



*Το άρθρο αυτό  
δημοσιεύτηκε στο  
πρώτο τεύχος του  
περιοδικού  
«Περιβάλλον 21»*

## **Πράσινη και Βιώσιμη Χημεία (Green and Sustainable Chemistry)**

**Κωνσταντίνος Πούλος, Καθηγητής Οργανικής Χημείας  
Τμήμα Χημείας Πανεπιστημίου Πατρών**

Η Χημεία είναι μία κεντρική και δημιουργική επιστήμη που συνδέεται με την ζωή του ανθρώπου και του πλανήτη γη και έχει προσφέρει, άμεσα ή έμμεσα, στα περισσότερα τεχνολογικά επιτεύγματα όπως:

- αντιβιοτικά, εμβόλια, εξειδικευμένα φάρμακα
- λιπάσματα, γεωργικά φάρμακα
- πλαστικά, πολυμερή
- διάφορα συνθετικά υλικά, προηγμένα ηλεκτρονικά
- καύσιμα
- καθαρισμός του νερού

και πολλά άλλα που έχουν διαμορφώσει την σημερινή ποιότητα ζωής του ανθρώπου.

Παρά τα οφέλη της κοινωνίας από τα επιτεύγματα της Χημείας και της Τεχνολογίας είναι γεγονός, που συνδέεται άμεσα με την αλόγιστη ανάπτυξη που χαρακτηρίζει τον 20<sup>ο</sup> αιώνα, ότι η βιομηχανική παραγωγή των αγαθών, οι διεργασίες που χρησιμοποιήθηκαν, η χρήση των αγαθών και η διάθεση ορισμένων χημικών ουσιών είχαν σαν αποτέλεσμα σημαντική και μετρίσιμη αρνητική επίδραση στην υγεία του ανθρώπου και το περιβάλλον.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα από την καθημερινή μας ζωή είναι το γνωστό σε όλους DDT το οποίο σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας έσωσε 500.000.000 ζωές, όμως εκατομμύρια τόνοι διοχετεύθηκαν στο περιβάλλον με δυσμενείς επιδράσεις σ' αυτό και τον άνθρωπο.

Τόσο στην παραπάνω περίπτωση αλλά και σε κάθε περίπτωση εφαρμογής και χρήσης χημικών ουσιών για τη βελτίωση της Ποιότητας Ζωής, η επιστημονική κοινότητα

προειδοποιεί την Κοινωνία για τις άμεσες και μελλοντικές επιπτώσεις των χημικών και τεχνολογικών επιτευγμάτων αλλά συνήθως δεν εισακούεται.

Η Χημεία προστατεύει τον άνθρωπο και το περιβάλλον διότι:

- είναι σε θέση να δείξει και να προβλέψει αν οι ανθρώπινες αποφάσεις και δραστηριότητες θα ρυπάνουν ή όχι το περιβάλλον, αρκεί βέβαια να ερωτηθεί!
- Η Χημεία εξ ορισμού ασχολείται με τις μετατροπές της ύλης. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση των ρυπογόνων ουσιών.

Παρά τις προειδοποιήσεις της Χημείας και των άλλων Επιστημών η διοχέτευση ρυπογόνων ουσιών στο περιβάλλον συνεχίζεται. **Ποιος είναι όμως υπεύθυνος γι' αυτή τη κατάσταση;** Υπεύθυνος είναι ο άνθρωπος ο οποίος χρησιμοποίησε τα επιτεύγματα της Χημείας και των άλλων επιστημών χωρίς αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων έναντι των κινδύνων για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Πρέπει λοιπόν άνθρωπος πρέπει να συνειδητοποιήσει ότι:

- Η επιστήμη είναι ανεξάρτητη
- Ανθρώπινες αποφάσεις και δραστηριότητες είναι υπεύθυνες τόσο για τα ευεργετήματα όσο και τους κινδύνους που συνδέονται με τη Χημεία.
- Ο άνθρωπος είναι ο ρυθμιστής της ισορροπίας των τριών βασικών παραγόντων της ποιότητας ζωής **Υγεία-Περιβάλλον-Τροφή**.

