

Κεφάλαιο 7

Μείωση Αέριας Ρύπανσης

Σύνοψη

Η βελτίωση της ποιότητας του αέρα προϋποθέτει προσπάθειες όχι μόνο για τη δέσμευση ή απομάκρυνση των ρύπων μετά τον σχηματισμό τους, αλλά και για μείωση της παραγωγής τους κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Στο πλαίσιο αυτό, στο έβδομο κεφάλαιο δίνονται τα βασικά στοιχεία των κύριων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για αντιρρύπανση, δίνοντας έμφαση στις διαδικασίες καθαρισμού απαερίων από αέριους ρύπους και από το σωματιδιακό φορτίο.

Προαπαιτούμενη γνώση

Κλιματική αλλαγή, ατμοσφαιρική ρύπανση, ποιότητα ατμόσφαιρας, τεχνολογία προστασίας περιβάλλοντος.

7. Μείωση Αέριας Ρύπανσης

7.1 Μετριασμός ρύπανσης και αντιρρύπανση

Για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα απαιτείται μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων στην πηγή. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται ένα εύρος διεργασιών και τεχνολογιών μείωσης των ρύπων οι οποίες εξαρτώνται από το είδος της εγκατάστασης, δηλαδή αν πρόκειται για βιομηχανική μονάδα ή για κινητή πηγή και από το είδος της διεργασίας που παράγει ρύπους. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για μείωση της ρύπανσης από διεργασίες καύσης είναι διαφορετικές από τις συσκευές που χρησιμοποιούνται σε χημικές διεργασίες, διυλιστήρια κλπ.

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται τα βασικά στοιχεία των κύριων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για αντιρρύπανση. Δεν θα πρέπει όμως να διαφύγει το γεγονός ότι προσπάθειες γίνονται όχι μόνο για τη δέσμευση ή απομάκρυνση των ρύπων μετά τον σχηματισμό τους, αλλά και για μείωση της παραγωγής τους κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι κινητήρες των οχημάτων, στους οποίους έχει επιτευχθεί σημαντική μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων λόγω του καλύτερου σχεδιασμού του συστήματος καύσης. Επίσης, σημαντική βελτίωση προέρχεται και από βελτίωση των καυσίμων. Για παράδειγμα, το μέγιστο περιεχόμενο σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων που χρησιμοποιούνται έχει περιοριστεί από ~4,5% σε 1% το 2010 και περιορίστηκε ακόμα περισσότερο σε 0,1% από το 2015 και μετά σε προστατευόμενες περιοχές (Οδηγία 2012/33/ΕΕ). Η μείωση αυτή οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση εκπομπών SO₂ από τα πλοία.

7.2 Καθαρισμός απαερίων από αέριους ρύπους

Απορρόφηση

Ως απορρόφηση στην τεχνολογία αντιρρύπανσης ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία ένα αέριο συστατικό διαχωρίζεται από ένα αέριο μίγμα μέσω της μεταφοράς μάζας προς ένα κατάλληλο υγρό. Η κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά αυτή είναι η διαφορά συγκέντρωσης του συγκεκριμένου αερίου μεταξύ του αερίου μίγματος (υψηλή συγκέντρωση) και του υγρού μίγματος (χαμηλή συγκέντρωση). Προϋπόθεση είναι το αέριο να είναι διαλυτό στο απορροφητικό υγρό. Επίσης, το απορροφητικό υγρό πρέπει να είναι αυστηρά εκλεκτικό, ώστε να απορροφάται μόνο το επιθυμητό συστατικό. Ο ρυθμός απορρόφησης, άρα και η αποτελεσματικότητα της διεργασίας, ευνοείται σε υψηλή πίεση και χαμηλή θερμοκρασία. Ο έλεγχος αυτών των δύο παραμέτρων είναι σημαντικός, διαφορετικά μπορεί να συμβεί εκρόφιση από το υγρό προς την αέρια φάση, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης ρύπων στην αέρια φάση.

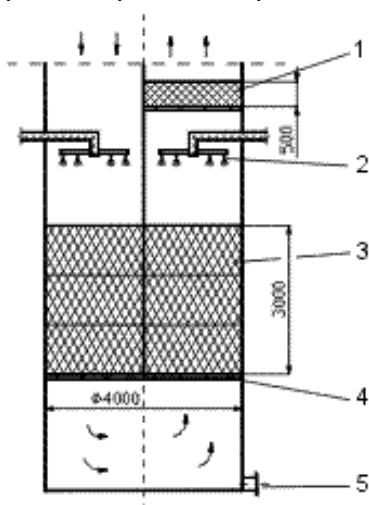
Για την απορρόφηση αερίου σε υγρό χρησιμοποιείται ένα εύρος συσκευών που στόχο έχουν να αυξήσουν τη διεπιφάνεια μεταξύ αερίου και υγρού. Για παράδειγμα, το αέριο μπορεί να διέλθει μέσα από το απορροφητικό υγρό με τη μορφή φυσαλίδων, ή το υγρό μπορεί να εκνεφωθεί μέσω εγχυτήρων και να έλθει σε επαφή με το αέριο. Επίσης, το υγρό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαβροχή ενός πορώδους πληρωτικού μέσου, μέσω του οποίου διέρχεται το αέριο. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τις συνθήκες

λειτουργίας, το είδος του απαερίου και του ρύπου που ενδιαφέρει. Το χαρακτηριστικό των συσκευών απορρόφησης είναι ο μεγάλος τους όγκος, καθώς τόσο η συγκέντρωση του απορροφώμενου αερίου είναι μικρή, αλλά και οι ποσότητες απαερίου προς επεξεργασία είναι μεγάλες. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται μεγάλος όγκος για να αυξηθεί η διεπιφάνεια υγρού - αερίου. Η απορρόφηση είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται αποκλειστικά στη βιομηχανία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής είναι η απομάκρυνση του SO₂ από τα απαέρια καύσης, με χρήση αραιών αλκαλικών διαλυμάτων ως απορροφητικών υγρών.

