προξενεί αποσάθρωση, ενώ τα αλκάλια προξενούν διάβρωση των στροβίλων: σοβαρές ζημιές και μικρή διάρκεια ζωής των στροβίλων

## 6.7.1 Απομάκρυνση Σωματιδιακών, Αλκαλίων & Ενώσεων S

- Συσκευές ελέγχου σωματιδιακής ύλης: κοκκώδεις κλίνες, πορώδη κεραμικά, σύνθετα κεραμικά με ίνες, κλίνες πλεγμένων ινών, πυροσυσσωματωμένα μέταλλα και θερμές ηλεκτροστατικές συσκευές καθίζησης. Οι κοκκώδεις κλίνες, τα κεραμικά φίλτρα και οι ηλεκτροστατικές συσκευές καθίζησης → δυνατότητα απομάκρυνσης  $\leq 99.9\%$



**Σχήμα 6.31** (α) Σχηματική αναπαράσταση κινούμενου φίλτρου κοκκώδους κλίνης χωρίς κόσκινο.

## Απομάκρυνση Αλκαλίων

- Για την αποφυγή διάβρωσης των λεπίδων των στροβίλων, οι ατμοί των αλκαλίων πρέπει να απομακρυνθούν από τα θερμά αέρια, μέχρι επιπέδου ppm
- Η κατάληξη των αλκαλικών μετάλλων στα συστήματα αεριοποίησης και καύσης εξαρτάται από την μορφή τους στον γαιάνθρακα. Μέρος του μη εναλλάξιμου νατρίου, που είναι δεσμευμένο στα καρβοξυλικά άλατα των γαιανθράκων χαμηλής τάξης, σχηματίζει αιθάλη μεγέθους  $< 1\mu\text{m}$  → περνά μέσω του εξοπλισμού καθαρισμού θερμών αερίων στον αεριοστρόβιλο.
- Ενώσεις για την απομάκρυνση αλκαλίων: ο ενεργός βωξίτης ή ο αναμεμειγμένος με οξείδια του σιδήρου βωξίτης, μείγματα οξειδίου του αλουμινίου με χαλαζιακή άμμο ή βωξίτη με χαλαζιακή άμμο → ιδιαίτερα κατάλληλα μέσα προσρόφησης για την δέσμευση των πιητικών αερίων στην στερεή ύλη
- Αυτά τα προσθετικά βασίζονται στον χαλαζία και στο οξείδιο του αλουμινίου, τα οποία σε υψηλές T σχηματίζουν πυριτικά άλατα του αλουμινίου, που είναι σημαντικά για την δέσμευση αλκαλίων και δεν προξενούν ρύπανση του περιβάλλοντος όταν απορρίπτονται. Οι ποσότητες προσθετικών κυμαίνονται μεταξύ 1-10% κ.β. της τροφοδοσίας γαιάνθρακα, ενώ οι T=700-1100°C. Βαθμός αποδοτικότητας: 85-90%.

## Απομάκρυνση θείου

- Διεργασία οξειδίου του σιδήρου ( λειτουργεί σε  $T=540-815^{\circ}\text{C}$ )  $\rightarrow$  απορρόφηση του περιεχόμενου στα θερμά αερίδια  $\text{H}_2\text{S}$ , από στερεές ενώσεις σιδήρου. Η αναγέννηση επιτελείται με αέρα, και οι αντιδράσεις που διεξάγονται σε αντιδραστήρα σταθερής κλίνης είναι:



Η διεργασία αυτή επέτυχε απομάκρυνση του υδρόθειου κατά 92-97%.

- Διεργασία τηγμένου ανθρακικού νατρίου: έχει προβλήματα όπως η μεταφορά υπερβολικής ποσότητας στερεών και αλκαλίων στις περαιτέρω εγκαταστάσεις, η συσσώρευση τέφρας στα τηγμένα άλατα, η διάβρωση του εξοπλισμού και οι μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και ατμού για αναγέννηση.
- Διεργασία «Αποδέκτη Δολομίτη».

