

# Τεχνολογία ανακύκλωσης πλαστικών υλικών και η συμβολή του Ε.Μ.Π.

των Ι. Γ. Πουλάκη και Κ. Δ. Παπασπυρίδη

## Εισαγωγή

Η ανησυχητική αύξηση του όγκου των αποβλήτων, η συνεχιζόμενη ενεργειακή κρίση και η ευαισθητοποίηση της περιβαλλοντικής συνείδησης της κοινής γνώμης, αποτέλεσαν τα κύρια αίτια της ενεργοποίησης και παρέμβασης του κοινωνικού συνόλου στον τομέα διαχείρισης των αποβλήτων. Τα πολυμερή κατέχουν ήδη ένα σημαντικό ποσοστό των οικιακών και βιομηχανικών στερεών απορριμμάτων. Είναι χαρακτηριστικό ότι τις προηγούμενες δεκαετίες, τα πλαστικά ήσαν συνώνυμα του φθηνού και του αναξιόπιστου. Λόγω όμως της διαθεσιμότητας νέων τύπων πολυμερών, της ανάπτυξης νέων

τεχνικών μορφοποίησης και της αυξανόμενης οικειότητας και γνώσης, τόσο των σχεδιαστών όσο και των χρηστών, τα πολυμερή ραγδαία εισέβαλαν στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου, με απώτερο όμως αποτέλεσμα και τη μαζική απόρριψή τους στο φυσικό περιβάλλον.

Σήμερα πλέον, είναι δύσκολο να συλλάβει κανείς κάποια οικιακή ή βιομηχανική δραστηριότητα που να μην εξαρτάται άμεσα ή έμμεσα από τα πλαστικά. Τα πλαστικά απορρίμματα αποτελούν μόνο το 7 - 9 % κατά βάρος του συνόλου των αστικών απορριμμάτων. Ενώ όμως και το ποσοστό αυτό αυξάνει βαθμιαία, τα πλαστικά απορρίμματα έχουν πολύ μεγαλύτερη κατ' όγκον αναλογία (έως και 30 %), δεδομένης της χαμηλής τους πυκνότητας και του γεγονότος ότι συνήθως συναντώνται υπό τη μορφή κοιλών αντικειμένων. Ακόμη, στη μεγάλη τους πλειοψηφία δεν βιοαποικοδομούνται, ενώ έχουν και σχετικά μικρή διάρκεια χρήσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι το 1990 καταναλώθηκαν στη Δυτική Ευρώπη 24 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών, από τα οποία, μόνο ένα ποσοστό της τάξης του 20 % έχει ανακυκλωθεί. Αντίστοιχα, το 1991 στις Η.Π.Α., μόνο 11 % του συνόλου της μάζας των πλαστικών φιαλών και δοχείων ανακυκλώθηκε, σημειώνοντας πάντως αύξηση από το

7% του 1990. Επισημαίνεται ότι ο στόχος που έχει τεθεί στις Η.Π.Α. για το 1995 και για τα ίδια προϊόντα, είναι μόλις 25%! Ενώ λοιπόν ανατίρητα προκύπτει η ανάγκη της ανακύκλωσης των πλαστικών απορριμμάτων, πρέπει να επισημανθεί ότι η εφαρμογή τεχνολογίας ανακύκλωσης στην πράξη, προϋποθέτει την αντιμετώπιση ουσιαστικών προβλημάτων, όπως:

- i. Την ανάπτυξη μεθόδων συλλογής και διαχωρισμού των απορριμμάτων (sortation),
- ii. την εύρεση οικονομικών μεθόδων ανακύκλωσής τους,
- iii. την ανάπτυξη αγορών ικανών να απορροφήσουν τα ανακυκλωμένα τελικά προϊόντα, και
- iv. την ανάπτυξη προτύπων για τον έλεγχο της ποιότητας των ανακυκλωμένων υλικών.

