

ΠΡΑΣΙΝΗ ΧΗΜΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ/ΜΗΧΑΝΙΚΗ:
Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Παραγωγικών Διαδικασιών

A. I. Ζουμπούλης* και Γ. Τράσκας

Τομέας Χημικής Τεχνολογίας & Βιομηχανικής Χημείας, Τμήμα Χημείας (Box 116)
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, 54124 Θεσσαλονίκη

Εισαγωγή

Τα τεράστια περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν εμφανιστεί με ιδιαίτερη ένταση ιδιαίτερα κατά τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας της πληθυσμιακής έκρηξης, της αλόγιστης χρήσης των πρώτων υλών, του νερού και της καλλιεργήσιμης γης και της συνεχώς αυξανόμενης βιομηχανικής παραγωγής χημικών προϊόντων, θα μπορούσαν να ταξινομηθούν γενικά στα παγκόσμιας εμβέλειας και στα τοπικά [1]. Μεταξύ των πρώτων κατατάσσονται π.χ. τα ενεργειακά προβλήματα, εξαιτίας της εντατικής κατανάλωσης των μη-ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως π.χ. του πετρελαίου, του φυσικού αερίου, του λιγνίτη κλπ. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αν και θεωρητικά ανεξάντλητες, δε θεωρούνται προς το παρόν οικονομικά συμφέρουσες και δε χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Στην ίδια κατηγορία προβλημάτων έχουν θέση επίσης το φαινόμενο του «θερμοκηπίου», που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, καθώς και η καταστροφή του στρώματος του όζοντος. Στη δεύτερη κατηγορία των τοπικών προβλημάτων, ανήκουν κυρίως τα προβλήματα υποβάθμισης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών και εξωτερικών χώρων με διάφορους ρύπους, η υποβάθμιση της ποιότητας των νερών και η ελάττωση των φυσικών πόρων (μεταλλεύματα, ξυλεία, στερεά καύσιμα κλπ.).

Τα προηγούμενα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα έχουν απασχολήσει συχνά και σε μεγάλο βαθμό ιδιαίτερα κατά τα τελευταία χρόνια τις κυβερνήσεις των κρατών, τους αρμόδιους επιστήμονες, αλλά και την κοινή γνώμη, καθιστώντας απαραίτητη μια αλλαγή στον τρόπο θεώρησης της εφαρμοζόμενης περιβαλλοντικής πολιτικής, καθώς σήμερα καθίσταται επιτακτικότερη από κάθε άλλη φορά, η ανάγκη επίλυσής τους [2]. Για την αντιμετώπισή τους και για την προστασία του περιβάλλοντος και της υγείας του ανθρώπου έχουν παραδοσιακά θεσπιστεί (και θεσπίζονται συνεχώς) ολοένα και αυστηρότεροι νόμοι και κανονισμοί περιβαλλοντικής συμμόρφωσης, που έχουν σαν κύριο σκοπό τη θέσπιση ορίων (μέγιστων επιτρεπτών τιμών) στην ποσότητα των ρύπων, οι οποίοι απελευθερώνονται στο περιβάλλον.

Λαμβάνοντας υπόψη τις βασικές αρχές προστασίας του περιβάλλοντος, όπως εκφράζονται π.χ. από την πρόσφατη οδηγία της Ε.Ε. IPPC (Integrated Pollution Prevention & Control), η διαχείριση των βιομηχανικών αποβλήτων θα πρέπει να ακολουθεί την παρακάτω ιεραρχική σειρά προτίμησης:

1. Μείωση αποβλήτων στην πηγή της παραγωγής τους.
2. Ανακύκλωση στην ίδια παραγωγική διαδικασία.
3. Ανακύκλωση μέσα στη βιομηχανία.
4. Ανακύκλωση εκτός της βιομηχανίας.
5. Επεξεργασία αποβλήτων.

* e-mail: zoubouli@chem.auth.gr, τηλ. & fax: 2310-99 77 94

6. Ασφαλή διάθεση σε κατάλληλους (πλήρως ελεγχόμενους) χώρους (π.χ. χημικής ταφής).
7. Απευθείας απόθεση/απελευθέρωση στο περιβάλλον.

Στην εργασία αυτή θα περιγραφεί με μεγάλη συντομία ένα σχετικά καινούργιο «εργαλείο» περιβαλλοντικής προστασίας, που ονομάζεται «**Πράσινη Χημική Τεχνολογία ή Μηχανική**» (Green Chemical Technology ή Green Engineering). Σαν Πράσινη Τεχνολογία (ή Μηχανική) μπορεί να οριστεί ο σχεδιασμός και η εμπορευματοποίηση των προϊόντων που προκύπτουν με τη χρήση κατάλληλου συνδυασμού παραγωγικών διαδικασιών, τα οποία θα πρέπει να είναι ποιοτικά και οικονομικά αποδεκτά, ενώ παράλληλα θα ελαχιστοποιούνται: (α) η δημιουργία (ή πρόκληση) ρύπανσης στην πηγή της παραγωγής τους, και (β) η επικινδυνότητά τους για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον [3]. Ο σκοπός της θεώρησης αυτής, σε συνδυασμό με άλλες σχετικές πρακτικές, όπως είναι η Πράσινη Χημεία, είναι ο περιορισμός, ή ακόμα και η εξαφάνιση της χρήσης και παραγωγής επικίνδυνων χημικών ουσιών. Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας αυτής θα είναι σημαντικότερα, όσο πιο νωρίς εφαρμόζεται, δηλ. από στην αρχή ακόμη του σχεδιασμού και της ανάπτυξης (design & development) μιας παραγωγικής διαδικασίας ή ενός προϊόντος.

Ο Ρόλος των Τεχνικών Βιομηχανίας (Χημικών/Χημικών Μηχανικών)

Ένας από τους κύριους ρόλους των τεχνικών βιομηχανίας είναι ο σχεδιασμός και η λειτουργία των χημικών διεργασιών με στόχο την παραγωγή χημικών προϊόντων, που να πληρούν τις απαιτήσεις των καταναλωτών και τα οποία θα είναι οικονομικά αποδεκτά. Ένας άλλος σημαντικός ρόλος είναι η εξασφάλιση ασφαλών συνθηκών για το εργατικό προσωπικό και τους κατοίκους των γύρω περιοχών της βιομηχανικής εγκατάστασης. Γενικά, οι χημικές διεργασίες δεν θα πρέπει να επιβαρύνουν το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη όλα τα περιβαλλοντικά ζητήματα που έχουν σχέση με τον Κύκλο Ζωής ενός προϊόντος (Life Cycle Assessment), που περιλαμβάνουν τόσο το αρχικό στάδιο της παραγωγής του, όσο και τη μεταφορά του, τη χρήση του από τους καταναλωτές, την ανακύκλωσή του και την τελική διάθεσή του στο περιβάλλον [4].

Οι σύγχρονες αντιλήψεις επιβάλλουν στους τεχνικούς της βιομηχανίας να αναθεωρούν και να βελτιώνουν τον σχεδιασμό ακόμη και μιας παραδοσιακής παραγωγικής διαδικασίας, έτσι ώστε να εξαλείφουν ή να μειώνουν σημαντικά τις πηγές της επικινδυνότητάς της. Η θεώρηση αυτή έρχεται συχνά σε αντίθεση με παλαιότερες αντιλήψεις, στις οποίες η έμφαση δινόταν στη λήψη μέτρων ασφαλείας στις παραγωγικές διαδικασίες, όπου όμως εξακολουθούσαν να υπάρχουν (εν δυνάμει) κίνδυνοι. Στον επόμενο πίνακα 1 περιέχεται ένας αριθμός τυπικών θεμάτων με μορφή ερωτήσεων, που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη [2].

Εργαλεία Εκτίμησης και Βελτίωσης της Περιβαλλοντικής Απόδοσης μιας Χημικο-τεχνολογικής Παραγωγικής Διαδικασίας

Ο σχεδιασμός των παραγωγικών διαδικασιών της Χημικής Τεχνολογίας απορρέει σαν αποτέλεσμα μιας σειράς επιμέρους σταδίων, πρωταρχικά με τον καθορισμό των

ρευμάτων εισόδου-εξόδου της διαδικασίας και στη συνέχεια, με την πλήρη περιγραφή όλων των επιμέρους διεργασιών που λαμβάνουν μέρος για την παραγωγή ενός προϊόντος. Όλα αυτά περιγράφονται πλήρως με τα αντίστοιχα διαγράμματα ροής. Στα προηγούμενα χρόνια, η εκτίμηση της περιβαλλοντικής απόδοσης γινόταν μόνο στα τελικά στάδια, όταν η διεργασία είχε σχεδόν ολοκληρωθεί. Η σύγχρονη αντίληψη επιβάλλει όμως την υιοθέτηση αντίστοιχων μεθοδολογιών σε οποιοδήποτε στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας, οι οποίες θα δίνουν στον τεχνικό της βιομηχανίας περισσότερες επιλογές και ευκολίες σχεδιασμού, με σκοπό τη βελτίωση της συνολικής περιβαλλοντικής απόδοσης.

