



Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας



“Energy resources: Technologies & Management”

“Θερμικές διεργασίες άνθρακα”

Δρ. Γεώργιος Σκόδρας
Αν. Καθηγητής



Θερμικές διεργασίες ανθράκων

➤ **Καύση**

Θερμοδυναμική της καύσης

Κινητική ετερογενών αντιδράσεων καύσης

➤ **Πυρόλυση – Υδρογονοπυρόλυση**

➤ **Εξαερίωση**

Αντιδράσεις και στάδια εξαερίωσης

Θερμοδυναμική της εξαερίωσης

Κινητική της εξαερίωσης

➤ **Υγροποίηση**



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



Ως θερμικές διεργασίες του άνθρακα ορίζονται εκείνες **οι κατεργασίες που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες.**

Σκοπός των θερμικών διεργασιών του άνθρακα είναι η καλύτερη ενεργειακά και περιβαλλοντικά αξιοποίηση του, με τον μετασχηματισμό του σε υγρά ή αέρια προϊόντα. Η μετατροπή του άνθρακα σε αέρια ή υγρά καύσιμα συνεπάγεται αύξηση της θερμαντικής ικανότητας ανά μονάδα στοιχειακού άνθρακα στο νέο προϊόν και ευκολότερη και περιβαλλοντικά φιλικότερη διακίνηση. Επιπλέον, καθίσταται απλούστερη η απομάκρυνση ρυπαντών (π.χ. θειούχες ενώσεις) από τα αέρια ή υγρά προϊόντα.

Οι σημαντικότεροι τύποι θερμικών διεργασιών, πέραν της **καύσης**, που έχουν αναπτυχθεί είναι: **πυρόλυση** (pyrolysis), **υγροποίηση** (liquefaction), **ανθρακοποίηση** (carbonization) και η **εξαερίωση** (gasification).



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



Πυρόλυση: Είναι η, σε αδρανή ατμόσφαιρα, διεργασία θερμικής αποσύνθεσης του άνθρακα προς στερεά (εξανθράκωμα υψηλής περιεκτικότητας σε στοιχειακό άνθρακα), υγρά και αέρια (πλούσια σε υδρογόνο) προϊόντα. Στην περίπτωση παρουσίας υδρογόνου (υδρογονοπυρόλυση), αντί της αδρανούς ατμόσφαιρας, η παραγωγή υγρών περιορίζεται σε μικρότερου μοριακού βάρους και εμπλουτισμένα σε υδρογόνο προϊόντα ενώ οι αέριοι υδρογονάνθρακες είναι το κυριότερο προϊόν.

Υγροποίηση: Είναι διεργασία μετατροπής του άνθρακα, σε υγρά προϊόντα μεγάλου μοριακού βάρους, υπό υψηλή πίεση (> 100 bar), σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες ($300 - 500^{\circ}\text{C}$) και περιβάλλον υδρογόνου. Η προσθήκη υδρογόνου γίνεται είτε απ' ευθείας από αέριο υδρογόνο είτε μέσω οργανικών ενώσεων πλούσιων σε υδρογόνο (τετραλίνη).



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



Ανθρακοποίηση: Είναι θερμική διεργασία που ομοιάζει με την πυρόλυση και πολλές φορές τα όρια μεταξύ των διεργασιών αυτών είναι δυσδιάκριτα. Λαμβάνει χώρα στην θερμοκρασιακή περιοχή 600 – 900°C και σε ατμόσφαιρα καυσαερίων των οποίων η καύση συνήθως προσφέρει την απαιτούμενη για την διάσπαση του άνθρακα θερμότητα. Το κύριο προϊόν της διεργασίας είναι το κωκ, ενώ παράλληλα παράγονται καύσιμα αέρια, υγρά και πίσσα (tar).

Εξαερίωση: Είναι η θερμική μετατροπή των ανθράκων σε ελαφρά αέρια, συμπυκνώσιμα υγρά, πίσσες και στερεά προϊόντα παρουσία δραστικής ατμόσφαιρας, όπως οξυγόνο, υδρατμός, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Η παραγωγή εξανθρακώματος είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Η μετατροπή γίνεται μέσω ετερογενών αντιδράσεων με τα προαναφερθέντα ενεργά αερίων καθώς και διάφορους συνδυασμούς των H_2 , CO_2 , H_2O .

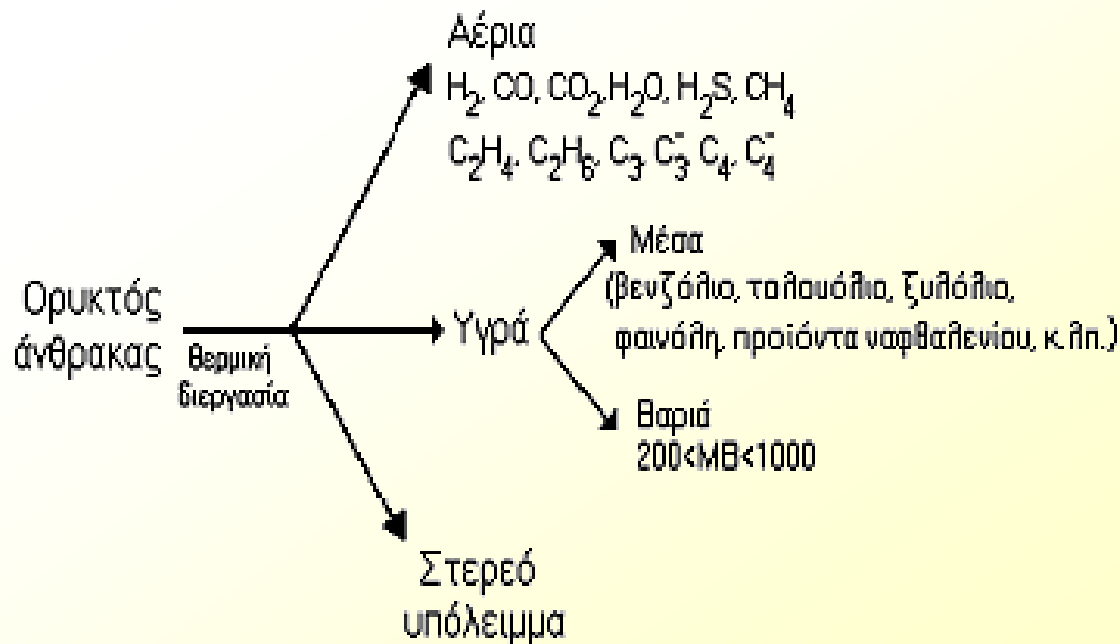


Θερμικές διεργασίες ανθράκων

Συνεπώς, σε όλες τις θερμικές κατεργασίες του άνθρακα, παράγονται τρεις βασικές κατηγορίες προϊόντων:

- Αέρια, ανόργανα και ελαφροί υδρογονάνθρακες.
- Υγρά, μέσου (BTX, PCX) και υψηλού μοριακού βάρους (tars) οργανικές ενώσεις και κυρίως υδρογονάνθρακες.
- Στερεό υπόλειμμα (εξανθράκωμα ή κωκ)

Η εκλεκτικότητα της μετατροπής προς τα παραπάνω προϊόντα, δηλαδή η ποσότητα και η ποιότητα τους, εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων όπως: είδος άνθρακα, τύπος αντιδραστήρα, αέριο περιβάλλον, ρυθμός θέρμανσης, πιθανή ύπαρξη καταλυτών κ.ά.





ΚΑΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η καύση του άνθρακα, είτε σε κλίνες είτε σε κονιοποιημένη μορφή περιλαμβάνει τρία βήματα:

- ✓ έκλυση της πτητικής ύλης, η οποία αποτελείται κυρίως από αέρια όπως H_2 , CO , CO_2 , H_2O , CH_4 και ελαφρείς υδρογονάνθρακες καθώς και ατμούς πίσσας
- ✓ οξείδωση της πτητικής ύλης στην αέρια φάση, και
- ✓ καύση του ανθρακούχου υπολείμματος ή εξανθρακώματος.

Αυτά τα στάδια, παρότι διακριτά μεταξύ τους, συχνά εξελίσσονται εν μέρει παράλληλα, ανάλογα με τις συνθήκες της αντίδρασης.



Θερμοδυναμική της καύσης

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1940 ελάχιστες είναι οι αλλαγές των βασικών γνώσεων θερμοδυναμικής των αντιδράσεων άνθρακα, σε σχέση με τις ενθαλπίες των αντιδράσεων και τις σταθερές ισορροπίας τους.

Στον Πίνακα δίνονται συνοπτικά οι ενθαλπίες αντίδρασης του β-γραφίτη σε θερμοκρασία 18 °C και πίεση 1 atm. Αν η ενθαλπία σχηματισμού του γραφίτη θεωρηθεί ίση με μηδέν, τότε οι ενθαλπίες σχηματισμού των άμορφων ανθράκων είναι συγκριτικά θετικές και κυμαίνονται από 1,6 έως 2,6 kcal/mol

Ενθαλπίες αντιδράσεων άνθρακα

| a/a | Αντίδραση | ΔH (kcal/mol) |
|---|------------------------------------|---------------|
| C (στερεός): αντίδραση με O ₂ | | |
| (1) | $C + O_2 \rightarrow CO_2$ | -94.0 |
| (2) | $C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$ | -26.6 |
| (3) | $CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$ | -67.4 |
| C (στερεός): αντίδραση με CO ₂ | | |
| (4) | $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ | +40.8 |
| C (στερεός): αντίδραση με ατμό | | |
| (5) | $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ | +31.1 |
| (6) | $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ | -9.7 |
| (7) | $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ | +40.8 |
| (8) | $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$ | -17.9 |
| C (στερεός): αντίδραση με H ₂ | | |
| (9) | $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$ | -17.9 |



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



Θερμοδυναμική της καύσης

Σταθερές ισορροπίας ($\log_{10} K_p$) αντιδράσεων

άνθρακα αερίου

Οι σταθερές ισορροπίας των αντιδράσεων του παραπάνω Πίνακα ενθαλπιών παρατίθενται σε λογαριθμική μορφή στον Πίνακα.

Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει από τα στοιχεία του Πίνακα είναι ότι για ισορροπία μέχρι 4000 K, δεν υπάρχει σημαντική παρεμπόδιση κατά την οξείδωση του άνθρακα προς CO και CO₂. Έτσι η αντίδραση του άνθρακα θερμοδυναμικά μπορεί να είναι πλήρης παρουσία περίσσειας οξυγόνου.

| Θερμοκρασία (K) | α/α Αντίδρασης Πίνακα | | | | | | |
|-----------------|-----------------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 300 | 68.67 | 23.93 | 44.74 | -20.81 | -15.86 | +4.95 | +8.82 |
| 400 | 51.54 | 19.13 | 32.41 | -13.28 | -10.11 | +3.17 | +5.49 |
| 500 | 41.26 | 16.26 | 25.00 | -8.74 | -6.63 | +2.11 | +3.43 |
| 600 | 34.40 | 14.34 | 20.06 | -5.72 | -4.29 | +1.43 | +2.00 |
| 700 | 29.50 | 12.96 | 16.54 | -3.58 | -2.62 | +0.96 | +0.95 |
| 800 | 25.83 | 11.93 | 13.89 | -1.97 | -1.36 | +0.61 | +0.15 |
| 900 | 22.97 | 11.13 | 11.84 | -0.71 | -0.37 | +0.34 | -0.49 |
| 1000 | 20.68 | 10.48 | 10.20 | +0.28 | +0.42 | +0.14 | -1.01 |
| 1100 | 18.80 | 9.94 | 8.86 | +1.08 | +1.06 | -0.02 | -1.43 |
| 1200 | 17.24 | 9.50 | 7.74 | +1.76 | +1.60 | -0.16 | -1.79 |
| 1300 | 15.92 | 9.12 | 6.8 | +2.32 | +2.06 | -0.26 | -2.10 |
| 1400 | 14.78 | 8.79 | 5.99 | +2.80 | +2.44 | -0.36 | -2.36 |
| 4000 | 5.14 | 5.84 | -0.70 | - | - | - | - |



Θερμοδυναμική της καύσης

Ισορροπία CO/CO₂ : Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο λόγος συγκεντρώσεων των παραγομένων μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα από την αντίδραση στερεού άνθρακα με οξυγόνο. Πολύ παλιότερα υπήρχε η αντίληψη ότι και τα δύο αέρια παράγονταν σε αναλογία που εξαρτάται από την θερμοκρασία (π.χ. ο λόγος CO/CO₂ αυξάνει με την θερμοκρασία, ενώ το κρίσιμο συστατικό στις υψηλές θερμοκρασίες (>1000°C) είναι το CO).

Η δυσκολία αντιμετώπισης του προβλήματος έγκειται στο γεγονός ότι η αρχική ισορροπία μεταξύ CO και CO₂ μεταβάλλεται από την δευτερεύουσα αντίδρασή του CO προς CO₂ στην αέρια φάση. Ο λόγος των συγκεντρώσεων CO/CO₂ συνδέεται με την σχέση:

$$\frac{[CO]}{[CO_2]} = f e^{-\Delta E/RT}$$

Σύμφωνα με την σχέση αυτή, ο λόγος CO/CO₂ είναι ανεξάρτητος από την ενεργότητα του άνθρακα, ενώ το κύριο προϊόν των επιφανειακών αντιδράσεων σε υψηλές θερμοκρασίες είναι το CO.



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



Κινητική ετερογενών αντιδράσεων καύσης

Η επίτευξη της ισορροπίας κατά την καύση δεν είναι πάντοτε και για όλους τους καυστήρες δυνατή. Ο ρυθμός έκλυσης των πτητικών, η ανάπτυξη εσωτερικών επιφανειών και πορώδους δομής και η διάχυση αντιδρώντων και προϊόντων είναι συναρτήσεις της δομής και της σύστασης (και συνεπώς της τάξης) του άνθρακα, του ρυθμού θέρμανσης στον συγκεκριμένο καυστήρα, και του ρυθμού μεταφοράς μάζας προς τα καιόμενα σωματίδια και στο εσωτερικό τους. Έτσι, η κινητική των αντιδράσεων αποκτά ιδιαίτερη σημασία.



