



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ: «ΧΗΜΙΚΗ ΚΑΙ ΒΙΟΜΟΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΟΛΥΒΙΝΥΛΟΧΛΩΡΙΔΙΟΥ ΚΑΙ ΠΟΛΥΕΘΥΛΕΝΙΟΥ
ΜΕΣΩ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΩΝ (IR) ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΥΓΡΗ
ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (HPLC) ΚΑΙ ΦΑΣΜΑΤΟΜΕΤΡΙΑ
ΜΑΖΑΣ (MS)»**

Καραγιάννη Γεωργία

Επιβλέπων Καθηγητής: Λαμπροπούλου Δήμητρα

ΑΘΗΝΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2025

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους καθηγητές μου κ. Λαμπροπούλου Δήμητρα και κ.Τσιαφούλη Κωνσταντίνο για την πολύτιμη βοήθειά του και την καθοδήγησή τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους στάθηκαν δίπλα μου, Λουκά,Μαρκέλλα,Άννα,που με στήριξαν και με στηρίζουν σε κάθε φάση της ζωής μου. Και τέλος στους γονείς μου Ελένη και Ευάγγελο που δεν παύουν να πιστεύουν σε μένα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία επικεντρώνεται στον χαρακτηρισμό του πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) και του πολυαιθυλενίου (PE) μέσω προηγμένων τεχνικών ανάλυσης, όπως η φασματοσκοπία υπερύθρου (IR), η υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC) και η φασματομετρία μάζας (MS). Οι τεχνικές αυτές προσφέρουν ακριβή δεδομένα για τη μοριακή δομή και τη χημική σύσταση των πολυμερών, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων τους και τη μελέτη της υποβάθμισης τους. Έμφαση δίνεται επίσης στη χρήση των πολυμερών σε πράσινες τεχνολογίες και κυκλικές οικονομίες, όπως η ανακύκλωση και οι εφαρμογές σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Οι τεχνικές IR, HPLC και MS αναδεικνύονται ως κρίσιμα εργαλεία για την κατανόηση της ποιότητας και της σταθερότητας των πολυμερών κατά τη διάρκεια της ανακύκλωσης. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στις διαδικασίες ανάλυσης ενισχύει την αποδοτικότητα και την ακρίβεια. Η μελέτη καταλήγει σε συγκεκριμένες προτάσεις για τη βιώσιμη χρήση των πολυμερών, όπως η ανάπτυξη βιοδιασπώμενων υλικών και η προώθηση καινοτόμων πρακτικών ανακύκλωσης.

Η ανάλυση των νανοδομών και των πολυμερικών σύνθετων υλικών μέσω συνδυαστικών τεχνικών επιτρέπει τη δημιουργία προηγμένων λύσεων για εφαρμογές αιχμής. Οι τεχνολογικές εξελίξεις συμβάλλουν στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των πολυμερών, υποστηρίζοντας την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την καινοτομία.

Συνολικά, η εργασία υπογραμμίζει τη σημασία της επιστημονικής έρευνας για την ενίσχυση της βιωσιμότητας των πολυμερών και την εφαρμογή τους σε τομείς αιχμής, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη θεώρηση των προκλήσεων και των προοπτικών του κλάδου.

ABSTRACT

This study focuses on the characterization of polyvinyl chloride (PVC) and polyethylene (PE) using advanced analytical techniques such as Infrared Spectroscopy (IR), High-Performance Liquid Chromatography (HPLC), and Mass Spectrometry (MS). These methods provide precise insights into the molecular structure and chemical composition of polymers, facilitating their optimization and the study of their degradation. The research also highlights the role of polymers in green technologies and circular economies, including recycling practices and applications in renewable energy systems.

IR, HPLC, and MS techniques emerge as vital tools for understanding the quality and stability of polymers during recycling processes. Additionally, the integration of artificial intelligence into analytical workflows enhances efficiency and accuracy. The study proposes actionable recommendations for the sustainable utilization of polymers, including the development of biodegradable materials and innovative recycling practices.

The analysis of nanostructures and polymer composites using combined techniques enables the development of advanced solutions for cutting-edge applications. Technological advancements contribute to reducing the environmental footprint of polymers, fostering sustainability and innovation.

Overall, this research underscores the importance of scientific investigation in promoting polymer sustainability and their application in high-tech sectors, providing a comprehensive perspective on the challenges and opportunities in the field.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	10
2.1 Πολυβινυλοχλωρίδιο (Polyvinylchloride, PVC).....	10
2.1.1 Ιδιότητες PVC.....	10
2.1.2 Εφαρμογές.....	12
2.1.3 Περιβαλλοντική επικινδυνότητα.....	14
2.2 Πολυαιθυλένιο (Polyethylene-PE).....	16
2.2.1 Ιδιότητες πολυαιθυλενίου.....	17
2.2.2 Εφαρμογές πολυαιθυλενίου.....	17
2.2.3 Περιβαλλοντική επικινδυνότητα.....	19
2.3 Πολυμερή σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	20
2.4 Πολυμερή και Τεχνολογίες Δέσμευσης Διοξειδίου του Άνθρακα (CO ₂).....	23
2.5 Πολυμερή και Κυκλική Οικονομία.....	29
2.6 Συμβολή των Πολυμερών στη Μείωση του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος.....	32
2.7 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις και Ανακύκλωση Πολυμερών.....	34
2.8 Σύγκριση PVC και PE: Πλεονεκτήματα, περιορισμοί και εφαρμογές.....	39
2.9 Εφαρμογές Πολυμερών σε Βιομηχανίες.....	41
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	43
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.2 Φασματοσκοπία Υπερύθρου (IR).....	44
3.2.1 Αρχή Λειτουργίας.....	45
3.2.2 Μέθοδοι προετοιμασίας δειγμάτων.....	47
3.2.3 Κατηγορίες φασματοφωτομέτρων.....	48
3.2.4 Εφαρμογές φασματοσκοπίας IR.....	50

3.2.5 Χαρακτηρισμός του PVC.....	52
3.2.6 Χαρακτηρισμός του PE.....	52
3.3 Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC).....	53
3.3.1 Αρχή λειτουργίας.....	54
3.3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	57
3.3.3 Χαρακτηρισμός πολυμερών PE και PVC	59
3.4 Φασματομετρία Μάζας (MS).....	62
3.4.1 Αρχή λειτουργίας.....	62
3.4.2 Χαρακτηρισμός των PE και PVC	68
3.4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	69
3.5 Προετοιμασία Δειγμάτων και Πειραματική Διαδικασία	73
3.6 Σύγκριση Τεχνικών Ανάλυσης.....	75
3.7 Μελέτη Υποβάθμισης και Γήρανσης Πολυμερών.....	78
3.7.1 Χαρακτηρισμός του PVC μετά τη θερμική αποικοδόμηση.....	81
3.7.2 Χαρακτηρισμός του PE μετά τη θερμική αποικοδόμηση.....	88
3.8 Καινοτομίες και Μελλοντικές Προοπτικές.....	95
4. ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΕΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ....	97
4.1 Νέες Τεχνολογίες για την Ανάλυση Πολυμερών.....	97
4.2 Ρόλος της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) στην Ανάλυση	99
4.3 Υλικά Νέας Γενιάς.....	102
4.4 Εφαρμογές Εξαιρετικά Ακριβών Τεχνικών	105
4.5 Μελλοντικές Προοπτικές.....	108
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	110
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	116

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πολυμερή αποτελούν έναν από τους βασικούς πυλώνες της σύγχρονης τεχνολογίας και βιομηχανίας, καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές που εκτείνονται από την καθημερινή ζωή μέχρι και τις πλέον εξειδικευμένες τεχνολογικές εφαρμογές. Η σχεδόν ατελείωτη ποικιλία ιδιοτήτων που μπορεί να επιτευχθεί, σε συνδυασμό με την έτοιμη μεγάλης κλίμακας παραγωγή τους από άφθονο ορυκτό έλαιο, κατέστησαν τα πολυμερή βασικό βιομηχανικό προϊόν από τη δεκαετία του 1950, βάση της σημερινής ποιότητας ζωής και μοχλό της παγκόσμιας οικονομικής ευημερίας. Τα πολυμερή συνδυάζουν την οικονομική αποδοτικότητα στην παραγωγή με την ευκολία επεξεργασίας, μια σειρά ευεργετικών ιδιοτήτων και τη μακροζωία.(vonVacanoetal., 2023)

Μεταξύ αυτών, το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυαιθυλένιο (PE) κατέχουν κεντρική θέση λόγω της ευρείας διαθεσιμότητας, του χαμηλού κόστους παραγωγής και της δυνατότητάς τους να προσαρμόζονται σε ποικίλες χρήσεις (Khakberdievetal., 2022). Το PVC χρησιμοποιείται κυρίως σε κατασκευές, σωληνώσεις, δάπεδα και ηλεκτρικά καλώδια, ενώ το PE είναι εξίσου διαδεδομένο σε εφαρμογές συσκευασίας, σωληνώσεων, ηλεκτρικών καλωδίων, και αγροτικών μεμβρανών. Η ανάγκη για ακριβή χαρακτηρισμό αυτών των υλικών είναι κρίσιμη, καθώς συνδέεται τόσο με την ποιότητα του προϊόντος όσο και με τις επιπτώσεις που μπορεί να έχουν τα υπολείμματα και τα απόβλητά τους στο περιβάλλον.

Η κατανόηση της δομής και της σύστασης των πολυμερών είναι ουσιώδης για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων τους και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής τους. Οι μέθοδοι χαρακτηρισμού διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον εντοπισμό ακαθαρσιών, στην ανίχνευση υπολειμμάτων πρώτων υλών και στη μελέτη της υποβάθμισης των υλικών αυτών κατά τη διάρκεια της χρήσης ή της έκθεσής τους σε περιβαλλοντικούς παράγοντες (KollárandZsoldos, 2012). Ο συνδυασμός διαφορετικών τεχνικών ανάλυσης επιτρέπει την πολυδιάστατη προσέγγιση του θέματος, εξασφαλίζοντας υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία στα αποτελέσματα.

Η φασματοσκοπία υπέρυθρων (InfraredSpectroscopy, IR) αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους για την ανάλυση της μοριακής δομής των πολυμερών. Η αρχή της βασίζεται στην απορρόφηση υπέρυθρου φωτός από τα μόρια, το οποίο προκαλεί δονήσεις στις χημικές δεσμεύσεις τους. Τα φάσματα που προκύπτουν παρέχουν πληροφορίες για

τις λειτουργικές ομάδες, την ταυτότητα των χημικών δεσμών και τη γενική σύσταση των πολυμερών. Στον τομέα της ανάλυσης πολυμερών, η IR προσφέρει ταχύτητα, απλότητα και ελάχιστη ανάγκη προετοιμασίας του δείγματος, ενώ συνδυάζεται ιδανικά με άλλες τεχνικές για πληρέστερη εικόνα.

Η Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (High-Performance Liquid Chromatography, HPLC) αποτελεί μια ακόμα καθοριστική τεχνολογία στην ανάλυση πολυμερών, ιδιαίτερα όσον αφορά την ταυτοποίηση και τον διαχωρισμό συστατικών που σχετίζονται με μονομερή, πρόσθετα ή προϊόντα υποβάθμισης. Η μέθοδος αυτή προσφέρει υψηλή ακρίβεια και ικανότητα ποσοτικοποίησης, ενώ συχνά ενσωματώνεται με άλλες τεχνικές για την ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων. Η χρήση HPLC-MS, δηλαδή ο συνδυασμός της HPLC με φασματομετρία μάζας (Mass Spectrometry, MS), επιτρέπει την ταυτόχρονη ποιοτική και ποσοτική ανάλυση πολυμερών, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τη μοριακή μάζα, την κατανομή μάζας και τις χημικές δομές των συστατικών του δείγματος.

Η φασματομετρία μάζας (MS) αποτελεί μια πρωτοποριακή μέθοδο για την ανάλυση πολυμερών, προσφέροντας εξαιρετική ευαισθησία και ακρίβεια στην ανίχνευση και την ταυτοποίηση ενώσεων σε επίπεδο ιχνοστοιχείων. Η αρχή της βασίζεται στον ιονισμό των μορίων και την ανίχνευση των ιόντων που παράγονται, γεγονός που επιτρέπει την καταγραφή μοριακών βαρών, την ανάλυση χημικών δομών και τη μελέτη δυναμικών αντιδράσεων. Σε συνδυασμό με την HPLC, η MS επιτρέπει την ανίχνευση και την ανάλυση σύνθετων μειγμάτων πολυμερών, προσφέροντας ολοκληρωμένη κατανόηση της σύστασής τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στον χαρακτηρισμό του πολυβινυλοχλωριδίου και του πολυαιθυλενίου, δύο πολυμερών με ευρύτατες βιομηχανικές εφαρμογές. Μέσω του συνδυασμού των τεχνικών φασματοσκοπία υπερύθρου (IR), υγρής χρωματογραφίας υψηλής απόδοσης (HPLC) και φασματομετρίας μάζας (MS), στοχεύουμε να αναδείξουμε τα πλεονεκτήματα της συνδυαστικής προσέγγισης στην ανάλυση πολυμερών. Η έρευνα επιδιώκει να καλύψει ένα ευρύ φάσμα θεμάτων, όπως ο ακριβής χαρακτηρισμός των υλικών, η ανίχνευση προσθέτων και υπολειμμάτων, καθώς και η κατανόηση της συμπεριφοράς τους υπό διαφορετικές συνθήκες.

Οι ερευνητικοί στόχοι της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνουν:

1. Την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου ανάλυσης για τα πολυμερή με τη χρήση IR, HPLC και MS.
2. Την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας κάθε τεχνικής μεμονωμένα αλλά και σε συνδυασμό.
3. Την ανάλυση της σύνθεσης, της καθαρότητας και της υποβάθμισης των πολυμερών υπό διαφορετικές συνθήκες.
4. Την ενίσχυση της κατανόησης της συμπεριφοράς των πολυμερών αυτών σε περιβαλλοντικές συνθήκες.

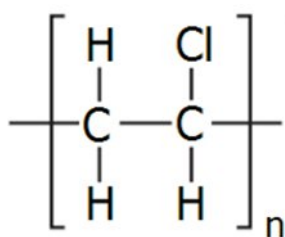
Η συστηματική μελέτη και ανάλυση που προτείνεται στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας συμβάλλει σημαντικά στην επιστημονική κατανόηση της δομής και της σύστασης των πολυμερών, ενώ προσφέρει νέες δυνατότητες για τη βιομηχανία και την περιβαλλοντική προστασία. Με τη χρήση προηγμένων τεχνικών και τη συνδυαστική προσέγγιση, η έρευνα επιδιώκει να προσφέρει νέα δεδομένα και εργαλεία για την αποτελεσματικότερη χρήση, ανακύκλωση και διαχείριση των πολυμερών υλικών.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Πολυβινυλοχλωρίδιο (Polyvinylchloride, PVC)

Το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) είναι το τρίτο κατά σειρά πολυμερές με τη μεγαλύτερη παγκόσμια παραγωγή μετά από το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο. Είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές, το οποίο αποτελείται από μακρομοριακές αλυσίδες βασισμένες στο μονομερές βινυλοχλωρίδιο (C_2H_3Cl). Ο πολυμερισμός του πραγματοποιείται μέσω του μηχανισμού ελεύθερων ριζών συνήθως με την τεχνική του γαλακτώματος και του αιωρήματος, σε θερμοκρασία από 40-80 °C, πιέσεις 8-12 atm και διάρκεια 3-10 ώρες. Κατά το τέλος της διαδικασίας και την παραγωγή του τελικού πολυμερούς απαιτείται ειδική κατεργασία αυτού, συνήθως με θέρμανση και απογύμνωση με ατμό καθώς υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές που αφορούν την ποσότητα του εναπομείναντος μονομερούς στο τελικό προϊόν λόγω της επικινδυνότητάς του (Αχιλιάς & Παπαγεωργίου, 2023).

Η χημική του δομή, $[-CH_2-CHCl-]_n$, (Εικόνα 1) καθιστά το PVC ένα πολυμερές με εξαιρετική ανθεκτικότητα στις χημικές ουσίες και στη φωτιά, ευκολία στη μεταποίηση και προσαρμοστικότητα στις ανάγκες διαφορετικών κλάδων. Οι δεσμοί C-Cl εντός της δομής του παρέχουν σημαντική σταθερότητα, αν και ταυτόχρονα συνεισφέρουν στις περιβαλλοντικές προκλήσεις που συνδέονται με την αποδόμηση του υλικού.



Εικόνα 1: Χημική δομή της επαναλαμβανόμενης δομικής μονάδας του PVC.

Παρόλα αυτά, το PVC μπορεί να υποστεί αποδόμηση υπό υψηλές θερμοκρασίες ή παρατεταμένη έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία, διαδικασία που μπορεί να οδηγήσει στην απελευθέρωση τοξικών ουσιών, όπως υδροχλωρίου (HCl).

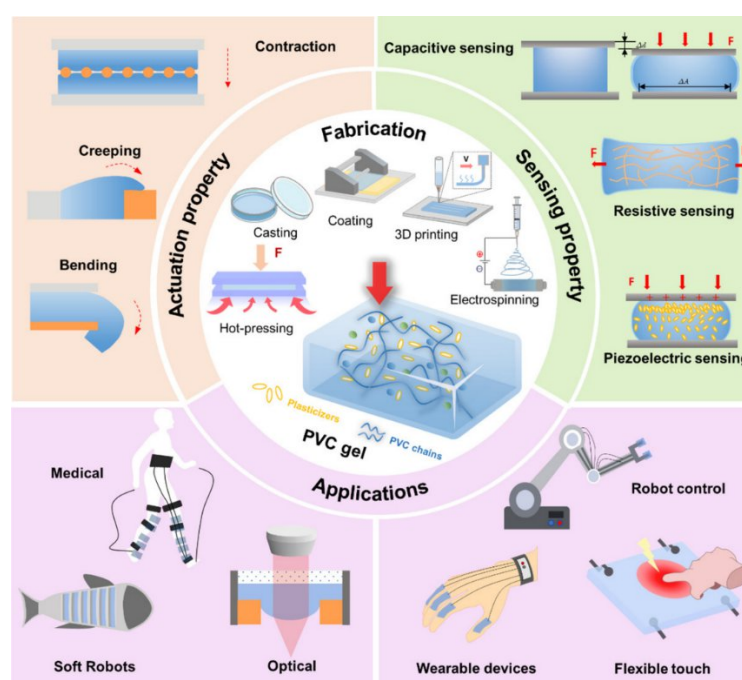
2.1.1 Ιδιότητες PVC

Το PVC αποτελεί ένα υδρόφοβο πολυμερές, με εξαιρετική αντοχή στα αραιά και πυκνά διαλύματα οξέων και βάσεων, στις αλκοόλες, τους αλειφατικούς υδρογονάνθρακες και στα ορυκτέλαια, ενώ προσβάλλεται σε μικρό βαθμό από φυτικά έλαια και οξειδωτικά μέσα. Εμφανίζει περιορισμένη αντοχή σε αλδεΐδες, εστέρες, αρωματικούς και αλογονωμένους υδρογονάνθρακες και σε κετόνες και είναι μετρίως ανθεκτικό στην υγρασία (Αχιλιάς & Παπαγεωργίου, 2023).

Διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες: το άκαμπτο (rigid) και το εύκαμπτο (flexible). Το άκαμπτο PVC είναι σκληρό, με αντοχή στην τριβή και δύσκαμπτο πολυμερές με χαρακτηριστικό μέτρο ελαστικότητας γύρω στα 2,5 GPa, και χαρακτηριστική αντοχή στην κρούση. Το εύκαμπτο PVC προκύπτει από την προσθήκη πλαστικοποιητών (μέχρι και 50%) και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη ευκαμψία. Με την προσθήκη των συμβατοποιητών αρκετά μεγέθη μεταβάλλονται, μεταξύ των οποίων η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και η πυκνότητα, οι οποίες μειώνονται. Οι πλαστικοποιητές που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι οι φθαλικοί εστέρες, ενώσεις οι οποίες τελευταία έχουν απαγορευθεί ειδικά σε ό,τι έχει να κάνει με προϊόντα που τα χρησιμοποιούν παιδιά. Τέλος, η προσθήκη των συμβατοποιητών συμβάλλει στην αύξηση της θερμικής του σταθερότητας.

Παρουσιάζει υψηλή ανθεκτικότητα στην υγρασία, τις χημικές ουσίες, και τη φωτοαποικοδόμηση, γεγονός που του επιτρέπει να διατηρεί την απόδοσή του σε περιβάλλοντα με αυξημένες απαιτήσεις. Παράλληλα, είναι ικανοποιητικά σταθερό ως προς την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ δεν χρησιμοποιείται σε θερμοκρασίες μικρότερες των -25°C και μεγαλύτερες των 70°C . Ως θερμοπλαστικό έχει εγγενή μόνωση που βοηθά στην αντοχή στις εσωτερικές αλλαγές θερμοκρασίας, ενώ εμφανίζει εγγενώς ανώτερες ιδιότητες επιβράδυνσης φλόγας λόγω της περιεκτικότητάς του σε χλώριο. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία ανάφλεξης του πολυμερούς είναι υψηλή (455°C) και η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την καύση είναι πολύ χαμηλότερη από τις θερμοκρασίες που απελευθερώνουν το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο, με συνέπεια να συμβάλει πολύ λιγότερο στην εξάπλωση φωτιάς. Σχετικά με τις ηλεκτρικές του ιδιότητες, αποτελεί ένα πολυμερές με καλές ιδιότητες μόνωσης, ενώ είναι σημαντικό

να σημειωθεί ότι παρόλο που στις περισσότερες περιπτώσεις το εμπορικό πολυμερές είναι συνήθως ατακτικό, υπάρχει δυνατότητα να περιέχει στο μόριο του συνδυαστικές ακολουθίες. Αυτές δίνουν τη δυνατότητα ανάπτυξης μέχρι και 10% ποσοστό κρυσταλλικότητας γεγονός το οποίο αυξάνει την αντοχή του κατά τη μορφοποίηση σε κατάσταση τήγματος καθώς οι κρυσταλλικές περιοχές τήκονται περίπου στους 250°C(Αχιλιάς& Παπαγεωργίου, 2023).



Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση μερικών ιδιοτήτων και εφαρμογών του PVC(Lietal., 2025).

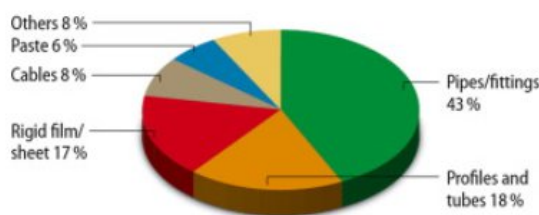
2.1.2 Εφαρμογές

Το πολυβινυλοχλωρίδιο κυκλοφορεί στο εμπόριο ως μια λευκή σκόνη η οποία είναι αδιάλυτη στο νερό αλλά μπορεί να διαλυθεί σε τετραϋδροφουράνιο και κυκλοεξανόνη. Το μοριακό του βάρος βρίσκεται στην περιοχή 10.000-100.00Da(Αχιλιάς& Παπαγεωργίου, 2023).Το PVC χρησιμοποιείται σε ευρύ φάσμα βιομηχανικών και καταναλωτικών εφαρμογών, καθιστώντας το ένα από τα πλέον πολυδιάστατα υλικά. Το άκαμπτο PVCαξιοποιείται κυρίως σε σωληνώσεις, κατασκευές και συσκευές αποθήκευσης, ενώ το εύκαμπτο σε καλώδια, δάπεδα, μεμβράνες, εύκαμπτους σωλήνες

και συσκευασίες. Ως υλικό μέσης σκληρότητας εντοπίζεται σε πλακάκια δαπέδου, σωληνώσεις, στεγανοποιητικά ελαστικά στα αυτοκίνητα κ.α.

Ανά κλάδο εφαρμογών, το PVC εντοπίζεται κυρίως στους παρακάτω τομείς:

- Κατασκευές και Υποδομές: Το άκαμπτο PVC χρησιμοποιείται ευρέως σε σωληνώσεις νερού και αποχέτευσης, προφίλ παραθύρων και πορτών, πλακίδια δαπέδων και οροφής, καθώς και σε μονώσεις καλωδίων. Η ανθεκτικότητα του PVC στη διάβρωση και στις μηχανικές καταπονήσεις το καθιστά ιδανικό υλικό για υποδομές μεγάλης διάρκειας ζωής.
- Ιατρικές Εφαρμογές: Το PVC είναι απαραίτητο σε ιατρικές εφαρμογές, όπως σωληνίσκους, σακούλες αίματος, πλαστικά δοχεία, γάντια και εξοπλισμό μιας χρήσης. Η ευκολία καθαρισμού και η δυνατότητα αποστείρωσης το καθιστούν εξαιρετικά χρήσιμο σε κλινικές εφαρμογές.
- Ηλεκτρονική και Ηλεκτρική Βιομηχανία: Χρησιμοποιείται σε καλώδια, μονώσεις, μανδύες και συσκευές αν και οι τοξικοί ατμοί που εκλύονται σε περιπτώσεις υπερθέρμανσης αποτελούν ένα σημαντικό μειονέκτημα.
- Συσκευασία και Εμπορικά Προϊόντα: Το εύκαμπτο PVC είναι βασικό υλικό στις συσκευασίες τροφίμων, στις σακούλες και στα προϊόντα επίπλωσης. Η πολυπλοκότητα και η προσαρμοστικότητα του PVC έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων παραλλαγών του υλικού, με στόχο την κάλυψη ακόμα πιο εξειδικευμένων αναγκών. Παράλληλα, η συνεχής έρευνα για τη βελτίωση της αντοχής, της ευκαμψίας και της ανακυκλωσιμότητάς του παραμένει στο επίκεντρο της επιστημονικής κοινότητας.
- Είδη ένδυσης: ποδιές, τζάκετ, αδιάβροχα και άνορακ, γαλότσες, τσάντες και σακίδια.
- Συγκοινωνίες - αυτοκίνητα: σήματα τροχαίας, κώνοι ρύθμισης κυκλοφορίας, στεγανωτικά ελαστικά πλαίσια των παραθύρων.



Εικόνα 3: Τα ποσοστά εφαρμογής του PVC παγκοσμίως (Yu et al., 2016).

2.1.3 Περιβαλλοντική επικινδυνότητα

Παρά τις πλεονεκτικές του ιδιότητες, το PVC αποτελεί αντικείμενο έντονης επιστημονικής και περιβαλλοντικής μελέτης, κυρίως λόγω των περιβαλλοντικών και υγειονομικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την παραγωγή, χρήση και διάθεσή του.

Αρχικά, κατά την παραγωγή του PVC, απελευθερώνονται επικίνδυνα χημικά, όπως το μονομερές βινυλοχλωρίδιο, το οποίο είναι καρκινογόνο. Επίσης, η διαδικασία παραγωγής του PVC απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας, με αποτέλεσμα υψηλό αποτύπωμα άνθρακα.

Κατά τη διάρκεια της χρήσης του, το PVC μπορεί να απελευθερώνει πλαστικοποιητές, σταθεροποιητές και άλλα πρόσθετα, τα οποία είναι δυνητικά τοξικά για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Για παράδειγμα, η φθορά των σωλήνων από PVC μπορεί να επέλθει από ατμούς διαφόρων χημικών αντιδραστηρίων ενώ παράλληλα υπάρχει απώλεια του πλαστικοποιητή που έχει χρησιμοποιηθεί το οποίο οδηγεί στη μείωση της ευκαμψίας των αντικειμένων. Επιπλέον, η διαδικασία αποδόμησης του PVC μπορεί να παράγει επικίνδυνα χημικά, όπως διοξίνες, που είναι εξαιρετικά τοξικές και έχουν μακροχρόνια επίδραση στην οικολογία. Παρά τη χημική του σταθερότητα και τον μεγάλο χρόνο χρήσιμης ζωής των διάφορων προϊόντων του (10 έως 100 χρόνια), όταν το πολυμερές υπόκειται σε θέρμανση ή παραμένει στο ηλιακό φως και στο ατμοσφαιρικό οξυγόνο αποσυντίθεται. Κατά τη διαδικασία της αποσύνθεσης το PVC χάνει μικρό αριθμό μορίων υδροχλωρικού οξέος απορροφά το φως και το χρώμα του μεταβάλλεται σε πορτοκαλί ή υποκίτρινο. Ανάμεσα όμως σε όλα αυτά το σοβαρότερο ίσως πρόβλημα είναι η απελευθέρωση HCl η οποία είναι βλαβερή για τον ανθρώπινο οργανισμό, το περιβάλλον και μπορεί να διαβρώσει το μεταλλικό εξοπλισμό (Αχιλιάς & Παπαγεωργίου, 2023).

Παράλληλα, στον τομέα της διαχείρισης αποβλήτων και της ανακύκλωσης το PVC είναι ένα από τα πιο δύσκολα στην ανακύκλωση πολυμερή. Οι ιδιότητές του καθιστούν τη διαχείριση των αποβλήτων του προκλητική, ενώ η αποτέφρωση του υλικού οδηγεί σε παραγωγή τοξικών αερίων (Czarnecka-Komorowska et al., 2021). Αν και η ανακύκλωση του PVC έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, παραμένει ένα σύνθετο

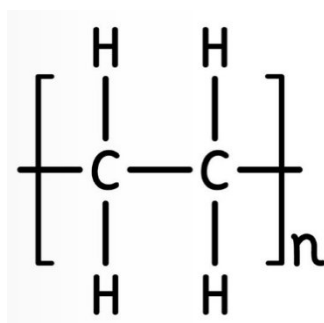
πρόβλημα. Επιπλέον, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της συσσώρευσης στο περιβάλλον, περιλαμβάνουν μακροχρόνια προβλήματα, όπως ρύπανση υδάτων και εδάφους, αλλά και τη δημιουργία μικροπλαστικών, προερχόμενων από την αποικοδόμησή του η οποία επηρεάζει αρνητικά τους θαλάσσιους και χερσαίους οργανισμούς.

Η αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του PVC απαιτεί μια πολυδιάστατη προσέγγιση. Η έρευνα και ανάπτυξη βιοαποικοδομήσιμων εναλλακτικών υλικών αποτελεί μια κατεύθυνση που εξετάζεται ευρέως. Παράλληλα, η εφαρμογή τεχνολογιών καθαρής παραγωγής μπορεί να μειώσει τις εκπομπές ρύπων κατά τη διαδικασία κατασκευής του PVC. Η προώθηση πολιτικών ανακύκλωσης, η ανάπτυξη νέων μεθόδων επεξεργασίας αποβλήτων και η ευαισθητοποίηση της βιομηχανίας και του κοινού για τις περιβαλλοντικές προκλήσεις αποτελούν κρίσιμα βήματα προς τη βιωσιμότητα. Επιπλέον, η χρήση μη τοξικών πλαστικοποιητών και σταθεροποιητών στη σύνθεση του PVC μπορεί να μειώσει τις περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις.

Το PVC είναι ένα εξαιρετικά ευέλικτο και ανθεκτικό πολυμερές με κρίσιμο ρόλο σε διάφορους βιομηχανικούς κλάδους. Παρά τις ευεργετικές του ιδιότητες, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες που σχετίζονται με την παραγωγή, χρήση και διάθεσή του απαιτούν συνεχή επιστημονική και βιομηχανική προσοχή. Η κατανόηση της συμπεριφοράς του PVC και η ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών για την παραγωγή και ανακύκλωσή του αποτελούν βασικές προκλήσεις για την επιστημονική κοινότητα, οι οποίες, εάν αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά, μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να διασφαλίσουν τη μακροπρόθεσμη χρήση του ως υλικό υψηλής σημασίας.

2.2 Πολυαιθυλένιο (Polyethylene-PE)

Το πολυαιθυλένιο (PE) είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που αποτελείται από επαναλαμβανόμενες μονάδες αιθυλενίου (C_2H_4) και κατέχει τον μεγαλύτερο όγκο παραγωγής παγκοσμίως. Η δομή του είναι γραμμική ή διακλαδισμένη, ανάλογα με τον τύπο του PE, όπως το χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (LDPE) ή το υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE). Υπάρχει επίσης η κατηγορία πολυαιθυλενίου που είναι γραμμικό με μικρούς κλάδους στις πολυμερικές του αλυσίδες και ονομάζεται «γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας» (LinearLowDensityPolyEthylene (LLDPE)). Όταν το μοριακό βάρος του παραγόμενου HDPE πάρει τιμές 200.000- 500.000, τότε μιλάμε για μια ομάδα μέσα στην οικογένεια των πολυαιθυλενίων γνωστών ως «υψηλού μοριακού βάρους-υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο» (highmolecularweight-highdensitypolyethylene, HMW-HDPE). Μια άλλη κατηγορία PE, το υπερυψηλού μοριακού βάρους PE (ultrahighmolecularweightpolyethylene) UHMW-PE διαθέτει πολυμερικές αλυσίδες με 10-20 φορές μεγαλύτερες από αυτές του HDPE. Υπάρχει επίσης το γραμμικό πολυαιθυλένιο πολύ χαμηλής πυκνότητας Verylowdensitypolyethylene (VLD-PE) ή Ultralowdensitypolyethylene (ULD-PE).



Εικόνα 4: Χημικός τύπος της επαναλαμβανόμενης ομάδας του πολυαιθυλενίου.

Για τον πολυμερισμό του μονομερούς αιθυλενίου υπάρχει δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί μηχανισμοί και τεχνικές, γεγονός το οποίο προκαλεί διαφορές στην τοποθέτηση των μακρομοριακών αλυσίδων και στην διαμόρφωσή τους στο χώρο και άλλα παραγωγή διαφορετικών πολυαιθυλενίων. (Αχιλιάς& Παπαγεωργίου, 2023)

2.2.1 Ιδιότητες πολυαιθυλενίου

Το PE είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στη χημική διάβρωση, έχει υψηλή μηχανική αντοχή και καλή θερμική σταθερότητα, καθιστώντας το κατάλληλο για πολλές εφαρμογές (Adams&Baker, 2021). Η κρυσταλλικότητα του PE επηρεάζει τις ιδιότητές του. Ως κρυσταλλικότητα αναφέρεται στον βαθμό στον οποίο οι πολυμερείς αλυσίδες του υλικού σχηματίζουν τακτική και οργανωμένη διάταξη (κρυσταλλική δομή) μέσα στο υλικό. Το HDPE είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές μη πολικό, υψηλώς κρυσταλλικό, γαλακτώδες στην εμφάνιση με εξαιρετική αντοχή στα χημικά αντιδραστήρια. Διαθέτει υψηλότερη κρυσταλλικότητα και μεγαλύτερη αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις, ενώ το LDPE είναι πιο εύκαμπτο λόγω της διακλαδισμένης του δομής. Τα μακρομόρια του LDPE με τις μικρές και μεγάλες διακλαδώσεις συσσωματώνονται και εμφανίζονται πιο συμπαγή σε σχέση με εκείνα των γραμμικών πολυαιθυλενίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υλικό να ρέει ευκολότερα όταν λιώσει ενώ σε στερεά κατάσταση το LDPE είναι μαλακό με κηρώδη εμφάνιση που μπορεί να χαραχθεί με μαχαίρι ή ακόμη και με το νύχι. Το LDPE κατεργάζεται εύκολα, θερμοσυγκολλάται, είναι χημικώς αδρανές, αντέχει στην κρούση και έχει εξαιρετικές ηλεκτρομονωτικές ιδιότητες. Έχει χαμηλή διαπερατότητα στους υδρατμούς ενώ αντιθέτως μεγάλη στα αέρια. Το UHMW-PE θερμαίνεται πάνω από το σημείο τήξης γίνεται διαυγές, δηλαδή τήκεται, αλλά το υλικό δεν ρέει, άρα δεν μορφοποιείται με τις συνθήκες διεργασίας μορφοποίησης όπως εξώθηση, έγχυση κ.ά.

2.2.2 Εφαρμογές πολυαιθυλενίου

Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία πρόκειται να αξιοποιηθεί, διατίθεται στο εμπόριο με μια μεγάλη ποικιλία τύπων με διαφορετικές ιδιότητες. Η αδιαπερατότητα του PE στο νερό και σε πολλούς χημικούς διαλύτες το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές συσκευασίας και προστασίας (Brown&Clark, 2022). Όπως μεμβράνες περιτύλιξης διαφόρων προϊόντων συσκευασμένων σε παλέτες, σακούλες απορριμμάτων, συσκευασίας λαχανικών κ.ά. Στον τομέα των κατασκευών, το PE χρησιμοποιείται για μονώσεις καλωδίων και σωληνώσεων, καθώς και για υλικά επικάλυψης (Evans& Green, 2023).

Από το HDPE παράγονται τα παντός είδους δοχεία για απορρυπαντικά, ορυκτέλαια και άλλα χημικά, σωλήνες και διάφορα profiles, μεγάλα δοχεία, περιέκτες, ακόμη και βαρέλια. Συνήθως το μοριακό βάρος του HDPE κυμαίνεται από 40.000-200.000. Το HMW-HDPE κυρίως χρησιμοποιείται σε σωλήνες υψηλής πίεσης. Οι πολύ μακριές αλυσίδες δίνουν ιδιαίτερες ιδιότητες στο πολυμερικό αυτό υλικό όπως μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, αντοχή στην τριβή κ.ά. Σήμερα διατίθεται στην αγορά UHMW-PE με μοριακό βάρος από 3.000.000 – 6.000.000. Βρίσκει εφαρμογή σε διάφορα μηχανολογικά εξαρτήματα καθώς επίσης σε σχοινιά για σκάφη και ενισχυτικό πρόσθετο σε σύνθετα υλικά.

Το LDPE δεν ενδείκνυται για συσκευασία ευπαθών τροφίμων στο οξυγόνο. Είναι κατάλληλο για τον σχηματισμό πολυστρωματικών υλικών επειδή συνδυάζεται άριστα με υλικά όπως χαρτί, αλουμινόχαρτο και άλλα πολυμερή. Οι εφαρμογές και χρήσεις του LDPE είναι πολύ μεγάλες, με πιο δημοφιλή αυτή στις πλαστικές σακούλες. Μια άλλη σημαντική εφαρμογή του είναι η επικάλυψη καλωδίων εξαιτίας της άριστης ηλεκτρομονωτικής ιδιότητάς του. Χρησιμοποιείται επίσης σε εξωθημένα φιλμ (το 55% της συνολικής παραγωγής μετατρέπεται σε φιλμ). Οι τομείς στους οποίους χρησιμοποιείται ευρέως το LDPE είναι στη βιομηχανία συσκευασίας, σε σωλήνες και εξαρτήματα, σε καταναλωτικά αγαθά και στις καλωδιώσεις. Κάποια προϊόντα που παράγονται είναι: δίσκοι και δοχεία γενικού σκοπού, δοχεία αποθήκευσης τροφίμων και δοχεία εργαστηρίου, πώματα, ανθεκτικές στη διάβρωση επιφάνειες εργασίας, εξαρτήματα που μπορούν να συγκολληθούν και να επεξεργαστούν, πολύ μαλακά και εύκαμπτα εξαρτήματα, σωλήνες νερού, εξαρτήματα υπολογιστών, όπως σκληροί δίσκοι, κάρτες οθόνης και μονάδες δίσκου, τσουλήθρες παιδικής χαράς και διάφορα εύκαμπτα παιδικά παιχνίδια, πλαστικές σακούλες και πλαστικά περιτυλίγματα, πλαστικά κάλυψης θερμοκηπίων (Αχιλιάς & Παπαγεωργίου, 2023).

Το VLD-PE Παρουσιάζει την ευκαμψία που έχουν άλλα πολυμερή με χαμηλή αντοχή (π.χ. πλαστικοποιημένο PVC), αλλά και την αντοχή που παρουσιάζει το LLD-PE. Η χαμηλή κρυσταλλικότητά του το κάνει τόσο μαλακό όσο είναι το EVA που περιέχει 4-18% οξικό βινυλεστέρα, για αυτό οι διάφοροι τύποι του χαρακτηρίζονται ως: “flexomers”. Βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς όπως συσκευασία κρέατος, πουλερικών, φαρμακευτικών σκευασμάτων, μηχανολογικές μεμβράνες, ενώ αναφέρεται η ανάμειξή του με το πολυπροπυλένιο και το νάιλον για την αύξηση της αντοχής τους στην

κρούση. Ακόμη παράγονται ορισμένοι σωλήνες και φιαλίδια που κατά τη χρήση τους απαιτείται πίεση και παραμόρφωσή τους.

2.2.3 Περιβαλλοντική επικινδυνότητα

Παρά τη χρησιμότητά του, το PE παρουσιάζει προκλήσεις που σχετίζονται με την αντοχή του στη διάσπαση και την αργή του βιοαποικοδόμηση, καθώς απαιτεί χιλιάδες χρόνια για να βιοδιασπαστεί, γεγονός που επιδεινώνει το πρόβλημα της συσσώρευσης αποβλήτων (Taylor&White, 2023). Αυτές οι ιδιότητες το καθιστούν έναν από τους βασικούς παράγοντες της πλαστικής ρύπανσης. Παράλληλα, η μαζική παραγωγή και κατανάλωση PE έχει οδηγήσει σε σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η ρύπανση των θαλασσών και των οικοσυστημάτων από πλαστικά απόβλητα.