## Απομάκρυνση θείου

### ➤ Τεχνική με χρήση μειγμάτων οξειδίων μετάλλων:

Προσοροφητής σιδηρούχου ψευδαργύρου ( $ZnFe_2O_4$ ): απομακρύνει ποσοστό του θείου στον γαιάνθρακα >99.9%, σε επίπεδα όσο τα 10ppm, και σε  $T > 540^\circ C$ . Ο προσροφητής μειώνει επίσης κατά 20% τους προδρόμους των  $NO_x$ . Η αναγέννηση γίνεται με αέρα και ατμό, για την παραγωγή ροής πυκνού  $SO_2$ , με άμεση ή έμμεση ψύξη.

Απενεργοποιείται λόγω των χημικών και των φυσικών μεταβολών κατά την αναγέννηση και των μικρών ορίων διακύμανσης της θερμοκρασίας.

### ➤ Προσοροφητές σιδηρούχου άλατος ψευδαργύρου-χαλκού και τιτανικού ψευδαργύρου μειώνουν τα επίπεδα του θείου σε λιγότερο από 1ppm με δυναμικότητα θείου του προσροφητή 15%. Εξετάζονται προσροφητές οι οποίοι λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, συμπεριλαμβανομένων προσροφητών ανακύκλωσης οξειδίου του σιδήρου, ασβεστόλιθου και αναγεννήσιμου τιτανικού ψευδαργύρου, καθώς και οξειδίου του ψευδαργύρου και οξειδίου του νικελίου. Η αναγέννηση αυτών των προσροφητών παράγει ένα απαέριο που περιέχει $SO_2$ , το οποίο πρέπει να απομακρυνθεί σαν θειϊκό ασβέστιο, ή να μετατραπεί είτε σε θειϊκό οξύ, είτε σε στοιχειακό θείο. Για τις περισσότερες εγκαταστάσεις, το θείο μπορεί να αποτελεί την καλύτερη επιλογή, επειδή το θείο μπορεί να αποθηκευθεί, να αποτεθεί ή να πουληθεί.



