

ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΣΗΣ

- Συμπύκνωση
- Απορρόφηση
- Χημική κατεργασία
- Προσρόφηση
- Καύση-Θερμική οξείδωση

ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

ΑΡΧΗ

Μείωση της τάσης ατμών των πτητικών ουσιών που υπάρχουν στα αερολύματα με σκοπό την υγροποίησή τους.

Η συμπύκνωση μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους:

- με μείωση της θερμοκρασίας
- με αύξηση της πίεσης

Στη βιομηχανική πρακτική, η συμπύκνωση γίνεται κατά προτίμηση μόνον με μείωση της θερμοκρασίας

ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑ

κατάλληλη

- ✓ Κατακράτηση ενώσεων με σημείο ζέσεως σχετικά υψηλότερο από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (αν το σ.ζ. είναι κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, έχει μεγάλο κόστος)
- ✓ Κατακράτηση ενώσεων που βρίσκονται στα αέρια απόβλητα σε υψηλές συγκεντρώσεις ή αποτελούν το κύριο συστατικό τους
- ✓ Απομάκρυνση συστατικών των αποβλήτων που είναι διαβρωτικά και καταστρέφουν άλλα μέρη του συστήματος απαγωγής
- ✓ Ελάττωση του όγκου των αερίων εκροής
- ✓ Ανάκτηση (επαναχρησιμοποίηση) συμπυκνώσιμων συστατικών που είναι πολύτιμα οικονομικά προϊόντα

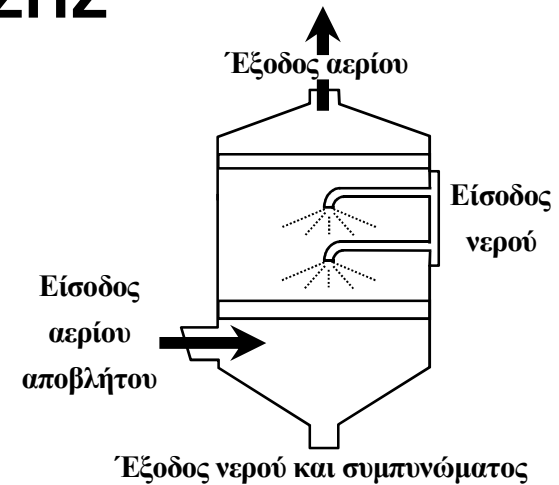
ακατάλληλη

Πολύ πτητικές ενώσεις ή για ενώσεις ιδιαίτερα τοξικές. Στις περιπτώσεις αυτές, η συμπύκνωση εφαρμόζεται ως προκαταρκτική μέθοδος επεξεργασίας των αερίων αποβλήτων και ακολουθεί άλλη μέθοδος, πιο κατάλληλη για χαμηλές συγκεντρώσεις (π.χ. προσρόφηση).

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

Συμπύκνωση με άμεση ψύξη (Contact condensation)

- Το αέριο απόβλητο έρχεται σε απευθείας επαφή με ένα ψυκτικό υγρό, το οποίο συνήθως ανακυκλώνεται αφού περάσει από εναλλάκτη θερμότητας για την απαγωγή της θερμότητας συμπύκνωσης.
- Η επαφή του αερίου εκροής με το ψυκτικό υγρό γίνεται μέσα σε ειδικούς θαλάμους (συμπυκνωτές).
- Η επιλογή του ψυκτικού γίνεται με βάση:
 - ✓ την τάση ατμών του προς συμπύκνωση ρύπου
 - ✓ τη διαλυτότητά του στο ψυκτικό υγρό
 - ✓ την παρουσία άλλων ατμών ή αερίων, κ.ά.
- Συχνά, το ψυκτικό υγρό είναι ίδιο με τους ατμούς που πρόκειται να συμπυκνωθούν



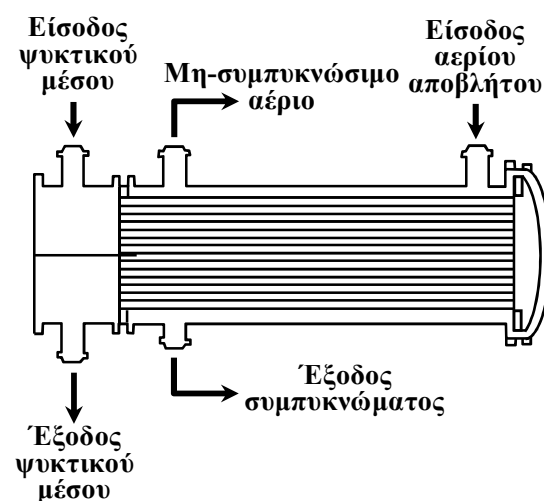
Συμπυκνωτής άμεσης ψύξης
(Contact condenser)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ: Αποφεύγεται ο διαχωρισμός των δύο φάσεων που δημιουργούνται από τη συμπύκνωση

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

Συμπύκνωση με έμμεση ψύξη (Surface condensation)

- Το αέριο απόβλητο έρχεται σε επαφή με ψυχρές μεταλλικές επιφάνειες, πάνω στις οποίες συμπυκνώνονται τα αέρια ή οι ατμοί.
- Οι μεταλλικές επιφάνειες είναι συνήθως σωλήνες, τοποθετημένοι σε ειδικούς πύργους (κατακόρυφους ή ελαφρά κεκλιμένους), οι οποίοι ψύχονται εσωτερικά με ψυκτικό υγρό.
- Το ψυκτικό υγρό ανακυκλώνεται αφού περάσει από εναλλάκτη θερμότητας.
- Η επιλογή της θερμοκρασίας ψύξης καθορίζεται από τη σύσταση του αερίου εκροής (αποφεύγεται ο σχηματισμός πάγου ή η στερεοποίηση άλλων συστατικών).
- Απόδοση: από ~50% μέχρι >95%.
- Συνήθως χρησιμοποιούνται ως συσκευές προκατεργασίας αέριων αποβλήτων.



Συμπυκνωτής έμμεσης ψύξης
(Surface condenser)

Η έμμεση ψύξη είναι πιο διαδεδομένη από την άμεση κυρίως για τη συμπύκνωση ατμών που αποτελούν το κύριο συστατικό του αερίου αποβλήτου

ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ

ΑΡΧΗ

Μεταφορά ενός ρύπου από την αέρια φάση στην υγρή, όταν η μερική πίεση του ρύπου στο μίγμα των αερίων εκροής είναι μεγαλύτερη από την τάση ατμών του στο διάλυμα.

Για την απορρόφηση χρησιμοποιούνται κατάλληλα απορροφητικά υγρά, όπως:

- ✓ νερό
- ✓ υδατικά διαλύματα χημικών ουσιών
- ✓ οργανικοί διαλύτες
- ✓ έλαια μεγάλου μοριακού βάρους

Ο **βαθμός απορρόφησης** ενός αερίου ρύπου σε ένα απορροφητικό υγρό εξαρτάται από:

- ✓ τη διαλυτότητά του στο υγρό απορρόφησης
- ✓ τη θερμοκρασία
- ✓ την επιφάνεια και τον χρόνο επαφής της αέριας φάσης με την υγρή (α. χρήση του απορροφητικού υγρού με μορφή πολύ μικρών σταγονιδίων ή λεπτού υμενίου, β. χρήση πύργων πλήρωσης)

ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ

Επιλογή απορροφητικών υγρών

Η επιλογή των απορροφητικών υγρών γίνεται με βάση:

- ✓ τις ρεολογικές τους ιδιότητες (χαμηλό ιξώδες)
- ✓ τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες:
 - ✓ χαμηλό σημείο πήξης
 - ✓ χαμηλή διαβρωτικότητα
 - ✓ χαμηλή αναφλεξιμότητα
 - ✓ υψηλή χημική σταθερότητα)
- ✓ το λειτουργικό κόστος
- ✓ τη δυνατότητα αναγέννησης και επαναχρησιμοποίησης
- ✓ την τοξικότητά τους
- ✓ την πιθανότητα δημιουργίας δευτερογενούς ρύπανσης της ατμόσφαιρας (π.χ. διαφυγή ατμών οργανικού απορροφητικού υγρού)

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Υδατική απορρόφηση

Με νερό

- Το νερό είναι κατάλληλο για την απορρόφηση των υδατοδιαλυτών αερίων (HCl, HF, SiF₄, NH₃, κ.ά.).
- Συχνά γίνεται ρύθμιση του pH για αύξηση της διαλυτότητας.
- Για αέριους ρύπους με χαμηλή διαλυτότητα απαιτούνται μεγάλοι όγκοι νερού που συνεπάγονται μεγάλο λειτουργικό κόστος.

Με υδατικά διαλύματα

- Χρησιμοποιούνται υδατικά διαλύματα χημικών ενώσεων, οι οποίες αντιδρούν με τους αέριους ρύπους και τους δεσμεύουν, π.χ. δέσμευση SO₂ με υδατικό διάλυμα NaOH, ή κατακράτηση CO₂ με υδατικό διάλυμα Ca(OH)₂.
- Αυτές οι τεχνικές απορρόφησης θεωρούνται χημικές κατεργασίες.