Κινητική ετερογενών αντιδράσεων καύσης

Χημική κινητική: Πρώτος ο Langmuir έθεσε τις βάσεις για την κινητική της καύσης εξηγώντας τα αποτελέσματα αντιδράσεων άνθρακα και οξυγόνου με βάση τις ισόθερμες προσρόφησης, γνωστές ήδη από την ετερογενή κατάλυση.

Οι δύο βασικές παραδοχές της θεωρίας αυτής είναι ότι: (α) υπάρχουν ενεργά κέντρα προσρόφησης στα οποία χημειορροφάται οξυγόνο με ρυθμό ανάλογο της συγκέντρωσής του (p_s) και μιας σταθεράς ταχύτητας k_1 , και (β) τα κέντρα αυτά καθίστανται εκ νέου ενεργά με την εκρόφηση του οξυγόνου, το οποίο απομακρύνει και άτομα άνθρακα με αποτέλεσμα την αντίδραση CO σε CO_2 , ανάλογη της σταθεράς k_2 .



Θερμικές διεργασίες ανθράκων

Κινητική ετερογενών αντιδράσεων καύσης

Μετά την επίτευξη δυναμικής ισορροπίας, η ταχύτητα αντίδρασης ανά μονάδα επιφάνειας, R_s , δίνεται από την σχέση:

$$R_s = \frac{k_1 k_2 p_s}{k_1 p_s + k_2}$$

Η βασική αυτή εξίσωση οδηγεί σε δύο ακραίες κινητικές εκφράσεις: (α) σε υψηλές πιέσεις η αντίδραση είναι μηδενικής τάξης, και (β) σε χαμηλές πιέσεις, είναι πρώτης τάξης ως προς το οξυγόνο. Δηλαδή:

$$R_s = k_2 \quad \text{για} \quad k_1 p_s \gg k_2$$

$$R_s = k_1 p_s \quad \text{για} \quad k_2 \gg k_1 p_s$$

Παρόμοια αποτελέσματα είναι δυνατόν να ληφθούν όταν μεταβληθεί σημαντικά η θερμοκρασία και με την προϋπόθεση ότι οι σταθερές k_1 , k_2 εξαρτώνται διαφορετικά από την θερμοκρασία.



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



Κινητική ετερογενών αντιδράσεων καύσης

Επίδραση της επαναρρόφησης: Όταν ένα από τα αέρια καύσης επαναρροφάται στο στερεό, η ισόθερμη της αντίδρασης διαμορφώνεται ως εξής:

$$R_S = \frac{k_1 k_2 p_S}{k_1 p_S + k_2 k_3 p_3}$$

όπου k_3 και p_3 η σταθερά ισορροπίας και η μερική πίεση αντίστοιχα του επαναρροφούμενου συστατικού. Η επαναρρόφηση δρα ανασταλτικά στην πρόοδο της αντίδρασης αφού καταλαμβάνονται θέσεις ρόφησης των αερίων αντιδρώντων. Πάντως η εξίσωση αυτή έχει επαληθευθεί μόνο για αντιδράσεις άνθρακα με CO_2 και με ατμό και όχι για τις αντιδράσεις οξείδωσης.



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



Κινητική ετερογενών αντιδράσεων καύσης

Στάδια αντίδρασης: Η σταθερά ταχύτητας εκφραζόμενη με την μορφή της εξίσωσης Arrhenius:

$$k = Ae^{-E/RT}$$

αποτελεί στην πραγματικότητα μία φαινόμενη σταθερά του συνδυασμού όλων των ενδιάμεσων σταδίων.



Κινητική ετερογενών αντιδράσεων καύσης

Στα συστήματα άνθρακα, ο Gulbransen προτείνει τα εξής στάδια αντιδράσεων (χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η διάχυση):

(1) Στατική ρόφηση

- η αντίδραση ελέγχεται από την προσρόφηση
- η αντίδραση ελέγχεται από την διάσπαση

(2) Δυναμική προσρόφηση

- ανενεργή εξίσωση (Hertz – Knudsen)
- ενεργή

(3) Χημικές επιφανειακές αντιδράσεις

- Κινητική πρώτης τάξης
- Κινητική μηδενικής τάξης

(4) Εκρόφηση

Ο Gulbransen, συνδυάζοντας πειραματικά δεδομένα και πειραματικές αναλύσεις, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ταχύτητα αντίδρασης ελέγχεται είτε από στατική προσρόφηση με διάσπαση (στάδιο 1β) είτε από ενεργή δυναμική προσρόφηση (στάδιο 2β).



ΠΥΡΟΛΥΣΗ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΠΥΡΟΛΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

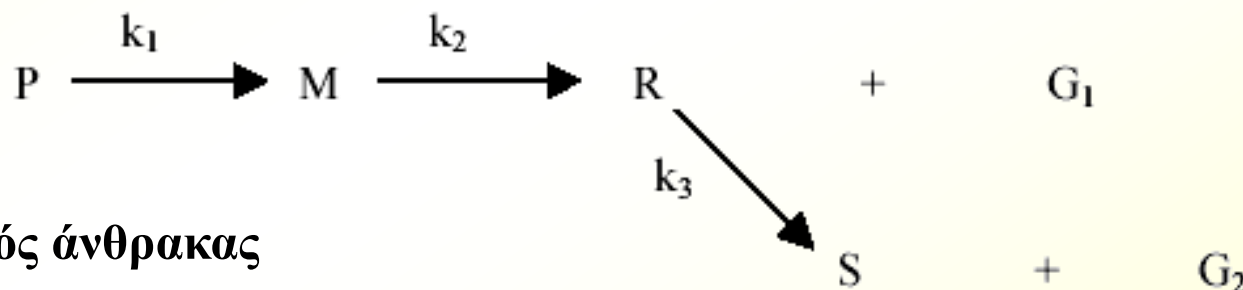
Η πυρόλυση αποτελεί μια από παλαιότερες θερμικές κατεργασίες του άνθρακα. Μπορεί να θεωρηθεί ως η σημαντικότερη θερμική διεργασία του άνθρακα καθώς λαμβάνει χώρα και σε όλες τις άλλες διεργασίες του άνθρακα. Συνεπώς, απαιτείται μελέτη και διερεύνηση και της πυρόλυσης ακόμη και όταν μελετώνται οι άλλες διεργασίες.

Η πυρόλυση γίνεται σε αδρανή ατμόσφαιρα οπότε και λαμβάνει χώρα θερμική αποσύνθεση ορυκτού με ταυτόχρονη παραγωγή στερεού προϊόντος (εξανθράκωμα) πλούσιου σε άνθρακα, υγρών και αερίων προϊόντων πλούσιων σε υδρογόνο. Χαρακτηρίζεται ως εξανθράκωση χαμηλής θερμοκρασίας όταν λαμβάνει χώρα στην θερμοκρασιακή περιοχή από 400°C ως 700°C και ως υψηλής θερμοκρασίας εξανθράκωση όταν η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 900°C.