**Πίνακας 6.12** Κύρια χαρακτηριστικά μερικών προσροφητών θείου

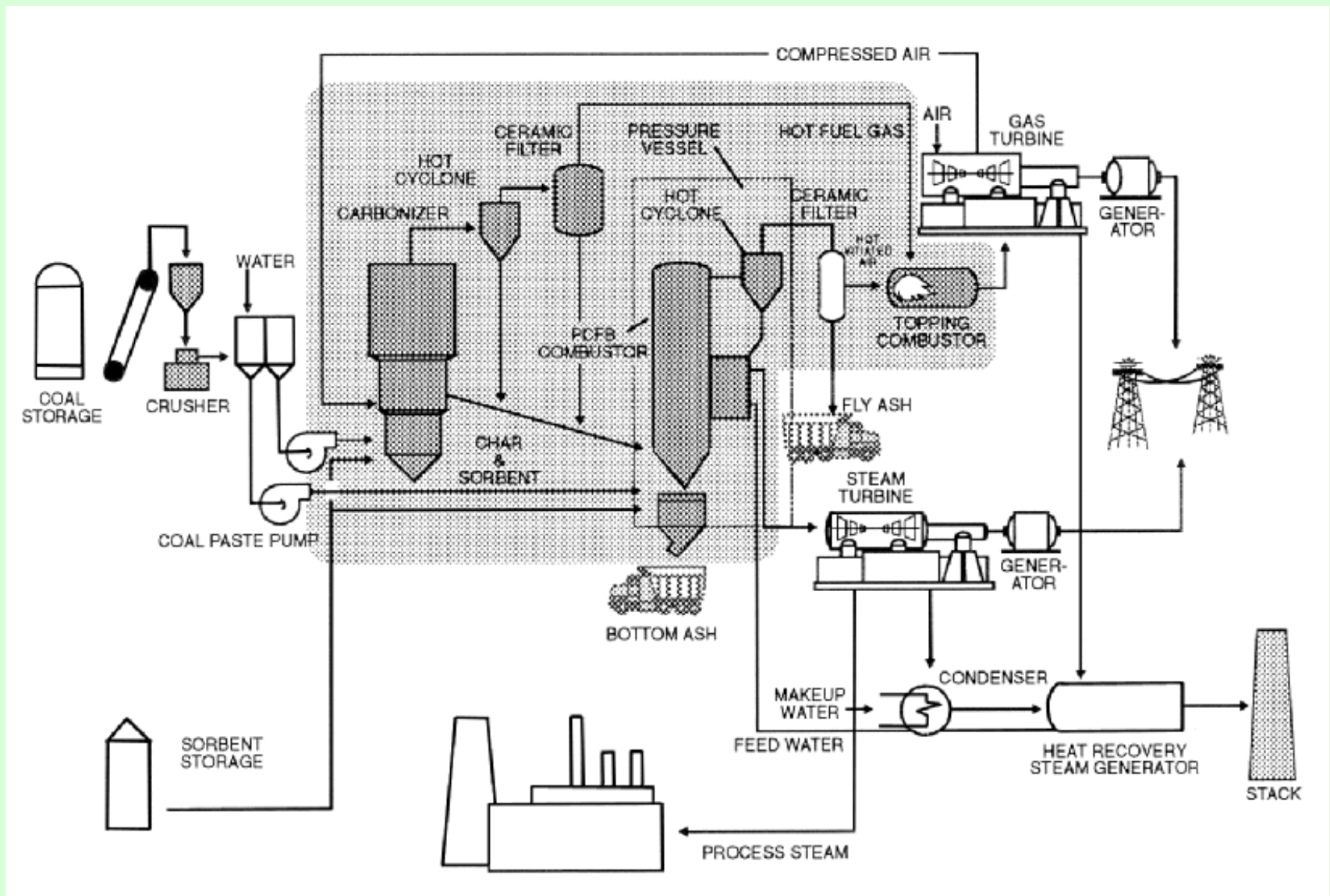
Όνομα	Χημικός Τύπος	<sup>1</sup> Θεωρ. Δυναμ., %	<sup>2</sup> H <sub>2</sub> S Ισορροπίας ppm	Εύρος Θερμοκρασιών, °F
Σιδηρούχος ψευδάργυρος	ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	39.83	<sup>4</sup> 10	1000-1200
Σιδηρούχο άλας ψευδαργύρου χαλκού	0.86ZnO.0.14CuO.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38.90	<sup>4</sup> <1	1000-1260
Τιτανικός ψευδάργυρος	0.8ZnO.TiO <sub>2</sub>	17.68	<sup>4</sup> 8	1000-1350
Σιδηρούχο άλας του οξειδίου του αλουμινίου του χαλκού	3CuO.Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.31	<sup>5</sup> <1	1000-1150
Αλουμινικός χαλκός	CuO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.79	<sup>5</sup> 2	1000-1100
Οξείδιο του μαγγανίου του χαλκού	CuMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	53.78	<sup>7</sup> <1	950-1200
Νικέλιο σε φορέα αλουμίνα	20wt.% Ni on Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.90	20 ppb <sup>5</sup>	930-1290
Οξείδιο του ψευδαργύρου	ZnO	39.51	<sup>4</sup> 7	850-1200
Οξείδιο του σιδήρου	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	41.38	<sup>4</sup> 560	850-1300
Χαλκός	Cu	25.00	<sup>4</sup> 70	1000-1300
Οξείδιο του χαλκού	Cu <sub>2</sub> O	22.38	<sup>4</sup> <1	1000-1300
Ασβεστόλιθος	CaCO <sub>3</sub>	32.00	<sup>3</sup> 100	1500-1800
Οξείδιο του ασβεστίου	CaO	57.14	<sup>6</sup> 150	1500-1800

- 1 Λίμπρες θείου /100 λίμπρες προσροφητή  
 2 H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub> = 25/20 % mole.  
 2 Υπό πίεση 230 psig, 6 mole % H<sub>2</sub>O, 11 mole % CO<sub>2</sub>, και 1 800°F.