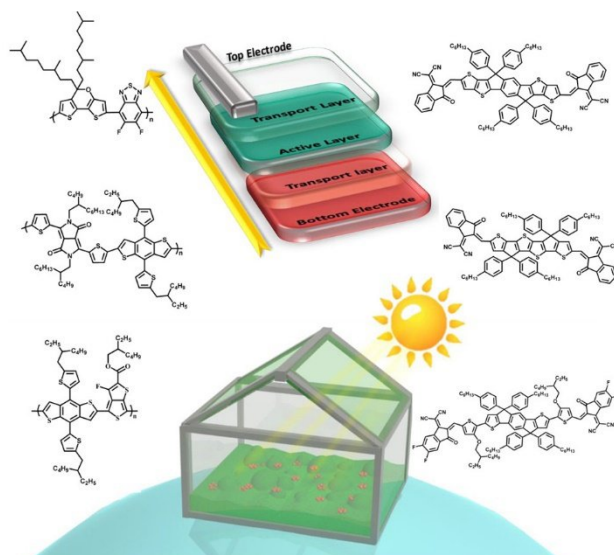
Οι βιομηχανίες προσπαθούν να αντιμετωπίσουν αυτό το ζήτημα μέσω της ανάπτυξης πιο φιλικών προς το περιβάλλον παραλλαγών του PE, όπως το πράσινο πολυαιθυλένιο, το οποίο προέρχεται από βιολογικές πηγές (Johnson & Lee, 2022). Επιπλέον, η ανακύκλωση του PE προσφέρει μια βιώσιμη λύση για τη μείωση της πλαστικής ρύπανσης. Για παράδειγμα, η μηχανική ανακύκλωση, όπου το PE λιώνει και αναμορφώνεται, είναι η πιο κοινή μέθοδος. Ωστόσο, η ποιότητα του ανακυκλωμένου υλικού συχνά υποβαθμίζεται. Η χημική ανακύκλωση, που διασπά το PE σε μονομερή ή άλλα χρήσιμα προϊόντα, παρέχει καλύτερη ποιότητα, αλλά είναι πιο ενεργοβόρα (Wilson&Carter, 2021).

Η έρευνα εστιάζει επίσης στη χρήση βιοδιασπώμενων πολυμερών ως εναλλακτική λύση στο παραδοσιακό PE. Αυτά τα υλικά, αν και δεν έχουν πλήρως αντικαταστήσει το PE, μειώνουν σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα και την κυκλική οικονομία.

2.3 Πολυμερή σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

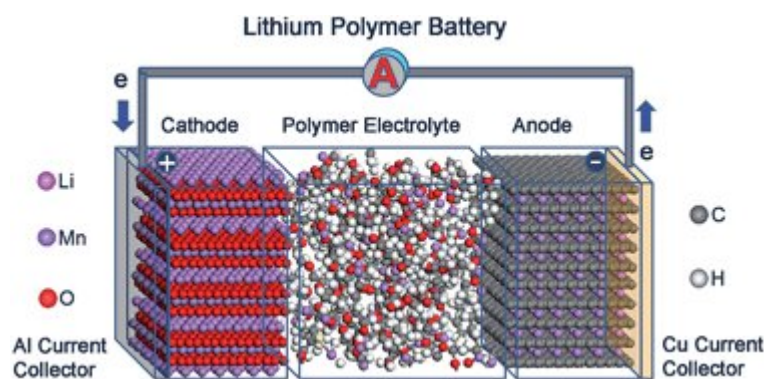
Έναν από τους πρωτοποριακούς τομείς έρευνας αποτελεί ο συνδυασμός της επιστήμης των υλικών με τις τεχνολογίες ενέργειας. Ιδιαίτερα τα πολυμερή, με βάση την ευελιξία, προσαρμοστικότητα και ελαφρότητα που παρέχουν, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παίζουν κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη βιώσιμων εναλλακτικών ενέργειας με στόχο την απελευθέρωση από τα ορυκτά καύσιμα. Από την κατασκευή ηλιακών κυττάρων και ανεμογεννητριών έως την ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες και υπερπυκνωτές, τα πολυμερή συμβάλλουν σημαντικά στη μετάβαση προς ένα πιο πράσινο και βιώσιμο ενεργειακό μέλλον. Τα δομικά και λειτουργικά πολυμερή καθιστούν δυνατή την παραγωγή πολλών αγαθών με χαμηλές εισροές ενέργειας σε σύγκριση με εναλλακτικά υλικά, μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) ως μονωτικά υλικά, επιτρέπουν την κατασκευή ανεμογεννητριών για παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας μειώνοντας το βάρος των αυτοκινήτων και των τρένων, και ελαχιστοποιώντας την αντίσταση του αέρα (vonVacanoetal., 2023).

Η χρήση πολυμερών σε ηλιακούς συλλέκτες προσφέρει ένα ελκυστικό πεδίο για την ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας. Στους οργανικούς φωτοβολταϊκούς συλλέκτες (OPVs), πολυμερικά υλικά όπως το πολυ(3-εξυλοθειοφαίνιο) (P3HT) και τα πολυμερή φουλερενίων παρέχουν υψηλή απορρόφηση φωτός, ευκαμψία και χαμηλό κόστος παραγωγής. Η ευκολία στη μεταποίηση και η δυνατότητα δημιουργίας λεπτών υμενίων επιτρέπουν την εφαρμογή τους σε φορητές και ενσωματωμένες τεχνολογίες, όπως εύελικτες φωτοβολταϊκές συσκευές (Taylor&White, 2023).



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση τυπικής διαφανούς οργανικής φωτοβολταϊκής συσκευής και ορισμών χαρακτηριστικών πολυμερών που αξιοποιούνται, για εφαρμογή σε οροφή θερμοκηπίου για γεωργική χρήση (Chang et al., 2018).

Η τεχνολογία των μπαταριών λιθίου-πολυμερών (Li-polymer) βασίζεται σε πολυμερή ηλεκτρολύτες που εξασφαλίζουν σταθερότητα και αυξημένη ασφάλεια. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως για την αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως ηλιακή και αιολική ενέργεια. Οι πολυμερικοί ηλεκτρολύτες είναι ελαφρύτεροι και ασφαλέστεροι σε σχέση με τους παραδοσιακούς υγρούς ηλεκτρολύτες, παρέχοντας βελτιωμένη αποδοτικότητα και δυνατότητα εφαρμογής σε συστήματα μεγάλης κλίμακας (Evans&Green, 2023).



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση της μπαταρίας λιθίου-πολυμερούς (Long et al., 2016).

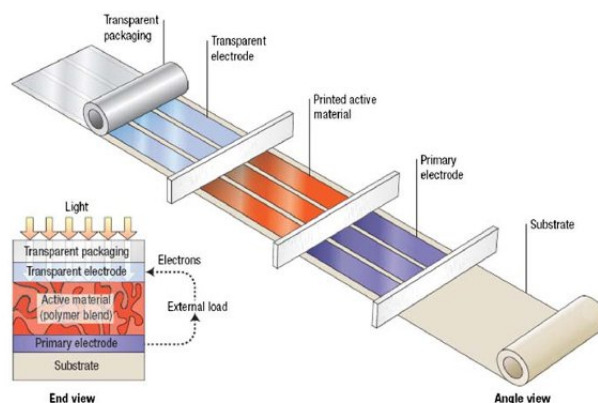
Ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής πολυμερών σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι πολυμερικές μεμβράνες σε κυψέλες καυσίμου. Αυτές οι μεμβράνες λειτουργούν ως διαχωριστές για τη διαχείριση της μεταφοράς ιόντων, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας τις ενεργειακές απώλειες. Η ανάπτυξη υλικών υψηλής θερμικής και χημικής αντοχής έχει ενισχύσει τη βιωσιμότητα αυτών των συστημάτων (Johnson&Lee, 2022). Παράλληλα, η τεχνολογία των πολυμερικώνσυγκεντρωτών φωτός (Luminophores) ενισχύει την απόδοση των φωτοβολταϊκών, χρησιμοποιώντας πολυμερή υλικά για τη μεταφορά του φωτός σε ενεργές περιοχές των συσκευών. Αυτή η τεχνολογία προσφέρει αυξημένη αποδοτικότητα και δυνατότητα εφαρμογής σε σύνθετες αρχιτεκτονικές (Wilson&Carter, 2021).

Η έρευνα για την ενίσχυση της αποδοτικότητας των πολυμερικών υλικών επικεντρώνεται στη χρήση νανοσωματιδίων και υλικών προηγμένης τεχνολογίας. Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση γραφενίου σε πολυμερικά υλικά έχει δείξει σημαντική βελτίωση στη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, κάνοντάς τα ιδανικά για εφαρμογές σε ηλιακούς συλλέκτες. Οι νανοδομές του γραφενίου επιτρέπουν την αποδοτική απορρόφηση φωτός και την ταχύτερη μεταφορά ηλεκτρονίων, αυξάνοντας την αποδοτικότητα κατά 20-30% σε σύγκριση με παραδοσιακά πολυμερή (Evans&Green, 2023). Παράλληλα, τα πολυμερή με ενσωματωμένους νανοσωλήνες άνθρακα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία εύκαμπτων ηλιακών συλλεκτών. Αυτά τα υλικά παρέχουν ευκαμψία και υψηλή μηχανική αντοχή, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτούνται φορητές και ανθεκτικές λύσεις. Τέτοιες τεχνολογίες έχουν ήδη εφαρμοστεί σε φορητές συσκευές και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μικρής κλίμακας (Johnson&Lee, 2022).

Η ανάπτυξη πολυμερών που βασίζονται σε ανανεώσιμες πρώτες ύλες, όπως η βιομάζα, συμβάλλει στη βιωσιμότητα των τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας. Τα βιοδιασπώμενα πολυμερή χρησιμοποιούνται ήδη σε συστήματα φωτοβολταϊκών και αποθήκευσης, προσφέροντας φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις. Η εισαγωγή βιοαποικοδομήσιμων πολυμερών σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές συμβάλλει στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και την προώθηση πιο βιώσιμων τεχνολογιών (Taylor&Smith, 2023).

Επιπλέον, η δυνατότητα πλήρους ανακύκλωσης αυτών των υλικών ενισχύει την εναρμόνισή τους με την κυκλική οικονομία (Taylor&White, 2023). Η τεχνολογία των πολυμερικών φωτοβολταϊκών υλικών έχει επίσης βελτιωθεί μέσω της χρήσης πολυμερών που διαθέτουν προσαρμόσιμες οπτικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες. Αυτή η ευελιξία

επιτρέπει την κατασκευή υλικών με βελτιστοποιημένη απορρόφηση φωτός και υψηλότερη σταθερότητα υπό ακραίες συνθήκες περιβάλλοντος (Wilson&Carter, 2021).



Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση μιας πολυμερικής οργανικής κυψέλης που μπορεί να κατασκευαστεί με τυπικές διαδικασίες εκτύπωσης (Cai et al., 2010)

Τέλος, η ανάπτυξη προηγμένων διαδικασιών παραγωγής, όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση πολυμερικών υλικών, επιτρέπει την κατασκευή καινοτόμων συσκευών υψηλής απόδοσης. Οι διαδικασίες αυτές μειώνουν το κόστος παραγωγής και αυξάνουν τη δυνατότητα προσαρμογής στις ανάγκες συγκεκριμένων εφαρμογών, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα και την οικονομική αποδοτικότητα (Evans&Green, 2023).

2.4 Πολυμερή και Τεχνολογίες Δέσμευσης Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂)

Οι τεχνολογίες δέσμευσης και διαχωρισμού διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) έχουν προσελκύσει αυξανόμενη προσοχή καθώς η υπερβολική εκπομπή CO₂ που παράγεται από την καύση ορυκτών καυσίμων έχει οδηγήσει σε υπερθέρμανση του πλανήτη και ορισμένα περιβαλλοντικά ζητήματα. Χαρακτηριστικά, σύμφωνα με έρευνα του 2018, η ανθρωπογενής απελευθέρωση CO₂ μετρήθηκε στους 35 δισεκταμύριο τόνους ετησίως, με μια συνεχώς αυξανόμενη τάση (Kurgan et al., 2018).

Η τρέχουσα κορυφαία τεχνολογία δέσμευσης CO₂ είναι η τεχνολογία υγρού καθαρισμού με βάση τις αμίνες (Zhang et al., 2015). Αν και τα συστήματα αυτά θεωρούνται τα τελευταίας τεχνολογίας σήμερα και θα είναι κυρίαρχος "παίκτης" για τις επόμενες δεκαετίες, θεωρούνται δαπανηρά και παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα. Η διαδικασία απαιτεί μεγάλο μέγεθος εξοπλισμού και η αναγέννηση διαλυτών είναι σχετικά ενεργοβόρα. Τα διαλύματα αμίνης είναι επίσης διαβρωτικά, γεγονός που αποτελεί

περιβαλλοντική ανησυχία, ενώ μπορεί να είναι ασταθής σε υψηλή θερμοκρασία, γεγονός που περιορίζει τη θερμοκρασία αναγέννησης και μειώνει τη διάρκεια ζωής του διαλύτη(Kupgan et al., 2018) .

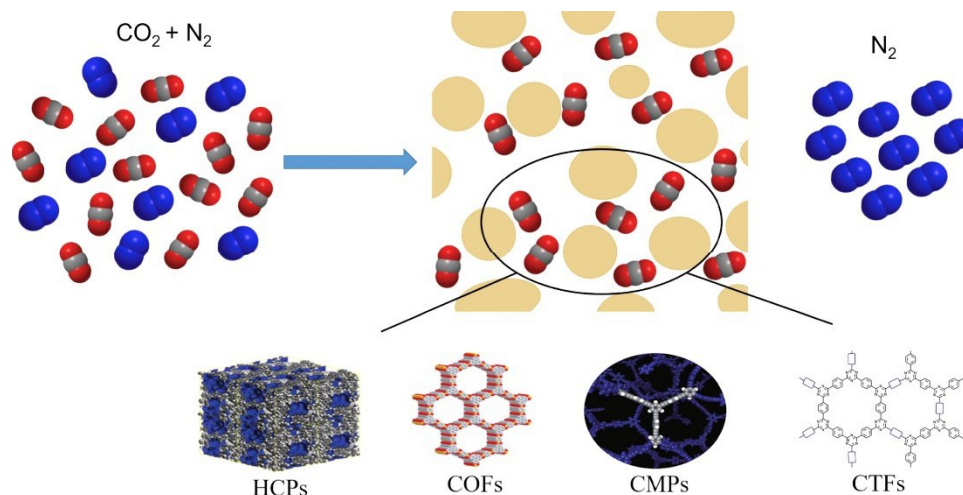
Τα δομικά και λειτουργικά πολυμερή είναι απαραίτητα για τη δημιουργία μιας οικονομίας με μηδενικές εκπομπές CO₂. Τα πολυμερή χρησιμοποιούνται ως υλικά δέσμευσης λόγω της ικανότητάς τους να τροποποιούνται χημικά, ώστε να προσδένονται επιλεκτικά στα μόρια του CO₂. Οι αμίνες, για παράδειγμα, μπορούν να ενσωματωθούν σε πολυμερικές μήτρες για να απορροφούν και να συγκρατούν CO₂ σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις (Taylor&White, 2022). Ένα βασικό παράδειγμα εφαρμογής είναι οι πολυμερικές στήλες δέσμευσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής για τη συγκράτηση του CO₂ που προκύπτει από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η χρήση αυτών των πολυμερών υλικών μειώνει το ενεργειακό κόστος της δέσμευσης, σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους, όπως τα υγρά διαλύματα αμινών. Παράλληλα, η αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες και χημικές επιδράσεις ενισχύει τη μακροχρόνια χρήση τους (Evans&Green, 2023).

Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί και στην ανάπτυξη πολυμερικών υλικών με πορώδεις δομές, όπως τα μεταλλικά-οργανικά πλαίσια (Metal-Organic Frameworks) (MOFs) που συνδυάζονται με πολυμερικές μήτρες για να δημιουργήσουν υβριδικά υλικά. Αυτά τα υλικά επιτρέπουν τη δέσμευση CO₂ ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, όπως αυτές που απαντώνται στην ατμόσφαιρα, προσφέροντας λύσεις για μελλοντικές τεχνολογίες περιβαλλοντικής αποκατάστασης (Johnson&Lee, 2022). Οι πολυμερικές συσκευές δέσμευσης έχουν επίσης βρει εφαρμογές σε κινητές πηγές εκπομπών, όπως οι κινητήρες εσωτερικής καύσης. Ελαφριά πολυμερικά υλικά επιτρέπουν τη μείωση του βάρους των συστημάτων δέσμευσης, καθιστώντας τα πιο αποδοτικά και οικονομικά για εφαρμογές μεταφοράς (Wilson&Carter, 2021). Μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα των υδατικών διαλυμάτων αμίνης είναι η χρήση πορωδών στερεών προσροφητών, οι οποίοι φυσικορροφούν μόρια CO₂ μέσω αδύναμων δυνάμεων vanderWaals, καθιστώντας την αναγέννηση της ενέργειας των υλικών πολύ πιο αποτελεσματική. Ως εκ τούτου, τα μικροπορώδη οργανικά πολυμερή (MOPs), ως ένα είδος προηγμένων πορωδών υλικών, αναδεικνύονται ως μια πολλά υποσχόμενη κατηγορία προσροφητικών υλικών αερίου με αξιοσημείωτη δυνατότητα αντιμετώπισης πολλών κοινωνικών προκλήσεων που σχετίζονται με την ενέργεια και το περιβάλλον, λόγω της μεγάλης επιφάνειας, της εξαιρετικής φυσικοχημικής σταθερότητας και της

χαμηλής πυκνότητας σκελετού. Ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα των MOP είναι η δυνατότητα εισαγωγής συνθετικά μιας σειράς χρήσιμων χημικών λειτουργιών στον σκελετό του πολυμερούς, που παρέχει στο πολυμερές ειδικές λειτουργίες και ιδιότητες για συγκεκριμένες εφαρμογές, ιδιαίτερα για δέσμευση CO₂(Zhang et al., 2015).

Τα υπερδιασταυρωμένα πολυμερή (HCPs) είναι μια κατηγορία πολυμερών δικτύου που παράγουν πορώδες με έντονη διασταύρωση πολυμερών σε διογκωμένη κατάσταση με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτρέπεται η κατάρρευση των πόρων μόλις αφαιρεθεί ο διαλύτης. Τυπικά παραδείγματα συντίθενται με μετα-διασταυρωμένη σύνδεση πολυστυρενίου (post-cross-linking of polystyrene) (Kurgan et al., 2018). Την περασμένη δεκαετία, μια σειρά MOPs, όπως πολυμερή ενδογενούς μικροπορώδους (PIMs), συζυγή μικροπορώδη πολυμερή (CMPs), ομοιοπολικά οργανικά πλέγματα (COFs), πορώδη αρωματικά πλαίσια (PAFs), πορώδη πολυμερικά δίκτυα (PPNs) και υπερδιασταυρωμένα πορώδη πολυμερή (HCPs), έχουν διερευνηθεί εντατικά για τη δέσμευση CO₂(Zhang et al., 2015).

Τα υβριδικά αυτά υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανίες πετροχημικών και ενεργειακής παραγωγής για την απομάκρυνση του CO₂ από μείγματα αερίων, όπως το μεθάνιο ή το υδρογόνο. Αυτή η διαδικασία μειώνει την κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους συμπίεσης και ψύξης (Evans & Green, 2023). Τα υβριδικά υλικά αποκτούν μεγαλύτερη ζήτηση σε όλους τους τομείς της μηχανικής και των εφαρμογών κι ιδιαίτερα τα υλικά με βάση τα πολυμερή είναι μια νέα προσέγγιση στη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα. Μια από τις καινοτόμες ιδέες ήταν η ανάπτυξη προσροφητικού σε υβριδική μορφή με βάση την κοίλη ίνα πολυμερούς-ροφητικού (polymer-sorbent hollow fiber). Η οξική κυτταρίνη και η πολυβινυλοπυρρολιδόνη (polyvinylpyrrolidone) ήταν τα πολυμερή και ο ζεόλιθος 13X ήταν το προσροφητικό που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη. Αυτά τα υβριδικά προσροφητικά έχουν τα πλεονεκτήματα όπως υψηλή απόδοση προσρόφησης, ταχεία μεταφορά θερμότητας και μάζας. Οι τροποποιημένες ίνες γυαλιού PEI που διασυνδέονται με επιχλωροϋδρίνη έχουν μελετηθεί για την προσρόφηση CO₂ και βρέθηκε ότι έχουν ικανότητα δέσμευσης 4,12 mmol/g προσροφητικού. Οι σύνθετες κοίλες ίνες εμποτισμένες με πυρίτιο/νανοσωλήνα άνθρακα έχουν επίσης αναπτυχθεί και μελετηθεί για τη δέσμευση CO₂ (Tsivadze et al., 2021).

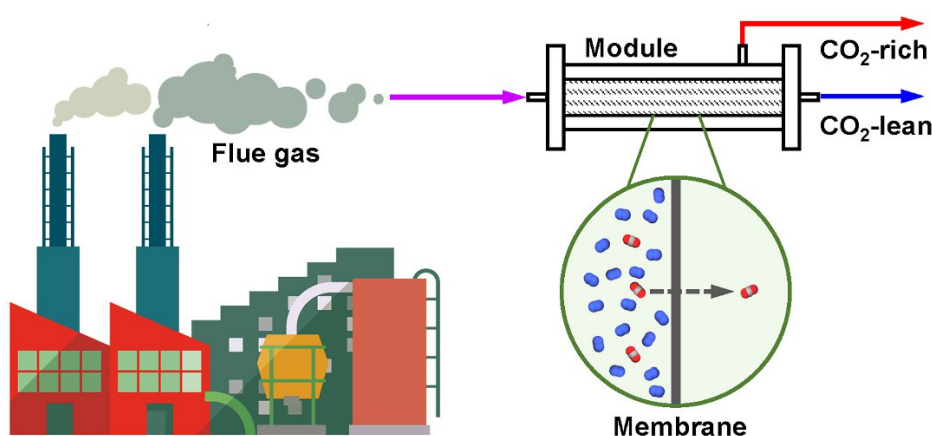


Εικόνα 8: Η διαδικασία δέσμευσης CO₂ με χρήση πορωδών υλικών 6, 7, 8, 9. HCPs, πολυμερή με υπερδιασταυρούμενη σύνδεση. COF, ομοιοπολικά οργανικά πλαίσια. CMPs, συζευγμένα μικροπορώδη πολυμερή. CTFs, CTF, ομοιοπολικό πλαίσιο που βασίζεται σε τριαζίνη (Gao et al., 2019).

Οι πολυμερικές μεμβράνες έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικές στη δέσμευση και τον διαχωρισμό του CO₂ από άλλα αέρια, καθώς προσφέρουν υψηλή επιλεκτικότητα και διαπερατότητα. Αυτές οι μεμβράνες χρησιμοποιούνται κυρίως σε εγκαταστάσεις βιομηχανικών εκπομπών για τη διαχείριση των ρύπων που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Οι πολυμερείς μεμβράνες βασισμένες σε πολυαιθεροσουλφόνες (PES) ή πολυαμιδικά υλικά έχουν αναδειχθεί ως κορυφαίες επιλογές λόγω της αντοχής τους και της απόδοσής τους σε ακραίες συνθήκες (Taylor & Smith, 2023). Ένα καινοτόμο παράδειγμα είναι οι μεμβράνες μικροπόρων που ενσωματώνουν νανοσωματίδια για την ενίσχυση της επιλεκτικότητας. Σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες διαχωρισμού CO₂, η μεμβράνη είναι πλεονεκτική για τη συμπαγή του συστήματος, την ενεργειακή απόδοση, τη λειτουργική απλότητα και την ικανότητα να ξεπεραστούν οι περιορισμοί θερμοδυναμικής διαλυτότητας. Αυτά τα χαρακτηριστικά προέρχονται από το γεγονός ότι η μεμβράνη είναι μια λεπτή ενδιάμεση φάση που δρα ως επιλεκτικό φράγμα που χωρίζει δύο φάσεις. Αυτή η λεπτότητα, συνήθως στην περιοχή από 100 nm έως μερικά μικρόμετρα, παρέχει μια σχεδόν φυσική πλατφόρμα για την εφαρμογή μακρομοριακών δομών με εξελιγμένη μηχανική (Han & Ho, 2018).

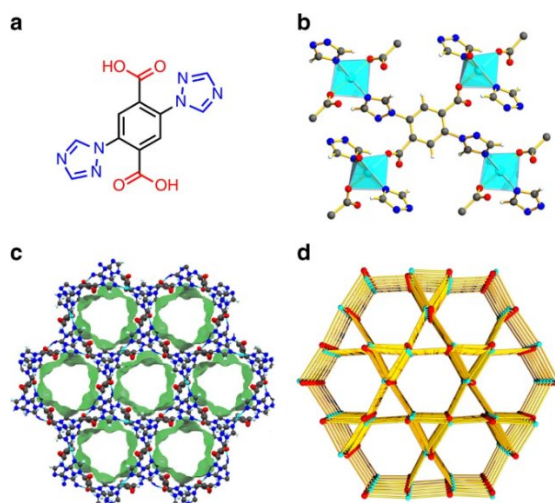
Επιπλέον, μεμβράνες που βασίζονται σε συνθετικά πολυμερή, όπως το πολυ(βινυλοαλκοόλη) (PVA), έχουν αναπτυχθεί για την απομάκρυνση και άλλων ρύπων, όπως το θείο και το μονοξείδιο του άνθρακα. Οι ιδιότητες αυτών των πολυμερών μπορούν να τροποποιηθούν μέσω χημικών αντιδράσεων, αυξάνοντας την ικανότητά τους

να διαχειρίζονται σύνθετα μείγματα ρύπων (Wilson&Carter, 2021). Οι πολυμερικές μεμβράνες χρησιμοποιούνται επίσης για τη δέσμευση CO₂ σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις, όπου το βάρος και η αντοχή αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους. Ειδικές μεμβράνες χαμηλής πυκνότητας και υψηλής διαπερατότητας έχουν δείξει αξιόλογες επιδόσεις, μειώνοντας τα κόστη λειτουργίας και αυξάνοντας την αποδοτικότητα (Johnson&Lee, 2022). Η έρευνα στις πολυμερικές μεμβράνες επικεντρώνεται επίσης στη βιωσιμότητα, με την ανάπτυξη υλικών από βιοδιασπώμενες πρώτες ύλες. Οι μελλοντικές εφαρμογές περιλαμβάνουν τη χρήση τους σε φορητές συσκευές και συστήματα περιβαλλοντικής αποκατάστασης, υπογραμμίζοντας τη σημασία της τεχνολογίας αυτής για την αντιμετώπιση των παγκόσμιων προκλήσεων (Taylor&White, 2023).



Εικόνα9: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας μιας πολυμερικής μεμβράνης δέσμευσης CO₂ (Han&Ho, 2018).

Πρωτότυπα πολυμερή με υψηλό ελεύθερο όγκο που χρησιμοποιούνται συνήθως για διαχωρισμό μεμβράνης είναι το πολυ(τριμεθυλοσιλυλο)προπίνιο (poly(trimethylsilyl)propyne, PTMSP) και οι παραλλαγές του, που έχουν δείξει υψηλούς συντελεστές διάχυσης αερίου ως αποτέλεσμα μεγάλων συνεχών μικροκενών. Τα πολυϊμίδια (PIs) έχουν επίσης μελετηθεί πιο πρόσφατα, καθώς παρουσιάζουν καλές ιδιότητες φυσικού και διαχωρισμού αερίων που μπορούν να συντονιστούν με την επιλογή διανυδρίτη και διαμίνης (Kurganetal., 2018).



Εικόνα10: Structural illustration of FJI-H14. a The selected ligand H2BTTA for the construction of FJI-H14. b The coordination environment of the Cu(II) ions as four-connected nodes and BTTA also as a four-connected node. c The one-dimensional nanoporous channels along the crystallographic c direction. d The framework of USF topology. (Cu atom, cyan; C atom, gray; O atom, red; N atom, blue; H atom, white)(Liang et al., 2017).

Τέλος, τα τελευταία χρόνια έχει αναδειχθεί μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση που βοηθάει ταυτόχρονα σε ένα ακόμη μείζον ζήτημα, αυτό της συσσώρευσης των πλαστικών απορριμμάτων. Συγκεκριμένα γίνεται έρευνα γύρω από τον τομέα της ανακύκλωσης των πολυμερών και των δυνατοτήτων αξιοποίησής τους μετά το τέλος ζωής τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πολυουρεθάνη (PU), ειδικά με τη μορφή αφρού πολυουρεθάνης (PUF). Σύμφωνα με τις πρόσφατες μελέτες, το PUF μετατράπηκε σε πορώδες άνθρακα με προ-ανθρακοποίηση και ενεργοποίηση υδροξειδίου του καλίου. Η πορώδης δομή που λαμβάνεται έχει ικανότητα δέσμευσης CO₂ 6,67 mmol/g στους 0 °C και 4,33 mmol/g στους 25 °C σε πίεση κάτω από 1 bar. Αυτά τα υλικά από πορώδη άνθρακα που παρασκευάζονται διαθέτουν βελτιωμένη επιλεκτικότητα ως προς τη δέσμευση CO₂ από μίγμα διοξειδίου του άνθρακα και αζώτου. Πλαστικά απόβλητα όπως τereφθαλικός πολυαιθυλενεστέρας (PET, μπουκάλι), πολυπροπυλένιο (κύπελλα), πολυβινυλοχλωρίδιο (πλαστικοί σωλήνες) και σκραπ ελαστικών (καουτσούκ) χρησιμοποιήθηκαν ως πρότυπο με σφαιρίδια καρβιδίου. Παρόμοια πορώδη προσροφητικά άνθρακα παρασκευάστηκαν από απόβλητα PET με ενανθράκωση και ενεργοποίηση χρησιμοποιώντας υδροξείδιο του καλίου (Tsivadze et al., 2021).

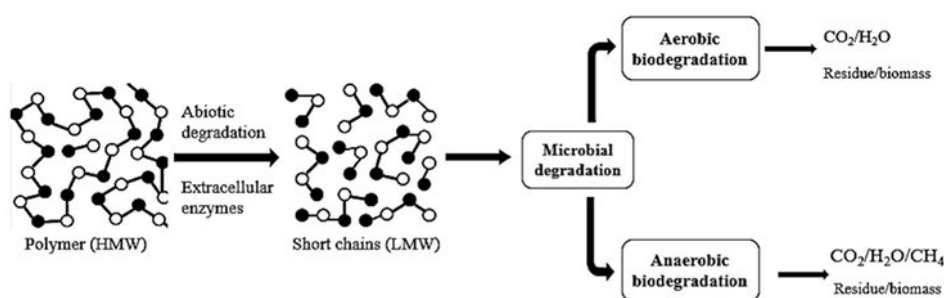
2.5 Πολυμερή και Κυκλική Οικονομία

Η γενική ιδέα της κυκλικής οικονομίας περιστρέφεται γύρω από το ότι η αξία ενός προϊόντος διατηρείται όσο το δυνατόν περισσότερο και η σπατάλη ελαχιστοποιείται. Η συγκεκριμένη, είναι μια προτεινόμενη στρατηγική για την αντιμετώπιση της ταχείας οικονομικής αλλαγής που είναι συμβατή με τη βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη και την προστασία του περιβάλλοντος (Gubanov *et al.*, 2020). Αυτή τη στιγμή, τα συνθετικά πολυμερή βασίζονται κυρίως σε πετρελαϊκούς πόρους, οι οποίοι εξαντλούνται γρήγορα από την αυξανόμενη ενεργειακή μας ζήτηση. Επομένως, υπάρχει μια επικείμενη πρόκληση για τη σταδιακή αντικατάσταση των πολυμερών με βάση το πετρέλαιο με εκείνα που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές. Επιπλέον, η συντριπτική πλειονότητα των συνθετικών πολυμερών έχει σχεδιαστεί για απόδοση και ανθεκτικότητα, όχι για δυνατότητα αποικοδόμησης και ανακύκλωσης, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα την τεράστια αύξηση των απορριπτόμενων πολυμερών απορριμμάτων τις τελευταίες δεκαετίες. Για να μειωθεί η ζήτηση για πεπερασμένες πρώτες ύλες, να ελαχιστοποιηθεί ο αρνητικός αντίκτυπος στο περιβάλλον και επίσης να αντιμετωπιστεί το ζήτημα του τέλους ζωής των συνθετικών πολυμερών, η λογική και ιδανική λύση είναι να αναπτυχθεί μια προσέγγιση κυκλικής οικονομίας για βιώσιμα πολυμερή που μπορούν εύκολα να ανακυκλωθούν (Hong & Chen, 2017).

Μια στρατηγική που αναπτύχθηκε τις τελευταίες δύο δεκαετίες είναι η χρήση βιοαποδομήσιμων πολυμερών, για παράδειγμα, πολύ(γαλακτικό οξύ) (PLA), πολυ(βουτυλενοηλεκτρικό), πολυ(3-υδροξυβουτυρικό) και ούτω καθεξής, με ευρείες εφαρμογές. Τα βιοαποδομήσιμα πολυμερή παράγονται από ανανεώσιμες πηγές, όπως φυτικά έλαια, άμυλο, κυτταρίνη ή ακόμη και μικροοργανισμούς (Hong & Chen, 2017). Έχουν την ικανότητα να αποικοδομούνται φυσικά, είτε μέσω βιολογικών διεργασιών (π.χ. από μικροοργανισμούς, ένζυμα) είτε μέσω φυσικοχημικών μηχανισμών. Κατά τη (βιο-) αποικοδόμηση, το πολυμερές διασπάται σε μικρότερα θραύσματα και μεταβολίζεται ιδανικά σε βιομάζα, CO₂ και H₂O. Ο πιθανός σχηματισμός προϊόντων ενδιάμεσης (βιο) αποικοδόμησης χρειάζεται έλεγχο, αλλά η ανάπτυξη και η τυποποίηση συγκεκριμένων σχημάτων δοκιμών έχει βοηθήσει στην αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος (von Vacano *et al.*, 2023). Αυτά τα πολυμερή διακρίνονται για την ευελιξία τους και τις ποικίλες εφαρμογές τους, που καλύπτουν τομείς όπως η συσκευασία τροφίμων, η γεωργία, η ιατρική (π.χ. απορροφήσιμα ράμματα, φαρμακευτική

απελευθέρωση) και η βιομηχανία. Παρά τα τους πλεονεκτήματα, τα βιοαποικοδομήσιμα πολυμερή αντιμετωπίζουν και ορισμένες προκλήσεις, που περιλαμβάνουν το υψηλότερο κόστος παραγωγής σε σύγκριση με τα παραδοσιακά πλαστικά, τις περιορισμένες ιδιότητες (π.χ. μηχανική αντοχή, θερμοστάθμηση) σε ορισμένες περιπτώσεις, καθώς και την ανάγκη για ειδικές συνθήκες αποικοδόμησης, οι οποίες δεν είναι πάντα εύκολα διαθέσιμες.

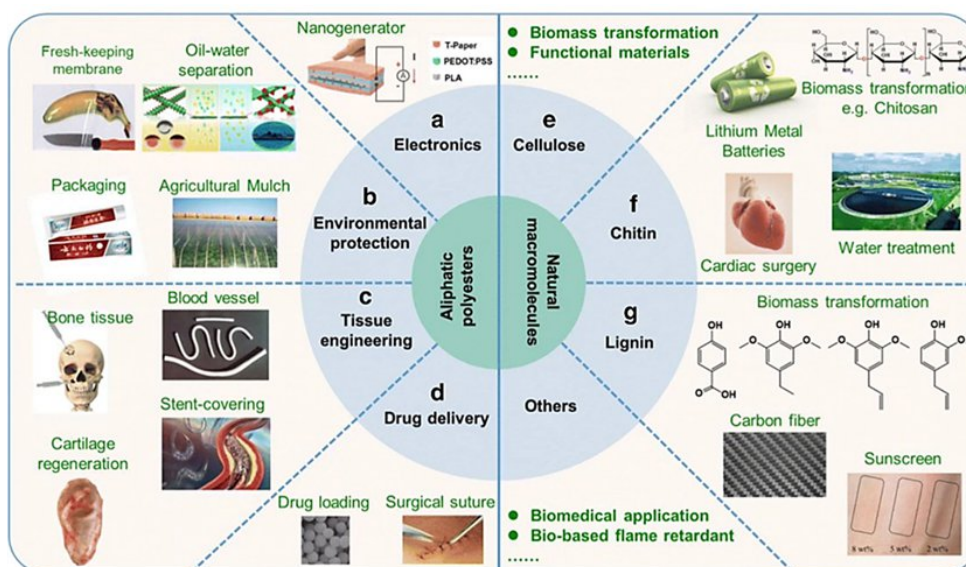
Ένα από τα πιο υποσχόμενα υλικά είναι το πολύ(γαλακτικό οξύ) (PLA), ένα βιοδιασπώμενο πολυμερές που κατασκευάζεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως το άμυλο και η ζάχαρη. Το PLA μπορεί να αντικαταστήσει το PVC και το PE σε εφαρμογές συσκευασίας και άλλες χρήσεις, προσφέροντας λύσεις που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον μετά το τέλος του κύκλου ζωής του (Taylor&White, 2023). Ένα άλλο υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως είναι η πολυκαπρολακτόνη (PCL), το οποίο χαρακτηρίζεται από τη βιοδιασπασιμότητά του υπό βιομηχανικές συνθήκες κομποστοποίησης. ΗPCL χρησιμοποιείται σε ιατρικές εφαρμογές και στη βιομηχανία συσκευασίας, ενώ μπορεί να υποστεί πλήρη αποδόμηση χωρίς να δημιουργεί τοξικά υπολείμματα (Evans&Green, 2023).



Εικόνα 11: Βήματα βιοαποικοδόμησης των πολυμερών(Samir et al., 2022).

Σχετικά με τις σύγχρονες εφαρμογές των βιοαποδομήσιμων πολυμερών, εντοπίζεται μια σημαντική ανάπτυξη σε τομείς που αφορούν την ιατρική, τη γεωργία, τα προϊόντα συσκευασίας και τα αντικείμενα μιας χρήσης. Για παράδειγμα, στη γεωργία, τα βιοαποικοδομήσιμα πολυμερή χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πλαστικών για θερμοκήπια και συσκευασίες σπόρων, οι οποίες αποικοδομούνται στο έδαφος μετά τη χρήση, μειώνοντας τη συσσώρευση πλαστικών στα αγροτικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοαποικοδομήσιμων δοχείων φυτών και βιολογικά ενεργών κομποστιζόμενων υλικών. Σε αυτόν τον τομέα συναντάται το PLA. Στον ιατρικό τομέα, αξιοποιούνται για την παραγωγή απορροφήσιμων ραμμάτων, μηχανημάτων και φορέων που συμβάλλουν στην ιστομηχανική, φαρμακευτικών φορέων

για ελεγχόμενη απελευθέρωση φαρμάκων. Πολυμερή όπως το πολύ(γαλακτικό οξύ) (PLA) και το πολύ(γλυκολικό οξύ) (PGA) αλλά και συμπολυμερή τους (PLGA - Poly(lactic-co-glycolicacid) είναι ιδανικά για τέτοιες εφαρμογές, καθώς και PHA – πολύ(υδροξυαλκανοεστέρες), η χιτοζάνη, το αλγινικό οξύ και το κολλαγόνο. Τα συγκεκριμένα πολυμερή αξιοποιούνται επίσης σε συσκευασίες τροφίμων, για την παραγωγή βιοαποικοδομήσιμων δοχείων και ταινιών (φίλμς), που προσφέρουν προστασία στα τρόφιμα χωρίς να συμβάλλουν στην παραγωγή πλαστικών αποβλήτων. Παραδείγματα περιλαμβάνουν συσκευασίες από πολύ(γαλακτικό οξύ)(PLA) ή πολύ(υδροξυαλκανοεστέρες) (PHA), που αποικοδομούνται φυσικά μετά τη χρήση. Εντοπίζονται επίσης στην παραγωγή σακουλών απορριμμάτων και κομποστοποίησης, οι οποίες μπορούν να αποικοδομηθούν μαζί με τα οργανικά απόβλητα, μειώνοντας την ποσότητα των πλαστικών που καταλήγουν σε χωματερές. Στον τομέα των κατασκευών, τα βιοαποικοδομήσιμα πολυμερή χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μονωτικών υλικών, βαφών και επικαλύψεων, ενώ στη βιομηχανία μόδας, υπάρχουν πλέοντα βιολογικά φιλικά υφάσματα και νήματα. Επιπλέον, η παραγωγή προϊόντων μιας χρήσης όπως πιάτα, μαχαιροπήρουνα, ποτήρια και καλαμάκια, βασίζεται πλέον σε μεγάλο βαθμό σε τέτοια πολυμερή. Αυτά τα προϊόντα αποτελούν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά πλαστικά μιας χρήσης, τα οποία συχνά καταλήγουν στον ωκεανό και προκαλούν ρύπανση. Τέλος, στον τομέα της ενέργειας, αξιοποιούνται στην παραγωγή βιοαποικοδομήσιμων μεμβρανών για κυψέλες καυσίμων όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ή σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αποκατάστασης περιβάλλοντος, όπως η απορρόφηση ρύπων από το νερό ή το έδαφος (Samir et al., 2022).



Εικόνα 12: Οι κυριότεροι τομείς εφαρμογών των βιοαποικοδομήσιμων πολυμερών (Samir et al., 2022).

2.6 Συμβολή των Πολυμερών στη Μείωση του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος

Η χρήση πολυμερών στη συσκευασία έχει υποστεί σημαντική αναδιαμόρφωση, καθώς οι βιομηχανίες προσπαθούν να μειώσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Τα βιοδιασπώμενα πολυμερή, όπως το πολύ(γαλακτικό οξύ) (PLA) και το πολυβουτυλενοσουλκινικό οξύ (PBS), χρησιμοποιούνται ευρέως στη συσκευασία τροφίμων και άλλων καταναλωτικών προϊόντων. Αυτά τα υλικά διασπώνται γρήγορα υπό κατάλληλες συνθήκες κομποστοποίησης, ελαχιστοποιώντας τη συσσώρευση πλαστικών αποβλήτων στο περιβάλλον (Taylor&White, 2023). Επιπλέον, η αντικατάσταση των παραδοσιακών πλαστικών, όπως το PE και το PVC, με πολυμερή που κατασκευάζονται από ανανεώσιμες πηγές, έχει συμβάλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά την παραγωγή. Τα πολυμερή που βασίζονται στη βιομάζα, όπως το πολυυδροξυβουτυρικό (PHB), παρέχουν εξαιρετική μηχανική αντοχή και βιοδιασπασιμότητα, κάνοντάς τα ιδανικά για εφαρμογές μιας χρήσης (Evans&Green, 2023).