Πίνακας 1. Κατάλογος ερωτήσεων για τον έλεγχο και την ασφάλεια των χημικο-τεχνολογικών παραγωγικών διαδικασιών.

Ελαχιστοποίηση παραγωγής αποβλήτων

Χρήση μικρότερων ποσοτήτων επικίνδυνων ουσιών:

- Ελαχιστοποιήθηκαν όλα τα επικίνδυνα υλικά της διεργασίας στους αποθηκευτικούς χώρους;
 - Χρειάζονται πραγματικά όλες οι προτεινόμενες δεξαμενές αποθήκευσης;
 - Είναι δυνατόν άλλου είδους εξοπλισμός ή παραγωγική μονάδα να ελαττώσει τους χώρους αποθήκευσης των υλικών;
-

Αντικατάσταση υλικών

Χρήση λιγότερο επικίνδυνων χημικών ουσιών:

- Είναι δυνατό να εξαλειφθούν εντελώς οι επικίνδυνες πρώτες ύλες, τα ενδιάμεσα προϊόντα παραγωγής και τα παραπροϊόντα, χρησιμοποιώντας μια εναλλακτική χημική ή τεχνολογική παραγωγική διαδικασία;
 - Είναι δυνατό να αντικαταστήσουμε εύφλεκτες ή εκρηκτικές πρώτες ύλες (π.χ. διαλύτες) με λιγότερο επικίνδυνες πρώτες ύλες (π.χ. μη-αναφλέξιμες);
-

Ελαχιστοποίηση περιβαλλοντικών οχλήσεων

Χρήση λιγότερο επικίνδυνων συνθηκών ή εγκαταστάσεων που θα ελαχιστοποιούν τις επιδράσεις ενός ατυχήματος απελευθέρωσης επικίνδυνων υλικών ή ενέργειας: Π.χ.

- Μπορεί η πίεση κατά την τροφοδοσία των πρώτων υλών να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη;
 - Μπορούν οι συνθήκες μιας αντίδρασης (π.χ. θερμοκρασία, πίεση) να είναι όσο το δυνατόν ηπιότερες, εισάγοντας π.χ. κάποιον καταλύτη ή χρησιμοποιώντας κάποιον άλλο καλύτερο καταλύτη;
-

Απλούστευση παραγωγικών διαδικασιών

Σχεδιασμός εγκαταστάσεων που θα εξαλείφουν την περιττή πολυπλοκότητα και τα επακόλουθα λειτουργικά προβλήματα και λάθη.

- Μπορεί ο απαραίτητος εξοπλισμός να σχεδιαστεί όσο απλούστερα γίνεται;
-

Πράσινη Χημεία

Τα χημικά προϊόντα μπορούν να παρασκευαστούν με διαφορετικούς τρόπους σύνθεσης, εφαρμόζοντας τις κατάλληλες χημικών διεργασιών. Ο χημικός βιομηχανίας έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα σε ποικιλία πρώτων υλών, διαλυτών, μηχανισμών και συνθηκών αντιδράσεων. Επειδή όμως όλα αυτά αναμένεται ότι θα έχουν σημαντική επίδραση τόσο στο περιβάλλον όσο και στον άνθρωπο, θα πρέπει οι αντίστοιχες χημικές διεργασίες να είναι κατά το δυνατό απλές, ασφαλείς, υψηλής απόδοσης και εκλεκτικότητας, μη-ενεργοβόρες και να κάνουν όσο το δυνατό πληρέστερη χρήση των ανανεώσιμων και ανακυκλώσιμων χημικών αντιδραστηρίων και πρώτων υλών. Το

«κλειδί» συνήθως για μια χημική διεργασία περιβαντολογικώς αποδεκτή θεωρείται κυρίως η εφαρμογή της κατάλυσης, η οποία μπορεί να ελαττώσει τον αριθμό ατυχημάτων, την ποσότητα των χρησιμοποιούμενων χημικών και τοξικών ουσιών, των παραγομένων αποβλήτων, αλλά και την κατανάλωση ενέργειας [5]. Για να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός μπορούν να εφαρμοστούν οι βασικές αρχές της Πράσινης Χημείας, που είναι συνοπτικά [6]:

1. Η πρόληψη της ρύπανσης.
2. Οι μέθοδοι σύνθεσης, που θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι, ώστε να μεγιστοποιείται η κατανάλωση όλων των πρώτων υλών, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή ενός προϊόντος.
3. Ο περιορισμός της σύνθεσης επικίνδυνων χημικών ουσιών.
4. Ο σχεδιασμός ασφαλέστερων χημικών προϊόντων.
5. Η χρήση ασφαλέστερων διαλυτών και άλλων βοηθητικών μέσων.
6. Η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.
7. Η χρήση ανανεώσιμων πρώτων υλών.
8. Η μείωση των ενδιάμεσων παραπροϊόντων, ή των σταδίων μιας αντίδρασης.
9. Η εφαρμογή της κατάλυσης.
10. Τα χημικά προϊόντα θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι, ώστε μετά τη χρήση τους να αποικοδομούνται σε προϊόντα που δεν θα επιβαρύνουν το περιβάλλον.
11. Η προληπτική παρακολούθηση και ο έλεγχος της χημικής διεργασίας.
12. Η πρόληψη του χημικού ατυχήματος. Οι ουσίες που χρησιμοποιούνται σε μια παραγωγική διαδικασία, θα πρέπει να επιλέγονται έτσι, ώστε να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος χημικού ατυχήματος, συμπεριλαμβανομένων εκπομπών, εκρήξεων και πυρκαγιών.

Εργαλεία Εκτίμησης της Περιβαλλοντικής Απόδοσης

Στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού μιας παραγωγικής διαδικασίας υπάρχουν διαθέσιμες μόνον οι στοιχειώδεις πληροφορίες σχετικά με τις πρώτες ύλες, τα προϊόντα και τα παραπροϊόντα (ενδεχόμενα απόβλητα) και επομένως, χρειάζεται να μελετηθεί ένας μεγάλος αριθμός εναλλακτικών σχεδιασμών της διαδικασίας αυτής. Οι μέθοδοι εκτίμησης της περιβαλλοντικής απόδοσης θα πρέπει να μην είναι χρονοβόρες, να είναι σχετικά απλές και να βασίζονται στην απλούστερη από τις διαθέσιμες εναλλακτικές διαδικασίες ροής των υλικών. Τα κυριότερα κριτήρια και εργαλεία που θα μας βοηθήσουν για την επιλογή της πλέον κατάλληλης διεργασίας και για το βέλτιστο σχεδιασμό αυτής – σε συνδυασμό πάντα με τις αρχές της Πράσινης Χημείας – είναι [3]:

- *Οικονομικά κριτήρια.* Πάντοτε θα προτιμάται η διαδικασία εκείνη με την οποία το επιθυμητό προϊόν θα παρασκευάζεται με το μικρότερο δυνατό κόστος. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι το κόστος μια παραγωγικής διαδικασίας θα εξαρτάται από πολλούς επιμέρους παράγοντες, όπως π.χ. το κόστος των πρώτων υλών, το λειτουργικό κόστος των μονάδων που λαμβάνουν μέρος στη διεργασία, το κόστος διάθεσης των παραπροϊόντων και των παραγομένων αποβλήτων κλπ.
- *Περιβαλλοντικά κριτήρια.* Μια ομάδα περιβαλλοντικών κριτηρίων που μπορούν να υπολογιστούν σχετικά εύκολα, ακόμα και στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού της διαδικασίας, είναι ο χρόνος παραμονής, η βιοσυσσώρευση και η τοξικότητα των υλών εισόδου-εξόδου.