Ευτυχώς όμως η Κοινωνία ευαισθητοποιείται και αυτό φαίνεται από τις Διεθνείς Διασκέψεις για το Περιβάλλον και την τύχη του πλανήτη Γη με αποκορύφωμα την Διάσκεψη του Ρίο η οποία έθεσε τις αρχές της Βιωσιμότητας. Από όλες τις διασκέψεις που έχουν γίνει μέχρι σήμερα προκύπτει καθαρά ποια είναι η κατάσταση του πλανήτη και τι πρέπει να κάνουμε ώστε **εμείς, οι απόγονοί μας και οι επόμενες γενεές να έχουν την ίδια ή και καλύτερη ποιότητα ζωής**. Επίσης στις παραπάνω διασκέψεις φάνηκαν οι διαθέσεις που έχουν οι «ισχυροί» του πλανήτη για την επίτευξη των στόχων της Βιώσιμης ανάπτυξης η οποία στηρίζεται σε τρεις πυλώνες **Κοινωνία, Περιβάλλον και Οικονομία**.

Κατά καιρούς μέσα στον 20<sup>ο</sup> αιώνα έχουν αναφερθεί τα παρακάτω γεγονότα:

- Η χημεία και τα χημικά προϊόντα είναι η βάση της οικονομίας κάθε βιομηχανοποιημένης χώρας.
- Η κοινωνία μας είναι και θα είναι εξαρτημένη από τη Χημεία.
- Η παρασκευή, κατεργασία, χρήση και διάθεση ορισμένων χημικών ουσιών έχουν σαν αποτέλεσμα σημαντική και μετρήσιμη βλάβη στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

- Τον προηγούμενο αιώνα έχουν διατεθεί τρισεκατομμύρια ευρώ για προστασία του περιβάλλοντος.

Την τελευταία δεκαετία του 20<sup>ου</sup> αιώνα τα παραπάνω γεγονότα έρχονται στο προσκήνιο για να αντιμετωπισθούν με βάση της αρχές της Βιώσιμης Ανάπτυξης. Διαπιστώνεται λοιπόν ότι:

- Τα δύο πρώτα θα συνεχίσουν να υπάρχουν και μάλιστα θα πρέπει να είναι βιώσιμα.
- Τα δύο άλλα, που είναι συνέπεια του πρώτου, δεν χαρακτηρίζουν την βιωσιμότητα και θα πρέπει να εξαλειφθούν

Η λύση αυτών κατά τρόπο Βιώσιμο έρχεται από τη Χημεία και ονομάζεται **Πράσινη Χημεία**. Η **Πράσινη Χημεία (Green Chemistry)** είναι μία νέα φιλοσοφία της Χημείας με βασική αρχή τη πρόληψη της ρύπανσης του περιβάλλοντος:

**«Είναι καλύτερα να προλαμβάνουμε τη δημιουργία αποβλήτων και τοξικών ουσιών παρά να θεραπεύουμε εκ των υστέρων.»**

Η Πράσινη Χημεία (Green Chemistry) εμφανίστηκε δυναμικά στον επιστημονικό χώρο στις αρχές της τελευταίας δεκαετίας του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Ονομάζεται και Βιώσιμη Χημεία (Sustainable Chemistry) έχει όμως επικρατήσει ο όρος Πράσινη Χημεία που πρωτοεισήχθηκε από τον Paul Anastas και ο οποίος έχει δώσει τον παρακάτω ορισμό.

*« Πράσινη Χημεία είναι η χρησιμοποίηση ενός συνόλου αρχών με την εφαρμογή των οποίων μειώνεται ή εξαλείφεται η χρήση ή η δημιουργία επικίνδυνων ουσιών στις διεργασίες σχεδιασμού, παραγωγής και εφαρμογής των χημικών προϊόντων»*

**Στόχοι της Πράσινης Χημείας:** είναι η μείωση επικίνδυνων ουσιών που σχετίζονται με προϊόντα και διεργασίες που είναι απαραίτητα όχι μόνο για την διατήρηση της Ποιότητας Ζωής που έχει πετύχει η κοινωνία μέσω της Χημείας αλλά και η περαιτέρω προώθηση τα τεχνολογικών επιτευγμάτων της Χημείας κατά τρόπο βιώσιμο.