Η απλούστερη συσκευή προσρόφησης αποτελείται από έναν κυλινδρικό πύργο στον οποίο το απορροφητικό υγρό εκνεφώνεται και εγχύεται κατά αντίρροη στο αέριο ρεύμα (στήλη καταΐονισμού). Η αποτελεσματικότητα της στήλης εξαρτάται κυρίως από την αύξηση της διεπαφής αερίου - υγρού, που επιτυγχάνεται ελαττώνοντας το μέγεθος των σταγονιδίων. Από την άλλη μεριά, το ελάχιστο μέγεθος των σταγονιδίων περιορίζεται από την απαίτηση αυτά να μην παρασύρονται από το ανοδικό ρεύμα του απαερίου. Ο κύλινδρος έχει αρκετά μεγάλη διάμετρο, συνήθως 2 - 3 μέτρα, για να εξασφαλιστεί επαρκής ομοιομορφία της διασποράς. Πλεονεκτήματα αυτής της συσκευής είναι η μικρή πτώση πίεσης του απαερίου, η απλή κατασκευή και η μικρή επίδραση των αιωρούμενων σωματιδίων του απαερίου στη δέσμευση του αερίου ρύπου. Στα μειονεκτήματά της συμπεριλαμβάνονται ο σχετικά χαμηλός ρυθμός διάχυσης και μεταφοράς μάζας, και επομένως η σχετικά μικρή αποτελεσματικότητα. Γενικά, η συσκευή παρέχει μια καλή λύση σε εγκαταστάσεις όπου δεν απαιτείται πλήρης καθαρισμός του απαερίου.

Άλλες συσκευές απορρόφησης είναι οι απορροφητήρες με δίσκους. Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό περίβλημα στο εσωτερικό των οποίων υπάρχουν δίσκοι με μικρές οπές. Το υγρό διοχετεύεται στους δίσκους και διατηρείται εκεί με τη βοήθεια του αερίου που κινείται αντίθετα. Το αέριο, λόγω διαφοράς πυκνότητας με το υγρό, κινείται μέσα από τις οπές με τη μορφή φυσαλίδων προς τα ανώτερα τμήματα της στήλης. Η λειτουργία της στήλης εξασφαλίζεται ρυθμίζοντας την παροχή του αέρα, έτσι ώστε αφενός να είναι ικανή να συγκρατήσει το υγρό στους δίσκους και αφετέρου να δημιουργεί συνθήκες αφρισμού του υγρού, ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλη επιφάνεια επαφής. Η πολύ καλή ανάμιξη υγρού και αερίου καθιστά τη συγκεκριμένη συσκευή πολύ αποδοτική με αποδόσεις ως 92 - 98%, ιδιαίτερα όταν η τροφοδοσία είναι αέριο με υψηλό φορτίο σε σκόνη. Το μειονέκτημά τους είναι ότι λόγω των δίσκων υπάρχει μεγάλη πτώση πίεσης και κατά συνέπεια δαπάνη ενέργειας για την άντληση του αερίου.

Μια ιδιαίτερα διαδεδομένη τεχνική για την απορρόφηση είναι η χρήση στήλης με πληρωτικό μέσο (Εικόνα 7.1). Το υγρό εγχύεται σε πορώδες απορροφητικό υλικό από την κορυφή της στήλης και σταδιακά διαβρέχει τη στήλη. Το κορεσμένο υγρό στη συνέχεια αποστραγγίζεται στη βάση της στήλης και απομακρύνεται. Το απαέριο ωθείται διαμέσου της στήλης και σταδιακά οι απορροφόμενοι ρύποι απομακρύνονται από το υγρό. Η στήλη με πληρωτικό μέσο έχει το πλεονέκτημα της πολύ καλής διεπαφής μεταξύ υγρού και αερίου, που εξασφαλίζει πολύ καλούς βαθμούς απόδοσης. Από την άλλη μεριά, εισαγάγει ιδιαίτερα μεγάλες απώλειες πίεσης, που πρέπει να αντισταθμίζονται με την κατανάλωση ενέργειας για τη ροή του απαερίου. Επίσης, η στήλη είναι κατάλληλη μόνο για απαέρια χωρίς σωματιδιακό φορτίο, καθώς τα σωματίδια ρυπαίνουν το πληρωτικό μέσο και μειώνουν την αποτελεσματικότητα της διεργασίας.



Εικόνα 7.1 Διάταξη απορρόφησης με πληρωτικό υλικό. 1-Διαχωριστής σταγονιδίων, 2-Στόμια υγρού, 3-Πληρωτικό μέσο, 4-Δίσκος συγκράτησης, 5-Εξόδος κορεσμένου απορροφητικού υγρού.