ΠΥΡΟΛΥΣΗ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΠΥΡΟΛΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Σύμφωνα με την θεωρία του van Krevelen, η απότομη θέρμανση και τήξη του άνθρακα προκαλεί αποπολυμερισμό και διάσπαση συγκεκριμένων δεσμών της ανθρακικής δομής, παράγοντας ένα ασταθές ενδιάμεσο πλαστικής φύσης (μεταπλαστικό). Ο μηχανισμός αυτός παριστάνεται με το ακόλουθο σχήμα αντιδράσεων:



όπου: **P** = αρχικός άνθρακας

M = ενδιάμεσο προϊόν (μεταπλαστικό)

R = εξανθράκωμα ή ημικώκ

S = κωκ

G₁, G₂ = πρωτογενές και δευτερογενές αέριο

k₁, k₂, k₃ = κινητικές σταθερές διάσπασης



ΠΥΡΟΛΥΣΗ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΠΥΡΟΛΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Το κύριο προϊόν (κατά βάρος) είναι **το στερεό υπόλειμμα** (εξανθράκωμα ή κωκ), ενώ τα πτητικά αποτελούνται από αέρια και υγρά. Οι χαμηλές θερμοκρασίες ευνοούν τον σχηματισμό υγρών, ενώ τα αέρια προϊόντα να υπερτερούν σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 800°C ως 900°C. Τα κυριότερα προϊόντα είναι πισσώδη και ελαιώδη υγρά, ελαφροί υδρογονάνθρακες όπως CH_4 , C_2H_4 καθώς και H_2 , CO , CO_2 , H_2S , N_2 κλπ.

Με βάση το είδος των παραγόμενων προϊόντων και την θερμοκρασία που παράγονται, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η λειτουργική ομάδα από την οποία προέρχονται καθώς οι διάφοροι δεσμοί στην ανθρακική δομή χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ενέργειες ενεργοποίησης. Συνεπώς, πλην των άλλων, η πυρόλυση αποτελεί εργαλείο μελέτης της δομής του άνθρακα καθώς τα παραγόμενα προϊόντα αντικατοπτρίζουν την δομή του συγκεκριμένου άνθρακα.



ΠΥΡΟΛΥΣΗ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΠΥΡΟΛΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Συνοπτικά, η διεργασία της πυρόλυσης μπορεί να θεωρηθεί ότι προχωρά, κυρίως, σύμφωνα με τα ακόλουθα στάδια:

1. σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 400°C – 500°C) λαμβάνει χώρα διάσπαση των καρβοξυλικών και μέρους των υδροξυλικών ομάδων της κυρίως δομής, σχηματίζοντας CO_2 και H_2 και λιγότερο CO . Ταυτόχρονα, ανιχνεύονται και βαριά υγρά που ήταν παγιδευμένα στην πορώδη δομή και ελευθερώνονται με την άνοδο της θερμοκρασίας.
2. θερμική αποικοδόμηση των μακρομοριακών αλυσίδων αρχίζει πάνω από τους 400°C συνοδευόμενη από τον σχηματισμό μοριακού υδρογόνου, λόγω αφυδρογόνωσης των υδρογονοαρωματικών δομών, καθώς και τον σχηματισμό ελαφρών υδρογονανθράκων $\text{C}_1 - \text{C}_4$. Το υδρογόνο προέρχεται από την διάσπαση δεσμών $\text{C} - \text{H}$, ενώ οι υδρογονάνθρακες από αλειφατικές ρίζες και γέφυρες. Ταυτόχρονα απομακρύνονται μεγαλομοριακά συμπλέγματα καθώς έχουν διασπαστεί οι γέφυρες που τα συνέδεαν.



ΠΥΡΟΛΥΣΗ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΠΥΡΟΛΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

3. κατά το τρίτο στάδιο λαμβάνει χώρα είτε υδρογόνωση των παραχθέντων βαριών προϊόντων και διάχυση τους έξω από το σωματίδιο του άνθρακα (πτητικά), είτε επανασύνδεση τους με ενεργά άτομα άνθρακα της στερεάς φάσης με επιπλέον απώλεια υδρογόνου.
4. τέλος σε θερμοκρασίες πάνω από 700°C γίνεται διάσπαση των ετεροκυκλικών δακτυλίων που περιέχουν οξυγόνο σχηματίζοντας CO .



ΠΥΡΟΛΥΣΗ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΠΥΡΟΛΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Ο σχηματισμός των προϊόντων της πυρόλυσης επηρεάζεται από μια σειρά παραμέτρων όπως,

- η θερμοκρασία,
- η ολική πίεση,
- το αέριο περιβάλλον και
- ο τύπος του άνθρακα,

που χαρακτηρίζονται ως κύριες.

Επιπλέον, επηρεάζεται και από τον χρόνο παραμονής του στερεού καθώς και του αερίου προϊόντος, τον ρυθμό θέρμανσης, το μέγεθος σωματιδίων και την θερμική ιστορία του άνθρακα που θεωρούνται ως δευτερεύουσες παράμετροι.



ΠΥΡΟΛΥΣΗ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΠΥΡΟΛΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Υδρογονοπυρόλυση είναι η διεργασία πυρόλυσης που λαμβάνει χώρα παρουσία υδρογόνου αντί της αδρανούς ατμόσφαιρας και περιλαμβάνει, πλην των αντιδράσεων της πυρόλυσης, και τις δευτερεύουσες αντιδράσεις με υδρογόνο.

Η κατανομή των προϊόντων είναι διαφορετική από την πυρόλυση καθώς η παραγωγή υγρών περιορίζεται σε μικρότερου μοριακού βάρους ενώσεις εμπλουτισμένες σε υδρογόνο, ενώ οι αέριοι υδρογονάνθρακες είναι το κυριότερο προϊόν.



ΠΥΡΟΛΥΣΗ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΠΥΡΟΛΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η παρουσία του υδρογόνου αλλάζει σημαντικά την εκλεκτικότητα του δεύτερου και τρίτου σταδίου της πυρόλυσης καθώς η παρουσία H_2

- ❑ αυξάνει την παραγωγή πτητικών αντιδρώντας με τις ελεύθερες ρίζες,
- ❑ προκαλεί τον σχηματισμό αρωματικών ενώσεων μικρού μοριακού βάρους και μεθανίου αντιδρώντας στην αέρια φάση με τα υγρά (πίσσες) και
- ❑ ευνοεί τον σχηματισμό μεθανίου αντιδρώντας σε θερμοκρασίες πάνω από $700^\circ C$ απ' ευθείας με το στερεό (εξανθράκωμα).



ΠΥΡΟΛΥΣΗ - ΥΔΡΟΓΟΝΟΠΥΡΟΛΥΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Σε αντιστοιχία με την πυρόλυση, οι κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν την υδρογονοπυρόλυση είναι:

- ✓ η πίεση του υδρογόνου,
- ✓ η θερμοκρασία και ο ρυθμός θέρμανσης,
- ✓ ο χρόνος παραμονής του άνθρακα και των πτητικών,
- ✓ το μέγεθος των σωματιδίων και
- ✓ η τάξη του άνθρακα και η περιεχόμενη ανόργανη ύλη.



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



ΕΞΑΕΡΙΩΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Εξαερίωση είναι η θερμική διαδικασία κατά την οποία ένα στερεό ανθρακούχο υλικό μετατρέπεται κατά ένα ποσοστό σε μίγμα καυσίμων αερίων ή αερίου σύνθεσης (CO/H₂).

