

Ανακύκλωση Πλαστικών Υλικών: Βιώσιμες Τεχνολογικές Προσεγγίσεις

Κ. Δ. Παπασπυρίδης¹, Π. Κοίλιαρης²

Εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμερών, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα 157 80

Γενικά περί των πλαστικών απορριμμάτων

Έχοντας διεισδύσει πια σε κάθε έκφανση της ανθρώπινης δραστηριότητας, τα πλαστικά αποτελούν πλέον τη δημοφιλέστερη κατηγορία υλικών. Παρότι πολύ συχνά και κυρίως για λόγους εθισμού παραγνωρίζονται τα πλεονεκτήματά τους, τα πλαστικά προτιμώνται έναντι των παραδοσιακών υλικών λόγω της μεγάλης ποικιλίας των ιδιοτήτων και συνεπώς του ευρέος φάσματος των εφαρμογών τους, της εύκολης μορφοποίησής τους προς την παραγωγή καλαίσθητων και λειτουργικών αντικειμένων, της λιγότερης ενέργειας που καταναλώνεται για την παραγωγή και επεξεργασία τους και τέλος, λόγω του μικρότερου βάρους τους που καθιστά τη μεταφορά τους οικονομικότερη. Εξαιτίας όμως των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, τα πλαστικά προϊόντα, που μετά τη χρήση τους απορρίπτονται στο περιβάλλον, αν και αποτελούν το 7-8 % κ.β. των αστικών και μόλις το 1 % κ.β. των συνολικών απορριμμάτων, διασπώνται βραδύτατα συνιστώντας μία διαρκή εστία ρύπανσης. Μεγάλο μέρος των πλαστικών απορριμμάτων αποτελούν οι συσκευασίες, δεδομένου ότι για την κατασκευή τους καταναλώνεται ετησίως περί το ήμισυ της παραγόμενης σε παγκόσμια κλίμακα ποσότητας πολυμερών. Θα μπορούσε, συνεπώς, να υποστηρίξει κανείς ότι ένα μέτρο για τον περιορισμό του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των πλαστικών θα ήταν η κατάργηση της πλαστικής συσκευασίας και η αντικατάστασή της από τα παραδοσιακά υλικά. Κάτι τέτοιο θα οδηγούσε, εντούτοις, σε δραματική αύξηση του βάρους των προϊόντων, της τιμής τους αλλά και της ενέργειας που θα απαιτούνταν για την παραγωγή τους, ενώ ακόμη δραματικότερη θα ήταν η αύξηση του όγκου των παραγόμενων απορριμμάτων. Συγκεκριμένα, το βάρος των υλικών συσκευασίας θα τετραπλασιαζόταν, ενώ η τιμή τους και η κατανάλωση ενέργειας θα διπλασιάζονταν [1, 2]. Γίνεται, επομένως, κατανοητό ότι η προστασία του περιβάλλοντος υπαγορεύει την ορθολογική διαχείριση και αξιοποίηση των πλαστικών απορριμμάτων, ώστε η ποσότητα των υπολειμμάτων που οδηγείται προς ταφή να είναι η ελάχιστη δυνατή.

Διαχείριση πλαστικών απορριμμάτων

¹ Καθηγητής, Διευθυντής του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Πολυμερών και τ. Πρόεδρος της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Έχει διατελέσει επανειλημμένα Επισκέπτης Καθηγητής του **Massachusetts Institute of Technology (MIT)** των Η.Π.Α., του **Eidgenoessische Technische Hochschule Zuerich (ETHZ)** της Ελβετίας και των Χημικών Εταιρειών **Du Pont Co** των Η.Π.Α. και **Ciba Lampertheim GmbH/BASF GmbH** της Ελβετίας και Γερμανίας.

² Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., Διδάκτωρ Μηχανικός Ε.Μ.Π. και Επιστημονικός Συνεργάτης των Εργαστηρίων της **Ciba Lampertheim GmbH/BASF GmbH** της Ελβετίας και Γερμανίας, σε θέματα περιβαλλοντικής/πράσινης διαχείρισης πολυμερικών υλικών.