- *Παράμετροι ποιότητας και ασφάλειας (TLVs, PELs, RELs) [7].* Στους χώρους εργασίας έχουν θεσπιστεί ανώτατες επιτρεπτές συγκεντρώσεις ρύπων, στους οποίους μπορούν να εκτίθενται οι εργαζόμενοι, χωρίς κίνδυνο για την υγεία τους. Οι οριακές αυτές τιμές εκφράζονται ως «Τιμές Κατωφλίου» (Threshold Limit Values, TLVs), ως «Τιμές Μέγιστης Επιτρεπτής Έκθεσης» (Permissible Exposure Limits, PELs) και ως «Προτεινόμενες Τιμές Έκθεσης» (Recommended Exposure Limits, RELs).
- *Παράγοντες τοξικότητας.*

Εφόσον καθοριστεί η βασική δομή της παραγωγικής διαδικασίας (δηλ. τα κύρια συστατικά εισόδου-εξόδου), αναπτύσσεται στη συνέχεια ένα προκαταρκτικό διάγραμμα ροής, το οποίο θα περιέχει τις τυπικές λειτουργικές μονάδες, όπως π.χ. τους χώρους αποθήκευσης, τους αντιδραστήρες, τις συσκευές διαχωρισμού κλπ. Επίσης, θα πρέπει να περιέχει πληροφορίες όσον αφορά το μέγεθος των επιμέρους μονάδων, αλλά και την παροχή των επιμέρους ρευμάτων. Αυτό το προκαταρκτικό στάδιο σχεδιασμού θεωρείται σαν το κατάλληλο στάδιο, ώστε να μελετηθεί ξανά η σχεδιαζόμενη διαδικασία ως προς την περιβαντολογική της απόδοση.

Στο σημείο αυτό τα βασικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού είναι ήδη διαθέσιμα, όπως π.χ. τα ισοζύγια μάζας, οι μονάδες λειτουργίας, οι συνθήκες λειτουργίας κλπ. Όλες αυτές οι πληροφορίες μαζί με τις παροχές των υλικών της παραγωγικής διαδικασίας θα περιλαμβάνονται στο διάγραμμα ροής. Από το διάγραμμα ροής είναι δυνατός ο προσδιορισμός κάθε εκροής, που δε θα μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί, ή που δε θα μπορεί π.χ. να πουληθεί. Αυτές οι παροχές κατηγοριοποιούνται σαν ενδεχόμενες εκροές αποβλήτων/εκπομπών. Συχνά, με ένα διάγραμμα ροής δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν όλες οι ενδεχόμενες ανεπιθύμητες παροχές. Πηγές παροχών που προσδιορίζονται δύσκολα είναι συνήθως διαρροές, απαέρια, υπολείμματα σε δοχεία και σε δεξαμενές κλπ.

Το επόμενο στάδιο για τη διευρεύνηση της περιβαλλοντικής απόδοσης μιας παραγωγικής διαδικασίας είναι η εφαρμογή των κατάλληλων μεθόδων για τον ποσοτικό προσδιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων. Εφόσον έχει πραγματοποιηθεί η ταυτοποίηση και ο προσδιορισμός των ενδεχόμενων σημείων και πηγών απελευθέρωσης ρύπων, θα πρέπει στη συνέχεια να υπολογιστούν οι ποσότητες αυτών των ρύπων. Ο πίνακας 2 περιέχει τις κυριότερες μεθόδους, που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό κατά σειρά προτίμησης [3].

Πίνακας 2. Μέθοδοι ποσοτικού προσδιορισμού των εκπεμπόμενων ρύπων.

-
1. Απευθείας μέτρηση/υπολογισμός των χημικών ρύπων ή έμμεσος προσδιορισμός τους με τη χρήση ισοζυγίων μάζας, ή στοιχειομετρικών αναλογιών. Συνήθως αυτή η μέθοδος δεν είναι εφαρμόσιμη σε σχεδιαζόμενες διεργασίες, ενώ προτιμάται για τις ήδη εφαρμόσιμες διαδικασίες.
 2. Μέτρηση μιας (υποκατάστατης) αντιπροσωπευτικής χημικής ουσίας, η οποία θα έχει παρόμοιες ιδιότητες και συμπεριφορά με το ρύπο που μελετούμε και επιπλέον θα χρησιμοποιείται στην ίδια (ή πολύ παρόμοια) διεργασία, με αποτέλεσμα την εξαγωγή συμπερασμάτων και για τους υπό μελέτη ρύπους. Ο ποσοτικός αυτός προσδιορισμός θα μπορεί να γίνει άμεσα ή έμμεσα όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, με τη χρήση μοντέλων ή συνδυασμό των προηγούμενων.
 3. Υπολογισμός με χρήση εξισώσεων (μοντέλα):
 - i. Μαθηματικά μοντέλα μέτρησης βασισμένα σε φυσικοχημικούς νόμους (π.χ. μοντέλα μεταφοράς μάζας).
 - ii. Εμπειρικά μοντέλα μέτρησης.
-

Για ακόμη μια φορά στο στάδιο αυτό μπορεί να εξετασθεί η περιβαλλοντική απόδοση του σχεδιασμού και να επανεξετασθεί η επιλογή των διαφόρων επιμέρους λειτουργικών μονάδων, που λαμβάνουν μέρος στην παραγωγική διαδικασία, όπως π.χ. οι αντιδραστήρες, οι δεξαμενές αποθήκευσης, αλλά και η ιδιαίτερη συνδεσμολογία μεταξύ αυτών, δηλαδή οι αντίστοιχες σωληνώσεις, αντλίες, συμπιεστές κλπ.

Κριτήρια Επιλογής Υλικών και Λειτουργικών Μονάδων μιας Παραγωγικής Διαδικασίας

Σε αρκετές περιπτώσεις είναι δυνατό να συνδυαστούν το επιδιωκόμενο κέρδος με τον ορθό (περιβαλλοντικά) σχεδιασμό μιας παραγωγικής διαδικασίας. Η σωστή και μελετημένη επιλογή των πρώτων υλών, των βοηθητικών παροχών, των αντιδραστήρων, των μεθόδων διαχωρισμού, των δεξαμενών αποθήκευσης και μεταφοράς κλπ., θα έχει σαν αποτέλεσμα όχι μόνο τη μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση και επικινδυνότητα, αλλά και το υψηλότερο (προσδοκώμενο) κέρδος. Το κέρδος αυτό θα οφείλεται στη μεγαλύτερη παραγωγική ικανότητα της διαδικασίας για το επιδιωκόμενο προϊόν και στη μικρότερη δημιουργία αποβλήτων, τα οποία σε κάθε περίπτωση θα αποτελούν οικονομική επιβάρυνση για τη βιομηχανία, είτε τα επεξεργάζεται η ίδια, είτε όχι (π.χ. για την τελική διάθεσή τους, τα ενδεχόμενα πρόστιμα που θα υποστεί από την πλευρά της Πολιτείας κλπ.).

Επιλογή υλικών

Πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα μπορούν να λυθούν με τη σωστή επιλογή των απαραίτητων υλικών (π.χ. πρώτες ύλες, διαλύτες, καύσιμα, μέσα διαχωρισμού και άλλα βοηθητικά αντιδραστήρια) που θα λάβουν μέρος στην παραγωγική διαδικασία. Η χρήση υλικών που είναι γνωστά για την επικίνδυνη δράση τους στο περιβάλλον, όπως οι μεγάλοι χρόνοι διάρκειας ζωής σ' αυτό (σταθερότητα και παραμονή τους), η βιοσυσσωρευση και η τοξικότητά τους, θα πρέπει να αποφεύγεται.

Επιλογή χημικών αντιδραστήρων

Από περιβαλλοντική άποψη, οι αντιδραστήρες είναι από τις σημαντικότερες λειτουργικές μονάδες σε μια παραγωγική διαδικασία. Ο βαθμός μετατροπής της τροφοδοσίας προς το επιθυμητό προϊόν επηρεάζει όλες τις επακόλουθες διεργασίες, π.χ. διαχωρισμού, το σύστημα ανακύκλωσης, τις επιλογές επεξεργασίας των αποβλήτων, την κατανάλωση ενέργειας και τελικά την απελευθέρωση των ρύπων στο περιβάλλον. Ο ορθός περιβαλλοντικός σχεδιασμός απαιτεί:

- 1) Σωστή χρήση και επιλογή των υλικών. Στα υλικά περιλαμβάνονται τα αντιδραστήρια τροφοδοσίας, ο καταλύτης (αν χρειάζεται) και οι διαλύτες. Οι περισσότερες επιλογές μεταξύ των υλικών αυτών έχουν πραγματοποιηθεί κατά τα προηγούμενα στάδια σχεδιασμού.
- 2) Σωστή επιλογή τύπου αντιδραστήρα. Οι λεπτομέρειες του μηχανισμού μιας χημικής αντίδρασης, όπως είναι π.χ. η τάξη της αντίδρασης, αν υπάρχουν ή όχι παράλληλες αντιδράσεις και αν η αντίδραση είναι αντιστρεπτή ή μη, επηρεάζουν τη στρατηγική επιλογής του αντιδραστήρα. Αυτές οι λεπτομέρειες

θα καθορίσουν επίσης τη βέλτιστη θερμοκρασία του αντιδραστήρα, το χρόνο παραμονής και την ανάδευση.