Υπάρχουν εκατοντάδες διαφορετικοί τύποι πλαστικών απορριμμάτων, αλλά για απλοποίηση της μελέτης τους μπορούν να ενταχθούν σε τέσσερες κατηγορίες:

1. Ανεξάρτητα είδη πλαστικών υλικών υπό τη μορφή απορρίμματος (scrap), που μπορούν να επαναεισαχθούν στην παραγωγική διαδικασία από την οποία παρήχθησαν.
2. Ανεξάρτητα είδη πλαστικών που έχουν υποστεί μόλυνση (contam-

*Ο Ι.Γ. Πουλάκης είναι μεταπτυχιακός σπουδαστής Ε.Μ.Π.*

*Ο Κ.Δ. Παπασπυρίδης είναι αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.*

*Οι συγγραφείς του άρθρου κρίνουν επιβεβλημένη μια τιμητική αναφορά στην επιστημονική παρουσία του καθηγητή Ε.Μ. Καμπούρη που πρώτος διείδε και υλοποίησε στην πενταετία 1979-1984 κρίσιμα πειράματα της περιγραφόμενης εδ πορείας «διαλυτοποίησης/επανακαταβύθισης» για ένα σύστημα πλαστικού απορρίμματος.*

ination), οπότε δεν είναι δυνατή η εισαγωγή τους στην παραγωγική διαδικασία από την οποία παρήχθησαν. Απαιτείται λοιπόν να υποβληθούν σε περαιτέρω κατεργασίες, η έκταση των οποίων εξαρτάται από τις τελικές τους εφαρμογές.

3. Μίγματα πλαστικών απορριμμάτων με γνωστή σύσταση, ουσιαστικά ελεύθερα από μη-πλαστικές προσμίξεις.

4. Τυχαία συλλεχθέντα ή οικιακά απορρίμματα, τα οποία εμπεριέχουν μη-πλαστικά υλικά.

Από την άλλη πλευρά, πέντε είναι κυρίως οι μέθοδοι διαχείρισης πλαστικών απορριμμάτων:

i. Απόρριψη σε χωματερές ή στη θάλασσα, με ή χωρίς προηγούμενη επεξεργασία,

ii. πρωτογενής ανακύκλωση,

iii. δευτερογενής ανακύκλωση,

iv. τριτογενής ανακύκλωση,

v. τεταρτογενής ανακύκλωση.

Θα σχολιασθούν οι τέσσερες τελευταίες κατηγορίες ανακύκλωσης, αφού η πρώτη ως επιλογή, είναι η λιγότερο πρόσφορη και η εφαρμογή της εξαρτάται από πολιτικούς, τεχνολογικούς και οικονομικούς παράγοντες.

### Πρωτογενής Ανακύκλωση (Primary Recycling)

Η πρωτογενής ανακύκλωση, η ανάτξη δηλαδή καθαρού θερμοπλαστικού απορρίμματος, είναι η ευκολότερη δυνατή και εφαρμόζεται εκτεταμένα στην βιομηχανία. Το ανακυκλωμένο scrap, είτε αναμιγνύεται με παρθένο υλικό για να εξασφαλισθεί η ποιότητα του τελικού προϊόντος, είτε χρησιμοποιείται ως υλικό δευτέρας κατηγορίας. Πρέπει να διατηρείται καθαρό και πιθανόν να χρειάζεται να διαχωρισθεί από άλλα υλικά συσκευασίας ή να συγκεντρωθεί ανά χρώμα. Προφανώς, η ανακύκλωση γίνεται επί τόπου, για να ελαχιστοποιηθούν κόστη χειρισμού και μεταφοράς. Τυπικά παραδείγματα, όπου πλαστικά απορρίμματα μπορούν να απομονωθούν πολύ εύκολα και να συλλεγούν στην «πηγή», αποτελούν οι πλαστικές φιάλες κάποιου όγκου, π.χ. φιάλες ανθρακούχων αναψυκτικών από πολυεστερικό πολυαιθυλένιο (PET), φιάλες μεταλλικού



νερού από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), μπαταρίες αυτοκινήτων από πολυπροπυλένιο (PP), προϊόντα συσκευασίας τύπου «fast-food» από πολυστυρένιο (PS), φύλλα θερμοκηπίου από πολυαιθυλένιο (PE), φιάλες νοσοκομειακού ορού, επίσης από πολυαιθυλένιο. Βασικό πρόβλημα της πρωτογενούς ανακύκλωσης, είναι ότι κατά την επεξεργασία ή κατά την προηγούμενη χρήση, το πλαστικό μπορεί να υφίσταται χημικές αντιδράσεις που επιδρούν στις τελικές του ιδιότητες. Εάν πράγματι συμβεί αυτό, το πολυμερές καθίσταται ακατάλληλο για την αρχική του χρήση, και υποβαθμίζεται. Η οξειδωτική αποικοδόμηση των πολυολεφινών, αποτελεί μια τυπική περίπτωση.