Σήμερα, κυριαρχεί η πεποίθηση ότι μόνο μέσω μίας ολιστικής προσέγγισης, βασισμένης στο τρίπτυχο: ελαχιστοποίηση, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, είναι εφικτή η τελεσφόρα αντιμετώπιση του προβλήματος της διαχείρισης των απορριμμάτων και η άμβλυνση των περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεών του. Τα υλικά θα πρέπει να ενταφιάζονται, όταν πλέον έχει εξαντληθεί κάθε πιθανότητα αξιοποίησής τους, δεδομένου ότι οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), όσο καλοσχεδιασμένοι κι αν είναι, δεν συνιστούν την καλύτερη λύση για τη διαχείριση των αποβλήτων και ήδη αμφισβητείται και η περαιτέρω χρήση τους. Για την ελαχιστοποίηση της ποσότητας των απορριμμάτων, η χρήση των πολυμερών, εις βάρος των παραδοσιακών υλικών, κρίνεται αναπόδραστη, καθώς τα πολυμερή επιτρέπουν την παραγωγή τελικών προϊόντων χρησιμοποιώντας την ελάχιστη ποσότητα υλικού. Επιπλέον, τα πλαστικά, λόγω της εντυπωσιακής ανθεκτικότητάς τους, είναι υλικά που κατεξοχήν προσφέρονται για επαναχρησιμοποίηση. Μπορούν να έχουν περισσότερους από ένα κύκλους ζωής, με αποτέλεσμα αφενός να ελαττώνεται η ανάγκη για την παραγωγή νέων προϊόντων, αφετέρου να επιμηκύνεται το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τη παραγωγή τους μέχρι το οριστικό τέλος χρήσης [3, 4].

Περαιτέρω εξοικονόμηση των φυσικών πόρων και μείωση του όγκου των υλικών που καταλήγουν στο περιβάλλον μπορεί να επιτευχθεί αν της (συχνά ανέφικτης) επαναχρησιμοποίησης των απορριμμάτων έπεται η ανακύκλωσή τους. Τα πλαστικά είναι από τις ευχερέστερα ανακυκλώσιμες ύλες, γεγονός που καθιστά ελκυστική την εκμετάλλευσή τους μετά το πέρας της ωφέλιμης ζωής τους. Για το σκοπό αυτό, τρεις είναι οι πορείες που ακολουθούνται: η μηχανική ανακύκλωση, η χημική ανακύκλωση, και η ανάκτηση ενέργειας. Η πρώτη περιλαμβάνει την επεξεργασία των πλαστικών απορριμμάτων για την παραγωγή νέων τελικών προϊόντων, ενώ η δεύτερη τη διάσπασή τους προς τα δομικά τους στοιχεία, τα οποία εκτός των άλλων μπορούν να αποτελέσουν τις πρώτες ύλες για την παραγωγή πολυμερών. Μέσω της τρίτης μεθόδου, αξιοποιείται η υψηλή θερμογόνο δύναμη των πλαστικών για την παραγωγή ενέργειας [5, 6].

Έχοντας επίγνωση της σπουδαιότητας της προστασίας του περιβάλλοντος για τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας αλλά και της σημασίας της αειφόρου ανάπτυξης για την αύξηση της απασχόλησης, η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) έχει ήδη προχωρήσει στη σύνταξη οδηγιών, καθιστώντας στα μέλη της υποχρεωτική την επίτευξη συγκεκριμένων ποσοτικών στόχων που αφορούν στην ανακύκλωση των πλαστικών απορριμμάτων. Βέβαια, παρότι η Ελλάδα έχει υιοθετήσει τις ίδιες περιβαλλοντικές αρχές με τις υπόλοιπες χώρες και έχει ενσωματώσει στο Εθνικό Δίκαιο τις σχετικές ευρωπαϊκές οδηγίες, δεν κατορθώνει να ανταποκριθεί ή ανταποκρίνεται μετά βίας και με χρονική υστέρηση. Η ταφή των απορριμμάτων εξακολουθεί να αποτελεί την κύρια μέθοδο διαχείρισης, ενώ μεγάλες ποσότητες διατίθενται ανεξέλεγκτα, πρακτική που επισύρει βαρύτατα κοινοτικά πρόστιμα. Γίνεται συνεπώς αντιληπτό ότι η ορθολογική διαχείριση των πλαστικών απορριμμάτων αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα της χώρας, η λύση του οποίου είναι επιτακτικότερη όσο ποτέ.

Το Έργο του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Πολυμερών του Ε.Μ. Π.