- 3) Σωστή λειτουργία του αντιδραστήρα. Στα λειτουργικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται η θερμοκρασία αντίδρασης, ο ρυθμός ανάδευσης και η αρχική συγκέντρωση των αντιδραστηρίων, που καθορίζει το ρυθμό παραγωγής των προϊόντων και των παρα-προϊόντων.

Επιλογή μονάδων διαχωρισμού

Οι συσκευές (διατάξεις) που χρησιμοποιούνται για τους διάφορους διαχωρισμούς παίζουν ίσως το σημαντικότερο ρόλο στις χημικές διεργασίες. Επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις η τροφοδοσία είναι ένα μίγμα αντιδραστηρίων και οι αποδόσεις των αντιδράσεων δεν είναι σχεδόν ποτέ 100%, πάντοτε θα υπάρχει ανάγκη για τον ικανοποιητικό διαχωρισμό των χημικών συστατικών, ώστε να παραληφθούν τα προϊόντα καθαρά, χωρίς (κατά το δυνατό) την ύπαρξη προσμίξεων.

Καταρχήν, πρέπει να γίνεται σωστή επιλογή του μέσου διαχωρισμού. Μια λανθασμένη επιλογή θα έχει σαν αποτέλεσμα την έκθεση του εργατικού προσωπικού σε τοξικές ουσίες, ενώ και στο τελικό προϊόν θα υπάρχουν ενδεχομένως επικίνδυνα συστατικά. Το γεγονός αυτό είναι εξαιρετικά επικίνδυνο, ιδιαίτερα στην παραγωγή τροφίμων. Για παράδειγμα, η εκχύλιση των κόκκων καφέ για την παραγωγή καφέ χωρίς καφεΐνη συνήθως γινόταν μ' ένα χλωριωμένο διαλύτη [8]. Αν και αυτός ο διαλύτης ήταν αρκετά αποτελεσματικός, οι υπολειμματικές του συγκεντρώσεις στο τελικό προϊόν έθεταν σε ενδεχόμενο κίνδυνο την υγεία του καταναλωτή. Η καφεΐνη σήμερα εκχυλίζεται χρησιμοποιώντας το διοξείδιο του άνθρακα σε υπερκρίσιμη κατάσταση, του οποίου τα ενδεχόμενα υπολείμματα στο τελικό προϊόν δεν αναμένεται να θέσουν κανένα κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία.

Εκτός από την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας διαχωρισμού, η οποία θα πρέπει να οδηγεί σε διεργασίες που παράγουν μειωμένες ποσότητες αποβλήτων και κάνουν χρήση λιγότερης ενέργειας, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι παράμετροι του επόμενου πίνακα 3 [2].

Πίνακας 3. Μέτρα πρόληψης ρύπανσης στις διεργασίες διαχωρισμού.

-
1. Συνένωση παρόμοιων ρευμάτων, ώστε να ελαττωθεί ο απαιτούμενος αριθμός των μονάδων διαχωρισμού.
 2. Απομάκρυνση διαβρωτικών και ασταθών ουσιών σε πρώιμα στάδια.
 3. Διαχωρισμός αρχικά των συστατικών που υπάρχουν σε μεγάλες ποσότητες.
 4. Οι πιο δύσκολοι διαχωρισμοί να λαμβάνουν χώρα τελευταίοι.
 5. Οι διαχωρισμοί ανάκτησης κλασμάτων υψηλής καθαρότητας να γίνονται (επίσης) τελευταίοι.
 6. Χρήση μιας ακολουθίας διαχωρισμών, που θα έχει σαν αποτέλεσμα το μικρότερο αριθμό παραγομένων προϊόντων.
 7. Αποφυγή πρόσθεσης νέων συστατικών στην ακολουθία διαχωρισμού.
 8. Εάν χρησιμοποιηθεί ένα μέσο διαχωρισμού, να ανακτηθεί στο επόμενο στάδιο.
 9. Να μην χρησιμοποιηθεί ένα δεύτερο μέσο διαχωρισμού για την ανάκτηση του πρώτου.
 10. Αποφυγή δραστικών και έντονων συνθηκών λειτουργίας.
-

Επιλογή Δεξαμενών Αποθήκευσης/Μεταφοράς

Αυτές χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας και η κυριώτερη περιβαλλοντική επίδρασή τους είναι οι αέριες εκπομπές των πτητικών οργανικών ουσιών και τα στερεά ή ελαιώδη υπολείμματα συστατικών στον πυθμένα τους. Οι

αέριες εκπομπές εξαρτώνται από την τάση ατμών των αποθηκευμένων υγρών, τα χαρακτηριστικά των δεξαμενών, ενώ οι οχλήσεις τους από το σημείο, όπου βρίσκεται τοποθετημένη η δεξαμενή και τις τοπικές κλιματικές συνθήκες. Τα μέτρα μείωσης των εκπομπών αυτών έχουν να κάνουν κυρίως με το σχεδιασμό των δεξαμενών. Η καθίζηση των στερεών και η δημιουργία λάσπης στον πυθμένα μπορεί π.χ. να αποφευχθεί με τη χρήση κατάλληλων γαλακτοματοποιητών.

Πηγές Διαφυγής Ρύπων

Στις πηγές διαφυγής ουσιών περιλαμβάνονται βαλβίδες, αντλίες, σύνδεσμοι σωληνώσεων, βαλβίδες απελευθέρωσης πίεσης, συμπιεστές κλπ. Σε μια μεγάλη βιομηχανική μονάδα, όπως π.χ. σε ένα διυλιστήριο πετρελαίου, υπάρχουν χιλιάδες τέτοιες πηγές εκπομπής ρύπων και είναι φανερό ότι η συνεισφορά τους στη ρύπανση του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα της ατμόσφαιρας θα είναι πολύ μεγάλη. Υπάρχουν δύο κυρίως μέθοδοι για τη μείωση ή την πρόληψη και την αποφυγή των αέριων εκπομπών και διαρροών από τις προηγούμενες πηγές:

1. Ανίχνευση της διαρροής και επισκευή του προβληματικού εξοπλισμού (Leak Detection And Repair, LDAR) [9]. Με το πρόγραμμα LDAR, ο εξοπλισμός όπως οι αντλίες και οι βαλβίδες παρακολουθούνται περιοδικά, χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή πτητικών οργανικών ενώσεων. Αν εμφανιστεί διαρροή, αυτή καταγράφεται και εάν κριθεί επικίνδυνη (δηλ. πάνω από τα επιτρεπτά όρια που έχει θεσπίσει η αρμόδια Υπηρεσία Περιβάλλοντος), τότε θα πρέπει να επισκευάζεται αμέσως ο προβληματικός εξοπλισμός.
2. Τροποποίηση του εξοπλισμού ή αντικατάστασή του με νέες τεχνολογίες που θα περιορίζουν στο ελάχιστο τις σχετικές διαρροές (π.χ. αεροστεγείς βαλβίδες).

Ανάλυση του Διαγράμματος Ροής με σκοπό την Πρόληψη της Ρύπανσης

Η περιβαλλοντική απόδοση ενός διαγράμματος ροής εξαρτάται από την απόδοση των ξεχωριστών λειτουργικών μονάδων, που συνθέτουν όλη την παραγωγική διαδικασία, καθώς και από το επίπεδο στο οποίο έχουν δικτυωθεί και ενοποιηθεί όλα τα επιμέρους ρεύματα αυτής. Υπάρχουν διαθέσιμες αρκετές μέθοδοι ανάλυσης επικινδυνότητας διαδικασιών (Process Hazards Analysis, PHA), όπως π.χ. η HAZ-OP (Hazard and Operability Analyses), η Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), η Fault Tree Analysis κλπ. [10]. Καμία όμως από τις μεθοδολογίες αυτές δεν θεωρείται καλύτερη από τις άλλες. Συνήθως χρησιμοποιείται ο συνδυασμός αυτών με σκοπό τον προσδιορισμό κινδύνων σε μια χημική διεργασία, την ελαχιστοποίησή τους και την αλλαγή του τρόπου σκέψης των εργαζομένων σε μια χημική βιομηχανία.

Άλλες μεθοδολογίες συστηματικής μελέτης μιας χημικής διεργασίας με σκοπό την περιβαλλοντική βελτίωσή της, βασίζονται στον ιεραρχικό σχεδιασμό που έχει αναπτύξει ο Douglas (1992) [2, 11]. Τα σημαντικότερα βήματα της μεθοδολογίας αυτής παρουσιάζονται συνοπτικά στον επόμενο πίνακα 4.