Η επίτευξη των στόχων της Πράσινης Χημείας βασίζεται στις 12 παρακάτω αρχές:

1. **Πρόληψη:** Είναι προτιμότερο να προλαμβάνουμε τα απόβλητα από το να κατεργαζόμαστε ή να καθαρίζουμε τα απόβλητα αφού σχηματιστούν.
2. **Οικονομία Ατόμων:** Οι μέθοδοι σύνθεσης πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε όλα τα άτομα των αντιδρώντων ή όσον το δυνατόν περισσότερα να συμμετέχουν στο τελικό προϊόν.

3. **Λιγότερο επικίνδυνες χημικές συνθέσεις:** Σχεδιασμός συνθετικών μεθόδων ώστε να χρησιμοποιούν και να δημιουργούν ουσίες που έχουν ελάχιστη ή καθόλου τοξικότητα στον άνθρωπο και το περιβάλλον.
4. **Σχεδιασμός ασφαλέστερων χημικών προϊόντων:** Τα χημικά προϊόντα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να είναι αποτελεσματικά για τον σκοπό που σχεδιάστηκαν με ελαχιστοποίηση της τοξικότητάς των.
5. **Ασφαλέστεροι διαλύτες και βοηθητικά μέσα:** Η χρήση διαλυτών να αποφεύγεται ή όπου χρησιμοποιούνται να είναι αβλαβείς.
6. **Σχεδιασμός για ενεργειακή αποτελεσματικότητα:** Μείωση της απαιτούμενης ενέργειας στις διάφορες χημικές διεργασίες και όπου είναι δυνατόν συνθέσεις να γίνονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ατμοσφαιρική πίεση.
7. **Χρήση ανανεώσιμων πρώτων υλών:** Οι πρώτες ύλες πρέπει να είναι ανανεώσιμες.
8. **Μείωση ενδιάμεσων παραγώγων:** Μη απαραίτητα παράγωγά όπως προστατευτικές ομάδες, προστασία αποπροστασία, προσωρινές τροποποιήσεις φυσικών και/ή χημικών διεργασιών πρέπει να ελαχιστοποιηθούν ή να αποφεύγονται διότι τα στάδια αυτά απαιτούν επιπλέον αντιδραστήρια και δημιουργούν απόβλητα.
9. **Κατάλυση:** Καταλυτικά αντιδραστήρια, κατά το δυνατόν εκλεκτικά, υπερέχουν των αντιδραστηρίων που επιβάλλει η στοιχειομετρία της αντίδρασης.
10. **Σχεδιασμός αποικοδομήσιμων προϊόντων:** Προϊόντα που αποικοδομούνται στο περιβάλλον προς μη τοξικά προϊόντα και δεν διατηρούνται ανέπαφα για μεγάλο χρονικό διάστημα.
11. **Ανάλυση πραγματικού χρόνου για πρόληψη της ρύπανσης:** Ανάπτυξη μεθόδων ανάλυσης πραγματικού χρόνου που θα επιτρέπουν τον έλεγχο των διεργασιών όσον αφορά το σχηματισμό επικίνδυνων ουσιών
12. **Ασφαλέστερη χημεία για την πρόληψη ατυχημάτων:** Οι χρησιμοποιούμενες και παραγόμενες ουσίες σε μία χημική διεργασία πρέπει να επιλέγονται έτσι ώστε να υπάρχει ελάχιστη πιθανότητα χημικών ατυχημάτων συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών, των εκρήξεων και της ανάφλεξης.