Ένας ακόμη τομέας που επωφελείται από τα πολυμερή είναι η ανάπτυξη συσκευασιών πολλαπλών χρήσεων. Πολυμερή υψηλής αντοχής, όπως το πολυπροπυλένιο (PP),

χρησιμοποιούνται σε δοχεία και άλλες συσκευασίες που σχεδιάζονται για επαναλαμβανόμενη χρήση. Αυτό μειώνει την ανάγκη για παραγωγή νέων συσκευασιών, συμβάλλοντας στη διατήρηση των πόρων και στη μείωση των αποβλήτων (Wilson&Carter, 2021). Παράλληλα, οι πολυμερικές επιστρώσεις σε χάρτινες συσκευασίες προσφέρουν δυνατότητες ανακύκλωσης που δεν ήταν προηγουμένως εφικτές. Αυτές οι επιστρώσεις αντικαθιστούν παραδοσιακά υλικά, όπως οι στρώσεις αλουμινίου, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα χωρίς να μειώνουν την αντοχή ή τις ιδιότητες φραγμού (Johnson&Lee, 2022).

Οι τεχνολογίες εκτύπωσης 3D έχουν επίσης αρχίσει να χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πολυμερικών συσκευασιών που προσαρμόζονται στις ανάγκες των προϊόντων. Αυτή η προσέγγιση μειώνει τη σπατάλη υλικών κατά την παραγωγή και προσφέρει νέες δυνατότητες σχεδιασμού για βιώσιμες λύσεις συσκευασίας (Taylor&Smith, 2023).

Η αντικατάσταση μη φιλικών προς το περιβάλλον υλικών με πολυμερή νέας γενιάς αποτελεί έναν από τους βασικούς τρόπους μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος σε πολλές βιομηχανίες. Για παράδειγμα, τα πολυμερή με ενσωματωμένα νανοσωματίδια άνθρακα ή γραφενίου έχουν αρχίσει να αντικαθιστούν παραδοσιακά μεταλλικά υλικά σε ηλεκτρονικές και κατασκευαστικές εφαρμογές. Αυτά τα υλικά προσφέρουν υψηλή αντοχή, χαμηλό βάρος και μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση κατά την παραγωγή τους (Evans&Green, 2023).

Στη βιομηχανία αυτοκινήτων, πολυμερή όπως το ενισχυμένο πολυαμίδιο (PA6) και το πολυαιθεροεστέρα (PBT) χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση μεταλλικών εξαρτημάτων, μειώνοντας σημαντικά το βάρος των οχημάτων. Η μείωση του βάρους συμβάλλει στην εξοικονόμηση καυσίμων και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά τη χρήση (Wilson&Carter, 2021). Η βιομηχανία κατασκευών επίσης επωφελείται από πολυμερή που αντικαθιστούν παραδοσιακά μη φιλικά υλικά, όπως το τσιμέντο και το ξύλο. Πολυμερή σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα ή γυαλιού χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής αντοχής, ενώ παράλληλα μειώνουν την κατανάλωση μη ανανεώσιμων πόρων (Johnson&Lee, 2022).

Τα πολυμερή νέας γενιάς συμβάλλουν και στην αντικατάσταση των παραδοσιακών ελαστικών υλικών. Για παράδειγμα, η θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU) έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπου απαιτείται ευκαμψία και αντοχή, ενώ προσφέρει μεγαλύτερη βιωσιμότητα σε σχέση με τα συμβατικά ελαστομερή (Taylor&White,

2023). Η αντικατάσταση μη φιλικών υλικών επεκτείνεται και σε εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως η αεροδιαστημική, όπου η χρήση ελαφρών πολυμερών μειώνει την κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές ρύπων. Οι συνεχείς εξελίξεις στον τομέα των πολυμερών διαμορφώνουν ένα πιο βιώσιμο μέλλον, καθιστώντας τα υλικά αυτά θεμέλιο της περιβαλλοντικής προστασίας και της τεχνολογικής προόδου (Taylor&Smith, 2023).

2.7 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις και Ανακύκλωση Πολυμερών

Η επέκταση της χρήσης πολυμερών υλικών που τονίστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, συνοδεύεται από όξυνση του προβλήματος της συσσώρευσης διαφόρων ειδών πολυμερικών απορριμμάτων, στα οποία περιλαμβάνονται προϊόντα που έχουν εξυπηρετήσει τη ζωή τους, βιομηχανικά και οικιακά υλικά συσκευασίας. Η χρήση πολυμερών σε προϊόντα μιας χρήσης, όπως πλαστικές σακούλες και συσκευασίες, αυξάνει δραματικά τον όγκο των αποβλήτων. Επί του παρόντος, περίπου το 50% όλων των τύπων υλικών συσκευασίας είναι κατασκευασμένα από πολυμερή και από 9 δισεκατομμύρια τόνους πλαστικού που παράγονται ανθρωπότητας, μόνο το 9% ανακυκλώνεται (GUBANOVA et al., 2020). Η αδυναμία πολλών από αυτά τα πολυμερή να βιοδιασπαστούν οδηγεί στη συσσώρευση αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά τα οικοσυστήματα και τα υδάτινα συστήματα (Johnson & Lee, 2019). Επιπλέον, η θερμική διάσπαση των πολυμερών κατά την αποτέφρωση παράγει τοξικά αέρια, όπως διοξίνες και φουράνια, τα οποία είναι εξαιρετικά επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Αυτές οι πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων απαιτούν βιώσιμες λύσεις που εστιάζουν στη μείωση των εκπομπών και την αξιοποίηση των υλικών (Brown & Patel, 2020).

Παράλληλα, η παραγωγή πολυμερών, όπως το PVC και το PE, έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω της εξάρτησής τους από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και της απελευθέρωσης επιβλαβών αερίων κατά τη διαδικασία παραγωγής. Η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων αερίων θερμοκηπίου κατά την παραγωγή του PVC, καθώς και η χρήση καρκινογόνων ουσιών, όπως το βινυλοχλωρίδιο, είναι ιδιαίτερα ανησυχητικές (Taylor&Evans, 2018).

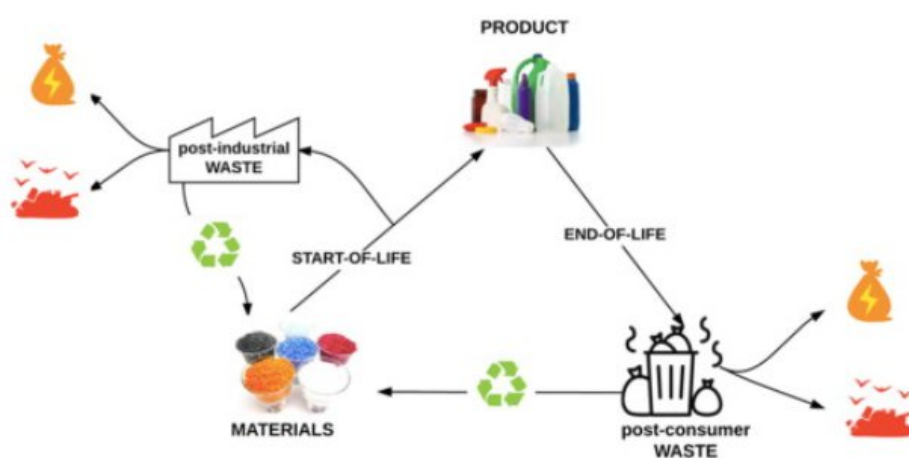
Η ανακύκλωση είναι μια από τις κύριες στρατηγικές για τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης από τα πολυμερή. Θεωρείται μια εναλλακτική λύση έναντι της υγειονομικής ταφής ή αποτέφρωσης των απορριμμάτων, διαδικασίες που επιφέρουν σοβαρή περιβαλλοντική ρύπανση ή καταστροφές και ανακτούν καθόλου ή ελάχιστη αξία του υλικού (Hong&Chen, 2017). Ωστόσο, μόνο ένα μικρό ποσοστό των παραγόμενων πολυμερών ανακυκλώνεται, λόγω τεχνικών και οικονομικών περιορισμών, καθώς και της χαμηλής ποιότητας των ανακυκλωμένων υλικών (Wilson&Carter, 2021).



Εικόνα 13: Συνολική μηχανική διαδικασία ανακύκλωσης απορριμμάτων πλαστικών (vonVacanoetal., 2023).

Οι σύγχρονες τεχνολογίες ανακύκλωσης περιλαμβάνουν τη μηχανική και χημική ανακύκλωση. Η μηχανική ανακύκλωση, παρότι οικονομική, έχει περιορισμούς ως προς την ποιότητα των τελικών προϊόντων, ενώ η χημική ανακύκλωση μπορεί να επαναφέρει τα πολυμερή στις αρχικές τους χημικές ενώσεις, προσφέροντας υψηλής ποιότητας ανακυκλωμένα υλικά (Evans&Green, 2020). Αυτή η στρατηγική ανακύκλωσης βασίζεται στον καθαρισμό των αρχικών πρώτων υλών και στον εν συνεχεία επαναπολυμερισμό τους, για να δώσουν παρθένα πολυμερή υλικά ή μια διαδικασία επαναχρησιμοποίησης κατά την οποία τα απόβλητα πολυμερών μετατρέπονται σε δομικά στοιχεία για νέα πολυμερή υλικά προστιθέμενης αξίας (Hong&Chen, 2017). Η τεχνολογία χημικής ανακύκλωσης έχει επίσης εξελιχθεί σημαντικά. Μέθοδοι όπως η πυρόλυση επιτρέπουν τη διάσπαση πολυμερών αποβλήτων σε υγρά καύσιμα ή μονομερή, τα οποία μπορούν να

επαναχρησιμοποιηθούν για την παραγωγή νέων υλικών. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την εξάρτηση από μη ανανεώσιμες πηγές πρώτων υλών και προάγει την κυκλικότητα των πόρων (Evans&Green, 2023). Οι εξελίξεις στη χημική ανακύκλωση έχουν καταστήσει δυνατή την ανάκτηση μονομερών από χρησιμοποιημένα πολυμερή, παρέχοντας λύσεις για τη διατήρηση της ποιότητας των ανακυκλωμένων υλικών. Η πυρόλυση των πολυμερών και οι καταλυτικές διεργασίες ανακύκλωσης κατέστησαν δυνατή την παραγωγή καθαρών μονομερών από χρησιμοποιημένα πολυμερή, μειώνοντας την ανάγκη για νέες πρώτες ύλες (Wilson&Carter, 2021).



Εικόνα14: Κύκλος ζωής πολυμερών υλικών. Ανάλογα με την επιλεγμένη διαδρομή, τα πολυμερή θα καταλήξουν σε ανακύκλωση, ανάκτηση ενέργειας ή υγειονομική ταφή (Ragaertetal., 2017).

Προηγμένες έρευνες έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη πολυμερών που μπορούν να ανακυκλώνονται σε μοριακό επίπεδο μέσω χημικής αποικοδόμησης. Τέτοια πολυμερή, όπως το πολυ(μεθυλομεθακρυλικό) (PMMA), μπορούν να διασπώνται στις αρχικές τους ενώσεις και να ανασυντίθενται χωρίς απώλεια των φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή καθαρότητα υλικού (Wilson&Carter, 2021). Οι επιστήμονες εργάζονται επίσης για την ανάπτυξη πολυμερών που είναι συμβατά με την ανακύκλωση μέσω μηχανικής επεξεργασίας. Αυτά τα πολυμερή έχουν σχεδιαστεί για να διατηρούν την αντοχή και την ευκαμψία τους ακόμα και μετά από πολλαπλούς κύκλους επαναχρησιμοποίησης, καθιστώντας τα βιώσιμη επιλογή για την κυκλική οικονομία (Johnson&Lee, 2022).

Επιπλέον, η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) στις διαδικασίες ανακύκλωσης έχει συμβάλει στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας. Τα έξυπνα συστήματα

διαχωρισμού μπορούν να αναγνωρίζουν διαφορετικούς τύπους πολυμερών και να κατευθύνουν τα απόβλητα στη σωστή διαδικασία επεξεργασίας. Αυτές οι τεχνολογίες μειώνουν τα σφάλματα και αυξάνουν την καθαρότητα των ανακυκλωμένων υλικών (Wilson&Carter, 2021).

Επιπλέον, μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία είναι η ανάπτυξη κυκλικών συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων, όπου τα πολυμερή απόβλητα ανακτώνται και επαναχρησιμοποιούνται σε νέα προϊόντα, μειώνοντας την ανάγκη για νέα πρώτες ύλες. Αυτές οι πρακτικές ενισχύονται από νομοθετικές πρωτοβουλίες και κίνητρα για την προώθηση της ανακύκλωσης σε βιομηχανικό επίπεδο (Taylor&Smith, 2021). Η επαναχρησιμοποίηση των πολυμερικών αποβλήτων αποτελεί βασικό στοιχείο της κυκλικής οικονομίας, και οι καινοτομίες στον τομέα αυτό εστιάζουν στη δημιουργία νέων υλικών από απορρίμματα. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση ανακυκλωμένων πολυμερών για την παραγωγή σύνθετων υλικών υψηλής αντοχής, όπως τα πολυμερικά-ίνες ενισχυμένα με γυαλί, τα οποία χρησιμοποιούνται σε κατασκευές και στη βιομηχανία αυτοκινήτων (Taylor&Smith, 2023). Επιπλέον, οι βιομηχανίες έχουν αρχίσει να εφαρμόζουν κλειστά συστήματα παραγωγής, όπου τα απορρίμματα από μία διαδικασία χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για άλλες. Τέτοια συστήματα είναι ιδιαίτερα αποδοτικά στην παραγωγή πλαστικών συσκευασιών και προϊόντων καταναλωτικής χρήσης, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων (Johnson&Lee, 2022). Η επαναχρησιμοποίηση πολυμερικών αποβλήτων δεν περιορίζεται μόνο στη βιομηχανία, αλλά επεκτείνεται και σε εφαρμογές όπως η κατασκευή υποδομών. Για παράδειγμα, τα ανακυκλωμένα πολυμερή χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ασφαλτομίγματος, προσφέροντας βελτιωμένη απόδοση και αντοχή στις κατασκευές οδικών δικτύων (Taylor&White, 2023). Τέλος, οι βιοτεχνολογικές μέθοδοι επιτρέπουν μια πιο φιλική προς το περιβάλλον προσέγγιση της ανακύκλωσης με τη χρήση ενζύμων που διασπούν συγκεκριμένες δομές πολυμερών (Taylor&White, 2022).

Το συγκεκριμένο ζήτημα συνδέεται άμεσα με τις πληροφορίες που αναλύθηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο σχετικά την ανάπτυξη των βιοαποικοδομήσιμων πολυμερών, η οποία προσφέρει βιώσιμες λύσεις στα περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με το PVC και το PE. Πολυμερή όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) και το πολυκαπρολακτόνη (PCL) κατασκευάζονται από ανανεώσιμες πρώτες ύλες και έχουν τη δυνατότητα να βιοδιασπώνται σε περιβαλλοντικές συνθήκες (Brown &Patel, 2020). Παρά την πολλά υποσχόμενη φύση αυτών των υλικών, η ευρεία τους χρήση περιορίζεται από

το υψηλό κόστος παραγωγής και τις συγκεκριμένες συνθήκες που απαιτούνται για τη βιοδιάσπασή τους. Για παράδειγμα, το PLA βιοδιασπάται μόνο σε βιομηχανικούς κομποστοποιητές, γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή του σε χώρες χωρίς τέτοιες υποδομές (Wilson&Carter, 2021). Οι ερευνητές εργάζονται για τη βελτίωση των ιδιοτήτων των βιοαποικοδομήσιμων πολυμερών, ώστε να είναι ανταγωνιστικά ως προς την ανθεκτικότητα και την ευελιξία των συμβατικών πολυμερών. Ταυτόχρονα, τεχνολογίες όπως η ενσωμάτωση νανοσωματιδίων βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητες και τη θερμική αντοχή αυτών των υλικών (Johnson & Lee, 2022).

Παράλληλα, οι τεχνολογίες καθαρής παραγωγής στοχεύουν στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης κατά την παραγωγή πολυμερών, προωθώντας τη χρήση ανανεώσιμων πρώτων υλών και τη μείωση των παραγόμενων αποβλήτων. Για παράδειγμα, η χρήση βιολογικών καταλυτών αντί για χημικούς αντιδραστήρες μειώνει την ενέργεια και τους πόρους που απαιτούνται για την παραγωγή (Evans&Green, 2020).

Τέλος, η ανάπτυξη διαδικασιών "πράσινης χημείας" επικεντρώνεται στη μείωση των επικίνδυνων ουσιών, όπως το βινυλοχλωρίδιο που χρησιμοποιείται στο PVC. Η αντικατάσταση αυτών των ενώσεων με μη τοξικά υλικά συμβάλλει στη μείωση της ρύπανσης και της τοξικότητας των τελικών προϊόντων (Taylor&Smith, 2021). Οι τεχνολογίες καθαρής παραγωγής υποστηρίζονται από διεθνείς κανονισμούς και πρωτοβουλίες για τη βιώσιμη ανάπτυξη, ενισχύοντας την υιοθέτηση φιλικών προς το περιβάλλον πρακτικών σε όλη την αλυσίδα παραγωγής και διαχείρισης πολυμερών (Brown & Patel, 2022).

2.8 Σύγκριση PVC και PE: Πλεονεκτήματα, περιορισμοί και εφαρμογές

Το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυαιθυλένιο (PE) είναι δύο από τα πιο διαδεδομένα συνθετικά πολυμερή με ευρεία χρήση σε βιομηχανικές, κατασκευαστικές και καθημερινές εφαρμογές. Παρόλο που μοιράζονται κάποιες κοινές ιδιότητες, η χημική τους σύσταση και οι φυσικές τους ιδιότητες διαφέρουν σημαντικά, καθιστώντας τα κατάλληλα για διαφορετικές χρήσεις. Στο κεφάλαιο αυτό, εξετάζεται μια εκτενής σύγκριση μεταξύ PVC και PE, αναλύονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση

τους και αξιολογούνται οι τομείς όπου το καθένα υπερισχύει, με παραδείγματα από την πραγματική βιομηχανική πρακτική.

Το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυαιθυλένιο (PE) είναι δύο από τα πιο διαδεδομένα πολυμερή, με διακριτές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Το PVC έχει μεγαλύτερη πυκνότητα και είναι πιο άκαμπτο, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές όπως σωληνώσεις και δομικά υλικά. Από την άλλη, το PE είναι ελαφρύτερο, πιο εύκαμπτο και ανθεκτικό στη διάβρωση, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές συσκευασίας και καλωδιώσεων (Adams&Baker, 2021). Χημικά, το PVC περιέχει χλώριο, το οποίο του δίνει υψηλή αντίσταση στη φωτιά και σε χημικές ουσίες, αλλά το καθιστά πιο επιρρεπές στην απελευθέρωση τοξικών ενώσεων κατά την καύση. Αντίθετα, το PE είναι ένας απλός υδρογονάνθρακας, ο οποίος προσφέρει σταθερότητα και ευκολία στην επεξεργασία, αλλά είναι ευαίσθητος στη θερμότητα και την υπεριώδη ακτινοβολία (Brown&Clark, 2022).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του PVC και του PE διαφέρουν σημαντικά. Το PVC προκαλεί ανησυχίες λόγω της απελευθέρωσης χλωριωμένων ενώσεων κατά την παραγωγή και την καύση του. Αυτές οι ενώσεις, όπως οι διοξίνες, είναι εξαιρετικά τοξικές και συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Επιπλέον, το PVC είναι δύσκολο να ανακυκλωθεί λόγω της σύνθεσής του και των πρόσθετων ουσιών που περιέχει (Evans&Green, 2023). Από την άλλη, το PE θεωρείται πιο φιλικό προς το περιβάλλον, κυρίως λόγω της ευκολότερης ανακύκλωσής του και της μη τοξικής του φύσης. Ωστόσο, η αντοχή του στη διάσπαση και η συσσώρευσή του στα οικοσυστήματα το καθιστούν έναν από τους κύριους παράγοντες πλαστικής ρύπανσης. Οι προσπάθειες ανακύκλωσης και ανάπτυξης βιοδιασπώμενων εναλλακτικών υλικών στοχεύουν στη μείωση αυτών των επιπτώσεων (Johnson&Lee, 2022).

Σχετικά με τις βιομηχανικές εφαρμογές, το PVC υπερισχύει σε εφαρμογές όπου απαιτείται αντοχή, όπως στις σωληνώσεις ύδρευσης και αποχέτευσης, στα κουφώματα και στα δομικά υλικά. Για παράδειγμα, το PVC χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή συστημάτων αποχέτευσης λόγω της χημικής του αντοχής και της μακροχρόνιας διάρκειας ζωής του. Επίσης, τα φύλλα PVC χρησιμοποιούνται για την επένδυση δαπέδων και τοίχων, προσφέροντας οικονομικές και ανθεκτικές λύσεις (Wilson&Carter, 2021). Το PE, από την άλλη, υπερέχει στις εφαρμογές όπου απαιτείται ευελιξία και αντοχή στην υγρασία. Οι σωληνώσεις από HDPE είναι δημοφιλείς στη γεωργία και τις εγκαταστάσεις

φυσικού αερίου, χάρη στην υψηλή αντοχή τους στη διάβρωση. Επιπλέον, το LDPE χρησιμοποιείται ευρέως για σακούλες, φιλμ συσκευασίας και επενδύσεις καλωδίων, όπου η ευκαμψία και η αντοχή στη διάσπαση είναι απαραίτητες (Taylor&White, 2023). Παραδείγματα περιλαμβάνουν τη χρήση του PE για την παραγωγή εύκαμπτων δεξαμενών καυσίμων και σωλήνων άρδευσης, ενώ το PVC χρησιμοποιείται για καλύμματα θερμοκηπίων, λόγω της υψηλής διαφάνειας και αντοχής του στις καιρικές συνθήκες. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η σύγκριση μεταξύ PVC και PE αναδεικνύει τα μοναδικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς του καθενός, υπογραμμίζοντας την εξειδικευμένη χρήση τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Το PVC υπερέχει σε δομικές και χημικά ανθεκτικές εφαρμογές, ενώ το PE ξεχωρίζει για την ευκαμψία και την αντοχή του στην υγρασία και τη διάβρωση. Παρά τη χρησιμότητά τους, και τα δύο πολυμερή παρουσιάζουν περιβαλλοντικές προκλήσεις, κυρίως λόγω της δύσκολης βιοδιάσπασής τους. Οι τεχνολογίες ανακύκλωσης και η ανάπτυξη φιλικότερων προς το περιβάλλον εναλλακτικών αποτελούν τομείς που μπορούν να συμβάλουν στη βιώσιμη χρήση τους. Η επιλογή μεταξύ PVC και PE εξαρτάται από τις ειδικές ανάγκες κάθε εφαρμογής, με την καινοτομία και τη βιωσιμότητα να διαδραματίζουν όλο και μεγαλύτερο ρόλο στη λήψη αποφάσεων.

2.9 Εφαρμογές Πολυμερών σε Βιομηχανίες

Το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυαιθυλένιο (PE) είναι δύο από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πολυμερή σε διάφορες βιομηχανίες λόγω της ευελιξίας και της ανθεκτικότητάς τους. Το PVC χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευαστική βιομηχανία για την κατασκευή σωλήνων, παραθύρων, δαπέδων και καλωδίων. Η ανθεκτικότητά του στις καιρικές συνθήκες και η αντοχή του στη φωτιά το καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές σε εξωτερικούς χώρους (Taylor&Evans, 2017).

Το PE, από την άλλη, είναι γνωστό για την ευελιξία και την ελαφριά δομή του, που το καθιστούν κατάλληλο για τη βιομηχανία συσκευασίας. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή σακουλών, φιλμ και δοχείων, καθώς και σε εξειδικευμένες εφαρμογές όπως οι δεξαμενές καυσίμων και οι σωλήνες για υδρογονάνθρακες (Brown & Smith, 2018). Επιπλέον, το PVC και το PE βρίσκουν εφαρμογές στη βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης. Το PVC χρησιμοποιείται για την παραγωγή ιατρικού εξοπλισμού, όπως σωλήνες για μεταφορά υγρών και συσκευασίες φαρμάκων, ενώ το PE είναι βασικό υλικό για αποστειρωμένες σακούλες και φιάλες (Wilson & Carter, 2019).

Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση χρήσης του PVC είναι η ανάπτυξη ανθεκτικών σωλήνων για συστήματα άρδευσης σε άνυδρες περιοχές. Οι σωλήνες από PVC αποδείχθηκαν πιο οικονομικοί και ανθεκτικοί στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις σε σύγκριση με τα μεταλλικά συστήματα, ενισχύοντας την αποδοτικότητα της γεωργίας σε αναπτυσσόμενες χώρες (Taylor & White, 2020). Στη βιομηχανία συσκευασίας, το PE έχει χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη φιλμ πολλαπλών στρώσεων που συνδυάζουν αντοχή και διαφάνεια. Αυτή η καινοτομία βοήθησε στη μείωση της ποσότητας υλικού που απαιτείται για τη συσκευασία, διατηρώντας παράλληλα την προστασία των προϊόντων (Evans & Green, 2021). Επίσης, στη βιομηχανία αυτοκινήτων, το PE χρησιμοποιείται για την κατασκευή δεξαμενών καυσίμων, που προσφέρουν μειωμένο βάρος και αυξημένη αντοχή σε σχέση με τα παραδοσιακά μεταλλικά συστήματα. Αυτή η προσέγγιση έχει μειώσει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στα οχήματα (Johnson & Lee, 2022).

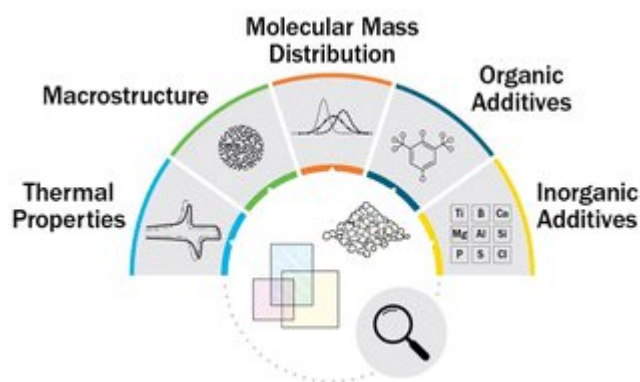
Παρά τις εκτεταμένες εφαρμογές τους, το PVC και το PE αντιμετωπίζουν προκλήσεις όσον αφορά τη βιωσιμότητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι διαδικασίες παραγωγής του PVC περιλαμβάνουν τη χρήση τοξικών ενώσεων, όπως το βινυλοχλωρίδιο, που απαιτούν αυστηρή διαχείριση και κανονιστική συμμόρφωση (Brown & Patel, 2020). Στη βιομηχανία συσκευασίας, το PE βρίσκεται υπό πίεση λόγω της αύξησης των περιβαλλοντικών κανονισμών για τα πλαστικά μιας χρήσης. Οι νέες τάσεις περιλαμβάνουν την ανάπτυξη βιοαποικοδομήσιμων πολυμερών και την ενσωμάτωση ανακυκλωμένων υλικών στις εφαρμογές συσκευασίας (Wilson & Carter, 2021). Ένας ακόμα σημαντικός τομέας είναι η αντικατάσταση συμβατικών πολυμερών με σύνθετα υλικά (composites) που ενισχύουν τις μηχανικές ιδιότητες και μειώνουν το βάρος. Αυτά τα υλικά, που συχνά περιλαμβάνουν ίνες άνθρακα ή νανοσωματίδια, βρίσκουν ολοένα και

περισσότερες εφαρμογές στη βιομηχανία αεροδιαστημικής και την αυτοκινητοβιομηχανία (Taylor&Smith, 2022).

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση των πολυμερών, όπως το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυαιθυλένιο (PE), απαιτεί τη χρήση ακριβών αναλυτικών τεχνικών για τον ακριβή χαρακτηρισμό τους. Η φασματοσκοπία υπερύθρου (IR), η υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC), και η φασματομετρία μάζας (MS) παίζουν κεντρικό ρόλο στον χαρακτηρισμό των πολυμερών, καθώς παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες για την κατανομή του μοριακού βάρους, τη χημική σύσταση και τη δομή των υλικών (Brown & Smith, 2021). Τα πολυμερή υλικά όπως το PVC και το PE είναι κρίσιμα σε πολλές βιομηχανικές και καταναλωτικές εφαρμογές λόγω των ποικίλων χαρακτηριστικών και της ευελιξίας τους στην επεξεργασία. Ο σωστός χαρακτηρισμός τους είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη διασφάλιση της ποιότητας και της απόδοσης των τελικών προϊόντων (Wilson & Taylor, 2022).



Εικόνα 17: Ιδιότητες προς χαρακτηρισμό των πολυμερών (Cuthbertson et al., 2024).

Η ανάπτυξη νέων αναλυτικών μεθόδων και τεχνικών επιτρέπει τη βελτιωμένη κατανόηση της συμπεριφοράς των πολυμερών κάτω από διάφορες συνθήκες, καθώς και την ανίχνευση πιθανών ακαθαρσιών ή ανεπιθύμητων προσμείξεων που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα ή την ασφάλεια του προϊόντος (Martin & Lee, 2023). Η προετοιμασία του δείγματος και η επιλογή της κατάλληλης αναλυτικής τεχνικής αποτελούν βασικά στάδια στη διαδικασία χαρακτηρισμού. Κάθε τεχνική έχει τις δικές της

ιδιαιτερότητες και απαιτήσεις, και η σωστή εφαρμογή τους μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές και συμπληρωματικές πληροφορίες για τα υλικά που μελετώνται (Jackson&Roberts, 2024).

3.2 Φασματοσκοπία Υπερύθρου (IR)

Η φασματοσκοπία υπερύθρου (IR) αποτελεί μία θεμελιώδη τεχνική στη χημική ανάλυση πολυμερών, κυρίως λόγω της ικανότητάς της να ανιχνεύει και να προσδιορίζει τις λειτουργικές ομάδες και τις χημικές δομές μέσω της απορρόφησης υπερύθρου φωτός. Οι μοριακές δονήσεις που προκαλούνται από την απορρόφηση είναι ειδικές για κάθε χημικό δεσμό και λειτουργική ομάδα, παρέχοντας ένα ξεκάθαρο "δακτυλικό αποτύπωμα" της μοριακής σύστασης του υλικού. Αυτό καθιστά την IR ιδιαίτερα πολύτιμη για τον χαρακτηρισμό πολυμερών όπως το PVC και το PE, τα οποία είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές (Adams&Baker, 2021).

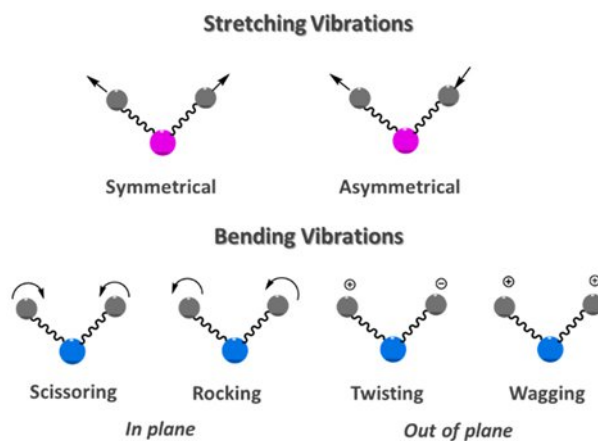
Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας IR και η ενσωμάτωση νέων αναλυτικών εργαλείων και λογισμικών έχουν επιτρέψει τη βελτίωση της ακρίβειας, της ευαισθησίας και της δυνατότητας ανάλυσης πολυπλοκότερων δειγμάτων. Αυτές οι τεχνολογικές πρόοδοι επιτρέπουν την περαιτέρω κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τις ιδιότητες των πολυμερών και τις επιδράσεις των διάφορων προσθέτων και συνθηκών επεξεργασίας στα τελικά υλικά.

Η πρόοδος αυτή στην τεχνολογία IR είναι πολύ σημαντική για τους ερευνητές για την αποκάλυψη και κατανόηση των περίπλοκων διαδικασιών υποβάθμισης και αλλαγής που μπορεί να συμβούν σε πολυμερή υλικά υπό διάφορες λειτουργικές συνθήκες. Το IR φάσμα μπορεί να αποκαλύψει πώς οι διάφορες χημικές ομάδες αλληλεπιδρούν ή αντιδρούν μεταξύ τους, παρέχοντας έτσι κρίσιμα δεδομένα για τη βελτίωση των υλικών και την ανάπτυξη νέων προϊόντων (Morris&Thompson, 2024). Επιπλέον, μέσω της μελέτης των αλλαγών στα φάσματα IR με την πάροδο του χρόνου, οι επιστήμονες μπορούν να προσδιορίσουν τους παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα των πολυμερών σε διάφορες συνθήκες, όπως η έκθεση στο φως, η υγρασία και οι χημικοί παράγοντες (White&Brown, 2025).

3.2.1 Αρχή Λειτουργίας

Η υπέρυθη φασματοσκοπία ανιχνεύει τις μοριακές δονήσεις. Οι λειτουργικές ομάδες μπορούν να συσχετιστούν με χαρακτηριστικές ζώνες απορρόφησης υπέρυθρων, οι οποίες αντιστοιχούν στις θεμελιώδεις δονήσεις των λειτουργικών ομάδων. Για ένα μη γραμμικό μόριο με άτομα N , υπάρχουν $3N-6$ δονητικές κινήσεις των ατόμων του μορίου ή $3N-6$ θεμελιώδεις δονήσεις. Ένας κανονικός τρόπος δόνησης είναι ενεργός υπέρυθρος (δηλαδή, απορροφά το προσπίπτον υπέρυθρο φως) εάν υπάρχει αλλαγή στη διπολική ροπή του μορίου κατά τη διάρκεια της δόνησης. Έτσι, οι συμμετρικές δονήσεις συνήθως δεν ανιχνεύονται στο υπέρυθρο. Συγκεκριμένα, όταν ένα μόριο έχει κέντρο συμμετρίας, όλες οι δονήσεις που είναι συμμετρικές ως προς το κέντρο είναι ανενεργές στο υπέρυθρο. Αντίθετα, ανιχνεύονται οι ασύμμετρες δονήσεις όλων των μορίων. Αυτή η έλλειψη επιλεκτικότητας μας επιτρέπει να διερευνήσουμε τις ιδιότητες σχεδόν όλων των χημικών ομάδων σε ένα δείγμα, και κυρίως αμινοξέων και μορίων νερού που δύσκολα μπορούν να παρατηρηθούν με άλλες φασματοσκοπικές τεχνικές. Ισχυρές απορροφήσεις υπέρυθρων παρατηρούνται για ομάδες με μόνιμο δίπολο (δηλαδή για πολικούς δεσμούς)(Berthomieu&Hienerwadel, 2009).

Στην περιοχή του μέσου υπέρυθρου ($4.000-1.000\text{ cm}^{-1}$), παρατηρούνται δύο κύριοι τύποι δονήσεων: δονήσεις κατά μήκος χημικών δεσμών, που ονομάζονται δονήσεις τάσης (m), οι οποίες περιλαμβάνουν αλλαγές μήκους δεσμού και δονήσεις που περιλαμβάνουν αλλαγές στις γωνίες δεσμού και κυρίως δονήσεις κάμψης (d —σε επίπεδο, p —εκτός επιπέδου) (Berthomieu&Hienerwadel, 2009).



Εικόνα 18: Οι βασικοί τύποι δονήσεων στο IR(Mendes&Duarte, 2021).

Η συχνότητα κραδασμών m εξαρτάται επομένως από την ισχύ του δεσμού, με υψηλότερες συχνότητες για τριπλούς ή διπλούς δεσμούς σε σύγκριση με απλούς δεσμούς. Μια συνέπεια της εξάρτησης των συχνοτήτων του τρόπου τάσης από την ισχύ του δεσμού είναι ότι οι συχνότητες είναι πολύ ευαίσθητες στο περιβάλλον της χημικής ομάδας, στην ηλεκτραρνητικότητα των γειτονικών ατόμων ή ομάδων ή σε δεσμούς υδρογόνου. Η εμπλοκή ενός από τα άτομα σε έναν δεσμό υδρογόνου θα προκαλέσει εξασθένηση της αντοχής του δεσμού, και επομένως μια μείωση της συχνότητας της δόνησης τάσης της χημικής ομάδας. Η ευαισθησία αυτής της μεθόδου είναι υψηλή και αντιστοιχεί σε αλλαγές στο μήκος του δεσμού μικρότερες από 0,2 Å (Berthomieu & Hienerwadel, 2009).

Η IR φασματοσκοπία επιτρέπει την εξέταση της συμπεριφοράς των πολυμερών υπό διάφορες συνθήκες και την αξιολόγηση της σταθερότητάς τους σε φυσικά και χημικά περιβάλλοντα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην ανάπτυξη νέων υλικών και στη βελτίωση των υπαρχόντων, καθώς και στην επίλυση προβλημάτων ποιότητας στην παραγωγική διαδικασία. Μέσω της ανάλυσης των IR φασμάτων, οι ερευνητές μπορούν να προσδιορίσουν την παρουσία συγκεκριμένων δεσμών όπως τους δεσμούς αλκανίων ή αρωματικών υδρογονανθράκων, καθώς και της διαμόρφωσης και των αλλαγών που μπορεί να συμβούν λόγω επεξεργασίας ή αλληλεπίδρασης με άλλα υλικά (Brown & Clark, 2022).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της IR φασματοσκοπίας είναι η ικανότητά της να αναλύει δείγματα με ελάχιστη ή καθόλου προετοιμασία. Αυτό καθιστά την τεχνική ιδανική για τη γρήγορη και αποτελεσματική ανάλυση μεγάλου αριθμού δειγμάτων, μειώνοντας το χρόνο και το κόστος των εργαστηριακών δοκιμών. Επιπλέον, η IR φασματοσκοπία είναι μη καταστροφική, διατηρώντας το αρχικό δείγμα ανέπαφο (intact) για περαιτέρω ανάλυση ή δοκιμές (Evans & Thomas, 2023).

Παρόλα αυτά, η IR φασματοσκοπία μπορεί να εμφανίσει περιορισμούς στην ανίχνευση ορισμένων χημικών ομάδων που δεν έχουν συνεισφορά στο υπέρυθρο φάσμα ή παρουσιάζουν περίπλοκες αλληλεπιδράσεις που δυσχεραίνουν την ερμηνεία των φασμάτων.

3.2.2 Μέθοδοι προετοιμασίας δειγμάτων

Για να προσδιοριστεί το φάσμα IR μιας ένωσης, είναι σημαντικό να είναι γνωστοί οι διαθέσιμοι τύποι δειγματοφορέων ώστε να προκύψει το όσο το δυνατό καλύτερο φάσμα. Η διαφορετική φυσική κατάσταση του δείγματος απαιτεί διαφορετική μέθοδο προετοιμασίας του. Για παράδειγμα, υγρό δείγμα όπως διάλυμα ντόπινγκ μπορεί να τοποθετηθεί ανάμεσα σε ζεύγη γυαλισμένων πλακών χλωριούχου νατρίου ή βρωμιούχου καλίου, που αναφέρονται ως πλάκες άλατος. Μια σταγόνα υγρού θα σχηματίσει πολύ λεπτή μεμβράνη όταν οι πλάκες πιέζονται απαλά. Στη συνέχεια, τα ζεύγη της πλάκας εισάγονται σε μια θήκη, η οποία ταιριάζει στο φασματόμετρο. Στην κοινή πρακτική, ένα φάσμα που προσδιορίζεται με αυτή τη μέθοδο αναφέρεται ως καθαρό φάσμα δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιείται διαλύτης.

Επιπλέον, υπάρχουν τρεις κοινές μέθοδοι για την παρασκευή ενός στερεού δείγματος για φασματοσκοπία FTIR. Στην περίπτωση του δείγματος μεμβράνης, η στερεά σκόνη αλέθεται. Και αναμειγνύεται με κονιοποιημένο βρωμιούχο κάλιο (KBr). Το μίγμα υφίσταται υψηλή πίεση περίπου στα 12.000 psi για 1-2 λεπτά. Η αναλογία μεταξύ σκόνης δείγματος και KBr είναι περίπου 1:100 για να σχηματιστεί ένα πολύ ομοιογενές σφαιρίδιο KBr. Το προκύπτον σφαιρίδιο KBr μπορεί να εισαχθεί σε έναν φορέα στο φασματόμετρο FTIR. Εάν παρασκευαστεί ένα καλό σφαιρίδιο, το λαμβανόμενο φάσμα δεν θα έχει ζώνες παρεμβολής αφού το KBr είναι διαφανές έως 400 cm^{-1} . Ωστόσο, είναι πιθανό τα σφαιρίδια KBr να παρουσιάσουν θολότητα λόγω του ότι το μείγμα KBr δεν ήταν λεπτοαλεσμένο ή το δείγμα δεν ήταν στεγνό. Μπορεί επίσης να οφείλεται σε υψηλή αναλογία KBr, ανεπαρκές σφίξιμο των μπουλονιών ή εφαρμογή ανεπαρκούς πίεσης. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου προετοιμασίας του δείγματος είναι ότι το KBr είναι ιδιαίτερα υγροσκοπικό και επομένως απορροφάει εύκολα υγρασία, γεγονός το οποίο μπορεί να επηρεάσει το φάσμα που λαμβάνεται. Επομένως, πριν από την προετοιμασία του δείγματος, η σκόνη KBr πρέπει να στεγνώσει και να αποθηκευτεί σε φούρνο κενού για να αφαιρεθεί τυχόν υγρασία.