Τελική Εκτίμηση της Περιβαντολογικής Απόδοσης του Διαγράμματος Ροής

Εφόσον ολοκληρωθεί το στάδιο δημιουργίας του διαγράμματος ροής και εφαρμοσθούν όλα τα μέτρα για την κατά το δυνατό πληρέστερη αξιοποίηση της ενέργειας και της

μάζας, θα πρέπει στη συνέχεια να γίνει η λεπτομερής εκτίμηση της περιβαλλοντικής επίδρασης της διεργασίας. Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της εκτίμησης αυτής θα αποτελείται από μια ομάδα περιβαλλοντικών δεικτών, που θα αντιπροσωπεύουν τις επιδράσεις και την επικινδυνότητα της διεργασίας στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Μερικοί από αυτούς τους δείκτες είναι π.χ. η ενεργότητα των ρύπων, η διάχυση των ρύπων στο περιβάλλον (ατμόσφαιρα, έδαφος, νερό), η ταχύτητα των αντιδράσεων στις οποίες λαμβάνουν μέρος (π.χ. βιοαποικοδόμηση, φωτόλυση, υδρόλυση, οξειδωση κλπ.), οι (αντίστοιχοι) δείκτες τοξικότητας, η (ενδεχόμενη) καταστροφή του όζοντος κλπ.

Πίνακας 4. Βήματα της Ιεραρχικής Ανάλυσης του Douglas.

Βήματα Σχεδιασμού	
1.	Προσδιορισμός του υλικού (π.χ. χημικής ουσίας) που πρόκειται να παρασκευαστεί.
2.	Καθορισμός του τύπου της παραγωγικής διαδικασίας (ασυνεχής ή συνεχής).
3.	Καθορισμός των εισροών και εκροών του διαγράμματος ροής.
4.	Σχεδιασμός της ανακύκλωσης.
5.	Καθορισμός του συστήματος διαχωρισμού. <ol style="list-style-type: none"> a. Γενική δομή: διαχωρισμός φάσεων. b. Σύστημα ανάκτησης ατμών. c. Σύστημα ανάκτησης υγρών. d. Σύστημα ανάκτησης στερεών.
6.	Αξιοποίηση της μάζας και της ενέργειας των ρευμάτων της διεργασίας: <ol style="list-style-type: none"> a. Ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ των θερμών και ψυχρών ρευμάτων της διεργασίας (αξιοποίηση της ενέργειας). b. Προσδιορισμός της διεργασίας ανακύκλωσης του νερού και δυνατότητες επαναχρησιμοποίησής του.

Παραδείγματα Εφαρμογής της «Πράσινης Χημικής Τεχνολογίας/Μηχανικής» στη παραγωγική διαδικασία

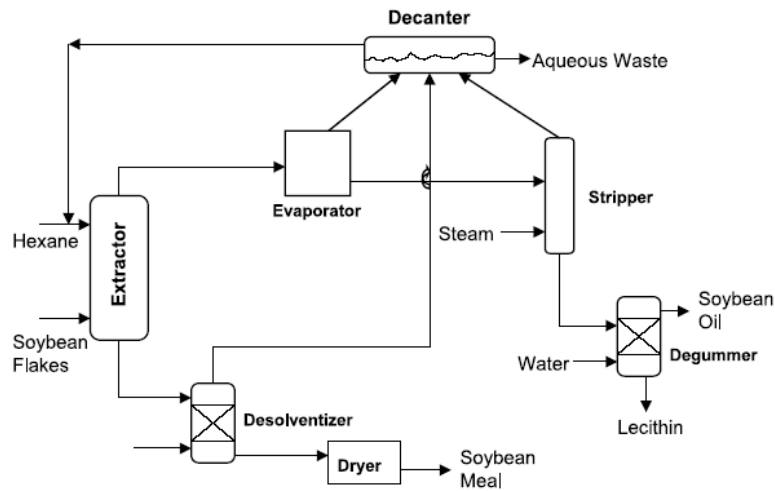
1^ο. Επιλογή χημικού αντιδραστηρίου (διαχωρισμός με εκχύλιση)

Στο παράδειγμα αυτό περιγράφεται η εκχύλιση σόγιας με σκοπό την παραγωγή σογιέλαιου. Η τυπική μέθοδος εκχύλισης που φαίνεται στο Σχήμα 1 γίνεται με τον οργανικό διαλύτη εξάνιο. Με τη νέα μέθοδο (Σχήμα 2) η εκχύλιση των κόκκων σόγιας επιτυγχάνεται με το υπερκρίσιμο CO₂, το οποίο δε δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα και κινδύνους, όπως το εξάνιο.

Τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας που χρησιμοποιεί το εξάνιο σαν εκχυλιστικό μέσο είναι:

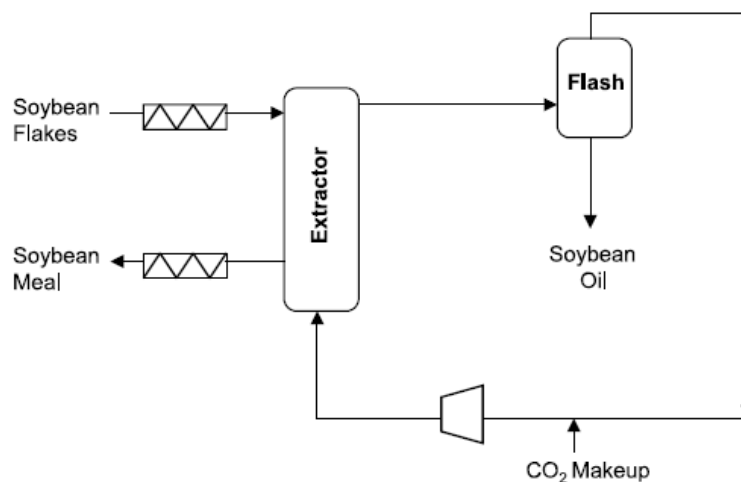
1. Αέριες εκπομπές VOC.
2. Ευφλεκτότητα του διαλύτη (στο παρελθόν έχουν γίνει αρκετές εκρήξεις σε ελαιουργικές εγκαταστάσεις σόγιας λόγω του εύφλεκτου εξανίου).
3. Το εξάνιο δεν είναι εκλεκτικό μέσο διαχωρισμού, με αποτέλεσμα να απαιτούνται αρκετά στάδια καθαρισμού στη συνέχεια για τον εξευγενισμό του ελαίου (π.χ. απομάκρυνση φωσφολιπιδίων, χρωστικών ουσιών κλπ.), που επιτυγχάνεται με την επίδραση επιπλέον μεθόδων διαχωρισμού, π.χ. προσρόφιση σε γη διατόμων.

4. Μικρές ποσότητες εξανίου καταλήγουν τελικά στα στερεά απόβλητα (π.χ. στη γη διατόμων), τα οποία τα καθιστούν εύφλεκτα.



Σχήμα 1. Συμβατική διεργασία παραγωγής σογιέλαιου με χρήση εξανίου.

Η διεργασία με το υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα είναι απλή, καθώς ο διαλύτης αυτός εκχυλίζει κυρίως το επιθυμητό έλαιο και σχεδόν καθόλου τα φωσφολιπίδια και τις χρωστικές ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους. Επομένως, ο αριθμός των σταδίων εξευγενισμού θα είναι κατά πολύ μικρότερος, όπως φαίνεται και στο σχετικό σχήμα. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η εφαρμογή εξαιρετικά υψηλών πιέσεων (της τάξεως των 700 bar) για την επίτευξη ικανοποιητικής διαλυτότητας του ελαίου στο CO₂. Παρόλα τα πλεονεκτήματα όμως της εκχύλισης με το υπερκρίσιμο CO₂, η νέα αυτή τεχνική δεν εφαρμόζεται ακόμα, εξαιτίας της χαμηλής τιμής πώλησης του προϊόντος. Θα πρέπει να βρεθούν τρόποι βελτίωσης της συμπίεσης του CO₂, ώστε να μειωθεί το κόστος της διεργασίας.



Σχήμα 2. Διεργασία παραγωγής σογιέλαιου με χρήση υπερκρίσιμου CO₂.

Συνήθως η τεχνολογία εκχύλισης με υπερκρίσιμο CO₂ δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις, όπου το προϊόν είναι η αραιωμένη εκχυλισμένη ένωση. Για παράδειγμα,

στην περίπτωση παραγωγής καφέ χωρίς καφεΐνη, η καφεΐνη εκχυλίζεται και απομακρύνεται, αλλά το προϊόν πώλησης είναι ο καφές. Η τεχνολογία αυτή βρίσκει εφαρμογή και σε περιπτώσεις, όπου η εκχυλισμένη ένωση πωλείται ακριβά.