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

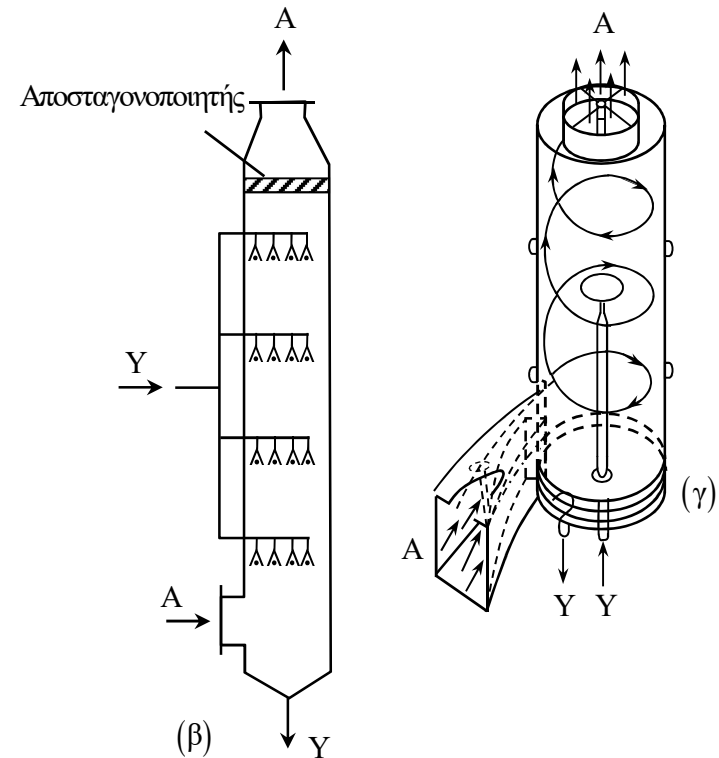
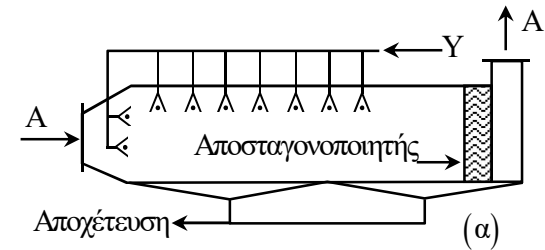
Μη-υδατική απορρόφηση

- Χρησιμοποιεί οργανικούς διαλύτες όπως διμεθυλαμίνη, τριαιθανολαμίνη (π.χ. απομάκρυνση H_2S από αέρια διυλιστηρίων), έλαια μεγάλου μοριακού βάρους, κ.ά.
- Έχει μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος
- Αναγέννηση του απορροφητικού υγρού (απομάκρυνση των ρύπων που έχουν απορροφηθεί) με κρυστάλλωση, εκχύλιση με άλλο διαλύτη, καταβύθιση, κ.ά.
- Η χρήση οργανικών διαλυτών αποφεύγεται όταν τα αέρια απόβλητα περιέχουν και σωματίδια επειδή δημιουργείται λάσπη στην οργανική φάση που δύσκολα απομακρύνεται και περιορίζει τις δυνατότητες αναγέννησης του απορροφητικού υγρού.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Πύργοι ψεκασμού (spray towers)

- Μπορούν να είναι διαφόρων τύπων
 - ✓ οριζόντιοι πύργοι διασταυρούμενης ροής (οι ροές απορροφητικού υγρού και αερίου αποβλήτου διασταυρώνονται),
 - ✓ κατακόρυφοι πύργοι αντιρροής (το απορροφητικό υγρό έχει αντίθετη ροή από το αέριο απόβλητο)
 - ✓ πύργοι κυκλωνικού τύπου
- Συστήματα απλά από πλευράς λειτουργικότητας.
- Ορισμένοι τύποι χρησιμοποιούνται και για την απομάκρυνση σωματιδίων από τα αέρια απόβλητα.
- Η παρουσία σωματιδίων δημιουργεί λιγότερο έντονα προβλήματα από ό,τι στους άλλους τύπους πύργων.



Πύργοι ψεκασμού:
(α) οριζόντιος διασταυρούμενης ροής,
(β) κατακόρυφος αντιρροής, (γ) τύπου κυκλώνα

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Πύργοι ψεκασμού - Αποσταγονοποίηση

- Στους πύργους ψεκασμού τα αερολύματα συμπαρασύρουν στην έξοδό τους και λεπτότατα σταγονίδια του υγρού που ψεκάζεται.
- Συνήθως, οι πύργοι ψεκασμού είναι εφοδιασμένοι με αποσταγονοποιητή για τη συγκράτηση των σταγονιδίων του απορροφητικού υγρού που παρασύρονται με τα αέρια εκροής.
- Σκοπός της αποσταγονοποίησης είναι η συγκράτηση των σταγονιδίων και η επαναφορά τους στο σύστημα απορρόφησης (ή αποκονίωσης).
- Αποσταγονοποίηση χρησιμοποιείται και στην παραγωγική διαδικασία για τη συλλογή σταγονιδίων (π.χ. σε βιομηχανίες φωσφορικού ή θειικού οξέος, σε πύργους ψύξης, κ.ά.).
- Τα συστήματα αποσταγονοποίησης είναι κυρίως:
 - ✓ Αεροκυκλώνες
 - ✓ Πλέγματα μεταλλικά ή από συνθετικές ίνες (Η πιο διαδεδομένη τεχνική που χρησιμοποιείται στους πύργους ψεκασμού)

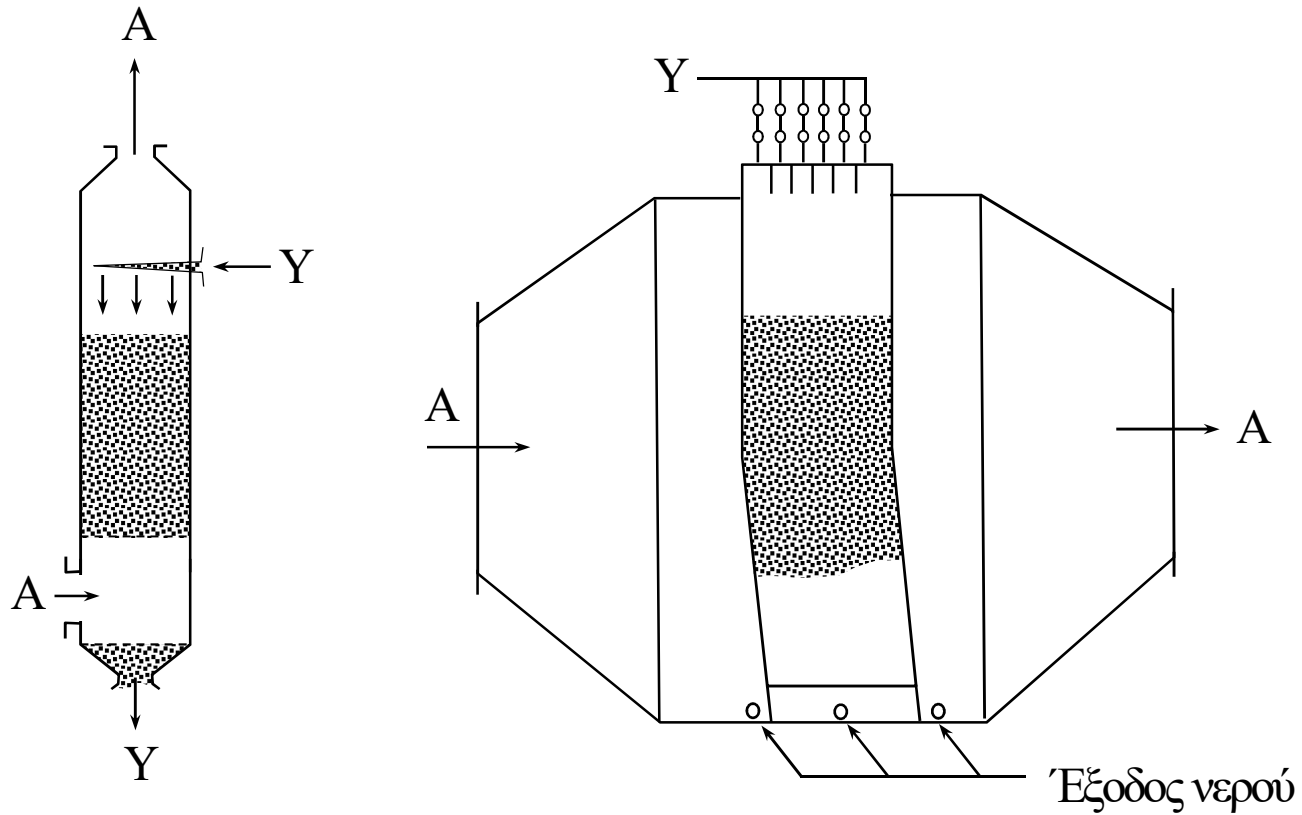
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Πύργοι πλήρωσης (packed towers)

