

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΑ

4.1. Εισαγωγή

4.2. Χημικές Αντιδράσεις και Μηχανισμοί

4.3. Χαρακτηριστικά του Γαιάνθρακα που Επηρεάζουν την Αεριοποίηση

4.3.1. Αντιδραστικότητα

4.3.2. Περιεκτικότητα σε Υγρασία και Οξυγόνο

4.3.3. Περιεκτικότητα σε Πτητικά

4.3.4. Ιδιότητες Συσσωμάτωσης

4.3.5. Χαρακτηριστικά της Τέφρας

4.3.6. Περιεκτικότητα σε Θείο

4.4. Ταξινόμηση των Διεργασιών Αεριοποίησης

4.4.1. Αεριοποίηση Σταθερής Κλίνης

4.4.2. Αεριοποίηση Ρευστοστερεάς Κλίνης

4.4.3. Αεριοποίηση Παρασυρόμενης Κλίνης

4.4.4. Αεριοποίηση Λουτρού Τήγματος

4.5. Διεργασίες σε Εμπορική Εφαρμογή

4.5.1. Η Διεργασία Lurgi (Σταθερής Κλίνης)

4.5.2. Η Διεργασία Σταθερής Κλίνης Wellman-Galusha

4.5.3. Η Διεργασία Ρευστοστερεάς Κλίνης Winkler

4.5.4. Η Διεργασία Παρασυρόμενης Κλίνης Koppers-Totzek

4.6. Διεργασίες υπό Ανάπτυξη

4.6.1. Διεργασίες Αεριοποίησης Σταθερής Κλίνης

I. Η Διεργασία Gegas

II. Η Διεργασία Kilngas

III. Η Διεργασία Morgas

IV. Το Έργο Ολοκληρωμένης Αεριοποίησης Συνδυασμένου Κύκλου της Tampra Electric

V. Το Έργο Encoal Ήπιας Αεριοποίησης του Γαιάνθρακα

4.6.2. Διεργασίες Αεριοποίησης Ρευστοστερεάς Κλίνης

I. Η Διεργασία U-Gas

II. Η Διεργασία Hygas

III. Η Διεργασία Αποδέκτη CO₂

IV. Η Διεργασία Exxon

V. Το Έργο Παραγωγής Ισχύος με Μονάδα Igcc της Pinon Pine

VI. Το Έργο Kobra

4.6.3. Διεργασίες Αεριοποίησης Παρασυρόμενης Κλίνης

I. Η Διεργασία Texaco

II. Η Διεργασία Της Combustion Engineering

III. Η Διεργασία Shell

IV. Η Διεργασία Dow

V. Το Έργο Αναβάθμισης Μονάδας της Combustion Engineering Igcc

4.6.4. Διεργασίες Αεριοποίησης Λουτρού Τήγματος

I. Η Διεργασία Saarberg-Otto

II. Η Διεργασία Kellogg

III. Η Διεργασία Atgas

4.7 Υπόγεια Αεριοποίηση

4.7.1 Αρχές της Υπόγειας Αεριοποίησης

4.7.2. Ιδιότητες των Γαιανθοάκων Χαμηλής Τάξης που Επηρεάζουν την Αεριοποίηση

I. Πάχος Κοιτάσματος, Συνέχεια, Βάθος και Κλίση

II. Παρείσδυση Ύδατος

III. Κατάρρευση Οροφής

V. Ιδιότητες Διόγκωσης του Γαιάνθρακα

VI. Αντιδραστικότητα του Γαιάνθρακα

VII. Θερμική Αγωγιμότητα και Θερμική Διαχυσιμότητα του Γαιάνθρακα

4.7.3. Διαδικασίες Σύζευξης

I. Κατευθυνόμενη Γεώτρηση

II. Καύση Αντίρροης Ροής

III. Ηλεκτρική Σύζευξη

4.7.4. Εγκαταστάσεις Πεδίων Και Εμπορικές Εγκαταστάσεις

Κεφάλαιο 4

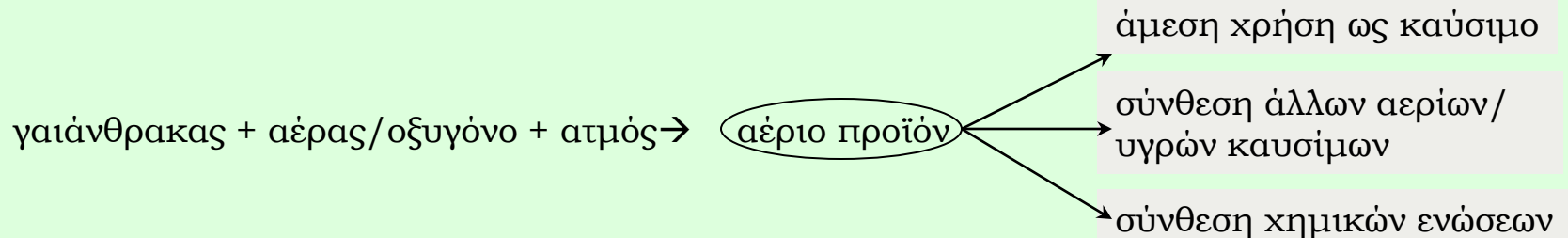
Αεριοποίηση του γαιάνθρακα






4.1 Εισαγωγή

- Αέρια καύσιμα: σημαντικά για την παγκόσμια ενεργειακή οικονομία (φιλικά προς περιβάλλον, εύκολη μεταφορά, μεγάλο εύρος χρήσεων ως πηγές ενέργειας & πρώτες ύλες της χημικής βιομηχανίας)
- Συνδυασμός της αεριοποίησης με την παραγωγή ηλεκτρισμού → περισσότερο αποδοτική μετατροπή του καυσίμου, με εφαρμογή του κύκλου «αερίου-ατμού»
- Δυνατότητα χρησιμοποίησης προβληματικών γαιανθράκων υψηλής περιεκτικότητας σε θείο
- Στην ουσία, η αεριοποίηση είναι μία ατελής καύση:



- Παρόμοιες φυσικές και χημικές διεργασίες με της καύσης. Διαφορετικές διεργασίες σχηματισμού ρυπαντών : σε συνθήκες αναγωγής, το $S \rightarrow H_2S$, και όχι SO_2 , ενώ το $N \rightarrow NH_3$ & δεν σχηματίζονται σχεδόν καθόλου NO_x . Χαρακτηρίζεται σαν μία «καθαρή» τεχνολογία γαιάνθρακα.



Ανάλογα με τον τύπο του συστήματος αεριοποίησης και τις συνθήκες λειτουργίας του, η διεργασία αυτή μπορεί να παράγει ένα αέριο κατάλληλο για διάφορες χρήσεις.

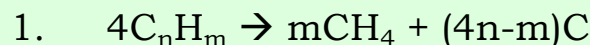
- Αεριοποίηση με αέρα και ατμό → παράγεται ένα αέριο μικρής θερμαντικής αξίας, για χρήση σαν βιομηχανικό καύσιμο και σαν καύσιμο παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.
- Αεριοποίηση με οξυγόνο και ατμό → παράγεται ένα αέριο μέσης θερμαντικής αξίας, το οποίο αποτελείται ουσιαστικά από CO και H₂ (SYNGAS), για χρήση σαν αέριο καύσιμο ή σαν τροφοδοσία χημικής σύνθεσης, παράγοντας προϊόντα όπως ή αμμωνία, η μεθανόλη και η βενζίνη η οποία παράγεται από μεθανόλη.
- Από την αντίδραση μετάπτωσης (shift) και την αντίδραση σχηματισμού μεθανίου, ή από υδρογονοαεριοποίηση → παράγεται ένα αέριο υψηλής θερμαντικής αξίας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν υποκατάστατο του φυσικού αερίου (συνθετικό φυσικό αέριο SNG).

4.2. Χημικές αντιδράσεις και μηχανισμοί

Οι βασικές αντιδράσεις οι οποίες συμμετέχουν στην διεργασία αεριοποίησης είναι:

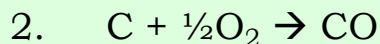
Αποπτητικοποίηση

ΔH (kJ/mol)

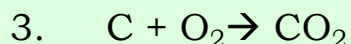


→ εάν T ↑ μετατόπιση ←

Καύση Εξανθρακώματος

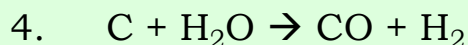


-123.0 γρήγορη ολοκλήρωσή

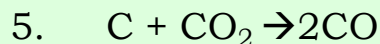


-406.0 γρήγορη ολοκλήρωσή

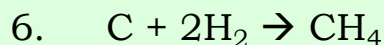
Αεριοποίηση Εξανθρακώματος



+118.5 δεν φθάνουν σε ισορροπία



+170.7 δεν φθάνουν σε ισορροπία

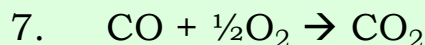


-74.8

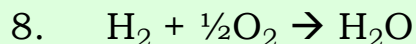
Μόνο εάν T > 1090°C
& P = 1- 20atm
εάν T ↑ μετατόπιση →
εάν P ↓ μετατόπιση ←

→ εάν T ↑ μετατόπιση ←

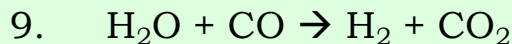
Αντιδράσεις Αέριας Φάσης



-282.0 γρήγορη ολοκλήρωσή

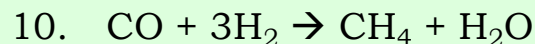


-241.6 γρήγορη ολοκλήρωσή



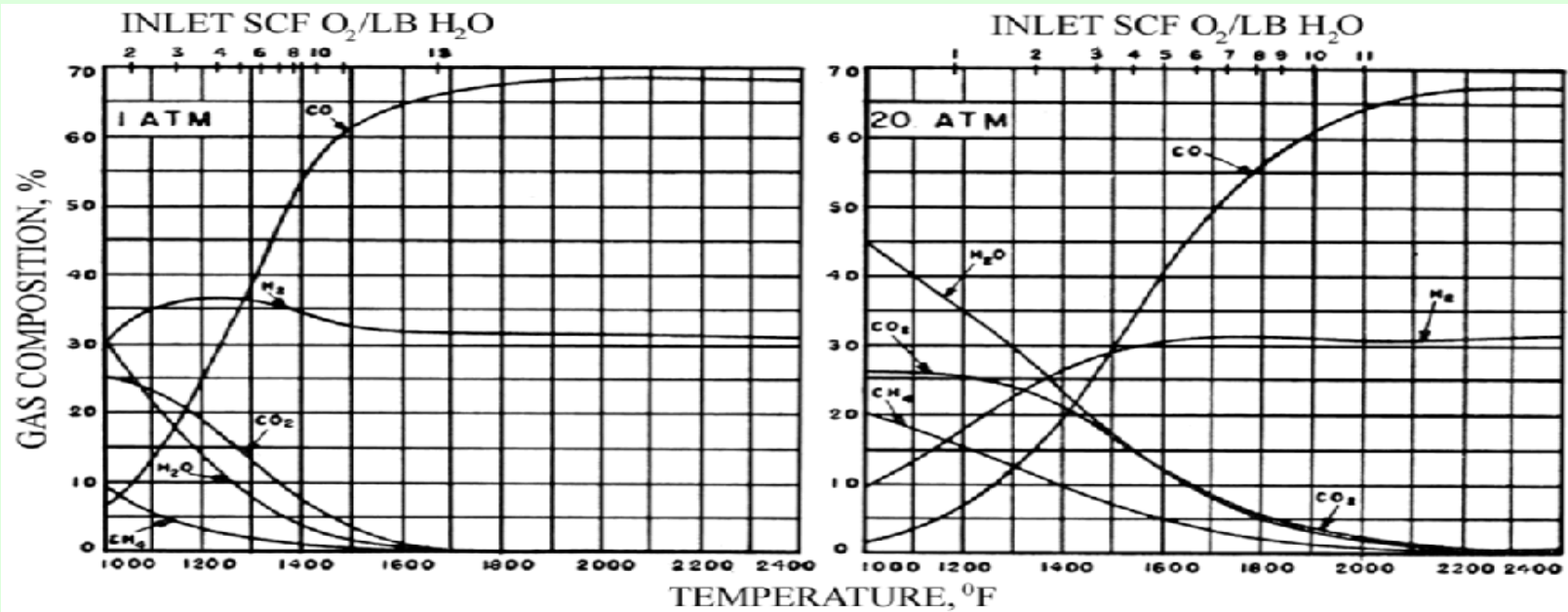
-42.3

(αντίδραση μετάπτωσης ύδατος -αερίου)

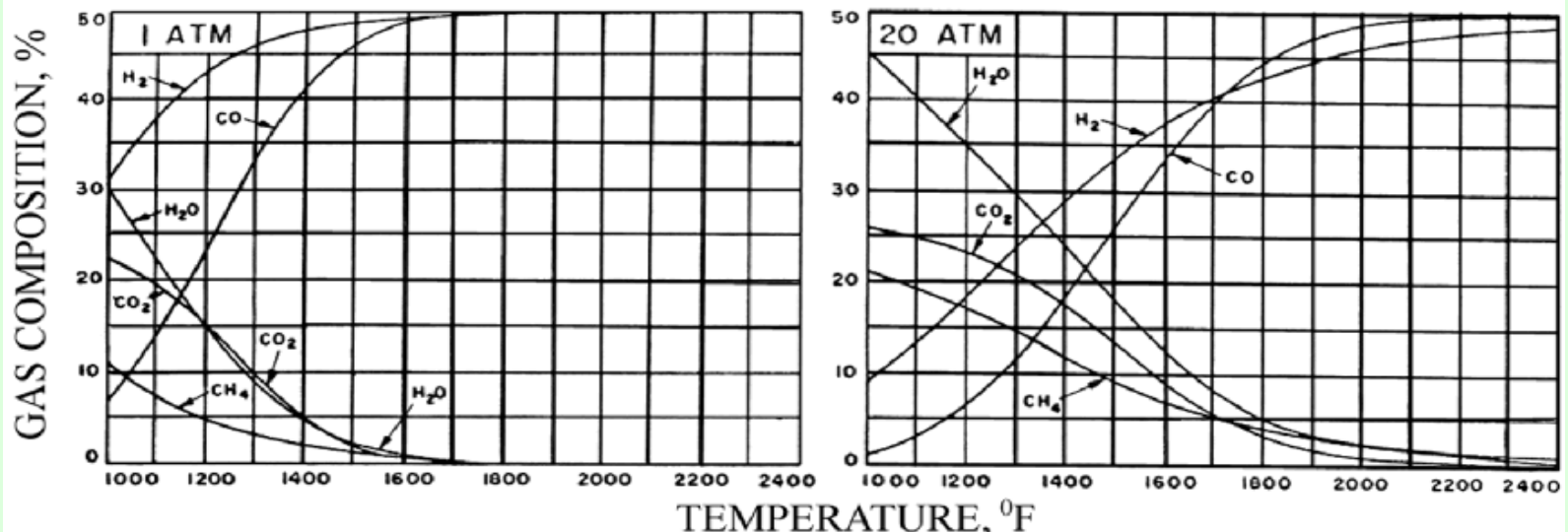


-206.0 ανεξάρτητη της πίεσης

εάν T ↑ μετατόπιση ←



Σχήμα 4.2 Συνθέσεις ισορροπίας αερίου για το σύστημα άνθρακα-οξυγόνου-ατμού σε αδιαβατικές συνθήκες

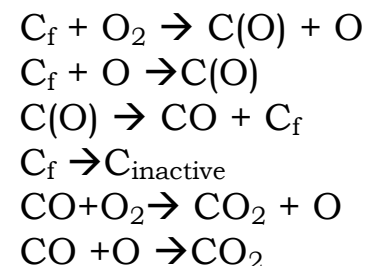


Σχήμα 4.3 Σύνθεση ισορροπίας του αερίου για το σύστημα άνθρακα-ατμού

Ο μηχανισμός των βασικών αντιδράσεων αεριοποίησης μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

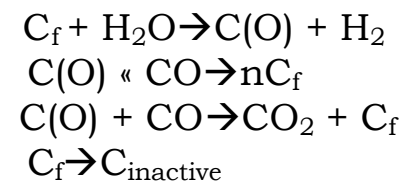
Αντιδράσεις Εξανθρακώματος -Οξυγόνου (2) και (3)

Μη αντιστρεπτή χημειορόφηση οξυγόνου σε ενεργά κέντρα
Μη αντιστρεπτή χημειορόφηση ατόμου οξυγόνου σε ενεργά κέντρα
Αποσύνθεση επιφανειακών οξειδίων
Ανόπτηση
Αντίδραση μονοξειδίου του άνθρακα με οξυγόνο
Αντίδραση μονοξειδίου του άνθρακα με άτομο οξυγόνου



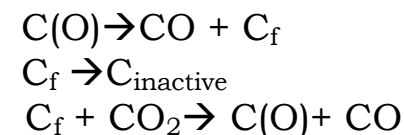
Αντίδραση Εξανθρακώματος - Ατμού (4)

Αντιστρεπτή εναλλαγή οξυγόνου μεταξύ ενεργών κέντρων και ατμού
Αποσύνθεση επιφανειακών οξειδίων
Αντιστρεπτή εναλλαγή οξυγόνου μεταξύ επιφανειακών οξειδίων και CO
Ανόπτηση



Αντίδραση Εξανθρακώματος -Διοξειδίου του Άνθρακα (5)

Αποσύνθεση επιφανειακών οξειδίων
Ανόπτηση
Αντιστρεπτή εναλλαγή οξυγόνου μεταξύ επιφανειακών οξειδίων και CO



Αντίδραση Εξανθρακώματος -Υδρογόνου (6)

Γαιάνθρακας: ατέλειες ή ασυνέχειες δομής → : ενεργά κέντρα (C_f) → παρέχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία απαιτούνται για την επίτευξη της χημειορόφησης του αντιδρώντος αερίου → σχηματισμός επιφανειακών συμπλόκων.

Οι ρυθμοί σχηματισμού και απομάκρυνσης των επιφανειακών συμπλοκών, ο αριθμός και η έκταση κάλυψης των ενεργών κέντρων → προσδιορίζουν τον ρυθμό και την τάξη της κάθε αντίδρασης

4.3 Χαρακτηριστικά του γαιάνθρακα που επηρεάζουν την αεριοποίηση

4.3.1. Αντιδραστικότητα

4.3.2. Περιεκτικότητα σε Υγρασία και Οξυγόνο

4.3.3. Περιεκτικότητα σε Πτητικά

4.3.4. Ιδιότητες Συσσωμάτωσης

4.3.5. Χαρακτηριστικά της Τέφρας

4.3.6. Περιεκτικότητα σε Θείο

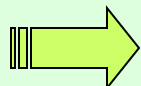


4.3.1 Αντιδραστικότητα

Οι γαιάνθρακες χαμηλής τάξης μπορούν να έχουν αντιδραστικότητα έως και 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή των γαιανθράκων υψηλότερης τάξης

Η αυξημένη αντιδραστικότητα των γαιανθράκων χαμηλής τάξης αποδίδεται:

- ✓ Στα πιο ενεργά κέντρα που διαθέτουν, λόγω των μικρότερων μεγεθών κρυσταλλιτών
- ✓ Στο υψηλότερο πορώδες, που ευνοεί την πρόσβαση του αερίου της αντίδρασης
- ✓ Στην υψηλότερη περιεκτικότητα σε ασβέστιο της τέφρας που έχει καταλυτική δράση στην αεριοποίηση του εξανθρακώματος



Επομένως:

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες χωρικές ταχύτητες → χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου
- Η κατανάλωση οξυγόνου και ατμού μπορεί να μειωθεί & να επιτευχθούν υψηλότερα ποσοστά μετατροπής του γαιάνθρακα → σημαντικό για τους αεριοποιητές με μικρούς χρόνους παραμονής, όπως ο τύπος της παρασυρόμενης κλίνης
- Η χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας είναι πλεονεκτική για τις μονάδες σταθερής κλίνης με απομάκρυνση τέφρας υπό ξηρή μορφή

4.3.2 Περιεκτικότητα σε Υγρασία και Οξυγόνο

Η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και οξυγόνο γαιανθράκων χαμηλής τάξης ενεργεί σαν διαλύτης κατά την διεργασία αεριοποίησης έτσι:

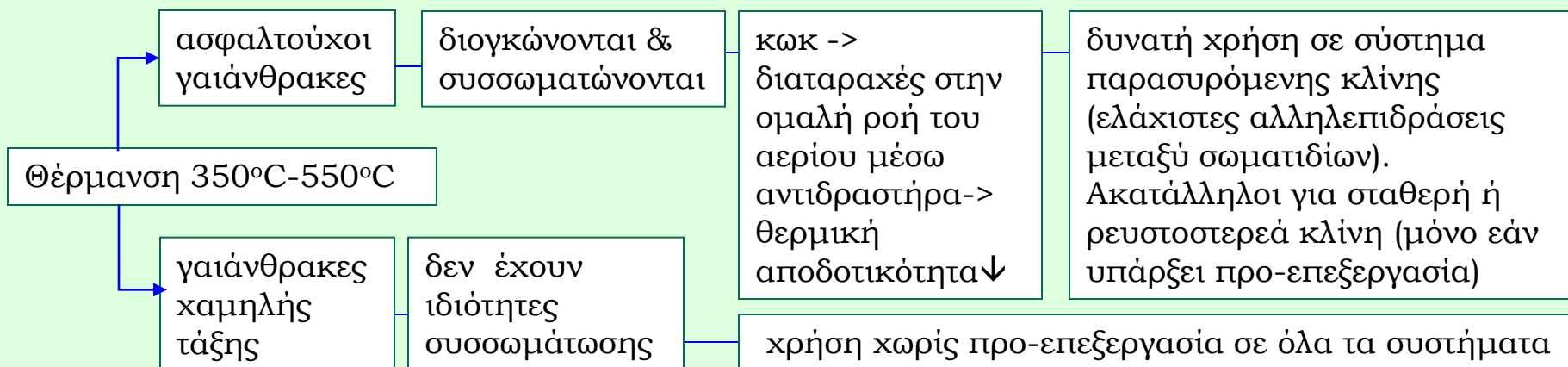
- Απαιτούνται μεγαλύτερες ποσότητες τροφοδοσίας για την επίτευξη της ίδιας παροχής ενέργειας με τους γαιάνθρακες υψηλότερης τάξης → δημιουργία μεγαλύτερων ποσοτήτων στερεών, υγρών και αερίων → εξοπλισμός μεγαλύτερων διαστάσεων

	Δυνατή λειτουργία	Προβλήματα
Αεριοποιητές	επίπεδα υγρασίας	
σταθερής κλίνης	≤35%	
πλήρους παράσυρης	<5%	
ρευστοστερεάς κλίνης	<5%	
με απομάκρυνση ρευστής σκωρίας		εάν υγρασία υψηλή → T κλίνης πέφτει & ροή τηγμένης σκωρίας σταματά → μονάδα εκτός λειτουργίας

4.3.3 Περιεκτικότητα σε Πτητικά

- Διαφορετική χημική σύνθεση πτητικών ουσιών, που παράγονται από γαιάνθρακες χαμηλής τάξης στην αεριοποίηση → διαφορετική κατεργασία διαχωρισμού και χρήση
- Σε αεριοποιητές σταθερής κλίνης, παράγονται πίσσα, έλαια, φαινόλες κ.α., ενώ σε συστήματα ρευστοστερεάς και παρασυρόμενης κλίνης ($T > 800^\circ\text{C}$) τέτοια υγρά οργανικά προϊόντα διασπώνται σε C και H → απαλοιφή ανάγκης σύνθετων εγκαταστάσεων κατεργασίας.