Η αναζήτηση βιώσιμων τεχνολογιών ανακύκλωσης των πλαστικών απορριμμάτων αποτελεί αντικείμενο έρευνας για το Εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμερών (Ε.Τ.Π.) του Ε.Μ.Π. για περισσότερες από τρεις δεκαετίες. Τα επιτεύγματα του ερευνητικού του έργου έχουν μάλιστα δημοσιευτεί σε Εγκριτα Διεθνή Περιοδικά και έχουν παρουσιαστεί σε Διεθνή Συνέδρια παγκοσμίως, τυγχάνοντας ευρείας και διεθνούς αναγνώρισης. Το Ε.Τ.Π. έχει, επίσης, συμμετάσχει σε πολυάριθμα Εθνικά και Ευρωπαϊκά Επιστημονικά Προγράμματα, αναλαμβάνοντας σε αρκετά από αυτά το ρόλο του Επιστημονικού Υπεύθυνου. Επιπλέον, σε στενή συνεργασία με Διεθνούς φήμης Ερευνητικά Κέντρα έχει επιτευχθεί η ανάπτυξη τεχνολογίας μέσω της οποίας διαφυλάσσεται η προστιθέμενη αξία που αποκτά το πλαστικό κατά την παρασκευή του, καθιστώντας εφικτή την παραγωγή νέων προϊόντων υψηλής

ποιότητας, με αυξημένη συνεπώς δυνατότητα εμπορικής αποδοχής που είναι και το τελικό ζητούμενο.

Συγκεκριμένα, έχει τεκμηριωθεί διεθνώς ότι με την τεχνολογία της διάλυσης-επανακαταβύθισης κατορθώνεται ο διαχωρισμός των ρευμάτων των πλαστικών απορριμμάτων σε προϊόντα που ομοιάζουν με τα παρθένα υλικά. Εναλλακτικά, η ανακύκλωση των πλαστικών γενικής χρήσης είναι δυνατή μέσω της τεχνολογίας ανάτηξης-ανασταθεροποίησης. Η επιστροφή των απορριμμάτων σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων επιτυγχάνεται επίσης με τεχνολογία εκβολής αντιδρώντος συστήματος. Η ερευνητική δραστηριότητα του Ε.Τ.Π. έχει επικεντρωθεί και στην διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης ανακυκλωμένων πλαστικών σε πολυστρωματικές συσκευασίες τροφίμων μέσω της τεχνολογίας λειτουργικών φραγμάτων. Επιπροσθέτως, εξετάζεται αν η προσθήκη νανοϋλικών στα χρησιμοποιημένα πλαστικά οδηγεί στη δημιουργία νανοσυνθέτων που μπορούν να αποτελέσουν την πρώτη ύλη για την παραγωγή πλαστικών συσκευασιών, πάντοτε όμως με την προσοχή εστραμμένη και στις πλέον πρόσφατες εξελίξεις και προδιαγραφές της νανοτοξικολογίας. Αναλυτικότερες πληροφορίες περί των προαναφερθεισών τεχνολογικών προσεγγίσεων διαχείρισης των πλαστικών απορριμμάτων, παρατίθενται ακολούθως.

I. Διάλυση-επανακαταβύθιση

Είναι από τις πιο σύγχρονες τεχνολογίες διαχωρισμού των πλαστικών απορριμμάτων, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί και για την ανακύκλωση πλαστικών με στόχο την απομάκρυνση προσθέτων ή ανεπιθύμητων προσμίξεων. Περιλαμβάνει, σε πρώτη φάση, τη διάλυση του πολυμερούς χρησιμοποιώντας διαλύτη στον οποίο τα υπόλοιπα συστατικά του απορριμματος είναι αδιάλυτα. Έπεται η επανακαταβύθισή του σε στερεά μορφή, ώστε να καταστεί δυνατή η επεξεργασία του. Η διαδικασία καταβύθισης, μπορεί να πραγματοποιηθεί: α) με χρήση ενός μη-διαλύτη, β) με ψύξη και γ) με απομάκρυνση του διαλύτη με απότομη μεταβολή της πίεσης. Η εν λόγω μέθοδος έχει μελετηθεί εντατικά από το Ε.Τ.Π. και έχει εφαρμοστεί σε όλο σχεδόν το φάσμα των κοινών πλαστικών (HDPE, LDPE, PP, PVC, PET, PS, PMMA). Μάλιστα έχει αποδειχθεί αποτελεσματικότερη για την απομάκρυνση προσθέτων ή ανεπιθύμητων προσμίξεων από τα πλαστικά, καθώς και για το διαχωρισμό πλαστικών μιγμάτων ή και το σπουδαιότερο για την ανακύκλωση θερμοπλαστικών συνθέτων υλικών. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 1, παρατίθενται οι ιδιότητες, ανακτημένου από σωλήνες, πολυπροπυλενίου (PP) ως περίπτωση επίδειξης, οι οποίες διατηρούνται στο επίπεδο εκείνων του παρθένου πολυμερούς [7, 8].