Οι πολυολεφίνες έχουν την τάση να αντιδρούν με το οξυγόνο κατά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες (thermal oxidation) ή κατά τη διάρκεια της έκθεσής τους σε υπεριώδη ακτινοβολία (photo-oxidation). Αυτή η οξειδωτική αποικοδόμηση οδηγεί σε υποβάθμιση του μοριακού βάρους, της αντοχής σε εφελκυσμό και στη δημιουργία ομάδων καρβονυλίου και υδροξυλίου. Είναι βέβαιο ότι κατά τη διάρκεια της πρωτογενούς ή δευτερογενούς ανακύκλωσης, τα χαρακτηριστικά αυτά, όπως και όλα τα περιεχόμενα

πρόσθετα (additives), θα επιβαρύνουν την πολυμερική μήτρα.

Ανάλογο παράδειγμα αποτελεί η θερμική αποικοδόμηση των βινυλικών πολυμερών. Αυτή η αποικοδόμηση οδηγεί σε υποβάθμιση του μοριακού βάρους, της αντοχής σε εφελκυσμό και στη δημιουργία παραγώγων ομάδων καρβονυλίου και υδροξυλίου, η παρουσία των οποίων στο ανακυκλωμένο προϊόν αυτοεπιταχύνει τα φαινόμενα οξείδωσης.

Ανάλογα λοιπόν με τη δομή του πολυμερούς, αλλά και τη μελλοντική του εφαρμογή, καθορίζονται οι προδιαγραφές, τα πρόσθετα και το ποσοστό του παρθένου υλικού που θα πρέπει να ενσωματωθούν κατά τη διάρκεια των σταδίων επανάτξης. Η ανακύκλωση πλαστικών απορριμμάτων με επανάτξη, εφαρμόζεται ήδη ευρύτατα. Αναφέρεται, παραδείγματος χάριν, ότι η πρωτογενής ανακύκλωση των φιαλών από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) το 1992 έφθασε στις Η.Π.Α. τους 250.000 t/yr, ενώ η ανακύκλωση πολυαιθυλενίου στην Αγγλία, τους 25.000 t/yr, πολυπροπυλενίου, τους 15.000 t/yr και πολυστυρενίου, τους 2.000 t/yr. Στη Γαλλία έχει αναπτυχθεί ένα πρόγραμμα συλλογής και ανακύκλωσης απορριμμάτων πολυβινυλοχλωριδίου, το οποίο έχει στόχο



την ποσότητα των 15.000 t/yr για τα επόμενα 3 χρόνια.

### Δευτερογενής Ανακύκλωση (Secondary Recycling).

Υπάρχουν δύο βασικές αντιλήψεις της δευτερογενούς ανακύκλωσης, η επιλογή των οποίων εξαρτάται κυρίως από τις αγορές απορρόφησης των ανακυκλωμένων υλικών αλλά και από τη φύση και τη σύσταση του ρεύματος απορριμμάτων προς ανακύκλωση.

Η μια αντίληψη επιτάσσει να διαχωρισθούν τα πλαστικά από τις διάφορες προσμίξεις και να καταταγούν σε κατηγορίες, οπότε σε ένα ακόλουθο στάδιο να ανακυκλωθούν σε προϊόντα ανταγωνιστικά των παρθένων ή των πρωτογενώς ανακυκλωθέντων υλικών. Κατά την άλλη προσέγγιση, τα πλαστικά διαχωρίζονται από τις προσμίξεις και ανακυκλώνονται ως μίγμα (blend).

Οι διεργασίες που υπεισέρχονται στην κατεργασία απορριμμάτων που περιέχουν πλαστικά, συμπεριλαμβάνουν:

- i. Υποβιβασμό μεγέθους χρησιμοποιώντας κοκκοποιητές (granulators), λουριδοποιητές (shredders) και θρυμματιστές (crumblers),
- ii. διαχωρισμό των πλαστικών από το ρεύμα των απορριμμάτων,
- iii. περαιτέρω καθαρισμό,
- iv. Ξήρανση, και
- v. κατεργασία - μορφοποίηση.