- Είναι πληρωμένοι με αδρανές κοκκώδες υλικό, κατάλληλο για την αύξηση του χρόνου και της επιφάνειας επαφής αέριας-υγρής φάσης.
- Η επιλογή του υλικού πλήρωσης (σχήμα και μέγεθος κόκκων) γίνεται με βάση:
 - ✓ τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων
 - ✓ την αντοχή του υλικού στη διάβρωση από το απορροφητικό διάλυμα
 - ✓ τα σχηματιζόμενα προϊόντα
- Οι πύργοι πλήρωσης μπορούν να είναι πύργοι αντιρροής, διασταυρούμενης ροής, ή ομορροής (το απορροφητικό υγρό έχει ροή ίδιας κατεύθυνσης με το αέριο απόβλητο).
 - Οι **πύργοι αντιρροής** είναι πιο αποτελεσματικοί επειδή το αέριο εκροής έρχεται συνεχώς σε επαφή με καθαρό απορροφητικό υγρό. Προβλήματα απόφραξης δημιουργούνται από την παρουσία σωματιδίων αδιάλυτων στο απορροφητικό υγρό.
 - Οι πύργοι **διασταυρούμενης ροής** αντέχουν περισσότερο στην απόφραξη, αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματικοί στην απομάκρυνση των αερίων.
 - Οι πύργοι **ομορροής** αντέχουν περισσότερο στην απόφραξη και προτιμούνται έναντι των άλλων πύργων πλήρωσης όταν τα αέρια εκροής περιέχουν σωματίδια (όχι όμως και έναντι των πύργων ψεκασμού).

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Πύργοι πλήρωσης (packed towers)

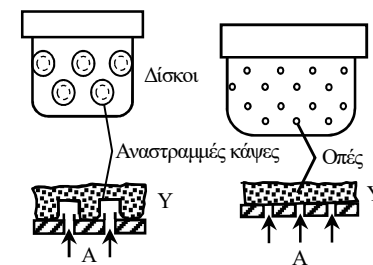
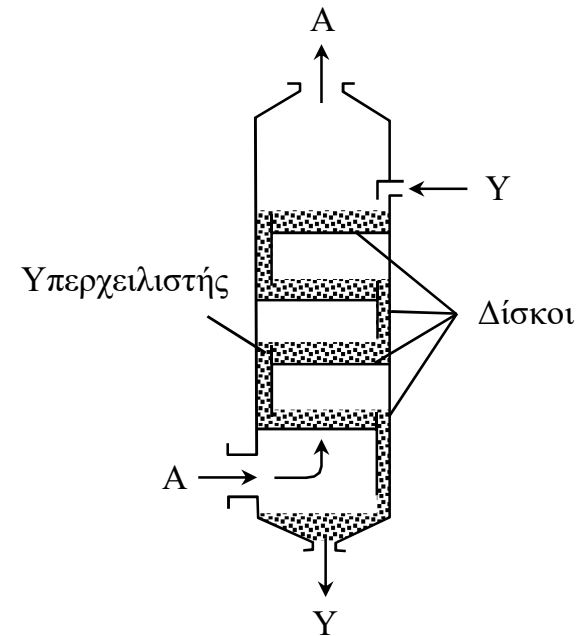


Πύργοι πλήρωσης: (α) αντισροής, (β) διασταυρούμενης ροής

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

Πύργοι με δίσκους (plate towers)

- Οι πύργοι αυτοί φέρουν εσωτερικά διάτρητους δίσκους που επιτρέπουν τη διέλευση των αερολυμάτων που εισέρχονται από τη βάση του πύργου, όχι όμως και του απορροφητικού υγρού (όπως στην απόσταξη).
- Το απορροφητικό υγρό ρέει από το επάνω μέρος του πύργου και σχηματίζει ένα λεπτό **υμένιο** επάνω στους δίσκους. Τα αερολύματα περνούν από τις οπές και έρχονται σε επαφή με το υμένιο σχηματίζοντας μικρές φυσαλίδες.
- Οι πύργοι με δίσκους είναι πάντοτε πύργοι **αντιρροής**. Διαθέτουν ειδικό σύστημα που διατηρεί σταθερή τη στάθμη του απορροφητικού υγρού επάνω στους δίσκους (πάχος υμενίου) και τη ροή από τον ένα δίσκο στον άλλο χωρίς να επιτρέπεται η διέλευση των αερολυμάτων από τα σημεία αυτά.
- Πύργοι με δίσκους χρησιμοποιούνται κυρίως όταν μαζί με τα τοξικά αέρια θέλουμε να συγκρατήσουμε και τα σωματίδια.



*Πύργος με δίσκους
(Στη μεγέθυνση απεικονίζονται
δύο διαφορετικοί τύποι δίσκων)*

ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΧΗ

Χημική κατεργασία ονομάζεται η διαδικασία καθαρισμού αερίων αποβλήτων κατά την οποία το κύριο στάδιο αποτελούν χημικές αντιδράσεις.

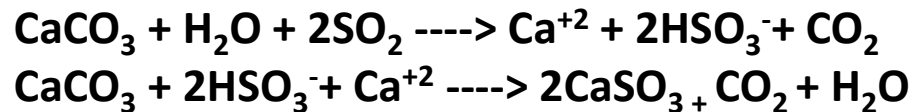
Συχνά, η χημική κατεργασία συνδυάζεται με άλλες τεχνικές καθαρισμού αερολυμάτων, π.χ. απορρόφηση, καύση, κ.ά.

ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ SO₂

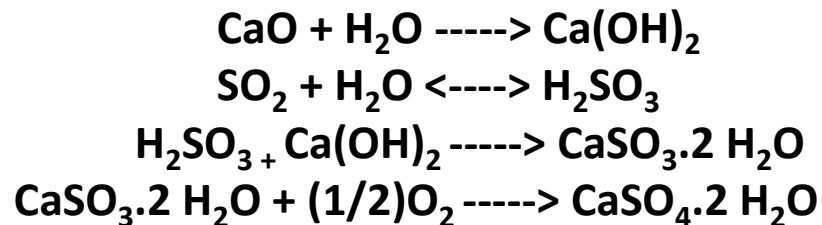
Υγρές μέθοδοι

1. Έκπλυση των αποβλήτων με υδατικά διαλύματα ή αιωρήματα CaO, CaCO₃, MgO, Na₂CO₃, NH₄OH ή μίγματα αυτών.
 - ✓ Η έκπλυση γίνεται με ψεκάσμό σε πύργους απορρόφησης αντισροής.
 - ✓ Τα στερεά παραπροϊόντα της έκπλυσης [Na₂SO₄, CaSO₄, (NH₄)₂SO₄, κ.ά.] μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βελτιωτικά εδάφους, ως λιπάσματα, στη βιομηχανία χαρτιού, κ.ά.

1.1. Χρήση αιωρήματος CaCO₃ (Limestone Scrubbing)



1.2. Χρήση αιωρήματος CaO (Lime Scrubbing)



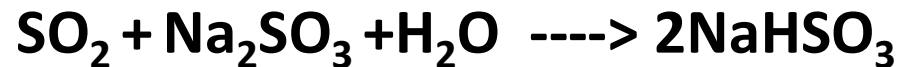
Η χρήση CaO πλεονεκτεί καθώς η διαδικασία είναι πιο ευέλικτη, αλλά έχει το μειονέκτημα του μεγαλύτερου κόστους.

ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ SO₂

Υγρές μέθοδοι

2. Δέσμευση του SO₂ με υδατικό διάλυμα Na₂SO₃ (Μέθοδος Wellman-Lord)

- Τα θειώδη αντιδρούν με το SO₂ προς NaHSO₃ το οποίο τελικά οξειδώνεται προς Na₂SO₄ (παραπροϊόν).



- Είναι δυνατή η αναγέννηση του θειώδους άλατος και η επαναχρησιμοποίησή του.
- Το SO₂ που δημιουργείται κατά την αναγέννηση χρησιμοποιείται για παραγωγή H₂SO₄, στοιχειακού θείου, κ.ά.
- Η απόδοση της μεθόδου είναι περίπου 90%.

ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ SO₂

Υγρές μέθοδοι

3. Δέσμευση του SO₂ με Br₂

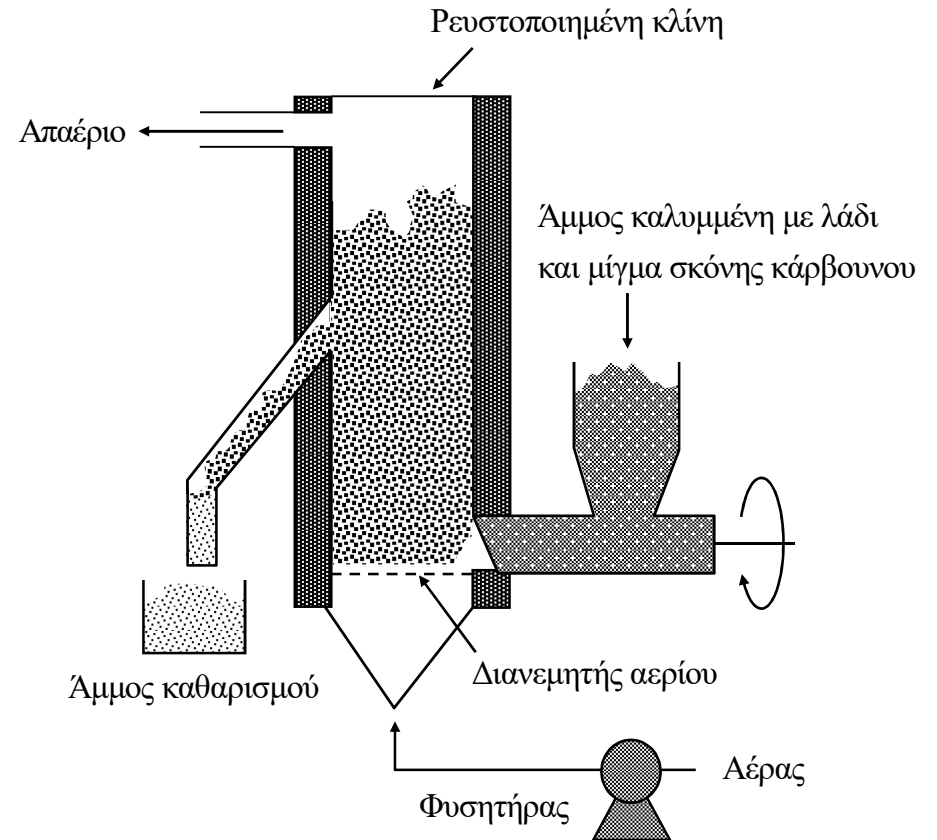


Το παραγόμενο H₂SO₄ συγκεντρώνεται και διατίθεται για διάφορες εφαρμογές, ενώ το HBr ηλεκτρολύεται για την αναγέννηση του Br₂.

ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ SO₂

Ξηρές μέθοδοι

- Η δέσμευση των SO_x (SO₂ & SO₃) γίνεται στο στάδιο της καύσης του στερεού καυσίμου.
- Το καύσιμο υλικό ψεκάζεται με σκόνη Na₂CO₃, CaO, CaCO₃ ή MgO με τα οποία τα SO_x αντιδρούν αμέσως προς σχηματισμό των αντίστοιχων θειωδών ή θεικών αλάτων.
- Η καύση γίνεται σε ρευστοποιημένη κλίνη (Fluidised Bed Combustion).



**Καύση κάρβουνου
σε ρευστοποιημένη κλίνη
(Fluidised Bed Combustion)**

ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ SO₂

Ξηρές μέθοδοι

- Οι ξηρές μέθοδοι έχουν αρκετά πλεονεκτήματα
 - ✓ δεν δημιουργούν υγρά απόβλητα
 - ✓ απαιτούν απλούστερες εγκαταστάσεις
 - ✓ έχουν μειωμένο κόστος λειτουργίας
- Το μειονέκτημά τους είναι ότι η εφαρμογή τους περιορίζεται σε μερικά μόνον στερεά καύσιμα (κάρβουνο χαμηλής περιεκτικότητας σε S).

ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ NO_x

1. Επιλεκτική αναγωγή

Ως αναγωγικά χρησιμοποιούνται η αμμωνία ή η ουρία



1.1. Επιλεκτική μη-καταλυτική αναγωγή (*selective non-catalytic reduction, SNCR*)

- Τα αερολύματα αναμιγνύονται με αμμωνία σε θάλαμο καύσης (900-1000 °C).
- Η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τον λόγο NH₃ : NO_x (απόδοση 40-60% σε λόγους NH₃ : NO_x μεταξύ 1:1 - 2:1).
- Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η οξείδωση της NH₃ προς NO στη θερμοκρασία καύσης.



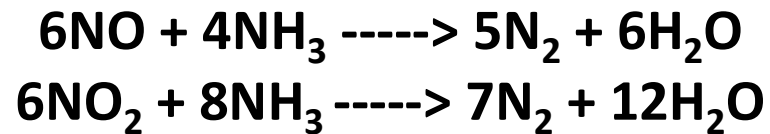
SNCR denitration equipment (Urea solution system)



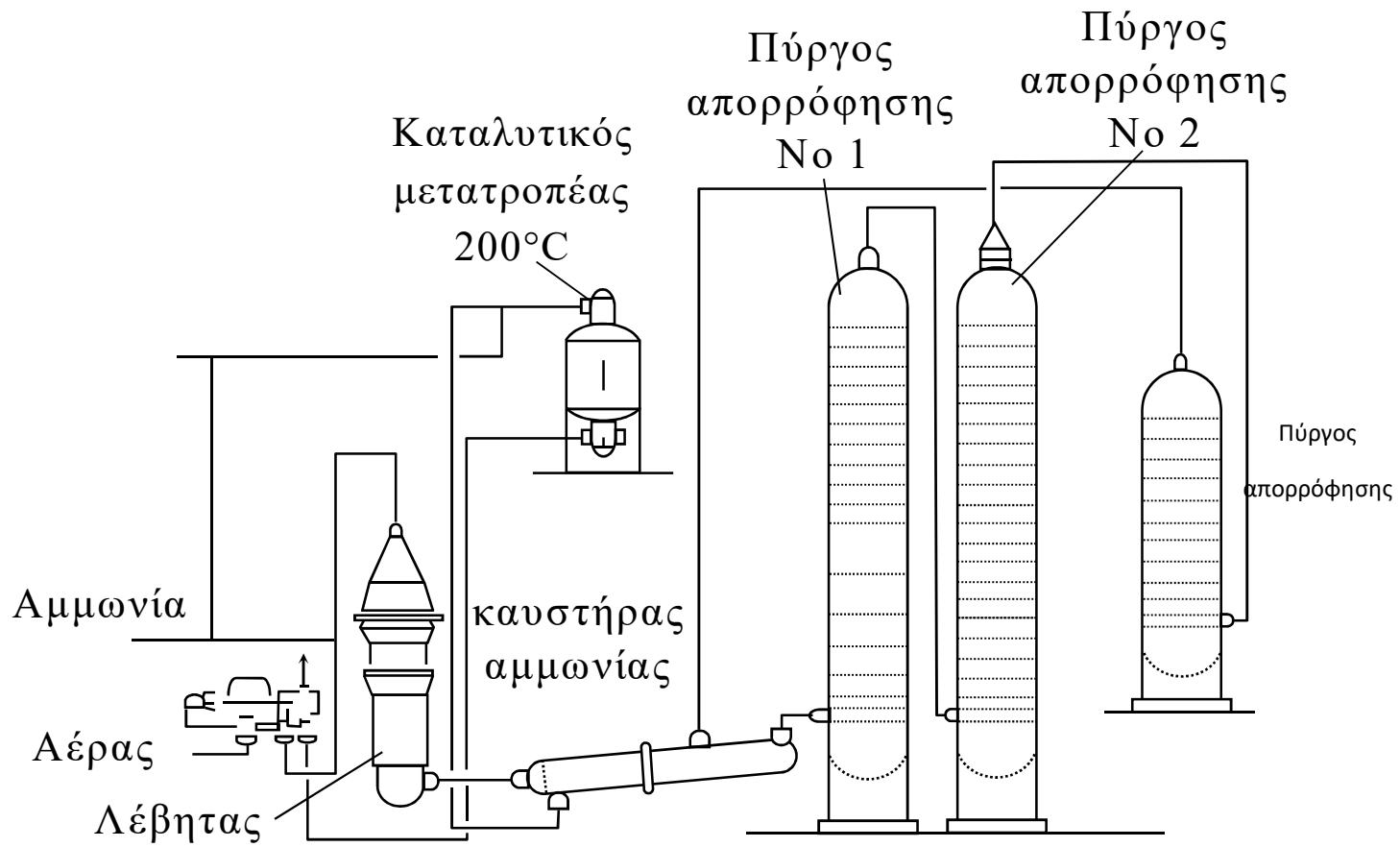
ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ NO_x

1.2. Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (*selective catalytic reduction, SCR*)

- Τα αερολύματα αναμιγνύονται με αμμωνία και διοχετεύονται σε καταλύτη TiO₂ ή V₂O₅ (θερμοκρασία 200 °C).
- Η απόδοση είναι ~90%, αλλά το κόστος είναι μεγαλύτερο.