Προσρόφηση

Η Προσρόφηση είναι η διεργασία διάχυσης ενός αερίου στην επιφάνεια ενός στερεού. Προσρόφηση εμφανίζεται και σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης ενός ατμού. Δηλαδή, συμπύκνωση εμφανίζεται μόνο όταν το αέριο δεν μπορεί να συγκρατήσει άλλους ατμούς (κορεσμός) ενώ προσρόφηση εμφανίζεται ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις (τάσεις) ατμών. Οι δυνάμεις που συγκρατούν τα μόρια του αερίου πάνω στην επιφάνεια του στερεού είναι κυρίως δυνάμεις Van der Waals. Κατά την προσρόφηση δεν λαμβάνει χώρα καμιά χημική αντίδραση. Η χημειορρόφηση είναι μια υποκατηγορία προσρόφησης, κατά την οποία αναπτύσσεται χημικός δεσμός μεταξύ της προσροφητικής και της προσροφώμενης ουσίας. Η χημειορρόφηση είναι επομένως πολύ ισχυρότερη της προσρόφησης. Λόγω της τοπικής χημικής αντίδρασης που πραγματοποιείται, η χημική προσρόφηση είναι μη αντιστρέψιμη διαδικασία.

Η προσρόφηση (όπως και η απορρόφηση) ευνοείται σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις. Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας εξαρτάται κυρίως όμως από την ύπαρξη μεγάλης ειδικής επιφάνειας του στερεού μέσου που να επιτρέπει τη διάχυση του αερίου στην επιφάνεια του στερεού. Τα προσροφητικά μέσα είναι συνήθως πορώδη υλικά, εντός των πόρων των οποίων μπορούν να δεσμευθούν αποτελεσματικά τα μόρια του αερίου ρύπου. Τυπικά προσροφητικά μέσα είναι οι ζεόλιθοι και η αλουμίνα - συνθετικά κεραμικά υλικά τα οποία παράγονται στη βιομηχανία - ο ενεργός άνθρακας και η πηκτή πυριτίου (silica gel). Γενικά, η προσρόφηση θεωρείται μια διεργασία που οδηγεί σε υψηλή δέσμευση αερίων ρύπων, όταν αυτοί βρίσκονται σε σχετικά μικρές συγκεντρώσεις στο απαέριο. Τυπικά, διεργασίες προσρόφησης στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται για τη μείωση του φορτίου των απαερίων σε οργανική ύλη, σε τοξικούς ρύπους (φουράνια, διοξίνες) κλπ.

Η απλούστερη συσκευή προσρόφησης αποτελείται από στήλη εντός της οποίας υπάρχει το προσροφητικό μέσο σε στρώση συγκεκριμένου ύψους (αντιδραστήρας σταθερής κλίνης). Το απαέριο ρέει στο εσωτερικό του δοχείου διαμέσου της σταθερής στρώσης του προσροφητικού μέσου και τα ρυπογόνα συστατικά προσροφώνται έως ότου το μέσο προσρόφησης κορεστεί. Η απόδοση της διαδικασίας είναι πολύ υψηλή (φτάνει το 100%) και όταν η απόδοση αρχίσει να ελαττώνεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας σημαίνει ότι έχει επέλθει ο κορεσμός του προσροφητικού μέσου και γιαυτό πρέπει να αντικατασταθεί. Ουσιαστικά αυτό αποτελεί και το μεγαλύτερο πρόβλημα της συσκευής αυτής, ότι δηλαδή το μέσο προσρόφησης πρέπει να «αναγεννάται» με συγκεκριμένη συχνότητα, δηλαδή να διακόπτεται η λειτουργία του προσροφητήρα και να καθαρίζεται από την προσροφημένη ποσότητα ρύπων. Η αναγέννηση γίνεται είτε με θέρμανση είτε μειώνοντας την πίεση εντός του προσροφητήρα, ώστε να εκροφηθούν οι ρύποι.

Οι σχεδιαστικές παράμετροι για μια στήλη προσρόφησης απαιτούν γνώση του ρυθμού προσρόφησης ρύπων στο προσροφητικό μέσο, που συνήθως λαμβάνεται από πειραματικά ή εργαστηριακά δεδομένα. Κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό είναι η παροχή του απαερίου, η θερμοκρασία του, και η συγκέντρωσή του σε ρύπους. Σημαντικό κριτήριο επίσης είναι ο χρόνος ενός πλήρους κύκλου λειτουργίας (συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου αναγέννησης του προσροφητικού μέσου) ο οποίος πρέπει να συμβαδίζει με τις συνθήκες λειτουργίας της μονάδας στην οποία εντάσσεται η στήλη. Συνήθως, χρησιμοποιούνται τρεις ή τέσσερις συσκευές παράλληλα, ώστε να λειτουργούν εναλλακτικά και να εξασφαλίζεται η συνεχής λειτουργία.

Υπάρχουν ειδικές στήλες προσρόφησης συνεχούς λειτουργίας για περιπτώσεις όπου αυτό απαιτείται. Σε αυτές τις στήλες το προσροφητικό μέσο πέφτει με χαμηλή ταχύτητα (συνήθως με τη βοήθεια της βαρύτητας) ενώ το αέριο ανεβαίνει προς το πάνω μέρος της στήλης. Το κορεσμένο προσροφητικό μέσο συλλέγεται στο κάτω μέρος της στήλης και οδηγείται στη μονάδα αναγέννησης. Οι ίδιες τεχνολογίες χρησιμοποιούνται και για τη χημική προσρόφηση με τη διαφορά ότι δεν είναι πάντα δυνατή η αναγέννηση του προσροφητικού μέσου.