4.3.4. Ιδιότητες Συσσωμάτωσης



4.3.5. Χαρακτηριστικά της Τέφρας

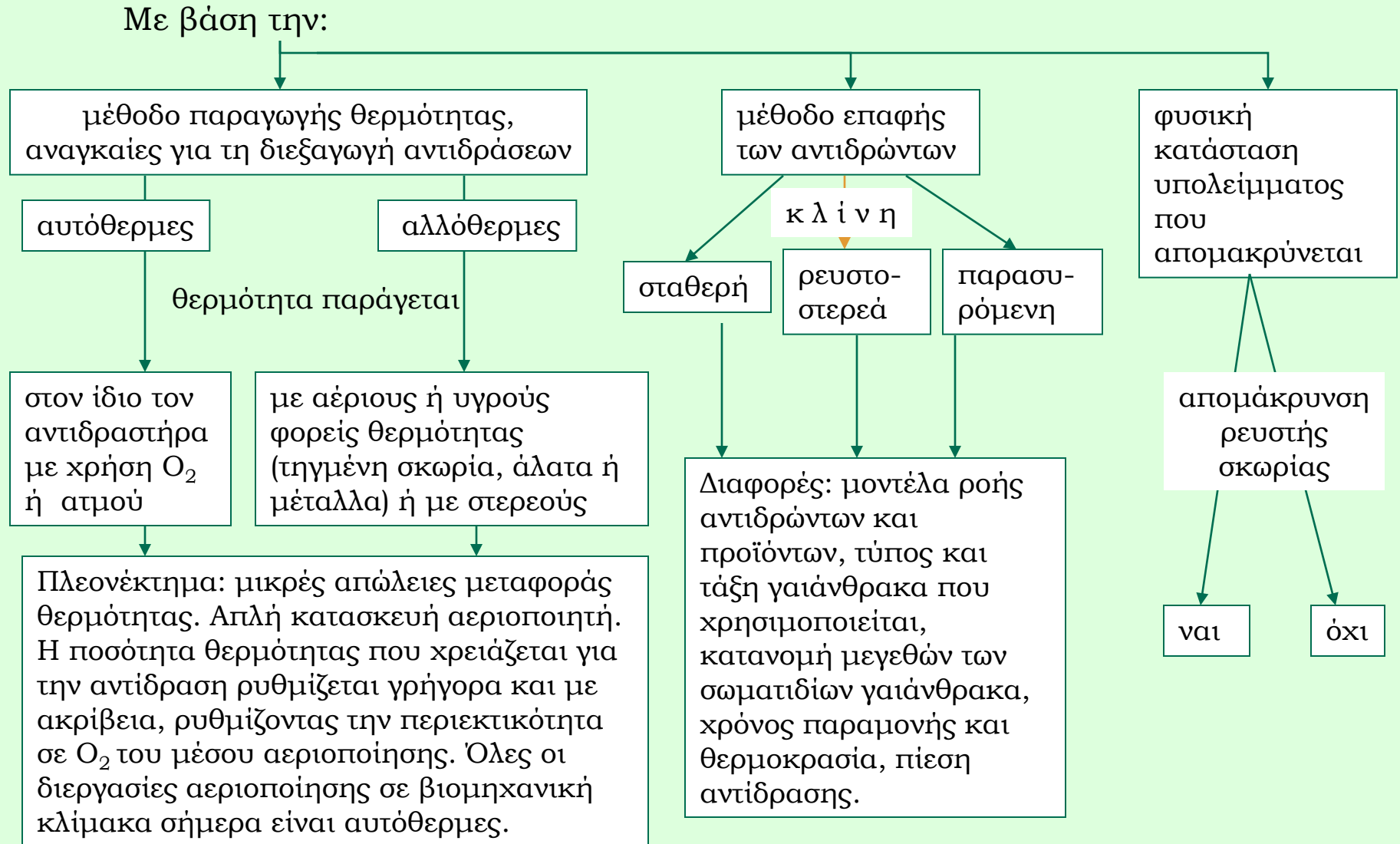
Στην αεριοποίηση τα χαρακτηριστικά της τέφρας που ενδιαφέρουν είναι:

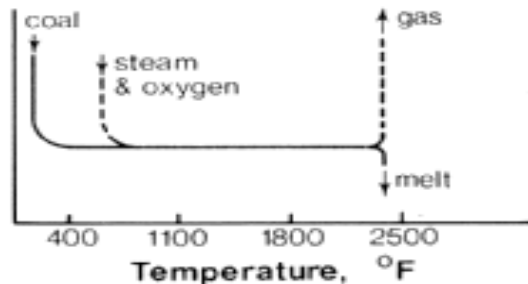
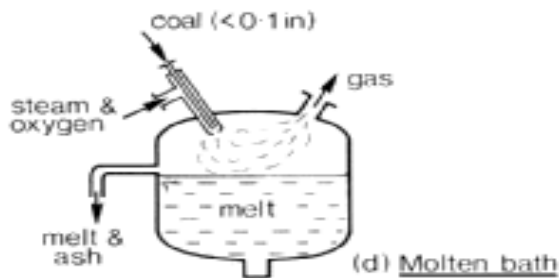
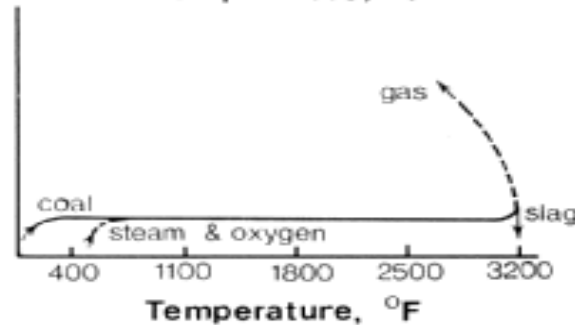
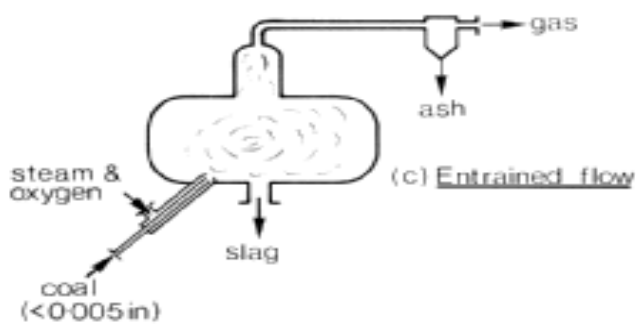
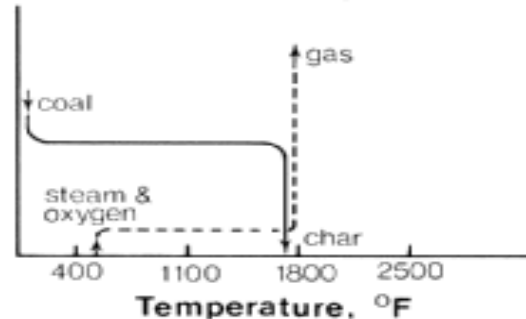
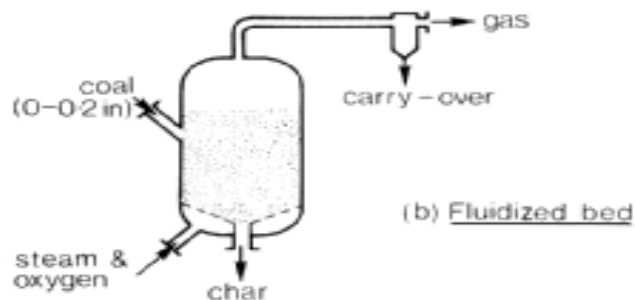
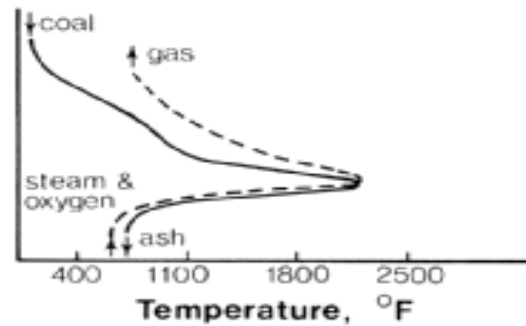
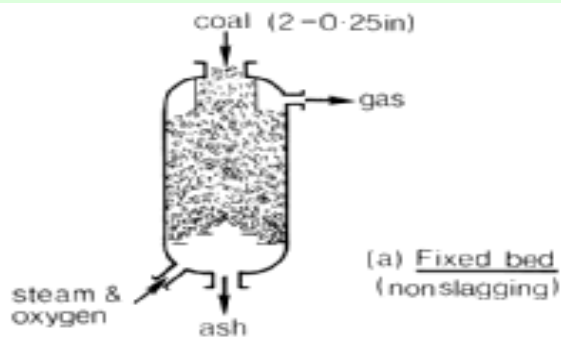
- η καταλυτική δράση → ανάλογα με την ατμόσφαιρα (οξειδωτική, αναγωγική, ατμού) τα Na, K, Ca, Fe βελτιώνουν την αντιδραστικότητα
- η συμπεριφορά συναρτίζει θερμοκρασίας-ιξώδους → κρίσιμα χαρακτηριστικά σκωρίας → επιλογή συνθηκών (T, αέρα) αεριοποίησης για την διατήρηση συνθηκών σκωρίας ή μη
- η διαβρωτική δράση σε πυρίμαχες επιφάνειες → υψηλή περιεκτικότητα σε Ca (έχει διαβρωτική δράση) αλλά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε Fe (διαβρωτικό μέσο)

4.3.6. Περιεκτικότητα σε Θείο

- γαϊάνθρακες χαμηλής τάξης → λιγότερο S → κόστος ↓ για συστήματα καθαρισμού αερίων

4.4. Ταξινόμηση των Διεργασιών Αεριοποίησης





Σχήμα 4.4

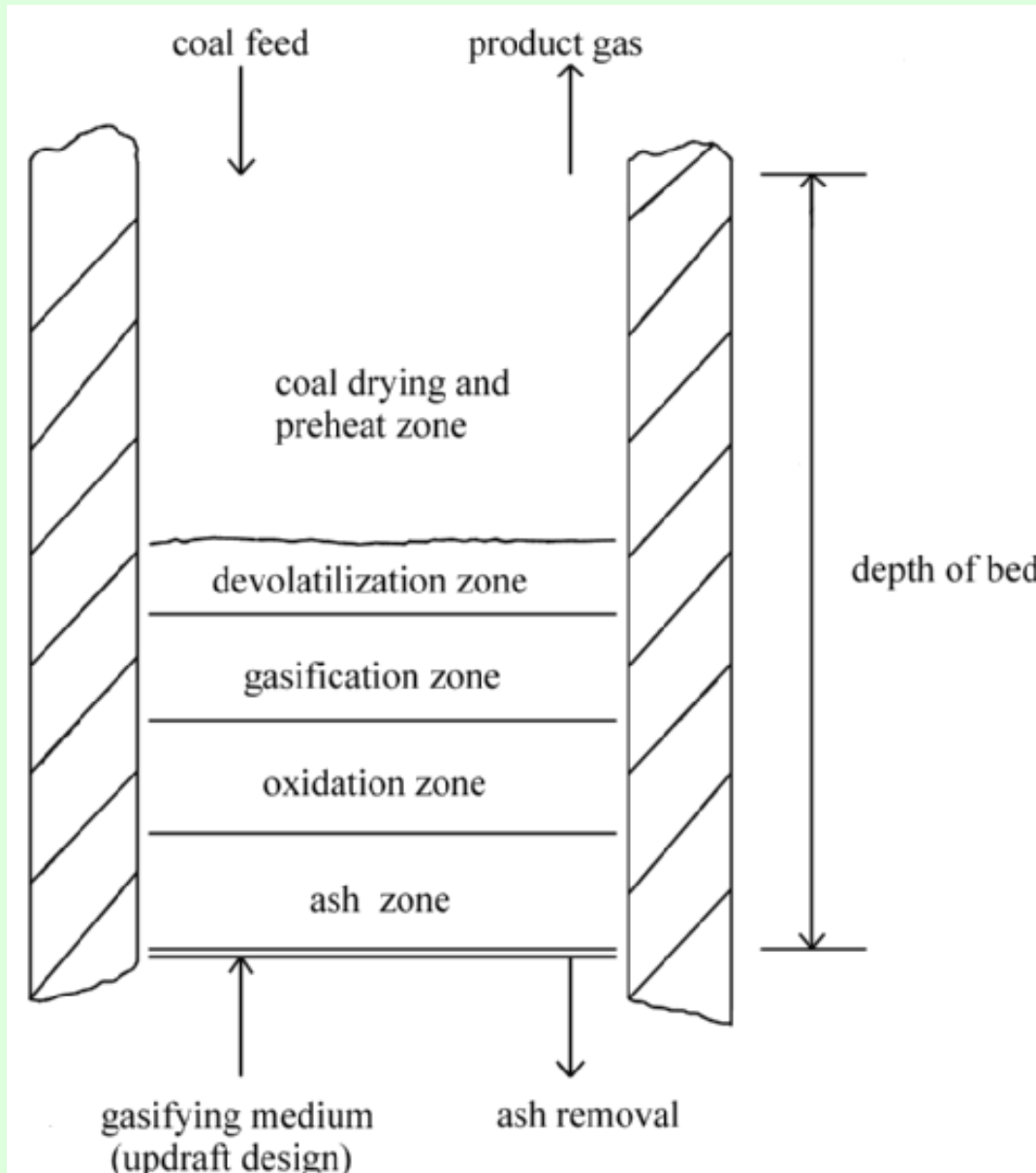
Ταξινόμηση & Χαρακτηριστικά των Κυρίων Συστημάτων Αεριοποίησης



Η επιλογή του αεριοποιητή εξαρτάται γενικά από:

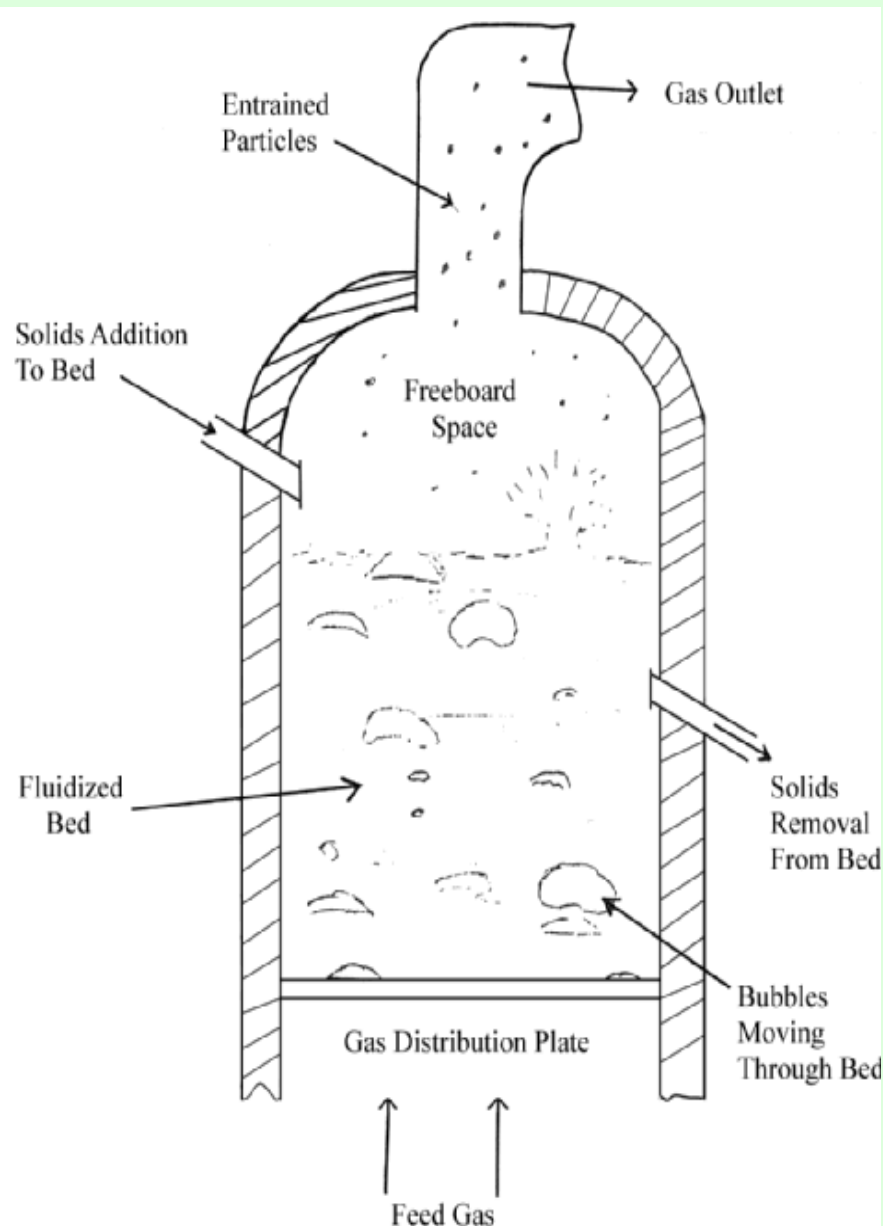
- α) τον ρυθμό παραγωγής ενέργειας
- β) τις απαιτήσεις για χρόνο εκτός λειτουργίας
- γ) την θερμογόνο δύναμη του αερίου (αέριο μικρής θερμαντικής αξίας με θερμογόνο δύναμη $3.8-7.6\text{MJ/m}^3$ για χρήση σαν βιομηχανικό καύσιμο και καύσιμο παραγωγής ισχύος, αέριο μέσης θερμαντικής αξίας με θερμογόνο δύναμη $10.5-16\text{MJ/m}^3$ για χρήση σαν τροφοδοσία στις διεργασίες χημικής σύνθεσης και καύσιμο αέριο υψηλής θερμαντικής αξίας με θερμογόνο δύναμη πάνω από 21MJ/m^3 για χρήση σαν υποκατάστατο του φυσικού αερίου)
- δ) την θερμοκρασία και την πίεση
- ζ) την διαθεσιμότητα, τον τύπο και το κόστος του γαιάνθρακα
- ε) την επιτρεπόμενη καθαρότητα του αερίου όσον αφορά πίσσες, κάπνα, τέφρα
- θ) τους περιορισμούς μεγέθους.
- η) τις τοποθεσίες εγκατάστασης του αεριοποιητή και της τελικής χρήσης των προϊόντων και των επιδράσεών τους

4.4.1. Αεριοποίηση Σταθερής Κλίνης



- Απλό και αξιόπιστο σύστημα
- Υψηλή αποδοτικότητα
- Είναι κατάλληλα για μεγάλα κομμάτια γαιάνθρακα, (50mm έως 6mm)
- Οι γαιάνθρακες οι οποίοι έχουν τάσεις συσσωμάτωσης χρειάζονται προ-επεξεργασία
- Τα προϊόντα αποπτητικοποίησης εκλύονται σε περιοχή σχετικά χαμηλών T και έλλειψης οξυγόνου, έτσι ώστε οι πίσσες, τα έλαια και οι βαρύτεροι υδρογονάνθρακες ούτε διασπώνται, ούτε οξειδώνονται, αλλά προστίθενται στο αέριο προϊόν
- Στην λειτουργία με απομάκρυνση ρευστής σκωρίας, όπου οι μέγιστες T είναι σημαντικά υψηλότερες επιτυγχάνεται υψηλότερη παραγωγή, με χαμηλότερη κατανάλωση ατμού
- Χρόνος παραμονής στερεού: αρκετές ώρες. Χρόνος παραμονής αερίου: δευτερόλεπτα

4.4.2. Αεριοποίηση Ρευστοστερεάς Κλίνης



- τροφοδοσία γαιάνθρακα σκόνη <3mm
- δεν διαμορφώνονται ζώνες αντίδρασης, όπως στην σταθερή κλίνη, λόγω έντονης ανάμειξης των στερεών σωματιδίων
- υψηλή αποδοτικότητα εναλλαγής θερμότητας, ομοιόμορφη και μέτρια θερμοκρασία, υψηλός ειδικός ρυθμός αεριοποίησης, ομοιομορφία των τελικών προϊόντων, προϊόν ελεύθερο από πίσσα, μεγάλη ευελιξία χρήσης για ένα μεγάλο εύρος συνθέσεων τροφοδοσίας και δυνατότητα χειρισμού λεπτών σωματιδίων.
- Υψηλό περιεχόμενο σε σκόνη του ακατέργαστου αερίου → διάβρωση, επικαθίσεις
- Δημιουργία υγρής σκωρίας & διαυλοι, αν η αναλογία μήκος/διάμετρος είναι υψηλή, η κατανομή μεγέθους σωματιδίων δεν είναι ευρεία, ή ο γαιάνθρακας δημιουργεί συσσωματώματα
- οι γαιάνθρακες με τάσεις συσσωμάτωσης → σχηματίζουν μεγάλα κομμάτια, μεταβάλλοντας την μηχανική συμπεριφορά του ρευστού → μείωση ρυθμού αεριοποίησης
- Οι γαιάνθρακες χαμηλής τάξης έχουν πλεονεκτήματα λόγω υψηλότερης αντιδραστικότητάς τους και έλλειψης τάσης για συσσωμάτωση

4.4.3 Αεριοποίηση Παρασυρόμενης Κλίνης

- **Λειτουργία:** κονιοποιημένος γαιάνθρακας (<0.12mm) παρασύρεται μαζί με το μέσον αεριοποίησης αντιδρώντας σε ομορροή
- **Τροφοδοσία:** όλοι σχεδόν οι τύποι γαιάνθρακα → διόγκωση και συσσωμάτωση δεν επηρεάζουν την λειτουργικότητα της διεργασίας, αφού κάθε σωματίδιο είναι ξεχωριστό από τα άλλα στο ρεύμα του αερίου
- **Θερμοκρασίες αντίδρασης:** υψηλές (>1500°C) & επιτυγχάνονται με την χρήση ενός μέσου που περιέχει μικρή μόνο ποσότητα ατμού
- Πίτσες, έλαια, φαινόλες, H/C διασπώνται και οξειδώνονται σε CO, H₂, CO₂ και ατμό. **Καυσαέρια:** S γαιάνθρακα μετατρέπεται σε H₂S & σε μικρές ποσότητες COS, αντί SO₂, ενώ το N γαιάνθρακα μετατρέπεται σε NH₃ και σε μικρές ποσότητες HCN (δεν σχηματίζονται σχεδόν καθόλου NO_x)
- Υψηλότερη αντιδραστικότητα γαιανθράκων χαμηλής τάξης → υψηλότερη αποδοτικότητα μετατροπής
- **Απλός σχεδιασμός συστήματος κλίνης.** Οι διαστάσεις καθορίζονται από το μέγεθος των σωματιδίων και την αντιδραστικότητα του καυσίμου, την T αντίδρασης και την ταχύτητα αερίου
- **Μειονεκτήματα:** λόγω χαμηλής συγκέντρωσης καυσίμου στο μέσον αεριοποίησης και ομορροής των αντιδρώντων → μείωση ρυθμού αεριοποίησης στην έξοδο αντιδραστήρα → μη ευνοϊκές συνθήκες μεταφοράς θερμότητας → υψηλές θερμοκρασίες εξόδου → ανάγκη για εκτεταμένες επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας → αντισταθμίζει κάπως την απλότητα της κλίνης.
Επίσης, λόγω απαιτήσεων υψηλής θερμοκρασίας → σχετικά υψηλή κατανάλωση O₂

4.4.4 Αεριοποίηση Λουτρού Τήγματος

- **Λειτουργία:** αεριοποίηση γαιάνθρακα που είναι σε έμμεση επαφή με ατμό και/είτε αέρα ή O_2 μέσα σε ένα λουτρό τηγμένης σκωρίας, μετάλλου ή άλατος
- **Τροφοδοσία:** χονδροκομμένος γαιάνθρακας, με κάποια λεπτά σωματίδια. Δυνατή χρήση γαιανθράκων με ιδιότητες συσσωμάτωσης και με μεγάλη περιεκτικότητα τέφρας ή θείου
- Για την διατήρηση του λουτρού σε τηγμένη κατάσταση απαιτούνται συνήθως **υψηλές θερμοκρασίες** → υψηλοί ρυθμοί αντίδρασης → μεγάλη παραγωγή.
- Η αεριοποίηση βελτιώνεται από τις καταλυτικές ιδιότητες του τήγματος: υψηλή θερμική χωρητικότητα → πολύ γρήγορη θέρμανση καυσίμου στην είσοδο: δεν σχηματίζονται πίσσες και έλαια. Η κατακράτηση S στο τήγμα → παραγωγή αερίου ρεύματος ελεύθερου από S. Το υπόλειμμα μπορεί να απομακρυνθεί πολύ απλά, αφού είναι σε υγρή κατάσταση.
- **Μειονεκτήματα:** υψηλή απαίτηση σε O_2 , μεγάλες απώλειες θερμότητας, έντονη διάβρωση από τα υψηλής θερμοκρασίας τηγμένα άλατα και μέταλλα
- Το υλικό που χρησιμοποιείται για το τήγμα καθορίζει, κυρίως, τα χαρακτηριστικά κάθε ξεχωριστής διεργασίας. **Σκωρία:** ενεργεί κυρίως σαν μέσο εναλλαγής θερμότητας, αλλά μπορεί να έχει και καταλυτική επίδραση. **Σίδηρος:** χρησιμοποιείται λόγω της ισχυρής του χημικής συγγένειας με το θείο, αλλά και επειδή το οξείδιο του σιδήρου στο τήγμα προσφέρει οξυγόνο. **Τηγμένα άλατα:** όπως του ανθρακικού ή θειϊκού νατρίου, είναι λιγότερο διαβρωτικά, έχουν χαμηλότερα σημεία τήξης από ότι τα μέταλλα και μπορούν να καταλύσουν την αντίδραση άνθρακα-ατμού.

4.5. Διεργασίες σε Εμπορική Εφαρμογή

4.5.1 Η Διεργασία Lurgi (Σταθερής Κλίνης)

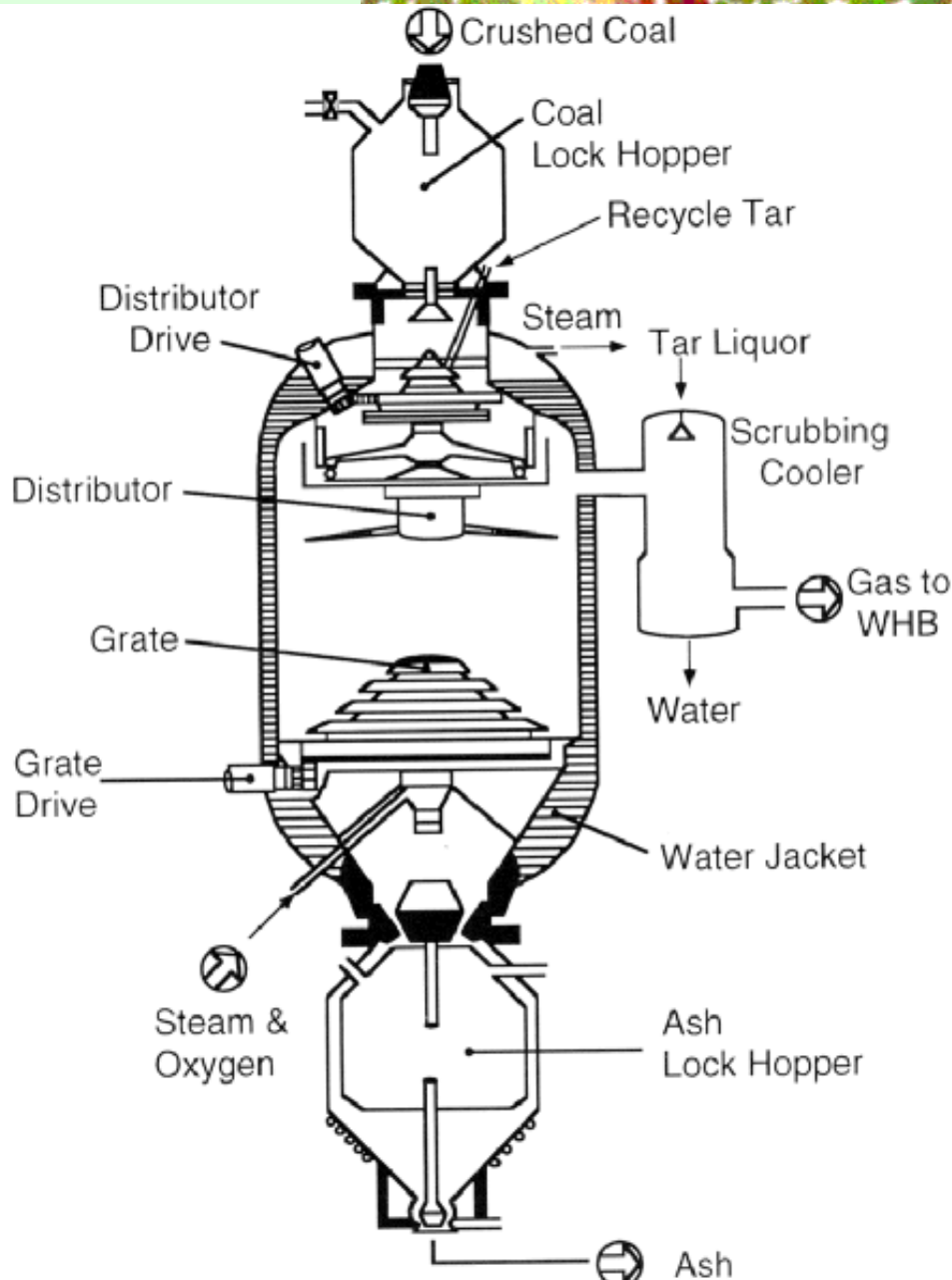
4.5.2 Η Διεργασία Σταθερής Κλίνης Wellman-Galusha

4.5.3. Η Διεργασία Ρευστοστερεάς Κλίνης Winkler

4.5.4. Η Διεργασία Παρασυρόμενης Κλίνης Koppers-Totzek

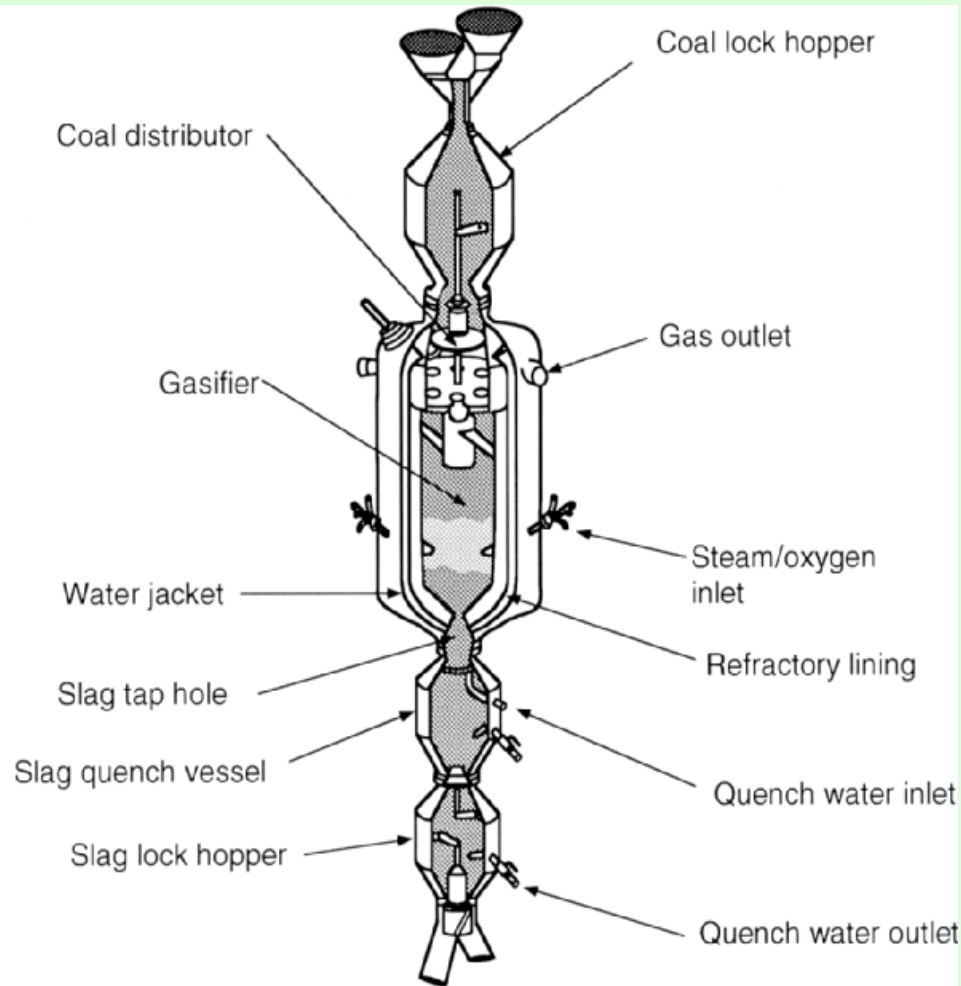


4.5.1 Η Διεργασία Lurgi (Σταθερής Κλίνης)