SCR Reactor



Διαγραμματική απεικόνιση μονάδας παραγωγής HNO_3 από NH_3 με καταλυτικό μετατροπέα των NO_x σε N_2

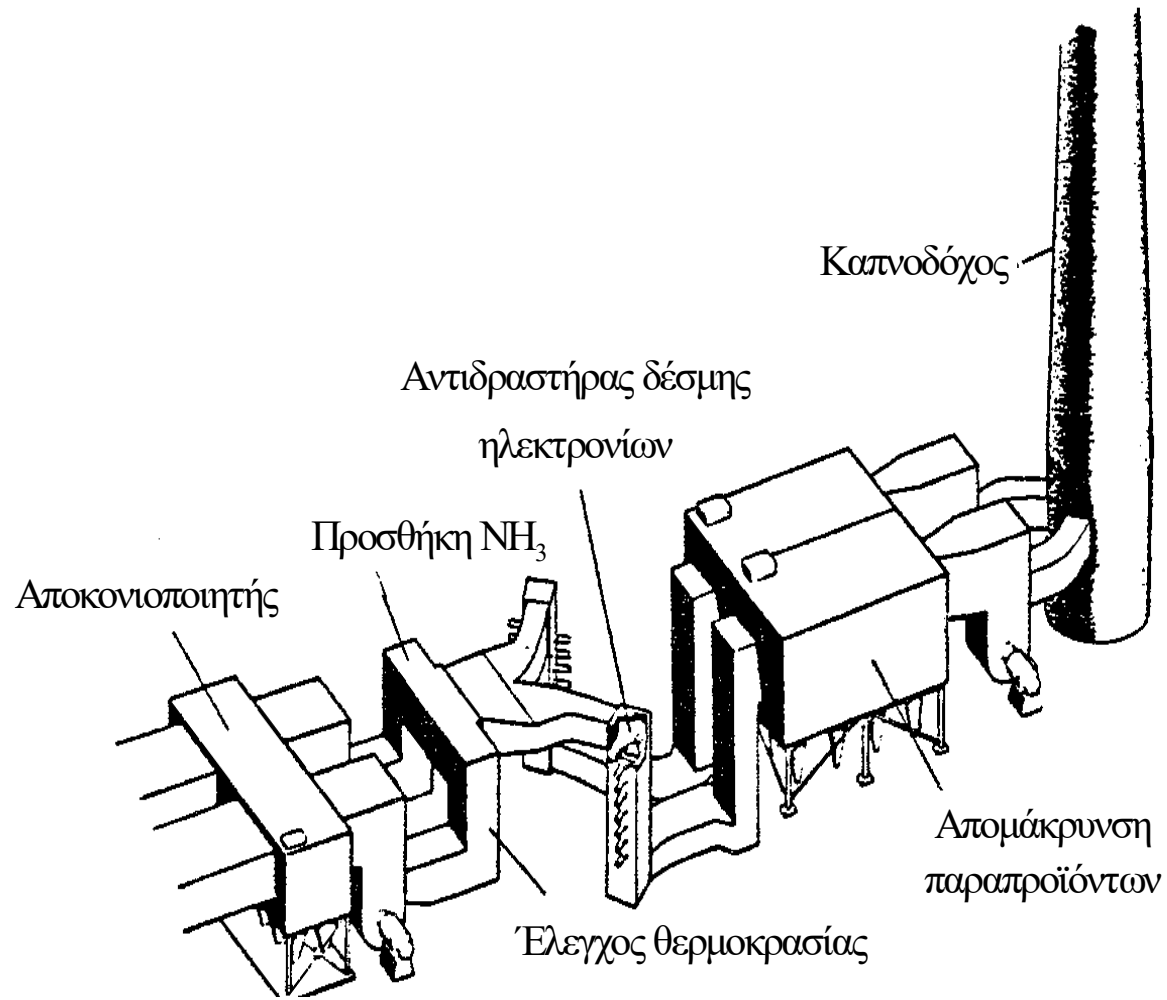
ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ NO_x

2. Ακτινοβόληση με ηλεκτρόνια

- Η ακτινοβόληση με ηλεκτρόνια ενός αερίου μίγματος προκαλεί διέγερση των συστατικών του (π.χ. N₂, O₂, H₂O) παράγοντας ενεργές ομάδες ικανές να οξειδώσουν τους περιεχόμενους ρύπους.
- Τα ενεργά χημικά είδη που παράγονται συνήθως είναι άτομα (N και O), μοριακά ιόντα (N₂⁺ και O₂⁺), ουδέτερα μόρια οξειδωτικών (O₃) και ελεύθερες ρίζες ([•]OH).
- Απομάκρυνση των με NH₃ με τη βοήθεια ηλεκτρονίων.
- Ταυτόχρονα με τα NO_x επιτυγχάνεται απομάκρυνση και των SO_x.
- Με την προσθήκη νερού και αμμωνίας, παράγονται 2NH₄NO₃ & (NH₄)₂SO₄



- Τα προϊόντα σχηματισμού είναι στερεά σωματίδια που συλλέγονται με κατάλληλο αποκονιοποιητή (αεροκυκλώνα, σακκόφιλτρο, κ.ά.).
- Η τεχνολογία πλεονεκτεί σε περιπτώσεις που οι εκπομπές διοξινών είναι



Γραφική απεικόνιση συστήματος καθαρισμού αερίων αποβλήτων για τον περιορισμό των εκπομπών SO_x και NO_x με ακτινοβόληση με ηλεκτρόνια

ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

ΑΡΧΗ

- Οι επιφάνειες των πορωδών στερεών είναι πηγές ελκτικών δυνάμεων και συγκρατούν μόρια ή άτομα ουσιών που βρίσκονται στην αέρια φάση (φυσική προσρόφηση).
- Στις περισσότερες περιπτώσεις, συμβαίνει μία επιφανειακή χημική αντίδραση όταν το αέριο και ο προσροφητής έλθουν σε επαφή (χημειορρόφηση-ενεργοποιημένη προσρόφηση). Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις, η προσρόφηση συνοδεύεται και από μερική απορρόφηση (διάλυση).
- Η προσρόφηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την απομάκρυνση τοξικών αερίων που υπάρχουν στα αερολύματα σε χαμηλές συγκεντρώσεις.

ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

Βαθμός προσρόφησης

Η προσρόφηση είναι **εξώθερμη** διεργασία (τα μόρια που προσροφούνται χάνουν μεγάλο μέρος από την κινητική τους ενέργεια).

Κατά συνέπεια:

- Ο βαθμός προσρόφησης αυξάνει με ψύξη του προσροφητικού μέσου ή των αερολυμάτων. Με την ψύξη αυξάνεται και η χωρητικότητα του προσροφητικού (αύξηση του όγκου διαφυγής).
- Αντίθετα, η αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί την εκρόφηση της προσροφημένης ουσίας (η ιδιότητα χρησιμοποιείται για την αναγέννηση του προσροφητικού).

ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

Ιδιότητες προσροφητικών

- Αντοχή στη θραύση
- Μεγάλη χωρητικότητα
- Μεγάλη απόδοση (~100% στην έναρξη λειτουργίας, η οποία να παραμένει υψηλή σχεδόν μέχρι ο προσροφητής να κορεσθεί από το ροφούμενο συστατικό)
- Εύκολη αναγέννηση (ταυτόχρονη αναγέννηση ροφημένων αερίων με πιθανή οικονομική αξία)

ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

Είδη Προσροφητικών

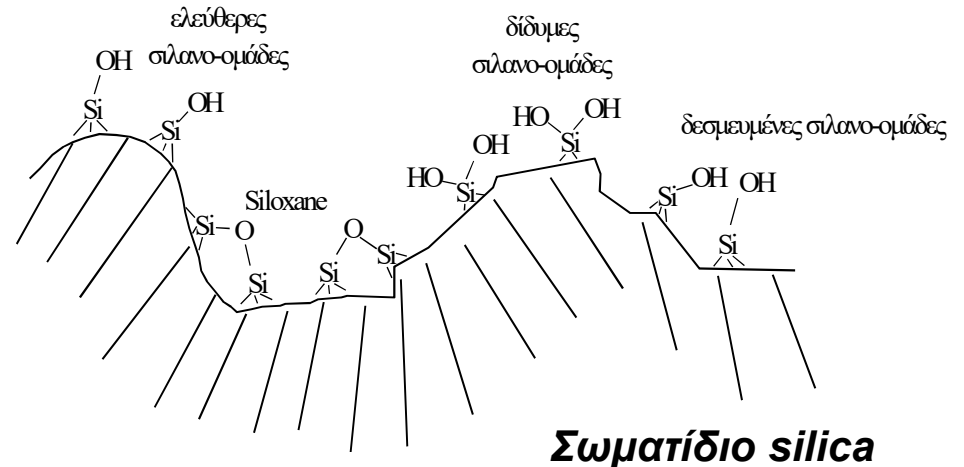
Ενεργός Άνθρακας

- Χρησιμοποιείται τόσο σε βιομηχανική, όσο και σε μικρή κλίμακα (αντιασφυξιγόνες μάσκες)
- Έχει ενεργό επιφάνεια 600-2000 m²/g
- Έχει μικρή εκλεκτικότητα, αλλά είναι το καταλληλότερο προσροφητικό για οργανικές ενώσεις παρουσία υγρασίας
- Μετά τη χρήση, μπορεί να καεί χωρίς πρόβλημα διάθεσης στο περιβάλλον

Πηκτές SiO_2 (Silica gel) και $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (alumina)

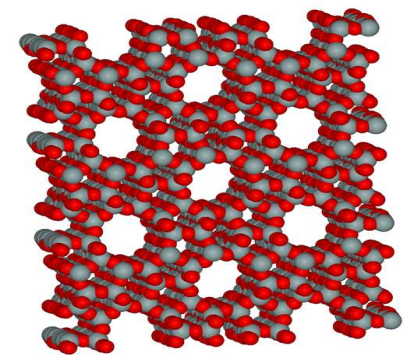
- Πολικά υλικά με άριστη συμπεριφορά στην προσρόφηση πολικών αερίων (χρήση ξηροπηκτής SiO_2 στην κατακράτηση υδρατμών)
- Η προσροφητική τους ικανότητα καθορίζεται τόσο από το μέγεθος των κόκκων, όσο και από τις συνθήκες επεξεργασίας τους (θερμοκρασία ενεργοποίησης). Έτσι, η πηκτή SiO_2 με θέρμανση (π.χ. στους $160\text{ }^\circ\text{C}$ για 24 ώρες ή στους $300\text{ }^\circ\text{C}$ για 2 ώρες) χάνει τις ομάδες $-\text{OH}$ που έχει στην επιφάνειά της και οι σιλανο-ομάδες ($=\text{Si}-\text{OH}$) συμπυκνώνονται προς σιλοξάνιο ($=\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$) με αποτέλεσμα η ενεργοποιημένη silica (activated silica) να αποκτά μεγαλύτερη προσροφητική ικανότητα.