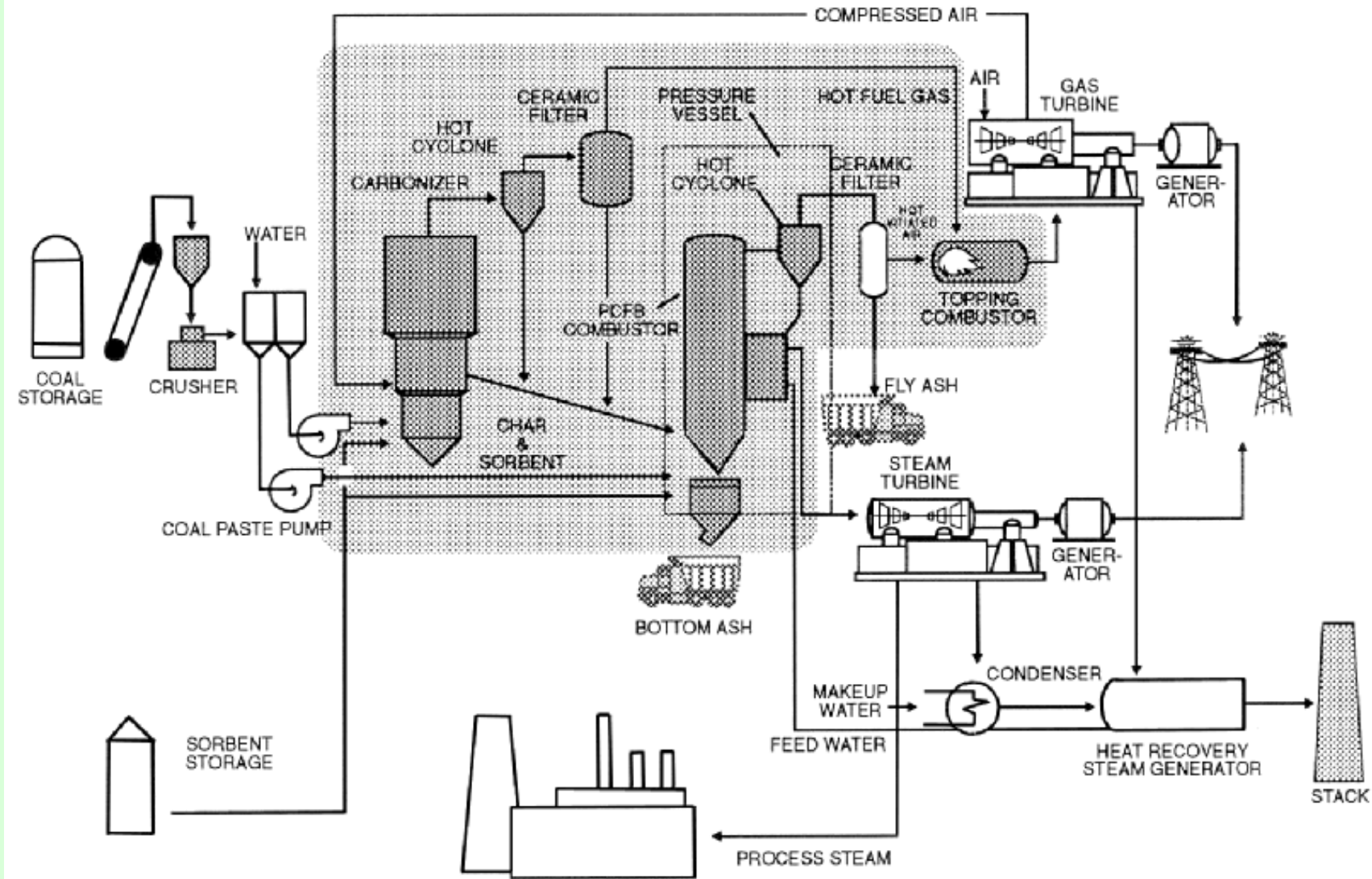
- 4 At 1100°F.  
 5 At 1050°F.  
 6 At 1800°F.  
 7 At 1200°F.  
 8 Parts/billion (ppb) σε 930 °F.