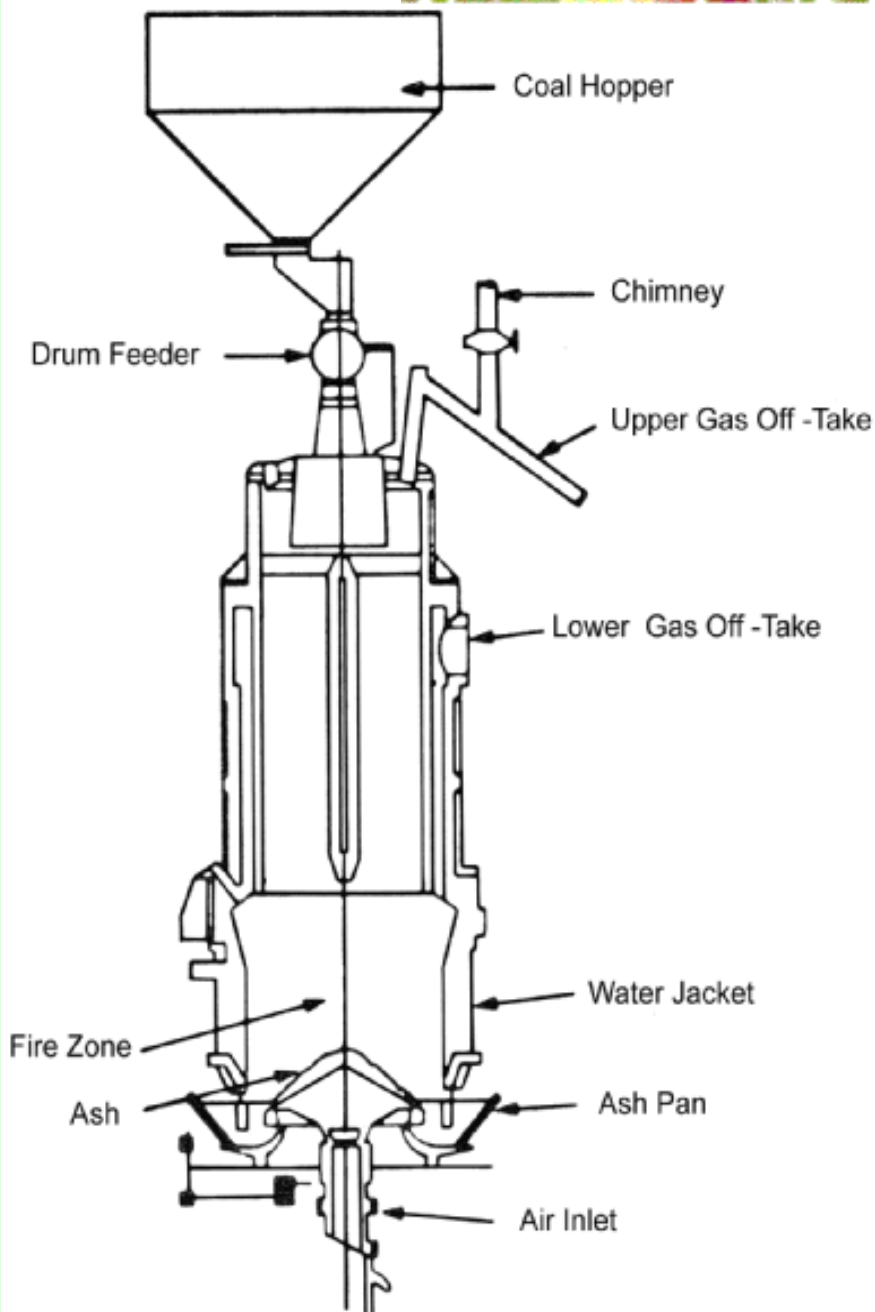
- τυπικές διαστάσεις γαιάνθρακα 5-50mm
- απαιτείται μεγάλη ποσότητα ατμού για μείωση της T της ζώνης καύσης κάτω από την T τήξης της τέφρας.
- Οι T όχι πολύ ομοιόμορφες λόγω αντirroής. Για γαιάνθρακα υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία, όπως ο λιγνίτης, η T εξόδου του αερίου μπορεί να πέσει $\rightarrow 300^{\circ}\text{C}$
- Το χαμηλής ή μέσης θερμαντικής αξίας αέριο που παράγεται, μετά την κατεργασία του για απομάκρυνση του όξινου αερίου, είναι διαθέσιμο σαν καύσιμο ή σαν αέριο σύνθεσης.
- Μία κανονική μονάδα Lurgi έχει διάμετρο 4m και ονομαστική δυναμικότητα ξηρού αερίου $55000\text{m}^3/\text{h}$, που ισοδυναμεί με $600\text{t}/\text{d}$ γαιάνθρακα
- Σε όλον τον κόσμο έχουν κατασκευασθεί >16 μονάδες Lurgi. Οι πιο σημαντικές είναι 3 μονάδες SASOL στην Νότια Αφρική. Αυτές έχουν παραπάνω από 90 αεριοποιητές Lurgi & καταναλώνουν περίπου $90000\text{t}/\text{d}$ υποασφαλιμένου γαιάνθρακα

Αεριοποιητής Lurgi με Δυνατότητα Απομάκρυνσης Ρευστής Σκωρίας



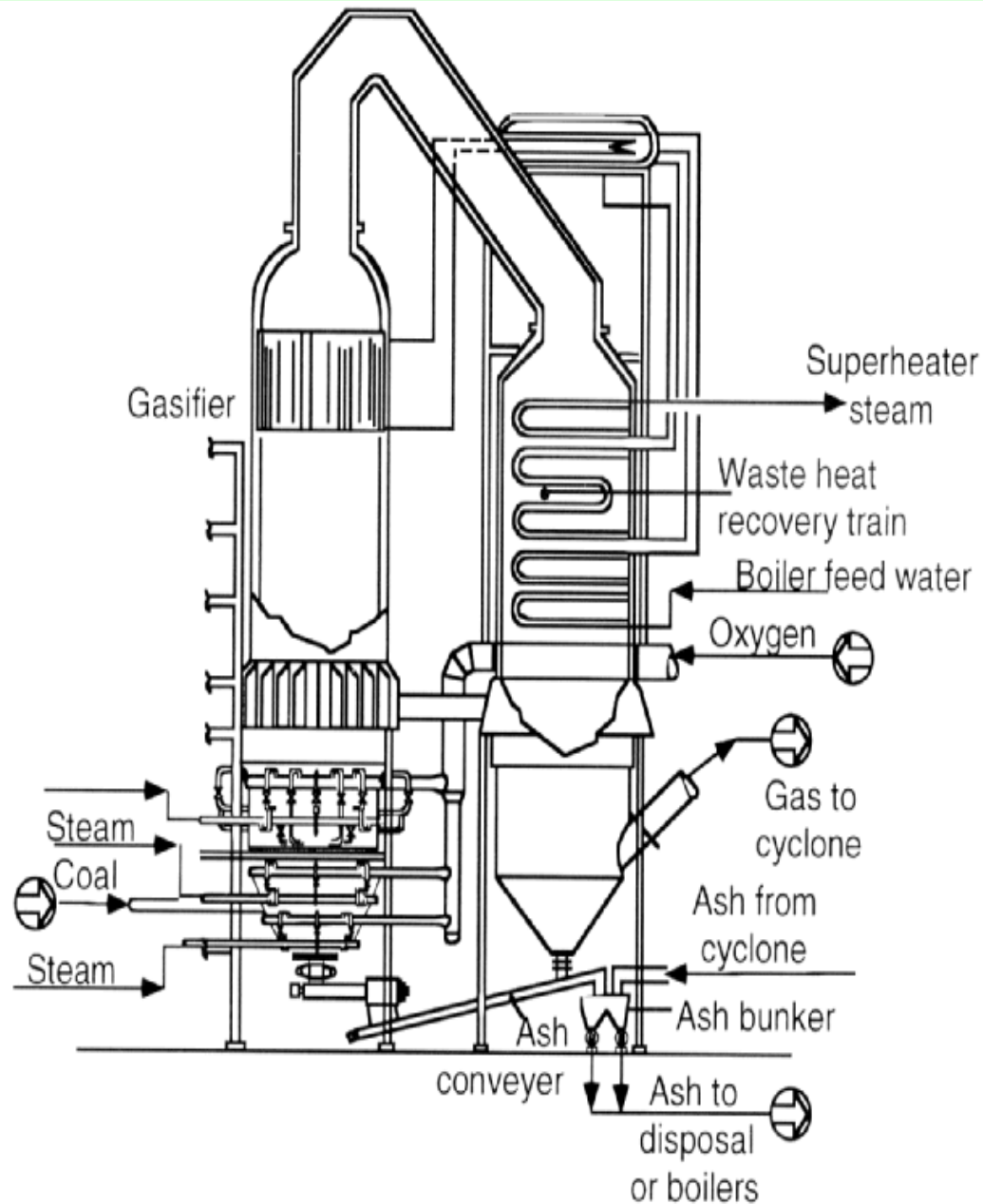
- Ανέπτυχθηκε για να ξεπεραστεί ο περιορισμός της λειτουργίας σε χαμηλή T --> αποφυγή τήξης τέφρας και συσσωμάτωσης
- Η μονάδα χρησιμοποιεί οξυγόνο και λειτουργεί υπό πίεση και υψηλές T έτσι ώστε η ιπτάμενη τέφρα να λιώνει και να σχηματίζει υγρή σκωρία.
- Το αέριο προϊόν έχει \uparrow θερμαντική αξία από αυτό που παράγεται στην μονάδα ξηρής τέφρας, λόγω \uparrow συγκέντρωσης ($CO+H_2$) στο αέριο σύνθεσης
- Με την λειτουργία αυτή μειώνεται παραγόμενη ποσότητα ατμού-->όγκος συμπυκνώματος των αερίων \downarrow και \uparrow συγκέντρωσης διαλυμένων υπο-προϊόντων στο ρεύμα. Βελτιώνει επίσης τον ρυθμό παραγωγής αερίου, ανά μονάδα εμβαδού διατομής του αεριοποιητή.
- Οι γαιάνθρακες χαμηλής τάξης δεν έχουν τάσεις συσσωμάτωσης-->μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στους δύο τύπους αεριοποιητή Lurgi, χωρίς μηχανικά μέσα ανάδευσης. Καθότι πολύ αντιδραστικοί, είναι πιο κατάλληλοι για αεριοποιητές ξηρής τέφρας.

4.5.2. Η Διεργασία Σταθερής Κλίνης Wellman-Galusha



- Αντιδραστήρας ατμοσφαιρικής πίεσης, μπορεί να λειτουργήσει με ατμό / αέρα ή ατμό / οξυγόνο.
- Απαραίτητη ανάδευση όταν οι γαιάνθρακες έχουν τάσεις συσσωμάτωσης. Η χρήση ανάδευσης μπορεί να επιτύχει επίσης \uparrow δυναμικότητας έως 35%.
- Αέριο προϊόν $T \sim 480-650^{\circ}\text{C}$ μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα σαν αέριο καύσιμο, μετά την απομάκρυνση της σωματιδιακής ύλης.
- Τροφοδοσία: γαιάνθρακας $> 6.3\text{mm}$ και θερμοκρασίες τήξης τέφρας $> 1200^{\circ}\text{C}$
- Ο χρόνος παραμονής σωματιδίων γαιάνθρακα ~ 4 ώρες \rightarrow αυτό περιορίζει την ποσότητα τροφοδοσίας αντιδραστήρα
- Αεριοποιητές ενός ή 2 σταδίων παράγουν έως $233 \times 10^3 \text{m}^3/\text{d}$ καθαρού αερίου με θερμαντική αξία $4.56- 6.07 \text{MJ}/\text{m}^3$ αν χρησιμοποιείται αέρας, ή $10-25 \text{MJ}/\text{m}^3$, αν χρησιμοποιείται οξυγόνο (από τροφοδοσία γαιάνθρακα $73\text{t}/\text{d}$)
- Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευασθεί πάνω από 25 μονάδες.

4.5.3. Η Διεργασία Ρευστοστερεάς Κλίνης Winkler



- Τυπική κλίνη εμπορικής χρήσης: διάμετρος 5.5m & ύψος 23m. Δυναμικότητα: 1100t/d γαιάνθρακα σε 1 atm και 1800t/d σε πίεση 0.4MPa
- Οι σχετικά μικρές T περιορίζουν την χρήση με περισσότερο αντιδραστικούς λιγνίτες και υποασφατούχους γαιάνθρακες. Επιτεύξιμα επίπεδα μετατροπής της τάξης του 90%, με χρόνους παραμονής μεταξύ 20 και 30 λεπτών
- T κλίνης διατηρείται ~800°C-1100°C για την αποφυγή τήξης της τέφρας. Αέριο προϊόν: CO, H₂, CO₂ & λίγο CH₄. Δεν υπάρχουν πίεσες ή άλλοι βαρείς H/C.
- Τροφοδοσία: γαιάνθρακας <9.5mm. Η περιεκτικότητα σε τέφρα δεν εμποδίζει αυτήν την διεργασία
- Υγρασία γαιάνθρακα ≤18% → αναγκαία η ξήρανση. Απουσία τάσεων συσσώρευσης υποβοηθά την επαφή αερίου-στερεού και την διατήρηση κατάλληλης κατανομής μεγεθών στην κλίνη

Εγκαταστάσεις Ρευστοστερεάς Κλίνης Winkler

- Σήμερα οι μεγαλύτερες εγκαταστάσεις που παράγουν αέριο σύνθεσης για παραγωγή αμμωνίας, βρίσκονται στο Gorzade της Γιουγκοσλαβίας, την Kutahya της Τουρκίας και το Madras της Ινδίας.



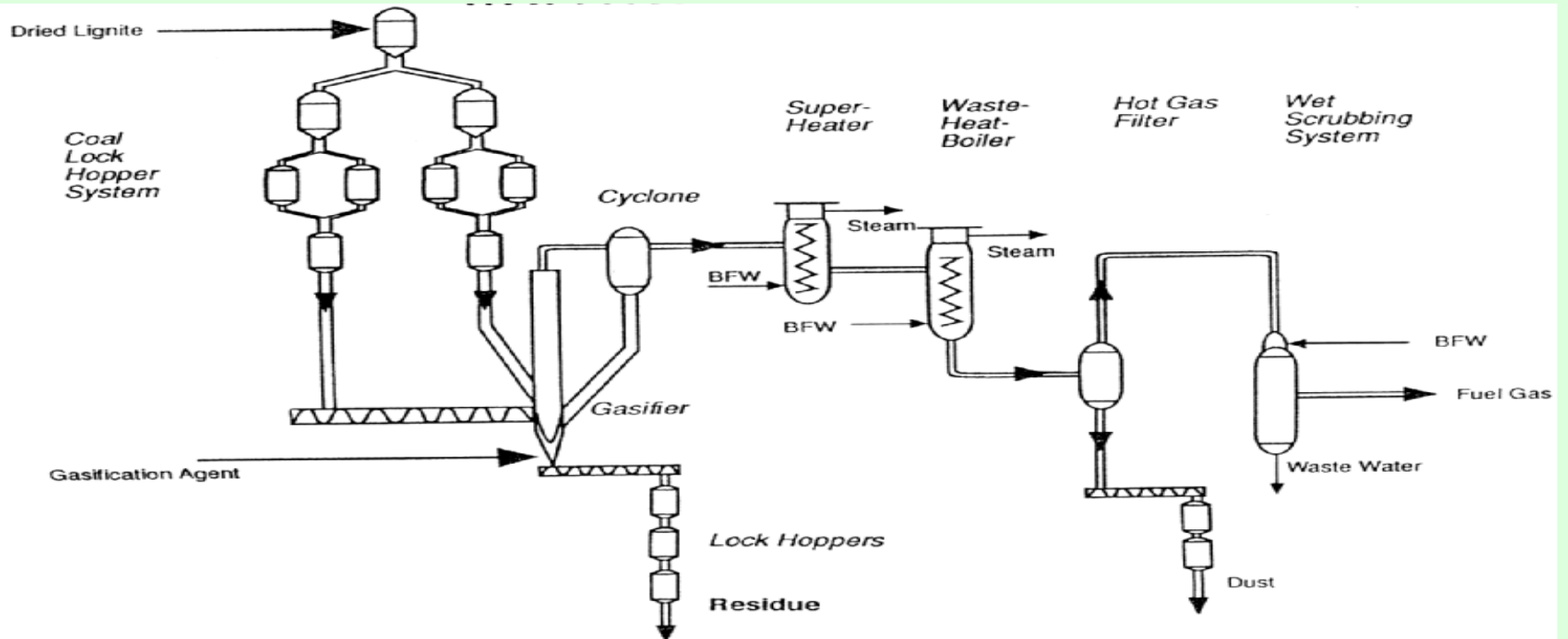
- Μερικές μονάδες έχουν μέχρι και 7 αεριοποιητές και βρίσκονται σε λειτουργία από το 1950. Η μονάδα στην Kutahya χρησιμοποιεί επιτυχώς αεριοποιητές Winkler >20 χρόνια. Η δυναμικότητα σχεδιασμού είναι 24000m³/h, αν και η μονάδα έχει λειτουργήσει στο 130% της δυναμικότητας σχεδιασμού με Τουρκικούς λιγνίτες, περιεκτικότητας σε άνθρακα 73.7% και σε τέφρα 50%

- Πρόσφατα, μια Γερμανική Εταιρία (Rheinbraun) ανέπτυξε την διεργασία High Temperature Winkler (HTW) για λειτουργία σε υψηλές T, P.

↑ T → ↑ ρυθμού αεριοποίησης & βελτίωση ποιότητας αερίου. Η προσθήκη ασβεστόλιθου αυξάνει το σημείο τήξης της τέφρας → σχηματισμός τέφρας σε θρύμματα. ↑ P → ↑ ρυθμό αεριοποίησης → δυνατή η κατασκευή μονάδων υψηλότερης δυναμικότητας. Το κόστος για παροχή του μέσου οξείδωσης υπό πίεση αντισταθμίζεται με μειώσεις κόστους στην συμπίεση του αερίου προϊόντος



- Η εταιρία Rheinbraun εγκατέστησε μία πιλοτική μονάδα HTW στο Wesseling το 1989 η οποία λειτουργεί σε αυξημένη πίεση 2.5MPa. Επίσης, μαζί με την εταιρία Rheinisch Westfalische Elektrizitätswerk AG (RWE) σχεδιάζουν την κατασκευή μίας μονάδας επίδειξης δυναμικότητας 320MWe, για 1 θερμοηλεκτρική μονάδα συνδυασμένου κύκλου



Σχήμα 4.11 Διάγραμμα ροής μονάδας HTW υπό πίεση

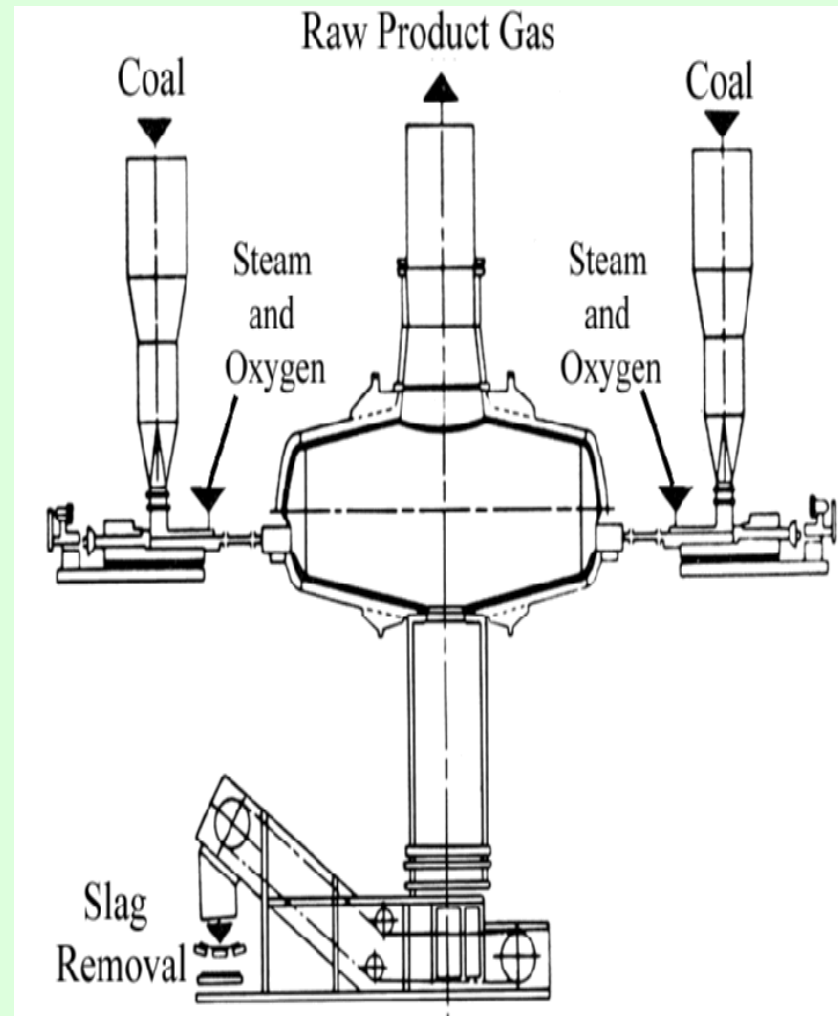
		Πιλοτ. Μονάδα 1978-85	Μονάδα Επίδειξης από το 1986	Αεριοποίηση HTW υπό Πίεση από το 1989	
				Δεδομ. Λειτουργίας	Υπολογ. Δεδομ.
Πίεση	bar	10	10	25	25
Εσωτερική διάμετρος	m	0.6	2.75	0.6	0.6
Ροή μάζας γαιάνθρακα	t/m ² h	4.5	4.5	24.3	24.3
Κατανάλωση οξυγόνου	m ³ (STP) / t _{Coal} /maf	401	390	370	390
Αποδοτικ. μετατροπής C	%	89	95.3	90.5	95.2
Αποδοτ. ψυχρ. αερίου (LHV)	%	73	85.1	77.3	81.3
Ειδική ροή αερίου καυσίμου (LHV)	MW/m ²	18.3	23.3	100.5	105.8
Αποδοτικ. κυκλώνα	%	-	94	85	92

Πίνακας 4.4

Αεριοποίηση υπό πίεση μονάδας HTW – Σύγκριση με άλλες μονάδες HTW

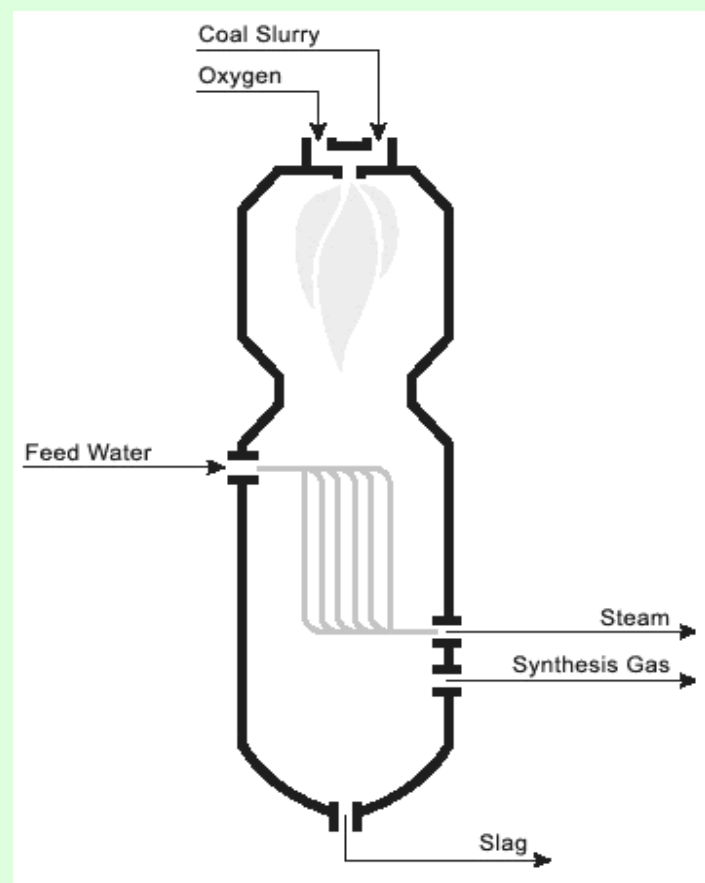
4.5.4 Η Διεργασία Παρασυρόμενης Κλίνης Koppers-Totzek

- Τυπική κλίνη : διάμετρος 3.5m & ύψος 7.5m. Δυναμικότητα: 210t/d γαιάνθρακα (1 atm)
- Αέριο προϊόν: (T=1500°C) CO, H₂, CO₂ & λίγο CH₄. Τέφρα: 50% απομακρύνεται σαν σκωρία και 50% σαν ιπτάμενη τέφρα (αποβολή μέσω συστήματος καθαρισμού αερίων)
- Τροφοδοσία: γαιάνθρακας < 75μm (υγρασία 2%- 8%)
- Μετατροπή γαιάνθρακα ↑ απ' ότι σε ρευστοστερεά κλίνη: 92-95% για ασφαλτούχους και ~100% για λιγνίτες. Αντικίνητρα είναι: απώλεια αισθητής θερμότητας, κατά την ψύξη σε T περιβάλλοντος του ακατέργαστου αερίου για καθαρισμό & ανάγκη συμπίεσης του καθαρού αερίου για χημική σύνθεση (σε επόμενο στάδιο λειτουργίας της εγκατάστασης)
- Δυνατή χρήση γαιάνθρακων κάθε τάξης (μεγάλο εύρος περιεκτικότητας σε τέφρα και υγρασία). Χαμηλή κατανάλωση ατμού (μηδενική για λιγνίτη). Απλές εγκαταστάσεις κατεργασίας απόβλητου ύδατος αφού δεν περιέχει πίσσα, έλαια και H/C
- 14 εγκαταστάσεις σε όλο τον κόσμο με >50 αεριοποιητές. Οι μεγαλύτερες μονάδες βρίσκονται στην Ινδία και την Νότιο Αφρική, και παράγουν ένα αέριο πλούσιο σε H₂ για σύνθεση NH₃ ή CH₃OH



4.6. Διεργασίες υπό Ανάπτυξη

- Σκοπός: ανάπτυξη αντιδραστήρων «δεύτερης γενεάς» → δημιουργία βελτιωμένης τεχνολογίας για παραγωγή φυσικού αερίου (SNG) πολύ μεγάλης κλίμακας
- Οι διαθέσιμες εμπορικές διεργασίες αεριοποίησης είναι ικανές να παράγουν συνθετικό αέριο κατάλληλο για μετατροπή σε υποκατάστατο του SNG & άλλα πετροχημικά αλλά → θεωρούνται ανεπαρκείς για παραγωγή μεγάλης κλίμακας
- Ανάπτυξη αεριοποιητών οι οποίοι (α) θα χρησιμοποιούν παροχές του ύψους των 5000-10000 τόνων γαιάνθρακα και (β) θα μπορούν να λειτουργήσουν σε πιέσεις αντίστοιχες αυτών των συμβατικών σωληνώσεων διανομής (~6.7MPa)
- Αποτέλεσμα → σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής SNG → επίπεδα μεγαλύτερης τεχνικής αξιοπιστίας της αεριοποίησης μεγάλης κλίμακας → και ανάπτυξη καινοτόμων ιδεών σχεδιασμού και επεξεργασίας όπως η διεργασία Ολοκληρωμένης Αεριοποίησης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC).