- Μπορούν να αναγεννηθούν εύκολα με απλή θέρμανση ή με θέρμανση υπό κενό.



Ζεόλιθοι (φυσικοί-συνθετικοί)

- Αργιλλοπυριτικά μικρο- και μεσο-πορώδη ορυκτά.
- Αποτελούνται από συζευγμένα τετράεδρα του τύπου TO_4 ($T=Al^{3+}$ ή Si^{4+}) που ενώνονται μέσω κοινών ατόμων οξυγόνου σχηματίζοντας ένα τρισδιάστατο δίκτυο που ορίζει ένα κανονικό σύστημα πόρων με μοριακές διαστάσεις.
- Οι ζεόλιθοι διαφέρουν ως προς τη σχετική κρυσταλλικότητα
- Οι ζεόλιθοι έχουν παρόμοιες προσροφητικές ιδιότητες με τις πηκτές silica και alumina, είναι χημικώς και θερμικώς σταθεροί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο αριθμό θερμοχημικών διεργασιών.



Ζεόλιθος SM-5

Ζεόλιθοι (φυσικοί-συνθετικοί)

- Εκτός από προσροφητικά, βρίσκουν πλήθος εφαρμογών ως καταλύτες, μαλακτικά νερού, εκλεκτικές μεμβράνες για διαχωρισμό αερίων και υγρών μιγμάτων, αισθητήρες (π.χ. αισθητήρες CO₂).
- Συχνά, οι ζεόλιθοι αποκαλούνται «μοριακά κόσκινα» λόγω της ικανότητάς τους να διακρίνουν μόρια διαφορετικού μεγέθους, σχήματος ή πολικότητας.
- Γενικά, τα «μοριακά κόσκινα» είναι υλικά που περιέχουν μικροσκοπικούς πόρους, ομοιόμορφου συγκεκριμένου μεγέθους, που χρησιμοποιούνται ως προσροφητικά αερίων ή υγρών. Τα μόρια που είναι αρκετά μικρά περνούν μέσα στους πόρους, ενώ τα μεγαλύτερα όχι. Π.χ. το μόριο του νερού μπορεί να μην είναι αρκετά μικρό για να περάσει όπως το μόριο ενός αερίου. Γι' αυτό τα μοριακά κόσκινα χρησιμοποιούνται και ως ξηραντικά (ένα μοριακό κόσκινο μπορεί να προσροφήσει νερό μέχρι ποσοστό 22% του βάρους του).
- Τα μοριακά κόσκινα χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία πετρελαίου για τον καθαρισμό του αερίου εκροής. Η αναγέννησή τους γίνεται με μεταβολή της πίεσης, με θέρμανση και διαβίβαση φέροντος αερίου, ή με θέρμανση σε υψηλό κενό.

Προσροφητική ικανότητα μοριακών κοσκίνων

Μέγεθος πόρων	Προσροφώνται	Δεν προσροφώνται
3 Å	NH ₃ , H ₂ O	C ₂ H ₆
4 Å	H ₂ O, CO ₂ , SO ₂ , H ₂ S, C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₆ , EtOH	C ₃ H ₈ και υψηλότεροι υδρογονάνθρακες
5 Å	<ul style="list-style-type: none"> – υδρογονάνθρακες ευθείας αλυσίδας μέχρι n-C₄H₁₀ – αλκοόλες μέχρι C₄H₉OH – μερκαπτάνες μέχρι C₄H₉SH 	iso-υδρογονάνθρακες και δακτύλιοι μεγαλύτεροι από C ₄
8 Å	<ul style="list-style-type: none"> – διακλαδισμένοι υδρογονάνθρακες – αρωματικά 	
9 Å	di-n-butylamine	tri-n-butylamine

1 Angstrom = 1×10^{-10} m

ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

Διαποτισμένα προσροφητικά

1. Προσροφητικά **διαποτισμένα με αντιδραστήρια** που αντιδρούν χημικά με τους αέριους ρύπους και δίνουν προϊόντα που συγκρατούνται ισχυρότερα, π.χ.
 - ✓ ενεργός άνθρακας διαποτισμένος με Br_2 10-20% κ.β. για συγκράτηση του αιθυλενίου
 - ✓ ενεργός άνθρακας διαποτισμένος με I_2 για συγκράτηση ατμών Hg
 - ✓ ενεργός άνθρακας διαποτισμένος με οξικό μόλυβδο για συγκράτηση H_2S , με πυριτικό νάτριο για συγκράτηση HF
2. Προσροφητικά **διαποτισμένα με ουσίες που δρουν ως καταλύτες** στη χημική μετατροπή (π.χ. οξείδωση, διάσπαση, κ.ά.) των αερίων ρύπων. Ως καταλύτες χρησιμοποιούνται άλατα Cr, Cu, Ag, Pd, Pt. Η τεχνική είναι κατάλληλη για αέριους ρύπους που οξειδώνονται εύκολα (εξουδετέρωση πολεμικών αερίων, π.χ. λεβισίτη και χλωροπικρίνης).

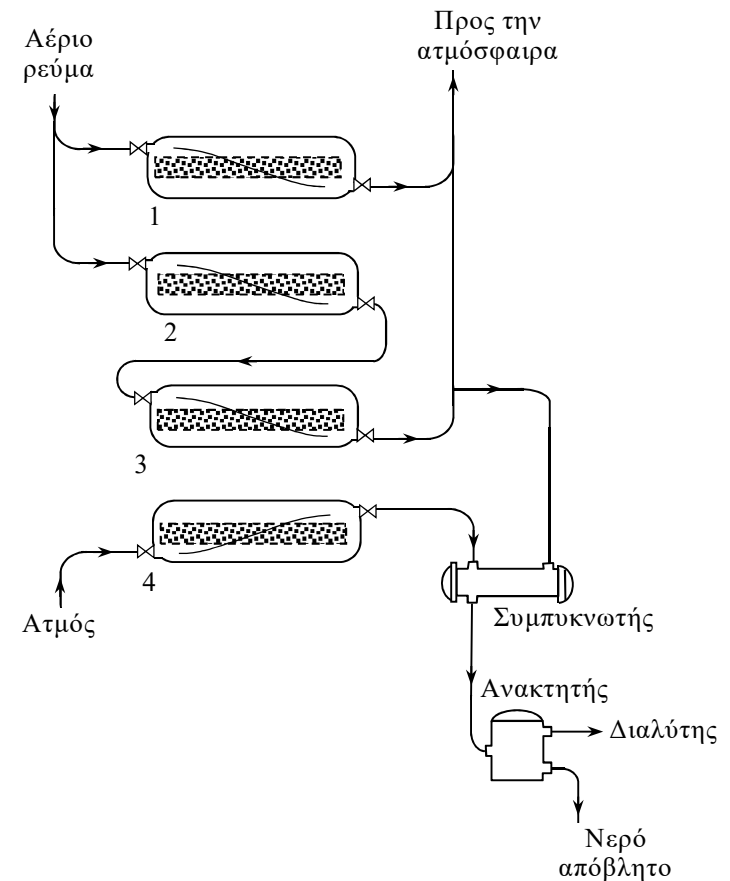
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ

Κάνιστρα

Δοχεία κατάλληλα σχεδιασμένα από σκληρό χαρτί ή άλλο παρόμοιο υλικό, τα οποία περιέχουν προσροφητικό υλικό. Χρησιμοποιούνται για μικρούς όγκους αποβλήτων (π.χ. κατά τη μεταφορά τοξικών αερίων ή ατμών, τοποθετούνται κάνιστρα στις εξόδους για τη δέσμευση πιθανών διαφυγών).