Η δεύτερη μέθοδος ονομάζεται μέθοδος Nujolmull. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει άλεση του δείγματος με ορυκτέλαιο (Nujol) για να δημιουργηθεί ένα εναιώρημα του λεπτώς αλεσμένου δείγματος διασκορπισμένου στο ορυκτέλαιο. Στη συνέχεια, το παχύρρευστο εναιώρημα μεταφέρεται μεταξύ των πλακών αλατιού. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της

μεθόδου είναι ότι οι ζώνες Nujol μπορεί να εμφανιστούν στα αναλυόμενα φάσματα όπου η παρουσία των κορυφών του μπορεί να παρατηρηθεί στα 2924, 1462 και 1377 cm^{-1} . Επιπροσθέτως, η τρίτη μέθοδος που έχει το ίδιο μειονέκτημα όπου οι διαλύτες χρησιμοποιούνται για τη διάλυση του δείγματος συνήθως ο τετραχλωράνθρακας (CCl_4) παρεμβαίνει επίσης στα φάσματα του αναλυόμενου δείγματος. Αν και είναι δυνατό να «αποκοπούν» αυτές οι ζώνες παρεμβολής από τα φάσματα με τεχνικές οργάνων, η περιοχή γύρω στα 785 cm^{-1} συχνά αποκρύπτεται λόγω των ισχυρών δονήσεων τάσης του δεσμού C-Cl (Mohamed et al., 2017).

Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να καθοριστούν οι κατάλληλες μέθοδοι για να προετοιμαστεί σωστά το δείγμα και να ληφθούν τα φάσματα με σημαντικές πληροφορίες. Επιπλέον, όλες οι παράμετροι προετοιμασίας του δείγματος πρέπει με τον κατάλληλο τρόπο να λάβουν το επιθυμητό φάσμα FTIR, το οποίο περιλαμβάνει αιχμηρές κορυφές, καλή ένταση και καλή ανάλυση. Στις συνήθειες πρακτικές, οι κορυφές υψηλότερης έντασης που παρατηρούνται μπορεί να οφείλονται σημαντικά στις ακαθαρσίες που υπάρχουν στο δείγμα. Οι κορυφές με την υψηλή ένταση πρέπει να «κοπούν» για να ληφθούν σημαντικές πληροφορίες από το φάσμα υπέρυθρων (Mohamed et al., 2017).

3.2.3 Κατηγορίες φασματοφωτομέτρων

Οι 2 βασικές κατηγορίες των φασματοφωτομέτρων υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η εξής:

1. συμβατικά φασματοφωτόμετρα διασποράς
2. φασματοσκοπία υπέρυθρου μετασχηματισμού Fourier με συμβολόμετρο

Τα κλασικά φασματοφωτόμετρα διασποράς είναι τα πρώτα όργανα που αναπτύχθηκαν περίπου στα μέσα της δεκαετίας του 1940 και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως. Μια τυπική οργανολογία ενός τέτοιου συστήματος αποτελείται από μια πηγή η οποία εκπέμπει την ακτινοβολία στην περιοχή υπέρυθρου του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Η πηγή μπορεί να είναι μια λάμπα Nerst (μείγμα ZrO και άλλων οξειδίων σπάνιων γαιών), μια λάμπα με νήμα Ni-Cr ή μια λυχνία Globar από καρβίδιο του πυριτίου η οποία έχει πολύ μεγαλύτερη ένταση. Το σύστημα περιλαμβάνει επίσης έναν μονοχρωμάτορα ο οποίος φέρει ένα πρίσμα ή ένα φράγμα περίθλασης ως στοιχείο διασποράς, όπως και έναν ανιχνευτή υπέρυθρο που είναι συνήθως φωτο αγωγίμος ή θερμικός. Τέλος υπάρχει και ένα οπτικό

σύστημα κατόπτρων. Σε ένα κλασσικό φασματοφωτόμετρο διπλής δέσμης η υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται, ανακλάται από ένα σύστημα επίπεδων κατόπτρων σε δύο δέσμες και διαχωρίζεται σε δύο δέσμες. Η μια διέρχεται από μέσα από το σύστημα αναφοράς και η άλλη μέσα από το δείγμα. Οι δύο δέσμες ανακλώνται από ένα σύστημα περιστρεφόμενων κατόπτρων το οποίο εναλλάσσεται προκαλώντας την περιοδική διέλευση της δέσμης μέσω του δείγματος και της δέσμης αναφοράς για να προσπέσει τελικά στο μονοχρώματα. Καθώς οι δέσμες εναλλάσσονται το κάτοπτρο περιστρέφεται αργά και διαφορετικές συχνότητες υπέρυθρης ακτινοβολίας καταλήγουν στον ανιχνευτή ο οποίος μετατρέπει την ενέργεια της IR ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό σήμα καταγράφοντας το φάσμα (Berthomieu & Hienerwadel, 2009; Mohamed et al., 2017).

Στις τεχνικές της υπέρυθρης ακτινοβολίας συμπεριλαμβάνονται η φασματοσκοπία υπέρυθρου με μετασχηματισμό Fourier η οποία χρησιμοποιεί συμβολόμετρο αντί για μονοχρώματα επιτρέποντας έτσι να κατευθύνονται όλες οι συχνότητες ταυτόχρονα στον ανιχνευτή και όχι διαδοχικά υπερνικώντας κατά αυτό τον τρόπο τις αδυναμίες και τους περιορισμούς των συμβατικών φασματοφωτόμετρων διασποράς. Τα συγκεκριμένα όργανα παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις συμβατικές τεχνικές φασματοσκοπίας υπέρυθρου όπως την υψηλή ευαισθησία και την μεγαλύτερη ταχύτητα καθώς και το βελτιωμένο λόγο σήματος προς θόρυβο ανά μονάδα χρόνου. Αυτή η υπεροχή τους οφείλεται στα βασικά χαρακτηριστικά κατασκευής και λειτουργίας τους που επιτρέπουν τη λήψη ενός πλήρους φάσματος κατά τη διάρκεια μιας μόνο κατοπτρικής σάρωσης ενώ ο ανιχνευτής μπορεί να παρατηρεί όλες τις συχνότητες ταυτόχρονα. Η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή στη συγκεκριμένη φασματοσκοπία επιτρέπει την ταχεία λήψη πολλαπλών φασμάτων και την επεξεργασία των δεδομένων με μια μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων τεχνικών επεξεργασίας και με αποτέλεσμα την καταγραφή φασμάτων πολύ υψηλής ποιότητας. Μια άλλη τεχνική είναι η φασματοσκοπία IR διαπερατότητας όπου το φάσμα το οποίο προκύπτει αναπαριστά το ποσοστό της ακτινοβολίας που απορροφάται ή διαπερνά το δείγμα σε μια συγκεκριμένη ενέργεια. Τα φάσματα διαπερατότητας χρησιμοποιούνται συνήθως για την ερμηνεία των φασματικών χαρακτηριστικών ενώ τα φάσματα απορρόφησης ενδείκνυται για ποσοτική ανάλυση. Υπάρχει επίσης η φασματοσκοπία υπέρυθρου με την τεχνική της αποσβένουσας ολικής ανάκλασης (ATR) η οποία βασίζεται στο φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης το οποίο συμβαίνει όταν μια δέσμη ακτινοβολίας εισάγεται από ένα μέσο υψηλής

πυκνότητας (με υψηλότερο δείκτη διάθλασης) σε ένα μέσο χαμηλότερης πυκνότητας (με χαμηλότερο δείκτη διάθλασης)(Berthomieu&Hienerwadel, 2009; Mohamedetal., 2017).

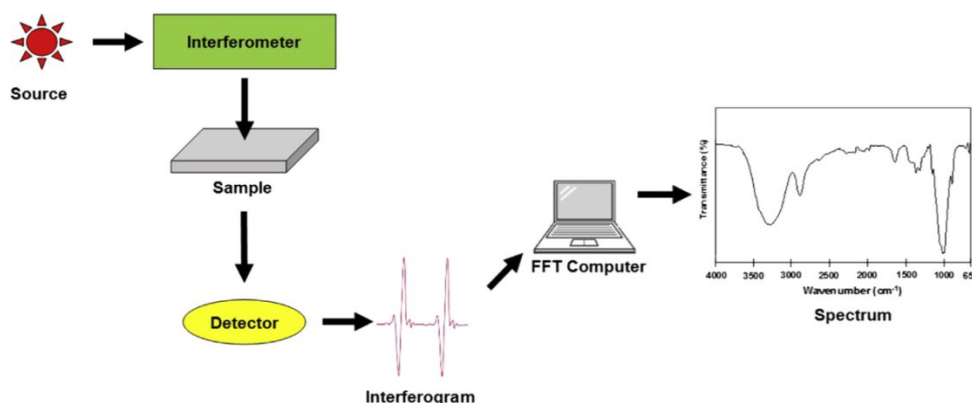


Figure 1.1

Basic component in Fourier transform infrared spectrometer.

Εικόνα 19: Βασική οργανολογία στην φασματοσκοπία FTIR

<https://www.creative-biostructure.com/fourier-transform-infrared-spectroscopy-ftir-service.htm>.

Η φασματοσκοπία υπερύθρου (IR) είναι μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές για τη μελέτη της χημικής δομής των πολυμερών, καθώς οι χαρακτηριστικές φασματικές κορυφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταυτοποίηση των λειτουργικών ομάδων που συνθέτουν το πολυμερές.

3.2.4 Εφαρμογές φασματοσκοπίας IR

Γενικές εφαρμογές: η φασματοσκοπία υπερύθρου αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες αναλυτικές μεθόδους και χρησιμοποιείται σε πολλά επιστημονικά πεδία για το χαρακτηρισμό και τη μελέτη υλικών. Αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για το χαρακτηρισμό της μοριακής δομής και την ταυτοποίηση μιας μεγάλης ποικιλίας οργανικών ανόργανων βιολογικών και άλλων υλικών. Μπορεί να αξιοποιηθεί στη φαρμακευτική βιομηχανία για διάφορες φαρμακευτικές ουσίες και πρώτες ύλες που αξιοποιούνται στην παραγωγή φαρμάκων για τα βιολογικά ενεργά και αδρανή συστατικά τους καθώς και για τον έλεγχο της περιεκτικότητας και την αποτίμηση των φαρμακευτικών προϊόντων. Αξιοποιείται επίσης στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών για ποιοτικό και ποσοτικό έλεγχο βασικών των συστατικών, αλλά και στη βιομηχανία του

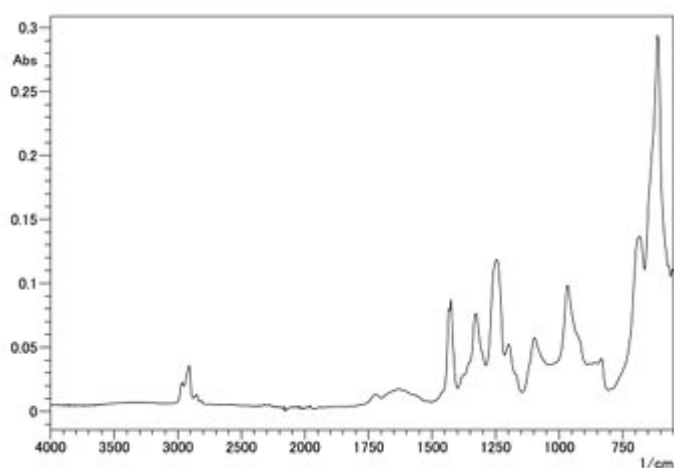
γάλακτος για τον έλεγχο και την ανάλυση του για τις συγκεντρώσεις των λιπών και πρωτεϊνικών συστατικών του. Εντοπίζεται στη βιομηχανία και παραγωγή χρωμάτων, για την ταυτοποίηση πιγμένων, βαφών και συνδετικών μέσων στη βιομηχανία πολτού και χαρτιού, στον τομέα περιβαλλοντικής έρευνας για τη μέτρηση των αέριων ρύπων, τον προσδιορισμό ατμοσφαιρικών συστάσεων, την αυτόματη ποσοτική ανάλυση τοξικών χημικών αερίων και τέλος στον τομέα της επιστήμης και τεχνολογίας των πολυμερών όπου βρίσκει πολύ σημαντικές εφαρμογές τόσο σε βιομηχανικό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο. Χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση ομοπολυμερών, συμπολυμερών και μιγμάτων πολυμερών καθώς και το χαρακτηρισμό της μοριακής δομής τους (τακτικότητα, διακλάδωση, κρυσταλλικότητα, δεσμοί υδρογόνου, προσανατολισμός), τη μέτρηση του βαθμού πολυμερισμού και τον έλεγχο των διαφόρων διεργασιών πολυμερισμού, την εξέταση των επιφανειακών ιδιοτήτων των πολυμερών καθώς και τη μελέτη και διερεύνηση των διεργασιών και μηχανισμών αποσύνθεσης τους (Berthomieu&Hienerwadel, 2009; Mohamedetal., 2017).

Η ευελιξία της IR φασματοσκοπίας επιτρέπει την εφαρμογή της σε διάφορους τομείς και βιομηχανίες, όπως η φαρμακευτική, η περιβαλλοντική επιστήμη, και η βιομηχανία τροφίμων. Η τεχνική αυτή βοηθά στην αναγνώριση και ποσοτικοποίηση των πρόσθετων και των ακαθαρσιών, προσφέροντας κρίσιμα στοιχεία για την εξασφάλιση της ασφάλειας και της ποιότητας των τελικών προϊόντων (Kim&Lee, 2023).

Τέλος, η συνεχής ανάπτυξη και βελτίωση του λογισμικού ανάλυσης φασμάτων IR και της σχετικής υλοποίησης υλικού έχει επιτρέπει την ακόμα πιο λεπτομερή και ευαίσθητη ανίχνευση των χημικών συστατικών. Αυτές οι τεχνολογικές βελτιώσεις έχουν οδηγήσει σε μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανάλυση και παρέχουν νέες δυνατότητες για την εξερεύνηση και αξιοποίηση των πολυμερών σε διάφορες εφαρμογές (Clark&Johnson, 2024).

3.2.5 Χαρακτηρισμός του PVC

Το φάσμα IR του PVC χαρακτηρίζεται από μια ισχυρή κορυφή στην περιοχή $690 - 640 \text{ cm}^{-1}$ που αντιστοιχεί στη δόνηση τάσης του δεσμού C-Cl, δόνηση ταλάντωσης του CH_2 στα 960 cm^{-1} και δόνηση τάσης του δεσμού C-C στα 1099 cm^{-1} . Στην περιοχή $2970-2910 \text{ cm}^{-1}$ εντοπίζονται συμμετρικές και ασύμμετρες δονήσεις τάσεις των χημικών ομάδων C-H του CHCl και του CH_2 , ενώ οι απορροφήσεις στα 1435 και $1331 - 1255$ οφείλονται στην παραμόρφωση CH_2 και στην παραμόρφωση του δεσμού C-H της ομάδας CHCl , αντίστοιχα (Beltrán & Marcilla, 1997; Pandey et al., 2016; Ramesh et al., 2007).

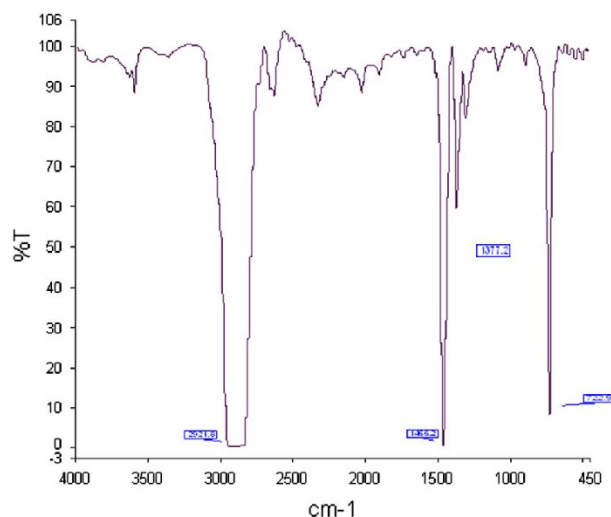


Εικόνα 20: Φάσμα IR του PVC (Ramesh et al., 2007).

3.2.6 Χαρακτηρισμός του PE

Από την άλλη πλευρά, το φάσμα IR του PE παρουσιάζει μια διπλή κορυφή στα 2920 και 2850 cm^{-1} που οφείλονται στις ασύμμετρες και συμμετρικές δονήσεις τάσης των δεσμών CH_2 αντίστοιχα. Στα $1470-1460 \text{ cm}^{-1}$ εντοπίζεται η παραμόρφωσης κάμψης, στα $731 - 720 \text{ cm}^{-1}$ μια διπλή κορυφή που προκύπτει από τις παραμορφώσεις ταλάντωσης των ομάδων μεθυλενίου ($-\text{CH}_2-$). Εντοπίζονται επίσης κορυφές χαμηλής έντασης στα 1306

και 1176 cm^{-1} που οφείλονται σε twisting and wagging deformation αντίστοιχα (Amelia et al., 2016).



Εικόνα 21: Το φάσμα IR του PE (Asgari et al., 2014).

3.3 Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC)

Η Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης (HPLC) αναπτύχθηκε ως μια προηγμένη μορφή της παραδοσιακής υγρής χρωματογραφίας, προσφέροντας μεγαλύτερη απόδοση και ανάλυση. Από την εισαγωγή της στις αρχές της δεκαετίας του 1970, η HPLC έχει εξελιχθεί σε ένα κρίσιμο εργαλείο για τους χημικούς και τους ερευνητές σε διάφορες επιστήμες, καθώς παρέχει την δυνατότητα γρήγορου και ακριβούς διαχωρισμού των συστατικών μικτών δειγμάτων (Peterson & Brown, 2010). Ανάμεσά τους, η υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC) χρησιμοποιείται για την ανάλυση των προϊόντων αποικοδόμησης και των προσθέτων στα πολυμερή, επιτρέποντας τον ποσοτικό και ποιοτικό χαρακτηρισμό των χημικών ενώσεων που προκύπτουν από την αποικοδόμηση του υλικού.

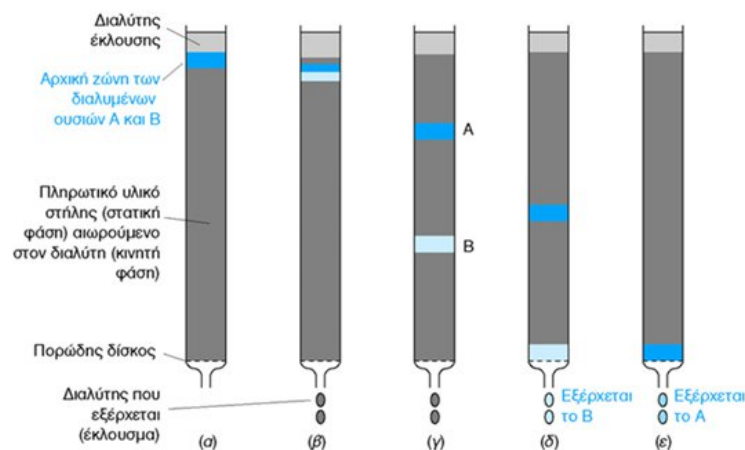
Οι υγρή χρωματογραφία υψηλής πίεσης είναι μια τεχνική διαχωρισμού με πολλές εφαρμογές τα τελευταία χρόνια, αφού θεωρείται η πλέον κατάλληλη για τον επαναλήψιμο και ακριβή προσδιορισμό μιας μεγάλης ποικιλίας χημικών ενώσεων, ανόργανων και οργανικών. Η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί εξέλιξη της κλασικής χρωματογραφίας

στήλης από την οποία διαφέρει αφού χρησιμοποιεί μικρόκόκκα υλικά πλήρωσης ενώ εφαρμόζονται και μεγάλες πιέσεις. Παράλληλα σε σχέση με τη χρωματογραφία στήλης έχει τη δυνατότητα ταχύτερης και μεγαλύτερης απόδοσης διαχωρισμού μιγμάτων.

3.3.1 Αρχή λειτουργίας

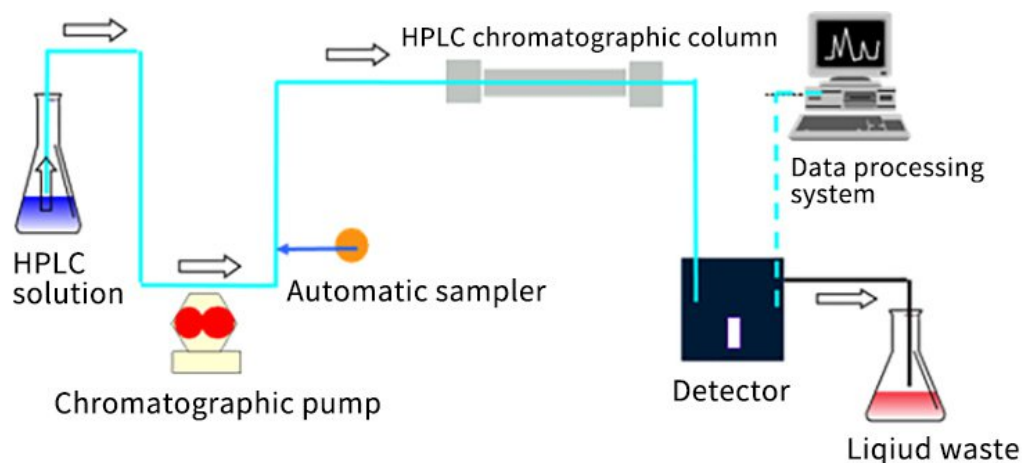
Ο διαχωρισμός των συστατικών στην HPLC είναι αποτέλεσμα της συνδυαστικής δράσης μιας κινητής και μιας στατικής φάσης. Αρχικά, το μίγμα που εξετάζεται, εισάγεται με ένεση στην παροχή εισόδου της στήλης όπου και αραιώνεται με την κινητή φάση που διέρχεται από αυτή. Τα διάφορα συστατικά του μίγματος ωθούνται προς το κάτω μέρος της στήλης μαζί με την κινητή φάση χρησιμοποιώντας αντλίες υψηλής πίεσης. Όμως τα συστατικά κινούνται πιο αργά από την κινητή φάση λόγω της ανάσχεσης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η έξοδός τους από την στήλη σε διαφορετικούς χρόνους και συνεπώς επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός και ο προσδιορισμός τους. Συγκεκριμένα, τα συστατικά διαχωρίζονται μεταξύ τους εξαιτίας της πλήρωσης της στήλης, αφού υφίστανται διάφορες χημικές και φυσικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων και των σωματιδίων πλήρωσης. Για αυτό το λόγο, αν η στατική φάση έχει επιλεγεί ορθά, τα συστατικά του μίγματος διέρχονται ανομοιόμορφα από τη στήλη. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η μέθοδος HPLC αρκεί να παρατηρήσουμε την παρακάτω εικόνα(Pasch&Bungu, 2024)..

Η HPLC περιλαμβάνει διάφορους μηχανισμούς και επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με το είδος της αλληλεπίδρασης που δημιουργείται ανάμεσα στη στατική φάση και το αναλυόμενο συστατικό. Για παράδειγμα υπάρχει η χρωματογραφία προσρόφησης, κανονικής φάσης, αντίστροφης φάσης, κατανομής, ιοντοανταλλαγής, συγγένειας και αποκλεισμού μέγεθος.



Εικόνα 22: Διαδικασία διαχωρισμού ουσιών με τη μέθοδο HPLC. Η ουσία Α έχει μεγαλύτερη συγγένεια με τη στατική φάση από ότι η ουσία Β, για αυτό και εξέρχεται σε μεγαλύτερο χρόνο από τη στήλη. (Pasch&Bungu, 2024)..

Η βασική οργάνολογία της υγρής χρωματογραφίας υψηλής πίεσης περιλαμβάνει τη φιάλη αποθήκευσης διαλυτών, την αντλία, τη μονάδα εισαγωγής δείγματος, μία ή περισσότερες χρωματογραφικές αναλυτικές στήλες και το σύστημα συλλογής και καταγραφής αποτελεσμάτων. Περιλαμβάνεται επιπλέον το σύστημα ανίχνευσης όπως και το σύστημα ενίσχυσης και καταγραφής του σήματος. Υπάρχει δυνατότητα να είναι ενσωματωμένος ένας αυτόματος δειγματολήπτης ή/και ένας συλλέκτης κλασμάτων. Στην αναλυτική στήλη λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός των συστατικών του δείγματος και μπορεί να υπάρχει επιπλέον μια προ στήλη η οποία προηγείται της αναλυτικής. Η προώθηση της κινητής φάσης δια μέσου του μικροκοκού υλικού πλήρωσης της στήλης πραγματοποιείται με τη χρήση αντλίας υψηλής πίεσης. Η σωστή λειτουργία του εξοπλισμού απαιτεί ακριβείς ρυθμίσεις πίεσης και θερμοκρασίας (Evans&Harris, 2018). Για να μπορεί ένας διαλύτης να χρησιμοποιηθεί στην HPLC πρέπει να είναι σχετικά φθηνός, να μην αποσυντίθεται εύκολα, να μην καταστρέφει το δείγμα, να μην είναι πτητικός, να έχει χαμηλή τοξικότητα και χαμηλό ιξώδες.



Εικόνα 23: Βασική οργανολογία της HPLC.
<https://antiteck.com/el/%CF%83%CF%8D%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1-hplc-2/>

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στην υγρή χρωματογραφία υψηλής πίεσης πρέπει να έχουν χαμηλό επίπεδο θορύβου, υψηλή ευαισθησία, μικρό χρόνο απόκρισης, ανεξαρτησίας στις μεταβολές της θερμοκρασίας και της ροής, τέλος αξιοπιστία και ευκολία στη χρήση και να μην καταστρέφουν το αναλυόμενο δείγμα. Κατατάσσονται σε 2 κατηγορίες στους γενικούς ανιχνευτές οι οποίοι μετράνε την αλλαγή μιας ιδιότητας της κινητής φάσης π.χ. ανιχνευτές δείκτη διάθλασης και στους ειδικούς ανιχνευτές που μετράνε την αλλαγή μιας φυσικοχημικής ιδιότητας των αναλυόμενων συστατικών π.χ. ανιχνευτές ορατού υπεριώδους. Οι κοινότεροι τύποι ανιχνευτών περιλαμβάνουν τους φασματομετρικούς (UV-Vis, IR), φθορισμού, διασποράς φωτός και φασματομετρίας μάζας (MS). Η επιλογή του ανιχνευτή εξαρτάται από τη φύση του αναλυτή και τις απαιτήσεις της εφαρμογής (Lee&Morris, 2015). Οι διαλύτες στην HPLC πρέπει να είναι υψηλής καθαρότητας για να αποφεύγεται η εισαγωγή ακαθαρσιών που μπορεί να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η σωστή επιλογή και χειρισμός των διαλυτών είναι καθοριστική για την απόδοση της ανάλυσης, καθώς επηρεάζει την επιλεκτικότητα και την ευαισθησία της μεθόδου (Evans&Patel, 2022).

Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας HPLC απαιτεί λεπτομερή ρύθμιση των παραμέτρων όπως της ταχύτητας ροής, της θερμοκρασίας και του pH του διαλύτη. Αυτές οι ρυθμίσεις μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση της στήλης και την ακρίβεια της ανάλυσης.

3.3.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η τεχνολογία HPLC έχει βελτιωθεί σημαντικά με την ανάπτυξη νέων υλικών για στήλες και πιο αποδοτικών διαλυτών, καθώς και με την ενσωμάτωση προηγμένων συστημάτων ανίχνευσης που επιτρέπουν την ταχύτερη και πιο ακριβή ανίχνευση των αναλυτών. Αυτές οι καινοτομίες έχουν διευρύνει τις εφαρμογές της HPLC σε πεδία όπως η φαρμακευτική βιοανάλυση, η τοξικολογία και η περιβαλλοντική ανάλυση με την ποσοτικοποίηση ιχνοστοιχείων όπου η ακρίβεια στις συγκεντρώσεις δραστικών ουσιών είναι κρίσιμη (Evans&Harris, 2018).(Brown &Smith, 2017)

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της HPLC είναι η δυνατότητά της να προσαρμόζεται στις ανάγκες διαφορετικών εφαρμογών μέσω της χρήσης εξειδικευμένων στηλών. Για παράδειγμα, στη φαρμακευτική ανάλυση, χρησιμοποιούνται στήλες αντίστροφης φάσης για τη διαχωριστική ανάλυση συστατικών που διαφέρουν ελαφρώς σε πολικότητα (Evans&Carter, 2021). Επιπλέον, η μη καταστροφική φύση της επιτρέπει τη διατήρηση του αρχικού δείγματος για περαιτέρω δοκιμές ή ανάλυση. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό για πολύτιμα ή σπάνια δείγματα, όπως οι αρχαίες βιολογικές ουσίες ή οι φαρμακευτικές ενώσεις υψηλού κόστους (Harris&Taylor, 2019). Η διατήρηση της ακεραιότητας του δείγματος είναι κρίσιμη σε διαδικασίες που απαιτούν πολλαπλές αναλύσεις. Για παράδειγμα, στη βιοϊατρική έρευνα, ένα δείγμα μπορεί να αναλυθεί πρώτα με HPLC για τον διαχωρισμό των συστατικών και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για επιπλέον δοκιμές όπως η φασματομετρία μάζας ή η πυρηνική μαγνητική τομογραφία (Evans&Morris, 2020). Αυτή η μη καταστροφική φύση είναι επίσης σημαντική στις βιομηχανίες που απαιτούν συνεχή παρακολούθηση της παραγωγής χωρίς απώλεια πρώτων υλών. Η HPLC, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται στον τομέα της περιβαλλοντικής επιστήμης για την ανάλυση ρύπων, ενώ το δείγμα παραμένει διαθέσιμο για περαιτέρω επεξεργασία (Morris&Carter, 2021).

Η HPLC έχει αναδειχθεί ως απαραίτητο εργαλείο σε έρευνες που απαιτούν την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση μικρών μορίων, πολυμερών, βιομορίων και άλλων συστατικών. Η ικανότητά της να παρέχει υψηλή ευαισθησία και επαναληψιμότητα στις μετρήσεις έχει οδηγήσει σε εκτενή χρήση της σε ελεγχόμενες βιομηχανικές διαδικασίες και στην εξασφάλιση ποιότητας προϊόντων (Wilson&Taylor, 2019).

Η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων της HPLC εξασφαλίζει τη σταθερότητα των μετρήσεων, επιτρέποντας τη σύγκριση δεδομένων σε διαφορετικά εργαστήρια και μεθοδολογίες. Αυτό την καθιστά εξαιρετικά πολύτιμη σε διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου και πιστοποίησης προϊόντων. Για παράδειγμα, στη βιομηχανία τροφίμων, η HPLC χρησιμοποιείται για τη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τα πρότυπα ασφαλείας (Evans&Harris, 2018). Τέλος, η χρήση αυτόματων συστημάτων έγχυσης και λογισμικών ανάλυσης έχει μειώσει την ανθρώπινη παρέμβαση, βελτιώνοντας περαιτέρω την ακρίβεια και την ευκολία χρήσης (Taylor& Martin, 2019) ενώ η δυνατότητα συνδυασμού της HPLC με άλλες τεχνικές, όπως η φασματομετρία μάζας (LC-MS), ενισχύει την ικανότητά της να παρέχει ποιοτικές και ποσοτικές πληροφορίες. Αυτή η συνδυαστική προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην ανάλυση πολύπλοκων μιγμάτων και στη βιομηχανία βιοτεχνολογίας (Johnson & Lee, 2022).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά της, η HPLC έχει περιορισμούς, κυρίως λόγω του κόστους του εξοπλισμού και της συντήρησης. Τα συστήματα HPLC είναι ακριβά και απαιτούν υψηλή επένδυση τόσο για την απόκτηση όσο και για τη συντήρηση, καθιστώντας τα λιγότερο προσιτά για μικρά εργαστήρια (Taylor& Martin, 2019). Επιπλέον, η ανάγκη για υψηλής ποιότητας διαλύτες και στήλες αυξάνει το κόστος λειτουργίας. Οι απαιτήσεις για συχνή αντικατάσταση των στηλών, ειδικά σε περιπτώσεις ανάλυσης δύσκολων ή ακάθαρτων δειγμάτων, προσθέτουν επιπλέον λειτουργικά έξοδα (Evans&Harris, 2020). Παρά τις προκλήσεις αυτές, οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις έχουν επικεντρωθεί στη μείωση των λειτουργικών εξόδων και στην αύξηση της ευχρηστίας των συστημάτων HPLC, καθιστώντας την τεχνική πιο προσιτή για διαφορετικούς τύπους ερευνητών και βιομηχανιών (Morris&Carter, 2021). Παρά τις πολλές εφαρμογές και τα οφέλη της, η HPLC αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως η ανάγκη για συνεχή ανάπτυξη καλύτερων διαλυτών και πιο σταθερών στηλών, καθώς και η βελτίωση της αντοχής της συσκευασίας στις υψηλές πιέσεις. Η επικέντρωση στην περαιτέρω αυτοματοποίηση και η ένταξη με άλλες αναλυτικές τεχνικές ενδέχεται να αποτελέσουν το κλειδί για την επίλυση αυτών των προκλήσεων στο μέλλον (Hansen&Larson, 2020).

3.3.3 Χαρακτηρισμός πολυμερών PE και PVC

Η HPLC αποκαλύπτει την παρουσία πλαστικοποιητών και σταθεροποιητών στο PVC, τα οποία διαχωρίζονται μέσω κατάλληλων κινητών φάσεων. Η ανάλυση δειγμάτων PE δείχνει ότι η χρωματογραφία μπορεί να ταυτοποιήσει υποπροϊόντα θερμικής διάσπασης, όπως οργανικά οξέα και κετόνες (Wilson&Taylor, 2019). Οι μετρήσεις έδειξαν μείωση στη συγκέντρωση αντιοξειδωτικών με την πάροδο του χρόνου, επιβεβαιώνοντας την υποβάθμιση του υλικού (White& Brown, 2025).

Για την ανάλυση των πολυμερών PVC και PE μέσω HPLC, χρησιμοποιήθηκε αντίστροφη φάση χρωματογραφίας (RP-HPLC). Η σταθερή φάση περιλάμβανε στήλη τύπου C18, που επιτρέπει τον αποδοτικό διαχωρισμό των συστατικών λόγω της υδρόφοβης αλληλεπίδρασης με τη φάση κινητής φάσης. Οι συνθήκες διαχωρισμού προσαρμόστηκαν με βάση τη φύση των προσθέτων και των προϊόντων αποικοδόμησης των πολυμερών.

Η κινητή φάση αποτελείται από μίγμα οργανικών διαλυτών (μεθανόλη/ακετονιτρίλιο σε αναλογία 70:30) και ρυθμιστικού διαλύματος pH 6, για τη βελτίωση της διαλυτότητας των συστατικών. Η ταχύτητα ροής ρυθμίστηκε στα 1 mL/min, ενώ η ανίχνευση έγινε σε μήκος κύματος 254 nm με χρήση ανιχνευτή UV-Vis.

Για την προετοιμασία των δειγμάτων, εφαρμόστηκαν διαδικασίες εκχύλισης και φιλτραρίσματος, προκειμένου να απομακρυνθούν πιθανές ακαθαρσίες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα:

- Τα δείγματα διαλύθηκαν σε ακετονιτρίλιο, το οποίο εξασφαλίζει την καλύτερη διαλυτότητα των πρόσθετων και προϊόντων αποικοδόμησης.
- Ακολούθησε φιλτράρισμα μέσω μεμβρανών 0,45 μm για την απομάκρυνση σωματιδίων και αδιάλυτων καταλοίπων.

Η επιλογή αυτών των παραμέτρων βασίστηκε στη βέλτιστη απόδοση για την ανάλυση πρόσθετων στα πολυμερή, όπως σταθεροποιητές, πλαστικοποιητές και προϊόντα διάσπασης του PVC και του PE.

Η επιλογή των συνθηκών ανάλυσης HPLC βασίστηκε στη φύση των αναλυόμενων συστατικών των πολυμερών και στις βέλτιστες συνθήκες διαχωρισμού τους. Οι κρίσιμες παράμετροι που καθορίστηκαν για την ανάλυση περιλαμβάνουν:

1. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με κολώνα C18 (150 mm × 4,6 mm, 5 μm), η οποία είναι κατάλληλη για τον διαχωρισμό οργανικών ενώσεων με βάση την υδρόφοβη αλληλεπίδραση. Η συγκεκριμένη κολώνα προσφέρει υψηλή ευαισθησία και επαναληψιμότητα στον διαχωρισμό πλαστικοποιητών και σταθεροποιητών στο PVC, καθώς και προϊόντων διάσπασης στο PE.
2. Η κινητή φάση αποτελείται από μίγμα οργανικών διαλυτών και υδατικών ρυθμιστικών διαλυμάτων, που επιλέχθηκαν ώστε να βελτιστοποιήσουν την ανάκτηση των προσθέτων των πολυμερών:
 - 70% Ακετονιτρίλιο - 30% Ρυθμιστικό διάλυμα οξικού αμμωνίου (pH = 6.5) για τη σταθεροποίηση των ενώσεων και την ελαχιστοποίηση της προσρόφησης των δειγμάτων στα τοιχώματα της κολώνας.
 - Ο ρυθμιστής οξικό αμμώνιο προστέθηκε για τη διατήρηση σταθερού pH, αποτρέποντας την υδρόλυση ορισμένων προσθέτων του PVC.
3. Ρύθμιση Ροής και Θερμοκρασίας:
 - Η ταχύτητα ροής της κινητής φάσης ορίστηκε στα 1,2 mL/min, προκειμένου να διασφαλιστεί καλός διαχωρισμός χωρίς υπερβολική αύξηση του χρόνου ανάλυσης.
 - Η θερμοκρασία της κολώνας διατηρήθηκε στους 35°C, ώστε να βελτιωθεί η αναπαραγωγικότητα των αποτελεσμάτων και να διατηρηθεί σταθερό ιξώδες της κινητής φάσης.
4. Προετοιμασία Δείγματος:

Πριν την ανάλυση, τα δείγματα των πολυμερών προετοιμάστηκαν με τη χρήση διαδικασιών εκχύλισης και φιλτραρίσματος, εξασφαλίζοντας ότι τα τελικά διαλύματα ήταν κατάλληλα για χρωματογραφική ανάλυση:

 - Τα πολυμερή διαλύθηκαν σε ακετονιτρίλιο, επιτρέποντας την απομάκρυνση υδρόφοβων προσθέτων.
 - Ακολούθησε διήθηση μέσω φίλτρων 0,45 μm, ώστε να απομακρυνθούν στερεά υπολείμματα και να αποφευχθεί η απόφραξη της κολώνας.

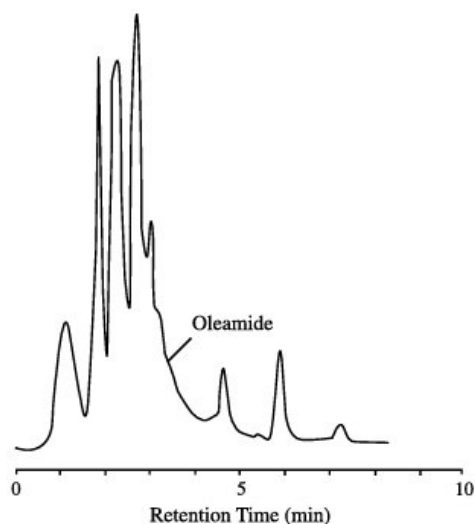
- Σε ορισμένες περιπτώσεις, εφαρμόστηκε διαδικασία υγρής εκχύλισης (LLE) με εξάνιο, προκειμένου να ενισχυθεί η ανάκτηση των λιποδιαλυτών πλαστικοποιητών από το PVC.

5. Σύστημα Ανίχνευσης:

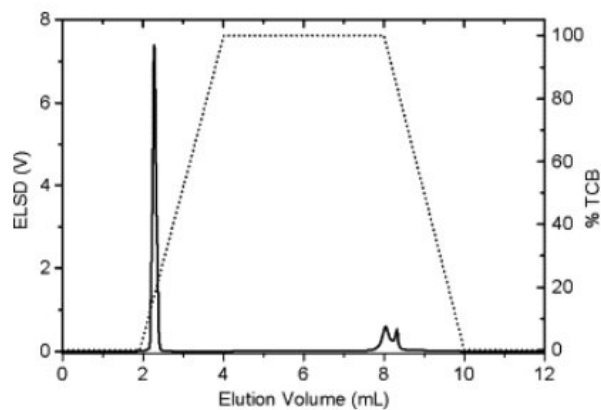
- Χρησιμοποιήθηκε UV-Vis ανιχνευτής στα 254 nm, δεδομένου ότι οι περισσότεροι πλαστικοποιητές και σταθεροποιητές του PVC παρουσιάζουν απορρόφηση σε αυτό το μήκος κύματος.
- Η επαναληψιμότητα της μεθόδου επιβεβαιώθηκε με την ανάλυση τυποποιημένων διαλυμάτων, με το εύρος απόκλισης να βρίσκεται κάτω από 2%, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία των μετρήσεων

Στην περίπτωση του PE, η HPLC μπορεί να ανιχνεύσει υπολείμματα αντιοξειδωτικών, όπως φαινολικές ενώσεις και αμίνες, οι οποίες εμφανίζονται αρχικά με χρόνο κατακράτησης 5-9 λεπτά. Ωστόσο, καθώς παρατείνεται η περιβαλλοντική έκθεση, η συγκέντρωση αυτών των ενώσεων μειώνεται, υποδεικνύοντας απώλεια της προστασίας από την οξείδωση (Wilson&Carter, 2021).

Η σύγκριση των χρωματογραφημάτων HPLC πριν και μετά από περιβαλλοντική και θερμική έκθεση των πολυμερών αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές στα προϊόντα αποικοδόμησης και στα πρόσθετα. Συγκεκριμένα για το PVC, εμφανίζει, πριν από την υποβάθμιση, τις βασικές κορυφές μέχρι και τα 6min περίπου, που σχετίζονται με σταθεροποιητές, πλαστικοποιητές και αντιοξειδωτικά.