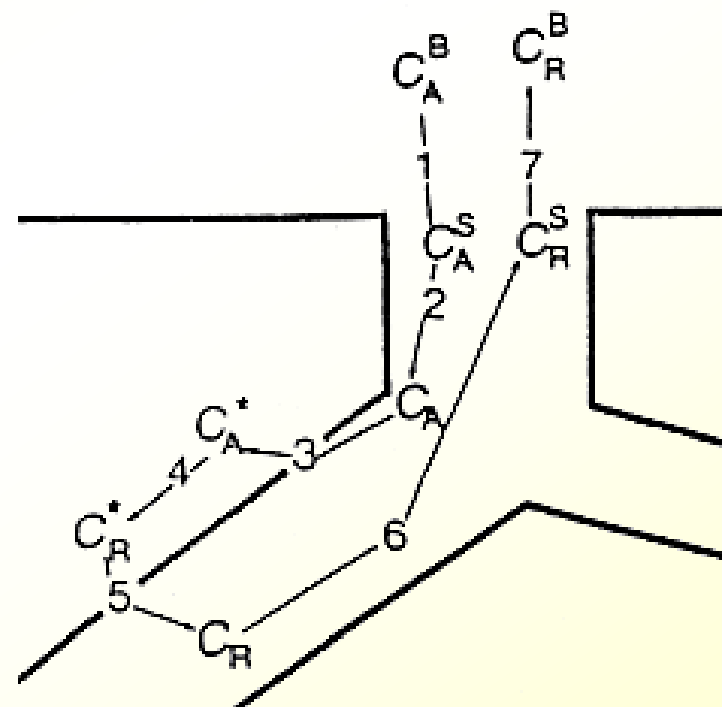
Το ενεργειακό περιεχόμενο του παραγόμενου αερίου εξαρτάται άμεσα από το μέσον, την θερμοκρασία και την πίεση της αντίδρασης εξαερίωσης.



ΕΞΑΕΡΙΩΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η διεργασία της εξαερίωσης αποτελείται από επτά επιμέρους στάδια:

1. Μεταφορά του αντιδρώντος A από το κύριο ρεύμα στην επιφάνεια των σωματιδίων του άνθρακα.
2. Μεταφορά των αντιδρώντων αερίων μέσα στους πόρους.
3. Προσρόφηση των αντιδρώντων στα ενεργά κέντρα.
4. Επιφανειακή χημική αντίδραση μεταξύ των προσροφημένων μορίων ή ατόμων με τον άνθρακα.
5. Μεταφορά των αερίων μέσα από τους πόρους προς την επιφάνεια του σωματιδίου.
6. Μεταφορά των προϊόντων από την επιφάνεια των σωματιδίων στο κύριο ρεύμα



Στάδια που περιλαμβάνονται στις αντιδράσεις εξαερίωσης



ΕΞΑΕΡΙΩΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Κατά την εξαερίωση με ατμό, ο άνθρακας αντιδρά με τον ατμό προς H_2 και CO . Στην συνέχεια τα δύο αυτά αέρια μπορεί να συμμετάσχουν στην ομογενή αντίδραση (2) και στην αντίδραση της μεθάνωσης (5). Επίσης μπορεί να συμβούν παράπλευρες αντιδράσεις CO_2 και H_2 με τον αρχικό άνθρακα. Επειδή η συνολική αντίδραση ατμού – άνθρακα είναι ενδόθερμη, η διατήρηση ισοθερμοκρασιακών συνθηκών στους αντίστοιχους αντιδραστήρες επιτυγχάνεται με την προσθήκη οξυγόνου και την παροχή θερμότητας από την μερική καύση του άνθρακα, αντίδραση (8).

Οι κύριες και δευτερεύουσες αντιδράσεις εξαερίωσης άνθρακα με H_2O , CO_2 , H_2 και O_2

| α/α | Αντίδραση | ΔH (kJ/mol) |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Εξαερίωση με ατμό | | |
| (1) | $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ | + 118.5 |
| (2) | $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ | - 42.3 |
| (3) | $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ | -206.0 |
| (4) | $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ | + 170.7 |
| (5) | $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$ | - 74.8 |
| Εξαερίωση με CO_2 | | |
| (6) | $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ | + 170.7 |
| Εξαερίωση με H_2 | | |
| (7) | $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$ | - 74.8 |
| Εξαερίωση με O_2 (καύση) | | |
| (8) | $C + O_2 \rightarrow CO_2$ | - 406.0 |
| (9) | $C + 1/2O_2 \rightarrow CO$ | - 123.0 |



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



ΕΞΑΕΡΙΩΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η εξαερίωση του άνθρακα με CO_2 είναι μια αρκετά πιο απλή διεργασία κατά την οποία αναβαθμίζεται το περιεχόμενο σε άνθρακα και ενέργεια ενός μη χρήσιμου θερμικού αερίου, του CO_2 . Όπως και στην εξαερίωση με ατμό η αντίδραση είναι ενδόθερμη με αποτέλεσμα να απαιτείται προσθήκη θερμότητας, αντίδραση (6).

Τέλος κατά την εξαερίωση του άνθρακα με υδρογόνο παράγεται μεθάνιο με ταυτόχρονη έκλυση μικρού ποσού θερμότητας, αντίδραση (7).



Θερμοδυναμική της εξαερίωσης

Η θερμοδυναμική μελέτη της εξαερίωσης επιτρέπει τον προσδιορισμό των σταθερών ισορροπίας και των θερμοτήτων αντιδράσεων, καθώς και τον σχεδιασμό των αντίστοιχων αντιδραστήρων. Λαμβάνοντας υπόψη την ανομοιογένεια της δομής του άνθρακα, και προς διευκόλυνση της ανάλυσης που ακολουθεί, έχει γίνει παραδοχή ότι ο άνθρακας είναι σε γραφιτική μορφή.

Οι τρεις κύριες αντιδράσεις που συμμετέχουν στην εξαερίωση είναι



Αφαιρώντας την (3) από την (2) προκύπτει:





Κινητική της εξαερίωσης

Η κινητική μελέτη της εξαερίωσης παρουσιάζει σημαντικές ιδιαιτερότητες που οφείλονται τόσο στην ποικιλία όσο και στην ιδιομορφία του εκάστοτε ορυκτού άνθρακα που παίρνει μέρος στην αντίδραση. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- ❑ Η εξαερίωση είναι **ετερογενής αντίδραση** μεταξύ μιας αέριας και μιας στερεής φάσης που καταναλώνεται συνεχώς και μεταβάλλει την πορώδη δομή της.
- ❑ Η δραστηριότητα του άνθρακα εξαρτάται από τον αριθμό των κέντρων που είναι διαθέσιμα για χημική αντίδραση. Ο αριθμός αυτός σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στην ετερογενή κατάλυση, μεταβάλλεται συνεχώς δυσχεραίνοντας έτσι την κινητική περιγραφή.
- ❑ Ο άνθρακας είναι ετερογενές υλικό με σύσταση που εξαρτάται από την τάξη και την προΐστορία του κοιτάσματος. Η ύπαρξη ορισμένων ενώσεων που πιθανόν να δρουν καταλυτικά, μπορεί να μεταβάλλει την κινητική των αντιδράσεων.