Στήλες

Η επιλογή της κατάλληλης στήλης καθορίζεται από (α) την παροχή των αποβλήτων και (β) τη φύση και τη συγκέντρωση των αέριων ρύπων. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερες στήλες (παράλληλες ή σε σειρά) άλλες από τις οποίες χρησιμεύουν για την προσρόφηση των ρύπων και άλλες για την



Σύστημα καθαρισμού αερολυμάτων με 4 στήλες προσροφητικού υλικού:
1. φρέσκια-ψυχρή, 2. μερικώς κορεσμένη, 3. υπό ψύξη μετά την επίδραση ατμού, 4. υπό ανανέωση

ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ

ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ

Κάθε σύστημα προσρόφησης για να έχει τη μέγιστη απόδοση και να είναι πρακτικά χρήσιμο πρέπει να ανταποκρίνεται στις παρακάτω απαιτήσεις:

- **Αρκετός χρόνος επαφής των αερολυμάτων με το προσροφητικό**
- **Ικανοποιητική χωρητικότητα του προσροφητικού μέσου**
- Χαμηλή αντίσταση στη ροή των αερίων
- Ομοιόμορφη κατανομή ροής για την πλήρη εκμετάλλευση του προσροφητικού
- Πρόβλεψη για την ανάγκη ενδεχόμενης ψύξης των αερολυμάτων
- Πρόβλεψη για απομάκρυνση των σωματιδίων που προκαλούν προβλήματα στην ομαλή ροή
- **Δυνατότητα αναγέννησης του προσροφητικού υλικού ή εύκολη και ασφαλής διάθεσή του στο περιβάλλον**

ΚΑΥΣΗ-ΘΕΡΜΙΚΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗ

- Διεργασία ταχείας οξείδωσης εύφλεκτων συστατικών των αερίων αποβλήτων προς CO₂ και H₂O **παρουσία φλόγας** . Η πλήρης οξείδωση των υδρογονανθράκων αποδίδεται από την αντίδραση:



- Αρκετές βιομηχανίες (πετροχημικών, πλαστικών, παραγωγής ανυδριτών οργανικών οξέων, κ.ά.) εκπέμπουν αέρια απόβλητα που μπορούν να διατηρήσουν τη φλόγα.
- Η θερμοκρασία καύσης εξαρτάται από τη φύση των τοξικών ουσιών που πρέπει να καταστραφούν (π.χ. η καύση αλογονούχων ενώσεων πρέπει να γίνεται σε υψηλή θερμοκρασία για μετατροπή τους προς αλογονούχα οξέα).
- Όταν στα προϊόντα καύσης περιέχονται επικίνδυνα συστατικά (π.χ. SO₂ από την καύση θειούχων ενώσεων, αλογονούχα οξέα, κ.ά.), τα καυσαέρια πρέπει να καθαρίζονται πριν τη διάθεσή τους στην ατμόσφαιρα.
- Η καύση είναι τεχνολογία επεξεργασίας όχι μόνο αερίων ρύπων αλλά και στερεών αποβλήτων, π.χ. ενεργού άνθρακα, γνωστή ως αποτέφρωση (incineration).

ΚΑΥΣΗ-ΘΕΡΜΙΚΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗ

ΠΡΟΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Τα αέρια μίγματα που αποτελούνται από καύσιμα, οξειδωτικά και αδρανή αέρια αναφλέγονται μόνον υπό ορισμένες συνθήκες.
- Ένα μίγμα θεωρείται αναφλέξιμο όταν είναι ικανό να παράξει σπινθήρα φωτιάς παρουσία μίας πηγής ανάφλεξης, π.χ. φλόγα, θερμότητα, ηλεκτρικό τόξο.
- Η εφαρμογή της καύσης προϋποθέτει:
 - **δυνατότητα διατήρησης της φλόγας**
 - **αποφυγή έκρηξης**
- Η καύση διατηρείται όταν η συγκέντρωση του καυσίμου στο μίγμα των αερίων είναι μέσα στην περιοχή που ορίζεται από το κατώτατο και το ανώτατο **όριο αναφλεξιμότητας ή εκρηξιμότητας.**

ΟΡΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ

- Τα όρια αναφλεξιμότητας ή όρια εκρηξιμότητας εκφράζουν την ελάχιστη και μέγιστη % συγκέντρωση καύσιμων αερίων σε ένα μίγμα, μεταξύ των οποίων το μίγμα είναι αναφλέξιμο.
- Το **κατώτατο όριο αναφλεξιμότητας** (lower explosive limit, LEL, ή lower flammable limit, LFL) περιγράφει το πιο φτωχό μίγμα που είναι αναφλέξιμο, δηλ. το μίγμα με το μικρότερο κλάσμα σε καύσιμο αέριο.
- Το **ανώτατο όριο αναφλεξιμότητας** (upper explosive limit, UEL, ή upper flammable limit, UFL) αναφέρεται στο πιο πλούσιο μίγμα (μίγματα με συγκεντρώσεις πάνω από το UEL είναι πολύ «πλούσια» για να καούν).

ΟΡΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ – Παράγοντες που τα επηρεάζουν

Η αναφλέξιμη περιοχή καθορίζεται από πολλούς παράγοντες, όπως το κλάσμα των αδρανών αερίων σε ένα μίγμα, η θερμοκρασία καύσης, ο σχεδιασμός του συστήματος, κ.ά.

- Με την αύξηση του κλάσματος των αδρανών αερίων σε ένα μίγμα, αυξάνει το LEL και μειώνεται το UEL (δηλ. περιορίζεται το εύρος της περιοχής ανάφλεξης).
- Τα όρια αναφλεξιμότητας επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία και σε μικρότερο βαθμό από την πίεση.
- Υψηλότερες θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερα LEL και υψηλότερα UEL, ενώ με την αύξηση της πίεσης αυξάνονται και τα δύο όρια.
- Π.χ. το LEL του μεθανίου στους 138 °C είναι 4.4% κατ' όγκο, ενώ στους 20 °C είναι 5.1 % κατ' όγκο. Κατά συνέπεια, αν η ατμόσφαιρα περιέχει λιγότερο από 5.1% μεθάνιο, δεν μπορεί να αναφλεγεί ακόμη και παρουσία πηγής ανάφλεξης.

ΟΡΙΑ ΑΝΑΦΛΕΞΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΙΓΜΑΤΟΣ ΑΕΡΙΩΝ

Το κατώτατο όριο ανάφλεξης μίγματος αερίων LEL_{mix} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$LEL_{mix} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{X_m \cdot LEL_i} \right]^{-1}$$

όπου,

X_i = ο όγκος του αερίου i στο μίγμα

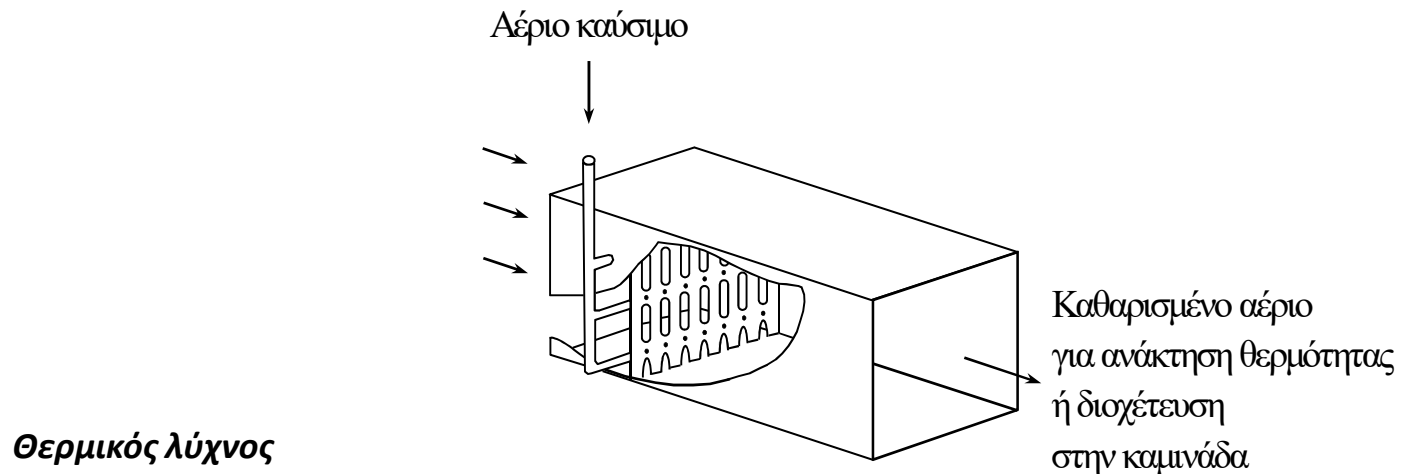
X_m = ο όγκος του μίγματος

LEL_i = το κατώτατο όριο ανάφλεξης του αερίου i

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΥΣΗΣ

Θερμικοί λύχνοι

- Οι θερμικοί λύχνοι (thermal afterburners) είναι από τα πιο διαδεδομένα συστήματα καύσης αερίων αποβλήτων. Χρησιμοποιούνται για αέρια απόβλητα στα οποία η συγκέντρωση του καυσίμου είναι μικρότερη του κατώτατου ορίου έκρηξης LEL.
- Αποτελούνται από ένα θάλαμο καύσης, στο άκρο του οποίου υπάρχει ο λύχνος που τροφοδοτείται με υγρό ή αέριο καύσιμο. Η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται είναι στην περιοχή 550-850°C. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αντί για έναν λύχνο χρησιμοποιούνται πολλοί μικροί λύχνοι με το πλεονέκτημα της καλύτερης καύσης των αερολυμάτων λόγω καλύτερης ανάμιξης.
- Τα καυσαέρια που παράγονται οδηγούνται στον εναλλάκτη θερμότητας και κατόπιν στην καμινάδα.