Βασικά ερωτήματα που εγείρονται είναι τρία:

- Γιατί η Πράσινη Χημεία εμφανίζεται τώρα ενώ οι επιδράσεις των Χημικών προϊόντων στο περιβάλλον και στο άνθρωπο είναι γνωστές εδώ και πολλά χρόνια;
- Πως θα υλοποιηθούν οι στόχοι της Πράσινης Χημείας;
- Μπορούν να εφαρμοστούν από τη βιομηχανία;

**Γιατί η Πράσινη Χημεία εμφανίζεται τώρα ενώ οι επιδράσεις των Χημικών προϊόντων στο περιβάλλον και στο άνθρωπο είναι γνωστές εδώ και πολλά χρόνια;**

Βασικοί λόγοι που απαντούν στο παραπάνω ερώτημα είναι:

- *Σήμερα οι χημικοί έχουν την γνώση ώστε να σχεδιάζουν χημικές ενώσεις και χημικές παραγωγικές διεργασίες οι οποίες είναι λίγο ή καθόλου επικίνδυνες στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον ως αποτέλεσμα της συνεχώς αυξανόμενης ικανότητα των χημικών να διαχειρίζονται εκλεκτικά και επιτυχώς τις χημικές ενώσεις σε μοριακό επίπεδο και να δημιουργούν τις κατάλληλες μη-τοξικές ενώσεις που χρειαζόμαστε.*
- *Γνωρίζουν και διαχειρίζονται την τοξικότητα ως αποτέλεσμα της νέας γνώσης για το τι είναι επικίνδυνο και τι ακίνδυνο.*
- *Το συνεχώς αυξανόμενο υψηλό κόστος της χρήσης και διάθεσης επικίνδυνων ουσιών.*

**Πως θα υλοποιηθούν οι στόχοι της Πράσινης Χημείας;**

Η Πράσινη Χημεία δημιουργεί καινοτομίες τις οποίες πρέπει να εκμεταλλευθεί η Πράσινη Χημική Τεχνολογία δίνοντας έξυπνες λύσεις τις οποίες θα υιοθετήσει η βιομηχανία για την παραγωγή χημικών προϊόντων με *Καθαρή Τεχνολογία* που σημαίνει μείωση της ρύπανσης, αύξηση της ασφάλειας και αποδοχή από την κοινωνία.

Η Πράσινη Χημεία χαρακτηρίζεται από **πολυεπιστημικότητα** και η πραγματοποίηση των στόχων της απαιτεί την συνεργασία μιας πολυεπιστημονικής ομάδας (Χημικοί, Χημικοί-Μηχανικοί, Βιολόγοι, Φυσικοί, Περιβαντολόγοι, Μηχανικοί, Οικονομολόγοι κ.ά.) η οποία θα στηριχθεί από την Πολιτεία, την Βιομηχανία και την Κοινωνία γενικότερα.

**Μπορούν να εφαρμοστούν από τη βιομηχανία;**

Η Πράσινη Χημεία είναι ελκυστική στην βιομηχανία για τρεις βασικούς λόγους:

- Μειώνει τα απόβλητα
- Δίνει μη-τοξικά παραπροϊόντα
- Μειώνει το κόστος

Η Χημική Βιομηχανία στην Ευρωπαϊκή Ένωση και τις Η.Π.Α. έχει υιοθετήσει την μεθοδολογία της Πράσινης Χημείας, την έχει εντάξει στην Έρευνα και Ανάπτυξη και σήμερα παράγονται «πράσινα» προϊόντα με μεγάλη ετήσια παραγωγή.

### **Βιομηχανικές εφαρμογές Πράσινης Χημείας.**

Ο μέσος όρος ζωής του ανθρώπου στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα ήταν 45 έτη σήμερα ο μέσος όρος ζωής είναι 80 έτη ένα γεγονός στο οποίο η συμβολή της χημείας είναι τεράστια συμμετέχοντας με το σχεδιασμό και τη σύνθεση φαρμάκων. Η βιομηχανία των φαρμάκων μπορεί να θεωρηθεί από τις πλέον ρυπογόνες καθόσον για κάθε χιλιόγραμμο παραγόμενου φαρμάκου παράγονται από 50-250 χιλιόγραμμο αποβλήτων έτσι η Πράσινη Χημεία ήταν και είναι μία πρόκληση για τη φαρμακοβιομηχανία. Το 1992 η BHC παρασκευάζει το **Ibuprofen (Advil, Nurofen κ.ά. )** με βάση τις αρχές της Πράσινης Χημείας μειώνοντας τα απόβλητα κατά 94% σε σχέση με τη προηγούμενη μέθοδο παραγωγής από την εταιρία BOOTS. Το φάρμακο για τη κατάθλιψη **Sertraline (Zoloft)**, επανασχεδιάζοντας τη σύνθεσή του σύμφωνα με τις αρχές της Πράσινης Χημείας, παράγεται με εξοικονόμηση 140 τόνων/έτος  $TiCl_4$ , 150 τόνων/έτος διαλύματος 50% υδροξειδίου του νατρίου και ταυτόχρονα μειώνονται τα απόβλητα διαλύματος 35% υδροχλωρικού οξέος κατά 150 τόνους/έτος και του οξειδίου του τιτανίου κατά 440 τόνους/έτος.