Διεργασία Ολοκληρωμένης Αεριοποίησης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

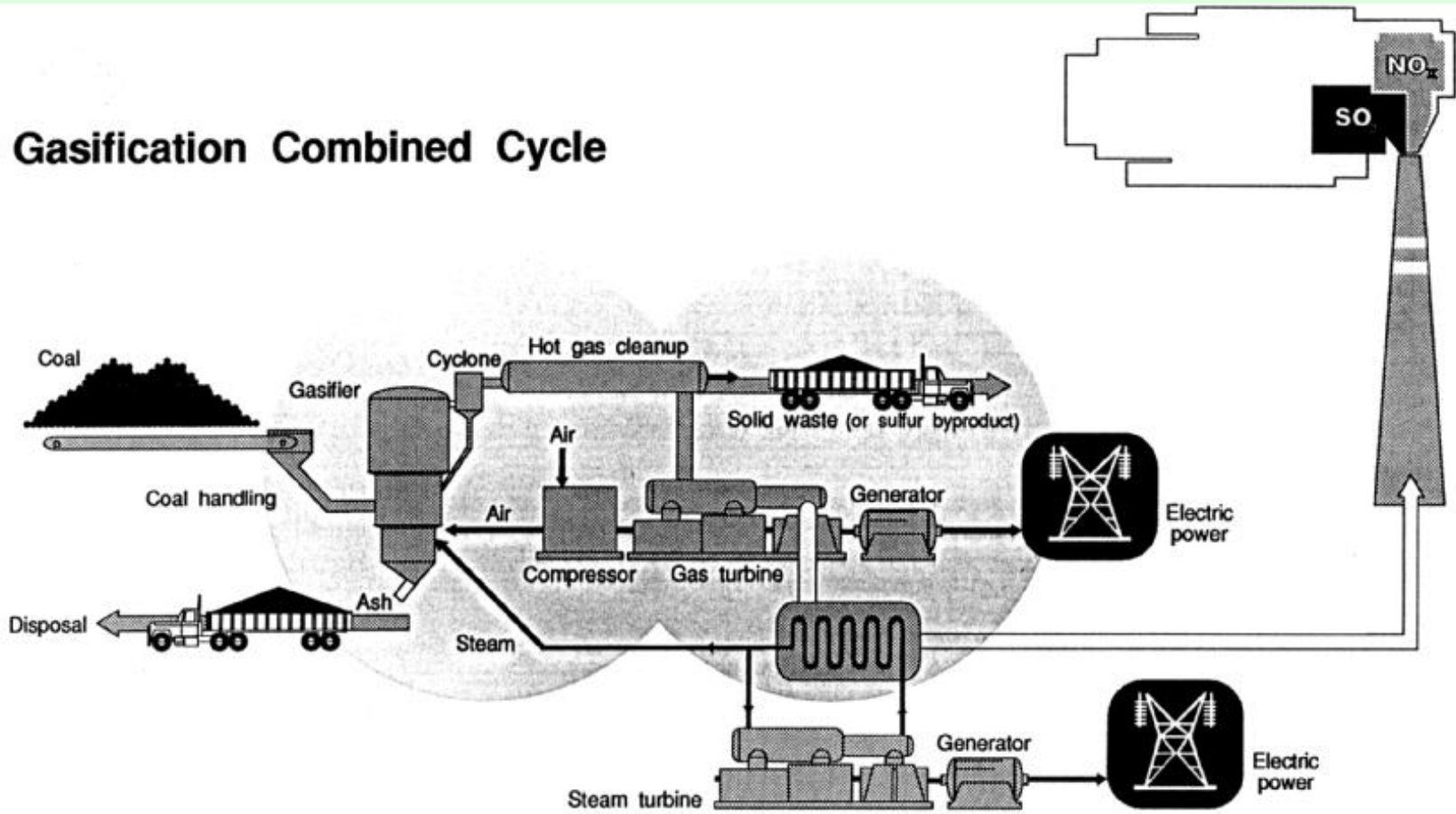
Περιλαμβάνει 4 βήματα:

1. αντίδραση: γαιάνθρακας+ατμός υψηλής T+ οξειδωτικό μέσο (οξυγόνο/αέρας)--> καύσιμο αέριο (σε αναγωγική ατμόσφαιρα)
2. ψύξη αερίου-->παράγωγή ατμού-->καθαρισμός για περαιτέρω απομάκρυνση της σωματιδιακής ύλης και των SO_x, NO_x
3. καύση καθαρού καύσιμου αερίου -->γεννήτρια αεριοστροβίλου --> παραγωγή ηλεκτρισμού
4. ανάκτηση υπολειμματικής θερμότητας του αερίου εκτόνωσης του αεριοστροβίλου σε μία γεννήτρια με ατμό--> παραγωγή επιπρόσθετης ενέργειας σε μία γεννήτρια στροβίλου ατμού

Πλεονεκτήματα:

- από τις "καθαρότερες" και αποτελεσματικότερες τεχνολογίες γαιάνθρακα. Προτιμάται σε μονάδες καύσης γαιανθράκων χαμηλής τάξης νέας γενεάς
- πολύ χαμηλά επίπεδα εκπομπής ρυπαντών (έχει επιτευχθεί μείωση NO_x και θείου > 90% και 99% αντίστοιχα) & μειωμένες εκπομπές CO₂ σε σύγκριση με μονάδες καύσης κονιοποιημένου γαιάνθρακα
- μικρότερα προβλήματα στερεών αποβλήτων, μεγάλη θερμική αποδοτικότητα και βελτιωμένα οικονομικά χαρακτηριστικά.
- για την επίτευξη χαμηλού επιπέδου εκπομπών & για την προστασία των συσκευών από διάβρωση (πχ. αεριοστροβίλος) -->απαραίτητος ο καθαρισμός αέριων προϊόντων σε υψηλό βαθμό. Αν χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα καθαρισμού θερμών αερίων-->επίπεδα αποδοτικότητας 45-50% (για T εισόδου στροβίλων ~1200°C)

Gasification Combined Cycle



SO ₂ REDUCTION	NO _x	EFFICIENCY	NEW PLANT		REPOWERED PLANT			
			CAPITAL COST	ELECTRICITY COST	CAPITAL COST	INCREMENTAL ELECTRICITY COST	POWER OUTPUT	LIFE EXTENSION
95-99%	>90%	40-42%	\$1,100-1,400 PER KW	45-50 MILLS/KWH	\$950-1,200 PER KW	0-4 MILLS/KWH	100-200% INCREASE	25-30 YEARS

Σχήμα 4.13 Η διεργασία Ολοκληρωμένης Αεριοποίησης Συνδυασμένου Κύκλου 31

Διεργασία Ολοκληρωμένης Αεριοποίησης Συνδυασμένου Κύκλου (IGCC)

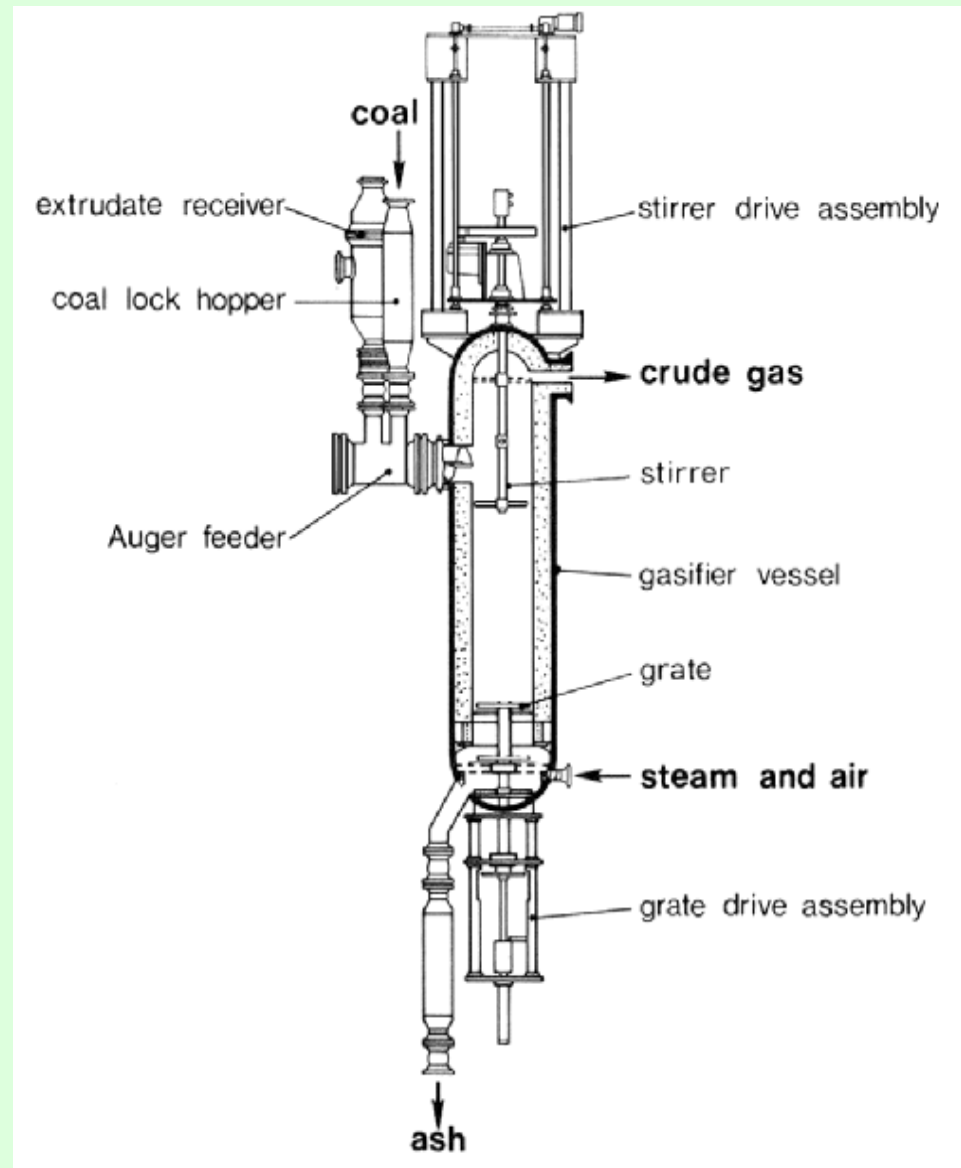
- Αναβάθμιση μονάδων με χρήση της IGCC: προστίθενται 1 αεριοποιητής, 1 μονάδα καθαρισμού του αερίου ρεύματος, 1 αεριοστρόβιλος και 1 λέβητας ανάκτησης θερμότητας.
- Αποτέλεσμα: επιμήκυνση της διάρκειας λειτουργίας της μονάδας κατά ένα χρονικό διάστημα αντίστοιχο με αυτό 1 νέας μονάδας, & επιπλέον αύξηση της ονομαστικής αποδοτικότητας από 35% σε >40%. Αύξηση της συνολικής δυναμικότητας μονάδας κατά ποσοστά 50-150%, με παράλληλη σημαντική μείωση των εκπομπών. Το επιπρόσθετο κόστος για την αυξημένη δυναμικότητα < κόστος για μία νέα μονάδα κωνιοποιημένου γαιάνθρακα
- Οι κυριότερες μονάδες που χρησιμοποιούν διεργασίες IGCC, είναι οι ευρωπαϊκές μονάδες Buggenum στην Ολλανδία (253MW), η Puertollano στην Ισπανία (300MW) και αυτές του ποταμού Wabash (265MW), της κομητείας του Polk (260MW), καθώς και του Pinon Pine (80MW) στις ΗΠΑ, Hycol στην Ιαπωνία (250MW, 540MW υπό κατασκευή)
- Δυναμικότητα θερμοηλεκτρικών σταθμών:

	σήμερα	2010	2020
Ευρώπη	0.6GWe	2.9GWe	6.5GWe
Κόσμος	1.2GWe	14.15GWe	32.7GWe

4.6.1. Διεργασίες Αεριοποίησης Σταθερής Κλίνης

I. Η Διεργασία GEGAS

- Επεξεργάζεται όλους τους τύπους γαιάνθρακα, συμπεριλαμβανομένων και των λεπτόκοκκων, με μειωμένες απαιτήσεις σε ατμό.
- Ο αεριοποιητής παράγει αέριο μικρής θερμαντικής άξιας και λειτουργεί σε πιέσεις μέχρι 2MPa. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι ένα σύστημα τροφοδοσίας κοχλία, ένα σύστημα ανάδευσης και ένας νέος σχεδιασμός της εσχάρας.
- Η ανάδευση της κλίνης μειώνει την κατανάλωση ατμού κατά ~30%, από τα κανονικά επίπεδα
- Η GEGAS έχει λειτουργήσει για χρονικές περιόδους μέχρι και 40 ώρες σε παροχή σχεδιασμού 1t/h (γαιάνθρακες Pittsburgh No. 8 και Illinois No. 6). Η General Electric έχει δοκιμάσει και κατοχυρώσει ένα εναλλακτικό σύστημα διαχείρισης γαιανθράκων με τάσεις συσσωμάτωσης και διόγκωσης

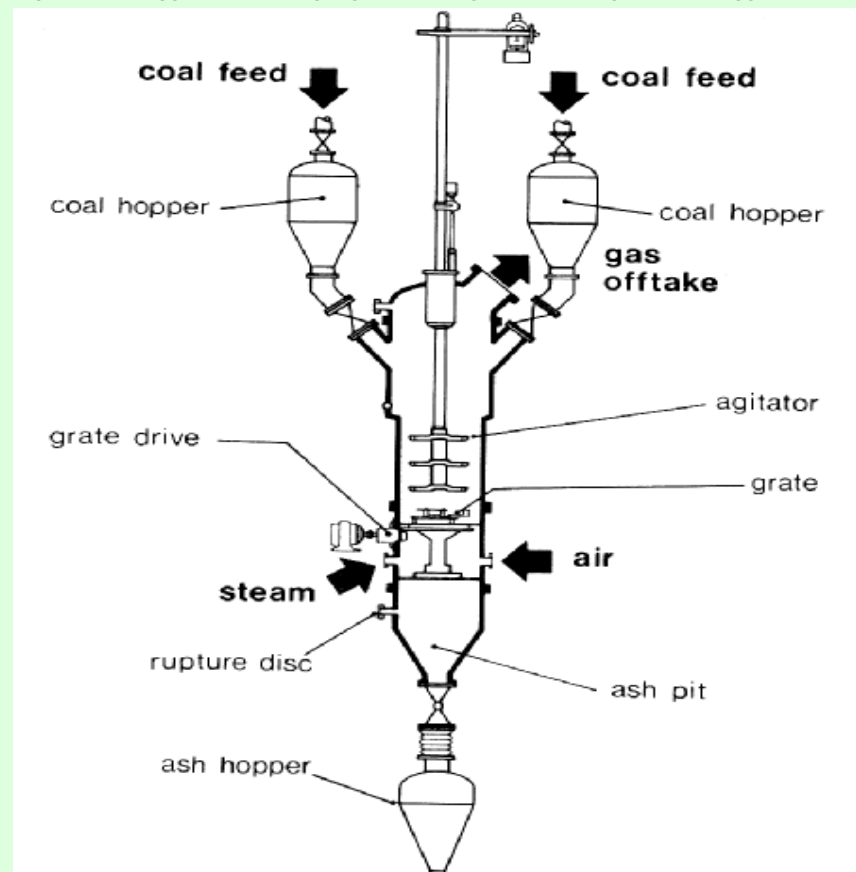


II. Η Διεργασία KILnGAS

- Χρησιμοποιεί ένα περιστρεφόμενο κλίβανο με θύρες έγχυσης. Λειτουργεί με καθοδική ροή υπό πίεση περίπου 0.7MPa. Επένδυση με πυρίμαχο υλικό, για να αντέξει τις υψηλές Τ λειτουργίας, ~1090°C.
- Χρησιμοποιεί γαιάνθρακες με ισχυρές τάσεις συσσωμάτωσης και περιεκτικότητα σε λεπτά σωματίδια έως 40%.
- Η μέση θερμαντική αξία του αερίου προϊόντος είναι 5600kJ/m³. Η εταιρία Allis-Chalmers έχει κατασκευάσει μία μονάδα επίδειξης, που κατεργάζεται 800t/d γαιάνθρακα και παράγει καύσιμο για μία υφιστάμενη μονάδα 50MW.

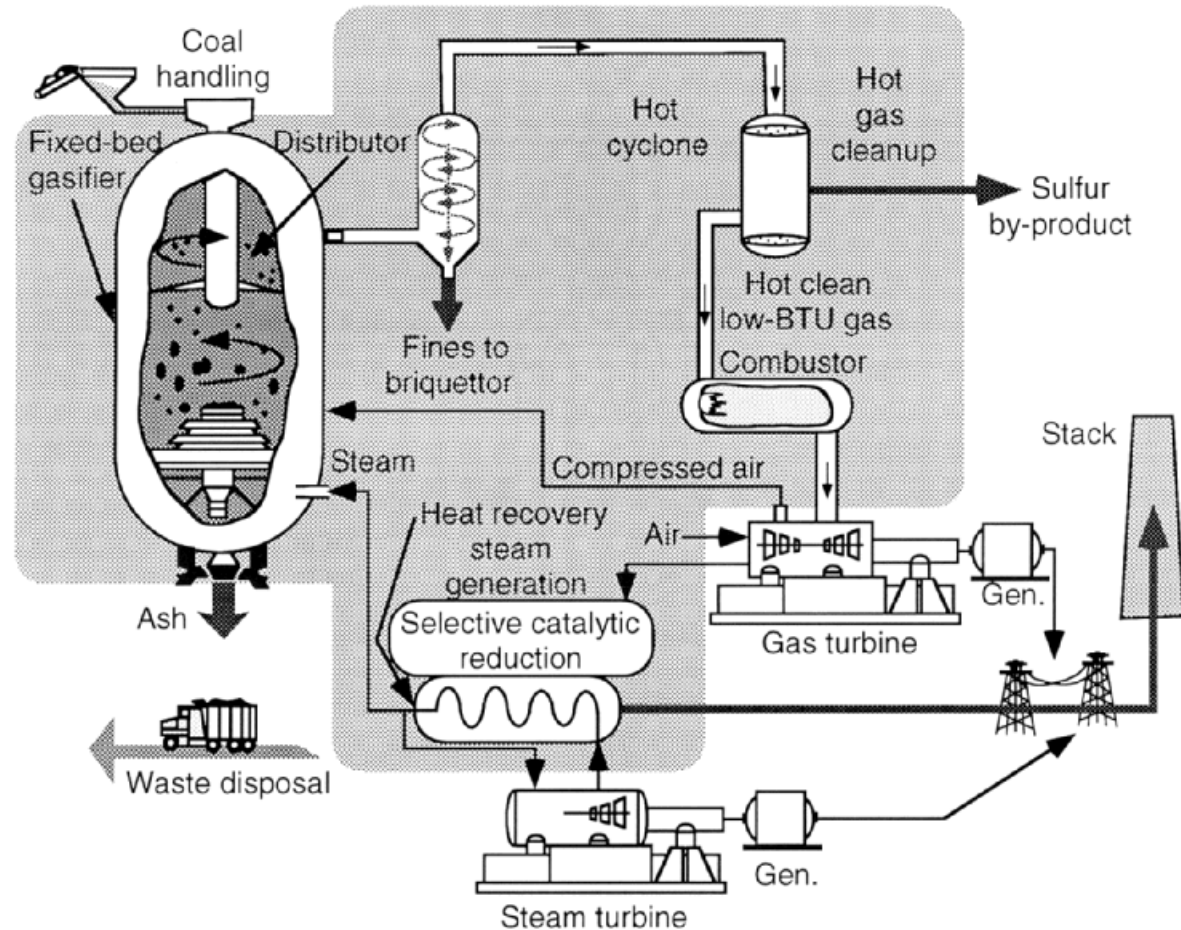
III. Η Διεργασία MORGAS

- Ανάπτυξη: Κέντρο Ερευνών Morgantown, Δυτική Virginia. Χρησιμοποιεί έναν αεριοποιητή σταθερής κλίνης 1 σταδίου που λειτουργεί με αέρα και υπό πίεση 1-4MPa.
- Δυνατότητα παροχής 20t/d (διαμέτρος 1m). Κύρια χαρακτηριστικά: ο αναδευτήρας και οι διπλοί δοσομετρητές. Το αέριο προϊόν έχει θερμαντική αξία ~5600kJ/m³. Έχουν αεριοποιηθεί επιτυχώς γαιάνθρακες με ισχυρές τάσεις συσσωμάτωσης και χωρίς τάσεις συσσωμάτωσης.



IV. Έργο Ολοκληρωμένης Αεριοποίησης Συνδυασμένου Κύκλου (Tampa Electric)

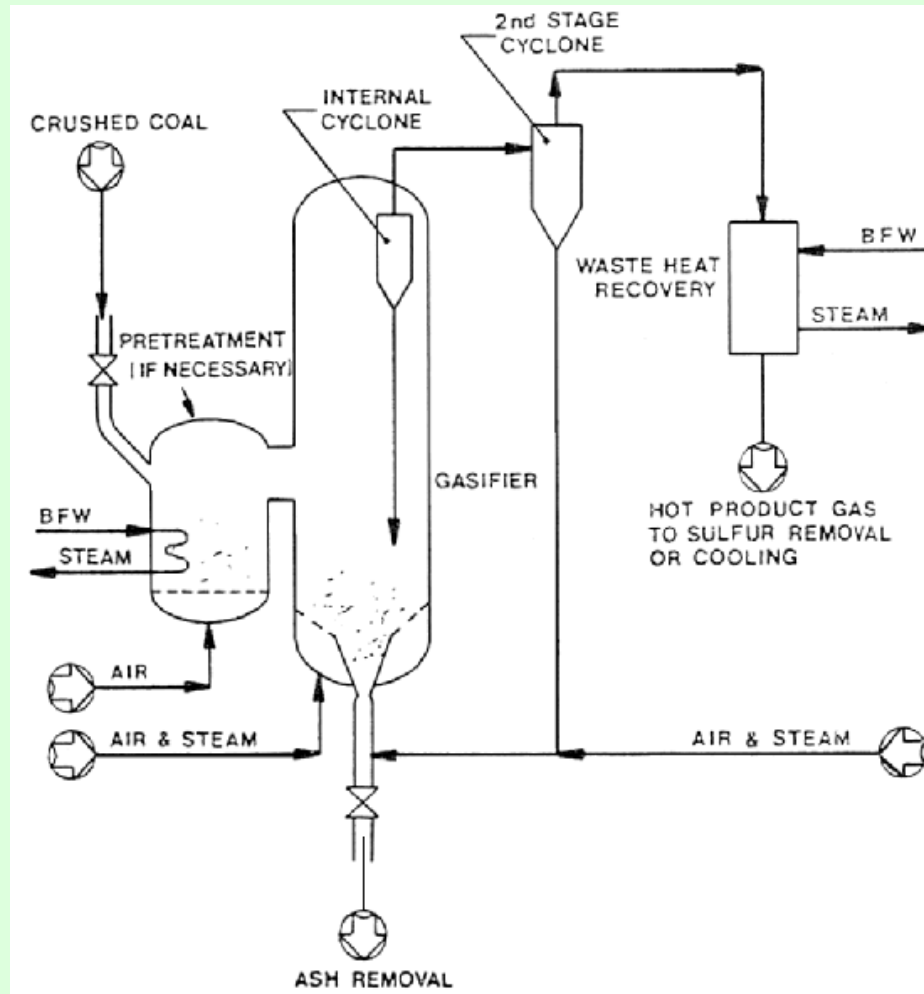
- Στόχοι: επίδειξη τεχνολογίας ολοκληρωμένης αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου σταθερής κλίνης με αέρα και αξιολόγηση της αξιοπιστίας, της διαθεσιμότητας και της δυνατότητας συντήρησής σε εμπορική κλίμακα
- 1.27t/d γαιάνθρακα υψηλής περιεκτικότητας σε θείο μετατρέπονται σε αέριο μικρής θερμαντικής αξίας-->το καθαρό αέριο χρησιμοποιείται σε σύστημα συνδυασμένου κύκλου, για την παραγωγή ηλεκτρισμού 120MW.
- Πιλοτική μονάδα: στον Θερμοηλεκτρικό Σταθμό της Tampa Electric στο Lakeland Florida. Ένα έργο 250MWe λειτουργεί από το 1996, με συνολική αποδοτικότητα 40%. Η διεργασία Tampa ήταν η πρώτη αντιρυπογόνος τεχνολογία αεριοποίησης συνδυασμένου κύκλου που τέθηκε σε εμπορική λειτουργία.