Καταλυτικοί λύχνοι

Στους καταλυτικούς λύχνους (Catalytic afterburners), το αέριο απόβλητο θερμαίνεται πριν οδηγηθεί στον θάλαμο καύσης και, αφού καεί, διέρχεται από καταλυτικό φίλτρο.

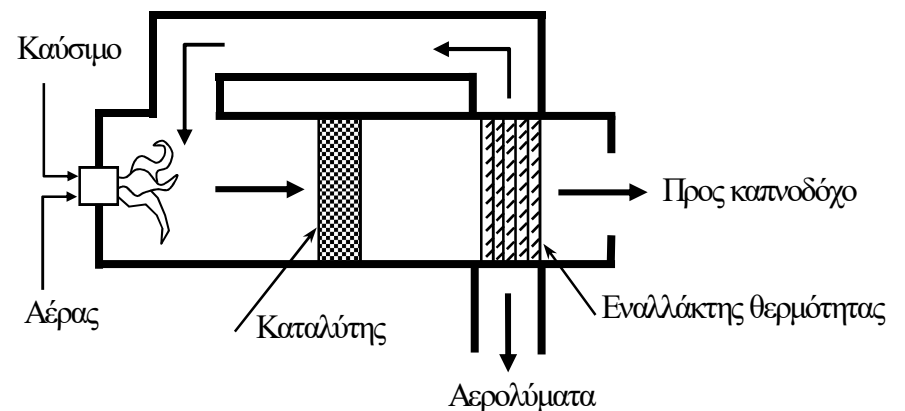
Ως καταλύτες, χρησιμοποιούνται κυρίως ευγενή μέταλλα, όπως Pt αποτεθειμένος σε στερεό αδρανές υλικό ή οξειδία μετάλλων (CoO_4 , $\text{CoO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$, MnO_2 , La-CoO_2 , CuO).

Οι καταλυτικοί λύχνοι λειτουργούν σε θερμοκρασία 400-500 °C και η εξοικονόμηση του καυσίμου αντισταθμίζει το κόστος του καταλύτη. Επιπλέον, το κόστος κατασκευής και λειτουργίας είναι μικρότερο από εκείνο των θερμικών λύχνων. Παρόλα αυτά, δεν είναι τόσο διαδεδομένοι εξαιτίας της απενεργοποίησης του καταλύτη από τα αιωρούμενα σωματίδια των αερίων αποβλήτων, ενώσεις θείου, φωσφόρου, αλογόνα, κ.ά.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τον σωστό σχεδιασμό και τη λειτουργία των καταλυτικών συστημάτων καύσης είναι:

- οι ταχύτητες ροής των αερίων (χρόνος παραμονής)
- η έκταση της δραστικής επιφάνειας του καταλύτη (διασπορά)
- η θερμοκρασία προθέρμανσης

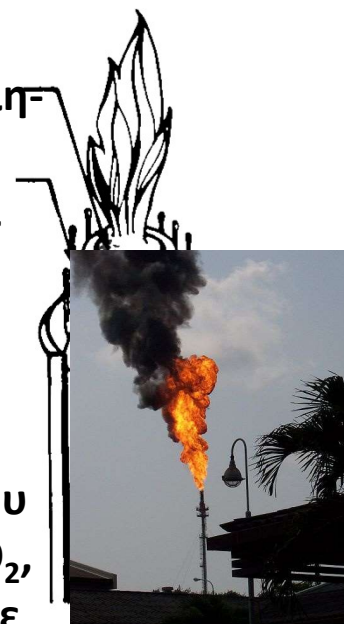
Μετά την έναυση, οι καταλύτες αυτοσυντηρούνται θερμικά από τον εξώθερμο χαρακτήρα των αντιδράσεων που επιτελούν.



Καταλυτικός λύχνος

Πυρσοί

- Οι πυρσοί (flares) είναι ειδικοί λύχνοι που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες βιομηχανίες στις οποίες, είτε υπάρχουν στάδια της παραγωγικής διαδικασίας με έκλυση άχρηστων αερίων (π.χ. βιομηχανίες πετροχημικών), είτε χρειάζεται να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα εύφλεκτα αέρια για λόγους ασφάλειας των εγκαταστάσεων.
- Μαζί με το αέριο απόβλητο στον πυρσό συχνά διοχετεύεται και ατμός με σκοπό την παροχή οξυγόνου ώστε να περιορίζεται ο σχηματισμός καπνού.
- Πυρσοί κατασκευάζονται σε πετρελαιοπηγές και πηγές φυσικού αερίου, διυλιστήρια, χημικά εργοστάσια, εργοστάσια φυσικού αερίου και χωματερές με σκοπό την καύση του αερίου αποβλήτου που απελευθερώνεται από βαλβίδες εκτόνωσης κατά τη διάρκεια μη-προγραμματισμένης υπερπίεσης του εργοστασιακού εξοπλισμού.
- Οι πυρσοί τοποθετούνται σε ύψος 5-100 μέτρων από το έδαφος και μακριά από το βιομηχανικό συγκρότημα. Έχουν περίπλοκη κατασκευή και είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να αποκλείουν την περίπτωση έκρηξης.
- Στις χωματερές, ο κύριος σκοπός του πυρσού είναι η καύση του CH_4 που παράγεται από την αποσύνθεση της οργανικής ύλης. Δεδομένου ότι το CH_4 είναι 23 φορές πιο ισχυρό αέριο θερμοκηπίου από το CO_2 , στο οποίο μετατρέπεται κατά την καύση, η εγκατάσταση πυρσού σε χωματερές συνοδεύεται από «πριμ άνθρακα».



Πυρσός

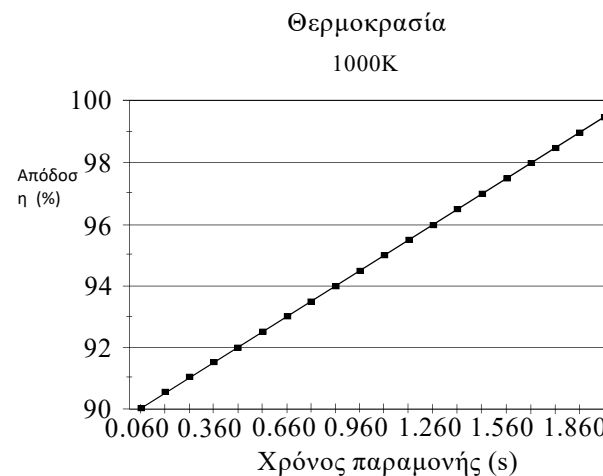
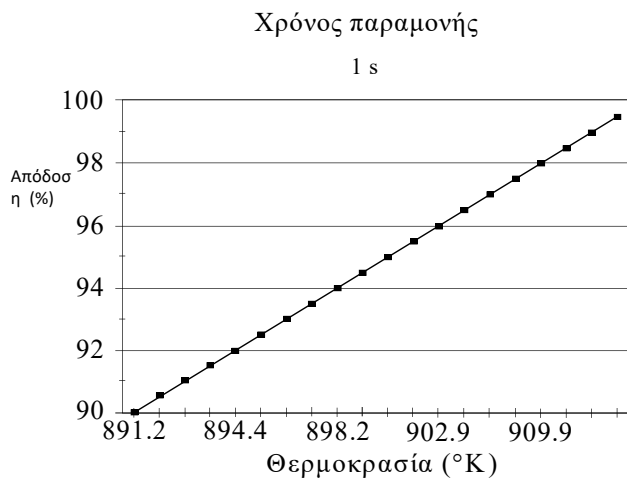
Απόδοση συστημάτων καύσης

Οι πιο σημαντικές παράμετροι στο σχεδιασμό και λειτουργία ενός συστήματος καύσης είναι:

- Θερμοκρασία (αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την ταχύτητα αντίδρασης)
- Χρόνος παραμονής (απαιτείται χρόνος για την ολοκλήρωση της αντίδρασης)
- Τύρβη (αύξηση της τύρβης ευνοεί την ανάμιξη των καύσιμων αερίων με το οξυγόνο)

Η απόδοση ενός συστήματος καύσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Απόδοση} = \frac{(\text{Αρχική συγκέντρωση} - \text{Τελική συγκέντρωση})}{\text{Αρχική συγκέντρωση}}$$



Επίδραση της θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής στην απόδοση ενός συστήματος καύσης.