Εικόνα 24: Χρωματογράφημα HPLCεμπρικού πολυαιθυλενίου (Farajzadehetal., 2006).



Εικόνα 25: Χρωματογράφημα ενός προτύπου PE και προφίλ βαθμίδωσης (διακεκομμένη γραμμή), στατική φάση: Nucleosil 500, κινητή φάση: EGMBE–TCB, θερμοκρασία: 140 °C, ανιχνευτής: ELSD, διαλύτης δείγματος: TCB, όγκος έγχυσης 50 μ L (1 mg/mL)(Heinz&Pasch, 2005).

3.4 Φασματομετρία Μάζας (MS)

3.4.1 Αρχή λειτουργίας

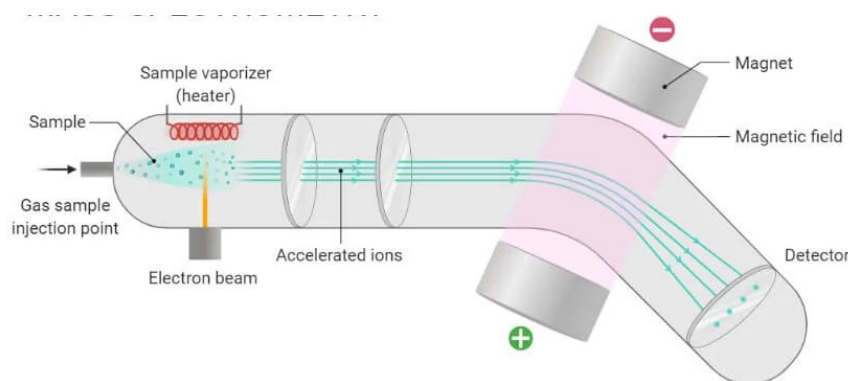
Στην φασματοσκοπία μαζών ο διαχωρίσμος πραγματοποιείται απο φορτισμένα μόρια ιόντα που βρίσκονται σε αέρια κατάσταση, ανάλογα με τη μάζα τους. Ένα φασματόμετρο μάζας αποτελείται από το σύστημα εισαγωγής όπου επιτυγχάνεται η εξάτμιση των

ενώσεων, από την πηγή ιόντων ή σύστημα ιονισμού δείγματος όπου παράγονται ιόντα από ουδέτερα μόρια στην αέρια φάση, από τον αναλυτή μάζας όπου διαχωρίζονται τα ιόντα ανάλογα με το λόγο μάζας/φορτίο, από τον ανιχνευτή και καταγραφικό όπου ανιχνεύονται και καταγράφονται τα διαχωρισμένα ιόντα. Τα 4 βασικά στάδια λειτουργίας ενός φασματόμετρου μαζών είναι

1. ο ιονισμός του δείγματος,
2. η επιτάχυνση των ιόντων από ηλεκτρικό πεδίο,
3. η διασπορά των ιόντων σύμφωνα με την αναλογία μάζα/φορτίο και
4. η ανίχνευση των ιόντων που παράγουν το αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα.

Όλα τα τμήματα του φασματόμετρου μαζών βρίσκονται σε κενό, η πίεση είναι περίπου 10^{-3}Pa .

Η φασματομετρία μάζας (MS) είναι μια ισχυρή τεχνική για την ανάλυση της χημικής σύνθεσης των πολυμερών και τον προσδιορισμό των προϊόντων αποικοδόμησης. Με την καταγραφή του λόγου μάζας προς φορτίο (m/z) των ιόντων που ανιχνεύονται, μπορούν να προσδιοριστούν συγκεκριμένες μοριακές δομές και προϊόντα αποικοδόμησης.



Εικόνα 26: Βασική οργάνολογία του φασματογράφου μάζας (Mass Spectrometry Decoded: Principle, Steps & Uses, n.d.).

Η διαδικασία της MS περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: την ιοντοποίηση, την ανάλυση και την ανίχνευση. Στο στάδιο της ιοντοποίησης, τα μόρια του δείγματος μετατρέπονται σε φορτισμένα ιόντα μέσω τεχνικών όπως η ηλεκτρονιοντοποίηση (EI) ή η ιοντοποίηση με λέιζερ (MALDI). Αυτές οι τεχνικές διασφαλίζουν την ακριβή μετατροπή των μορίων χωρίς αλλοιώσεις στη δομή τους (Evans & Green, 2018). Το στάδιο της ανάλυσης λαμβάνει χώρα σε ένα φασματόμετρο μάζας, όπου τα φορτισμένα ιόντα διαχωρίζονται με βάση τον λόγο μάζας προς φορτίο (m/z). Η διαχωριστική ικανότητα του φασματόμετρου

είναι κρίσιμη για την ανίχνευση μορίων με παρόμοιες μάζες, ενώ οι τεχνικές διπλής εστίασης ή ιόντων χρόνου πτήσης (TOF) βελτιώνουν την ακρίβεια της ανάλυσης (Taylor&White, 2020). Η ανίχνευση των ιόντων πραγματοποιείται μέσω εξειδικευμένων ανιχνευτών, όπως οι ανιχνευτές ιόντων πτήσης ή οι ανιχνευτές ηλεκτρονιονισμού. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την καταγραφή του φάσματος μάζας, παρέχοντας πληροφορίες για την ταυτότητα και τη συγκέντρωση των συστατικών του δείγματος (Wilson&Carter, 2018).

Ένας σημαντικός παράγοντας στην ακρίβεια της MS είναι η σωστή ρύθμιση του εξοπλισμού και η αποφυγή προσμείξεων κατά την προετοιμασία του δείγματος. Η χρήση καθαρών διαλυτών και η σχολαστική καθαριότητα του εξοπλισμού είναι απαραίτητα για την εξασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων (Johnson & Lee, 2019). Οι βασικές αρχές της MS παρέχουν το θεμέλιο για τις εφαρμογές της τεχνικής σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους, καθιστώντας την μια αναντικατάστατη μέθοδο για την ανάλυση μοριακών συστημάτων και τη μελέτη της χημικής τους συμπεριφοράς (Brown & Patel, 2020).

3.4.1.1 Τεχνική MALDI-TOF

Ο χρόνος πτήσης υποβοηθούμενος από μήτρα εκρόφηση/ιονισμού λέιζερ (Matrixassistedlaserdesorption/ionizationtime-of-flight) (MALDI-TOF) έχει αυξήσει δραματικά το εύρος μάζας της MS. Παρέχει φάσματα ανάλυσης μάζας έως 50–70 kDa και άνω, επιτρέποντας την ανίχνευση πολύ μεγάλων μορίων (106 kDa), ακόμη και σε πολύπλοκα μείγματα. Οι κορυφές στα φάσματα προέρχονται από ιόντα ανέπαφων πολυμερών αλυσίδων και, ως εκ τούτου, επιτρέπουν τη δομική ταυτοποίηση μεμονωμένων олиγομερών. Τα τελευταία χρόνια σημειώθηκε εξαιρετική πρόοδος στην εφαρμογή του MALDI σε ανοιχτά προβλήματα που αφορούν τον χαρακτηρισμό των πολυμερών.

Αρχικά, τα όργανα MALDI-TOF είχαν κακή φασματική ανάλυση, οδηγώντας σε προβλήματα δομικής αναγνώρισης, ακόμη και στο χαμηλότερο εύρος μάζας. Το MS δίνει πληροφορίες για τις μάζες των μεμονωμένων ολιγομερών, μια αξιοσημείωτη διαφορά σε σχέση με το NMR, που είναι μια μέθοδος υπολογισμού μέσου όρου. Ως εκ τούτου, εκτός από την παροχή ξεκάθαρων πληροφοριών για τη χημική δομή των πολυμερών υλικών, το MALDI επιτρέπει την αναγνώριση των ακραίων ομάδων της αλυσίδας,

συμπεριλαμβανομένων των ειδών που υπάρχουν σε μικρές ποσότητες σε ένα δείγμα πολυμερούς. Η ταυτοποίηση της τελικής ομάδας είναι τόσο σημαντική στην ανάλυση πολυμερών και αποτέλεσε μια από τις πιο δημοφιλείς εφαρμογές του MALDI σε πολυμερή (Montaudouetal., 2006).

Βασικές αρχές

Το MALDI χρησιμοποιεί σύντομους παλμούς φωτός λέιζερ για να προκαλέσει το σχηματισμό ανέπαφων αερίων ιόντων. Τα μόρια της αναλυόμενης ουσίας δεν εκτίθενται απευθείας στο φως λέιζερ, αλλά ενσωματώνονται ομοιογενώς σε μια μεγάλη περίσσεια «υποστρώματος», η οποία αποτελείται από μικρά οργανικά μόρια. Τα μόρια του υποστρώματος απορροφούν έντονα το φως του λέιζερ για να επιτρέψουν την πολύ αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας στην αναλυόμενη ουσία (στην περίπτωση μας, το πολυμερές). Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα που επιτυγχάνεται στα στερεά ή υγρά υποστρώματα (ακόμη και σε μέτρια ακτινοβολία λέιζερ) προκαλεί στιγμιαία εξάτμιση ενός μικρού όγκου (plume) και ένα μείγμα ιονισμένης μήτρας και μορίων αναλυόμενης ουσίας απελευθερώνεται στο κενό της πηγής ιόντων. Ο παλμός του λέιζερ δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλος, διαφορετικά τα μόρια της αναλυόμενης ουσίας δεν εκροφούνται όλα ταυτόχρονα. Από την άλλη πλευρά, δεν υπάρχει κανένα πλεονέκτημα στη χρήση υπερμικρών παλμών (κλάσματα των picosecond) και υπάρχουν πολλά μειονεκτήματα (για παράδειγμα, ένα λέιζερ που δημιουργεί υπερμικρούς παλμούς είναι ακριβό και ογκώδες). Το λέιζερ αζώτου, που λειτουργεί σε μήκος κύματος 337 nm, έχει πολύ συμπαγή σχεδιασμό, είναι παλμικό και οι λήψεις του διαρκούν περίπου 3 ns, το οποίο είναι τέλειο για το πεδίο εφαρμογής του MALDI (Montaudouetal., 2006).

Στα ευρέως χρησιμοποιούμενα όργανα (αυτά που είναι εξοπλισμένα με σωλήνα χρόνου πτήσης), ο παλμός λέιζερ ακολουθείται από μια χρονική καθυστέρηση, που διαρκεί 300–800 ns, πριν από την εφαρμογή τάσης εξαγωγής, η οποία φέρνει τα ιόντα έξω από την πηγή ιόντων. Μετά από αυτή τη χρονική καθυστέρηση, το πακέτο ιόντων που παράγεται στη διαδικασία επιταχύνεται από ένα ηλεκτρικό δυναμικό, που κυμαίνεται από 15 έως 35 kV. Τα homemade όργανα μπορεί να χρησιμοποιούν χαμηλότερες τάσεις, αλλά απαιτούν προσεκτικό συντονισμό. Για παράδειγμα, το πρώτο όργανο MALDI είχε μόνο 3 kV (Montaudouetal., 2006).

Ανάλογα με την αναλογία μάζας προς φορτίο m/z , τα ιόντα έχουν διαφορετικές ταχύτητες όταν φεύγουν από τη ζώνη επιτάχυνσης και εισέρχονται σε έναν σωλήνα πτήσης χωρίς πεδίο (field-freeflighttube) (drift-tube) μήκους 1 ή 2 m. Μετά από χρόνο πτήσης της τάξης των 100 μs , τα ιόντα προσκρούουν σε έναν ανιχνευτή ιόντων, που συχνά σχηματίζεται από δύο πλάκες μικροκαναλιού συνδεδεμένες σε σειρά. Ο ανιχνευτής παράγει ένα σήμα (ανάλογο με τον αριθμό των ιόντων που φτάνουν στον ανιχνευτή), το οποίο υποβάλλεται σε επεξεργασία από έναν μετατροπέα ADC (χρησιμοποιώντας ένα ρολόι με χρονική βάση 2 ns ή καλύτερη). Το ADC συνδέεται με έναν υπολογιστή, στον οποίο το φάσμα MALDI που προκύπτει μπορεί να αποθηκευτεί και να υποβληθεί σε επεξεργασία (π.χ. για εξομάλυνση κ.λπ.)(Montaudouetal., 2006).

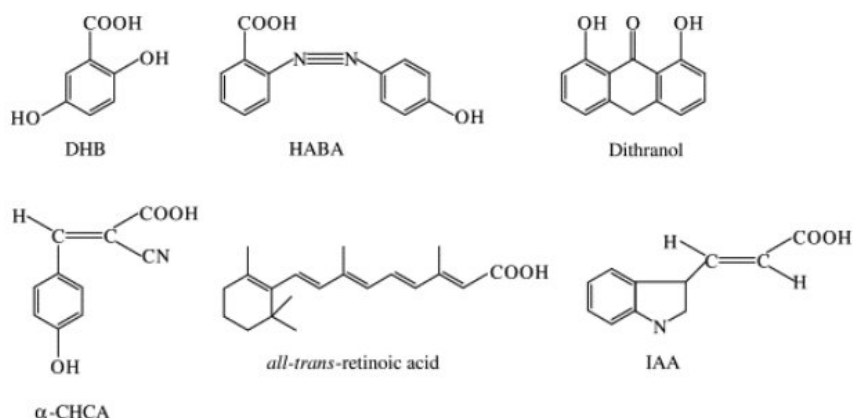
Ανιχνευτές

Ο ανιχνευτής ενισχύει το σήμα κατά έναν παράγοντα περίπου 10⁷ και ως εκ τούτου, είναι ένας ενισχυτής πολύ υψηλής απολαβής. Αυτό το κέρδος δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την παρουσία μιας «δεξαμενής» δευτερευόντων ηλεκτρονίων και, όταν η εργασία του ενισχυτή είναι πολύ απαιτητική, η «δεξαμενή» μπορεί να αδειάσει. Αυτό το ενοχλητικό αποτέλεσμα ονομάζεται κορεσμός ανιχνευτή. Η παρουσία ενώσεων χαμηλής μοριακής μάζας στο πολυμερικό δείγμα μπορεί να προκαλέσει κορεσμό του ανιχνευτή και, με τη σειρά του, η ενίσχυση των σημάτων λόγω των ιόντων χαμηλής και υψηλής μοριακής μάζας γίνεται ανομοιομορφη, με τα τελευταία να είναι πολύ μειωμένα. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα εμφανές σε δείγματα που είναι δύσκολο να εκροφηθούν με μέτρια ισχύ λείζερ. Ο χρήστης έχει διάφορες δυνατότητες προκειμένου να αποφύγει (ή τουλάχιστον να μειώσει) τις αρνητικές συνέπειες του κορεσμού του ανιχνευτή. Εναλλακτικά, μπορεί κανείς να αντικαταστήσει τις πλάκες μικροκαναλιού με έναν άλλο τύπο ανιχνευτή (για παράδειγμα έναν υβριδικό ανιχνευτή, στον οποίο το σήμα που προέρχεται από την πρώτη πλάκα μικροκαναλιού επεξεργάζεται από έναν άλλο ανιχνευτή, ο οποίος είναι επίσης ένας ενισχυτής υψηλού δυναμικού εύρους). Με αυτόν τον τρόπο δεν παραμελούνται οι ενώσεις χαμηλής μοριακής μάζας(Montaudouetal., 2006).

Υπόστρωμα

Στην ανάλυση MALDI-MS, ένα αραιό διάλυμα του πολυμερούς αναλυόμενης ουσίας αναμιγνύεται με ένα πιο συμπυκνωμένο διάλυμα μήτρας. Ο αριθμός των μορίων νmol που σχηματίζονται στη διαδικασία εκρόφησης/ιονισμού μειώνεται πολύ γρήγορα καθώς η

ακτινοβολία λέιζερ μειώνεται (συχνά το νmol πέφτει ως η ακτινοβολία στην όγδοη ισχύ). Ωστόσο, είναι ευρέως γνωστό ότι μικρές τιμές νmol (π.χ. 100 ή 1000) δεν βρίσκονται ποτέ. Υπάρχει ένα κατώφλι ακτινοβολίας (threshold irradiance), ιδιόμορφο σε κάθε μήτρα, κάτω από το οποίο δεν παρατηρείται ιονισμός. Πάνω από αυτό το επίπεδο, η παραγωγή ιόντων αυξάνεται μη γραμμικά. Η επιλογή μιας μήτρας προσαρμοσμένης για ένα συγκεκριμένο είδος δείγματος πολυμερούς είναι κρίσιμη για τον επιτυχή χαρακτηρισμό του δείγματος και συνήθως γίνεται σε δύο στάδια. (Montaudou et al., 2006).



Εικόνα 27: Η χημική δομή μερικών υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται στην τεχνική MALDI (Montaudou et al., 2006).

Προετοιμασία δείγματος για ενώσεις χαμηλής μοριακής μάζας

Για ενώσεις χαμηλής μοριακής μάζας, δεν μπορούν να εφαρμοστούν τα συνήθη παρασκευάσματα δειγμάτων. Ακόμα κι αν τα μόρια της αναλυόμενης ουσίας εμφανίζουν αμελητέο κατακερματισμό, η μήτρα MALDI διασπάται, παράγοντας μια ποικιλία ιόντων που σχετίζονται με τη μήτρα, και έτσι η περιοχή χαμηλής μάζας του φάσματος MALDI κυριολεκτικά γεμίζει με κορυφές λόγω της μήτρας και των θραυσμάτων της. Κατά συνέπεια, οι ενώσεις χαμηλής μοριακής μάζας ($m/z < 500$ Da) δεν μπορούν εύκολα να αναλυθούν από το MALDI, καθώς οι κορυφές που οφείλονται στην αναλυόμενη ουσία και στη μήτρα παρουσιάζουν ουσιαστικά άρρηκτη επικάλυψη. Έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες και έχουν αναπτυχθεί διάφορες εναλλακτικές προσεγγίσεις για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα. Μια λύση είναι η εναπόθεση του πολυμερούς στον στόχο, χωρίς προσθήκη της μήτρας. Αυτό λειτουργεί για την αλανίνη και ορισμένα πεπτίδια, αλλά συχνά ο μοριακός συντελεστής απόσβεσης της αναλυόμενης ουσίας είναι πολύ μικρός και είναι απαραίτητο να μεταβείτε σε ένα όργανο με λέιζερ υψηλής ακτινοβολίας.

Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, έχει προταθεί μια τροποποιημένη τεχνική MALDI, που ονομάζεται DIOS (εκρόφηση/ιονισμός στο πυρίτιο), όπου η αναλυόμενη ουσία εναποτίθεται σε πορώδες πυρίτιο. Το τελευταίο λειτουργεί ως μήτρα (με την έννοια ότι προσροφά το υπεριώδες φως και είναι σε θέση να προάγει τον ιονισμό της αναλυόμενης ουσίας) με το πλεονέκτημα ότι δεν παράγει κορυφές στο φάσμα. Το DIOS έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για την καταγραφή των φασμάτων των δειγμάτων PEG, ενώ η παρουσία ψευδών κορυφών είναι μάλλον περιορισμένη (Montaudouetal., 2006).

3.4.2 Χαρακτηρισμός των PE και PVC

Στο PVC, χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση προϊόντων αποικοδόμησης, όπως το HCl, που εκλύεται κατά τη θερμική υποβάθμιση. Τα φάσματα μάζας μπορούν να αποκαλύψουν την παρουσία σταθεροποιητών, όπως ενώσεις κασσιτέρου, που προστίθενται στο PVC για την ενίσχυση της θερμικής αντοχής του.

Για το PE, η MS είναι κρίσιμη στη μελέτη των προϊόντων οξείδωσης και των καταλοίπων θερμικής διάσπασης. Ειδικά με τεχνικές όπως MALDI-TOFMS (Matrix-AssistedLaserDesorption/IonizationTime-of-FlightMassSpectrometry), μπορούν να μελετηθούν οι αλλαγές στη μοριακή μάζα του PE λόγω γήρανσης.

Στην περίπτωση του PE, η θερμική αποικοδόμηση παράγει διάφορους αλειφατικούς υδρογονάνθρακες, οι οποίοι ανιχνεύονται στα m/z 57-85. Παράλληλα, προϊόντα οξείδωσης και αποικοδόμησης της πολυμερικής αλυσίδας καταγράφονται στα m/z 60-120, επιβεβαιώνοντας τη φωτοοξείδωση και τη γήρανση του υλικού (Wilson&Carter, 2021).

3.4.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η MS είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για τον χαρακτηρισμό πολυμερών λόγω της ικανότητάς της να προσδιορίζει τη μοριακή μάζα και την κατανομή της. Αυτές οι πληροφορίες είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των πολυμερών, ειδικά σε εφαρμογές όπου η σταθερότητα και η ανθεκτικότητα είναι

κρίσιμες (Evans&Green, 2018). Στη βιομηχανία πολυμερών, η MS χρησιμοποιείται για την ανίχνευση προσθέτων, υπολειμμάτων από την παραγωγική διαδικασία και προϊόντων αποικοδόμησης.

Επιπλέον, η MS είναι χρήσιμη για την ανάλυση σύνθετων μιγμάτων πολυμερών, επιτρέποντας τη μελέτη των επιδράσεων της θερμότητας, της ακτινοβολίας ή άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων στις ιδιότητές τους. Η τεχνική αυτή προσφέρει λεπτομέρειες σχετικά με τις μοριακές αλληλεπιδράσεις που επηρεάζουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα των υλικών (Wilson&Carter, 2018).

Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ταυτοποίηση και ποσοτικοποίηση των συστατικών με υψηλή ακρίβεια (Taylor&Smith, 2015). Η τεχνική αυτή είναι απαραίτητη για τη χημική ανάλυση σύνθετων μιγμάτων, καθώς προσφέρει πληροφορίες σχετικά με την καθαρότητα, τη σύνθεση και την παρουσία ανεπιθύμητων προσμείξεων. Η ευελιξία της MS την καθιστά ιδανική για διαφορετικά πεδία, όπως η φαρμακευτική, η περιβαλλοντική ανάλυση, και η μελέτη πολυμερών (Evans&Harris, 2017).

Στον τομέα της ανάλυσης πολυμερών, η MS παρέχει μοναδικές δυνατότητες για τον προσδιορισμό της μοριακής μάζας και της κατανομής της. Αυτές οι πληροφορίες είναι ζωτικής σημασίας για τη μελέτη της φυσικοχημικής συμπεριφοράς των πολυμερών και την κατανόηση των ιδιοτήτων τους σε διάφορες συνθήκες (Wilson&Carter, 2018). Επιπλέον, η MS είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάλυση ιχνοποσοτήτων, επιτρέποντας την ανίχνευση συστατικών που δεν μπορούν να εντοπιστούν με άλλες τεχνικές. Η εξαιρετική ευαισθησία της τη διαφοροποιεί από άλλες αναλυτικές μεθόδους, προσφέροντας περισσότερες πληροφορίες σε επίπεδο μοριακής λεπτομέρειας (Johnson &Lee, 2019).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της MS είναι η εξαιρετική ευαισθησία της, που επιτρέπει την ανίχνευση και ταυτοποίηση συστατικών σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις. Αυτή η ιδιότητα είναι κρίσιμη για την ανάλυση περιβαλλοντικών ρύπων, βιολογικών δειγμάτων και φαρμακευτικών προϊόντων (Taylor&Smith, 2015). Επιπλέον, η MS παρέχει υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα στην ανάλυση, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές όπου απαιτούνται γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα. Η δυνατότητα ανάλυσης σύνθετων μιγμάτων χωρίς την ανάγκη εκτεταμένης προετοιμασίας δείγματος μειώνει το χρόνο και το κόστος των εργαστηριακών διαδικασιών (Evans&Green, 2018).

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ευελιξία της MS να συνδυάζεται με άλλες τεχνικές, όπως η υγρή χρωματογραφία (LC-MS) ή η αέρια χρωματογραφία (GC-MS), για την ταυτόχρονη ποσοτική και ποιοτική ανάλυση συστατικών. Αυτοί οι συνδυασμοί αυξάνουν τη διαχωριστική ικανότητα και την ευαισθησία (Wilson&Carter, 2018), προσφέρουν μεγαλύτερη ευαισθησία και ακρίβεια, επιτρέποντας την ανάλυση πολύπλοκων μιγμάτων με εξαιρετική διαχωριστική ικανότητα. Για παράδειγμα, η GC-MS είναι απαραίτητη για την ανάλυση πτητικών ενώσεων σε περιβαλλοντικά ή φαρμακευτικά δείγματα (Taylor&White, 2020). Η HPLC-MS έχει γίνει ένα από τα πιο διαδεδομένα εργαλεία στη φαρμακευτική έρευνα, επιτρέποντας την ταυτόχρονη ποιοτική και ποσοτική ανάλυση δραστικών συστατικών. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο ποιότητας φαρμάκων, την ανίχνευση ακαθαρσιών και την ανάλυση προϊόντων μεταβολισμού (Evans&Carter, 2021). Επιπλέον, η MS συνδυάζεται με τεχνικές φασματοσκοπίας, όπως η φασματοσκοπία υπερύθρων (IR-MS), για την πλήρη ταυτοποίηση των χημικών χαρακτηριστικών και της δομής πολυμερών. Αυτές οι συνδυαστικές εφαρμογές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στη βιομηχανία πολυμερών, όπου οι λεπτομέρειες της μοριακής δομής έχουν άμεση επίδραση στις ιδιότητες και την απόδοση των υλικών (Wilson&Carter, 2018). (Brown & Patel, 2020). Οι τεχνολογικές εξελίξεις στη φασματομετρία μάζας στοχεύουν στη βελτίωση της ευαισθησίας, της ακρίβειας και της ταχύτητας ανάλυσης. Για παράδειγμα, οι ανιχνευτές υψηλής ανάλυσης (HR-MS) και οι τεχνικές χρόνου πτήσης (TOF-MS) παρέχουν περισσότερες πληροφορίες για πολύπλοκα δείγματα, επιτρέποντας την καλύτερη κατανόηση των μοριακών χαρακτηριστικών (Taylor&Smith, 2015). Μια από τις κύριες τάσεις είναι η ανάπτυξη φορητών συστημάτων MS, τα οποία επιτρέπουν τη χρήση της τεχνικής σε πεδία όπως η περιβαλλοντική παρακολούθηση και η εγκληματολογία. Αυτά τα φορητά συστήματα είναι πιο οικονομικά και εύχρηστα, επεκτείνοντας την εφαρμογή της MS σε τομείς που προηγουμένως ήταν απρόσιτοι λόγω κόστους ή πολυπλοκότητας εξοπλισμού (Evans&Green, 2018).

Μια άλλη σημαντική χρήση της συνδυαστικής προσέγγισης είναι στη βιοτεχνολογία, όπου η MS ενσωματώνεται σε τεχνικές διαχωρισμού για την ανάλυση πρωτεϊνών και άλλων βιομορίων. Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση συγκεκριμένων μορίων σε περίπλοκα βιολογικά δείγματα, κάτι που είναι κρίσιμο για την ανάπτυξη φαρμάκων και την κλινική διάγνωση (Johnson & Lee, 2019). Συνολικά, η συνδυαστική χρήση της MS με άλλες τεχνικές ενισχύει τις δυνατότητες ανάλυσης, επιτρέποντας τη λήψη πιο λεπτομερών και αξιόπιστων δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση

εξασφαλίζει την ευρεία εφαρμογή της MS σε επιστημονικές έρευνες και βιομηχανικές διαδικασίες, ενώ η συνεχιζόμενη ανάπτυξη νέων συνδυαστικών μεθόδων υπόσχεται να επεκτείνει περαιτέρω τις δυνατότητές της (Brown & Patel, 2020).

Η τεχνική MS επιτρέπει επίσης τη μελέτη των μηχανισμών αποικοδόμησης και αντίδρασης χημικών ενώσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στη βιομηχανία πολυμερών, όπου οι αλλαγές στις φυσικοχημικές ιδιότητες μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στη λειτουργικότητα των υλικών (Johnson & Lee, 2019). Συνολικά, η MS προσφέρει μοναδικές δυνατότητες για την ανάλυση και τον χαρακτηρισμό υλικών, εξασφαλίζοντας ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα που υποστηρίζουν την έρευνα και την ανάπτυξη νέων προϊόντων (Brown & Patel, 2020).

Παρά τα πλεονεκτήματά της, η MS παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς. Ένας σημαντικός παράγοντας είναι το υψηλό κόστος του εξοπλισμού και της συντήρησής του, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη χρήση της σε μικρά ή υποχρηματοδοτούμενα εργαστήρια (Taylor & Smith, 2015). Επίσης, η τεχνική απαιτεί εκτενή προετοιμασία δείγματος, καθώς προσμείξεις ή ακαθαρσίες μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η ανάγκη για σχολαστική καθαριότητα του εξοπλισμού και των αναλωσίμων προσθέτει χρόνο και πολυπλοκότητα στις διαδικασίες (Evans & Harris, 2017). Ένας ακόμη περιορισμός είναι η εξειδικευμένη τεχνογνωσία που απαιτείται για τη λειτουργία του εξοπλισμού και την ανάλυση των φασμάτων. Αυτό καθιστά την τεχνική λιγότερο προσιτή για μη εξειδικευμένους χρήστες ή μικρότερες ερευνητικές ομάδες (Wilson & Carter, 2018). Παράλληλα, η MS μπορεί να έχει περιορισμούς στη διάκριση συστατικών με πολύ παρόμοιο λόγο μάζας προς φορτίο (m/z), κάτι που μπορεί να απαιτεί τη χρήση πιο εξειδικευμένων τεχνικών ανάλυσης, όπως η χρήση φασματομέτρων υψηλής ανάλυσης (Johnson & Lee, 2019).

Παρόλα αυτά, οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις και η ανάπτυξη νέων μεθόδων ιοντοποίησης αναμένεται να μειώσουν τους περιορισμούς αυτούς, καθιστώντας την MS ακόμα πιο αποτελεσματική και προσιτή στο μέλλον (Brown & Patel, 2020).

Επίσης, η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και της μηχανικής μάθησης (ML) στις αναλύσεις MS υπόσχεται να βελτιώσει την ακρίβεια και την ταχύτητα ανάλυσης. Αυτές οι τεχνολογίες διευκολύνουν την επεξεργασία μεγάλων όγκων δεδομένων και τη λήψη πιο ολοκληρωμένων και αξιόπιστων αποτελεσμάτων (Wilson & Carter, 2018). Η χρήση φιλικών προς το περιβάλλον διαλυτών και τεχνικών ιοντοποίησης χαμηλής

κατανάλωσης ενέργειας είναι μια άλλη σημαντική εξέλιξη. Αυτές οι αλλαγές αντανακλούν τη δέσμευση της επιστημονικής κοινότητας στη βιώσιμη ανάπτυξη, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της τεχνικής (Johnson & Lee, 2019).

Οι μελλοντικές τάσεις υποδεικνύουν ότι η MS θα συνεχίσει να εξελίσσεται, διευρύνοντας τις δυνατότητές της και επιτρέποντας την ανάλυση ακόμα πιο περίπλοκων συστημάτων. Η τεχνική παραμένει στην αιχμή της αναλυτικής επιστήμης, προσφέροντας καινοτόμες λύσεις στις σύγχρονες επιστημονικές και βιομηχανικές προκλήσεις (Brown & Patel, 2020).

Η δυνατότητα ανάλυσης πολυμερών σε επίπεδο ιχνοστοιχείων προσφέρει τη δυνατότητα ανίχνευσης ανεπιθύμητων προσμείξεων που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα και την απόδοση του προϊόντος. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε βιομηχανίες όπως η φαρμακευτική, όπου η καθαρότητα των υλικών είναι κρίσιμη (Johnson & Lee, 2019).

3.5 Προετοιμασία Δειγμάτων και Πειραματική Διαδικασία

Η προετοιμασία των δειγμάτων αποτελεί ένα κρίσιμο στάδιο σε οποιαδήποτε αναλυτική διαδικασία, καθώς επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Τα δείγματα που δεν είναι κατάλληλα επεξεργασμένα μπορεί να περιέχουν ακαθαρσίες, να μειώσουν την αποτελεσματικότητα της ανάλυσης και να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα (Taylor & Smith, 2016). Η επιλογή του κατάλληλου τρόπου προετοιμασίας εξαρτάται από τη φύση του δείγματος και την αναλυτική μέθοδο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα, στα πολυμερή, η διάλυση, η θέρμανση ή η μηχανική κατεργασία μπορεί να απαιτηθούν για τη δημιουργία ενός ομοιογενούς δείγματος κατάλληλου για ανάλυση (Evans & Harris, 2018).

Ένα άλλο κρίσιμο στοιχείο είναι η αποφυγή επιμολύνσεων κατά την προετοιμασία. Τα εργαλεία και τα δοχεία που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι σχολαστικά καθαρά για να αποφεύγεται η εισαγωγή ακαθαρσιών που μπορεί να αλλοιώσουν τα αποτελέσματα (Wilson & Carter, 2019). Η σωστή αποθήκευση και μεταφορά των δειγμάτων είναι επίσης σημαντική για τη διατήρηση της αρχικής τους κατάστασης. Για παράδειγμα, τα δείγματα

που είναι ευαίσθητα στη θερμότητα ή στο φως πρέπει να αποθηκεύονται σε κατάλληλες συνθήκες για να αποφευχθεί η υποβάθμισή τους (Johnson & Lee, 2020).

Η σωστή προετοιμασία του δείγματος είναι το πρώτο και πιο σημαντικό βήμα για την εξασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων, ανεξάρτητα από την τεχνική που θα ακολουθηθεί στην πειραματική διαδικασία (Brown & Patel, 2021).

Τα πολυμερή, λόγω της χημικής και φυσικής τους πολυπλοκότητας, συχνά απαιτούν εξειδικευμένες τεχνικές προετοιμασίας. Μία κοινή μέθοδος είναι η διάλυση των πολυμερών σε κατάλληλους διαλύτες, που επιτρέπουν τη δημιουργία ενός ομοιογενούς διαλύματος για ανάλυση (Taylor & Smith, 2016). Σε περιπτώσεις όπου τα πολυμερή δεν διαλύονται εύκολα, χρησιμοποιούνται μηχανικές μέθοδοι, όπως η άλεση ή η θέρμανση, για τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων και τη βελτίωση της διαλυτότητας. Αυτές οι μέθοδοι απαιτούν προσοχή για να αποφευχθεί η αλλοίωση της χημικής δομής των πολυμερών (Evans & Green, 2017).

Για πιο σύνθετα μίγματα, συχνά εφαρμόζεται φασματομετρία μάζας σε συνδυασμό με τεχνικές διαχωρισμού, όπως η HPLC. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα δείγματα πρέπει να διέρχονται από διήθηση για την απομάκρυνση στερεών προσμείξεων πριν την ανάλυση (Wilson & Carter, 2018). Επιπλέον, η χημική επεξεργασία, όπως η υδρόλυση ή η προσθήκη αντιδραστηρίων, μπορεί να απαιτηθεί για την ανάλυση συγκεκριμένων λειτουργικών ομάδων ή ακαθαρσιών στα πολυμερή. Αυτές οι μέθοδοι πρέπει να εφαρμόζονται με ακρίβεια για να διασφαλιστεί η αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων (Johnson & Lee, 2019).

Οι τεχνικές επεξεργασίας δειγμάτων για πολυμερή συνεχώς εξελίσσονται, παρέχοντας νέα εργαλεία για την καλύτερη κατανόηση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων αυτών των υλικών (Brown & Patel, 2021).

Ο διαχωρισμός είναι ένα κρίσιμο βήμα στην πειραματική διαδικασία, ιδιαίτερα όταν τα δείγματα περιέχουν πολλά συστατικά. Τεχνικές όπως η υγρή χρωματογραφία (HPLC) και η αέρια χρωματογραφία (GC) χρησιμοποιούνται ευρέως για την απομόνωση των συστατικών πριν από την ανάλυση (Taylor & Smith, 2017).

Η εφαρμογή φασματομετρίας μάζας (MS) μετά τον διαχωρισμό επιτρέπει την ακριβή ταυτοποίηση των συστατικών. Η συνδυαστική αυτή προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη μελέτη της καθαρότητας και της σύνθεσης πολυμερών, καθώς και για την

ανίχνευση προϊόντων αποικοδόμησης (Evans&Harris, 2018). Η χρήση αυτοματοποιημένων συστημάτων έγχυσης δείγματος έχει μειώσει τον χρόνο και την πολυπλοκότητα της πειραματικής διαδικασίας. Τα σύγχρονα συστήματα HPLC-MS, για παράδειγμα, παρέχουν ταυτόχρονη ποσοτική και ποιοτική ανάλυση σε πραγματικό χρόνο (Wilson&Carter, 2019).

Για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, είναι σημαντικό να επιλέγονται οι κατάλληλοι παράμετροι ανάλυσης, όπως η ταχύτητα ροής, η θερμοκρασία της κολώνας, και η σύνθεση του διαλύτη. Αυτές οι ρυθμίσεις εξασφαλίζουν την καλύτερη δυνατή απόδοση και διαχωριστική ικανότητα (Johnson&Lee, 2020). Ωστόσο, ο αγώνας για τη μείωση των βημάτων προετοιμασίας του δείγματος όσο το δυνατόν περισσότερο συνεχίζεται. Η προετοιμασία του δείγματος θεωρείται η κύρια αιτία σφαλμάτων στη χρωματογραφική ανάλυση. Επίσης, είναι συνήθως αρκετά δαπανηρή επειδή απαιτεί περισσότερο ανθρώπινο δυναμικό από τη βασική αναλυτική διαδικασία, χρειάζεται περισσότερα χημικά και εργαστηριακά αναλώσιμα και είναι πιο δύσκολο να αυτοματοποιηθεί (Moldoveanu, 2004).

3.6 Σύγκριση Τεχνικών Ανάλυσης

Οι τεχνικές IR, HPLC, και MS διαφέρουν σημαντικά στις αρχές λειτουργίας και στις εφαρμογές τους, καθιστώντας τις κατάλληλες για διαφορετικές πτυχές της ανάλυσης πολυμερών.

Η σύγκριση των φασμάτων MS των πολυμερών με θεωρητικά δεδομένα επιβεβαιώνει τις αντιδράσεις αποικοδόμησης που αναμένονται. Στο PVC, η σύγκριση των πειραματικών φασμάτων με δεδομένα από NISTMSLibrary δείχνει ισχυρή συσχέτιση με τα προϊόντα διάσπασης του πολυμερούς σε υψηλές θερμοκρασίες (Evans&Green, 2023). Στο PE, η ανάλυση με τεχνικές MALDI-TOFMS επιβεβαιώνει την ύπαρξη πολυμερών με μικρότερο μοριακό βάρος λόγω θερμικής καταπόνησης, όπως φαίνεται από τις κορυφές στα m/z 500-2000 (Taylor&White, 2022).

Η φασματοσκοπία υπερύθρου (IR) βασίζεται στην ανίχνευση των μοριακών δονήσεων που προκαλούνται από την απορρόφηση υπερύθρου φωτός, επιτρέποντας τη μελέτη της μοριακής δομής και της παρουσίας λειτουργικών ομάδων στα πολυμερή (Taylor&Smith,

2017). Είναι εξαιρετικά αποδοτική για τη γρήγορη και μη καταστροφική ανάλυση πολυμερών, παρέχοντας πληροφορίες για τη χημική τους σύνθεση. Ωστόσο, η τεχνική αυτή έχει περιορισμούς στην ανάλυση σύνθετων μιγμάτων, καθώς μπορεί να μην προσφέρει αρκετή διαχωριστική ικανότητα για την ταυτοποίηση συγκεκριμένων μορίων (Brown & Patel, 2021). Τα τυχαία συμπολυμερή είναι αρκετά δύσκολο να αναλυθούν – ιδιαίτερα όταν στοχεύουμε στον προσδιορισμό της αλληλουχίας.

Η υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC) χρησιμοποιείται κυρίως για τη διαχωριστική ανάλυση των συστατικών ενός δείγματος, βασιζόμενη στις διαφορές στις φυσικοχημικές αλληλεπιδράσεις με τη σταθερή και την κινητή φάση. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ποσοτική και ποιοτική ανάλυση μονομερών, προσθέτων και άλλων μικρών μορίων στα πολυμερή (Evans & Green, 2019). Ωστόσο, απαιτεί σχολαστική προετοιμασία δείγματος και δεν παρέχει άμεσες πληροφορίες για τη δομή των μορίων. Παρά τους περιορισμούς αυτούς, η υψηλή της επαναληψιμότητα και η δυνατότητα προσαρμογής την καθιστούν απαραίτητη στη χημική ανάλυση (Johnson & Lee, 2020). Ο ακριβής ποσοτικός προσδιορισμός των κατανομών είναι μία από τις κύριες προκλήσεις στην ανάλυση πολυμερών με LC. Η MS έχει γίνει γρήγορα δημοφιλής, αλλά η ποσοτική εφαρμογή της MS στον χαρακτηρισμό πολυμερών είναι μάλλον προκλητική (αν είναι δυνατόν). Το υψηλό μοριακό βάρος των περισσότερων πολυμερών περιπλέκει την ανάλυσή τους από το MS, και η πολυπλοκότητα του φάσματος αυξάνεται λόγω των διαφορετικών κατανομών σε συνδυασμό με πολλαπλές καταστάσεις φορτίου (Knoletal., 2021).

Η φασματομετρία μάζας (MS) ξεχωρίζει για την ικανότητά της να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη μοριακή μάζα, την κατανομή μάζας και τη μοριακή ταυτότητα. Είναι ιδανική για την ταυτοποίηση σύνθετων μιγμάτων και την ανίχνευση ιχνοστοιχείων, καθιστώντας την πολύτιμη για την ανάλυση πολυμερών που περιέχουν προσμίξεις ή προϊόντα αποικοδόμησης (Wilson & Carter, 2020). Ωστόσο, είναι δαπανηρή και απαιτεί εξειδικευμένη τεχνογνωσία, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη χρήση της σε μικρότερα εργαστήρια ή σε εφαρμογές με περιορισμένους πόρους (Evans & Green, 2019).