Summary of some typical catalysts for NH<sub>3</sub> decomposition |

Catalysts	Chemical composition of the catalyst	Gas hourly space velocity (GHSV) (h <sup>-1</sup> )	Temp (°C)	Feed gas composition	Ammonia conversion (%)
Ru/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 wt% Ru	30,000	450	Pure NH <sub>3</sub>	32
Ru/SiO <sub>2</sub>	10 wt% Ru	30,000	400		35
Ru/TiO <sub>2</sub>	4.8 wt% Ru	30,000	400	Pure NH <sub>3</sub>	27
Ru/MgO	2.8 wt% Ru	30,000	400	Pure NH <sub>3</sub>	41
Ni on Ce <sub>0.9</sub> La <sub>0.1</sub> O <sub>2</sub>	10 wt% Ni	100,000	750	500 ppm NH <sub>3</sub> in H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	97
Ru-Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(2-5) wt% Ru-(2-5) wt% Ni	20,000	900	1040 ppm NH <sub>3</sub> in 10.5% H <sub>2</sub> , 28.4% CO, 3.6% CO <sub>2</sub> , 3.1% H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> balance	~90
Ru/SiO <sub>2</sub>	10 wt% Ru	30,000	500	Pure NH <sub>3</sub>	64
Ni/SiO <sub>2</sub>	10 wt% Ni	30,000	500	Pure NH <sub>3</sub>	10
Ni/fumed SiO <sub>2</sub>	5 wt% Ni	30,000	700	Pure NH <sub>3</sub>	93
Ru/fumed SiO <sub>2</sub>	5 wt% Ru	30,000	550	Pure NH <sub>3</sub>	97
Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.2 wt% Ni	30,000	500	15% NH <sub>3</sub> -85% He	38
Ni-Ce/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.2 wt%-1% Ce				72
146 (Johnson Matthey)	0.5% Ru/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,000	500-700	Pure NH <sub>3</sub>	7-84
Ni monolith (Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	NA	2500	900	4400 ppm NH <sub>3</sub> , in 11% CO, 14% CO <sub>2</sub> , 5% CH <sub>4</sub> , 10% H <sub>2</sub> , 12% H <sub>2</sub> O, 0-500 ppm H <sub>2</sub> S, 3200 ppm toluene, N <sub>2</sub> balance	100
Iron containing dolomite	NA				53
Australian limonite	90 wt% α-FeOOH	45,000	500	2000 ppm NH <sub>3</sub> in He	99
Australian limonite	90 wt% α-FeOOH	45,000	750	2000 ppm NH <sub>3</sub> in 20% CO, 10% H <sub>2</sub> , 3% H <sub>2</sub> O, He balance	90
Australian limonite	90 wt% α-FeOOH	45,000	750	2000 ppm NH <sub>3</sub> in 100 ppm H <sub>2</sub> S, He balance	99
Coal char supported Fe	2-6% wt% Fe	45,000	650	2000 ppm NH <sub>3</sub> in He	~100



**Σχήμα 6.33** Η διεργασία Four Rivers Energy Modernization



**Σχήμα 6.34** Η διεργασία Toms Creek IGCC