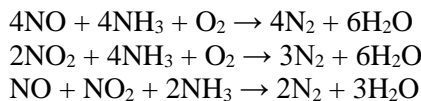
Η διεργασία της προσρόφησης χρησιμοποιείται στους καταλυτικούς μετατροπείς των οχημάτων για την αποθήκευση οξυγόνου, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την οξειδωση των ρύπων στην επιφάνεια του μετατροπέα. Τελευταία έχουν εμφανιστεί προσροφητήρες που χρησιμοποιούνται για τη δέσμευση NO_x από το καυσαέριο των κινητήρων ντίζελ. Τα NO_x προσροφώνται στη διάρκεια φτωχής λειτουργίας (όπως η τυπική λειτουργία του κινητήρα ντίζελ) σε επιφάνεια οξειδίου του βαρίου, που χρησιμοποιείται ως το προσροφητικό μέσο. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα (ορισμένα λεπτά) ο κινητήρας περνά σε λειτουργία πλούσιου μίγματος και το NO_x εκροφάται, ώστε να αναγεννηθεί το προσροφητικό μέσο. Τα οξείδια του αζώτου στη συνέχεια ανάγονται σε N_2 στο περιβάλλον ενός αναγωγικού καταλύτη.

Καταλυτική επεξεργασία

Σε ορισμένες περιπτώσεις ρύπων, όπως τα NO_x, η προσρόφηση ή η απορρόφηση δεν είναι κατάλληλες μέθοδοι αντιρρύπανσης. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, τα NO_x μπορούν να προσροφηθούν σε κατάλληλα μέσα. Όμως, και μετά την προσρόφηση, παραμένει το πρόβλημα του τι είδους επεξεργασία θα πρέπει να υποστεί ο συγκεκριμένος ρύπος μετά τη δέσμευσή του, ώστε να μην αποτελεί πλέον περιβαλλοντικό πρόβλημα. Ειδικά, λοιπόν, για τα NO_x, και σε μικρότερο βαθμό και για την οργανική ύλη, χρησιμοποιούνται βιομηχανικοί καταλυτικοί μετατροπείς που έχουν την ικανότητα να ανάγουν τα NO_x σε N₂, ή αντίστοιχα να οξειδώνουν την οργανική ύλη προς CO₂ και H₂O, αντίστοιχα.

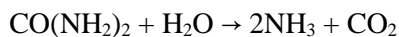
Η κατάλυση, ως χημική διεργασία, έχει τη δυνατότητα να επιταχύνει το ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις. Έτσι, μια αντίδραση που χωρίς την ύπαρξη καταλύτη απαιτεί ορισμένες ώρες για να ολοκληρωθεί, μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα με τη χρήση κατάλληλου καταλύτη. Η κατάλυση είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες χημικές διεργασίες, που δεν χρησιμοποιείται μόνο για αντιρρύπανση αλλά και για σύνθεση, διάσπαση κλπ. Οι ακριβείς μηχανισμοί με τους οποίους ένας καταλύτης έχει τη δυνατότητα να επιταχύνει τις χημικές αντιδράσεις είναι πολύπλοκοι και εξαρτώνται από τον καταλύτη, τα αντιδρώντα και το είδος της αντίδρασης. Γενικά, ο καταλύτης έχει τη δυνατότητα να μειώνει την ενέργεια ενεργοποίησης μιας αντίδρασης, με αποτέλεσμα αυτή να έχει τη δυνατότητα να διεξαχθεί πολύ πιο γρήγορα.

Η πιο ευρέως διαδεδομένη καταλυτική διεργασία αντιρρύπανσης στη βιομηχανία είναι η αναγωγή των οξειδίων του αζώτου με τη χρήση αμμωνίας, προς άζωτο και νερό. Η διεργασία αυτή καλείται επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (selective catalytic reduction - SCR), λόγω της επιλεκτικότητας των καταλυτών που χρησιμοποιούνται να ανάγουν μόνο τα οξείδια αζώτου. Οι κύριες χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι οι ακόλουθες:



Η διεργασία είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε θερμοκρασίες πάνω από 200-250°C και ο βαθμός μετατροπής μπορεί να φτάσει το 80-85%. Για τη λειτουργία της διεργασίας θα πρέπει να παρέχεται αμμωνία εξωτερικά στη ροή του απαερίου, σε σωστή αναλογία. Οι καταλυτικοί μετατροπείς που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από κεραμικό ή μεταλλικό υπόστρωμα, στην επιφάνεια του οποίου είναι διασπαρμένοι κόκκοι του καταλύτη. Ως καταλύτης, συνήθως, χρησιμοποιείται βανάδιο ή ζεόλιθοι.