Ειδικότερα, ο διαχωρισμός των πλαστικών απορριμμάτων από το ρεύμα των αστικών απορριμμάτων, [«διεργασία (ii)»] μπορεί να αντιμετωπισθεί αποτελεσματικά σε επίπεδο Τοπικής Αυτοδιοίκησης και με ταυτόχρονη ευαισθητοποίηση των πολιτών. Από την άλλη πλευρά, οι περισσότεροι διαθέσιμες μέθοδοι διαχωρισμού πλαστικών μεταξύ τους, εξαρτώνται κυ-

ρίως, από το σχήμα και την πυκνότητα των απορριμμάτων. Η τεχνολογία που βιβλιογραφικά προτείνεται, περιλαμβάνει:

- i. διαχωρισμό με αέρα,
- ii. διαχωρισμό με φυγοκέντριση σε υδροκυκλώνες,
- iii. διαχωρισμό με επίπλευση-καταβύθιση, χρησιμοποιώντας υγρά διαφορετικών πυκνοτήτων ή ρευστά που ευρίσκονται σε υπερκρίσιμες συνθήκες,
- iv. διαχωρισμό με επίπλευση χρησιμοποιώντας κάποιον αφριστικό.

Οι μέθοδοι αυτές ευρίσκουν επιτυχημένη εφαρμογή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις μιγμάτων πλαστικών και γενικά κρίνονται ως ένα βαθμό ανεπαρκείς, στην περίπτωση των υψηλά μόλυσμένων οικιακών απορριμμάτων. Πράγματι, στη δευτερογενή ανακύκλωση μιγμάτων πλαστικών δεν τίθεται απαραίτητα θέμα διαχωρισμού των πλαστικών μεταξύ τους. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα μεταβατικό στάδιο από την απόρριψη και την τριτογενή ανακύκλωση προς την πρωτογενή. Το μίγμα των πλαστικών απορριμμάτων ομοιογενοποιείται με τεχνολογία τήγματος, οπότε προκύπτει το σημαντικό πλεονέκτημα ευελιξίας ως προς την ποιότητα και τη σύσταση τροφοδοσίας.

Το βασικότερο μειονέκτημα όμως είναι, ότι τα ευρέως χρησιμοποιούμενα πλαστικά, λόγω των θερμοδυναμικών τους διαφορών είναι ασύμβατα μεταξύ τους. Αυτό έχει αποτέλεσμα, οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που προκύπτουν από μίγματα πλαστικών, να είναι σημαντικά υποβαθμισμένες σε σχέση με αυτές των επί μέρους πολυμερών.

### Τριτογενής Ανακύκλωση (Tertiary Recycling)

Τριτογενή ανακύκλωση συνιστά η διεργασία, μέσω της οποίας πλαστικά υλικά μετατρέπονται σε απλούστερα χημικά προϊόντα, που αποτελούν πρώτες ύλες για περαιτέρω συνθέσεις. Συχνά αναφέρεται και ως χημική ανακύκλωση (chemical recycling).

Χρήσιμα χημικά προϊόντα ή καύσιμα μπορούν να ανακτηθούν από τα πλαστικά απορρίμματα με θέρμανση απουσία αέρα (πυρόλυση), ή με αποπολυμερισμό (υδρόλυση, μεθανόλυση, υ-

δρογόνοση). Οι μέθοδοι αυτές, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες, εφόσον καλύπτονται από αντίστοιχες μονάδες απορρόφησης των παραγομένων μονομερών πολυμερισμού, χημικών προϊόντων και καυσίμων, αερίων και υγρών. Χαρακτηρίζονται όμως από αναγκαιότητα απαλλαγής των πλαστικών από ξένες προσμίξεις (η υδρόλυση προϋποθέτει ακόμα και διαχωρισμό των πλαστικών μεταξύ τους). Το βασικότερο όμως πρόβλημα, που συμπεριλαμβάνει και την τεταρτογενή ανακύκλωση, είναι ότι σπαταλάται η προστιθέμενη αξία κατά τον πολυμερισμό, που αποτελεί σημαντικό ποσοστό της συνολικής αξίας του πολυμερούς.

### Τεταρτογενής Ανακύκλωση (Quaternary Recycling)

Το ενεργειακό περιεχόμενο των πλαστικών απορριμμάτων, μπορεί να ανακτηθεί, τουλάχιστον κατά ένα μέρος, με καύση των απορριμμάτων (incineration) ή με μετατροπή σε καύσιμο υλικό (refuse derived fuel, RDF). Η ανάκτηση της ενέργειας που περιλαμβάνει τα πολυμερή μέσω της καύσης τους, εκτός από το προφανές της επιλογής της, παρουσιάζει τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- i. Μόνο το 30% της ενέργειας που περιλαμβάνει τα πλαστικά μπορεί να ανακτηθεί με καύση,
- ii. τα προϊόντα της καύσης περιλαμβάνουν ουσίες που προκαλούν εντονότατα φαινόμενα ρύπανσης, ώστε στις Η.Π.Α. τουλάχιστον, η τεχνολογία αυτή να κρίνεται πλέον ως απαράδεκτη,
- iii. η καύση δεν είναι αντάρκης ενεργειακά και άρα αξιόπιστη να εξασφαλίσει σταθερή παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού.