Κινητική της εξαερίωσης

Το πρώτο στάδιο της εξαερίωσης είναι κοινό με αυτό της καύσης και αποτελείται από την έκλυση πτητικών ουσιών που υπάρχουν στην δομή του άνθρακα και την πυρόλυση μεγαλομορίων προς ελαφρότερα αέρια προϊόντα, όπως υδρογονάνθρακες, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα.

Η πυρόλυση δημιουργεί ένα ενεργό εξανθράκωμα το οποίο στην συνέχεια αντιδρά με το αέριο μέσον εξαερίωσης (υδρατμό, υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα) προς παραγωγή ελαφρών ενώσεων. Ο ρυθμός θέρμανσης των σωματιδίων του άνθρακα, και συνεπώς ο ρυθμός πυρόλυσης επηρεάζουν την ενεργότητα του εξανθρακώματος για περαιτέρω αντίδραση, αλλά και την σύσταση των αερίων και υγρών προϊόντων της αντίδραση. Για αυτό και κινητικά αποτελέσματα που λαμβάνονται σε αργούς χρόνους θέρμανσης ($1-100^{\circ}\text{C}/\text{min}$) πρέπει να χρησιμοποιούνται προσεκτικά προκειμένου να σχεδιαστούν εγκαταστάσεις εξαερίωσης με υψηλούς ρυθμούς θέρμανσης ($10^3 - 10^4^{\circ}\text{C}/\text{s}$), όπως ρευστοστερεές κλίνες ή αντιδραστήρες παράσυρσης.



Κινητική της εξαερίωσης

Μέχρι τους $500 - 550^{\circ}\text{C}$ ο σχηματισμός μεθανίου προέρχεται από την πυρόλυση του άνθρακα και δεν είναι συνάρτηση της παρουσίας υδρογόνου.

Στο θερμοκρασιακό διάστημα $550 - 700^{\circ}\text{C}$ το μεθάνιο σχηματίζεται από χαλάρωση δεσμών C-C σε εξαμελής δακτυλίους λόγω απομάκρυνσης πλευρικών ομάδων ως πτητικών ή οξειδίων του άνθρακα.

Πάνω από 800°C οι χαλαρωμένοι δεσμοί αντιδρούν με υδρογόνο, ανάλογα με την μερική πίεση του υδρογόνου και ρυθμός σχηματισμού μεθανίου είναι κατά προσέγγιση πρώτης τάξεως ως προς υδρογόνο.



Κινητική της εξαερίωσης

Οι οξυγονούχες ομάδες της δομής του άνθρακα διασπώνται κατά την πυρόλυση προς οξείδια του άνθρακα. Οι αντιδράσεις αυτές έχουν έντονο ενδιαφέρον στους λιγνίτες λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε οξυγόνο. Το CO_2 μπορεί να προέρχεται από καρβοξυλικές ομάδες ή ανθρακικά άλατα σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η εμφάνιση σε θερμοκρασίες άνω των 200°C και σε όλη την συνήθη κλίμακα των θερμοκρασιών εξαερίωσης ($\sim 1000^\circ\text{C}$) υποδεικνύει την συμμετοχή καρβοξυλικών ομάδων με διάφορες ενέργειες ενεργοποίησης, όπως ακραίες καρβοξυλικές ρίζες, υποκατεστημένες καρβοξυλικές ομάδες με ιόντα, εστεροποιημένες καρβοξυλικές ομάδες κλπ.

Αντίθετα προς το CO_2 , το CO σχηματίζεται πάνω από 500°C , από την διάσπαση φαινολικών ομάδων ή από σχάση ετεροκυκλικών δακτυλίων που περιέχουν οξυγόνο. Με βάση την διαφορετική προέλευση CO , CO_2 και τις σχετικές συγκεντρώσεις του κατά την πυρόλυση σε αδρανή ατμόσφαιρα είναι δυνατόν να εκτιμηθεί ότι η περιεκτικότητα του λιγνίτη Πτολεμαΐδας σε καρβοξυλικές ομάδες είναι 10 – 12 φορές μεγαλύτερη από ότι σε φαινολικές ομάδες και/ή σε ετεροκυκλικές ενώσεις οξυγόνου.



ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η μετατροπή του άνθρακα σε υγρούς υδρογονάνθρακες δεν είναι εύκολη. Συγκρινόμενος με το αργό πετρέλαιο, ο άνθρακας υστερεί σε υδρογόνο, αφού περιέχει μόνο το μισό υδρογόνο περίπου και πολύ μεγαλύτερη ποσότητα αζώτου, οξυγόνου και τέφρας.

Χημική σύνθεση μερικών ανθράκων και πετρελαίου

| Στοιχείο | Ανθρακίτης | Ασφαλτ. με Μέτρια Περιεκτ. Πηητικών | Ασφαλτ. Α με Υψηλή Περιεκτ. Πηητικών | Ασφαλτ. Β με Υψηλή Περιεκτ. Πηητικών | Λιγνίτης | Αργό Πετρέλαιο | Βενζίνη | Τολουένιο |
|----------|------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------|----------------|---------|-----------|
| C (%) | 93.7 | 88.4 | 84.5 | 80.3 | 72.7 | 82-87 | 86 | 91.3 |
| H (%) | 2.4 | 5.0 | 5.6 | 5.5 | 4.2 | 11-14 | 14 | 8.7 |
| O (%) | 2.4 | 4.1 | 7.0 | 11.1 | 21.3 | | | |
| N (%) | 0.9 | 1.7 | 1.6 | 1.9 | 1.2 | 0.2 | | |
| S (%) | 0.6 | 0.8 | 1.3 | 1.2 | 0.6 | 1.0 | | |
| H:C+ | 0.31 | 0.67 | 0.79 | 0.82 | 0.69 | 1.76 | 1.94 | 1.14 |

+H: C ατομικός λόγος υπολειμματικών ασφαλτενίων πετρελαίου 1.18, ρητίνης 1.47, ελαίου 1.67.

Αυτό σημαίνει ότι, οι διεργασίες οι οποίες εφαρμόζονται στον άνθρακα πρέπει να αυξάνουν την αναλογία υδρογόνου / άνθρακα, κάτω από μάλλον σφοδρές συνθήκες και να αφαιρούν επίσης τα ετεροάτομα και την ανόργανη ύλη, που σχετίζονται με αυτόν. Η τροφοδοσία υδρογόνου μπορεί να είναι η αέρια φάση, ένας διαλύτης-δότης, ή ακόμα και κάποιο μέρος του ιδίου του άνθρακα.



ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η υδρογόνωση του άνθρακα για την παραγωγή υγρών μπορεί να επιτελεσθεί **άμεσα ή έμμεσα**.

Η έμμεση υγροποίηση προϋποθέτει την συνολική διάσπαση της δομής του άνθρακα με αεριοποίηση, ακολουθούμενη από χημική επεξεργασία των αερίων προϊόντων με σκοπό την παραγωγή καθαρών υγρών καυσίμων (σύνθεση Fischer-Tropsch).