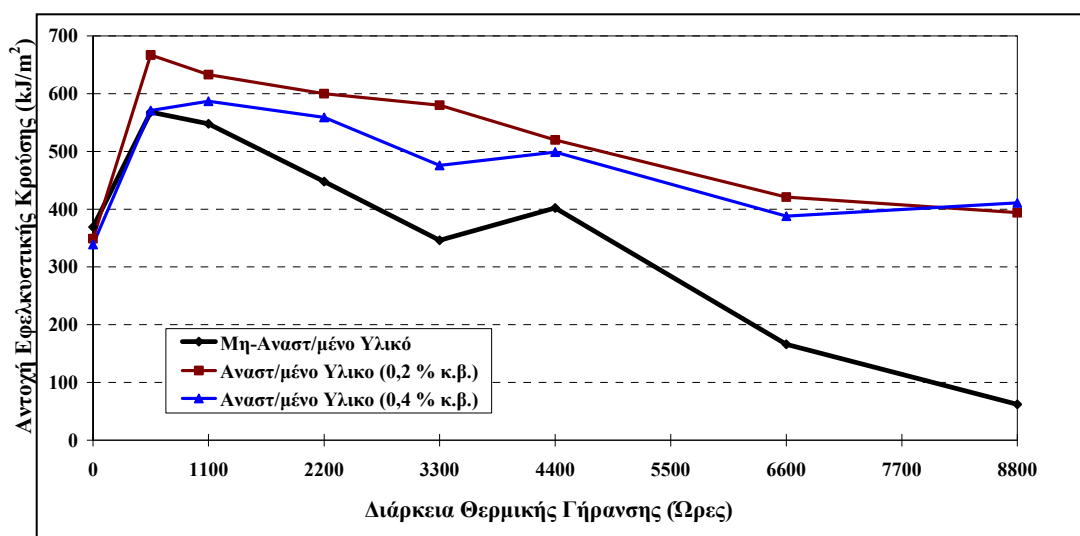
Πίνακας 1. Διατήρηση ιδιοτήτων ανακυκλωμένου πολυπροπυλενίου

Δείγμα	Αντοχή στην κρούση (KJ/m ²)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)	Αντοχή στην θραύση (MPa)	Επιμήκυνση κατά τη θραύση (%)
Παρθένο PP	26.9	567	20.7	284
Ανακυκλωμένο PP	26.5	550	20.0	290

II. Ανάτηξη-ανασταθεροποίηση

Για να καταστεί δυνατή η επεξεργασία των πλαστικών χωρίς την αντιμετώπιση προβλημάτων υποβάθμισης αλλά και για να μπορέσουν τα τελικά προϊόντα να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των εφαρμογών τους, η σταθεροποίηση τους, δηλαδή η προσθήκη σταθεροποιητών επεξεργασίας, θερμικών σταθεροποιητών ή/και σταθεροποιητών ακτινοβολίας, είναι ζωτικής σημασίας. Η αρχική σταθεροποίηση δεν αρκεί όμως για να τους εξασφαλίσει και δεύτερο κύκλο ζωής. Είναι επομένως, αναγκαία η ανασταθεροποίηση των απορριμμάτων. Μόνο μέσω του «ανεφοδιασμού» τους με σταθεροποιητές, τα