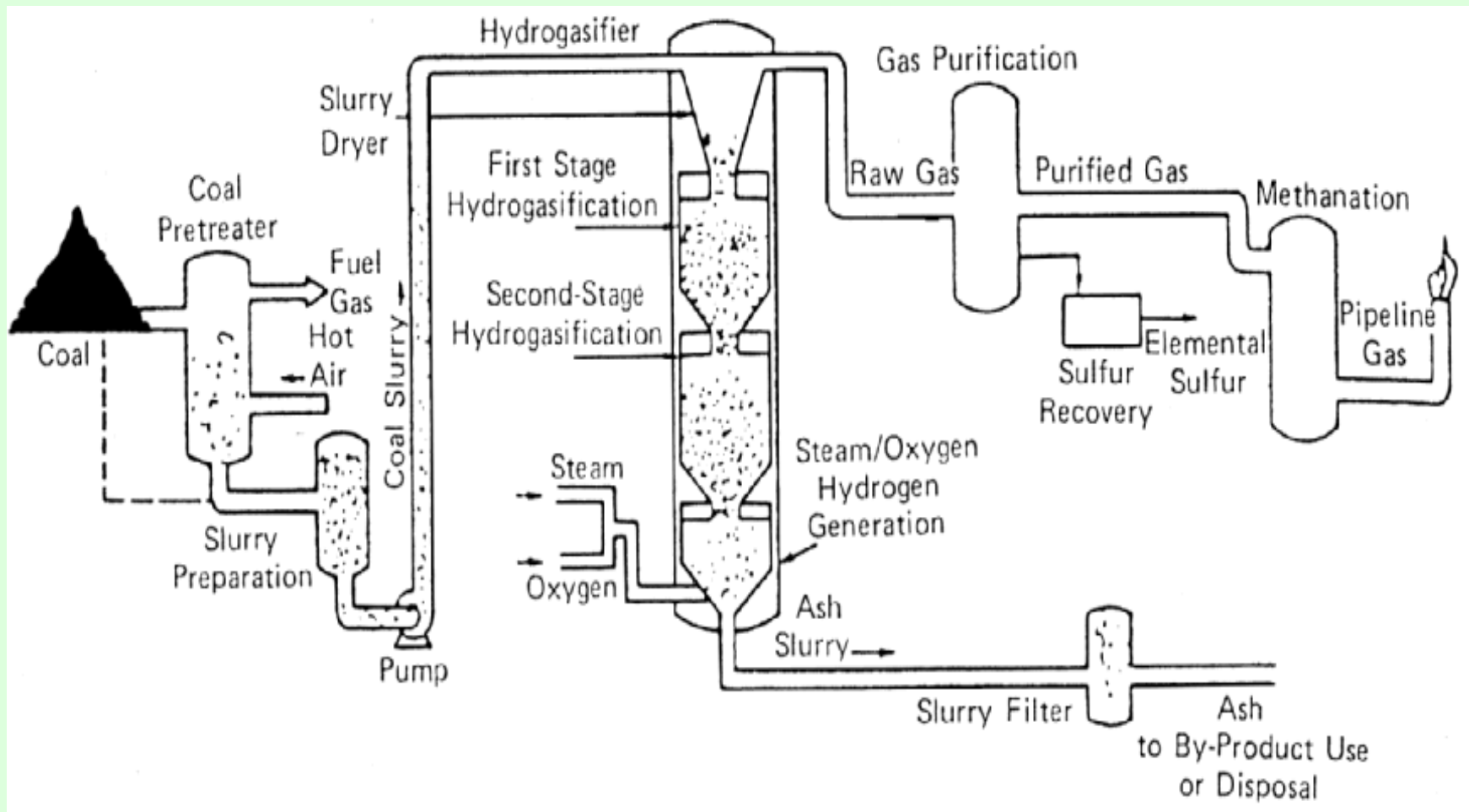


4.6.2. Διεργασίες Αεριοποίησης Ρευστοστερεάς Κλίνης

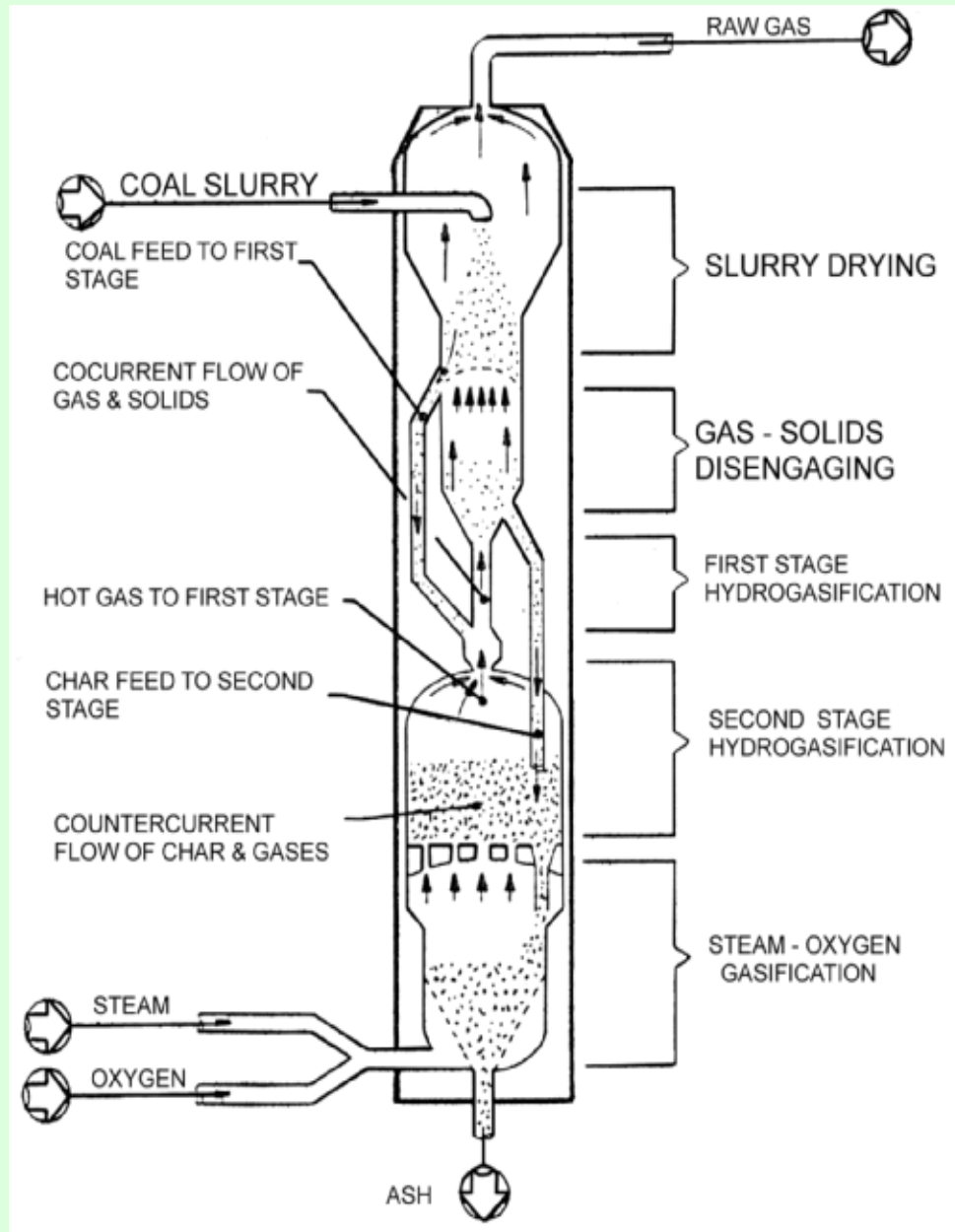
I. Η Διεργασία U-GAS

- Χρησιμοποιεί ρευστοστερεά κλίνη 1 σταδίου που λειτουργεί σε $T = 1050^{\circ}\text{C}$ και $P = 2\text{MPa}$
- Θραύση γαιάνθρακα ($<6\text{mm}$) και ξήρανση πριν τροφοδοτηθεί στον αεριοποιητή (δέχεται $<10\%$ λεπτών σωματιδίων). Οι γαιάνθρακες με ισχυρή τάση συσσωμάτωσης οξειδώνονται εκ των προτέρων σε μία ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση και $T = 430^{\circ}\text{C} \rightarrow$ απαέρια \rightarrow κυκλώνα \rightarrow εισαγωγή στον πυθμένα του αεριοποιητή
- Κρίσιμο σημείο λειτουργίας του αεριοποιητή: διατηρεί μία κλίνη με περιεκτικότητα σε άνθρακα 70% και τέφρα 30% με κατάλληλο σχεδιασμό και λειτουργία της εσχάρας και του συστήματος επιστροφής των λεπτών σωματιδίων στον πυθμένα του αεριοποιητή (χρήση εσωτερικού κυκλώνα)
- Με προσεκτική επιλογή της αναλογίας ατμού/αέρα, η θερμοκρασία μέσα στον λαιμό \rightarrow κοντά στο σημείο αποσκήρυξης της τέφρας. Τα σωματίδια τέφρας συσσωματώνονται \rightarrow αυξάνουν σε μέγεθος, μέχρι να είναι αρκετά βαριά, ώστε να κινηθούν προς τα κάτω και να συλλεχθούν \rightarrow Ποσοστά μετατροπής γαιάνθρακα της τάξης του 98%





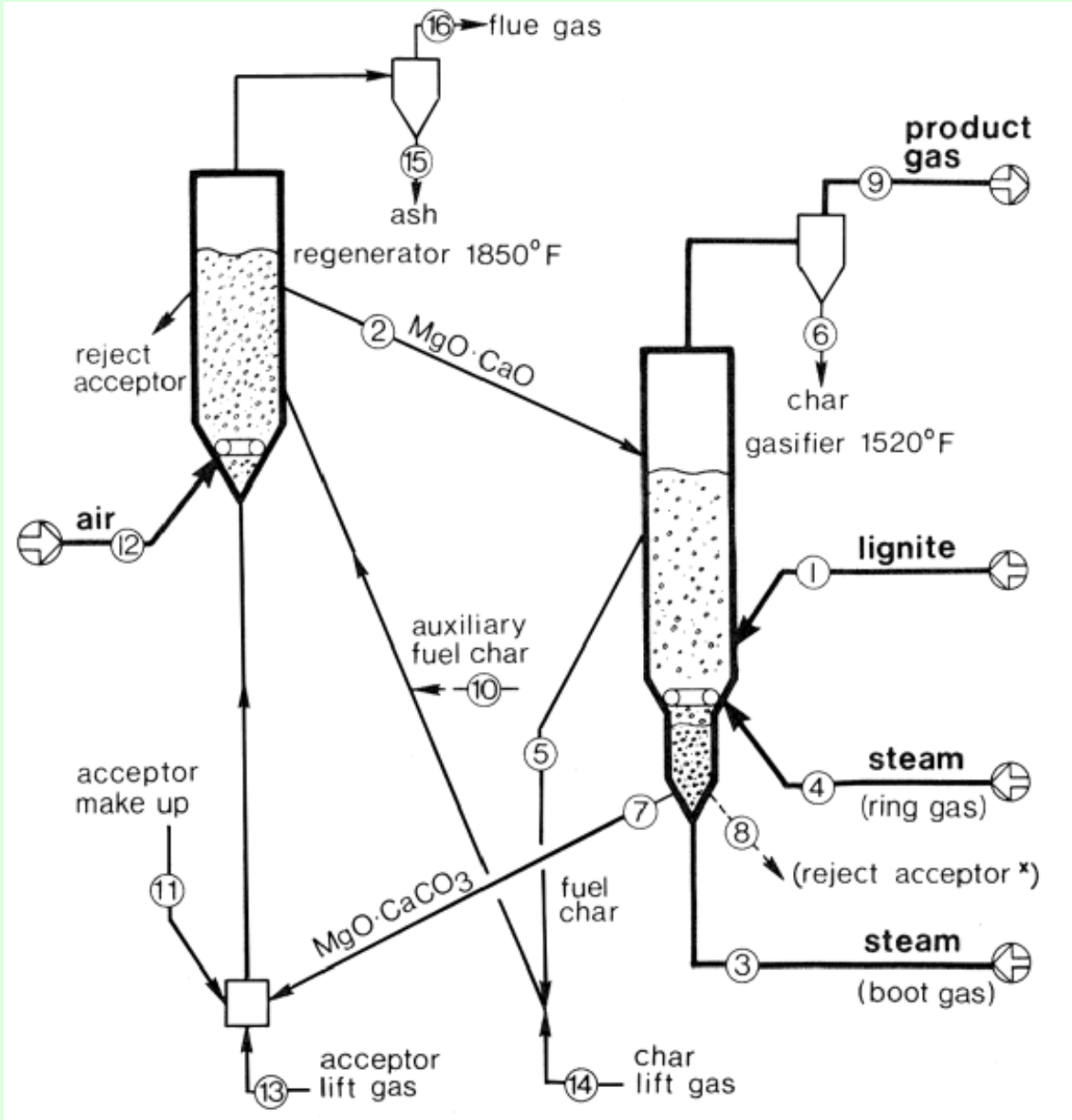
Σχήμα 4.18 Διάταξη πιλοτικής μονάδας HYGAS



Σχήμα 4.19 Αεριοποιητής HYGAS

II. Η Διεργασία HYGAS

- Αεριοποιητής: σύστημα ρευστοστερεάς κλίνης πολλαπλών σταδίων. 3 εναλλακτικές μέθοδοι για παραγωγή του μέσου αεριοποίησης: η ηλεκτροθερμική διεργασία, η διεργασία ατμού-σιδήρου και η διεργασία ατμού-οξυγόνου
- Στο σύστημα κλίνης πολλαπλών σταδίων: υδρογονο-αεριοποίηση του πιο αντιδραστικού κλάσματος του γαιάνθρακα --> παραγωγή μεθανίου (σε υψηλή P). Το υπόλοιπο κλάσμα --> παραγωγή του απαιτούμενου υδρογόνου
- Γαιάνθρακας: προ-επεξεργασία αν έχει τάση συσσωμάτωσης --> θραύση & ξήρανση --> παραγωγή χονδρόκοκκου υλικού (2.4/1.4-0.15mm)+ υπο-προϊόν αρωματικού ελαίου υδρογονοαεριοποιητή --> δημιουργία πολτού --> τροφοδοσία με αντλία (υπό P= 8MPa) στον αεριοποιητή
- Χαρακτηριστικά απαερίου: υψηλή περιεκτικότητά σε μεθάνιο --> υψηλή θερμοαντική αξία αερίου, η μικρή κατανάλωση οξυγόνου και η μεγάλη κατανάλωση του ατμού
- Η θερμική αποδοτικότητα (~74%) ↑ (α): με λειτουργία σε χαμηλή T --> περιορισμός απωλειών αισθητής θερμότητας (β): με το σύστημα τροφοδοσίας του πολτού που μειώνει τις απαιτήσεις συμπίεσης και (γ) από την υψηλή παραγωγή μεθανίου στον αεριοποιητή.
- Η διεργασία έχει δοκιμασθεί με διάφορους γαιάνθρακες πχ. λιγνίτες, υποασφαλτούχοι και ασφαλτούχοι. Πλεονέκτημα γαιανθράκων χαμηλής τάξης: υψηλότερη αντιδραστικότητα --> μείωση ποσότητας άνθρακα που χάνεται στο σύστημα απομάκρυνσης τέφρας. Επίσης δεν δημιουργούν συσσωματώσεις --> δεν φράζουν την απορροή του πολτού και τις γραμμές μεταφοράς υψηλής θερμοκρασίας. Όμως, η τάση των ξηραμένων γαιανθράκων χαμηλής τάξης να επαναπορροφούν την υγρασία --> μπορεί να περιορίσει την περιεκτικότητα του πολτού σε στερεά

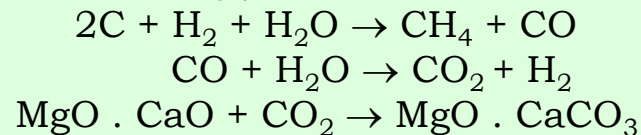


Σχήμα 4.20 Διάγραμμα ροής πιλοτικής μονάδας της διεργασίας Αποδέκτη CO₂ ⁴⁰

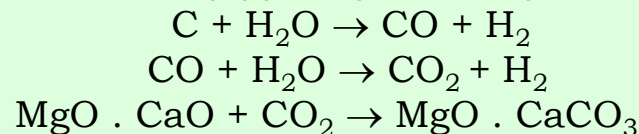
III. Η Διεργασία ΑΠΟΔΕΚΤΗ CO₂

- Αναπτύχθηκε για λιγνίτες και υποασφαλιτούχους γαιάνθρακες (Consolidation Coal Company and Conoco Coal Development Company, 1960)
- Καινοτομία: η χρήση αντιστρέψιμων εξώθερμων αντιδράσεων απανθράκωσης και ενδόθερμων αντιδράσεων ασβεστοποίησης ενός αποδέκτη (ασβεστόλιθου ή δολομίτη). Ο αποδέκτης κυκλοφορεί μεταξύ 2 αντιδραστήρων (αεριοποιητή-αναγεννητή) για την παροχή θερμότητας κατά την αεριοποίηση.

- Η αποπητικποίηση και αεριοποίηση λαμβάνουν χώρα παρουσία ατμού, μονοξειδίου του άνθρακα, υδρογόνου και του αποδέκτη (T=815°C, P=0.95 MPa):

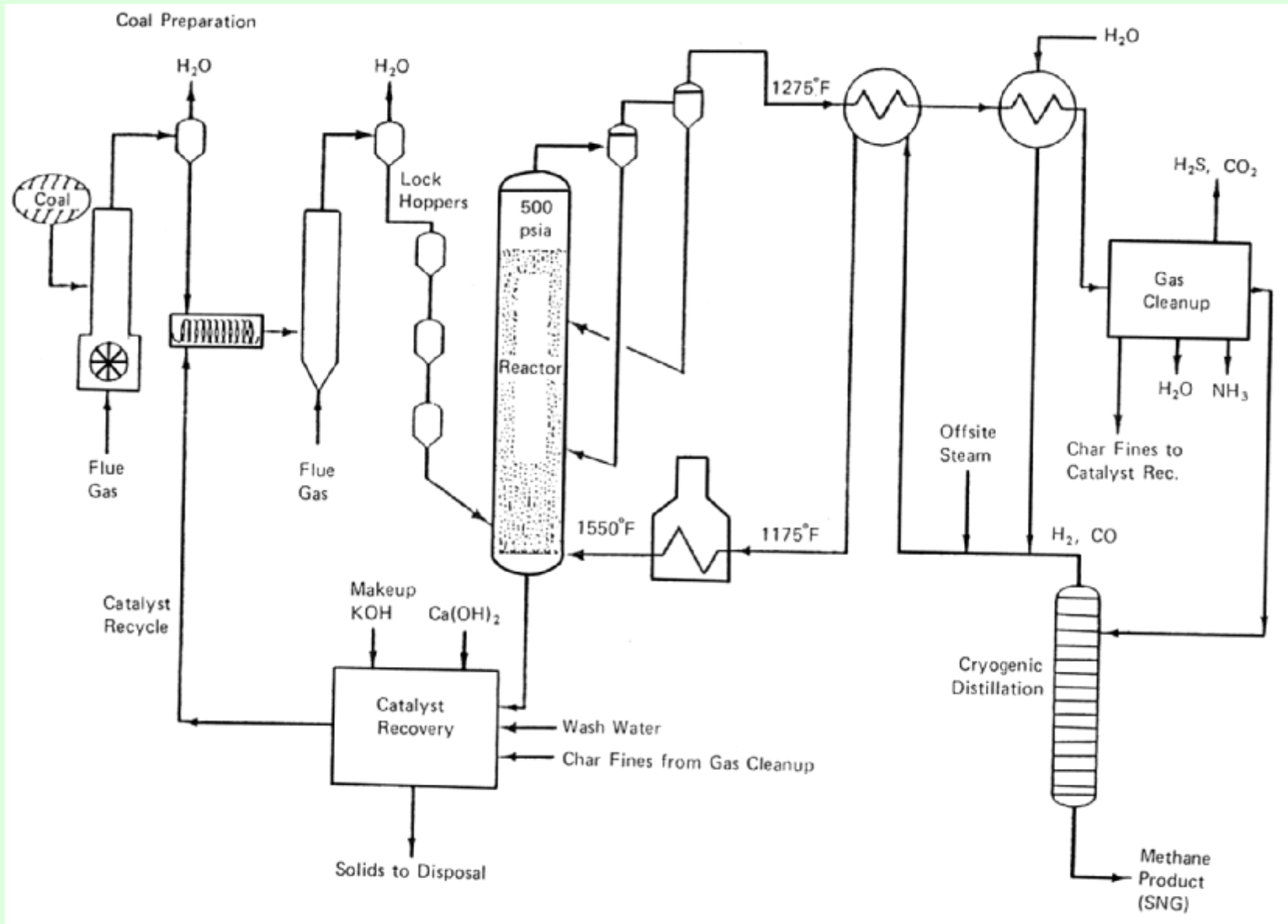


Από το πάνω μέρος της κλίνης, το εξανθράκωμα το οποίο δεν καταναλώθηκε προωθείται προς τον αεριοποιητή, όπου έρχεται σε επαφή με ατμό και περισσότερο διαπυρωμένο δολομίτη:



Το εξανθράκωμα που δεν έχει αντιδράσει, μαζί με τον καταναλωθέντα δολομίτη καίγεται στους 1065°C στην μονάδα αναγέννησης και η θερμότητα χρησιμοποιείται για την ασβεστοποίηση του δολομίτη, πριν αυτός ανακυκλωθεί.

- Χωρίς την χρήση O₂ στο σύστημα, το αέριο προϊόν έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε CH₄ --> υψηλή θερμαντική αξία & ελάχιστες ποσότητες H₂S, CO₂ ή βαρύτερων H/C.
- Χαμηλή T λειτουργίας -->περιορίζει τη χρήση με γαιάνθρακες χαμηλής τάξης.
- Κόστος διεργασίας (χρήση γαιανθράκων χαμηλού κόστους και έλλειψη ανάγκης οξυγόνου)--> χαμηλό σε σύγκριση με άλλες διεργασίες.

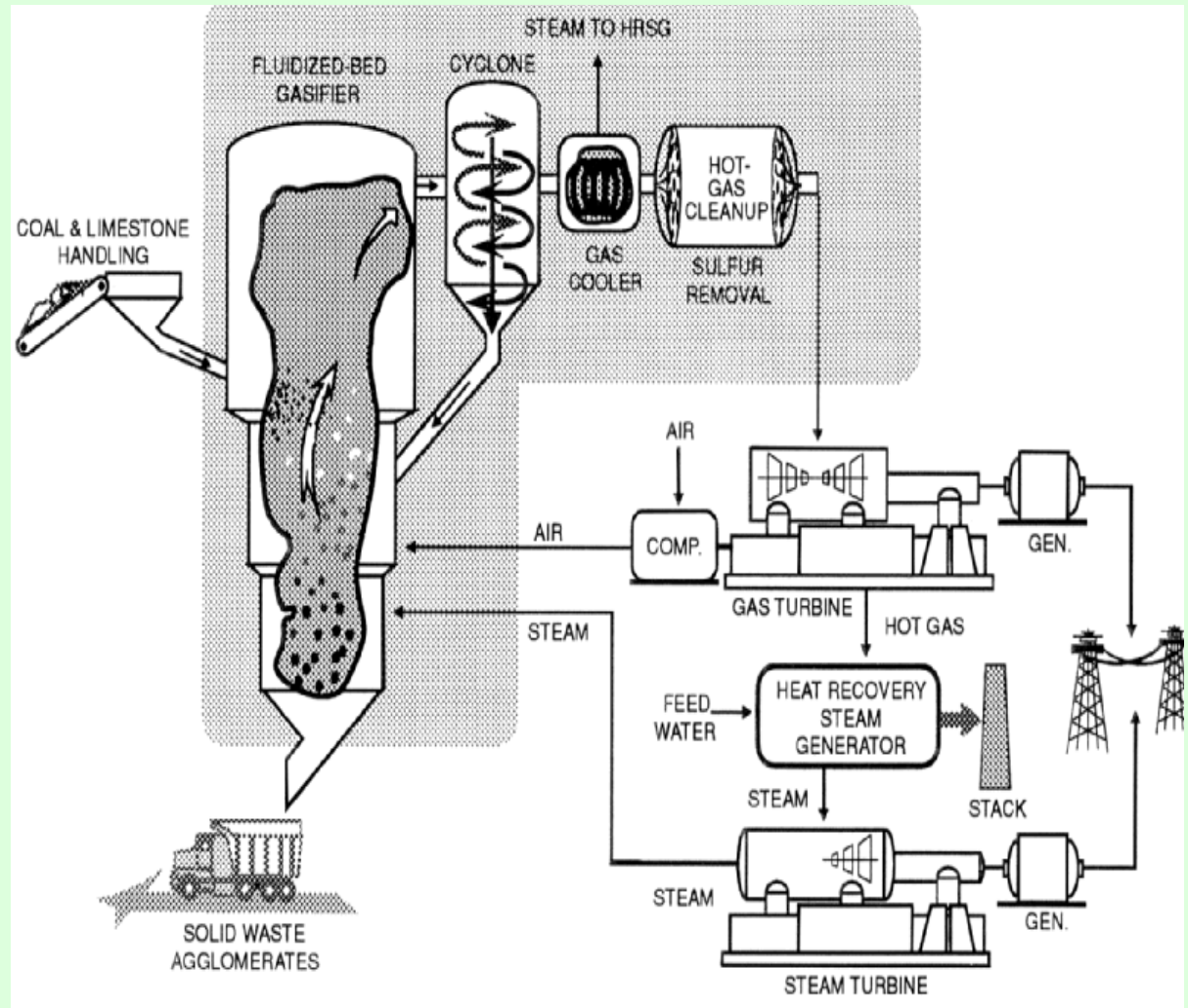


IV. Η Διεργασία ΕΧΧΟΝ

- Διεργασία Καταλυτικής Αεριοποίησης γαιάνθρακα για την παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου (Exxon Research & Engineering Company, 1968-1981)
- Χρήση αλάτων καλίου (ή άλλων αλκαλικών αλάτων)--> αύξηση ρυθμού αεριοποίησης με ατμό, προώθηση ισορροπίας σχηματισμού CH_4 & μείωση διόγκωσης και συσσωμάτωσης γαιανθράκων
- Αεριοποίηση: σε $T: 700^\circ\text{C}$ και $P: 3.4\text{MPa}$ σε αντιδραστήρα ρευστοστερεάς κλίνης.
- Απαέριο--> ροή μέσω σειράς κυκλώνων για ανάκτηση του λεπτόκοκκου υλικού --> ανακυκλώση στον αεριοποιητή. Μετά από απογύμνωση και απομάκρυνση του όξινου αερίου--> κρυογενική απόσταξη--> ανάκτηση CH_4 από τα συστατικά CO και H_2 του αερίου--> διαθέσιμο για διανομή μέσω δικτύου.
- Λόγω υψηλού κόστους καταλύτη-->κόστος διεργασίας εξαρτάται από την ποσότητα καταλύτη που μπορεί να ανακτηθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί
- Ελκυστικά χαρακτηριστικά διεργασίας: α) δεν απαιτούνται τα βήματα μετάπτωσης /σχηματισμού CH_4 , λόγω των υψηλών αποδόσεων CH_4 β) δεν απαιτείται οξυγόνο, γ) οι ιδιότητες συσσωμάτωσης του γαιάνθρακα περιορίζονται από τον καταλύτη και δ) οι χαμηλές T λειτουργίας \downarrow την δημιουργία κλίνκερ και τα προβλήματα υλικών.
- Υψηλές αντιδραστικότητες γαιανθράκων χαμηλής τάξης --> \uparrow την ήδη υψηλή παροχή αεριοποιητή. Επίσης, η τέφρα των γαιανθράκων χαμηλής τάξης --> έχει διαφορετικό αποτέλεσμα στην ενεργότητα ή την ανάκτηση του καταλύτη, από ότι στις περιπτώσεις χρήσης γαιανθράκων υψηλής τάξης.