Η άμεση υγροποίηση περιλαμβάνει μερική διάσπαση της δομής του άνθρακα, επιτρέποντας την διάλυσή του σε ένα διαλύτη, ακολουθούμενη από υδρογονοδιάσπαση για την απελευθέρωση των υγρών προϊόντων, τα οποία γενικά απαιτούν αναβάθμιση πριν την χρήση τους. Αν και η έμμεση υγροποίηση έχει εφαρμοσθεί εμπορικά στην Νότια Αφρική (διεργασία SASOL) από το 1956, η διεργασία είναι θερμικά ανεπαρκής και έχει πιθανότητες βιωσιμότητας μόνο όταν υπάρχουν μεγάλα αποθέματα άνθρακα χαμηλού κόστους. Η άμεση υγροποίηση, αν και έχει δυνητικά χαμηλότερο κόστος, έχει μόνο πρόσφατα φτάσει στο στάδιο της εμπορικής εκμετάλλευσης.



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η άμεση υγροποίηση του άνθρακα περιλαμβάνει την **υδρογόνωση του άνθρακα** με την παρουσία ενός διαλύτη δότη υδρογόνου, καθώς και μοριακού υδρογόνου, σε αυξημένη θερμοκρασία (370-480°C) και πίεση (10,2-27,2 MPa).

Τα παραγόμενα υγρά είναι δύο τύπων βασικά. Ο πρώτος είναι ένα συνθετικό - κυρίως αρωματικό - αργό πετρέλαιο κατάλληλο για περαιτέρω επεξεργασία, προοριζόμενο για παραγωγή βενζίνης και άλλων προϊόντων, και ο δεύτερος ένα βαρύ καύσιμο πετρέλαιο για χρήση σε λέβητες.

Ο διαλύτης απαιτείται για την δημιουργία πολτού με τον άνθρακα, την δωρεά ατόμων υδρογόνου και την μεταφορά υδρογόνου από την αέρια φάση στον άνθρακα. Η εφαρμογή πίεσης υδρογόνου αυξάνει τον βαθμό μετατροπής του άνθρακα και διατηρεί την ενεργότητα του διαλύτη δότη. Η μέγιστη κατάλληλη θερμοκρασία αυξάνεται, όσο αυξάνεται η αναλογία διαλύτη / άνθρακα και η περιεκτικότητα των διαλυτών σε δότη. Η τελευταία αυξάνεται, επίσης, όσο αυξάνεται η μερική πίεση του υδρογόνου.



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

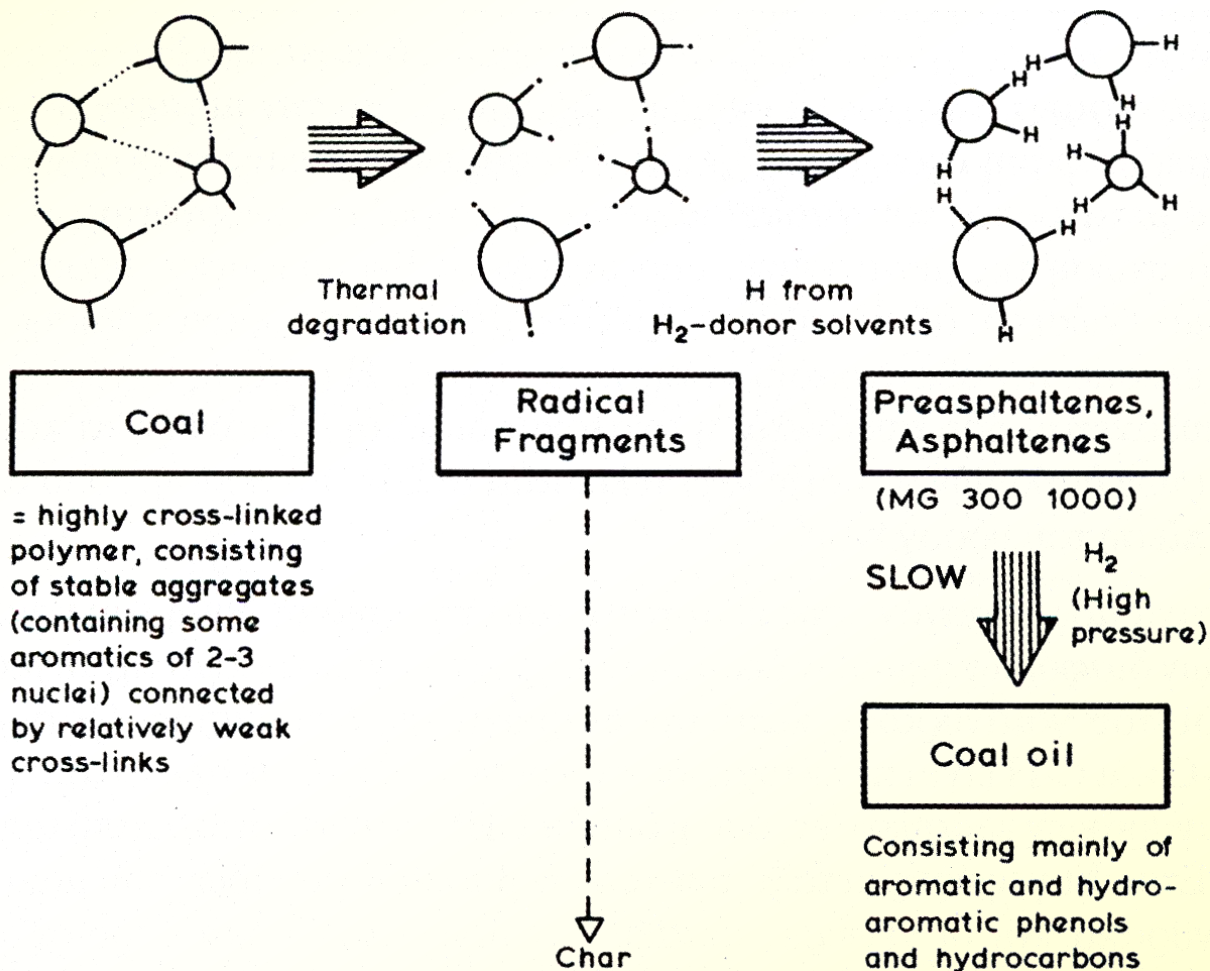
Ο μηχανισμός υδρογόνωσης εξαρτάται από την **χημική δομή του άνθρακα**. Η ισχύς των διαφόρων χημικών δεσμών ελέγχει σε μεγάλο βαθμό την συμπεριφορά του μορίου του άνθρακα, κατά την διάρκεια της διεργασίας.

Οι αρωματικοί δεσμοί C-C και C-H είναι πολύ ισχυροί, ενώ οι δεσμοί C-C σε αλειφατικές γέφυρες υδρογονανθράκων εξασθενούν, όσο η ομάδα CH₂ αντικαθίσταται από αρωματικές ενώσεις. Έτσι, οι γέφυρες μεταξύ των απλών βασικών μονάδων του μακρομορίου του άνθρακα και οι γέφυρες μεταξύ των αρωματικών και υδροαρωματικών ενώσεων, μέσα σε μία βασική μονάδα, είναι λιγότερο σταθερές από ότι οι υπόλοιποι χημικοί δεσμοί.