2°. Ανακύκλωση μάζας μέσα στη βιομηχανία

Στην περίπτωση αυτή μελετάται το διάγραμμα ροής της παραγωγής του ακρυλονιτριλίου (Σχήμα 1). Το ακρυλονιτρίλιο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μπορεί να παραχθεί με την οξείδωση του προπυλενίου παρουσία αμμωνίας. Στη συνέχεια το ρεύμα του ακάθαρτου προϊόντος εισέρχεται σε ένα συμπυκνωτήρα, όπου το περισσότερο νερό απομακρύνεται. Έπειτα, το αέριο ρεύμα οδηγείται στη μονάδα καθαρισμού αερίων (scrubber), όπου το ακρυλονιτρίλιο περνά στην υγρή φάση. Το τελευταίο ρεύμα τροφοδοτείται στη μονάδα διαχωρισμού της υδατικής από την οργανική φάση (decanter), που θα περιέχει τη μεγαλύτερη ποσότητα ακρυλονιτριλίου. Τέλος η οργανική φάση μαζί με κάποια ποσότητα νερού που δε διαχωρίστηκε επαρκώς κατά την προηγούμενη διεργασία, οδηγείται στην αποστακτική στήλη. Η στήλη λειτουργεί υπό κενό και διαχωρίζει το προϊόν από τα υπόλοιπα συστατικά.

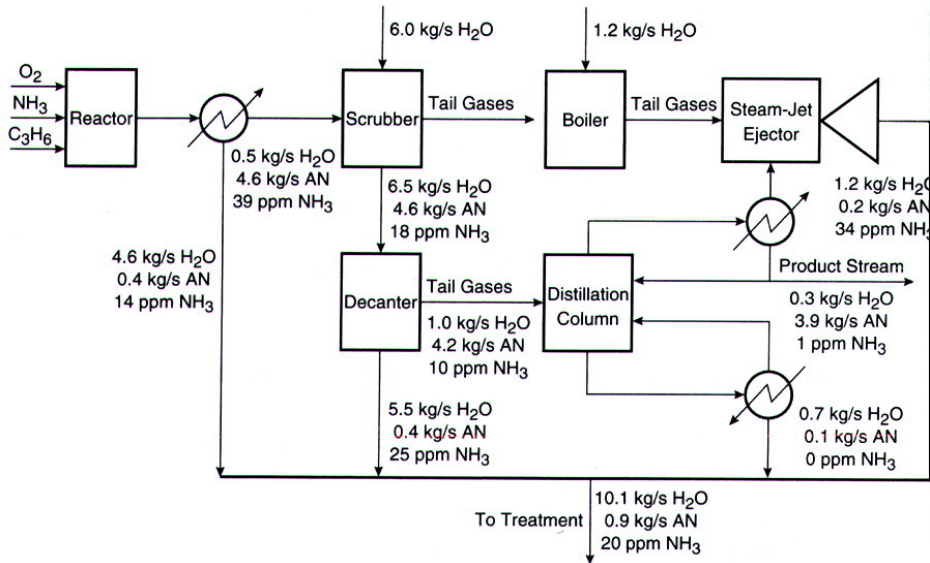
Σ' αυτό το πρόβλημα διερευνάται η δυνατότητα ανακύκλωσης του νερού και του ακρυλονιτριλίου (AN), ενώ ο κύριος ρύπος που μας ενδιαφέρει είναι η αμμωνία. Η υγρή τροφοδοσία στη μονάδα καθαρισμού αερίων πρέπει να είναι μεταξύ 5.8 και 6.2 kg/s, και μπορεί να περιέχει προσμίξεις AN και αμμωνίας, ενώ η τροφοδοσία στον ατμολέβητα θα πρέπει να είναι καθαρό νερό (1.2 kg/s). Με την εφαρμογή των αρχών της πράσινης χημικής τεχνολογίας και συγκεκριμένα της ανακύκλωσης των αξιοποιήσιμων ρευμάτων (υλικών) μέσα στη βιομηχανία, προκύπτουν τα εξής:

- 1) Όπως φαίνεται από το διάγραμμα ροής του σχήματος 1, οι πηγές αποβλήτων που περιέχουν νερό και AN είναι από το συμπυκνωτή, τη μονάδα διαχωρισμού των φάσεων (decanter), την αποστακτική στήλη και τη συσκευή κενού. Τα σημεία όπου χρειάζεται τροφοδοσία νερού είναι η μονάδα καθαρισμού των αερίων και ο ατμολέβητας (boiler).
- 2) Το ρεύμα εξόδου από τον πυθμένα της στήλης και το ρεύμα από το συμπυκνωτή μπορούν πιθανώς να ανακυκλωθούν στη μονάδα καθαρισμού αερίων. Ειδικά το πρώτο, που δεν περιέχει καθόλου αμμωνία και έχει το υψηλότερο κλάσμα μάζας σε AN, μπορεί να ανακυκλωθεί ολόκληρο.
- 3) Εφαρμόζοντας αυτές τις ανακυκλώσεις και επιλύοντας εκ νέου τα ισοζύγια μάζας, προκύπτει το νέο διάγραμμα ροής του σχήματος 2. Με το σχεδιασμό αυτό οι απαιτήσεις για καθαρό νερό στην τροφοδοσία (scrubber, boiler) ελαττώθηκαν κατά 70%, ενώ και η παροχή των αποβλήτων που στέλνονται για επεξεργασία μειώθηκε κατά 30%. Επίσης, το κλάσμα μάζας AN που διαφεύγει προς τα απόβλητα θα είναι κατά 15% μικρότερο. Σημαντικότερη όμως είναι η αύξηση της παραγωγής του AN, που σε κέρδος εκφράζεται σε 9,000,000 \$ το χρόνο.

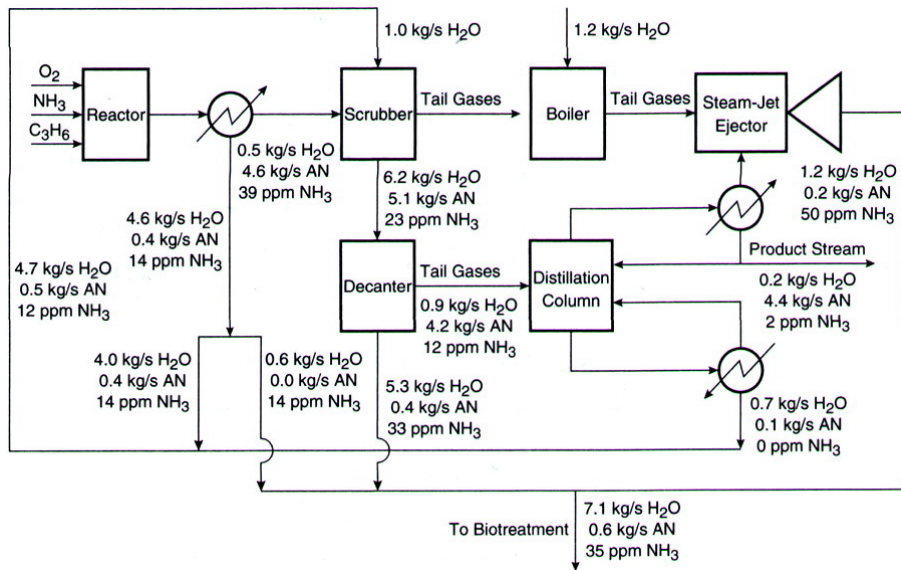
3°. Σχεδιασμός μονάδας διυλιστηρίου

Στο παράδειγμα αυτό, περιγράφεται η διεργασία παραγωγής πετρελαίου σε μια μονάδα διυλιστηρίου, εφαρμόζοντας τεχνικές περιβαντολογικής προστασίας [2, 13]. Αυτές οι τεχνικές καταδεικνύουν τη χρησιμότητα των ποιοτικών και ποσοτικών εργαλείων, που περιγράφηκαν προηγουμένως. Προτείνονται μέθοδοι πρόληψης της ρύπανσης, όπως

είναι η σωστή διαχείριση και εξοικονόμηση μάζας (πρώτων υλών) και ενέργειας, που έχουν σαν αποτέλεσμα όχι μόνο την προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και τη μείωση του κόστους της παραγωγικής διαδικασίας.



Σχήμα 3. Διάγραμμα ροής κλασικής παραγωγής AN.