V. Το Έργο Παραγωγής Ισχύος με Μονάδα IGCC της Pinon Pine

- Στόχοι: αξιολόγηση στροβίλου καύσης αερίου χαμηλής θερμοτικής αξίας ως προς την αξιοπιστία, διαθεσιμότητα, δυνατότητα συντήρησης και περιβαλλοντικής απόδοσης σε εμπορική κλίμακα.
- Κατάλληλο για αεριοποίηση όλων των τύπων γαιάνθρακα υπό πίεση με χρήση αέρα με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (καθαρισμός θερμών αερίων). Κατάλληλο για νέες μονάδες παραγωγής ενέργειας, ή για αναβάθμιση μονάδας, ή για συμπαραγωγή. Τέθηκε σε εμπορική λειτουργία το 1997. Ο καθαρός ρυθμός παραγωγής θερμότητας, μίας νέας μονάδας εκτιμάται σε 8.2MJ/kWh --> αύξηση της θερμικής αποδοτικότητας της τάξης του 20%, σε σύγκριση με τις συμβατικές μονάδες κονιοποιημένου γαιάνθρακα

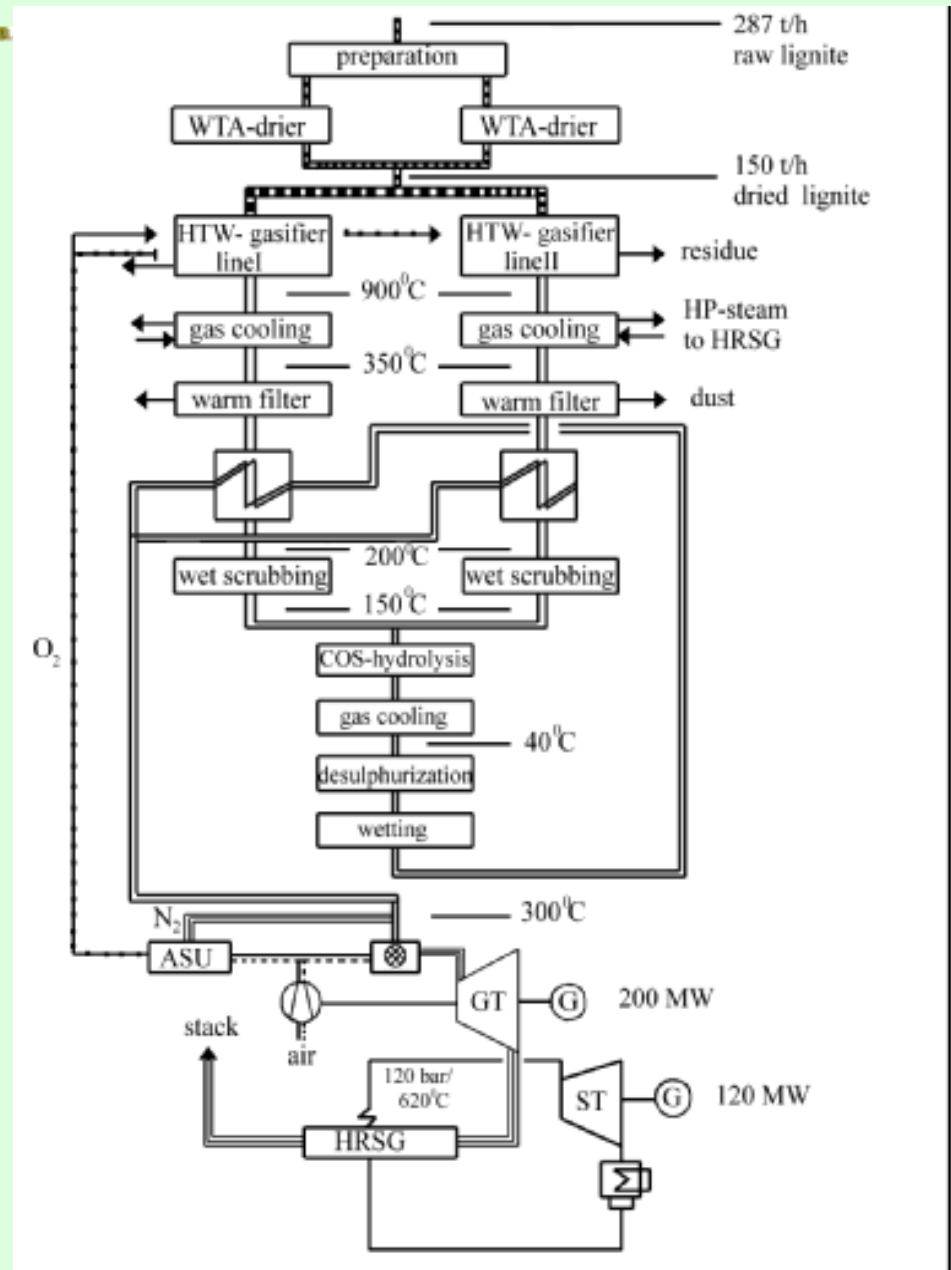


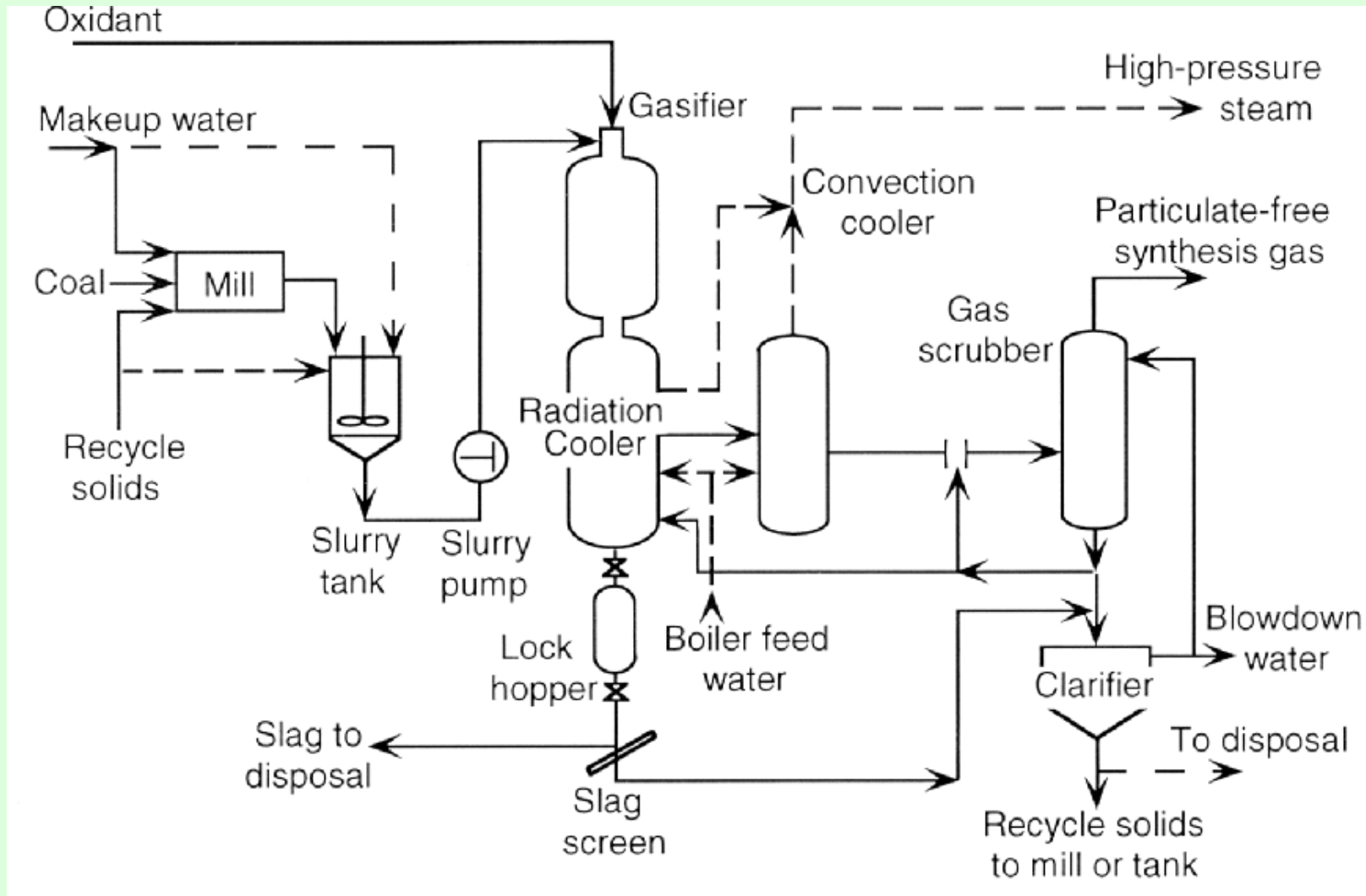
Πίνακας 4.11 Κύρια δεδομένα σχεδιασμού για το Έργο ΚοΒρα

— Παραγωγή Ηλεκτρισμού (Τιμές Σχεδιασμού)	Ο ₂ /Ατμός	Αέρας
Αεριοστρόβιλος		
Συνολική Ισχύς: □	200 MW*	210 MW*
Στρόβιλος Ατμού	120 MW	145 MW
Σύνολο	320 MW	355 MW
(*Μεγ. 230MW)		
— Ωφέλιμη Αποδοτικότητα (LHV)	45%-46%	(7,585 BTU/kWh)
— Ευελιξία	36%-110%	

VI. Το Έργο Kobra

- Χρήση διεργασίας HTW της Rheinbraun, για την κατασκευή μίας μονάδας παραγωγής ισχύος συνδυασμένου κύκλου με ολοκληρωμένη αεριοποίηση γαιανθράκων. Τέθηκε σε λειτουργία το 1996.
- Κύρια τμήματα: α) προετοιμασία λιγνίτη και τομέα ξήρανσης, β) νήσο αερίου, γ) αποθείωση ακατέργαστου αερίου και τμήμα ύγρανσης καθαρού αερίου, δ) ύγρανση καθαρού καύσιμου αερίου, ε) σύστημα αεριοστροβίλου δυναμικότητας 200MW με λέβητα ανάκτησης θερμότητας και στ) σύστημα στροβίλου ατμού.
- ↓ εκπομπών, περιορισμός εκπομπών CO₂, ↑ αποδοτικότητας, διατήρηση χαμηλού κόστους (απόδοση 45-46%)





Σχήμα 4.24 Διεργασία αεριοποίησης της Texaco

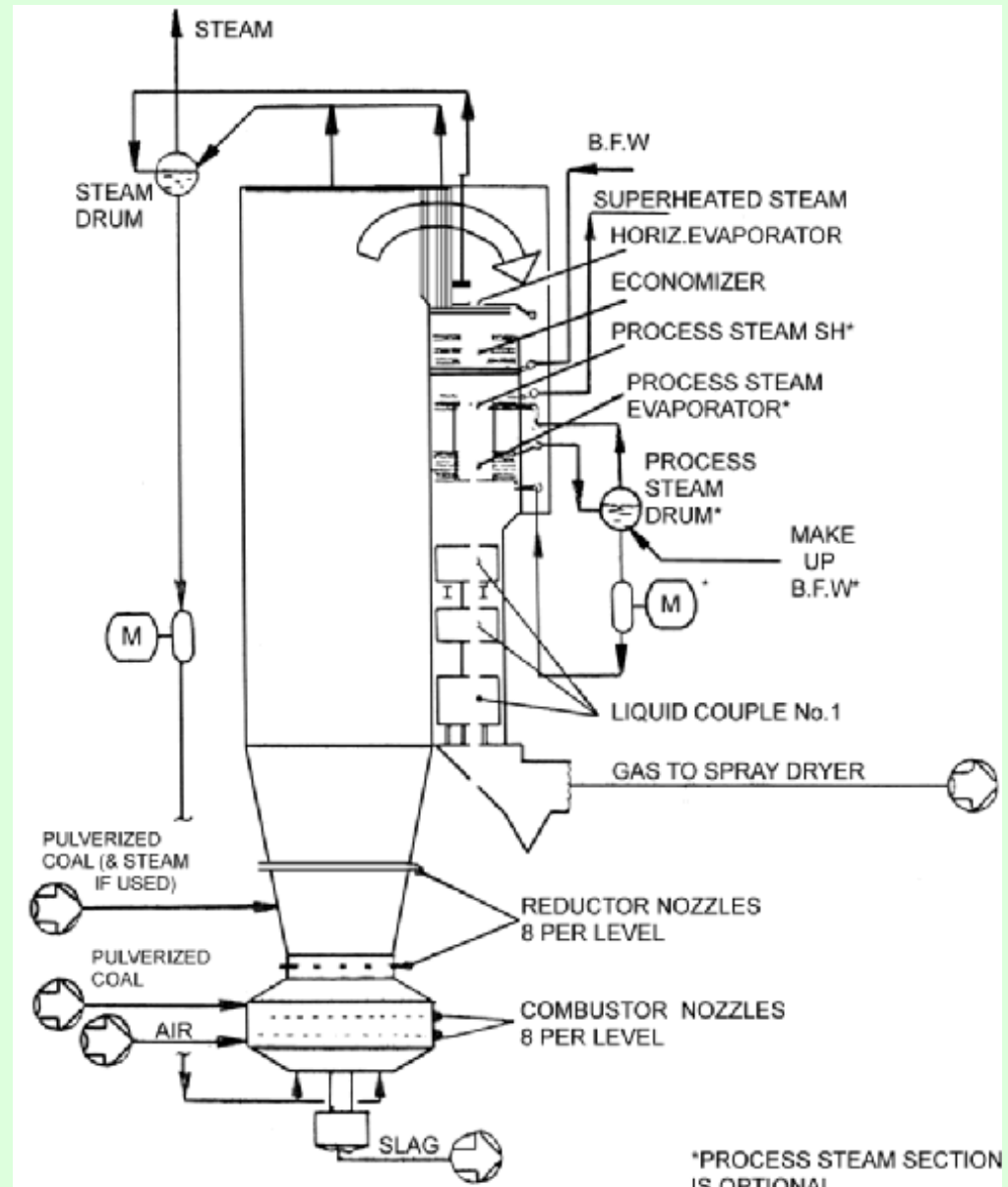
4.6.3 Διεργασίες Αεριοποίησης Παρασυρόμενης Κλίνης

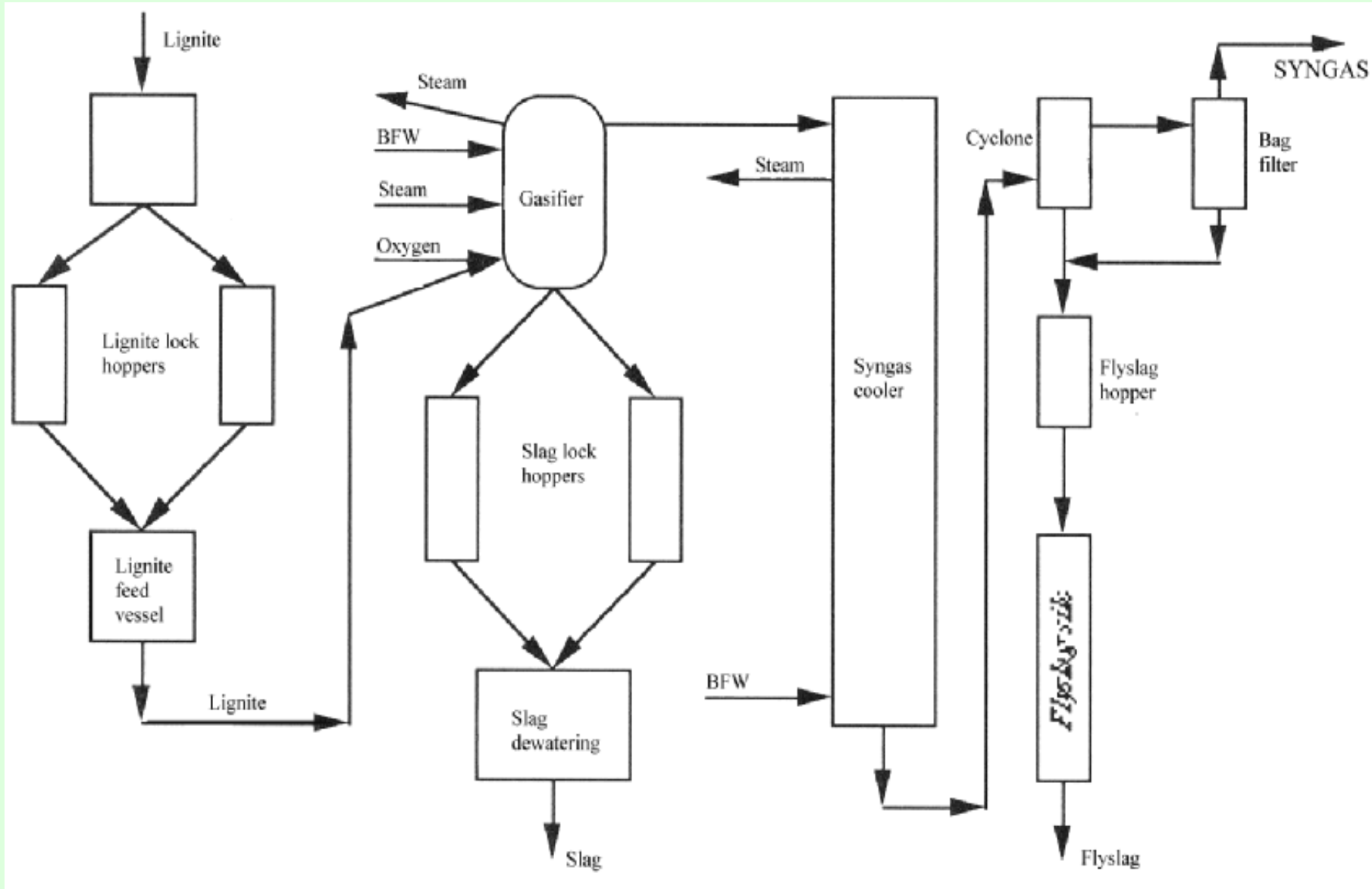
I. Η Διεργασία TEXACO

- Αναπτύχθηκε σαν αποτέλεσμα πολλών ετών εμπειρίας στην μερική οξείδωση των υπολειμματικών ελαίων του πετρελαίου → προσαρμογή στην αεριοποίηση του γαιάνθρακα → ειδική μονάδα για εναιώρηση λεπτόκοκκου γαιάνθρακα
- Ο γαιάνθρακας τροφοδοσίας κονιοποιείται και μετατρέπεται σε πολτό σε ένα υγρό κυλινδρόμυλο. Ένας χαρακτηριστικός αντιδραστήρας έχει διάμετρο 2.7m και ύψος 4.6m και λειτουργεί σε $P=4\text{MPa}$ και $T=1260^{\circ}\text{C}-1490^{\circ}\text{C}$. Στις συνθήκες αυτές, ο γαιάνθρακας μετατρέπεται κύρια σε CO , H_2 , CO_2 και μικρές ποσότητες CH_4 . Δεν παράγονται πίσσες ή έλαια, ενώ το καύσιμο άζωτο μετατρέπεται σε άζωτο και αμμωνία, το δε καύσιμο θείο ανάγεται σε υδρόθειο και μικρές ποσότητες COS
- Χρήση κάθε τύπου γαιάνθρακα. Η υψηλή αντιδραστικότητα των γαιανθράκων χαμηλής τάξης → μπορεί να ↑ αποδοτικότητα.
- Σύστημα τροφοδοσίας πολτού → σύνθετο → αποτελεί δυνητική πηγή προβλημάτων για λειτουργία σε μεγάλη κλίμακα. Λόγω του ύδατος στον πολτό → θερμότητα απορροφάται κατά την αεριοποίηση → αύξηση ποσότητας O_2 που απαιτείται για διατήρηση T λειτουργίας → μείωση αποδοτικότητας & ↑ CO_2
- 4 εμπορικές μονάδες σε λειτουργία στον κόσμο. Οι μονάδες Tennessee Eastman στις ΗΠΑ και Ube στην Ιαπωνία, παράγουν αέριο σύνθεσης για την παραγωγή μεθανόλης και αμμωνίας, αντίστοιχα. Η μονάδα Synthesegasanlage Ruhr (SAR) στην Γερμανία παράγει αέριο οξο-σύνθεσης και υδρογόνο υψηλής καθαρότητας. Η μονάδα 120MW “Coal Water” στην California μετατρέπει 900 τόνους γαιάνθρακα /ημέρα σε αέριο μέσης θερμογόνου δύναμης. Οι εκπομπές SO_2 , NO_x και σωματιδιακής ύλης → το 1/10 των ορίων που θέτουν τα Πρότυπα Απόδοσης Νέων Πηγών Ρύπανσης των ΗΠΑ για μονάδες καύσης γαιάνθρακα

II. Η Διεργασία της COMBUSTION ENGINEERING

- Χρήση αεριοποιητή παράσυρσης, πίεσης 1 atm, για την παραγωγή αερίου μικρής θερμαντικής αξίας ($3.7-4.7\text{MJ}/\text{m}^3$) για χρήση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Λόγω των υψηλών T λειτουργίας και των χαμηλών πιέσεων στον αεριοποιητή, δεν υπάρχουν CH_4 ή βαρύτεροι H/C στο απαέριο.
- Υψηλή αποδοτικότητα μετατροπής του άνθρακα \rightarrow με ανακύκλωση του εξανθρακώματος \rightarrow όμως έτσι παρουσιάζονται επιπρόσθετες ενεργειακές απαιτήσεις ή απώλεια θερμότητας.
- Υψηλότερη αντιδραστικότητα των γαιανθράκων χαμηλής τάξης \rightarrow υψηλός βαθμός μετατροπής σε ένα στάδιο, περιορίζοντας την ποσότητα του εξανθρακώματος που απαιτείται για ανακύκλωση. Όμως η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία \rightarrow μπορεί να απαιτήσει περισσότερο αέρα, για την επίτευξη συνθηκών δημιουργίας ρευστής σκωρίας





Σχήμα 4.26

Συστήματα τροφοδοσίας γαιάνθρακα, αεριοποίησης, και απομάκρυνσης στερεών για πιλοτική μονάδα αεριοποίησης Shell παρασυρόμενης ροής

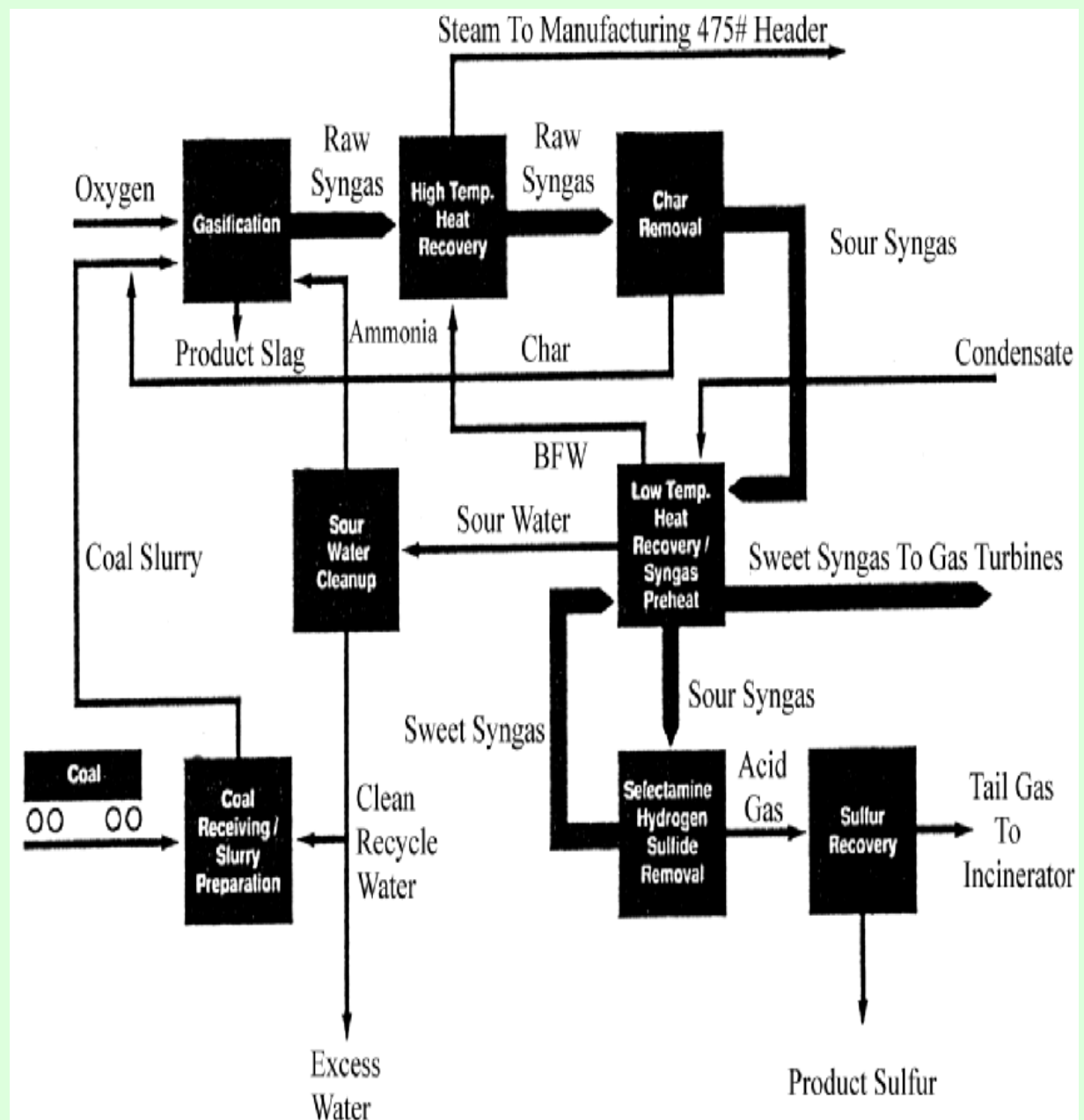
III. Η Διεργασία SHELL

- Μία έκδοση του αεριοποιητή Koppers-Totzek αλλά υψηλότερης πίεσης (3MPa)
- Κονιοποιημένος γαιάνθρακας (90% μικρότερος από 90 μ m) ξηραίνεται και τροφοδοτείται σε αντιτιθέμενους καυστήρες, όπου τροφοδοτούνται επίσης οξυγόνο και ατμός. Η T αντίδρασης είναι 1990°C. Το αέριο εξέρχεται στους 1480°C, λόγω ενδόθερμων αντιδράσεων και απωλειών θερμότητας. Μία υψηλή T καυστήρα εξασφαλίζει συνθήκες σχηματισμού ρευστής σκωρίας και η τέφρα απομακρύνεται από τον πυθμένα σαν σκωρία, (μέρος της απομακρύνεται μαζί με το αέριο ρεύμα σαν ιπτάμενη τέφρα)
- Πλεονεκτήματα: δεν παράγονται πίσσες, φαινόλες ή υγροί H/C λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και ο αεριοποιητής μπορεί να διαχειρισθεί κάθε στερεό καύσιμο, συμπεριλαμβανομένων γαιανθράκων με περιεκτικότητα σε τέφρα μέχρι 40% και σε θείο μέχρι 6%.
- Η θερμική αξία του αερίου προϊόντος είναι περίπου 11.2MJ/m³, ενώ η αποδοτικότητα σε άνθρακα είναι 98%.
- Μονάδα 250MW (Ολλανδία): αεριοποιητής γαιάνθρακα δυναμικότητας 2000 τόνων/ημέρα, σε συνδυασμό με αεριοστρόβιλο τύπου 13E της Asea Brown Boveri → ιδανική υπο-μονάδα για πρόσθετη δυναμικότητα σε μονάδες ισχύος 250-1000MW. Η εμπειρία διεργασίας μέχρι σήμερα: έχουν αεριοποιηθεί επιτυχώς δεκατέσσερις τύποι γαιάνθρακα, ενώ επετεύχθη μετατροπή άνθρακα >99%. Η περιβαλλοντική απόδοση ήταν ίση ή καλύτερη από την προβλεπόμενη από τον σχεδιασμό, δηλαδή ελάχιστο ποσοστό αποθείωσης (SO₂) 98%, μέγιστη εκπομπή NO_x 75g/GJ και μηδενική εκροή όλων των ρών ύδατος

IV. Η Διεργασία Dow

➤ Εγκατάσταση συνθετικού αερίου στην Louisiana: επεξεργάζεται, 2400t/d υποασφαλτούχου γαιάνθρακα χαμηλής περιεκτικότητας σε S καταναλώνοντας 1300t/d O₂, παράγει 32 δις κJ αερίου σύνθεσης, 115t/d σκωρίας και >4t/d καθαρό S εμπορεύσιμης ποιότητας. Παράγει 160MW σε μία διάταξη συνδυασμένου κύκλου υψηλής αποδοτικότητας.