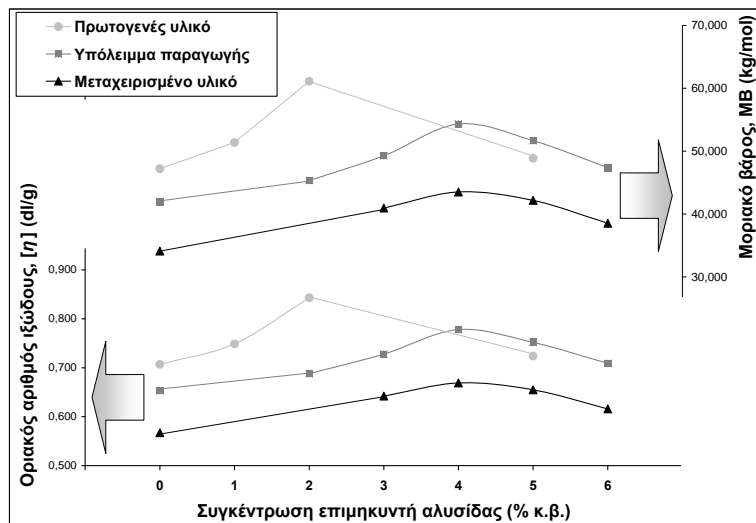
χρησιμοποιημένα πλαστικά μπορούν να επαναεισαχθούν σε εφαρμογές ανάλογες των παρθένων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί κάνοντας χρήση κλασικού μηχανολογικού εξοπλισμού. Ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη πορεία συνιστά μία εκ των οικονομικότερων επιλογών για την αξιοποίηση των πλαστικών απορριμμάτων. Η θετική επένδυση της ανάτηξης-ανασταθεροποίησης αποτυπώνεται στο Σχήμα 1, στο οποίο φαίνεται η επίδραση της θερμικής γήρανσης στην αντοχή εφελκυστικής κρούσης ανασταθεροποιημένου και μη PP, ανακυκλωμένου από πλαστικά κιβώτια. Μετά από το πέρας της γήρανσης, οι τιμές της μέγιστης αντοχής σε εφελκυστική κρούση για τα ανασταθεροποιημένα δείγματα, είναι στα επίπεδα των αρχικών τιμών, ενώ αντίθετα στο μη-ανασταθεροποιημένο υλικό, η τιμή που καταγράφεται είναι δραματικά υποβαθμισμένη [9, 10].



Σχήμα 1. Επίδραση θερμικής γήρανσης στη αντοχή εφελκυστικής κρούσης ανακυκλωμένου PP

III. Εκβολή αντιδρώντος συστήματος

Στην περίπτωση πλαστικών που έχουν υποστεί έντονη φθορά, η διεξαγωγή της ανάτηξης-ανασταθεροποίησης είναι εν πολλοίς αναποτελεσματική. Η επάνοδος των απορριμμάτων σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων υπαγορεύει την αναβάθμιση των ιδιοτήτων τους, ουσιαστικά την ανάκτηση του μοριακού βάρους που 'απώλεσαν' κατά την προηγούμενη επεξεργασία και χρήση τους. Η επίτευξη αυτού του στόχου είναι εφικτή εφαρμόζοντας τεχνολογία εκβολής αντιδρώντος συστήματος, στα πλαίσια της οποίας, υπό την επίδραση δραστικών ενώσεων (π.χ. οξαζολίνες, εποξειδία, ανυδρίτες), λαμβάνει χώρα επιμήκυνση των μακρομορίων του πολυμερούς και συνεπώς αύξηση του μοριακού του βάρους. Πρόκειται για περιβαλλοντικά φιλική και οικονομικά βιώσιμη διεργασία (συνεχούς έργου), διά της οποίας η μοριακή τροποποίηση του πολυμερούς επιτελείται παράλληλα με τη μορφοποίησή του προς τελικά προϊόντα. Σαν παράδειγμα, στο Σχήμα 2, απεικονίζεται η σημαντική αύξηση του οριακού αριθμού ιξώδους, άρα και του μοριακού βάρους που υπέστη το υπόλειμμα παραγωγής (scrap) PET αλλά και το μεταχειρισμένο (προερχόμενο από φιάλες νερού) PET, κατόπιν της υποβολής τους σε εκβολή αντιδρώντος συστήματος. Είναι εμφανές ότι η ποιοτική αναβάθμιση που επιτεύχθηκε ειδικά στην περίπτωση του υπολείμματος παραγωγής, καθιστά επιτρεπτή τη χρήση του στις εφαρμογές για τις οποίες προορίζεται το πρωτογενές υλικό [11, 12].