Οι διαλύτες είναι το βασικό συστατικό μιας χημικής αντίδρασης, χρησιμοποιείται σε πολλή μεγάλη αναλογία σε σχέση με τα αντιδρώντα, σε όλα τα στάδια της παραγωγής και μετά το πέρας της αντίδρασης απομακρύνονται και αποτελούν τον κύριο όγκο των αποβλήτων τα οποία συνήθως είναι τοξικά. Η Πράσινη Χημεία προτείνει και χρησιμοποιεί **«Αντιδράσεις χωρίς διαλύτη ή διαλύτες που είναι μη-τοξικοί και επαναχρησιμοποιούνται όπως το νερό, υπερκρίσιμοι διαλύτες, ιονικοί διαλύτες κ.α.»**. Για παράδειγμα, *οι πτητικοί οργανικοί διαλύτες (VOC), χλωριωμένοι διαλύτες, CFC, HCFC αντικαθίστανται από το «υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα»*, το οποίο ανακυκλώνεται και επαναχρησιμοποιείται, σε εφαρμογές όπως το **οικολογικό στεγνό καθάρισμα, καθαρισμός μετάλλων, καθαριστικό στη βιομηχανία ημιαγωγών, στην εκχύλιση φυσικών προϊόντων (καφές χωρίς καφεΐνη, μπαχαρικά και γενικά παραλαβή φυσικών προϊόντων), διογκωτικό του πολυστυρολίου, χρωματογραφία στήλης για λήψη φαρμάκων υψηλής καθαρότητας στη φαρμακοβιομηχανία.**

Η Πράσινη Χημεία προτείνει και αντικαθιστά στοιχειομετρικές αντιδράσεις με καταλυτικές με αποτέλεσμα τη μείωση των αποβλήτων και τη χρήση ενδιάμεσων τοξικών αντιδραστηρίων. Εδώ μπορούμε να αναφέρουμε τη **καταλυτική καύση του φυσικού αερίου** η οποία παράγει οξείδια του αζώτου λιγότερα από 1ppm (όριο 10ppm) ενώ η μη καταλυτική καύση παράγει 150-250ppm. Η **υδροκινόνη** (καλλυντικά, φωτογραφία, αντιοξειδωτικό) με ετήσια παραγωγή 50.000 τόνων παρασκευάζεται σε ένα στάδιο με καταλύτη Ζεόλιθο και ένα πράσινο οξειδωτικό το **υπεροξείδιο του υδρογόνου** και τα απόβλητα μειώνονται κατά 96%.

**Καταλύτες** μετατροπής των αερίων καύσης των αυτοκινήτων. Παραγωγή **βιοκαυσίμων (αιθανόλη)**, το **αδιπικό οξύ** (βασική πρώτη ύλη για πλαστικά και νάυλον με ετήσια παραγωγή 5.000.000 τόνοι) παράγεται με βιοκατάλυση από τη γλυκόζη της βιομάζας (ανανεώσιμη πρώτη ύλη). Η Πράσινη Χημεία εξοικονομεί ενέργεια με επανασχεδιασμό αντιδράσεων, με τη ανάπτυξη κατάλληλων **υλικών για φωτοβολταϊκά στοιχεία** που μειώνουν το κόστος της μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, με την ανάπτυξη κατάλληλων πολυμερών για τις μεμβράνες **κελιών υδρογόνου**. Νέα λιπάσματα χωρίς επιπτώσεις στο περιβάλλον και φυτοφάρμακα νέας γενιάς «φιλικών στο περιβάλλον».