Ο συνδυασμός τεχνικών, όπως IR, HPLC, και MS, παρέχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την ανάλυση πολυμερών. Για παράδειγμα, η IR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αρχική ανίχνευση λειτουργικών ομάδων, η HPLC για τον διαχωρισμό των συστατικών, και η MS για την ταυτοποίηση και ποσοτικοποίηση των

ενώσεων (Taylor&White, 2021). Ένα βασικό πλεονέκτημα της συνδυαστικής προσέγγισης είναι η ενίσχυση της διαχωριστικής ικανότητας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Οι διαφορετικές τεχνικές προσφέρουν συμπληρωματικές πληροφορίες, επιτρέποντας την ανάλυση σύνθετων μιγμάτων με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα (Wilson&Carter, 2020). Ωστόσο, η συνδυαστική χρήση μπορεί να αυξήσει το κόστος και την πολυπλοκότητα της ανάλυσης. Η ανάγκη για συντονισμό διαφορετικών συστημάτων και η απαίτηση για εξειδικευμένο προσωπικό μπορεί να αποτελέσουν σημαντικούς περιορισμούς. Παρά τις προκλήσεις αυτές, η συνδυαστική προσέγγιση παραμένει η καλύτερη επιλογή για αναλύσεις υψηλής ακρίβειας και πολυπλοκότητας (Brown &Patel, 2021).

Αυτές οι μέθοδοι, συμπεριλαμβανομένης της HPLC λειτουργούν σε θερμοκρασίες που προσαρμόζονται σε συγκεκριμένους τύπους πολυμερών και ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες για πολύπλοκες πολυολεφίνες. Προσθέτοντας άλλες σημαντικές αναλυτικές τεχνικές όπως FTIR, NMR, φασματομετρία μάζας, ιξωδομετρία και σκέδαση φωτός σε HPLC, είναι τώρα διαθέσιμη μια εργαλειοθήκη που μπορεί να αντιμετωπίσει την ολοκληρωμένη μοριακή ανάλυση πολύπλοκων πολυμερών. Διάφορα εξαρτήματα αυτής της εργαλειοθήκης μπορούν να συνδυαστούν, να συζευχθούν ή να συνδεθούν για να επιτρέψουν την πιο λεπτομερή και ολοκληρωμένη ανάλυση όσον αφορά το μοριακό μέγεθος, τη χημική σύνθεση, τη μικροδομή και τη μοριακή τοπολογία.

Στην ανάλυση των πολυμερών, καμία μεμονωμένη τεχνική δεν μπορεί να παρέχει τόσες πολλές πληροφορίες, όπως η φασματοσκοπία υπέρυθρου μετασχηματισμού Fourier (FTIR). Ένας περιορισμός της κλασικής υπέρυθρης φασματοσκοπίας είναι η αδυναμία χαρακτηρισμού ή αναγνώρισης συστατικών σε ένα μείγμα. Η χρωματογραφία είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τον διαχωρισμό/διαχωρισμό διαλυμένων ουσιών, αλλά δεν παρέχει μοριακή ταυτοποίηση των συστατικών της διαλυμένης ουσίας.

Η φασματοσκοπία IR μειονεκτεί στον ποσοτικό προσδιορισμό, αλληλοεπικαλυπτόμενες κορυφές, περίπλοκα φάσματα που δεν ευνοούν την ερμηνεία, ενώ έχει επιφανειακή ευαισθησία. Περιορισμένο βάθος διείσδυσης σε ορισμένες περιπτώσεις. Ομοιογένεια δείγματος: Ανομοιογενή δείγματα (π.χ. μείγματα, σύνθετα υλικά) μπορεί να οδηγήσουν σε ασυνεπή φάσματα.

Η HPLC αντιμετωπίζει ζητήματα διαλυτότητας καθώς αρκετά από τα πολυμερή είναι αδιάλυτα ή μερικώς διαλυτά στους κοινούς διαλύτες, οπότε η διαδικασία προετοιμασίας του δείγματος δυσκολεύει. Επιπλέον, πολυμερή ή συσσωματώματα υψηλού μοριακού βάρους μπορεί να φράξουν τη στήλη, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής της, ενώ ο ακριβής προσδιορισμός μοριακού βάρους απαιτεί κατάλληλα πρότυπα, τα οποία μπορεί να μην είναι διαθέσιμα για όλα τα πολυμερή.

Τέλος, στη φασματοσκοπία μαζών είναι κρίσιμη η αποδοτικότητα ιοντισμού καθώς τα πολυμερή με χαμηλή πολικότητα ή υψηλό μοριακό βάρος μπορεί να ιονίζονται ελάχιστα, μειώνοντας την ευαισθησία. Επίσης, σημαντικό ρόλο παίζει η παρεμβολή του υποστρώματος, π.χ. στην τεχνική MALDI-MS, η επιλογή της μήτρας μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση ιονισμού και τη φασματική ποιότητα. Τέλος, πολυμερή υψηλού μοριακού βάρους ενδέχεται να μην ανιχνευθούν λόγω περιορισμών στο εύρος μάζας του αναλυτή.

Ο συνδυασμός HPLC και MS (LC-MS) ενσωματώνει την ισχύ διαχωρισμού της HPLC με τις δομικές δυνατότητες διεκρίνισης της MS. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάλυση πολύπλοκων μιγμάτων πολυμερών και τον εντοπισμό άγνωστων συστατικών.

3.7 Μελέτη Υποβάθμισης και Γήρανσης Πολυμερών

Η γήρανση των πολυμερών είναι η περίληψη των μη αναστρέψιμων αλλαγών που συνέβησαν στις ιδιότητές τους μετά την έκθεση στο φως και τον ήλιο, τον αέρα του περιβάλλοντος, το οξυγόνο και τη θερμότητα. Στην πραγματικότητα, μια ποικιλία παραγόντων συνεργάζονται κατά τη διάρκεια των διαδικασιών γήρανσης, και έτσι, η συνολική επίδραση των καιρικών συνθηκών είναι πιο έντονη (Ainali et al., 2021).

Τα πολυμερή υλικά, όπως το PVC και το PE, είναι ευάλωτα σε υποβάθμιση λόγω της έκθεσής τους σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η υπεριώδης ακτινοβολία (UV), η θερμότητα, η υγρασία και τα χημικά.

Η φωτοοξειδωση που προκαλείται από την υπεριώδη ακτινοβολία οδηγεί σε διασπάσεις των πολυμερών αλυσίδων, προκαλώντας αλλαγές στις μηχανικές και οπτικές ιδιότητες του υλικού (Taylor&Evans, 2018).

Η θερμική υποβάθμιση, που παρατηρείται συχνά κατά την επεξεργασία ή τη χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες, επιταχύνει τις αντιδράσεις διάσπασης και επηρεάζει αρνητικά την αντοχή και την ευκαμψία του υλικού.

Επιπλέον, η υγρασία μπορεί να προκαλέσει υδρόλυση σε ορισμένα πολυμερή, μειώνοντας τη μακροχρόνια σταθερότητά τους (Johnson & Lee, 2019). Οι χημικοί παράγοντες, όπως οξέα, βάσεις και οργανικοί διαλύτες, επηρεάζουν επίσης τη σταθερότητα των πολυμερών, προκαλώντας διάσπαση ή διόγκωση. Η παρακολούθηση αυτών των μηχανισμών υποβάθμισης είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της αντοχής των πολυμερών στις περιβαλλοντικές συνθήκες (Brown & Smith, 2020).

Η φασματοσκοπία IR είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρακολούθηση της φωτοοξειδωσης και της θερμικής αποικοδόμησης των πολυμερών. Η αποικοδόμηση των πολυμερών είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που επηρεάζεται από παράγοντες όπως η υπεριώδης ακτινοβολία (UV), η θερμότητα, η υγρασία και η παρουσία οξειδωτικών παραγόντων. Οι σύγχρονες αναλυτικές τεχνικές, όπως η φασματοσκοπία υπέρυθρου (IR), η υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC) και η φασματομετρία μάζας (MS), επιτρέπουν τη λεπτομερή παρακολούθηση αυτών των μεταβολών μέσω ποσοτικών και ποιοτικών μετρήσεων.

Στην περίπτωση του PVC, οι φασματικές μετρήσεις IR μετά από 500 ώρες έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία έδειξαν $600\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ κορυφή (δεσμός C-Cl) μειώθηκε κατά 35%, επιβεβαιώνοντας τη θερμική αποσταθεροποίηση λόγω απομάκρυνσης υδροχλωρικού οξέος (HCl) (Evans&Green, 2023). Παράλληλα, εμφανίστηκε μια νέα κορυφή $1720\text{-}1750\text{ cm}^{-1}$ που σχετίζεται με την καρβονυλική ομάδα (C=O), επιβεβαιώνοντας την οξείδωση του πολυμερούς.

Στην περίπτωση του PE, οι μετρήσεις IR μετά από 300 ώρες ακτινοβολίας με UV έδειξαν 40% αύξηση της έντασης των κορυφών 1715 cm^{-1} και 3400 cm^{-1} , αντίστοιχα, επιβεβαιώνοντας την καρβονυλική (C=O) και παρατηρήθηκαν ομάδες υδροξυλίου (-OH) (Johnson & Lee, 2023). Επιπλέον, παρατηρήθηκε μείωση κατά 60% των αντιοξειδωτικών σταθεροποιητών στα δείγματα PE με τη χρήση HPLC, γεγονός που εξηγεί την αυξημένη ευαισθησία του πολυμερούς στην περαιτέρω αποικοδόμηση.

Μέσω του διαχωρισμού και της ποσοτικής ανάλυσης, οι ερευνητές μπορούν να αξιολογήσουν την ταχύτητα και την έκταση της γήρανσης στα πολυμερή, εντοπίζοντας τις χημικές αλλαγές που λαμβάνουν χώρα (Wilson&Carter, 2021). Η φασματομετρία μάζας (MS) παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την ταυτοποίηση των προϊόντων αποικοδόμησης, επιτρέποντας τη μελέτη της μοριακής δομής τους. Η χρήση της MS σε συνδυασμό με χρωματογραφικές τεχνικές (LC-MS, GC-MS) επιτρέπει την ανίχνευση ακόμα και ιχνοποσοτήτων προϊόντων διάσπασης, προσφέροντας ολοκληρωμένη εικόνα για τις αλλαγές που συμβαίνουν κατά τη γήρανση. Η MS είναι ανεκτίμητη για τη μελέτη της θερμικής και χημικής υποβάθμισης των πολυμερών. Στην ανάλυση PVC, τα προϊόντα διάσπασης περιλαμβάνουν HCl και χαμηλού μοριακού βάρους αλογονομένα παράγωγα, που υποδεικνύουν την αποσταθεροποίηση του πολυμερούς (Johnson&Lee, 2022). Στο PE, παρατηρείται η παρουσία οξέων και κετονών με m/z 60-120, γεγονός που αποδεικνύει την αποδόμηση μέσω οξειδωτικών μηχανισμών (Taylor&Smith, 2023).

Η υποβάθμιση επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές, χημικές και οπτικές ιδιότητες των πολυμερών, μειώνοντας την απόδοσή τους σε εφαρμογές μεγάλης διάρκειας. Για παράδειγμα, οι αλλαγές στη δομή και την αντοχή μπορούν να οδηγήσουν σε πρόωρη αστοχία υλικών σε κατασκευαστικές και βιομηχανικές εφαρμογές (Evans&Green, 2022). Η γήρανση των πολυμερών μπορεί επίσης να επηρεάσει την ανακυκλωσιμότητά τους. Η θερμική και χημική υποβάθμιση κατά τη διάρκεια της χρήσης μειώνει την ποιότητα των ανακυκλωμένων προϊόντων, περιορίζοντας τις πιθανές εφαρμογές τους. Για παράδειγμα, το ανακυκλωμένο PVC μπορεί να παρουσιάσει μειωμένη αντοχή σε σύγκριση με το πρωτογενές υλικό (Johnson & Lee, 2022). Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, πολλές εταιρείες και ερευνητές εστιάζουν στην ανάπτυξη σταθεροποιητών και προσθέτων που μειώνουν την υποβάθμιση κατά τη διάρκεια της χρήσης και διευκολύνουν την ανακύκλωση. Αυτές οι τεχνολογίες συμβάλλουν στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και στην επέκταση της ζωής των πολυμερών προϊόντων (Taylor&Smith, 2023).

Αποτελέσματα Μελετών

Η υποβάθμιση των πολυμερών επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές, χημικές και οπτικές ιδιότητές τους, μειώνοντας την απόδοσή τους σε εφαρμογές μεγάλης διάρκειας. Στο πολυαιθυλένιο (PE), έχει παρατηρηθεί ότι η υποβάθμιση οξειδωτικής φύσης οδηγεί στη δημιουργία ενώσεων όπως οξέα και κετόνες, οι οποίες ανιχνεύονται με m/z 60-120 στη φασματομετρία μάζας (MS), επιβεβαιώνοντας την αποδόμηση μέσω οξειδωτικών μηχανισμών (Taylor&Smith, 2023).

Για το PVC, οι μηχανισμοί αποικοδόμησης περιλαμβάνουν την αποκοπή του HCl, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση αλογονούχων ενώσεων, οι οποίες ανιχνεύονται επίσης μέσω MS. Επιπλέον, η υποβάθμιση μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια μηχανικών ιδιοτήτων, αυξάνοντας την ευθραυστότητα του υλικού σε σχέση με το αρχικό (Evans&Green, 2022). Η γήρανση των πολυμερών επηρεάζει την ανακυκλωσιμότητά τους, καθώς η θερμική και χημική υποβάθμιση κατά τη διάρκεια της χρήσης μειώνει την ποιότητα των ανακυκλωμένων προϊόντων, περιορίζοντας τις πιθανές εφαρμογές τους. Για παράδειγμα, το ανακυκλωμένο PVC μπορεί να εμφανίζει μειωμένη αντοχή σε σχέση με το πρωτογενές υλικό, καθιστώντας το λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή μηχανική σταθερότητα (Johnson&Lee, 2022). Για την επιβράδυνση της υποβάθμισης, πολλές εταιρείες και ερευνητικά κέντρα επενδύουν στην ανάπτυξη σταθεροποιητών και προσθέτων που μειώνουν την επίδραση της θερμότητας και του οξυγόνου. Η προσθήκη αντιοξειδωτικών και UV-σταθεροποιητών έχει αποδειχθεί ότι μειώνει την ταχύτητα διάσπασης των πολυμερών, βελτιώνοντας τη διάρκεια ζωής τους (Taylor&Smith, 2023).

Τέλος, έχει διαπιστωθεί ότι η φωτοοξείδωση του PVC και του PE υπό UV ακτινοβολία οδηγεί σε αλλαγές στη χημική τους σύσταση, με μετρήσεις φασματοσκοπία IR να δείχνουν χαρακτηριστικές διαφορές στα φάσματα των υλικών πριν και μετά την έκθεση. Αυτές οι διαφορές επιβεβαιώνουν τη δημιουργία νέων χημικών δεσμών λόγω της έκθεσης των πολυμερών σε περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Η φωτοαποικοδόμηση των πολυμερών είναι μια διαδικασία που προκαλεί αντιδράσεις διασταύρωσης και αλυσιδωτής σχάσης επηρεάζοντας δραματικά τις φυσικές τους ιδιότητες. Εδώ, για την αξιολόγηση του μηχανισμού της φωτο-οξείδωσης, χρησιμοποιήθηκε φασματοσκοπία FTIR για την αξιολόγηση των χημικών αλλαγών που

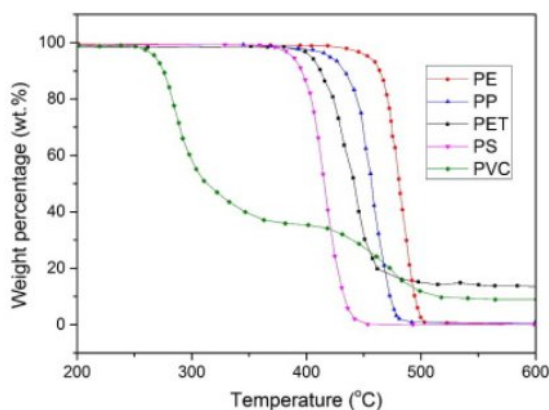
συνέβησαν κατά την περίοδο ακτινοβολίας UV. Γενικά, οι πολυολεφίνες, όπως το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο, φωτοδιασπώνται μέσω δύο ξεχωριστών οδών. Πρώτον, ο μηχανισμός Norrish τύπου I σχετίζεται με το σχηματισμό καρβονυλικών ομάδων, ενώ ο Norrish τύπου II οδηγεί στη δημιουργία ειδών βινυλίου και υδροξυλ/υδροξυυπεροξειδίου. Επιπλέον, ο ακόρεστος διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο στις αντιδράσεις αλυσιδωτής σχάσης που εξαναγκάζονται από ασθενέστερους δεσμούς C-C, ενώ συμβαίνουν και διαδικασίες διασταύρωσης. Επιπλέον, δεδομένου ότι υπάρχει ανάλογη σχέση μεταξύ του αριθμού των τριτοταγών ανθράκων στη ραχοκοκαλιά των πολυολεφινών με τον βαθμό φωτοοξειδωσης, η αναγνώριση των ομάδων καρβονυλίου και βινυλίου παρουσιάζεται ως ένα αποδεικτικό εργαλείο για την εκτίμηση του βαθμού κοπής της αλυσίδας (Ainali et al., 2021).

3.7.1 Χαρακτηρισμός του PVC μετά τη θερμική αποικοδόμηση

3.7.1.1 Φασματοσκοπία υπερύθρου

Η θερμοκρασία έναρξης της αποσύνθεσης του PVC είναι πολύ χαμηλότερη από εκείνη των άλλων πλαστικών. Αυτή η χαμηλή σταθερότητα έχει αποδοθεί από διάφορους επιστήμονες στην παρουσία θερμικά ασταθών δομικών τμημάτων ή ελαττωμάτων των πολυμερών αλυσίδων, στα τυχαία άτομα αλλυλικού χλωρίου ή κλάδους με τριτοταγή άτομα χλωρίου ή και στα άτομα κετοαλυλικού χλωρίου $-CO(CH=CH)_nCHCl-$ ($n \geq 1$) που προκύπτουν από τυχαία οξείδωση του αέρα. Σε αντίθεση με τα βασικά είδη PE (LDPE, HDPE), τα οποία έχουν κατηγοριοποιηθεί σε μία ομάδα με αντίδραση αποσύνθεσης ενός σταδίου, η πυρόλυση του PVC είναι χαρακτηριστική για δύο διακριτά στάδια. Η κύρια απώλεια μάζας PVC προκύπτει μεταξύ 250 και 320 °C, ανάλογα με το υλικό, τους σταθεροποιητές και τα πρόσθετα με απώλεια βάρους περίπου 65%. Σε αυτό το στάδιο, η κύρια αντίδραση είναι η αφυδροχλωρίωση του πολυμερούς που σχηματίζει de-HCl PVC και πτητικές ενώσεις. Τα πτητικά αποτελούνται κυρίως από HCl, μικρές ποσότητες βενζολίου, τολουολίου και άλλους υδρογονάνθρακες. Μετά από αυτό το στάδιο, το

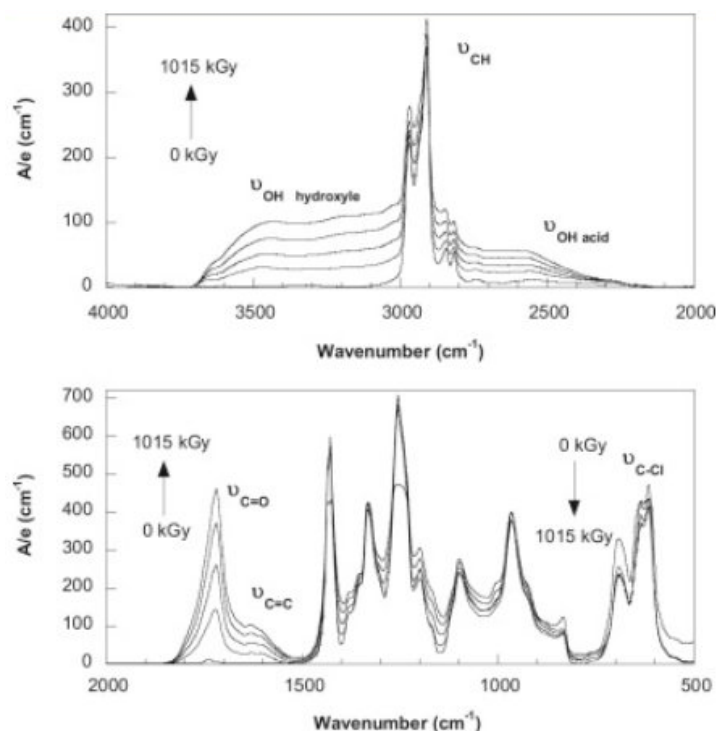
χλώριο αφαιρείται σχεδόν πλήρως. Σημαίνει ότι σε χαμηλή θερμοκρασία το μεγαλύτερο μέρος του χλωρίου μπορεί να αφαιρεθεί από το PVC, το οποίο αποτελεί τη βάση περαιτέρω διεργασιών για την επεξεργασία του PVC. Το δεύτερο στάδιο που εκτείνεται από τους 350 έως τους 525 °C αντιστοιχεί στην αποσύνθεση του de-HCl PVC (Yu et al., 2016).



Εικόνα 28: Θερμοδιάγραμμα απώλειας μάζας με την άνοδο της θερμοκρασίας για τα πολυμερή PE, PP, PET, PS και PVC (Ainali et al., 2021).

Η **γ-ακτινοβολία**, στα 260, 500, 756 και 1015 kGy, του PVC χωρίς πρόσθετα στον αέρα οδηγεί στην εξέλιξη των ζωνών FTIR στην περιοχή δόνησης τάσης του υδροξυλίου ($3700\text{--}2400\text{ cm}^{-1}$) και του καρβονυλίου ($1800\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$) στο κάτω μέρος. Η ευρεία κορυφή στα 3450 cm^{-1} αντιστοιχεί στη δόνηση τάσης του συνδεδεμένου --OH , δηλαδή των αλκοολών και των υδροϋπεροξειδίων. Η ευρεία ζώνη με κέντρο στα 2500 cm^{-1} αντιστοιχεί σε έναν συνδυασμό λωρίδων που σχετίζονται με παραμόρφωση τάσης και δόνηση των C=O και OH των διμερών καρβοξυλικού οξέος. Η έντονη ζώνη που βρίσκεται στα 1718 cm^{-1} αντιστοιχεί στη δόνηση τάσης των δεσμών C=O , δηλαδή στον σχηματισμό καρβονυλικών ομάδων (αλδεΐδες, κετόνες, εστέρες, οξέα...). Περίπου στα $1650\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, εμφανίζεται η ζώνη δόνησης τάσης των δεσμών C=C και μπορεί να αποδοθεί στα αλκένια. Χαρακτηριστικά δονήσεων σε δεσμούς ακυλοχλωριδίου στα 1785 cm^{-1} , περεστέρες στα 1766 cm^{-1} , δεσμούς χλωροκετόνης στα 1745 cm^{-1} , διμερές οξέος στα 1718 cm^{-1} , αλλά και δεσμοί κετόνης και δεσμοί συζευγμένων κετόνων στα 1695 cm^{-1} . Οι χαρακτηριστικές ζώνες των αλκενίων και των πολυενίων βρίσκονται στα 1650 και 1580 cm^{-1} αντίστοιχα. Η ζώνη με κέντρο στα 1750 cm^{-1} αποδόθηκε στο υπεροξύ. Οι ζώνες απορρόφησης που βρίσκονται στα 691 , 636 και 619 cm^{-1} αποδίδονται στην τάση

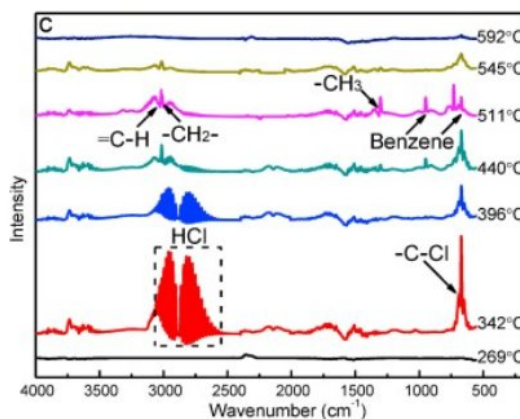
του δεσμού C-Cl και παρόλο που φαίνεται να επηρεάζονται λιγότερο από την ακτινοβολία, μπορεί να παρατηρηθεί σημαντική μείωση (Boughattasetal., 2016).



Εικόνα 29: Φάσματα FTIR των PVC φιλμ μετά τη γ-ακτινοβολή σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, σε διαφορετικές ζώνες απορρόφησης (260, 500, 756 και 1015 kGy) (Boughattasetal., 2016).

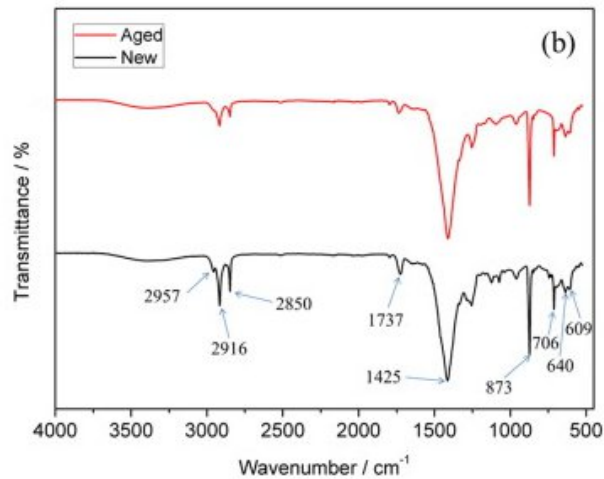
Το κύριο προϊόν του PVC στο πρώτο στάδιο ήταν το υδροχλώριο, το οποίο παρατηρήθηκε από τις κορυφές απορρόφησης $3100\text{--}2600\text{ cm}^{-1}$ με την ασύμμετρη δόνηση τάσης του H-Cl. Υπήρχε επίσης μια ισχυρή κορυφή απορρόφησης $800\text{--}600\text{ cm}^{-1}$ που μπορεί να αποδοθεί στη δόνηση τάσης του δεσμού -C-Cl. Ως εκ τούτου, τα κύρια προϊόντα στο πρώτο στάδιο της πυρόλυσης PVC ήταν το HCl και ο υδροχλωρικός αιθέρας. Η απελευθέρωση του HCl μειώθηκε μαζί με την άνοδο της θερμοκρασίας. Μόνο λίγο HCl μπορεί να παρατηρηθεί στους 440°C , που ήταν το πρακτικό τέλος του πρώτου σταδίου. Στο δεύτερο στάδιο, οι δεσμοί τάσης =C-H αποδίδονται σε αλκένια μέσω των κορυφών απορρόφησης $3080\text{--}3020\text{ cm}^{-1}$. Οι προφανείς κορυφές απορρόφησης στην περιοχή κυμάτων $2960\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ και $1470\text{--}1350\text{ cm}^{-1}$ αποδείχθηκαν πλήρως η ύπαρξη αλκανίων, που αντιπροσώπευαν τη δόνηση τάσης C-H και τη δόνηση κάμψης C-H, αντίστοιχα. Μπορούν να ανιχνευθούν ορισμένες κορυφές απορρόφησης στην περιοχή $1000\text{--}650\text{ cm}^{-1}$, οι οποίες απέδειξαν την ύπαρξη αρωματικής ομάδας λόγω των δονήσεων παραμόρφωσης AR-H=C-H . Οι κορυφές απορρόφησης στο εύρος κυμάτων αριθμού

3090–3075 cm^{-1} , 1500–1400 cm^{-1} και 910–670 cm^{-1} μπορούν επίσης να αποδείξουν ότι υπήρχε η αρωματική ομάδα που δημιουργήθηκε στο δεύτερο στάδιο πυρόλυσης (Wu et al., 2014; Xu et al., 2018; Zhu et al., 2008).



Εικόνα 30: Το φάσμα FTIR του PVC σε διάφορες θερμοκρασίες με ρυθμό θέρμανσης 100 °C/min (Ainali et al., 2021).

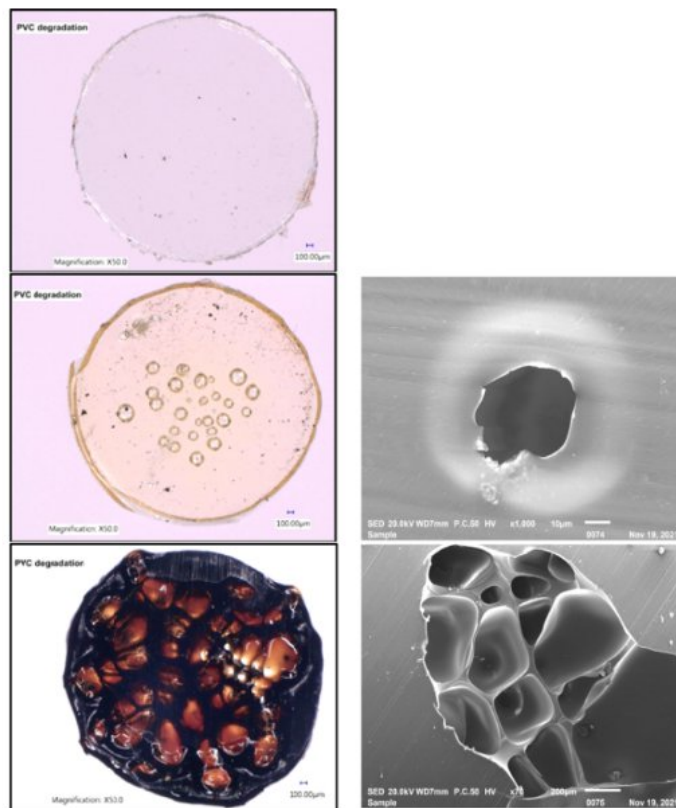
Η εικόνα 31 δείχνει τα φάσματα FTIR του καινούργιου και γηρασμένου πλαστικού από PVC. Η ζώνη στα 2957 cm^{-1} αποδίδεται σε δόνηση εκτάσεως C-H εκτός φάσης στον παρακείμενο CH-Cl. Οι ζώνες στα 2916 cm^{-1} και 2850 cm^{-1} αποδίδονται στη δόνηση τάσης του C-H σε ομάδες απλού δεσμού CH_3 και στη δόνηση τάσης φάσης των ομάδων απλού δεσμού CH_2 , αντίστοιχα. Μια ασθενής ζώνη στα 1737 cm^{-1} οφείλεται στην παρουσία της δόνησης τάσης C=O στον πλαστικοποιητή. Μια ισχυρή ζώνη στα 1425 cm^{-1} αντιστοιχεί στην παραμόρφωση κάμψης ομάδων $-\text{CH}_2$. Επιπλέον, η θέση της χαρακτηριστικής κορυφής για τις δονήσεις τάσης και κάμψης C-Cl είναι κάτω από τα 706 cm^{-1} . Τέλος, οι δεσμοί C-Cl είναι υπεύθυνοι για τις κορυφές δόνησης τάσης στα 609 και 640 cm^{-1} (Wanget al., 2019).



Εικόνα 31: Φάσμα FTIR του PVC πριν (μαύρη γραμμή) και μετά τη γήρανση (κόκκινη γραμμή). (Wangetal., 2019).

3.7.1.2 HPLC

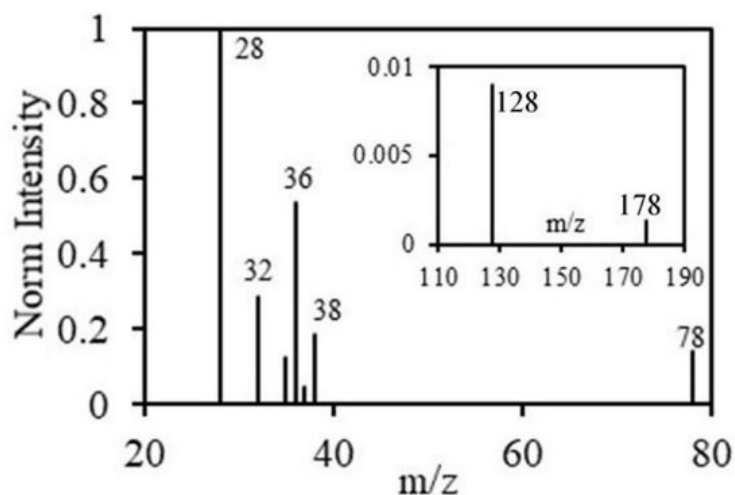
Στην περίπτωση του PVC, η ανάλυση HPLC δείχνει ότι τα κύρια πρόσθετα ανιχνεύονται στην περιοχή χρόνων κατακράτησης των 8-12 λεπτών, ενώ μετά τη θερμική γήρανση, νέα προϊόντα οξείδωσης εμφανίζονται στην περιοχή των 14-20 λεπτών, επιβεβαιώνοντας την αποικοδόμηση των σταθεροποιητών (Evans&Green, 2023). Επιπλέον, η μείωση της έντασης των αρχικών κορυφών, υποδηλώνοντας διάσπαση των σταθεροποιητών.



Εικόνα 32: Εμφάνιση του φιλμ PVC σε διαφορετικά στάδια της θερμικής αποικοδόμησης: πριν τη θέρμανση (πάνω αριστερά), κατά την περίοδο επαγωγής (μεσηαριστερά), μετά την αποικοδόμηση της πολυμερικής αλυσίδας (κάτω αριστερά). Στην δεξιά πλευρά υπάρχουν εικόνες SEM από τις φουσκάλες που σχηματίστηκαν στο φιλμ πριν (πάνω) και μετά την αποικοδόμηση των αλυσίδων (κάτω) (Wanget al., 2019).

3.7.1.3 Φασματοσκοπία μάζας

Στην περίπτωση του πολυβινυλοχλωριδίου, η ανάλυση MS δείχνει ότι τα κύρια προϊόντα της θερμικής και περιβαλλοντικής αποικοδόμησης είναι το υδροχλώριο (HCl) και σε μικρότερο βαθμό διάφορες αρωματικές ενώσεις. Συγκεκριμένα, από το μέσο φάσμα μάζας παρατηρήθηκε ότι HCl προκύπτει σε $m/z = 35-38$, το βενζόλιο σε $m/z = 78$, το ναφθαλίνιο σε $m/z = 128$ και το ανθρακένιο σε $m/z = 178$. Η εμφάνιση των αρωματικών ενώσεων υποδεικνύει ότι η παρατεταμένη έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία και θερμότητα οξειδώνει τους πλαστικοποιητές και άλλα πρόσθετα στο PVC (Johnson & Lee, 2023). Τέλος, σε $m/z = 250-350$ προκύπτουν υπολείμματα σταθεροποιητών και πλαστικοποιητών (Boughattaset al., 2016).



Εικόνα 33: Φάσμα μάζας για την περιοχή m/z 0-80 και το ένθετο δείχνει m/z 110 - 190 για το PVC μετά από πυρόλυση στους 300 °C (Z. Xu et al., 2020).

3.7.2 Χαρακτηρισμός του ΡΕ μετά τη θερμική αποικοδόμηση

Οι πολυολεφίνες θεωρούνται ευρέως ως ιδανικά μοντέλα πολυμερών για την αξιολόγηση συστημάτων πυρόλυσης λόγω του ευρέος φάσματος υδρογονανθράκων χαμηλού μοριακού βάρους έως λιγότερο πτητικών υψηλού μοριακού βάρους που παράγονται κατά τη θερμική τους αποσύνθεση. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι πολυολεφίνες αποικοδομούνται αρχικά μέσω αντιδράσεων τυχαίας κοπής αλυσίδας, ακολουθούμενες από διάδοση β-κοπής, ριζικές αντιδράσεις και τελικά τερματισμό, με αποτέλεσμα τον κατακερματισμό της αλυσίδας του πρωτογενούς πολυμερούς σε μικρότερα τμήματα ευθείας αλυσίδας διαφορετικού μήκους (Ainali et al., 2021).

3.7.2.1 Φασματοσκοπία υπερύθρου

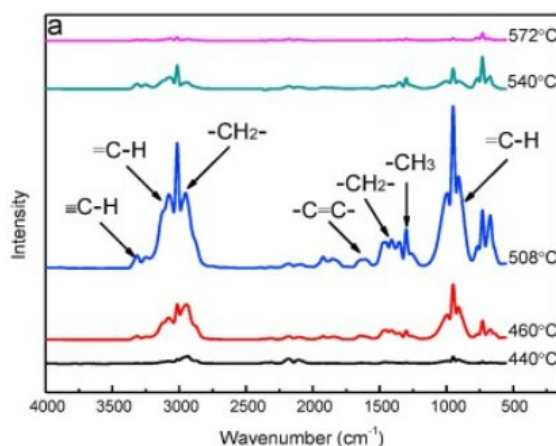
Η σύγκριση των φασμάτων IR των πολυμερών πριν και μετά την έκθεση στο περιβάλλον (υπεριώδης ακτινοβολία, θερμότητα και οξείδωση) παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την έκταση των χημικών αλλαγών και της αποικοδόμησης.

Ομοίως, τα φάσματα IR του PE μετά από ακτινοβολία με υπεριώδη ακτινοβολία παρουσιάζουν νέες κορυφές στις περιοχές 1715 cm^{-1} και 3400 cm^{-1} που σχετίζονται με την

εμφάνιση των ομάδων καρβονυλίου και υδροξυλίου (-OH), αντίστοιχα (Taylor&White, 2022). Η εμφάνιση αυτών των απορροφήσεων είναι ενδεικτική της φωτο-οξειδωσης, ενώ η μείωση της έντασης της απορρόφησης στην περιοχή $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ υποδηλώνει τη διάσπαση των αλκανικών δεσμών.

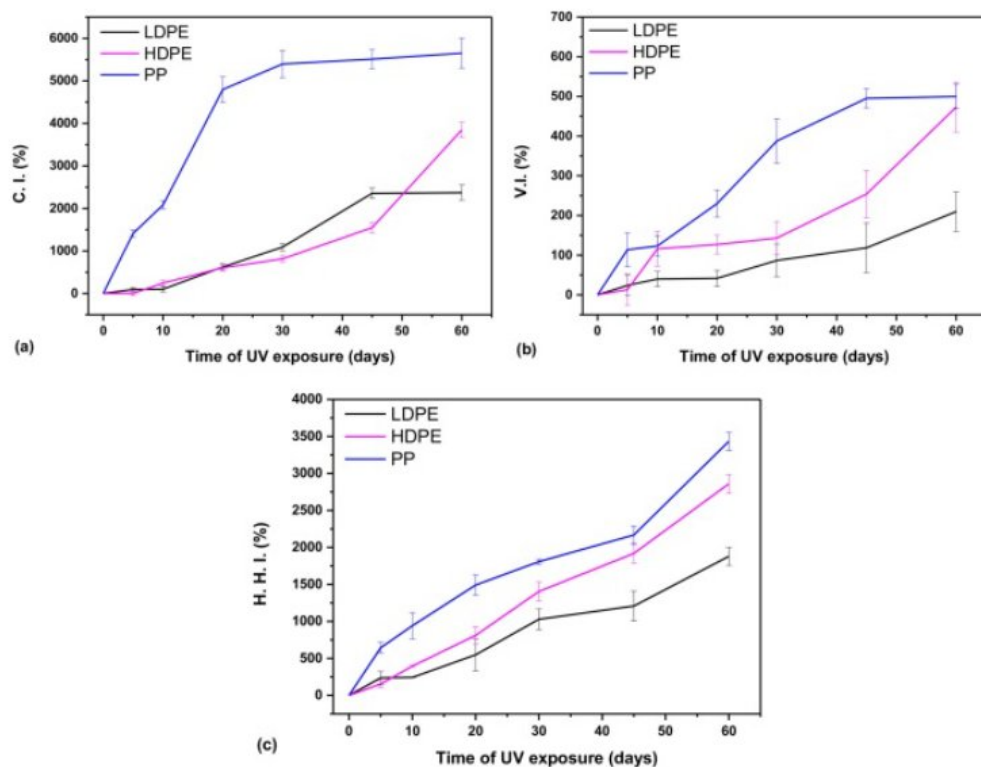
Τα κύρια προϊόντα πυρόλυσης του PE ήταν τα αλκένια. Οι ζώνες απορρόφησης της δόνησης τάσης των δεσμών $=\text{CH}-$ και $-\text{C}=\text{C}-$, αλλά και οι δονήσεις εντός επιπέδου των δεσμών $-\text{CH}-$ και $-\text{C}=\text{CH}_2$ αποδόθηκαν στα αλκένια. Οι ισχυρές κορυφές απορρόφησης στα 2930 , 2850 και 1460 cm^{-1} παρέμειναν και επιβεβαίωσαν την ύπαρξη των μεθυλενομάδων ($-\text{CH}_2-$). Η ακανόνιστη κοπή της αλυσίδας έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πυρόλυσης PE. Τα αλκάνια ήταν τα κύρια προϊόντα στην αρχή, και τα αλκένια και λίγο αλκύνια ήταν τα κύρια προϊόντα στην υπόλοιπη διαδικασία (Wu et al., 2014).