Η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή έχει βρει εφαρμογή σε πλήθος βιομηχανικών εγκαταστάσεων, όπως σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας με χρήση στερεών καυσίμων ή φυσικού αερίου, σε μεγάλους βιομηχανικούς καυστήρες και αποτεφρωτήρες απορριμμάτων, αλλά επίσης έχει βρει εφαρμογή σε κινητήρες ντίζελ πλοίων και τραινών. Από το 2008 και έπειτα στην ΕΕ, έχει ξεκινήσει η εφαρμογή συστημάτων SCR και για την αντιρρύπανση κινητήρων φορτηγών. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι ίδια με τη βιομηχανική εφαρμογή της διεργασίας. Ωστόσο, η αμμωνία είναι τοξική και για λόγους ασφαλείας δεν μπορεί να μεταφέρεται στο όχημα. Επομένως, για την αναγωγή χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα ουρίας που είναι ένα απόλυτα ασφαλές διάλυμα. Η ουρία [(NH₂)₂CO] προτού διατεθεί για αναγωγή των NO_x, υδρολύεται παρουσία οξειδωτικού καταλύτη, σύμφωνα με την αντίδραση:



Η υδρόλυση παράγει την απαραίτητη αμμωνία, η οποία στη συνέχεια ανάγει τα NO_x. Ένας κίνδυνος που υπάρχει με τη χρήση SCR σε μεταβλητά σημεία λειτουργίας του οχήματος είναι η διαφυγή αμμωνίας.

Γενικότερα, η καταλυτική επεξεργασία είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική για τον καθαρισμό των καυσαερίων από κινητές πηγές. Οι καταλυτικοί μετατροπείς εφαρμόστηκαν πρώτη φορά σε βενζινοκίνητα οχήματα ήδη από τη δεκαετία του 1970. Οι καταλύτες αυτοί έχουν τη δυνατότητα να οξειδώνουν το μονοξείδιο του άνθρακα και τους υδρογονάνθρακες προς CO₂ και να ανάγουν τα οξείδια του αζώτου σε άζωτο. Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται είναι ευγενή μέταλλα και κυρίως πλατίνα, παλλάδιο και ρόδιο. Η τριπλή αυτή λειτουργία είναι και ο λόγος ονομασίας των καταλυτών αυτών ως «τριοδικών». Αναγκαία συνθήκη για την επιτυχία της τριπλής μετατροπής είναι η λειτουργία του κινητήρα με στοιχειομετρικό μίγμα, δηλαδή να

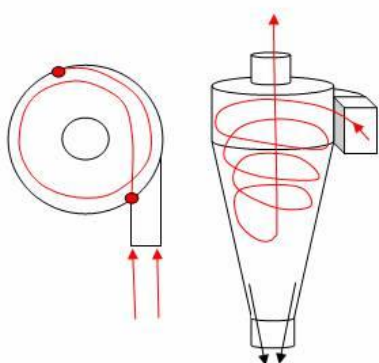
χρησιμοποιείται η ακριβής αναλογία καυσίμου / οξυγόνου για την τέλεια καύση. Λειτουργία του κινητήρα με έλλειψη οξυγόνου μειώνει τη δυνατότητα οξειδωσης από τον καταλυτικό μετατροπέα ενώ λειτουργία του κινητήρα με περίσσειμα οξυγόνου μειώνει τη δυνατότητα αναγωγής. Η ρύθμιση της στοιχειομετρικής αναλογίας καυσίμου / αέρα επιτυγχάνεται με αξιοποίηση του σήματος από τον αισθητήρα «λ» που είναι τοποθετημένος στη γραμμή του καυσαερίου. Οι σημερινοί τριοδικοί καταλύτες επιτυγχάνουν βαθμούς απόδοσης πάνω από 90% και στους τρεις ρύπους.

Στους κινητήρες ντίζελ, εκτός από την τεχνολογία SCR χρησιμοποιούνται ευρύτατα και απλοί οξειδωτικοί καταλυτικοί μετατροπέες. Σκοπός τους είναι να μειωθούν αφενός οι εκπομπές αερίων υδρογονανθράκων, αλλά και η μείωση του οργανικού τμήματος της σωματιδιακής ύλης. Για παράδειγμα, η σωματιδιακή ύλη από κινητήρα ντίζελ χωρίς οξειδωτικό καταλύτη μπορεί να αποτελείται έως και 50% από πτητικές οργανικές ενώσεις. Ο οξειδωτικός καταλύτης έχει τη δυνατότητα να μειώνει αυτό το τμήμα κατά 70 - 80% με αποτέλεσμα να μπορεί να μειώσει την εκπομπή σωματιδιακής ύλης μέχρι και κατά 40%. Οξειδωτικοί καταλυτικοί μετατροπέες είναι εγκατεστημένοι σήμερα σε όλα τα οχήματα ντίζελ.

7.3 Καθαρισμός απαερίων από το σωματιδιακό φορτίο

Οι συγκεντρώσεις σωματιδιακής ύλης στα απαέρια βιομηχανικών διεργασιών και στα καυσαέρια από την καύση ορυκτών καυσίμων είναι ιδιαίτερα υψηλές. Η μείωση του σωματιδιακού φορτίου είναι επομένως απαραίτητη προϋπόθεση για στοιχειώδη περιβαλλοντική προστασία, πριν την έκλυση των αερίων στην ατμόσφαιρα. Το είδος και η συγκέντρωση σωματιδίων που εκπέμπονται εξαρτάται ισχυρά από τη διεργασία. Η σωματιδιακή ύλη μπορεί να είναι σκόνη από επεξεργασία ορυκτών ή ξυλείας, τέφρα από την καύση ορυκτών καυσίμων ή απορριμμάτων, πίσσα από την αεριοποίηση γεωργικών υπολειμμάτων, σωματίδια άνθρακα από την καύση σε κινητήρες κλπ. Ακριβώς, λόγω αυτού του εύρους μεγεθών, χημικής σύστασης και ιδιοτήτων των σωματιδίων, χρησιμοποιούνται διάφορες συσκευές και διατάξεις για την αντιρρύπανση.