Θερμικές διεργασίες ανθράκων

ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ



Βήματα αντίδρασης άμεσης υδρογόνωσης άνθρακα

Το πρώτο βήμα της χημικής αντίδρασης (στους 350°C περίπου) είναι η πυρολυτική διάσπαση των ασθενών χημικών δεσμών της μήτρας του άνθρακα, κατά την οποία επέρχονται η απώλεια των ομάδων υδροξυλίου, η αφυδρογόνωση κάποιων αρωματικών, η αποκοπή των γεφυρών μεθυλενίου και η διάρρηξη των αλικυκλικών δακτυλίων, η οποία οδηγεί στην δημιουργία ελεύθερων ριζών.

Στο επόμενο βήμα, οι ελεύθερες ρίζες σταθεροποιούνται σύντομα με την προσθήκη υδρογόνου από έναν διαλύτη-δότη υδρογόνου, σχηματίζοντας προα-σφαλτένια, ασφαλτένια και υδροαρωματικές ενώσεις, με μοριακά βάρη μεταξύ 300 και 1000. Αυτά στην συνέχεια αφυδρογονώνονται, ενώ το υδρογόνο μεταφέρεται στις ελεύθερες ρίζες, οι οποίες προκύπτουν από τον άνθρακα, με διαφορετικούς ρυθμούς. Η σφοδρή υδρογόνωση του διαλύτη δεν είναι επιθυμητή, επειδή παράγει σχετικά φτωχούς δότες και μειώνει την δυνατότητα διάλυσης του άνθρακα. Από την άλλη πλευρά, απόντος ενός καλού διαλύτη-δότη υδρογόνου, οι ελεύθερες ρίζες μπορεί να ενωθούν και να σχηματίσουν κωκ ή πίσσα.

Το τελευταίο βήμα αυτής της αντίδρασης είναι μία μάλλον αργή διεργασία, κατά την οποία εμπλέκονται πολύ ισχυρότεροι δεσμοί και τα ασφαλτένια μετατρέπονται, με την παρουσία αέριου υδρογόνου σε υψηλή θερμοκρασία, σε μικρότερες μοριακές ενώσεις. Επίσης, στις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα συμπεριλαμβάνονται η υδρογόνωση των αρωματικών δακτυλίων, η αφυδάτωση, η απώλεια ετεροατόμων από διάνοιξη δακτυλίων και η σχάση των δομών γεφύρωσης.



ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η άμεση υγροποίηση του άνθρακα οδηγεί σε ένα εξαιρετικά σύνθετο μείγμα, το οποίο περιέχει εκατοντάδες ενώσεις. Μερικές από αυτές είναι επιθυμητές στην σύνθεση ενός καυσίμου, ή μίας πρώτης ύλης τροφοδοσίας και συχνά περιγράφονται σαν αυτές που μπορούν να αντικαταστήσουν τα καύσιμα τα οποία έχουν σαν βάση το πετρέλαιο. Ολα τα σε χρήση κύρια υγρά καύσιμα, ή βενζίνη για κινητήρες, το πετρέλαιο θέρμανσης, τα καύσιμα diesel, τα καύσιμα για την αεροπλοΐα και τα καύσιμα από απόσταξη για βιομηχανικές και γενικής χρήσης εφαρμογές μπορούν, κατ' αρχήν, να παραχθούν με υγροποίηση του άνθρακα.



ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Ανάλογα με την συμπεριφορά διαλυτότητάς τους, τα υγρά προϊόντα της μετατροπής του άνθρακα ταξινομούνται σε

- προασφαλτένια (διαλυτά σε πυριδίνη, και αδιάλυτα σε βενζόλιο ή εξάνιο),
- ασφαλτένια (διαλυτά σε βενζόλιο ή τολουένιο, και αδιάλυτα σε εξάνιο) και
- έλαια (διαλυτά σε πεντάνιο ή εξάνιο).

Το υλικό, το οποίο είναι μη διαλυτό σε πυριδίνη, ταξινομείται συνήθως σαν υπόλειμμα.

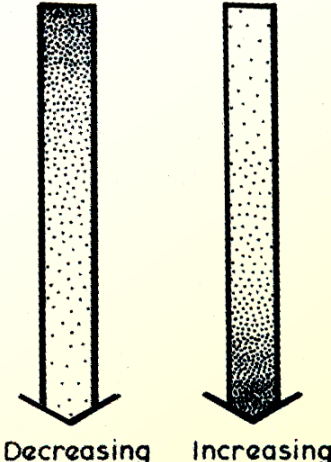


Θερμικές διεργασίες ανθράκων



ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Τα προϊόντα με μειούμενο μοριακό βάρος και ταυτόχρονα αυξανόμενη περιεκτικότητα σε υδρογόνο είναι εκχυλίσματα που περιέχουν προ-ασφαλτένια και ασφαλτένια. Αυτά είναι μαύρα, στερεά σε θερμοκρασία δωματίου, κυρίως αρωματικά, με μία σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα σε ετεροάτομα. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, απελευθερώνουν κλάσματα ελαίου τα οποία αποτελούνται κατά 80% από αλειφατικές και αρωματικές ενώσεις και κατά 20% από φαινόλες και ετεροκυκλικές ενώσεις.

| Kind of products | Molecular Weight | Hydrogen Content | |
|------------------|--|--|--|
| Residue | Non-reacted coal components, minerals, catalyst |  | |
| Extract | Preasphaltenes } Oil precursors molecular weights between 300 - 1000 Asphaltenes } | | |
| Coal oil | Heavy B.P. 340°C Middle B.P. 200 - 340°C Light B.P. 200°C | | |
| Gaseous Products | Aliphatics C ₁ to C ₄ NH ₃ /H ₂ O/H ₂ S/CO | | |

Product distribution depends on:

- Residence time, temperature, H-pressure, catalyst, coal

Important parameter:

- kg hydrogen consumption /kg carbon in coal

Προϊόντα υδρογόνωσης του άνθρακα



Θερμικές διεργασίες ανθράκων



ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Από την αντίδραση του υδρογόνου με μέρος του θείου, του αζώτου και του οξυγόνου που περιέχονται στον άνθρακα, σχηματίζονται H_2S , NH_3 , H_2O και CO . Το στερεό υπόλειμμα αποτελείται από άνθρακα που δεν έχει αντιδράσει, ανόργανη ύλη που εμπεριέχεται στον άνθρακα, καθώς και καταλύτη, αν αυτός χρησιμοποιείται στη διεργασία.



ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η κατανομή του προϊόντος εξαρτάται από τον τύπο του άνθρακα, τις συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, πίεση υδρογόνου, χρόνο παραμονής), το είδος της πηγής υδρογόνου η οποία χρησιμοποιείται και την ποσότητα υδρογόνου που καταναλώθηκε κατά την διάρκεια της αντίδρασης.

Η αναλογία των ελαίων αυξάνεται όσο αυξάνεται η κατανάλωση υδρογόνου. Τα έλαια τα οποία παράγονται από άνθρακες χαμηλής τάξης αυξάνονται μετά από σταδιακή, αλλά συνεχή έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία και περιέχουν περισσότερες αλειφατικές ενώσεις και λιγότερες αρωματικές με τρεις πυρήνες, σε σύγκριση με τους ασφαλτούχους άνθρακες.