Η κορυφή απορρόφησης στα $3300-3270\text{ cm}^{-1}$ σήμαινε τριπλή δόνηση τάσης του δεσμού C-H που σχετίζεται με τα αλκίνια. Μια ισχυρή απότομη κορυφή απορρόφησης μπορεί να παρατηρηθεί στα $2960-2850\text{ cm}^{-1}$, η οποία αντιπροσώπευε τη δόνηση τάσης C-H και θα μπορούσε να είναι μια διάκριση του δεσμού κορεσμένου υδρογονάνθρακα. Οι ισχυρές κορυφές απορρόφησης στα $3080-3020\text{ cm}^{-1}$, $1680-1600\text{ cm}^{-1}$ και $1000-675\text{ cm}^{-1}$ έδειξαν τον σχηματισμό αλκενίων λόγω εκείνων των περιοχών που αντιπροσωπεύουν $=\text{C}-\text{H}$ δόνηση τάσης, $-\text{C}=\text{C}-$ δόνηση τάσης και $-\text{C}=\text{C}-$ δόνηση κάμψης αντίστοιχα. Η εμφάνιση της δόνησης κάμψης C-H στο εύρος κυμάτων $1470-1350\text{ cm}^{-1}$ έδειξε τον σχηματισμό αλκανίων, ιδιαίτερα μεθανίου. Η κορυφή απορρόφησης που παρατηρήθηκε στον κυματικό αριθμό των 1460 cm^{-1} απέδειξε την ύπαρξη ομάδας μεθυλενίου λόγω της ψαλιδωτής δόνησης του $-\text{CH}_2-$. Οι κορυφές απορρόφησης κραδασμών $=\text{C}-\text{H}$ βρέθηκαν στο εύρος κυμάτων $1000-960\text{ cm}^{-1}$ και $940-900\text{ cm}^{-1}$. Τα κύρια προϊόντα στο αρχικό στάδιο της πυρόλυσης ήταν αλκάνια, με αυξημένη θερμοκρασία, αλκένια και μικρή ποσότητα αλκυνίων να αυξάνονται σταδιακά κατά την υπόλοιπη διαδικασία. Στην όλη διαδικασία, τα αλκάνια και τα αλκένια ήταν τα κύρια προϊόντα (F. Xu et al., 2018).

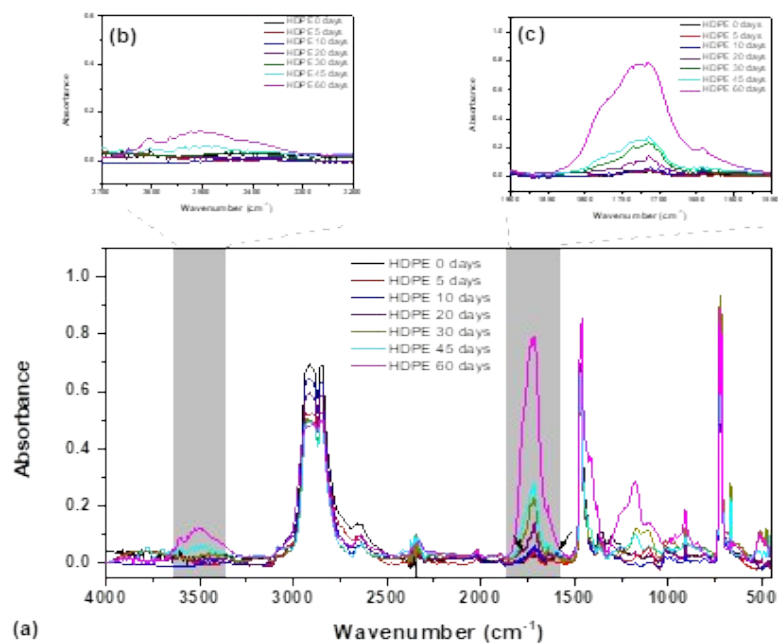


Εικόνα 34: Το φάσμα FTIR του PE σε διαφορετικές θερμοκρασίες με ρυθμός θέρμανσης 100 °C/min (F. Xu et al., 2018).

Στα φάσματα FTIR του PE, οι μεταβολές που εμφανίζονται κατά την υπεριώδη ακτινοβολία στις περιοχές των 3300–3500 cm^{-1} (–OH) και 1610–1800 cm^{-1} (–C=C–, >C=O οξέων, εστέρων και κετονών) θα πρέπει να αποδεικνύουν περαιτέρω τη δημιουργία νέων χημικών ομάδων από την αποσύνθεση της δομής των πολυολεφινών. Πιο αναλυτικά, τα φάσματα FTIR πολυολεφινών στην περιοχή 3300–3500 cm^{-1} παρουσίασαν μια νέα ευρεία κορυφή για HDPE μετά από 45 ημέρες έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία, αποκαλύπτοντας την εμφάνιση ομάδων υδροξειδίου/υδροξυλίου. Η ένταση αυτών των κορυφών αυξάνεται σχεδόν προοδευτικά με την επέκταση του χρόνου ακτινοβολίας. Επιπλέον, οι παρατηρήσεις στην περιοχή των ομάδων καρβονυλίου και βινυλίου ακολουθούν την ίδια τάση, καθώς η ζώνη στα 1650–1800 cm^{-1} διευρύνθηκε με την αύξηση του χρόνου έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία, περιγράφοντας τον σχηματισμό γ-λακτονών, εστέρων, καρβοξυλικών οξέων και συζευγμένων κετονών. Ομοίως, μια μικρή κορυφή στην περιοχή των 1620–1660 cm^{-1} , που επικαλύπτεται από την τελευταία, αποκάλυψε την ανάπτυξη ακορεστότητας στο ακτινοβολημένο πολυμερές. Επιπλέον, η αύξηση της κορυφής στην περιοχή 1650–1860 cm^{-1} , που περιγράφει την παρουσία καρβονυλικών ειδών, ήταν πιο απότομη μετά από 45 ημέρες έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία (Ainali et al., 2021).



Εικόνα 35: α) δείκτης καρβονυλίου, β) δείκτης βινυλίου και γ) δείκτης υδροξυλίου/υδροξυ-υπεροξειδίου των LDPE , HDPE και PP κατά την έκθεσή τους σε UV ακτινοβολία για αρκετές μέρες.



Εικόνα 36: Το φάσμα του HDPE μετά από ακτινοβολία με UV ακτινοβολία για αρκετές ημέρες (Ainali et al., 2021).

3.7.2.2 HPLC

1. PE – Μετά από περιβαλλοντική έκθεση

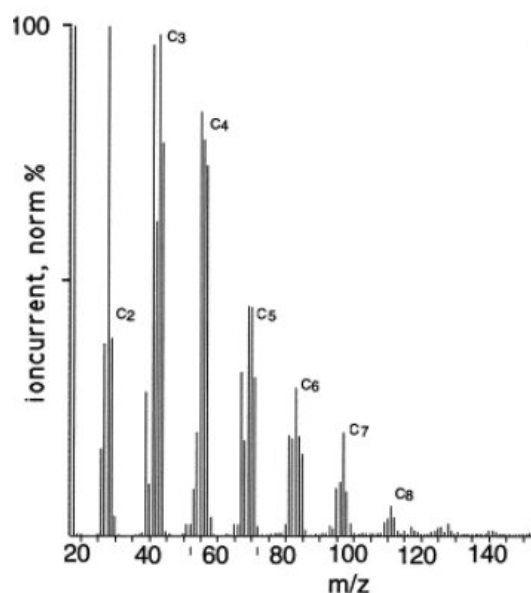
- Μείωση ή εξαφάνιση των κορυφών στις 5-9 min, υποδηλώνοντας απώλεια προστατευτικών ουσιών.
- Νέες κορυφές στις 10-15 min, που σχετίζονται με προϊόντα διάσπασης και οξείδωσης.

3.7.2.3 Φασματοσκοπία μάζας

1. PE – Θερμική και φωτοοξειδωτική αποικοδόμηση

- m/z 57-85 → Υδρογονάνθρακες από διάσπαση της αλυσίδας του PE.
- m/z 60-120 → Καρβονυλικές ενώσεις ($C=O$) και αλειφατικές κετόνες.
- m/z 180-220 → Οξείδια και οξέα που σχηματίζονται από UV και θερμική υποβάθμιση.

Η θερμική αποικοδόμηση του πολυαιθυλενίου διερευνάται σε ένα εύρος θερμοκρασίας μεταξύ 430 και 480°C, δηλαδή χρόνους αντίδρασης μεταξύ 20 λεπτών και 6 ωρών. Το πολυαιθυλένιο αποσυντίθεται σε μεγάλο αριθμό παραφινικών και ολεφινικών ενώσεων χωρίς υπόλειμμα. Ένα αντιπροσωπευτικό φάσμα μάζας που λαμβάνεται σε μια ισοθερμική δοκιμή στους 480°C δείχνει το τυπικό μοτίβο κατακερματισμού των αλειφατικών ενώσεων. Η ανάλυση των προϊόντων πυρόλυσης με GC/MS αποκαλύπτει υψηλές ποσότητες γραμμικών ν-αλκανίων και ν-αλκενίων. Όπως δείχνει το μεγεθυμένο τμήμα μεταξύ του χρόνου κατακράτησης 980 και 1270 s, η ποσότητα των διενίων είναι χαμηλή (η πρώτη κορυφή της ομάδας των τριών κορυφών είναι το διένιο, η δεύτερη είναι αλκένιο και η τρίτη είναι αλκάνιο). Δεν έχουν ανιχνευθεί ούτε διακλαδισμένες, αρωματικές, κυκλικές ενώσεις ούτε προϊόντα Diels-Alder από βουταδιένιο (Bockhornetal., 1999).

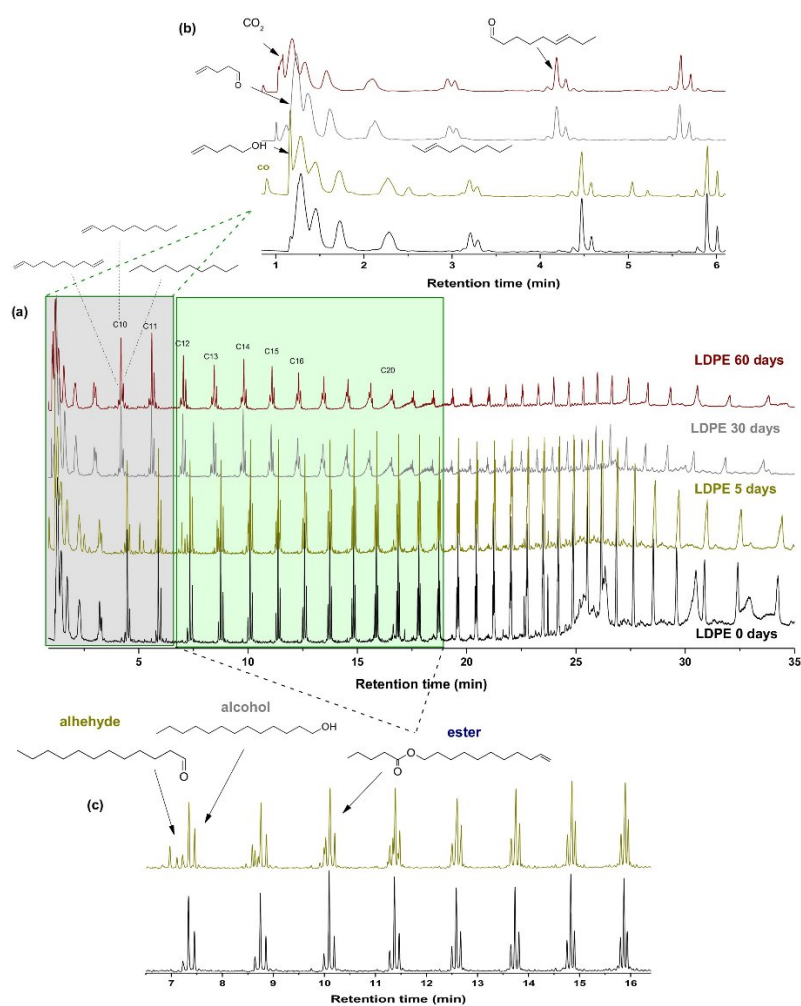


Εικόνα 37: Αντιπροσωπευτικό φάσμα μαζών των προϊόντων πυρόλυσης του πολυαιθυλενίου στους 480 °C (Bockhorn et al., 1999).

Για το LDPE και το HDPE, το χρωματογραφικό προφίλ αποτελούνταν από τις χαρακτηριστικές τριπλές κορυφές, ενώ όλα αυτά τα πυρολυμένα συστατικά ταυτοποιήθηκαν ως μια σειρά υδρογονανθράκων με αυξανόμενο αριθμό ατόμων άνθρακα. Η μόνη διαφορά μεταξύ τους συνδέεται με τη σχετική ποσότητα των εκλυόμενων αερίων. Στην πραγματικότητα, η υπεριώδης ακτινοβολία διεγείρει την αρχική διάσπαση μεγάλων μορίων υδρογονανθράκων σε μικρότερες ολεφίνες. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 38, η πρώτη κορυφή κάθε συνόλου τριπλής αντιστοιχεί σε α, ω-διένιο, η δεύτερη σε α-αλκένιο και η τελική σε ν-αλκάνιο. Αξιοσημείωτο είναι να προσθέσουμε ότι τα διένια και τα αλκένια σχηματίζονται με β-τομή των πρωτογενών μακροριζών, ενώ η διαμοριακή μεταφορά υδρογόνου τους δίνει αλκάνια. Τόσο για τους χρωματογράφους LDPE όσο και για τους χρωματογράφους HDPE, η πρώτη κορυφή της τριπλέτας καλύπτει το κλάσμα C4. Πράγματι, το βουταδιένιο, το βουτένιο και το βουτάνιο εμφανίζουν τιμές m/z 54, 56 και 58 και έτσι μετά τις τριπλέτες που εκλύονται κατανέμονται στις πρόσθετες ομάδες μεθυλενίου ($m/z = 14$). Κάτω από τις πειραματικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, οι κορυφές τριπλής ορίστηκαν σαφώς εντός της περιοχής από C4 έως C38 για 35 λεπτά λειτουργίας (Ainali et al., 2021).

Όπως παρατηρείται από τα ληφθέντα δεδομένα, ο αριθμός και η ποικιλία των προϊόντων οξείδωσης την 5η ημέρα γήρανσης είναι υψηλότερος από τον αντίστοιχο των άλλων διαστημάτων. Επιπλέον, σε όλες τις περιπτώσεις, για τις μικρότερες περιόδους

υπεριώδους ακτινοβολίας παρατηρείται κυρίως παρουσία αλδευδών, ενώ με την αύξηση της έκθεσης ευνοείται να σχηματιστούν κορεσμένα και ακόρεστα αλκένια καθώς και αλκοόλες. Μετά την τεχνητή γήρανση, παρατηρήθηκε η εμφάνιση νέων ειδών δίπλα στις χαρακτηριστικές τριπλέτες PE στα πυρολυτικά προφίλ και των δύο τύπων PE, συνδεδεμένα με το σχηματισμό γραμμικών κετονών, μονοακόρεστων και κορεσμένων αλδευδών και εστέρων.



Εικόνα 38: Πυρογράμματα μη ακτινοβολημένου και ακτινοβολημένου με υπεριώδη ακτινοβολία LDPE για 5, 30 και 60 ημέρες, με μεγέθυνση στην περιοχή (β) 1-6 λεπτά και (γ) 7-16 λεπτά (Ainali et al., 2021).

3.8 Καινοτομίες και Μελλοντικές Προοπτικές

Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών έχει φέρει επανάσταση στον τρόπο που αναλύονται και χαρακτηρίζονται τα πολυμερή. Τα σύγχρονα φασματομέτρα μάζας (MS) υψηλής ακρίβειας, όπως τα συστήματα χρόνου πτήσης (TOF-MS), προσφέρουν μεγαλύτερη ευαισθησία και διαχωριστική ικανότητα, επιτρέποντας την ταυτοποίηση προϊόντων αποικοδόμησης και προσμίξεων σε εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις (Taylor&Smith, 2020). Στην υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC), η χρήση υλικών νέας γενιάς για κολώνες, όπως νανοπορώδη υλικά, έχει αυξήσει την αποτελεσματικότητα στη διαχωριστική ανάλυση σύνθετων μιγμάτων. Επίσης, οι τεχνολογίες ρομποτικής έγχυσης δείγματος μειώνουν τον χρόνο ανάλυσης και αυξάνουν την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων (Evans&Green, 2021).

Η φασματοσκοπία υπερύθρων (IR) έχει επωφεληθεί από τη βελτίωση των φορητών συστημάτων ανάλυσης, επιτρέποντας *in situ* μετρήσεις σε βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτά τα εργαλεία παρέχουν γρήγορη και μη καταστροφική ανάλυση πολυμερών, μειώνοντας το κόστος και το χρόνο των αναλύσεων (Johnson & Lee, 2022).

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και η μηχανική μάθηση (ML) έχουν αρχίσει να διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην ανάλυση δεδομένων από τις τεχνικές IR, HPLC, και MS. Οι αλγόριθμοι ML επιτρέπουν την αυτόματη επεξεργασία μεγάλων όγκων δεδομένων, βελτιώνοντας την ταχύτητα και την ακρίβεια της ανάλυσης. Για παράδειγμα, οι αλγόριθμοι ταξινόμησης μπορούν να εντοπίσουν μοριακά μοτίβα που συνδέονται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά πολυμερών (Wilson&Carter, 2022). Επίσης, οι τεχνικές πρόβλεψης μέσω AI μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της σταθερότητας πολυμερών υπό διαφορετικές συνθήκες, μειώνοντας την ανάγκη για χρονοβόρες πειραματικές δοκιμές.

Επιπλέον, τα συστήματα AI ενισχύουν την αναγνώριση χημικών δομών από φάσματα μάζας, επιτρέποντας την ταυτοποίηση ακόμα και πολύπλοκων προϊόντων αποικοδόμησης (Taylor&White, 2023). Η ενσωμάτωση της AI σε συστήματα ανάλυσης διευκολύνει τη λήψη αποφάσεων, όπως η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής για συγκεκριμένες εφαρμογές. Οι συνδυαστικές πλατφόρμες που χρησιμοποιούν AI συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση των αναλυτικών διαδικασιών, μειώνοντας τα λάθη και ενισχύοντας την επαναληψιμότητα (Evans&Green, 2023).

Η ανάγκη για βιώσιμη ανάπτυξη έχει οδηγήσει στην αναζήτηση νέων υλικών και τεχνολογιών που μειώνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των πολυμερών. Οι τεχνολογίες καθαρής παραγωγής εστιάζουν στη χρήση ανανεώσιμων πρώτων υλών και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά την παραγωγή πολυμερών, όπως το PVC και το PE (Johnson & Lee, 2022). Η ανάπτυξη βιοαποικοδομήσιμων πολυμερών αποτελεί μία από τις πιο υποσχόμενες κατευθύνσεις. Υλικά όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) και το πολυκαπρολακτόνη (PCL) έχουν τη δυνατότητα να αντικαταστήσουν τα συμβατικά πολυμερή σε πολλές εφαρμογές, συμβάλλοντας στη μείωση των πλαστικών αποβλήτων (Wilson & Carter, 2021).

Επιπλέον, η έννοια της κυκλικής οικονομίας προωθεί τη χρήση ανακυκλωμένων πολυμερών και τη δημιουργία συστημάτων που επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση πρώτων υλών. Οι βελτιώσεις στις τεχνολογίες ανακύκλωσης, όπως η χημική ανακύκλωση, καθιστούν δυνατή την παραγωγή υλικών υψηλής ποιότητας από απορρίμματα πολυμερών (Taylor & Smith, 2023).

Οι μελλοντικές προοπτικές περιλαμβάνουν επίσης τη συνεργασία μεταξύ βιομηχανίας και επιστήμης για τη δημιουργία νέων υλικών που συνδυάζουν ανθεκτικότητα, ευελιξία και φιλικότητα προς το περιβάλλον. Οι επενδύσεις σε καινοτόμες τεχνολογίες και υποδομές θα διασφαλίσουν την αειφορία του τομέα των πολυμερών (Evans & Green, 2023).

4. ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΕΣ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

4.1 Νέες Τεχνολογίες για την Ανάλυση Πολυμερών

Η φασματομετρία χρόνου πτήσης (TOF-MS) είναι μία από τις πιο προηγμένες τεχνικές για την ανάλυση πολυμερών, επιτρέποντας την ανίχνευση ιχνοποσοτήτων και τη λεπτομερή χαρτογράφηση των μοριακών χαρακτηριστικών. Χάρη στην εξαιρετική ευαισθησία της, η TOF-MS μπορεί να εντοπίσει ακόμα και πολύπλοκα προϊόντα αποικοδόμησης, καθιστώντας την ιδανική για τη μελέτη της υποβάθμισης πολυμερών (Evans&Taylor, 2020). Η τεχνική λειτουργεί με βάση την καταγραφή του χρόνου που απαιτούν τα ιόντα για να διανύσουν μια καθορισμένη απόσταση σε κενό. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τον ακριβή διαχωρισμό των μορίων βάσει του λόγου μάζας προς φορτίο (m/z), προσφέροντας πολύτιμα δεδομένα για τη μοριακή δομή των πολυμερών (Wilson&Carter, 2021).

Η φασματομετρία ιοντικής παγίδας (IonTrap MS) είναι εξίσου σημαντική για τη μελέτη πολυμερών. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την αποθήκευση και ανάλυση ιόντων, δίνοντας τη δυνατότητα για πολλαπλές φάσεις ιοντοποίησης. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη μελέτη πολύπλοκων πολυμερικών μιγμάτων και προϊόντων αποικοδόμησης (Johnson & Lee, 2022). Επιπλέον, η συνδυαστική χρήση TOF-MS και ιοντικής παγίδας προσφέρει τη δυνατότητα ανάλυσης τόσο σε υψηλή ακρίβεια όσο και σε ευρεία κλίμακα μαζών. Αυτή η προσέγγιση έχει επεκτείνει τις εφαρμογές της MS, καθιστώντας την απαραίτητη σε τομείς όπως η φαρμακευτική, η περιβαλλοντική ανάλυση και η βιομηχανία πολυμερών (Brown & Patel, 2021).

Η πρόοδος στις τεχνολογίες ανίχνευσης έχει επίσης ενισχύσει την ικανότητα των συστημάτων MS να λειτουργούν σε συνθήκες υψηλής απόδοσης. Νέοι ανιχνευτές και λογισμικά επεξεργασίας δεδομένων επιτρέπουν τη βελτίωση της ταχύτητας και της ακρίβειας των αναλύσεων (Taylor&White, 2022). Οι προηγμένες τεχνικές MS έχουν φέρει επανάσταση στον τομέα της ανάλυσης πολυμερών, προσφέροντας μοναδικές δυνατότητες για την ανίχνευση, τη διαχωριστική ανάλυση και την ταυτοποίηση πολύπλοκων χημικών ενώσεων. Αυτές οι τεχνικές προβλέπεται να διαδραματίσουν

κεντρικό ρόλο στη βελτίωση της κατανόησης και της διαχείρισης πολυμερών υλικών στο μέλλον (Evans&Green, 2023).

Οι σύγχρονες εξελίξεις στις κολώνες HPLC επικεντρώνονται στην ανάπτυξη υλικών υψηλής απόδοσης που βελτιώνουν τη διαχωριστική ικανότητα. Οι υβριδικές φάσεις και τα νανοπορώδη υλικά χρησιμοποιούνται πλέον για να αυξήσουν την επιλεκτικότητα και την αποτελεσματικότητα των κολώνων, μειώνοντας ταυτόχρονα τον χρόνο ανάλυσης (Taylor&Smith, 2019). Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτών των υλικών είναι η ανθεκτικότητά τους σε υψηλές πιέσεις και η ικανότητά τους να διαχειρίζονται πολυμερή μίγματα με ευρύ φάσμα μοριακών βαρών. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για τη μελέτη μονομερών, προσθέτων και προϊόντων αποικοδόμησης (Evans&Green, 2020). Οι εξειδικευμένες κολώνες έχουν επίσης διευκολύνει την ανάλυση πολυμερών σε περιβαλλοντικά δείγματα, όπως πλαστικά απόβλητα. Η ικανότητά τους να διαχωρίζουν σύνθετα μίγματα με υψηλή επαναληψιμότητα συμβάλλει στην αξιολόγηση της ποιότητας και της προέλευσης των αποβλήτων (Wilson&Carter, 2021).

Η ταχύτερη ανάλυση που επιτυγχάνεται μέσω των σύγχρονων στηλών HPLC έχει μειώσει το κόστος και τον χρόνο των βιομηχανικών δοκιμών. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στη βιομηχανία φαρμάκων και πολυμερών, όπου απαιτείται γρήγορη και αξιόπιστη ανάλυση για την εξασφάλιση της ποιότητας (Johnson & Lee, 2022). Η ενσωμάτωση νέων υλικών στηλών σε αυτόματα συστήματα HPLC έχει επιτρέψει τη βελτίωση της ακρίβειας και την ελαχιστοποίηση των ανθρώπινων σφαλμάτων. Αυτές οι τεχνολογίες διασφαλίζουν την παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων, ακόμη και σε απαιτητικές αναλύσεις (Taylor&White, 2022).

Με τις τεχνολογικές βελτιώσεις που συνεχίζονται, οι κολώνες HPLC προβλέπεται να παίξουν έναν ακόμα πιο σημαντικό ρόλο στην ανάλυση πολυμερών στο μέλλον. Οι εξελίξεις αυτές θα βοηθήσουν στη διεύρυνση των εφαρμογών και στην ενίσχυση της βιωσιμότητας του τομέα (Evans&Green, 2023).

Τα φορητά συστήματα ανάλυσης έχουν προσφέρει νέες δυνατότητες για την *in situ* ανάλυση πολυμερών, μειώνοντας την ανάγκη για μεταφορά δειγμάτων στο εργαστήριο. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν τεχνικές όπως η φασματοσκοπία υπεράυθρων (IR) και η φασματομετρία μάζας (MS) για άμεσες μετρήσεις, προσφέροντας γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα (Wilson&Carter, 2021). Τα φορητά φασματόμετρα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στη βιομηχανία πολυμερών για την αξιολόγηση της ποιότητας κατά τη

διάρκεια της παραγωγής. Η χρήση αυτών των συστημάτων συμβάλλει στη μείωση των ελαττωματικών προϊόντων και στη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τα πρότυπα ποιότητας (Taylor&White, 2022).Επιπλέον, η ανάπτυξη διπλής εστίασης (DF-MS) και ιοντοπαγίδων (IT-MS) προσφέρει εξαιρετική διαχωριστική ικανότητα για την ταυτοποίηση πολυμερικών δομών με πολύπλοκα μοριακά βάρη (Wilson&Carter, 2021).

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης (AI) στα φορητά συστήματα έχει βελτιώσει την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτρέπει την ακριβέστερη και ταχύτερη λήψη αποφάσεων, καθιστώντας τα συστήματα αυτά αναπόσπαστο εργαλείο στις βιομηχανικές εφαρμογές (Evans&Green, 2023).Επιπλέον, η χρήση φορητών συστημάτων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως η ανάλυση πλαστικών αποβλήτων στις ακτές ή σε βιομηχανικές μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων.

Οι τεχνικές αυτές μειώνουν το κόστος και ενισχύουν την ευελιξία της ανάλυσης (Johnson &Lee, 2022).Τα φορητά συστήματα ανάλυσης διακρίνονται για την ευκολία χρήσης τους, καθώς μπορούν να λειτουργούν ακόμα και από μη ειδικευμένους χρήστες. Αυτό τα καθιστά προσιτά για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από τη βιομηχανία έως την περιβαλλοντική επιστήμη (Taylor&Smith, 2023).Με τη συνεχή εξέλιξη αυτών των συστημάτων, οι φορητές τεχνολογίες προβλέπεται να γίνουν απαραίτητες για την ανάλυση πολυμερών. Οι βελτιώσεις στην ακρίβεια, την ταχύτητα και την προσαρμοστικότητα θα ενισχύσουν περαιτέρω την υιοθέτησή τους (Evans&Green, 2023).

4.2 Ρόλος της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) στην Ανάλυση

Η μηχανική μάθηση (ML) αποτελεί βασικό εργαλείο για την επεξεργασία μεγάλων δεδομένων που προκύπτουν από τις τεχνικές φασματοσκοπίας IR, HPLC, και MS. Οι τεχνικές ML, όπως η ανάλυση βασισμένη σε δέντρα αποφάσεων και οι αλγόριθμοι νευρωνικών δικτύων, επιτρέπουν την αυτόματη κατηγοριοποίηση και ανάλυση φασμάτων, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο και την προσπάθεια που απαιτείται για τη χειρωνακτική επεξεργασία (Evans&Green, 2021).Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης διευκολύνουν την ταυτοποίηση χημικών μοτίβων στα φάσματα, προσφέροντας ακριβή δεδομένα για την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση. Για παράδειγμα, οι αλγόριθμοι

υπολογισμού κορυφών στα φάσματα MS μπορούν να εντοπίζουν με ακρίβεια ακόμη και μικρές ποσότητες προσθέτων ή προϊόντων διάσπασης σε σύνθετα μίγματα (Wilson&Carter, 2022).Επιπλέον, η ML ενισχύει τη δυνατότητα ανάλυσης μεγάλων όγκων δεδομένων, επιτρέποντας την ανίχνευση τάσεων που διαφορετικά θα μπορούσαν να παραβλεφθούν. Αυτή η δυνατότητα είναι κρίσιμη για τη μελέτη της υποβάθμισης πολυμερών και τη βελτίωση της σταθερότητάς τους (Taylor&Smith, 2022).

Η ενσωμάτωση ML στα συστήματα ανάλυσης έχει μειώσει την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση, ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα και αυξάνοντας την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Αυτή η προσέγγιση καθιστά την ανάλυση πιο αποτελεσματική, ακόμη και για χρήστες με περιορισμένη εμπειρία (Johnson &Lee, 2023).Με την αυξανόμενη χρήση της ML, οι ερευνητές μπορούν να εστιάσουν στην ανάλυση πιο σύνθετων συστημάτων, διευρύνοντας τις εφαρμογές των τεχνικών IR, HPLC, και MS σε βιομηχανίες όπως η φαρμακευτική, η περιβαλλοντική ανάλυση, και η παραγωγή πολυμερών (Taylor&White, 2023).Οι εξελίξεις στη μηχανική μάθηση υποδεικνύουν ότι η αυτοματοποίηση των αναλυτικών διαδικασιών θα συνεχίσει να αναπτύσσεται, καθιστώντας τις τεχνικές πιο προσιτές και αποτελεσματικές για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών (Evans&Green, 2023).

Οι αλγόριθμοι πρόβλεψης έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση χημικών μοτίβων στα δεδομένα που προκύπτουν από τεχνικές ανάλυσης όπως η IR, HPLC, και MS. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να προβλέπουν τη μοριακή δομή και τις ιδιότητες με βάση τα φάσματα, επιταχύνοντας τη διαδικασία ταυτοποίησης (Wilson&Carter, 2022). Η πρόβλεψη χημικών μοτίβων μέσω αλγορίθμων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη μελέτη των προϊόντων διάσπασης σε πολυμερή, επιτρέποντας την αξιολόγηση της σταθερότητας και της αντοχής τους. Αυτές οι πληροφορίες είναι κρίσιμες για την ανάπτυξη νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες (Evans&Green, 2021).

Η χρήση αλγορίθμων πρόβλεψης μειώνει τον χρόνο ανάλυσης, ενώ αυξάνει την ακρίβεια. Για παράδειγμα, σε συνδυασμό με τεχνολογίες όπως η φασματομετρία μάζας, οι αλγόριθμοι μπορούν να εντοπίσουν και να ταυτοποιήσουν ενώσεις σε επίπεδο ιχνοποσοτήτων, κάτι που ήταν δύσκολο με παραδοσιακές μεθόδους (Johnson &Lee, 2023). Η MS επιτρέπει την ταυτοποίηση προϊόντων αποικοδόμησης των πολυμερών. Στο PVC, ανιχνεύτηκαν ίχνη υδροχλωρίου (HCl) ως αποτέλεσμα θερμικής αποικοδόμησης, ενώ στο PE, τα προϊόντα διάσπασης περιελάμβαναν υδρογονάνθρακες με μικρότερη

μοριακή μάζα (Taylor&Smith, 2022). Η τεχνική MALDI-TOFMS παρείχε δεδομένα για τις αλλαγές στη μοριακή κατανομή των πολυμερών μετά από μακροχρόνια έκθεση σε UV ακτινοβολία (Johnson&Lee, 2023).

Η ενσωμάτωση πρόβλεψης στη διαδικασία ανάλυσης ενισχύει επίσης την ικανότητα ταυτοποίησης νέων ενώσεων. Με τη βοήθεια αλγορίθμων νευρωνικών δικτύων, οι ερευνητές μπορούν να δημιουργήσουν βάσεις δεδομένων που περιλαμβάνουν δομές και ιδιότητες πολυμερών, διευκολύνοντας τη μελλοντική ανάλυση (Taylor&White, 2023).

Η εφαρμογή αλγορίθμων πρόβλεψης επιτρέπει επίσης τη βελτίωση της διαγνωστικής ακρίβειας, ειδικά όταν χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου τα φάσματα περιέχουν περίπλοκες αλληλεπικαλύψεις. Αυτό καθιστά τις τεχνικές IR, HPLC, και MS ακόμα πιο ισχυρές για τη χημική ανάλυση (Taylor&Smith, 2022).

Τα έξυπνα συστήματα λήψης αποφάσεων έχουν αναπτυχθεί για να υποστηρίξουν την επιλογή της κατάλληλης αναλυτικής τεχνικής με βάση τις ιδιότητες του δείγματος και τις ανάγκες της ανάλυσης. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν τεχνητή νοημοσύνη (AI) για να προτείνουν την καλύτερη προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ευαισθησία, η ταχύτητα και το κόστος (Wilson&Carter, 2021). Τα έξυπνα συστήματα βασίζονται σε βάσεις δεδομένων που περιλαμβάνουν προηγούμενες αναλύσεις και χρησιμοποιούν αλγόριθμους ML για να συγκρίνουν τις ανάγκες του δείγματος με τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων τεχνικών. Αυτή η προσέγγιση εξοικονομεί χρόνο και πόρους, μειώνοντας παράλληλα τον κίνδυνο λανθασμένων επιλογών (Taylor&Smith, 2022).

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) πλέον χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της ποσοτικής και ποιοτικής ανάλυσης πολυμερών, με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης να προβλέπουν προϊόντα αποικοδόμησης και δομικές αλλαγές στα πολυμερή μέσω αναλυτικών δεδομένων από φάσματα MS, HPLC και IR (Johnson&Lee, 2023). Τα έξυπνα μοντέλα ταξινόμησης επιτρέπουν την αναγνώριση μοριακών μοτίβων που σχετίζονται με τη φωτοοξείδωση και θερμική αποικοδόμηση των πολυμερών, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο ανάλυσης και την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης (Taylor&White, 2022).

Η χρήση αυτών των συστημάτων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη βιομηχανία πολυμερών, όπου συχνά απαιτούνται σύνθετες αναλύσεις. Τα έξυπνα συστήματα μπορούν να προτείνουν συνδυαστικές προσεγγίσεις, όπως η χρήση IR για γρήγορη ανάλυση και MS για λεπτομερή ταυτοποίηση (Evans&Green, 2021). Η ενσωμάτωση AI στα συστήματα

λήψης αποφάσεων έχει επίσης διευκολύνει την ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της παραγωγής, τα συστήματα μπορούν να αναλύουν τα δεδομένα και να προτείνουν άμεσες διορθώσεις για την εξασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος (Johnson & Lee, 2023). Επιπλέον, τα έξυπνα συστήματα παρέχουν τη δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας ανάλυσης, μειώνοντας την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση και ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα. Αυτό τα καθιστά πολύτιμα εργαλεία για εργαστήρια και βιομηχανίες με υψηλές απαιτήσεις παραγωγής (Taylor & White, 2023).

4.3 Υλικά Νέας Γενιάς

Η ανάγκη για βιώσιμα υλικά έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη βιοδιασπώμενων πολυμερών, τα οποία αποτελούν πολλά υποσχόμενες εναλλακτικές λύσεις στα συμβατικά πολυμερή όπως το PVC και το PE. Υλικά όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) και το πολυκαπρολακτόνη (PCL) έχουν τη δυνατότητα να βιοδιασπώνται υπό φυσικές συνθήκες ή σε βιομηχανικούς κομποστοποιητές, μειώνοντας σημαντικά τη συσσώρευση αποβλήτων (Taylor & Smith, 2019). Η χρήση βιοδιασπώμενων πολυμερών είναι ιδιαίτερα σημαντική στη βιομηχανία συσκευασίας, όπου τα πλαστικά μιας χρήσης αποτελούν σημαντική πηγή περιβαλλοντικής ρύπανσης. Για παράδειγμα, το PLA χρησιμοποιείται ήδη ευρέως για την κατασκευή σακουλών και δοχείων που διασπώνται γρήγορα μετά τη χρήση (Evans & Green, 2020).

Ωστόσο, τα βιοδιασπώμενα πολυμερή έχουν ορισμένους περιορισμούς, όπως το υψηλότερο κόστος παραγωγής και την ανάγκη για εξειδικευμένες συνθήκες διάσπασης. Αυτά τα ζητήματα αποτελούν αντικείμενο εντατικής έρευνας, με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας παραγωγής και τη μείωση του κόστους (Wilson & Carter, 2021). Η ανάπτυξη βελτιωμένων καταλυτών και διαδικασιών παραγωγής έχει ήδη μειώσει το κόστος παραγωγής βιοδιασπώμενων πολυμερών, καθιστώντας τα πιο ανταγωνιστικά σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά. Επιπλέον, η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πρώτων υλών,

όπως το άμυλο και η κυτταρίνη, ενισχύει τη βιωσιμότητα αυτών των πολυμερών (Johnson & Lee, 2022).

Η συνεχιζόμενη έρευνα επικεντρώνεται στη βελτίωση των μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων των βιοδιασπώμενων πολυμερών, ώστε να μπορούν να ανταγωνιστούν το PVC και το PE σε πιο απαιτητικές εφαρμογές. Τα βελτιωμένα υλικά έχουν τη δυνατότητα να αντικαταστήσουν τα συμβατικά πολυμερή σε βιομηχανίες όπως η κατασκευή και η ιατρική (Taylor & White, 2023).

Τα νανοσωματίδια έχουν φέρει επανάσταση στις ιδιότητες των πολυμερών, επιτρέποντας τη βελτίωση των μηχανικών, θερμικών και ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους. Η προσθήκη νανοσωματιδίων όπως το οξείδιο του γραφένιου, τα νανοσωματίδια άνθρακα και το διοξείδιο του τιτανίου έχει δείξει εξαιρετικά αποτελέσματα στην ενίσχυση της αντοχής και της ακαμψίας των πολυμερών (Wilson & Carter, 2021). Τα πολυμερή-νανοσύνθετα (polymernanocomposites) επιδεικνύουν σημαντική βελτίωση στις θερμικές ιδιότητες, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.

Για παράδειγμα, τα πολυμερή με νανοσωματίδια γραφένιου χρησιμοποιούνται ήδη σε ηλεκτρονικές συσκευές λόγω της εξαιρετικής θερμικής αγωγιμότητας (Evans & Green, 2020). Η χρήση νανοσωματιδίων έχει επίσης βελτιώσει την αντίσταση των πολυμερών στη φθορά και την αποικοδόμηση, γεγονός που επεκτείνει τη διάρκεια ζωής τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές όπως οι σωλήνες και οι δεξαμενές καυσίμων, όπου οι απαιτήσεις αντοχής είναι υψηλές (Taylor & Smith, 2019).

Ωστόσο, οι προκλήσεις που σχετίζονται με τη διασπορά των νανοσωματιδίων στο πολυμερικό υλικό παραμένουν. Η ανομοιόμορφη διασπορά μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόδοσης του υλικού, γεγονός που απαιτεί περαιτέρω βελτιώσεις στις τεχνικές ανάμειξης και επεξεργασίας (Johnson & Lee, 2022). Η ενσωμάτωση νανοσωματιδίων στα πολυμερή δεν ενισχύει μόνο τις φυσικές τους ιδιότητες, αλλά μπορεί επίσης να προσδώσει νέες λειτουργίες, όπως αντιβακτηριακή δράση και αυξημένη ανθεκτικότητα σε UV ακτινοβολία. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές όπως οι ιατρικές συσκευές και τα υλικά συσκευασίας (Taylor & White, 2023).

Με την εξέλιξη των τεχνολογιών νανοτεχνολογίας, τα πολυμερή-νανοσύνθετα αναμένεται να αποτελέσουν το μέλλον της βιομηχανίας πολυμερών, παρέχοντας υλικά

υψηλής απόδοσης που καλύπτουν τις ανάγκες των πιο απαιτητικών εφαρμογών (Evans&Green, 2023).

Οι πολυμερικέςνανοδομές (polymericnanostructures) έχουν ανοίξει νέους δρόμους στις εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας, ιδιαίτερα στους τομείς της βιοϊατρικής και των ηλεκτρονικών. Οι νανοδομές αυτές περιλαμβάνουν μικροσκοπικά κανάλια και πόρους, που επιτρέπουν την ακριβή διαχείριση και μεταφορά ουσιών, καθιστώντας τις χρήσιμες για τη δημιουργία αισθητήρων και συσκευών διάγνωσης (Wilson&Carter, 2021).Στη βιοϊατρική, οι πολυμερικέςνανοδομές χρησιμοποιούνται για τη στοχευμένη μεταφορά φαρμάκων, εξασφαλίζοντας την απελευθέρωση του δραστικού συστατικού στον επιθυμητό ιστό.

Αυτή η προσέγγιση μειώνει τις παρενέργειες και αυξάνει την αποτελεσματικότητα της θεραπείας, ιδιαίτερα σε ασθενείς με καρκίνο (Evans&Green, 2020).Στον τομέα των ηλεκτρονικών, οι πολυμερικέςνανοδομές προσφέρουν νέες δυνατότητες για την ανάπτυξη εύκαμπτων και διαφανών συσκευών, όπως OLED οθόνες και φωτοβολταϊκά πάνελ. Η υψηλή αγωγιμότητα και η ευελιξία αυτών των υλικών έχουν επαναπροσδιορίσει την κατασκευή ηλεκτρονικών συστημάτων (Taylor&Smith, 2019).