Η πρώτη κατηγορία διατάξεων για τη μείωση της σωματιδιακής ρύπανσης είναι τα κυκλώνια (Εικόνα 7.2). Σε ένα κυκλώνιο τα απαέρια εισέρχονται περιφερειακά σε εφαπτομενική διεύθυνση με τη συσκευή και υποβάλλονται σε περιστροφική κίνηση (σπινάλ). Λόγω της φυγόκεντρου δύναμης τα σωματίδια με ικανή αδράνεια εξωθούνται και προσκρούουν στα εξωτερικά τοιχώματα του κυκλωνίου, και στη συνέχεια κατακρημνίζονται προς τη βάση της συσκευής. Το καθαρό απαέριο εξέρχεται από το κέντρο του κυκλωνίου με ανοδική πορεία. Τα κυκλώνια είναι ιδιαίτερα συνήθεις συσκευές αντιρρύπανσης με χαμηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Ωστόσο, δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά για μικρά σωματίδια (<10 μm), λόγω της μικρής αδράνειας των σωματιδίων αυτών. Συνήθως, τα κυκλώνια χρησιμοποιούνται ως πρώτες διατάξεις για μείωση της μεγάλης συγκέντρωσης σε τέφρα ή σκόνη και επιμελέστερος καθαρισμός του απαερίου επιτυγχάνεται στη συνέχεια με άλλες συσκευές. Επίσης, τα κυκλώνια δεν είναι κατάλληλα για κολλώδη σωματιδιακή ύλη (π.χ. πίσσα ή σκόνη σε απαέρια υψηλής υγρασίας), καθώς αυτό εμποδίζει την κατακρήμνισή τους μετά την επαφή με το τοίχωμα του κυκλωνίου. Ορισμένες λύσεις που έχουν δοθεί με επάλειψη των εσωτερικών τοιχωμάτων με λιπαντικό έλαιο για την κατακρήμνιση σωματιδίων πίσσας δεν είναι πάντα ιδιαίτερα αποτελεσματικές.

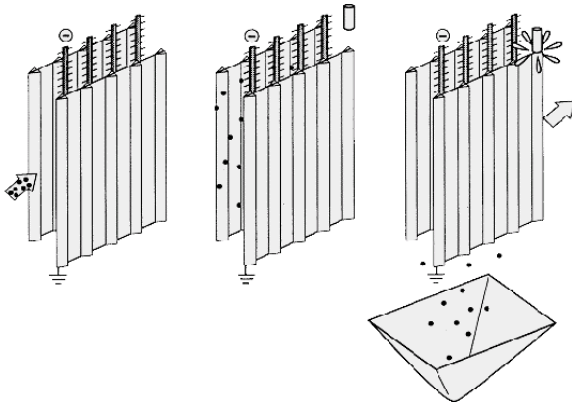


Εικόνα 7.2 Διατάξη κυκλωνίου για τον διαχωρισμό μεγάλων σωματιδίων.

Στη δεύτερη κατηγορία διατάξεων αντιρρύπανσης επιχειρείται και πάλι απομάκρυνση των σωματιδίων με εκμετάλλευση της βαρύτητας, αφού όμως τα σωματίδια δεσμευτούν από σταγονίδια νερού. Σε αυτές τις συσκευές (πλυντηρίδες - wet scrubbers), τα απαέρια συνήθως σχηματίζουν ένα ανοδικό ρεύμα το οποίο

συναντά σταγονίδια νερού που παράγονται με καταιονισμό. Κατά τη διεπαφή των δύο ρευμάτων, τα σωματίδια δεσμεύονται από τα σωματίδια νερού με αποτέλεσμα να αυξάνει η αδράνειά τους. Στη συνέχεια τα σωματίδια απομακρύνονται αποτελεσματικά είτε λόγω βαρύτητας είτε τεχνητά με φυγοκέντριση. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση του σωματιδιακού φορτίου (>95%) μέχρι και σε μέγεθος σωματιδίων 0,3 - 0,5 μm. Επίσης, λόγω της κάλυψης των σωματιδίων με νερό, οι πλυντηρίδες μπορούν να δεσμεύσουν αποτελεσματικά και κολλώδη σωματίδια. Μειονεκτήματα της διάταξης είναι η σχετικά μεγάλη πτώση πίεσης, η διαχείριση του ρυπασμένου υγρού που προκύπτει, η αδυναμία λειτουργίας με θερμό ρεύμα καυσαερίου και η διάβρωση στην περίπτωση που στα απαέρια υπάρχουν σημαντικές συγκεντρώσεις θεικών ή νιτρικών ιόντων.