➤ Περιλαμβάνει: 1 μονάδα διαχωρισμού αέρα, μύλους άλεσης γαιάνθρακα, προετοιμασίας & προθέρμανσης πολτού, αεριοποιητή, συστήματα ανάκτησης θερμότητας (υψηλής & χαμηλής T), απογύμνωσης αερίων, απομάκρυνσης όξινου αερίου, ανάκτησης S, ύγρυνσης καυσίμου αερίου και αναθέρμανσης αερίου καυσίμου

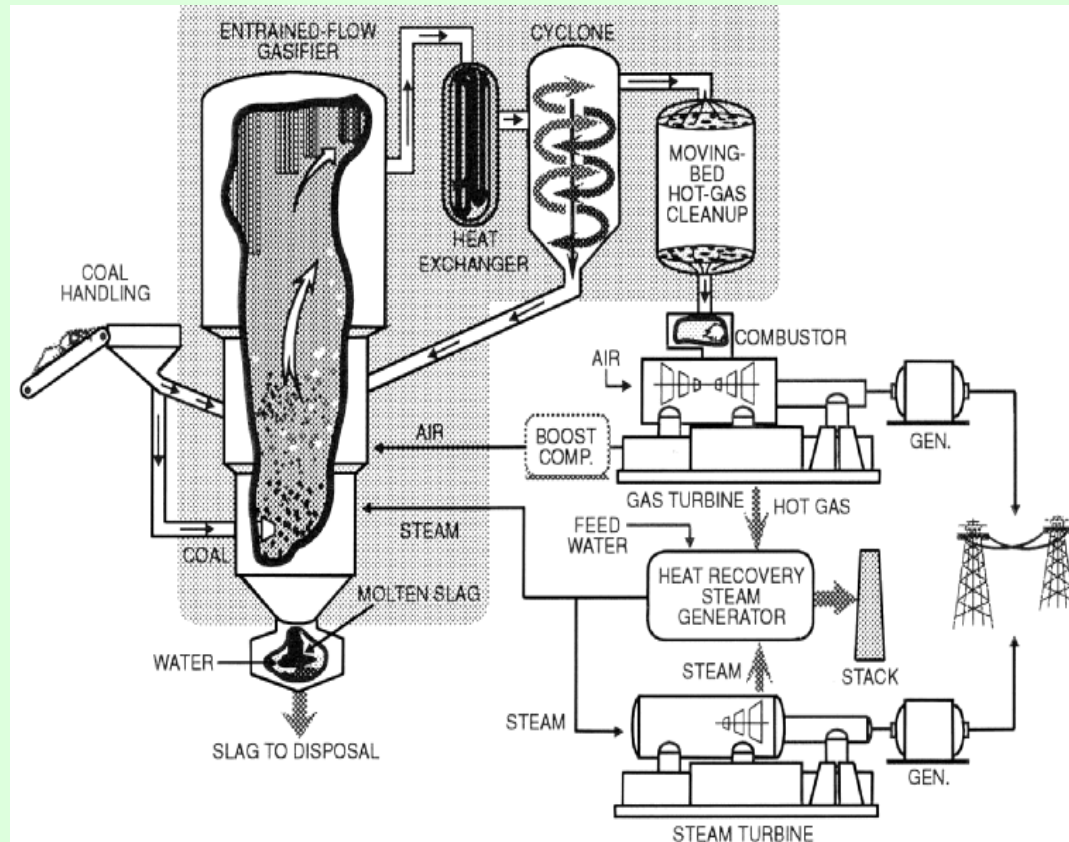


V. Το Έργο Αναβάθμισης Μονάδας της Combustion Engineering IGCC

➤ Στόχοι: η επίδειξη ενός καινοτόμου αεριοποιητή παράσχυσης 2 σταδίων, ξηρής τροφοδοσίας, με χρήση αέρα & εισαγωγή ασβεστόλιθου και ενός συστήματος καθαρισμού θερμών αερίων κινητής κλίνης, με καταλύτη σιδηρούχου ψευδαργύρου. Επίσης η αξιολόγηση ενός κινητού εξωθητή γαιάνθρακα και η εκτίμηση της αξιοπιστίας, διαθεσιμότητας και δυνατότητας συντήρησης σε εμπορική κλίμακα.

➤ Κατάλληλο για αναβάθμιση και νέες θερμοηλεκτρικές μονάδες. Πλεονεκτήματα: εύκολη μετατροπή, δυνατότητα γρήγορης και σταδιακής παραγωγής, υψηλή αποδοτικότητα, ευελιξία χρήσης καυσίμου, περιβαλλοντικός έλεγχος → ανταγωνιστικό σύστημα

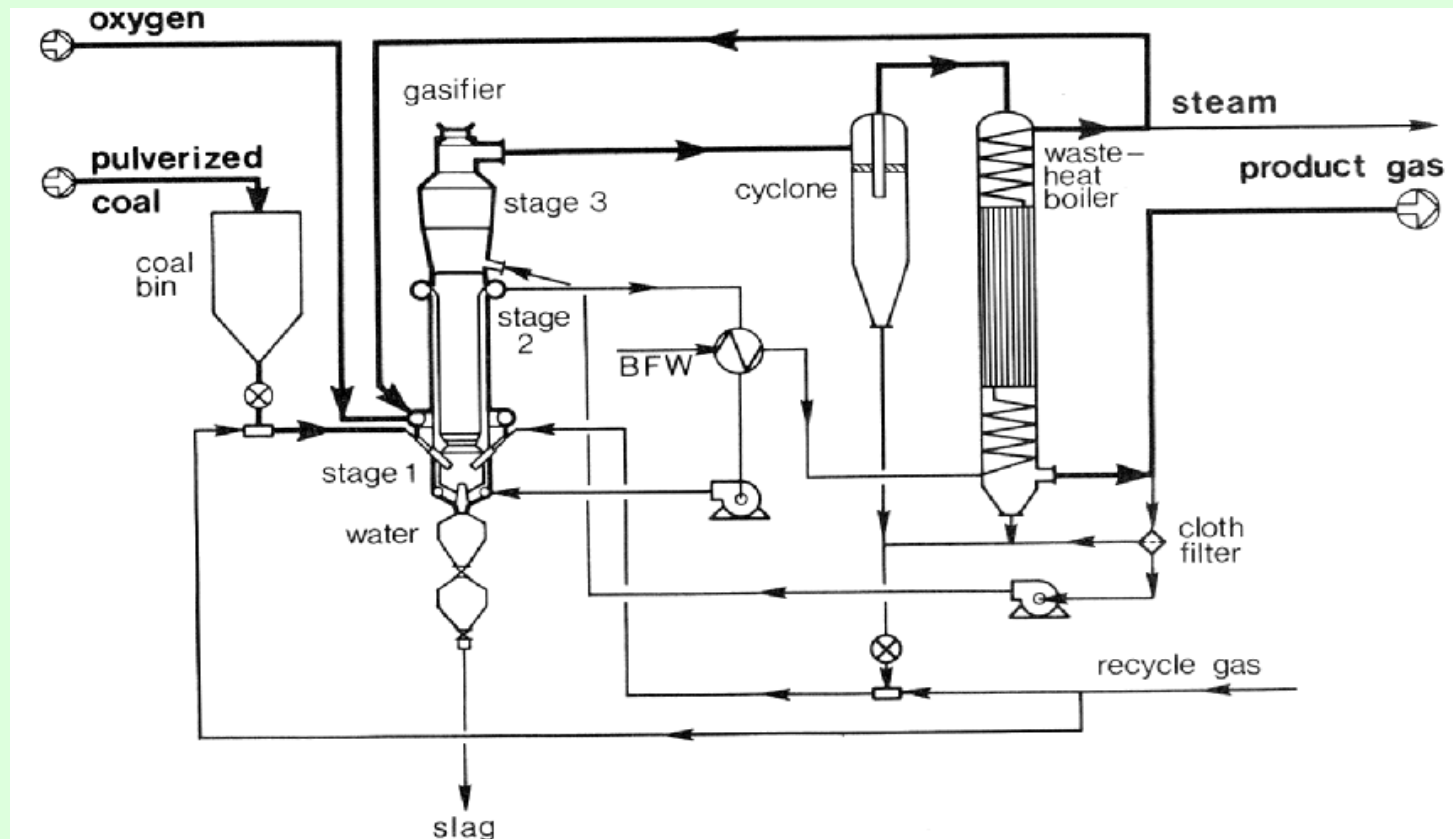
➤ Εμπορικής εγκατάσταση → έχει ρυθμό θερμότητας <8.4MJ/kWh (αποδοτικότητα >43%). Αυτός ο ρυθμός θερμότητας αναμένεται να οδηγήσει σε αύξηση της αποδοτικότητας τουλάχιστον κατά 20%, συγκρινόμενος με μία συμβατική μονάδα κονιοποιημένου γαιάνθρακα με εγκαταστάσεις αποθείωσης αερίων.



4.6.4. Διεργασίες Αεριοποίησης Λουτρού Τήγματος

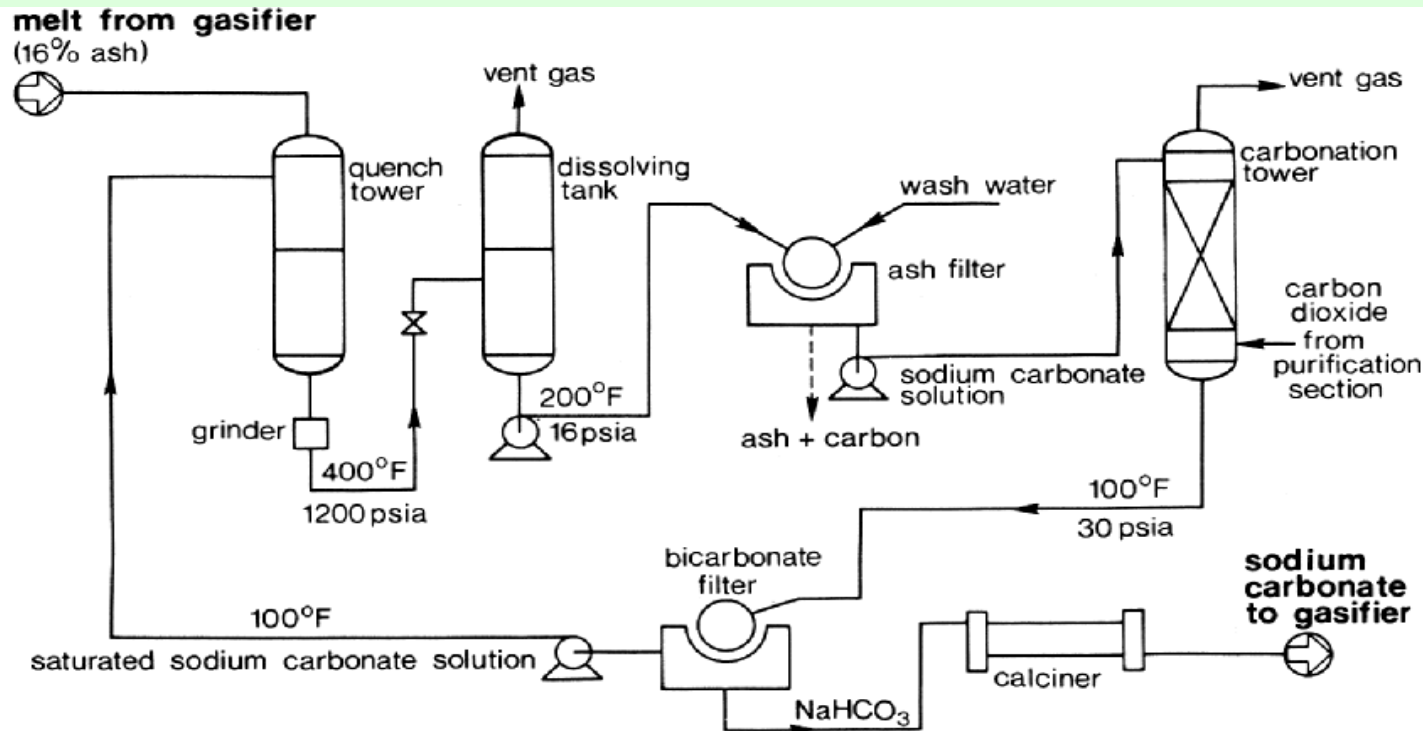
I. Διεργασία SAARBERG-ΟΤΤΟ

- Χρησιμοποιεί αεριοποιητή μονο-αξονικού λουτρού τήγματος, με εσωτερική διάμετρο 1.4m και ύψος 15m, που λειτουργεί σε P 2.5-3.0MPa και επεξεργάζεται μέχρι 220t/d γαιάνθρακα. Ο αντιδραστήρας διαιρείται σε τρία στάδια, τα δύο χαμηλότερα των οποίων είναι υδρόψυκτα. Στάδιο 1: λουτρό τηγμένης σκωρίας. Στάδιο 2: ζώνη παρασυρόμενης ροής. Στάδιο 3: τμήμα ψύξης.
- Εμπορικός σχεδιασμός: επεξεργασία 850 t/d γαιάνθρακα, παράγωγή 1.8MMm³/d αερίου μέσης θερμαντικής αξίας



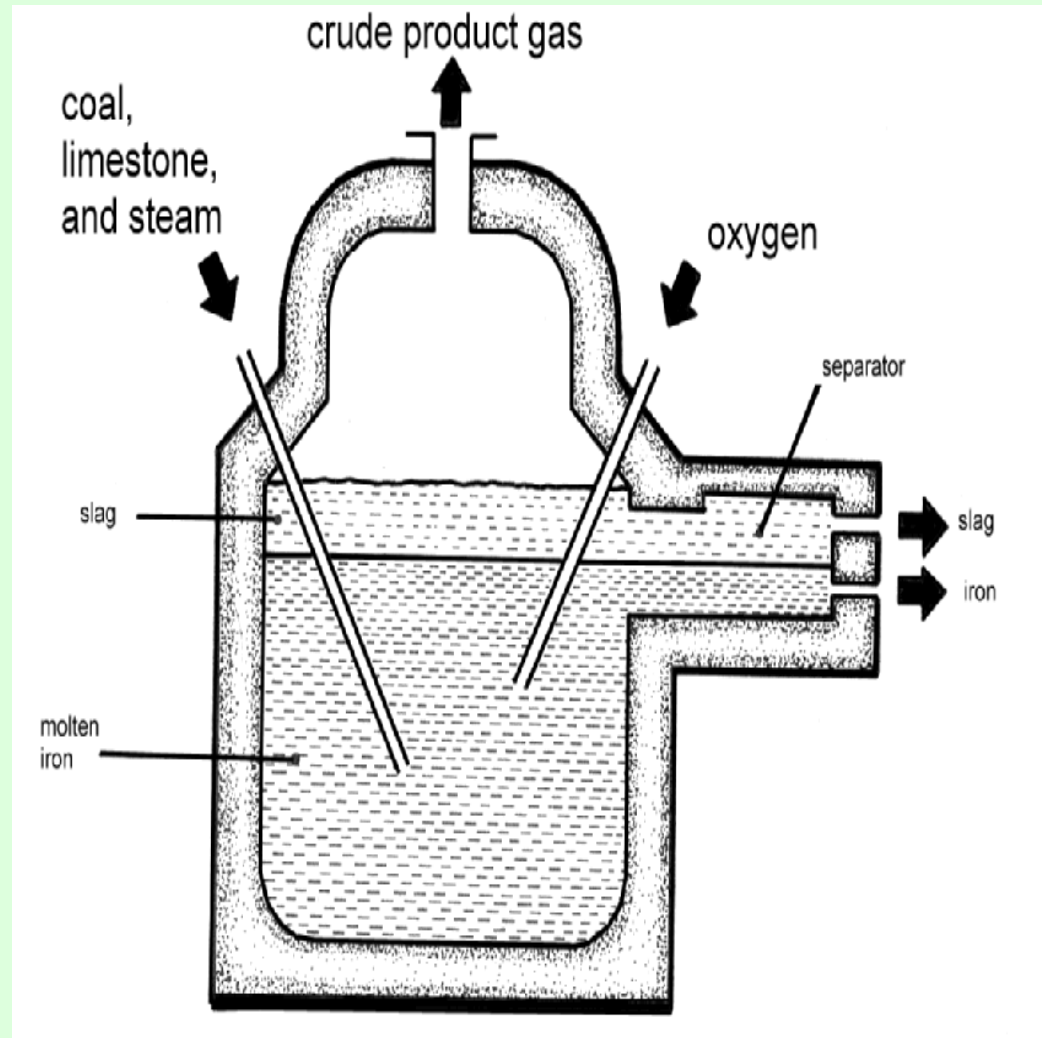
II. Η Διεργασία KELLOGG

- Αεριοποιεί γαιάνθρακα με ατμό σε τήγμα ανθρακικού νατρίου με ανακυκλοφορία στους 1000°C & πίεση 3- 8.5MPa
- Τήγμα: παράγοντας μεταφοράς θερμότητας και καταλύτης.
- Το S δεσμεύεται εν μέρει σαν Na_2S , αλλά η αντίθετη αντίδραση με CO_2 παράγει και μία μικρή ποσότητα H_2S .
- Συνηθισμένη σύνθεση του αερίου προϊόντος (% κ.ο. ξηρή βάση): $\text{H}_2=45$, $\text{CO}=33.5$, $\text{CO}_2=13.3$, $\text{CH}_4=7.5$, $\text{N}_2=0.4$ και $\text{H}_2\text{S}=0.3$. Θερμαντική αξία: $13\text{MJ}/\text{m}^3$.
- Έχει όλα τα πλεονεκτήματα των διεργασιών λουτρού τήγματος, αλλά έχει δημιουργήσει προβλήματα λόγω της διαβρωτικής φύσης του τήγματος → αναγκαία η επένδυση του αντιδραστήρα με Monofrax A, έναν τύπο αλουμίνας, για προστασία



III. Η Διεργασία ATGAS

- Κονιοποιημένος γαιάνθρακας (<3mm) και ασβεστόλιθος εγχύονται σε ένα λουτρό τηγμένου σιδήρου, μέσω εκτοξευτήρων ατμού, υπό πίεση 0.4MPa στους 1400°C
- Μεγάλη θερμική αποδοτικότητα
- Ακατέργαστο αέριο → καύσιμο μέσης θερμογόνου δύναμης (11736kJ/m³), ή αέριο σύνθεσης για παραγωγή άλλων οργανικών ενώσεων (διεργασία Patgas), ή υπόκειται σε μετατροπή μετάπτωσης, καθαρισμό, σχηματισμό μεθανίου και συμπίεση για την παραγωγή Συνθετικού Φυσικού Αερίου (SNG).
- Χρήση: όλοι οι τύποι γαιάνθρακα. Η μεγαλύτερη πειραματική μονάδα είναι ένας αντιδραστήρας διαλείποντος έργου, εσωτερικής διαμέτρου 63.5cm, δυναμικότητας 2 τόνων. Η επίδειξη της διεργασίας σε μεγάλη κλίμακα δεν έχει επιτευχθεί ακόμη.



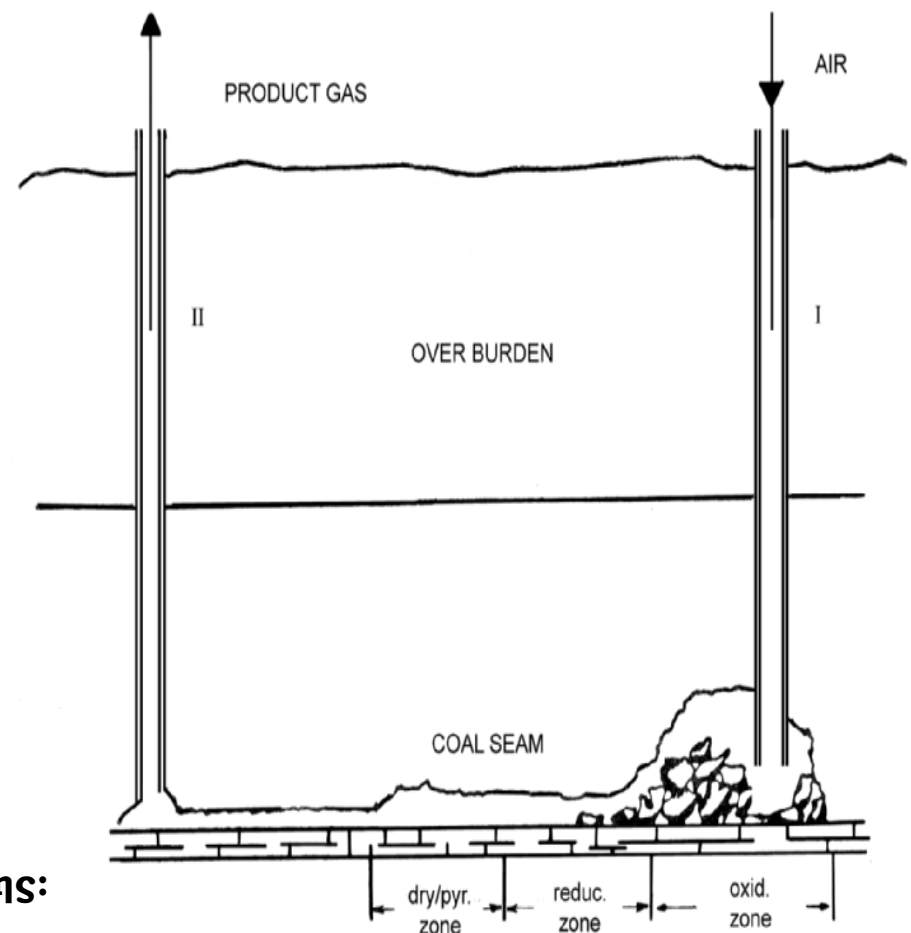
4.7. Υπόγεια Αεριοποίηση

- Παρόμοια με τις υπόλοιπες διεργασίες αεριοποίησης του γαιάνθρακα, εκτός από το ότι ο γαιάνθρακας αεριοποιείται επί τόπου, με εισαγωγή ατμού/οξυγόνου ή αέρα στο στρώμα.
- Αναπτύχθηκε στην Αγγλία για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων γαιάνθρακα στο μέσον του προηγούμενου αιώνα. Όμως, μόνο στα τέλη της δεκαετίας του 1930 υλοποιήθηκε η πρώτη πρακτική εφαρμογή στην τ. ΕΣΣΔ.
- Συνδυάζει εξόρυξη και μετατροπή του γαιάνθρακα σε ένα βήμα, χωρίς να χρησιμοποιηθούν συμβατικές τεχνικές εξόρυξης. Ελπιδοφόρα τεχνολογία για αποθέματα γαιάνθρακα που δεν είναι τεχνικά ή οικονομικά ανακτήσιμα,
- Μπορεί να απαλείψει μερικά από τα προβλήματα (υγείας και περιβαλλοντικά) που σχετίζονται με την συμβατική εξόρυξη του γαιάνθρακα αν και η προοπτική ρύπανσης των υπογείων υδάτων είναι σημαντική

4.7.1 Αρχές της Υπόγειας Αεριοποίησης

Πεδίο γαιάνθρακα → άνοιγμα 2 οπών γεώτρησης → (I) για εισαγωγή αερίου (αέρα, O_2 , ατμό) και (II) για την απομάκρυνση.

- Ζώνη οξείδωσης: $O_2 + \text{γαιάνθρακας} \rightarrow CO_2$
 - Ζώνη αναγωγής (600-900°C):
 $CO_2 + (\text{γαιάνθρακας χωρίς πολλά πτητικά}) \rightarrow CO$
ατμός ή $H_2O + \text{εξανθράκωμα} \rightarrow CO + H$
 - Ζώνη πυρόλυσης-ξήρανσης (200- 600°C):
πτητικά \rightarrow προς οπή γεώτρησης II σαν πίσσα
ή πτητικά $\rightarrow CO + \text{ελαφρείς H/C}$
- Τυπική σύνθεση αερίου: 50-60% N_2 , 10% H_2 , 10% CO , 10-20% CO_2 και 10-20% CH_4 ,
 $Q=5200-10000 \text{kJ/m}^3$.



Διαφορές από την αεριοποίηση σταθερής κλίνης:

- Ακατέργαστο αέριο προϊόν → έχει κάπως μικρότερη θερμογόνο δύναμη
- Αναλογία πίσσας/ H_2O → ποσοτικά μικρότερη & ποιοτικά ελαφρύτερη & φορτία σωματιδιακής ύλης → μεγαλύτερα
- Παραγωγή ανόργανων και οργανικών ρυπαντών → πιθανή ρύπανση υπόγειων υδάτων

4.7.1 Αρχές της Υπόγειας Αεριοποίησης

- Μεταξύ των δύο οπών γεώτρησης παρέχονται συνδετικές διόδους στο κοίτασμα του γαιάνθρακα, για να επιτρέψουν ανεμπόδιο πέρασμα του αερίου με υψηλή ροή και χαμηλή πτώση πίεσης κατά την διάρκεια της αεριοποίησης.

Η υψηλή ροή είναι απαραίτητη ώστε:

- α) να αποτρέψει έμφραξη από πίσσα και τέφρα (σχηματίζονται κατά την πυρόλυση & καύση)
- β) να αντισταθμίσει τον ρυθμό παρείσδυσης του ύδατος
- γ) να μεγιστοποιήσει το τελικό εύρος του καναλιού → αύξηση ανάκτησης πόρων για κάθε γεώτρηση συνδετικής διόδου
- δ) να πετύχει ένα οικονομικά υψηλό ρυθμό παραγωγής.

Η απαίτηση για υψηλή ροή οδηγεί σε: → αυξημένη διαφυγή αερίου [\uparrow ροή → \uparrow ΔP & απώλεια αερίου \uparrow ανάλογα με $(\Delta P)^2$]

- Διατήρηση υψηλής ροής αερίου μόνο αν η διαπερατότητα μεταξύ των φρεάτων εισαγωγής - εξαγωγής > κάποιων ελάχιστων τιμών. Συνήθεις ροές αερίου: μεταξύ $3000\text{m}^3/\text{h}$ - $10000\text{m}^3/\text{h}$ με κινητήριες $\Delta P < 0.25\text{MPa}$ → πολύ χαμηλές πιέσεις για παραγωγή υποκατάστατου φυσικού αερίου.
- Η λειτουργία με υψηλότερες πιέσεις είναι δυνατή σε μεγαλύτερα βάθη.