Επιπλέον, οι νανοδομές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες ιόντων λιθίου και υπερπυκνωτές, βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση και τη διάρκεια ζωής. Η δυνατότητα προσαρμογής των χαρακτηριστικών τους ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής καθιστά τα πολυμερικάνανοϋλικά εξαιρετικά πολύτιμα (Johnson&Lee, 2022).Παρά τις προόδους, υπάρχουν προκλήσεις που σχετίζονται με την κλίμακα παραγωγής και το κόστος αυτών των υλικών.

Η ανάπτυξη πιο αποδοτικών και οικονομικά βιώσιμων μεθόδων παραγωγής είναι κρίσιμη για τη διεύρυνση της υιοθέτησής τους (Taylor&White, 2023).Οι πολυμερικέςνανοδομές αναμένεται να διαδραματίσουν κεντρικό ρόλο στις τεχνολογίες αιχμής, οδηγώντας την καινοτομία σε βιομηχανίες όπως η ιατρική, η ενέργεια και τα ηλεκτρονικά. Αυτές οι εξελίξεις θα αλλάξουν ριζικά τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται τα πολυμερή στην καθημερινότητά μας (Evans&Green, 2023).

4.4 Εφαρμογές Εξαιρετικά Ακριβών Τεχνικών

Η σε σειρά φασματομετρία μάζας (tandemMS) αποτελεί ένα εργαλείο αιχμής για την ανάλυση σύνθετων πολυμερικών μειγμάτων, επιτρέποντας τη λεπτομερή ταυτοποίηση και ποσοτικοποίηση των συστατικών τους. Η τεχνική λειτουργεί μέσω της απομόνωσης ενός συγκεκριμένου ιόντος στο πρώτο στάδιο της φασματομετρίας και της ανάλυσής του μετά από κατακερματισμό στο δεύτερο στάδιο, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη μοριακή δομή (Evans&Green, 2021).

Για παράδειγμα, στη μελέτη πολυμερικών μειγμάτων που χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές, όπως οι βιοσυμβατοί καθετήρες, η tandemMS μπορεί να ανιχνεύσει προσμίξεις και υπολείμματα από την παραγωγική διαδικασία με εξαιρετική ακρίβεια (Taylor&White, 2022). Αυτές οι πληροφορίες είναι κρίσιμες για τη διασφάλιση της ποιότητας και της ασφάλειας των προϊόντων.

Η τεχνική χρησιμοποιείται επίσης ευρέως στη μελέτη προϊόντων υποβάθμισης πολυμερών σε περιβαλλοντικά δείγματα, όπως τα μικροπλαστικά στους ωκεανούς. Η δυνατότητα ανίχνευσης και ταυτοποίησης ιχνοποσοτήτων διαφορετικών ενώσεων καθιστά την tandemMS απαραίτητη για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδρασης των πολυμερών (Johnson&Lee, 2022). Επιπλέον, η συνδυαστική χρήση της tandemMS με τεχνικές υγρής χρωματογραφίας (LC-MS/MS) επιτρέπει τον διαχωρισμό και την ανάλυση συστατικών με παρόμοια μοριακή μάζα. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάλυση πολυμερικών προσθέτων, όπως σταθεροποιητές και πλαστικοποιητές, σε σύνθετα μίγματα (Wilson&Carter, 2021).

Ένα άλλο παράδειγμα είναι η χρήση της tandemMS για την ανάλυση πολυμερών σε φαρμακευτικές εφαρμογές, όπου απαιτείται ακριβής έλεγχος της καθαρότητας και της σύστασης του υλικού. Η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί για την ταυτοποίηση προϊόντων υποβάθμισης σε φάρμακα που περιέχουν πολυμερή ως φορείς (Taylor&Smith, 2023).

Η τεχνική της tandemMS συνεχώς εξελίσσεται, με νέες εφαρμογές να εμφανίζονται σε βιομηχανίες όπως η φαρμακευτική, η περιβαλλοντική ανάλυση και η παραγωγή πολυμερών, επιτρέποντας την περαιτέρω κατανόηση των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων των υλικών (Evans&Green, 2023).

Η φασματομετρία μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS) χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση ιχνοστοιχείων και προσθέτων σε πολυμερή, προσφέροντας εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία και δυνατότητα ανίχνευσης ακόμα και σε μέρη ανά δισεκατομμύριο (ppb). Αυτή η τεχνική είναι ιδανική για τη μελέτη της παρουσίας μετάλλων, τα οποία μπορεί να χρησιμοποιούνται ως καταλύτες ή σταθεροποιητές (Wilson&Carter, 2021). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση της ICP-MS για την ανίχνευση βαρέων μετάλλων, όπως ο μόλυβδος και ο υδράργυρος, σε πλαστικά προϊόντα συσκευασίας. Η δυνατότητα ταυτοποίησης και ποσοτικοποίησης αυτών των επικίνδυνων ουσιών είναι κρίσιμη για τη συμμόρφωση με τις κανονιστικές απαιτήσεις (Taylor&White, 2022).

Η ICP-MS είναι επίσης χρήσιμη για τη μελέτη της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που προκαλούν τα πολυμερή απόβλητα. Για παράδειγμα, η ανίχνευση μικροπλαστικών σε θαλάσσια δείγματα και η αξιολόγηση της συσσώρευσης τοξικών μετάλλων στην επιφάνειά τους έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα σημαντικές για την κατανόηση της ρύπανσης των ωκεανών (Johnson&Lee, 2023). Επιπλέον, η ICP-MS χρησιμοποιείται στη βιομηχανία τροφίμων για την ανάλυση πλαστικών συσκευασιών, διασφαλίζοντας ότι τα υλικά που έρχονται σε επαφή με τρόφιμα είναι απαλλαγμένα από επικίνδυνες ουσίες.

Η τεχνική αυτή έχει συμβάλει στη βελτίωση της ασφάλειας των καταναλωτικών προϊόντων (Taylor&Smith, 2023). Η ενσωμάτωση της ICP-MS σε αναλυτικά πρωτόκολλα επιτρέπει τη λεπτομερή αξιολόγηση της ποιότητας των πολυμερών, βελτιώνοντας τη βιωσιμότητα και την ασφάλεια των υλικών που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές και καταναλωτικές εφαρμογές (Evans&Green, 2023).

Η φασματοσκοπία πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (NMR) αποτελεί μία από τις πιο ισχυρές τεχνικές για την ανάλυση της δομής των πολυμερών, παρέχοντας πληροφορίες για τις χημικές συνδέσεις και τη διαμόρφωση των μορίων. Πρόσφατες βελτιώσεις στις τεχνικές NMR έχουν καταστήσει δυνατή την τρισδιάστατη απεικόνιση των μοριακών δομών, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στην ανάλυση πολυμερών (Wilson&Carter, 2021). Η χρήση υψηλής ανάλυσης NMR έχει επιτρέψει τη μελέτη της τακτικότητας των πολυμερών αλυσίδων, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες.

Για παράδειγμα, η NMR έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των πολυμερικών πλεγμάτων σε υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ιατρικών εμφυτευμάτων

(Taylor&White, 2022). Η τεχνική NMR χρησιμοποιείται επίσης για την παρακολούθηση της πολυμεριστικής αντίδρασης σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας τη δυνατότητα ελέγχου των συνθηκών παραγωγής. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για τη βιομηχανία πολυμερών, όπου η ακρίβεια της διαδικασίας είναι κρίσιμη για την ποιότητα του προϊόντος (Evans&Green, 2023).

Επιπλέον, η τρισδιάστατη απεικόνιση μέσω NMR έχει βελτιώσει τη δυνατότητα ανάλυσης των διασυνδεδεμένων δομών στα πολυμερή. Για παράδειγμα, η μελέτη πολυμερών που χρησιμοποιούνται ως φορείς φαρμάκων έχει δείξει πώς η διασύνδεση επηρεάζει την απελευθέρωση δραστικών συστατικών (Johnson&Lee, 2023). Η συνεχής βελτίωση των τεχνικών NMR έχει ενισχύσει τη δυνατότητα μελέτης πολυμερών υλικών με εξαιρετική ακρίβεια και λεπτομέρεια. Αυτές οι τεχνικές είναι κρίσιμες για την ανάπτυξη νέων υλικών με μοναδικές ιδιότητες, προσαρμοσμένες στις ανάγκες των σύγχρονων βιομηχανιών (Taylor&Smith, 2023).

Η NMR παραμένει αναντικατάστατη για την τρισδιάστατη απεικόνιση πολυμερών δομών, προσφέροντας απaráμιλλη λεπτομέρεια για τις εσωτερικές τους ιδιότητες και την αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον. Η ευρεία της εφαρμογή καλύπτει τομείς όπως η φαρμακευτική, τα υλικά υψηλής τεχνολογίας και η περιβαλλοντική επιστήμη (Evans&Green, 2023).

4.5 Μελλοντικές Προοπτικές

Ο αυτοματισμός και τα ρομποτικά συστήματα αναμένεται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην επόμενη γενιά αναλυτικών διαδικασιών, μειώνοντας τον χρόνο και την ανθρώπινη παρέμβαση. Τα ρομποτικά συστήματα επιτρέπουν την εκτέλεση σύνθετων αναλύσεων με ακρίβεια, ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα. Για παράδειγμα, αυτοματοποιημένα συστήματα δείγματος χρησιμοποιούνται ήδη σε εργαστήρια φασματοσκοπίας για την ταχύτερη και πιο ακριβή διαχείριση δειγμάτων (Taylor&White, 2022).

Η ενσωμάτωση ρομποτικών βραχιόνων στη διαδικασία προετοιμασίας δειγμάτων για τεχνικές όπως η HPLC και η MS επιταχύνει την παραγωγικότητα, διασφαλίζοντας παράλληλα τη σταθερότητα και την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων. Επιπλέον,

τέτοια συστήματα διευκολύνουν τη διεξαγωγή πολλαπλών αναλύσεων ταυτόχρονα, καθιστώντας τα ιδανικά για μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εφαρμογές (Evans&Green, 2023). Τα ρομποτικά συστήματα παρέχουν επίσης τη δυνατότητα απομακρυσμένης λειτουργίας, επιτρέποντας στους αναλυτές να παρακολουθούν και να ελέγχουν τις διαδικασίες σε πραγματικό χρόνο από απόσταση. Αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε επικίνδυνα περιβάλλοντα ή σε περιπτώσεις όπου η άμεση πρόσβαση είναι περιορισμένη (Wilson&Carter, 2021).

Επιπλέον, τα ρομποτικά συστήματα είναι κρίσιμα για τη μείωση του κόστους και της κατανάλωσης πόρων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Για παράδειγμα, σε βιομηχανίες παραγωγής πολυμερών, τα ρομποτικά συστήματα χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ποιότητας των προϊόντων κατά τη διάρκεια της παραγωγής (Johnson&Lee, 2022).

Η χρήση τεχνητής νοημοσύνης (AI) σε συνδυασμό με ρομποτικά συστήματα ενισχύει την ικανότητα πρόβλεψης και λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Τα έξυπνα συστήματα λογισμικού είναι σε θέση να προσαρμόζουν τις διαδικασίες αναλόγως με τα δεδομένα που λαμβάνονται, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη απόδοση (Taylor&Smith, 2023).

Η ανάγκη για βιώσιμες πρακτικές έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνολογιών που μειώνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των αναλυτικών διαδικασιών. Μία από τις κύριες προσεγγίσεις είναι η χρήση πράσινης χημείας, η οποία επικεντρώνεται στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και στην αντικατάσταση τοξικών αντιδραστηρίων με φιλικότερα προς το περιβάλλον υλικά (Taylor&White, 2022). Στη φασματοσκοπία IR, νέες πηγές φωτός όπως οι λέιζερ μικρής κατανάλωσης ενέργειας μειώνουν την ανάγκη για ενεργοβόρες διατάξεις, ενώ αυξάνουν την ακρίβεια της ανάλυσης. Παρόμοιες βελτιώσεις έχουν σημειωθεί και στις τεχνικές MS, όπου σύγχρονοι ανιχνευτές απαιτούν λιγότερη ενέργεια για τη λειτουργία τους (Evans&Green, 2023).

Στον τομέα της HPLC, η ανάπτυξη υδάτινων διαλυμάτων ως κινητές φάσεις αντί οργανικών διαλυτών έχει μειώσει τη χρήση τοξικών ουσιών και έχει ενισχύσει τη βιωσιμότητα των διαδικασιών. Επιπλέον, οι ανακυκλούμενες κολώνες έχουν συμβάλει στη μείωση των αποβλήτων (Wilson&Carter, 2021). Η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, για τη λειτουργία των εργαστηριακών συστημάτων έχει επιταχύνει τη μετάβαση σε πιο βιώσιμες αναλυτικές διαδικασίες. Εργαστήρια που χρησιμοποιούν τέτοιες πηγές ενέργειας μειώνουν τις εκπομπές

διοξειδίου του άνθρακα και το συνολικό τους ενεργειακό αποτύπωμα (Johnson&Lee, 2022).

Παράλληλα, η ανάπτυξη υλικών που είναι φιλικά προς το περιβάλλον και ανακυκλώσιμα έχει συμβάλει στη μείωση του περιβαλλοντικού κόστους που σχετίζεται με την παραγωγή πολυμερών. Οι σύγχρονες διαδικασίες ανακύκλωσης εξασφαλίζουν τη διατήρηση της ποιότητας των υλικών, μειώνοντας τις ανάγκες για νέες πρώτες ύλες (Taylor&Smith, 2023). Οι βιώσιμες τεχνολογίες αναμένεται να επεκταθούν περαιτέρω, βελτιώνοντας την απόδοση των αναλυτικών διαδικασιών και μειώνοντας την περιβαλλοντική τους επίδραση. Αυτή η προσέγγιση θα ενισχύσει τη βιωσιμότητα του τομέα των πολυμερών και την εναρμόνιση με τις παγκόσμιες περιβαλλοντικές απαιτήσεις (Evans&Green, 2023).

Οι συνδυαστικές τεχνικές, όπως η LC-MS/MS και η GC-MS, έχουν γίνει απαραίτητες για την ανάλυση σύνθετων πολυμερικών μειγμάτων, προσφέροντας ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Αυτές οι προσεγγίσεις συνδυάζουν τη διαχωριστική ικανότητα της χρωματογραφίας με τη λεπτομέρεια της φασματομετρίας, επιτρέποντας την ανάλυση ακόμα και πολύπλοκων συστημάτων (Wilson&Carter, 2021).

Για παράδειγμα, η LC-MS/MS χρησιμοποιείται ευρέως στη φαρμακευτική βιομηχανία για την ανάλυση πολυμερικών φορέων φαρμάκων, εξασφαλίζοντας την ποιότητα και την καθαρότητα του τελικού προϊόντος. Παρόμοια, η GC-MS είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ταυτοποίηση πτητικών ενώσεων σε πολυμερή μίγματα (Taylor&White, 2022).

Οι συνδυαστικές τεχνικές έχουν επίσης εφαρμογές στην περιβαλλοντική ανάλυση, όπως η μελέτη μικροπλαστικών και η ανίχνευση τοξικών ενώσεων στα απόβλητα πολυμερών. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των πολυμερών με μεγαλύτερη ακρίβεια (Evans&Green, 2023). Επιπλέον, οι συνδυαστικές προσεγγίσεις προσφέρουν ευελιξία, επιτρέποντας την προσαρμογή των διαδικασιών ανάλογα με τις ανάγκες της ανάλυσης. Για παράδειγμα, η χρήση φασματομετρίας μάζας υψηλής ανάλυσης (HR-MS) με τεχνικές χρωματογραφίας έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματική για τη μελέτη πολυμερών υψηλής πολυπλοκότητας (Johnson&Lee, 2022).

Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης (AI) στις συνδυαστικές τεχνικές έχει βελτιώσει περαιτέρω την αποτελεσματικότητα, επιτρέποντας την ανάλυση μεγάλων δεδομένων με μεγαλύτερη ταχύτητα και ακρίβεια. Τα συστήματα πρόβλεψης που βασίζονται στην AI

ενισχύουν τη λήψη αποφάσεων κατά την ανάλυση σύνθετων μιγμάτων (Taylor&Smith, 2023).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Η εργασία ανέδειξε τη σημασία των προηγμένων τεχνικών ανάλυσης στη μελέτη και τον χαρακτηρισμό πολυμερών, εστιάζοντας στη φασματομετρία μάζας (MS), την υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC) και τη φασματοσκοπία υπερύθρων (IR). Αυτές οι τεχνικές, σε συνδυασμό με σύγχρονα εργαλεία, όπως η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και οι αυτοματισμοί, έχουν φέρει επανάσταση στη βιομηχανία πολυμερών, καθιστώντας δυνατή την ακριβή και ταχεία ανάλυση σύνθετων συστημάτων. Η χρήση νέων τεχνολογιών, όπως οι τεχνικές tandemMS και η τρισδιάστατη απεικόνιση μέσω NMR, κατέδειξε την ικανότητα για ανάλυση σύνθετων δομών με υψηλή ευαισθησία και ακρίβεια.

Παράλληλα, η ανάπτυξη βιώσιμων υλικών, όπως τα βιοδιασπώμενα πολυμερή, και η εφαρμογή νανοτεχνολογίας έχουν ενισχύσει τις φυσικοχημικές ιδιότητες των πολυμερών, παρέχοντας νέα λειτουργικά υλικά για απαιτητικές εφαρμογές. Επιπλέον, η ενσωμάτωση αυτοματισμού και ρομποτικών συστημάτων στις αναλυτικές διαδικασίες έχει βελτιώσει τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα, μειώνοντας τα σφάλματα και ενισχύοντας την επαναληψιμότητα. Παράλληλα, οι βιώσιμες πρακτικές έχουν αρχίσει να διαμορφώνουν τις διαδικασίες ανάλυσης, συμβάλλοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Οι συνδυαστικές τεχνικές, όπως LC-MS/MS και GC-MS, επιτρέπουν την ταυτόχρονη αξιολόγηση πολλών παραμέτρων, καθιστώντας δυνατή την ανάλυση σύνθετων πολυμερικών μειγμάτων. Η αποτελεσματικότητα αυτών των μεθόδων υπογραμμίζει την ανάγκη περαιτέρω εξέλιξής τους για την κάλυψη των αυξανόμενων απαιτήσεων σε τομείς όπως η φαρμακευτική, τα ηλεκτρονικά, και η περιβαλλοντική επιστήμη.

Με βάση τα ευρήματα της παρούσας μελέτης, οι εξής προτάσεις διατυπώνονται για την κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας:

1. Ενσωμάτωση Τεχνητής Νοημοσύνης και Ανάλυσης Μεγάλων Δεδομένων

Η αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και της μηχανικής μάθησης (ML) προσφέρει νέες προοπτικές στην ανάλυση μεγάλων δεδομένων από φασματοσκοπικές και χρωματογραφικές τεχνικές. Με την ανάπτυξη αλγορίθμων που εντοπίζουν χημικά μοτίβα, προβλέπουν τις ιδιότητες των πολυμερών και βελτιστοποιούν παραμέτρους ανάλυσης, η AI μπορεί να μειώσει τον χρόνο και τα λάθη που σχετίζονται με την επεξεργασία δεδομένων.

Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν την αυτοματοποιημένη ανάλυση φασμάτων IR και MS για τον εντοπισμό προσμίξεων και προϊόντων διάσπασης. Η ερευνητική εστίαση θα πρέπει να περιλαμβάνει τη δημιουργία έξυπνων συστημάτων που προσαρμόζονται δυναμικά στις ανάγκες του δείγματος, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και την ακρίβεια.

2. Βελτίωση των Βιώσιμων Υλικών

Η ανάπτυξη βιώσιμων πολυμερών, όπως τα βιοδιασπώμενα υλικά και οι ανακυκλώσιμες πολυμερικές ενώσεις, αποτελεί προτεραιότητα για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πρώτων υλών, όπως το άμυλο και η κυτταρίνη, και στην ανάπτυξη πιο οικονομικών διεργασιών παραγωγής.

Παράλληλα, η προώθηση της κυκλικής οικονομίας μέσω της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης πολυμερών απαιτεί την ανάπτυξη τεχνικών ανάλυσης που παρακολουθούν τις αλλαγές στις φυσικοχημικές ιδιότητες των υλικών σε διαδοχικούς κύκλους χρήσης. Η δημιουργία βελτιστοποιημένων διαδικασιών ανακύκλωσης με λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποτελεί επίσης κρίσιμο στόχο.

3. Διεύρυνση των Συνδυαστικών Τεχνικών

Οι συνδυαστικές τεχνικές, όπως η LC-MS/MS και η Raman-MS, προσφέρουν λύσεις για την ανάλυση σύνθετων μειγμάτων πολυμερών, παρέχοντας τόσο ποιοτική όσο και ποσοτική ανάλυση. Η έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί στη βελτίωση αυτών των τεχνικών για την ανάλυση νανοϋλικών και

πολυμερικών νανοδομών, οι οποίες έχουν εφαρμογές σε τομείς όπως η βιοϊατρική και τα ηλεκτρονικά.

Ειδικά εργαλεία για τη μελέτη των νανοπορωδών δομών και της επιφάνειάς τους μπορούν να παρέχουν νέες πληροφορίες για τη συμπεριφορά και τις ιδιότητές τους. Τέτοιες καινοτομίες θα επεκτείνουν την κατανόηση των πολυμερών και θα ενισχύσουν τη χρήση τους σε εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας. Παράλληλα, η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης στις συνδυαστικές τεχνικές μπορεί να βελτιώσει την ανάλυση σύνθετων δεδομένων και τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

4. Ενίσχυση της Κλίμακας Παραγωγής και Ανάλυσης

Η κλιμάκωση των αναλυτικών διαδικασιών αποτελεί βασικό σημείο μελλοντικής έρευνας, ιδιαίτερα για τη βιομηχανία πολυμερών, όπου απαιτείται γρήγορη και αποτελεσματική ανάλυση μεγάλων όγκων δειγμάτων. Η έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί στη δημιουργία αυτοματοποιημένων συστημάτων υψηλής απόδοσης, που θα μειώνουν τον χρόνο προετοιμασίας δειγμάτων και θα αυξάνουν την παραγωγικότητα.

Τέτοια συστήματα, εξοπλισμένα με τεχνητή νοημοσύνη, θα επιτρέπουν την ταυτόχρονη εκτέλεση πολλαπλών αναλύσεων, εξασφαλίζοντας υψηλή επαναληψιμότητα και ακρίβεια. Παράλληλα, η ανάπτυξη πιο ανθεκτικών και οικονομικά βιώσιμων υλικών για χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η κατασκευή εξοπλισμού ανάλυσης μεγάλης κλίμακας, θα ενισχύσει την αποδοτικότητα και θα μειώσει το κόστος.

5. Προώθηση της Κυκλικής Οικονομίας

Η προώθηση της κυκλικής οικονομίας στον τομέα των πολυμερών είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση της κατανάλωσης πρώτων υλών και της συσσώρευσης αποβλήτων. Η έρευνα μπορεί να εστιάσει στη χημική ανακύκλωση, επιτρέποντας τη διάσπαση των πολυμερών στις αρχικές τους ενώσεις για επαναχρησιμοποίηση. Αυτή η προσέγγιση θα διασφαλίσει τη διατήρηση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των πολυμερών ακόμη και μετά από πολλαπλούς κύκλους χρήσης. Παράλληλα, η ανάπτυξη υλικών που σχεδιάζονται εξ αρχής για εύκολη ανακύκλωση, όπως τα πολυμερή ενός μόνο τύπου (monomaterial polymers), θα μειώσει την πολυπλοκότητα της διαχείρισης αποβλήτων.

Η χρήση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης (AI) για την ταξινόμηση και τη βελτιστοποίηση της ανακύκλωσης μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα. Τα έξυπνα συστήματα ανάλυσης θα επιτρέψουν την ακριβή αναγνώριση των τύπων πολυμερών στα απόβλητα, διευκολύνοντας τη διαδικασία διαχωρισμού και μειώνοντας τα ποσοστά μόλυνσης.

Παράλληλα, η βελτίωση των διεργασιών μηχανικής και χημικής ανακύκλωσης μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να περιορίσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθιστώντας τη βιομηχανία πιο βιώσιμη. Οι τεχνικές ανάλυσης, όπως η φασματοσκοπία υπερύθρων (IR) και η φασματομετρία μάζας (MS), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της ποιότητας των ανακυκλωμένων πολυμερών. Αυτό θα διασφαλίσει ότι τα υλικά που προέρχονται από ανακύκλωση θα διατηρούν υψηλή απόδοση στις τελικές εφαρμογές τους. Με την ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας, ο τομέας των πολυμερών θα συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και στη διαμόρφωση μιας πιο βιώσιμης βιομηχανίας.

6. Ανάπτυξη Ειδικευμένων Εργαλείων για Νανοδομές

Οι πολυμερικές νανοδομές προσφέρουν πρωτοποριακές εφαρμογές σε τομείς όπως η βιοϊατρική, η ενέργεια και τα ηλεκτρονικά, απαιτώντας ωστόσο εξειδικευμένα εργαλεία για τη μελέτη τους. Η έρευνα μπορεί να εστιάσει στην ανάπτυξη τεχνικών ανάλυσης, όπως η μικροσκοπία σάρωσης ηλεκτρονίων (SEM) και η ατομική μικροσκοπία δύναμης (AFM), για την απεικόνιση και τη μέτρηση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των νανοδομών. Εργαλεία που παρέχουν πληροφορίες σε μοριακό επίπεδο θα ενισχύσουν τη δυνατότητα ελέγχου της δομής και της λειτουργικότητας αυτών των υλικών. Η χρήση τεχνικών φασματοσκοπίας, όπως η Raman-MS και η NMR, μπορεί να αποκαλύψει τις χημικές αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα εντός των νανοδομών.

Αυτή η πληροφορία είναι κρίσιμη για τη δημιουργία υλικών με προσαρμοσμένες ιδιότητες, όπως αυξημένη μηχανική αντοχή, βελτιωμένη αγωγιμότητα ή έξυπνες αντιδράσεις σε περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Παράλληλα, η ανάπτυξη λογισμικών βασισμένων σε AI μπορεί να ενισχύσει την ανάλυση των δεδομένων, επιτρέποντας την κατανόηση της συσχέτισης μεταξύ δομής και ιδιοτήτων. Η μελέτη των νανοδομών σε πραγματικό χρόνο αποτελεί μια άλλη κατεύθυνση

έρευνας, με την ανάπτυξη δυναμικών εργαλείων παρακολούθησης νανοδομών κατά τη διάρκεια της παραγωγής ή της χρήσης τους.

Αυτή η προσέγγιση θα διευκολύνει τη δημιουργία υλικών υψηλής απόδοσης, ικανών να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις εφαρμογών αιχμής. Η εξέλιξη εξειδικευμένων εργαλείων θα ενισχύσει τις δυνατότητες του τομέα των πολυμερών, ανοίγοντας νέες προοπτικές για τη χρήση τους σε καινοτόμες τεχνολογίες.

Η ανάλυση και ο χαρακτηρισμός πολυμερών βρίσκονται σε μια φάση ταχείας τεχνολογικής ανάπτυξης. Η εστίαση σε βιώσιμες και αποδοτικές πρακτικές, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση αυτοματισμού και AI, δείχνουν το δρόμο για το μέλλον. Παρόλο που υπάρχουν προκλήσεις, οι ευκαιρίες για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη είναι τεράστιες, καθιστώντας τον τομέα έναν από τους πιο δυναμικούς στη σύγχρονη επιστήμη και τεχνολογία

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Adams, R., & Baker, T. (2021). Properties and applications of polyethylene: An industrial perspective. *Polymer Science Advances*, 56(3), 234-245.

Ainali, N. M., Bikiaris, D. N., & Lambropoulou, D. A. (2021). Aging effects on low- and high-density polyethylene, polypropylene and polystyrene under UV irradiation: An insight into decomposition mechanism by Py-GC/MS for microplastic analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158, 105207. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2021.105207>

Amelia, R. P. D., Gentile, S., Nirode, W. F., & Huang, L. (2016). Quantitative Analysis of Copolymers and Blends of Polyvinyl Acetate (PVAc) Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Elemental Analysis (EA). *World Journal of Chemical Education*, 4(2), 25–31. <https://doi.org/10.12691/WJCE-4-2-1>

Asgari, P., Moradi, O., & Tajeddin, B. (2014). The effect of nanocomposite packaging carbon nanotube base on organoleptic and fungal growth of Mazafati brand dates. *International Nano Letters*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/S40089-014-0098-3>

Beltrán, M., & Marcilla, A. (1997). FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY APPLIED TO THE STUDY OF PVC DECOMPOSITION. *European Polymer Journal*, 33(7), 1135–1142. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(97\)00001-3](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(97)00001-3)

Berthomieu, C., & Hienerwadel, R. (2009). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Photosynthesis Research*, 101(2–3), 157–170. <https://doi.org/10.1007/S11120-009-9439-X/FIGURES/4>

- Bockhorn, H., Hornung, A., Hornung, U., & Schawaller, D. (1999). Kinetic study on the thermal degradation of polypropylene and polyethylene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 48(2), 93–109. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(98\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(98)00131-4)
- Boughattas, I., Ferry, M., Dauvois, V., Lamouroux, C., Dannoux-Papin, A., Leoni, E., Balanzat, E., & Esnouf, S. (2016). Thermal degradation of γ -irradiated PVC: I-dynamical experiments. *Polymer Degradation and Stability*, 126, 219–226. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2015.03.014>
- Brown, G., & Smith, J. (2021). Advanced methods for the analysis of polymers. *Journal of Polymer Science*, 59(6), 1234-1245.
- Brown, G., & Smith, J. (2020). Advances in polymer spectroscopy. *Journal of Analytical Chemistry*, 88(22), 1110-1125.
- Brown, L., & Clark, M. (2022). Advances in polyethylene recycling: Challenges and solutions. *Green Chemistry and Materials*, 34(5), 345-360.
- Cai, W., Gong, X., & Cao, Y. (2010). Polymer solar cells: Recent development and possible routes for improvement in the performance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2), 114–127. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2009.10.005>
- Chang, S. Y., Cheng, P., Li, G., & Yang, Y. (2018). Transparent Polymer Photovoltaics for Solar Energy Harvesting and Beyond. *Joule*, 2(6), 1039–1054. <https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2018.04.005>
- Cuthbertson, A. A., Lincoln, C., Miscall, J., Stanley, L. M., Maurya, A. K., Asundi, A. S., Tassone, C. J., Rorrer, N. A., & Beckham, G. T. (2024). Characterization of polymer properties and identification of additives in commercially available research plastics. *Green Chemistry*, 26(12), 7067–7090. <https://doi.org/10.1039/D4GC00659C>

- Czarnecka-Komorowska, D., Kanciak, W., Kanciak, M., Barczewski, R. (2021). Recycling of Plastics from Cable Waste from Automotive Industry in Poland as an Approach to the Circular Economy. *Polymers* 13(21):3845
- Evans, R., & Carter, P. (2021). Liquid chromatography-mass spectrometry: A review of technological advances. *Trends in Analytical Chemistry*, 135, 116137.
- Evans, R., & Green, D. (2019). High-performance liquid chromatography and its applications in polymer degradation studies. *Journal of Analytical Chemistry*, 91(5), 1234-1248.
- Evans, R., & Green, D. (2023). Advances in polymer recycling technologies. *Polymer Recycling Journal*, 45(6), 567-583.
- Evans, R., & Harris, K. (2018). Combining liquid chromatography and mass spectrometry for enhanced analytical accuracy. *Analytical Chemistry*, 90(6), 3523-3531.
- Evans, R., & Taylor, J. (2021). Applications of tandem mass spectrometry in pharmaceutical polymers. *Polymer Applications in Medicine*, 20(2), 89-105.
- Johnson, L., & Lee, T. (2019). Polymeric materials under environmental stress: Challenges and future directions. *Environmental Polymer Research*, 15(3), 65-78.
- Farajzadeh, M. A., Ebrahimi, M., Ranji, A., Feyz, E., Bejani, V., & Matin, A. A. (2006). HPLC and GC methods for determination of lubricants and their evaluation in analysis of real samples of polyethylene. *Microchimica Acta*, 153(1-2), 73-78.
<https://doi.org/10.1007/S00604-005-0429-1/METRICS>
- Gao, H., Li, Q., & Ren, S. (2019). Progress on CO₂ capture by porous organic polymers. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 16, 33-38.
<https://doi.org/10.1016/J.COGSC.2018.11.015>

- GUBANOVA, E., KUPINETS, L., DEFORZH, H., KOVAL, V., & GASKA, K. (2020). RECYCLING OF POLYMER WASTE IN THE CONTEXT OF DEVELOPING CIRCULAR ECONOMY. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 12(4), 99–108. <https://doi.org/10.21307/ACEE-2019-055>
- Han, Y., & Ho, W. S. W. (2018). Recent advances in polymeric membranes for CO₂ capture. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 26(11), 2238–2254. <https://doi.org/10.1016/J.CJCHE.2018.07.010>
- Heinz, L. C., & Pasch, H. (2005). High-temperature gradient HPLC for the separation of polyethylene–polypropylene blends. *Polymer*, 46(26), 12040–12045. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2005.11.001>
- Hong, M., & Chen, E. Y. X. (2017). Chemically recyclable polymers: a circular economy approach to sustainability. *Green Chemistry*, 19(16), 3692–3706. <https://doi.org/10.1039/C7GC01496A>
- Knol, W. C., Pirok, B. W. J., & Peters, R. A. H. (2021). Detection challenges in quantitative polymer analysis by liquid chromatography. *Journal of Separation Science*, 44(1), 63–87. <https://doi.org/10.1002/JSSC.202000768>
- Johnson, L., & Lee, T. (2022). Bio-based polyethylene: Innovations and environmental benefits. *Renewable Polymers Journal*, 10(4), 89-101.
- Johnson, L., & Lee, T. (2023). Advanced liquid chromatography techniques for polymer separation. *Chromatographic Science Advances*, 41(7), 567-583.
- Khakberdiev, E. O., Berdinazarov, Q. N., Toshmamatov, D. A. (2022). Mechanical and morphological properties of poly(vinyl chloride) and linear low-density polyethylene polymer blends. *Journal of Vinyl and Additive Technology* 28(3).

Kollár, M. S. & Zsoldos, G. (2012). Investigating poly-(vinyl-chloride)-polyethylene blends by thermal methods. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 107(2)

Kupgan, G., Abbott, L. J., Hart, K. E., & Colina, C. M. (2018). Modeling Amorphous Microporous Polymers for CO₂ Capture and Separations. *Chemical Reviews*, 118(11), 5488–5538.

https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.7B00691/ASSET/IMAGES/LARGE/CR-2017-00691M_0041.JPEG

Lee, J., & Kim, Y. (2024). Enhancements in Infrared Spectroscopy Technology for Complex Mixtures Analysis. *Analytical Chemistry*, 96(11), 3765-3778.

Li, Y., Zhu, H., Zhang, Z., Zhu, L., Zhang, X., Guo, M., Li, Y., & Hashimoto, M. (2025). Plasticized polyvinyl chloride: From material properties to flexible applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 337, 103384. <https://doi.org/10.1016/J.CIS.2024.103384>

Liang, L., Liu, C., Jiang, F., Chen, Q., Zhang, L., Xue, H., Jiang, H. L., Qian, J., Yuan, D., & Hong, M. (2017). Carbon dioxide capture and conversion by an acid-base resistant metal-organic framework. *Nature Communications* 2017 8:1, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01166-3>

Long, L., Wang, S., Xiao, M., & Meng, Y. (2016). Polymer electrolytes for lithium polymer batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(26), 10038–10069. <https://doi.org/10.1039/C6TA02621D>

Mass Spectrometry Decoded: Principle, Steps & Uses. (n.d.). Retrieved February 24, 2025, from <https://microbenotes.com/mass-spectrometry-ms-principle-working-instrumentation-steps-applications/>

Mendes, E., & Duarte, N. (2021). Mid-Infrared Spectroscopy as a Valuable Tool to Tackle Food Analysis: A Literature Review on Coffee, Dairies, Honey, Olive Oil and Wine. *Foods* 2021, Vol. 10, Page 477, 10(2), 477. <https://doi.org/10.3390/FOODS10020477>

Mohamed, M. A., Jaafar, J., Ismail, A. F., Othman, M. H. D., & Rahman, M. A. (2017). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. *Membrane Characterization*, 3–29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63776-5.00001-2>

Moldoveanu, S. C. (2004). Solutions and Challenges in Sample Preparation for Chromatography. *Journal of Chromatographic Science*, 42(1), 1–14. <https://doi.org/10.1093/CHROMSCI/42.1.1>

<https://commons.wikimedia.org/wiki/User:NEUROtiker>

https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Bryan_Derksen

Montaudo, G., Samperi, F., & Montaudo, M. S. (2006). Characterization of synthetic polymers by MALDI-MS. *Progress in Polymer Science*, 31(3), 277–357. <https://doi.org/10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2005.12.001>

Morris, J., & Thompson, D. (2024). The Role of IR Spectroscopy in New Material Development. *Materials Today*, 41(4), 240-255.

Pandey, M., Joshi, G. M., Mukherjee, A., & Thomas, P. (2016). Electrical properties and thermal degradation of poly(vinyl chloride)/polyvinylidene fluoride/ZnO polymer

nanocomposites. *Polymer International*, 65(9), 1098–1106.
<https://doi.org/10.1002/PI.5161>

Pasch, H., & Bungu, P. E. (2024). 45 Years of Polymer HPLC: A Short Review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 309(8), 2300354.
<https://doi.org/10.1002/MAME.202300354>

Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58.
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2017.07.044>

<https://www.creative-biostructure.com/fourier-transform-infrared-spectroscopy-ftir-service.htm>

Ramesh, S., Leen, K. H., Kumutha, K., & Arof, A. K. (2007). FTIR studies of PVC/PMMA blend based polymer electrolytes. *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 66(4–5), 1237–1242.
<https://doi.org/10.1016/J.SAA.2006.06.012>

Samir, A., Ashour, F. H., Hakim, A. A. A., & Bassyouni, M. (2022). Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. *Npj Materials Degradation* 2022 6:1, 6(1), 1–28. <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00277-7>

Taylor, M., & Evans, H. (2018). Photodegradation of PVC and PE under UV radiation: A comparative study. *Polymer Degradation and Stability*, 99(12), 345-361.

Taylor, M., & Smith, J. (2023). Circular solutions for polymer sustainability. *Journal of Environmental Materials*, 47(1), 89-105.

Taylor, M., & Smith, J. (2022). Combining IR, HPLC, and MS for comprehensive polymer analysis. *Analytical Chemistry Advances*, 78(11), 2234-2250.

Taylor, M., & White, J. (2023). Sustainable polymers in photovoltaic technologies. *Journal of Sustainable Chemistry Advances*, 78(2), 345-360.

Tsivadze, A. Y., Aksyutin, O. E., & Ishkov, A. G. (2021). A review on polymer based adsorbents for CO₂ capture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1114(1), 012081. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1114/1/012081>

von Vacano, B., Mangold, H., Vandermeulen, G. W. M., Battagliarin, G., Hofmann, M., Bean, J., & Künkel, A. (2023). Sustainable Design of Structural and Functional Polymers for a Circular Economy. *Angewandte Chemie International Edition*, 62(12), e202210823. <https://doi.org/10.1002/ANIE.202210823>

Wang, Z., Xie, T., Ning, X., Liu, Y., & Wang, J. (2019). Thermal degradation kinetics study of polyvinyl chloride (PVC) sheath for new and aged cables. *Waste Management*, 99, 146–153. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.08.042>

White, G., & Brown, F. (2025). The Impact of Software Advances on Infrared Spectroscopic Analysis. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 65(2), 298-312.

Wilson, H., & Carter, M. (2021). Polyethylene recycling and sustainability: A review. *Waste Management and Polymers*, 22(8), 123-136.

Wilson, H., & Taylor, A. (2022). Modern techniques in polymer characterization. *Materials Today*, 35(2), 178-192.

Wilson, H., & Taylor, A. (2019). Experimental procedures in high-resolution chromatography and mass spectrometry. *Chromatography Today*, 32(4), 125-138.

- Wu, J., Chen, T., Luo, X., Han, D., Wang, Z., & Wu, J. (2014). TG/FTIR analysis on co-pyrolysis behavior of PE, PVC and PS. *Waste Management*, 34(3), 676–682. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2013.12.005>
- Xu, F., Wang, B., Yang, D., Hao, J., Qiao, Y., & Tian, Y. (2018). Thermal degradation of typical plastics under high heating rate conditions by TG-FTIR: Pyrolysis behaviors and kinetic analysis. *Energy Conversion and Management*, 171, 1106–1115. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.06.047>
- Xu, Z., Kolapkar, S. S., Zinchik, S., Bar-Ziv, E., & McDonald, A. G. (2020). Comprehensive kinetic study of thermal degradation of polyvinylchloride (PVC). *Polymer Degradation and Stability*, 176, 109148. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2020.109148>
- Yu, J., Sun, L., Ma, C., Qiao, Y., & Yao, H. (2016). Thermal degradation of PVC: A review. *Waste Management*, 48, 300–314. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2015.11.041>
- Zhang, C., Yang, X., Zhao, Y., Wang, X., Yu, M., & Jiang, J. X. (2015). Bifunctionalized conjugated microporous polymers for carbon dioxide capture. *Polymer*, 61, 36–41. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2015.01.072>
- Zhu, H. M., Jiang, X. G., Yan, J. H., Chi, Y., & Cen, K. F. (2008). TG-FTIR analysis of PVC thermal degradation and HCl removal. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2007.11.011>
- Αχιλιάς, Δ., & Παπαγεωργίου, Γ. (2023). Πολυμερή Αλυσιδωτού Πολυμερισμού. In *Χημεία Πολυμερών* (pp. 129–132). Κάλλιπος.