Στην τρίτη κατηγορία διατάξεων ανήκει ο ηλεκτροστατικός κατακρημνιστής. Μια τέτοια διάταξη αποτελείται από πολλές παράλληλες πλάκες (Εικόνα 7.3) που είναι ηλεκτρικά ουδέτερες (γειωμένες). Μεταξύ των πλακών υπάρχουν λεπτά σύρματα υπό υψηλή τάση που παράγουν ιόντα. Τα ιόντα επικάθηνται με διάχυση στα σωματίδια, τα οποία αποκτούν ηλεκτρικό φορτίο. Το φορτίο αυτό ωθεί τα σωματίδια προς τις ηλεκτρικά ουδέτερες πλάκες, καθώς κάθε φορτίο στο σωματίδιο επάγει ένα ίσο αλλά αντίθετο φορτίο πάνω στην πλάκα (κατοπτρικό φορτίο). Οι πλάκες δονούνται με κρούση ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, ανάλογα με τη συγκέντρωση σωματιδίων στα απαέρια, για την απομάκρυνση των σωματιδίων. Ο ηλεκτροστατικός κατακρημνιστής είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός για στερεά σωματίδια ακόμα και πολύ μικρού μεγέθους (~0,1 μm). Μειονεκτήματά του είναι το κόστος επένδυσης και λειτουργίας, καθώς και η αδυναμία του να λειτουργήσει με κολλώδη σωματιδιακή ύλη.



Εικόνα 7.3 Οι τρεις φάσεις λειτουργίας ενός ηλεκτροστατικού κατακρημνιστή. Αριστερά εισέρχονται τα απαέρια με το σωματιδιακό τους φορτίο και φορτίζονται με ιονισμό μεταξύ των δύο γειωμένων πλακών.

Τέλος, μια σημαντική κατηγορία διατάξεων είναι τα φίλτρα. Υπάρχουν δύο κατηγορίες φίλτρων, τα επιφανειακά φίλτρα και τα φίλτρα βαθιάς διήθησης. Τα επιφανειακά φίλτρα (σακκόφιλτρα) αποτελούνται από υφασμάτινους σάκους διαμέσου των οποίων διέρχονται τα απαέρια. Ανάλογα με την ύφανση, τα υφάσματα είναι δυνατόν να συγκρατήσουν σωματίδια με μέγεθος έως περίπου 1 μm. Γενικά, όσο μεγαλύτερη η αποτελεσματικότητα, τόσο μεγαλύτερη και η πτώση πίεσης. Επίσης, ορισμένοι τύποι υφασμάτων μπορούν να διαχειριστούν και απαέρια υψηλής υγρασίας. Τα σακκόφιλτρα είναι πολύ διαδεδομένες και οικονομικές διατάξεις αντιρρύπανσης σε λατομεία, σιλό, βιομηχανίες επεξεργασίας ξύλου κλπ.

Στα φίλτρα βαθιάς διήθησης η συγκράτηση των σωματιδίων δεν γίνεται επιφανειακά αλλά σε όλο το βάθος του φίλτρου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το φίλτρο του τσιγάρου. Τέτοια φίλτρα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που είναι απαραίτητος ο υψηλός βαθμός απόδοσης, όπως για παράδειγμα ο καθαρισμός του καυσαερίου των οχημάτων ντίζελ. Από το 2010, η χρήση τέτοιων φίλτρων έχει γίνει υποχρεωτική στα επιβατηγά οχήματα ντίζελ. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται φίλτρα από πορώδες κεραμικό υλικό στα οποία τα σωματίδια συλλέγονται εντός των πόρων του υλικού. Τα φίλτρα αυτά εξασφαλίζουν πολύ υψηλή αποτελεσματικότητα (>99%) σε όλο το φάσμα σωματιδίων <1 μm. Περιοδικά, το φίλτρο πρέπει να αναγεννάται, δηλαδή να καθαρίζεται η σωρευμένη μάζα σωματιδίων στο εσωτερικό του. Αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας του καυσαερίου που αναφλέγει τα κυρίως ανθρακικά σωματίδια. Η καύση των σωματιδίων διαρκεί 1 - 2 λεπτά (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας) και επαναλαμβάνεται περίπου κάθε 1.000 χιλιόμετρα.

7.4 Μείωση έκλυσης CO₂

Η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής δημιουργεί την ανάγκη μείωσης των εκπομπών CO₂. Έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, ότι μείωση των εκπομπών CO₂ μπορεί να επιτευχθεί με υιοθέτηση νέων τεχνολογιών καύσης με καλύτερο βαθμό απόδοσης, χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, επέκταση χρήσης των βιοκαυσίμων, μείωση της κατανάλωσης κλπ. Ωστόσο, ακόμα και στα πιο αισιόδοξα σενάρια από πλευράς διεύθυνσης ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα, τα ορυκτά καύσιμα συνεχίζουν να παράγουν το 70-80% της συνολικής ενέργειας μέχρι και το 2030. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη μείωσης της έκλυσης CO₂ στην ατμόσφαιρα κατά την καύση ορυκτών καυσίμων.

Η πρώτη μεγάλη διαφορά του CO₂ σε σχέση με τους άλλους ρύπους είναι η πολύ μεγάλη ποσότητα που δημιουργείται κατά την καύση. Για παράδειγμα, καύση ενός κιλού πετρελαίου ντίζελ δημιουργεί ένα 1 γραμμάριο NO_x και 3 κιλά CO₂. Το δεύτερο πρόβλημα είναι ότι το CO₂ είναι ένα πολύ ευσταθές μόριο. Η διάσπασή του είναι εφικτή μόνο με κατανάλωση ενέργειας μεγαλύτερης από αυτή που εκλύθηκε κατά τον σχηματισμό του. Άρα, η χημική μετατροπή του CO₂ είναι ενεργειακά ασύμφορη. Οι δύο αυτές συνθήκες εισάγουν σημαντικούς περιορισμούς στις τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση εκπομπής CO₂.