Σχήμα 2. Επίδραση εκβολής αντιδρώντος συστήματος στο μοριακό βάρος PET

IV. Τεχνολογία λειτουργικών φραγμάτων

Η έννοια του «λειτουργικού φράγματος» (functional barrier) εισήχθη στη βιομηχανία των πλαστικών λόγω της αναγκαιότητας για την προστασία του καταναλωτή, όταν μελετάται η δυνατότητα χρήσης ανακυκλωμένων πλαστικών σε υλικά συσκευασίας τροφίμων. Ως λειτουργικό φράγμα ορίζεται κάθε ενδιάμεσο στρώμα, το οποίο κάτω από προβλεπόμενες συνθήκες χρήσης, μειώνει ή/και καθυστερεί την μετανάστευση ουσιών από κάθε στρώμα το οποίο βρίσκεται πριν από αυτό, σε επίπεδα τεχνολογικά αναπόφευκτα ή αναλυτικά ασήμαντα. Για να καταστεί δυνατή η χρήση παλαιού πλαστικού ως λειτουργικού φράγματος πρέπει οι χημικές ουσίες που έρχονται σε επαφή και μολύνουν τα υλικά κατά την παραγωγή, τη χρήση τους, αλλά και την απόρριψή τους, να απομακρυνθούν, ώστε να αποτελούν μη κίνδυνο για την υγεία του καταναλωτή. Είναι λοιπόν απαραίτητο, πριν από τη χρήση ενός ανακυκλωμένου πλαστικού σε υλικά συσκευασίας να εφαρμοστεί μια διαδικασία, η οποία θα καταστήσει το τελικό προϊόν ικανό να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των Οδηγιών της Ε.Ε. και του Οργανισμού Τροφίμων και Φαρμάκων (FDA) των Η.Π.Α. Το Ε.Τ.Π. υπήρξε από τους πρωτοπόρους στη διεξαγωγή πειραματικών μελετών σχετικά με τη χρήση λειτουργικών φραγμάτων. Εστιάζοντας την περίπτωση χειρίστα μολυσμένων PE και του PP, διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή μίας διαδικασίας ανακύκλωσης, η οποία περιλαμβάνει ένα στάδιο εκβολής υπό έντονες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, οδηγεί σε απομάκρυνση των πτητικότερων μολυντών. Αντίθετα στην περίπτωση των μη πτητικών ουσιών, η απομάκρυνσή τους δεν είναι επαρκής, και κρίνεται αναγκαία η προστασία του πλαστικού μέσω λειτουργικών φραγμάτων, δηλαδή με στρώματα παρθένου πλαστικού [13, 14].

V. Νανοσύνθετα και πλαστική συσκευασία

Τα νανοσύνθετα αποτελούν μία νέα κατηγορία συνθέτων υλικών με ιδιαίτερο επιστημονικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον, που οφείλεται εν πολλοίς στις εντυπωσιακά βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες που εμφανίζουν σε σύγκριση με το παρθένο πολυμερές. Πέραν των μηχανικών ιδιοτήτων, η προσθήκη των νανοϋλικών οδηγεί σε σημαντική αναβάθμιση των ιδιοτήτων φράγματος του πολυμερούς, γεγονός που καθιστά ελκυστική τη χρήση των νανοσυνθέτων ως υλικών συσκευασίας τροφίμων και ποτών. Για την εξήγηση αυτού του φαινομένου, έχει προταθεί η θεωρία της δαιδαλώδους πορείας, σύμφωνα με την οποία, τα σωματίδια του ενισχυτικού μέσου (άργιλος, νανοσωλήνες άνθρακα κτλ.) εξαναγκάζουν τα μόρια που διεισδύουν στο υλικό να κινηθούν γύρω από αυτά, επιβραδύνοντας τη διάχυση τους. Συνεπώς, η διείσδυση των μορίων του οξυγόνου ή της υγρασίας σε μια συσκευασία από νανοσύνθετο θα ήταν πολύ βραδύτερη, διασφαλίζοντας την ποιότητα του τροφίμου για