4.7.2 Ιδιότητες των Γαιανθράκων Χαμηλής Τάξης που Επηρεάζουν την Αεριοποίηση

I. Πάχος κοιτάσματος, Συνέχεια, Βάθος και Κλίση

II. Παρέισδυση Υδατος

III. Κατάρρευση Οροφής

IV. Διαπερατότητα του Γαιάνθρακα

V. Ιδιότητες Διόγκωσης του Γαιάνθρακα

VI. Αντιδραστικότητα του Γαιάνθρακα

VII. Θερμική Αγωγιμότητα & Θερμική Διαχυσιμότητα του Γαιάνθρακα



I. Πάχος κοιτάσματος, Συνέχεια, Βάθος και Κλίση

- Απόδοση διεργασίας \uparrow όσο το πάχος του κοιτάσματος \uparrow . Μέγιστο πάχος \rightarrow περιορισμός από τις επιπτώσεις κατάρρευσης μεγάλης επιφάνειας του εδάφους \rightarrow διαρροή αερίων, καταστροφή της οπής γεώτρησης (ελάχιστο πάχος 1.5 m)
- Το κοιτάσμα να είναι συνεχές σε όλη την περιοχή αεριοποίησης \rightarrow μεγάλες ρωγμές & άλλες ασυνέχειες πχ. σχιστόλιθοι \rightarrow αναχαιτίζουν την διεργασία.
- Ιδιαίτερα επικλινή κλίση απαιτεί ελάχιστη γεώτρηση ανά τόνο γαιάνθρακα επεξεργασίας \rightarrow \downarrow κόστος γεώτρησης

II. Παρείσδυση Ύδατος

- Προσδιορίζεται από την διαπερατότητα παρακειμένων σχηματισμών και την υδροστατική πίεση της περιοχής. Αν είναι ιδιαίτερα υψηλή \rightarrow πιθανή καταστροφή λειτουργίας του συστήματος

III. Κατάρρευση Οροφής

- Καταστροφική: σχηματισμός καναλιών \rightarrow παράκαμψη περιοχής αεριοποίησης \rightarrow επικοινωνία με στρώματα πολύ διαπερατά από το ύδωρ ή που περιέχουν ύδωρ \rightarrow διαφυγή αερίου & εισροή υπογείων υδάτων.
- Ωφέλιμη: ελαχιστοποίηση κενού χώρου \rightarrow \downarrow παράκαμψης οξυγόνου \rightarrow \uparrow θερμογόνου δύναμης αερίου \rightarrow \uparrow θερμικής αποδοτικότητας

IV. Διαπερατότητα του Γαιάνθρακα

- Διαπερατότητα \downarrow όσο η περιεκτικότητα σε υγρασία \downarrow ή η πίεση των υπερκειμένων \uparrow

V. Ιδιότητες Διόγκωσης του Γαιάνθρακα

- Οι ασφαλτούχοι γαιάνθρακες καθώς θερμαίνονται--> γίνονται πλαστικοί, διογκώνονται & συσσωματώνονται -->διαμορφώνουν μία κολλώδη μάζα-->μείωση διαπερατότητας γαιάνθρακα--> φράξιμο στρώματος. Αναγκαία η προκαταρκτική κατεργασία τους με οξείδωση σε αέρα
- Οι γαιάνθρακες χαμηλής τάξης όταν ξηραίνονται και θερμαίνονται--> μειώνονται σε μέγεθος και θρυμματίζονται. Επιθυμητή ιδιότητα για την υπόγεια αεριοποίηση --> επιτρέπει καλή επαφή αερίου- στερεού και μεγάλη έκθεση επιφάνειας για αντίδραση.

VI. Αντιδραστικότητα του Γαιάνθρακα

- Οι γαιάνθρακες χαμηλής τάξης προτιμώνται για υπόγεια αεριοποίηση--> έχουν μεγαλύτερη αντιδραστικότητα--> εύκολη ανάφλεξη & το εξανθράκωμα τους αντιδρά πολύ εύκολα --> καλύτερη χρήση αέρα ή οξυγόνου --> άμεση αντίδραση όταν έρχεται σε επαφή με τον γαιάνθρακα ή το εξανθράκωμα, παρά να διαφεύγει στην ζώνη αεριοποίησης και να αντιδρά με το αέριο προϊόν

VII. Θερμική Αγωγιμότητα & Θερμική Διαχυσιμότητα Γαιάνθρακα

- Ιδιότητες μεταφοράς--> καθορίζουν τον ρυθμό θερμικής αγωγιμότητας μέσω του γαιάνθρακα. Η θερμότητα μπορεί επίσης να χάνεται από αγωγιμότητα, μέσω του βράχου και του γαιάνθρακα που δεν έχει αντιδράσει γύρω από την ζώνη καύσης.
- Η θερμική αγωγιμότητα του ξηρού λιγνίτη < ασφαλτούχου γαιάνθρακα, ενώ η θερμική αγωγιμότητα του υγρού λιγνίτη > ξηρού λιγνίτη & ασφαλτούχου γαιάνθρακα. Ο ξηρός λιγνίτης--> πιο πορώδης--> αέρας στους πόρους--> κακός αγωγός

4.7.3 Διαδικασίες Σύζευξης

I. Κατευθυνόμενη Γεώτρηση

II. Καύση Αντίρροης Ροής

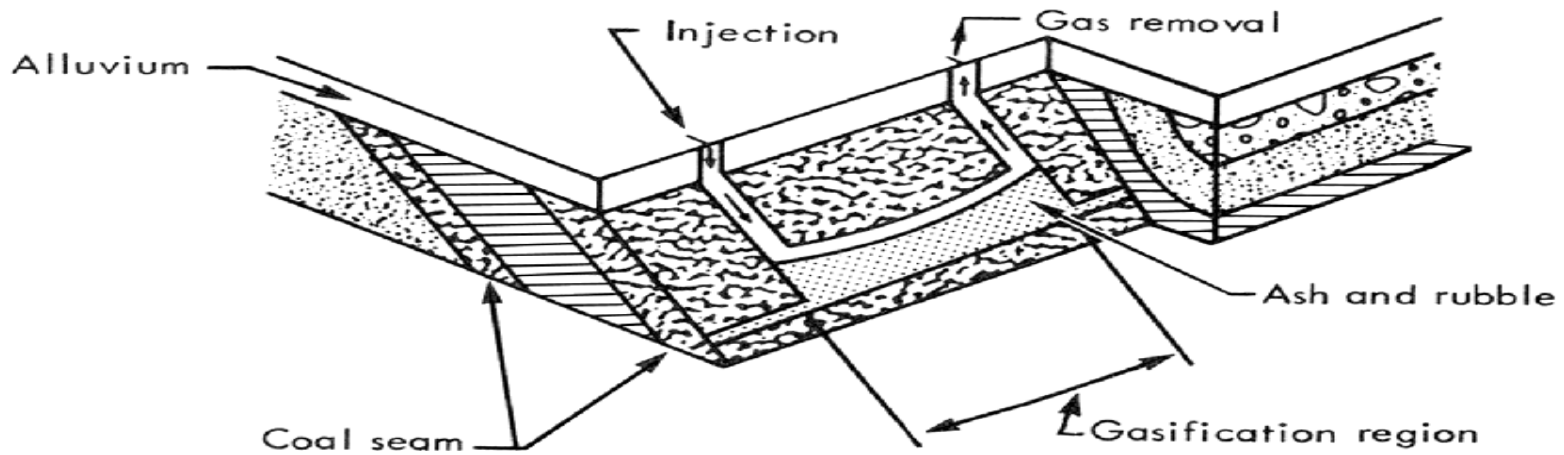
III. Ηλεκτρική Σύζευξη

IV. Ρωγμάτωση με Ύδωρ

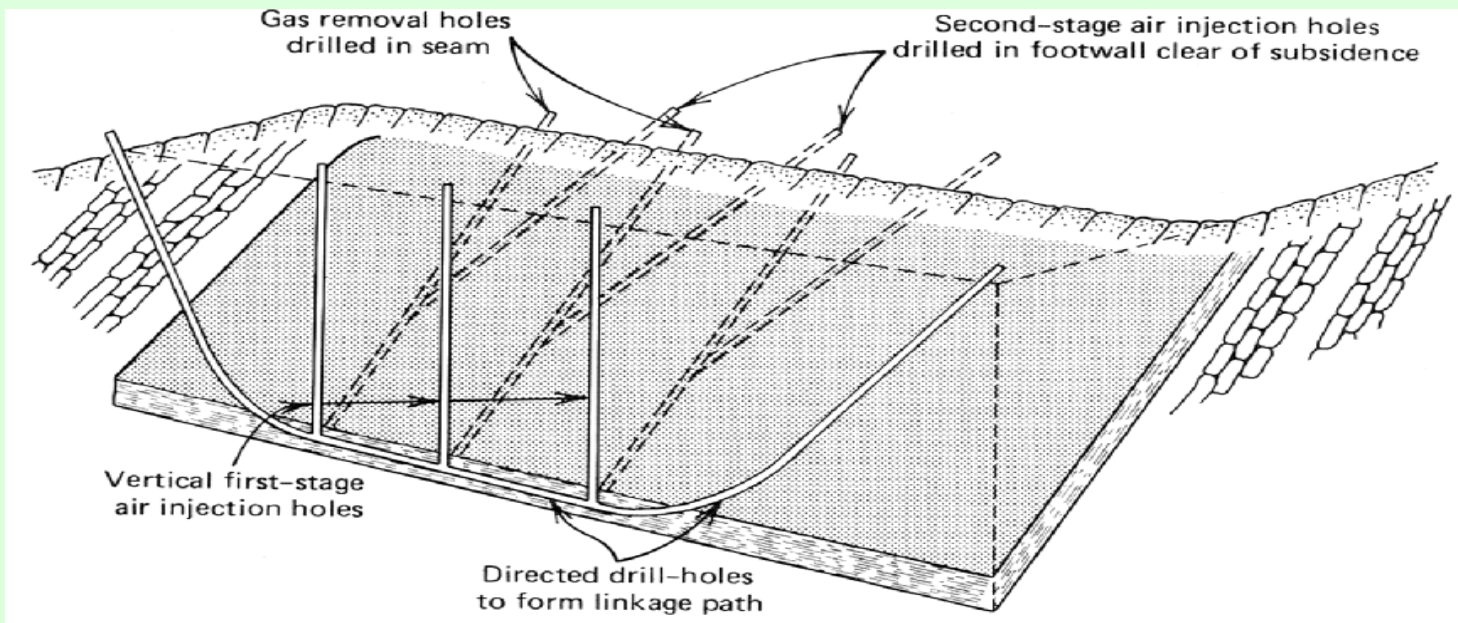


I. Κατευθυνόμενη Γεώτρηση

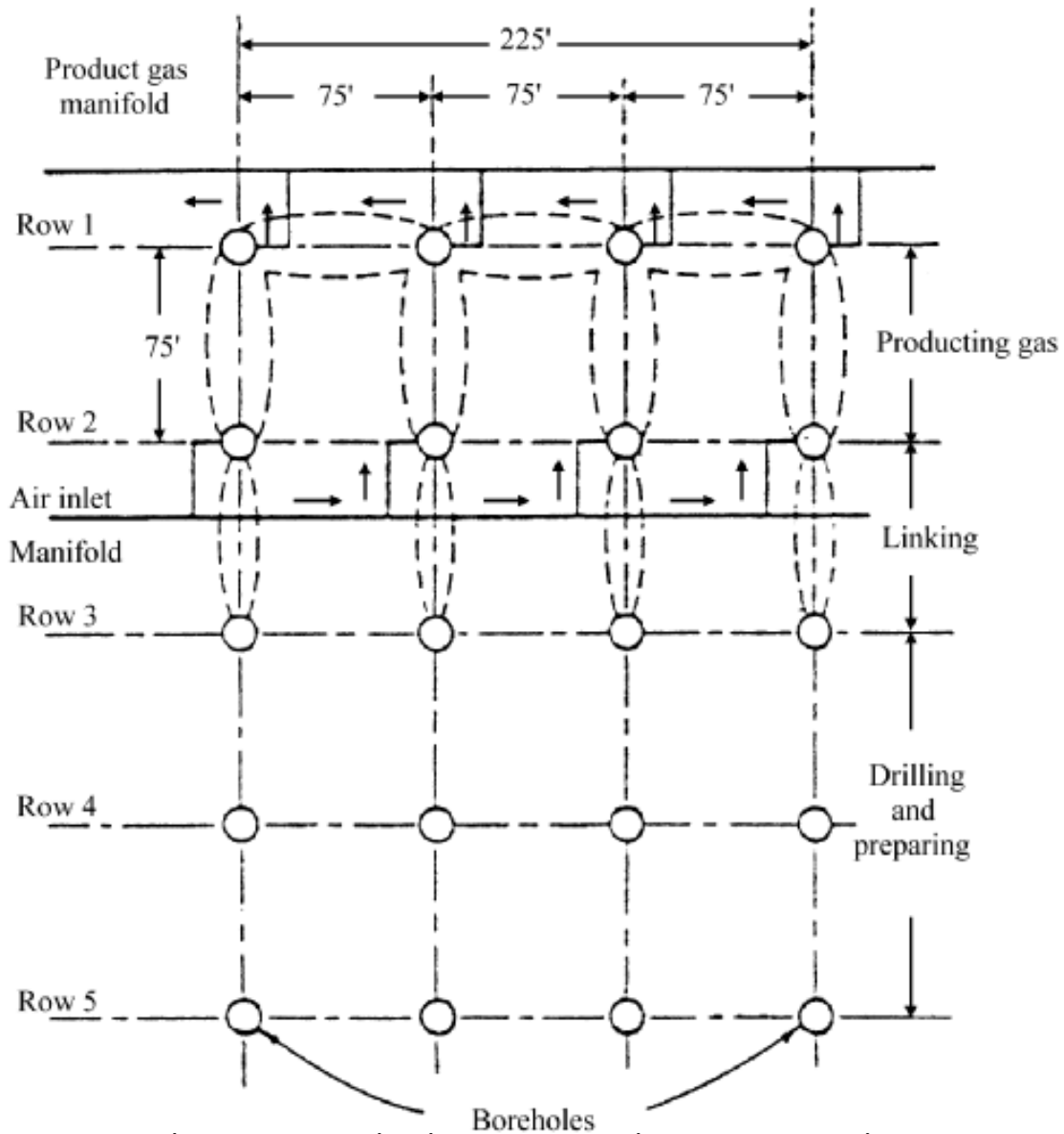
- Η γεώτρηση διαμέσου ενός κοιτάσματος γαιάνθρακα υπό μεταβλητές γωνίες παρέχει ένα κανάλι αεριοποίησης στο κοίτασμα. Οι τ. Σοβιετικοί χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες μέσα στην οπή
- Στρώματα γαιάνθρακα με μεγάλη κλίση: οι κατευθυνόμενες οπές γεώτρησης είναι ευθείες, υπό κατάλληλη γωνία ως προς την επιφάνεια
- Παχιά κοιτάσματα γαιάνθρακα: οι οπές εισαγωγής ανοίγονται υπό κλίση κάτω από το στρώμα, για την αποφυγή δημιουργίας καταρρέουσας περιοχής (ανοίγεται επιπλέον οπές κατά την φορά πτώσης του κοιτάσματος: μείωση της πτώσης πίεσης και δυνατότητα ελέγχου της ροής)
- Οριζόντια στρώματα: η γεώτρηση ξεκινά υπό γωνία προς την επιφάνεια και μετά συνεχίζει σε καμπύλη πορεία προς το κοίτασμα. Οι οπές ανοίγονται σε μία ορθογώνια διάταξη, κατευθείαν επάνω από τον προς αεριοποίηση γαιάνθρακα, ενώ τα κανάλια σύζευξης σχηματίζονται στο κάτω μέρος του κοιτάσματος.
- Οριζόντια παχιά στρώματα: γίνονται συνήθως δύο τροποποιήσεις. (1) οι οπές γεώτρησης για την εισαγωγή ή για την απομάκρυνση του αερίου τοποθετούνται δίπλα στην ζώνη αεριοποίησης, με τις υπόλοιπες οπές ανοιγμένες πάνω από την ζώνη αεριοποίησης. (2) όλες οι οπές ανοίγονται υπό κλίση για να παραμείνουν έξω από την ζώνη κατάρρευσης.
- Η κατευθυνόμενη γεώτρηση είναι η προτιμώμενη μέθοδος ανάπτυξης διόδων σύζευξης. Οι βελτιώσεις στην τεχνολογία, την καθιστούν την περισσότερο ελκυστική, για την εμπορική εφαρμογή της υπόγειας αεριοποίησης του γαιάνθρακα.



Σχήμα 4.34 Η μέθοδος ρεύματος για την αεριοποίηση του γαιάνθρακα σε απότομα επικλινή στρώματα γαιάνθρακα



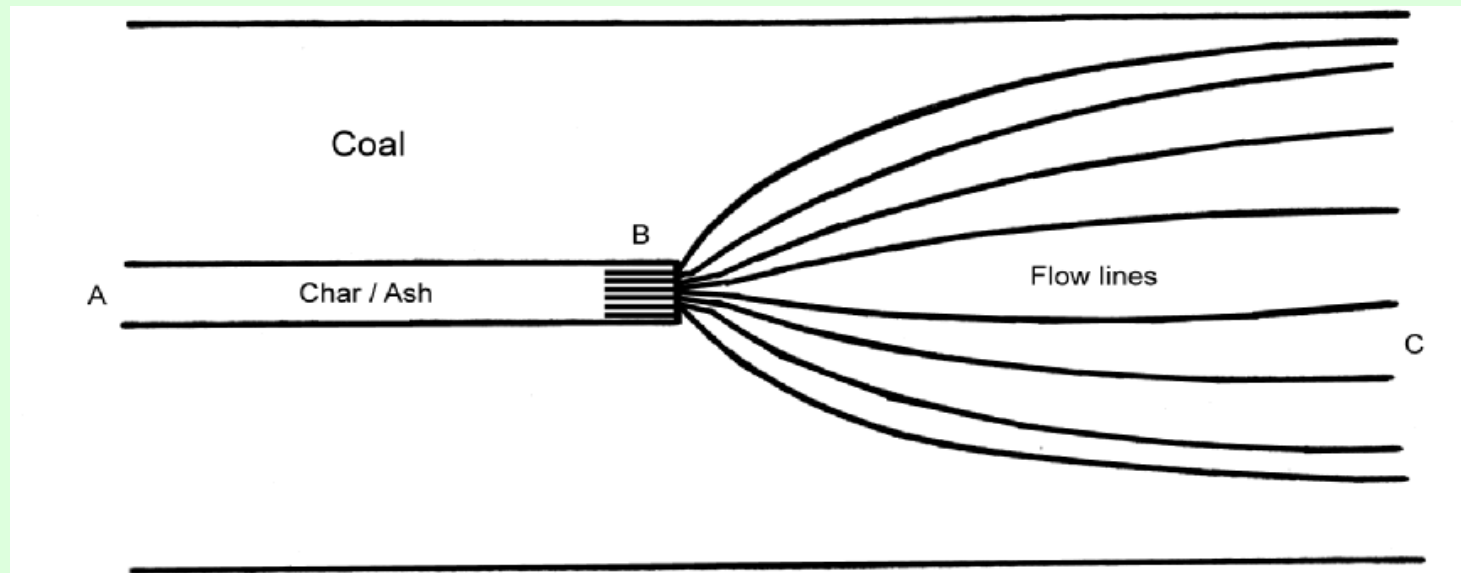
Σχήμα 4.35 Εναλλακτική διάταξη που χρησιμοποιεί κατευθυνόμενες οπές σύζευξης. Οι πολλαπλοί αγωγοί πυθμένα μεταξύ των οπών εισαγωγής και παραγωγής αερίου σχηματίζονται χρησιμοποιώντας κατευθυνόμενη γεώτρηση



Σχήμα 4.36 Διάγραμμα γεννήτριας χωρίς άξονα, μονάδα στα περίχωρα της Μόσχας

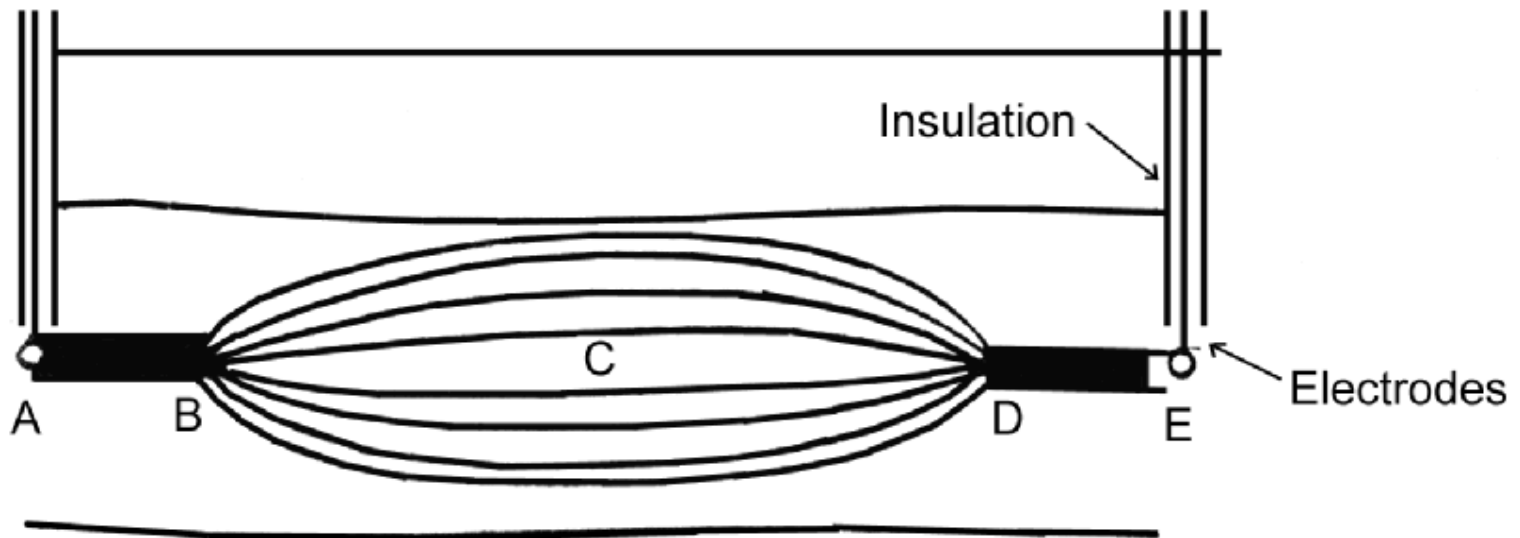
II. Καύση Αντίρρονης Ροής

- Ατιρροής: το μέτωπο της φλόγας προχωρεί στην αντίθετη κατεύθυνση από την ροή των αερίων. Η ταχύτητα του μετώπου φλόγας καθορίζεται από τον ρυθμό επαγωγής της θερμότητας προς τα εμπρός
- Ομορροής: το μέτωπο φλόγας και η ροή των αερίων προχωρούν στην ίδια κατεύθυνση. Ο ρυθμός κατανάλωσης του γαιάνθρακα καθορίζει την ταχύτητα του μετώπου της φλόγας.
- Η σημαντικότερη διαφορά είναι ότι η καύση αντιρροής προχωρά σε στενά κανάλια, σταθερής διαμέτρου, ενώ η καύση ομορροής-->σε πλατιά μέτωπα.
- Στην καύση αντιρροής --> παρουσιάζεται πολύ λιγότερη έμφραξη από υγρό (συμπύκνωση ατμών) πίσω από το μέτωπο της φλόγας
- Καύση αντιρροής: κατάλληλο για διαμόρφωση πολύ διαπερατών καναλιών σαν ένα προκαταρκτικό βήμα, αλλά όχι για την φάση παραγωγής-->χρειάζεται ένα σύστημα καύσης ομορροής.



III. Ηλεκτρική Σύζευξη

- Επιτυχημένη όταν ο γαιάνθρακας έχει ορισμένες κρίσιμες φυσικές ιδιότητες (1.κατά τη θέρμανση με ηλεκτρικό ρεύμα-->η ηλεκτρική αγωγιμότητα πρέπει να αυξάνεται έντονα, 2. η αγωγιμότητα του γαιάνθρακα που δεν έχει θερμανθεί να είναι αρκετά υψηλή, αλλά αρκετά χαμηλότερη από αυτήν του γαιάνθρακα που έχει θερμανθεί
- Περιγραφή: σε κάποιο χρονικό διάστημα μετά την έναρξη παροχής ισχύος, κανάλια υψηλής αγωγιμότητας εμφανίζονται και από τα δύο ηλεκτρόδια και σταδιακά μεγεθύνονται προς το κέντρο, μέχρι να συναντηθούν.
- Θεωρείται μία ανταγωνιστική τεχνική. Το κύριο πρόβλημα της διεργασίας ηλεκτρικής σύζευξης είναι ότι ελέγχεται δύσκολα.



IV. Ρωγμάτωση με Ύδωρ

- Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας είναι ανεξάρτητη των ιδιοτήτων του στρώματος του γαιάνθρακα.
- Η διεργασία απαιτεί απλούστερο εξοπλισμό από ότι η κατευθυνόμενη γεώτρηση, όμως η αδυναμία ελέγχου της είναι ένα σαφές μειονέκτημα
- Περιγραφή: τροφοδοτείται νερό με αντλία σε ένα σωλήνα μέσα στο έδαφος. Το ύδωρ πιέζεται να εξέλθει από το κάτω μέρος του σωλήνα, μέσα στον σχηματισμό του γαιάνθρακα και να προξενήσει ρωγμές-->επειδή οι ρωγμές τείνουν να κλείσουν μετά το πέρας της άντλησης, προστίθεται στο ύδωρ άμμος
- Αποδοτικότητα λειτουργίας: βελτιώνεται με την προσθήκη ενός μέσου πύκνωσης, για να αυξήσει το ιζώδες του ύδατος.
- Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για πολύ επικλινή στρώματα, όπου δεν είναι σημαντικό να σχηματισθούν ρωγμές στον πυθμένα του κοιτάσματος, παράλληλες ή κάθετες προς τα επίπεδα του στρώματος.

4.7.4 Εγκαταστάσεις Πεδίων και Εμπορικές Εγκαταστάσεις

- Οι τ. Σοβιετικοί απέδειξαν ότι η υπόγεια αεριοποίηση του γαιάνθρακα είναι τεχνικά εφικτή. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση συνεχούς λειτουργίας μεγάλης κλίμακας είναι η Angren, η οποία αεριοποιεί ένα παχύ, επίπεδο κοίτασμα λιγνίτη.
- Angren: πάχος 4-24m & είναι σε βάθη 40-200m. Οροφή: στρώμα καολίνη μη διαπερατό από αέριο. Η εκμετάλλευση επιτελείται με κάθετες οπές από την επιφάνεια. Ο λιγνίτης έχει $Q=15340\text{kJ/kg}$, ενώ το παραγόμενο αέριο $Q=3350\text{kJ/m}^3$. Η αποδοτικότητα εξαγωγής είναι 65% και η θερμική αποδοτικότητα επίσης 65%. Η συνολική ανάκτηση >40%. Το αέριο μεταφέρεται σε ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό (δυναμικότητα μονάδας 100MW) σαν καύσιμο τροφοδοσίας
- Δοκιμές πεδίων μικρότερης κλίμακας έδειξαν ότι η διεργασία είναι τεχνικά εφικτή για γαιάνθρακες χαμηλής τάξης.
- Η 1 επιτυχής δοκιμή υπόγειας αεριοποίησης γαιάνθρακα ήταν αυτή του πεδίου Hanna 2. Για 31 ημέρες $Q=5660\text{kJ/m}^3$, ενώ η θερμική αποδοτικότητα του ψυχρού αερίου ~90%. Η σειρά δοκιμών Hanna καθιέρωσε την αντίληψη ότι υψηλά επίπεδα Q ($4840\text{-}6520\text{kJ/m}^3$) μπορούν να παραχθούν με ένα σύστημα καύσης με αέρα.
- Σύστημα καύσης με ατμό και οξυγόνο μακράς διάρκειας Hoe Creek 3: παράγαγε αέριο με $Q=7450\text{kJ/m}^3$. Σύστημα της Εταιρίας Gulf Research & Development Company παράγαγε αέριο με $Q < 13040\text{kJ/m}^3$
- Οι δοκιμές αυτές συνέβαλαν σημαντικά στην καλύτερη αντίληψη των σχετικών πλεονεκτημάτων των διαθέσιμων μεθόδων σύζευξης