Σήμερα γίνονται σημαντικές προσπάθειες για τη δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα (carbon capture and storage) των καυσίμων (ενότητα 6.4). Τέτοιες τεχνικές αναπτύσσονται κυρίως για υπάρχοντες, μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Στόχος είναι να δεσμευτεί το CO₂ πριν την έκλυσή του στην ατμόσφαιρα. Μετά τη δέσμευσή του, το CO₂ συμπιέζεται και αποθηκεύεται σε γεωλογικούς σχηματισμούς. Συνήθως, τέτοιοι είναι σχηματισμοί πετρωμάτων στους οποίους η πίεση έχει μειωθεί μετά από άντληση αργού πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Αποθήκευση του CO₂ σε τέτοιους σχηματισμούς μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της εξόρυξης πετρελαίου, λόγω της ώθησης που δημιουργεί η ποσότητα CO₂ που εισέρχεται στο κοίτασμα. Επίσης, υπάρχουν σκέψεις για διάλυση του CO₂ στους ωκεανούς, αλλά τέτοιες λύσεις βρίσκουν πρακτικά και τεχνολογικά εμπόδια.

Βεβαίως, το δυσκολότερο τμήμα της όλης προσέγγισης είναι η δέσμευση του CO₂. Σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας, το CO₂ παράγεται σε αναλογία περίπου 5% στα καυσαέρια. Το υπόλοιπο είναι άζωτο, υδρατμοί, η όποια περίσσεια οξυγόνου και λοιποί ρύποι (SO₂, CO, τέφρα, οργανική ύλη, NO_x κλπ.). Η δέσμευση του CO₂ από το καυσαέριο γίνεται με απορρόφηση του σε διάλυμα αμινών. Οι αμίνες είναι αζωτούχες οργανικές ενώσεις στις οποίες διαλύεται αποτελεσματικά το CO₂. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται είναι όμοιες με αυτές της απορρόφησης για τους άλλους ρύπους. Μετά τη δέσμευση, οι αμίνες αναγεννιούνται με θέρμανση κατά την οποία απελευθερώνεται καθαρό CO₂, το οποίο στη συνέχεια συμπιέζεται και οδηγείται με αγωγούς (όμοιους με αυτούς του φυσικού αερίου) στις γεωλογικές αποθήκες.

Η διεργασία αυτή είναι τεχνικά εφικτή, αλλά εισάγει μεγάλα κόστη επένδυσης και λειτουργικά κόστη στην παραγωγή ενέργειας. Επίσης, λόγω της ανάγκης για θέρμανση των αμινών κατά την αναγέννησή τους και συμπίεσης του CO₂, ο συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης μειώνεται κατά 5 - 6%. Τα τεχνολογικά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν σήμερα συνδέονται κυρίως με την ανάπτυξη απορροφητικών μέσων μεγάλης επιλεκτικότητας και διαλυτότητας σε CO₂, αντοχής στη διάβρωση και επιμόλυνσης από άλλους ρύπους και μικρής ενεργειακής κατανάλωσης κατά τη φάση της αναγέννησης.

Μια εναλλακτική λύση για τη δέσμευση του CO₂ είναι η χρήση καθαρού οξυγόνου αντί για αέρα κατά την καύση. Αυτό έχει το πλεονέκτημα ότι τα καυσαέρια αποτελούνται ουσιαστικά μόνο από CO₂, υδρατμούς και τέφρα. Η τέφρα μπορεί να καθαριστεί και οι υδρατμοί να συμπυκνωθούν, με αποτέλεσμα το προϊόν της καύσης να είναι καθαρό CO₂. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η πολύ υψηλή θερμοκρασία καύσης λόγω της απουσίας N₂ (>3500 K), που οδηγεί σε προβλήματα χρήσης του υπάρχοντος εξοπλισμού, καθώς και η ενεργειακή κατανάλωση που συνοδεύει τον διαχωρισμό του N₂ από τον αέρα.

Επίσης, μια κατεύθυνση έρευνας είναι η απομάκρυνση του άνθρακα πριν την καύση, δηλαδή η καταλυτική αναμόρφωση των ορυκτών καυσίμων προς CO και H₂. Αυτή είναι μια ενδόθερμη αντίδραση. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια υδρατμών, το CO μετατρέπεται σε CO₂ και δεσμεύεται μέσω αμινών ή μέσω μεμβρανών. Έτσι, ως καύσιμο για περαιτέρω χρήση προκύπτει καθαρό H₂ το οποίο δεν οδηγεί σε σχηματισμό CO₂ κατά την καύση του. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου έναντι της δέσμευσης CO₂ μετά την καύση είναι ότι το CO₂ δεσμεύεται από ένα μίγμα αερίων με πολύ λίγες προσμίξεις και έτσι δεν δημιουργούνται προβλήματα επιμόλυνσης από την τέφρα. Για παράδειγμα, με αυτόν τον τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ημιπερατές μεμβράνες για το διαχωρισμό του CO₂, με χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση από την αναγέννηση των αμινών, τεχνική που είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί απευθείας στο καυσαέριο.