Σχήμα 4. Διάγραμμα ροής παραγωγής AN μετά την ανακύκλωση των αξιοποιήσιμων ροών.

Μια από τις μεγαλύτερες μονάδες σε ένα δυλιστήριο αποτελεί η εγκατάσταση του διαχωρισμού των κλασμάτων της ακατέργαστης πρώτης ύλης (crude oil) για περαιτέρω επεξεργασία. Έστω ότι η υποθετική αυτή μονάδα επεξεργάζεται 175,000 βαρέλια ελαφρού ακατέργαστου αραβικού πετρελαίου την ημέρα. Η εγκατάσταση αυτή αποτελείται αρχικά από μια μονάδα απομάκρυνσης αλάτων και άλλων ανεπιθύμητων συστατικών του πετρελαίου (μέταλλα, αιωρούμενα στερεά), που διαβρώνουν και δηλητηριάζουν τον υπόλοιπο εξοπλισμό και τους καταλύτες αντίστοιχα, έναν πύργο

απόσταξης που λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση και μία αποστακτική στήλη κενού που επιτρέπει το διαχωρισμό των πτητικών ουσιών σε αποδεκτές (δηλ. όχι ιδιαίτερα υψηλές) θερμοκρασίες. Τα υλικά τροφοδοσίας είναι το ακατέργαστο πετρέλαιο και το νερό, ενώ παράγονται διάφορα ρεύματα που περιέχουν καύσιμο αέριο, βενζίνη, τα κλάσματα ελαφριάς νάφθας και κηροζίνης, το βαρύ απόσταγμα καυσίμου, φυσικό αέριο και στερεό υπόλειμμα.

Μερικές από τις ποιοτικές τεχνικές που εφαρμόστηκαν για την προστασία από τη ρύπανση είναι η αντικατάσταση των χρησιμοποιούμενων φλογίστρων (burners) με άλλα, που είναι ικανά να μειώσουν την παραγωγή οξειδίων του αζώτου, ενώ επιτρέπουν ταυτόχρονα την ανακυκλοφορία του καυσίμου αερίου για την καλύτερη καύση του και τη μείωση των αέριων εκπομπών με τη χρήση ειδικών αεροστεγών βαλβίδων, σωληνώσεων, συμπιεστών και αντλιών, καθώς επίσης και το διαχωρισμό των υγρών αποβλήτων με μικρό ρυπαντικό φορτίο, με σκοπό την ευκολότερη επεξεργασία τους και την επαναχρησιμοποίηση των χρήσιμων υλών τους. Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται οι συγκριτικοί υπολογισμοί των παραγόμενων αποβλήτων πριν και μετά την εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων πρόληψης της ρύπανσης στο (υποθετικό) αυτό διυλιστήριο. Αναμένεται λοιπόν μείωση των αέριων εκπομπών NO_x κατά 60% και των πτητικών οργανικών ενώσεων κατά 93%. Η ποσότητα ελαίων και γράσου στα απόβλητα μειώνεται σχεδόν στο μισό και η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών και θειούχων ενώσεων στα απόβλητα ελαττώνεται κατά 32% και 19% αντίστοιχα. Τέλος, η ποσότητα των επικίνδυνων στερεών αποβλήτων μειώνεται κατά 90%, καθώς αυτά μετατρέπονται κατά το μεγαλύτερο μέρος τους σε μη-επικίνδυνα.

4°. Παραγωγή οξικού μεθυλεστέρα

Αυτό, όπως και το επόμενο παράδειγμα, είναι παραδείγματα μείωσης της ρύπανσης στην πηγή δημιουργίας της, όπως περιγράφεται από τη U.S. E.P.A. [14]. Η παραγωγή του οξικού μεθυλεστέρα μπορεί να γίνει, είτε με την παραδοσιακή μέθοδο, είτε με τη μέθοδο της Αποσταξης με Αντίδραση (Reactive Distillation), κατά την οποία γίνεται ταυτόχρονα τόσο η αντίδραση της παραγωγής του εστέρα, όσο και ο διαχωρισμός του με απόσταξη. Τα πλεονεκτήματα της συνδυασμένης αυτής παραγωγικής διαδικασίας είναι:

- Βελτιωμένη εκλεκτικότητα:
 - Μειωμένη χρήση πρώτων υλών.
 - Λιγότερα παραπροϊόντα.
- Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας.
- Επίτευξη δύσκολων διαχωρισμών:
 - Εξάλειψη/Ελάττωση χρήσης οργανικών διαλυτών.
- Αύξηση ολικού ρυθμού ταχύτητας παραγωγής.

5°. Μείωση επικίνδυνων χημικών ουσιών στη χαρτοβιομηχανία

Για την εξάλειψη της χρήσης και της έκθεσης σε επικίνδυνες χημικές ουσίες κατά τη διαδικασία της λεύκανσης του χαρτιού μελετήθηκε μια νέα τεχνολογία, που χρησιμοποιεί ένα καινούριο χημικό προϊόν, το poly-oxometalate (POM). Με τη νέα αυτή τεχνολογία εξαλείφεται η χρήση επιβλαβών και επικίνδυνων χημικών προϊόντων (π.χ. χλώριο), ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται η υψηλή απομάκρυνση της λιγνίνης.

Πίνακας 5. Ποσότητες αέριων εκπομπών και αποβλήτων πριν και μετά τη λήψη των κατάλληλων περιβαλλοντικών μέτρων πρόληψης της ρύπανσης.

Εκπομπές/Απόβλητα	Χωρίς τη λήψη μέτρων	Μετά τη λήψη μέτρων
Αέριες εκπομπές, tons/yr		
NO _x	420	170
CO	180	170
VOCs	180	12
Αιωρούμενα σωματίδια	23	21
SO ₂	3.3	3
Απόβλητα		
Έλαια, γράσο, L/day	870	454
TSS, tons/day	5	3.4
BOD, tons/day	0.5	
COD, tons/day	2	2
Επικίνδυνα απόβλητα, tons/day		
	6.3	0.5
Μη επικίνδυνα απόβλητα, tons/day		
	κανένα	3.7

Ωστόσο, η νέα τεχνολογία απομάκρυνσης της λιγνίνης έχει υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια και ατμό, εξαιτίας της λειτουργίας του αντίστοιχου οξειδωτικού αντιδραστήρα. Συνεπώς, η επόμενη πρόκληση των τεχνικών της χημικής βιομηχανίας θα είναι η ελάττωση της θερμοκρασίας στην οποία λαμβάνει χώρα η διεργασία αυτή και η αντικατάσταση του οξειδωτικού αντιδραστήρα, ώστε να ελαττωθούν οι απαιτήσεις σε ατμό. Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται μερικά συγκριτικά στοιχεία μεταξύ των δύο μεθόδων παραγωγής.

6°. Περιορισμός της έκθεσης στη βιομηχανική όχληση από το νέφος χημικών ουσιών

Στο παράδειγμα αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να προστατευθεί η υγεία των εργαζομένων στη χημική βιομηχανία από το νέφος χημικών ουσιών με μια σχετικά απλή καινούργια τεχνική. Το νέφος είναι αιωρούμενα σταγονίδια στην

Πίνακας 6. Λεύκανση χάρτου: συγκριτικά στοιχεία μάζας (πρώτων υλών) και ενέργειας.

	Δεδομένα Ρευμάτων Παραγωγικής Διαδικασίας (m ³ /MT)						Δεδομένα Ενέργειας	
	NaOH	O ₂	H ₂ SO ₄	ClO ₂	H ₂ O ₂	POM	Ηλεκτρική Εν. (kW-hr/MT)	Ατμός (kg/MT)
POM		137				0.27	277	2858
DEop	24	5	5	18.3	6		281	1693

POM = διεργασία με poly-oxometalate (δεν χρησιμοποιεί ClO₂ ή NaOH)

DEop = παραδοσιακή μέθοδος λεύκανσης

ατμόσφαιρα, που σχηματίζονται από μηχανικές δράσεις, ή από τη συμπύκνωση των αερίων. Η έκθεση ιδιαίτερα των εργαζομένων, αλλά και των γειτονικών κατοίκων στα σταγονίδια αυτά μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υγείας, όπως π.χ. καρκίνο,

αναπνευστικά προβλήματα και αλλεργικές αντιδράσεις. Για τον περιορισμό της έκθεσης έχει εξετασθεί η προσθήκη κατάλληλων πολυμερών στα χρησιμοποιούμενα βιομηχανικά ρευστά (υδατικής ή ελαιώδους φάσης). Όσον αφορά τα ελαιώδη, πρέπει να σημειωθεί ότι ήδη εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος, ενώ για την υδατική μορφή τους η τεχνική αυτή δεν είναι προς το παρόν οικονομικά συμφέρουσα.