μεγαλύτερο διάστημα. Λόγω λοιπόν των ανωτέρω, η ενσωμάτωση νανοϋλικών στα πολυμερή, σε συνδυασμό μάλιστα με τη χρήση αντιμικροβιακών ενώσεων ή ενζύμων που τροχοπεδούν την αλλοίωση του τροφίμου, φαντάζει ως η πλέον ενδεδειγμένη προσέγγιση για την παραγωγή 'έξυπνων' συσκευασιών. Βεβαίως, στους επιστημονικούς κύκλους επικρατεί έντονος προβληματισμός και εκφράζονται ανησυχίες σχετικά με την τοξικότητα των νανοσυνθέτων. Ελλείπει όμως σχετικών μελετών, τεκμηριωμένα στοιχεία που να αποδεικνύουν τη διακύβευση της ανθρώπινης υγείας δεν υπάρχουν προς το παρόν. Η διενέργεια ενδεδειγμένης εξέτασης επί του θέματος είναι λοιπόν αναγκαία και συνεχίζεται διεθνώς [15, 16].

Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας, συμπεραίνεται ότι το πρώτο βήμα για την αξιοποίηση των πλαστικών απορριμμάτων, δηλαδή η εύρεση οικονομικών και αποδοτικών τεχνολογιών ανακύκλωσής τους, έχει ήδη γίνει. Απομένει η εφαρμογή τους. Βεβαίως, πρέπει να σημειωθεί ότι η επιτυχία ενός προγράμματος ανακύκλωσης προϋποθέτει τη διευθέτηση και κάποιων εξαιρετικά κρίσιμων ζητημάτων, όπως η ανάπτυξη αποδοτικών μεθόδων συλλογής και διαχωρισμού των απορριμμάτων, η σταθερή παροχή απορριμμάτων ως πρώτη ύλη, καθώς και ο εντοπισμός αγορών για την απορρόφηση των ανακυκλωμένων προϊόντων.

Βιβλιογραφία

1. Hamerton I. *Polymers, the environment and sustainable development*. John Wiley & Sons Inc, West Sussex, England, 2003
2. *The compelling facts about plastics: an analysis of plastics production, demand and recovery for 2005 in Europe*. Association of Plastics Manufactures Europe, 2007 (www.plasticseurope.org)
3. Boustead I in Andrady AL (Ed.): *Plastics and the environment*. John Wiley & Sons Inc, Hoboken, USA, 2003
4. Al-Salem SM, Lettieri P, Baeyens J. *Waste Management* 2009, 29: 2625-2643
5. Burillo G, Clough RL, Czikovszky T, Guven O, Moel A, Liu W, Singh A, Zaharescu T. *Radiation Physics and Chemistry* 2002, 64: 41-51
6. Fischer MM I in Andrady AL (Ed.): *Plastics and the environment*. John Wiley & Sons Inc, Hoboken, USA, 2003
7. Papaspyrides CD, Poulakis JG, Varelides PC. *Resources, Conservation and Recycling* 1994, 12: 177-184
8. Poulakis JG, Papaspyrides CD. *Resources, Conservation and Recycling* 1997, 20: 31-41
9. Kartalis CN, Papaspyrides CD, Pfaendner R. *Journal of Applied Polymer Science* 2002, 86: 2472-2485
10. Kartalis CN, Papaspyrides CD, Pfaendner R. *Journal of Applied Polymer Science* 2003, 88: 3033-3044
11. Awaja F, Pavel D. *European Polymer Journal* 2005, 41: 1453-1477
12. Kiliaris P, Papaspyrides CD, Pfaendner R. *Journal of Applied Polymer Science* 2007, 104: 1671-1678
13. Dole P, Feigenbaum A, De le Cruz Garcia C, Pastorelli S, Paseiro P, Hankemeier T, Voultzatis Y, Aucejo S, Saillard P, Papaspyrides CD. *Food Additives and Contaminants* 2006, 23: 202-211
14. Dole P, Voultzatis Y, Vitrac O, Reynier R, Hankemeier T, Aucejo S, Feigenbaum A. *Food Additives and Contaminants* 2005, 23: 1038-1052
15. Papaspyrides CD, Hatzigrigoriou NB. *Technical Aspects of Using Nanocomposites in Food Packaging*. *Plastics and Paper in Contact with Foodstuff*, 26th Annual PIRA Conference, Dublin, December 8-11, 2009 (invited)
16. Hatzigrigoriou NB, Papaspyrides CD. *Journal of Applied Polymer Science*, in press