Η προσθήκη για παράδειγμα, 70 ppm πολυ-ισοβουτυλενίου σε ελαιώδη ρευστά έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των αιωρούμενων σταγονιδίων πάνω από το 40%. Για τον έλεγχο του σχηματισμού των αιωρούμενων σταγονιδίων και αεροζόλ από τα υδατικά ρευστά, έχει εξεταστεί η χρήση του πολυ-αυθυλενο-οξειδίου (PEO). Τα αποτελέσματα είναι ελπιδοφόρα, ωστόσο απαιτούνται σχετικά μεγάλες ποσότητες του πολυμερούς αυτού (πάνω από 500 ppm), ενώ το πολυμερές αυτό είναι σχετικά ακριβό και απαιτείται η καθημερινή αντικατάστασή του, οπότε η χρήση του είναι ακόμη περιορισμένη.

7^ο. Ανακύκλωση εκτός της βιομηχανίας

Ένα κεντρικό θέμα της Πράσινης Χημικής Τεχνολογίας/Μηχανικής είναι η ανακύκλωση των υλικών [15]. Για παράδειγμα στις Η.Π.Α. μια από τις συνέπειες της μη-πρόβλεψης για ανακύκλωση τα τελευταία χρόνια, αποτελεί η απόθεση σε χώρους χημικής ταφής των επικίνδυνων βιομηχανικών αποβλήτων (με κόστος άνω των 400 εκατομμυρίων \$) των 150 εκατομμυρίων παλαιάς τεχνολογίας ηλεκτρονικών υπολογιστών, των οποίων τα υλικά δεν μπορούν εύκολα να ανακυκλωθούν. Παρόμοια προβλήματα προκύπτουν από τις ηλεκτρικές οικιακές και άλλες συσκευές. Πρόσφατα και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκδόσει σχετική οδηγία (WEEE) για τη διαχείριση αποβλήτων ηλεκτρονικού και ηλεκτρικού εξοπλισμού. Η λύση για την ανακύκλωση μπορεί να δοθεί με τη βοήθεια της Πράσινης Χημικής Τεχνολογίας/Μηχανικής, σχεδιάζοντας «πράσινα» τα καινούρια υλικά (green design), έτσι ώστε:

- 1) Να χρησιμοποιείται ο μικρότερος αριθμός διαφορετικών τύπων υλικών (π.χ. προσπάθεια χρησιμοποίησης πλαστικού του ίδιου τύπου σε μια κατασκευή).
- 2) Να αποφεύγεται η χρήση τοξικών υλικών που εμποδίζουν τη διεργασία αποσυναρμολόγησης, την επαναχρησιμοποίηση ή/και την αποτέφρωσή τους. Εάν επιβάλλεται να χρησιμοποιηθεί κάποια τοξική ουσία, τότε να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο το προϊόν, ώστε το τοξικό συστατικό να προσδιορίζεται και να διαχωρίζεται σχετικά εύκολα από τα υπόλοιπα.
- 3) Να γίνεται ειδικός σχεδιασμός κατά την παραγωγή τους, ώστε η αποσυναρμολόγησή τους να διεκπεραιώνεται εύκολα. Ένας κακός σχεδιασμός, όπως π.χ. η επιμετάλλωση πλαστικών, δεν επιτρέπει την εύκολη και αποτελεσματική ανακύκλωσή τους.
- 4) Να γίνεται χρήση υλικών, τα οποία θα μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του ίδιου προϊόντος, π.χ. από αλουμίνιο.

Συμπεράσματα

Η χρησιμότητα των χημικο-τεχνολογικών παραγωγικών διαδικασιών στις σύγχρονες κοινωνίες είναι ανεκτίμητη, παρόλο που παράγονται εξαιτίας τους σημαντικές ποσότητες αποβλήτων. Είναι απαραίτητο επομένως, να βρεθούν αποτελεσματικά εργαλεία που θα βοηθούσαν στην ασφαλή και σχετικά οικονομική διαχείριση των

αποβλήτων αυτών. Ένα διαθέσιμο σχετικό «εργαλείο» θεωρείται η Πράσινη Τεχνολογία/Μηχανική, που βοηθάει στον οικονομικό σχεδιασμό μιας παραγωγικής διαδικασίας, στην εμπορευματοποίηση και στη χρήση παραγωγικών χημικο-τεχνολογικών διαδικασιών, οι οποίες είναι ικανές να ελαχιστοποιούν τη ρύπανση στην πηγή της και να μειώνουν τις επικίνδυνες επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου και το περιβάλλον.

Στην εργασία αυτή αναφέρθηκαν με συντομία ο σύγχρονος τρόπος αντίληψης, που θα πρέπει να έχει κάθε τεχνικός βιομηχανίας (αλλά και κάθε σύγχρονος άνθρωπος) και οι κυριότερες μεθοδολογίες ορθού περιβαλλοντικού ελέγχου και σχεδιασμού των χημικών παραγωγικών διαδικασιών. Μέσα από ορισμένα απλά παραδείγματα εφαρμογής της Πράσινης Τεχνολογίας παρουσιάστηκαν οι δυνατότητες που μπορεί να υπάρχουν σε μια βιομηχανία για την ασφαλή, οικονομική και περιβαλλοντικά αποδεκτή λειτουργία της.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν για τη βοήθειά τους στη συλλογή του πλούσιου βιβλιογραφικού υλικού τις Μεταπτυχιακές φοιτήτριες του Τμήματος Χημείας στο Εργαστήριο Γενικής & Ανόργανης Χημικής Τεχνολογίας κ.κ Χαρά Προχάσκα και Βασιλική Εμμανουήλ.

Βιβλιογραφία

1. <http://www.globalissues.org/EnvIssues/EnvIssues.asp>, [Περιγράφονται παγκόσμια προβλήματα που αφορούν το περιβάλλον και την υγεία του ανθρώπου].
2. Allen D. and Shonnard D., 2002, *Green Engineering: Environmentally Conscious Design of Chemical Processes*, Prentice-Hall, Upper Saddle River.
3. http://www.epa.gov/opptintr/greenengineering/whats_ge.html#whats_ge [Δίνεται ο ορισμός της πράσινης τεχνολογίας/μηχανικής].
4. <http://www.life-cycle.org>, [Παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος και ενδιαφέροντες σύνδεσμοι με άλλες υπηρεσίες και οργανισμούς].
5. <http://www.chembio.uoguelph.ca/preuss/Summary.ppt> [Παρουσίαση σχετική με τον περιβαλλοντικό σχεδιασμό των χημικών διεργασιών].
6. Anastas P. and Breen J., 1997, Design for the environment and Green Chemistry: the heart and soul of industrial ecology', *J. of Cleaner Production*, **5**, 97-102.
7. Κουμτζής Θ., Φυτιάνος, Κ. και Σαμαρά, Κ., 1998, *Χημεία Περιβάλλοντος*, University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
8. Brennecke J.F. and Stadtherr M.A., 2002, A Course in Environmentally Conscious Chemical Process Engineering, *Computers and Chemical Engineering*, **26**, 307-318.
9. <http://www.scdhec.net/eqc/baq/pubs/ldar9403.pdf>. [Παρέχονται γενικές οδηγίες για την εκτέλεση του προγράμματος LDAR].
10. http://www.suttonbooks.net/assets/sample_chapters/bprha_sample_chapter.pdf. [Περίληψη βιβλίου που αναφέρεται σε μεθοδολογίες ορθού περιβαλλοντικού σχεδιασμού των χημικών διεργασιών].
11. Vasbinder E., Hoo K. and Mann U., 2003, *Synthesis of Plantwide Control Structures Using a Decision-Based Methodology*, Dept. of Chemical Engineering, Texas Tech University, Lubbock. Available in: <http://www.che.ttu.edu/pcoc/pubs/pubs/descontrol/AbstChap.pdf>.
12. Brennecke J.F. and Stadtherr M.A., 2002, A Course in Environmentally Conscious Chemical Process Engineering, *Computers and Chemical Engineering*, **26**, 307-318.
13. American Petroleum Institute (API), 1993, *Environmental Design Considerations for Petroleum Refining Crude Processing Units*, Publication 311, Washington, DC.

14. http://www.epa.gov/oppt/greenengineering/case_studies.html. [Περιγράφονται μερικά παραδείγματα εφαρμογής της πράσινης τεχνολογίας/μηχανικής].
15. <http://www.grapey.com/efs/dfi.html>. [Περιέχονται πληροφορίες σχετικές με την πράσινη τεχνολογία και την ανακύκλωση].