### Τεχνολογία Εκλεκτικής Διάλυσης/Επανακαταβύθισης (Selective Dissolution / Reprecipitation)

Στο Εργαστήριο Ειδικής Χημικής Τεχνολογίας (Τεχνολογίας Πολυμερών) του Ε.Μ. Πολυτεχνείου, η σχετική έρευνα αφορά θερμοπλαστικά πολυμερή και επικεντρώνεται στην όσο το δυνατόν καλύτερη ποιότητα του τελικού προϊόντος, δηλαδή του ανακυκλωμένου πολυμερούς. Αν αυτό κατα-

στεί επιφύλαξη, τότε οι αγορές που θα απορροφήσουν τα ανακυκλωμένα πολυμερή, θα γίνουν αυτόματα περισσότερες και ευρύτερες. Με άλλα λόγια, η θεμελιώδης φιλοσοφία της ανακύκλωσης για μας ήταν πάντα: *Δεν πρέπει να απολεσθεί η αξία που προστίθεται στο υλικό κατά τη διάρκεια του σταδίου πολυμερισμού, αλλά συγχρόνως πρέπει να αποφευχθεί η αντικατάσταση τεράστιων όγκων πλαστικών απορριμμάτων με πλαστικά δευτέρας ή τρίτης ποιότητας και περιορισμένων εφαρμογών.*

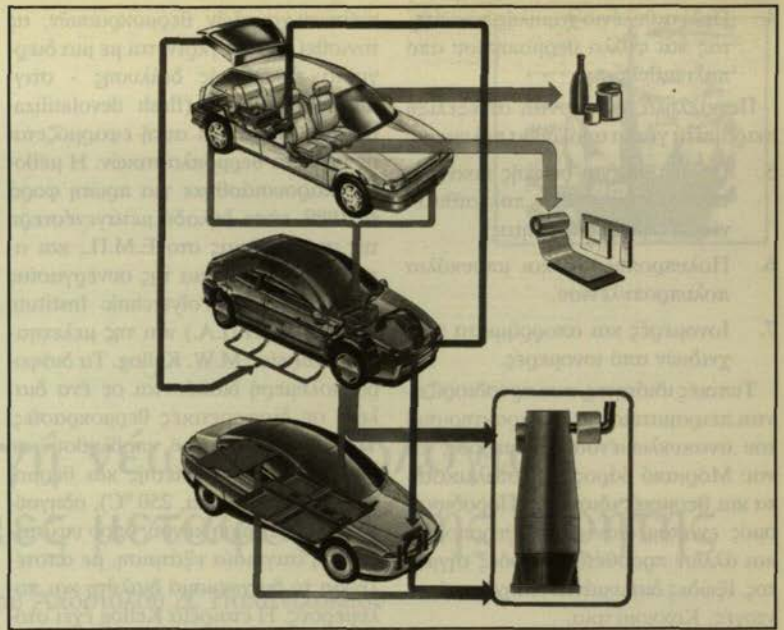
Τα κύρια στάδια της πειραματικής διαδικασίας, που διεξάγεται σε χαμηλές πιέσεις και χαμηλές έως ενδιάμεσες θερμοκρασίες, είναι τα ακόλουθα:

- Υποβιβασμός μεγέθους των απορριμμάτων και έκπλυση με νερό.
- Εκλεκτική διάλυση σε ένα διαλύτη στη μέγιστη δυνατή συγκέντρωση.
- Διήθηση υπό πίεση του διαλύματος για το διαχωρισμό των αδιαλυτών συστατικών.
- Επανακαταβύθιση του πολυμερούς με χρήση μη-διαλυτών σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος.
- Ανάκτηση του πολυμερούς με διήθηση, έκπλυση και ξήρανση.
- Διαχωρισμός και ανάκτηση του συστήματος διαλύτη/μη-διαλύτη με κλασματική απόσταξη.

Η επιλογή του συστήματος διαλύτη/μη-διαλύτη γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθα κριτήρια:

- Μορφή του ανακυκλωμένου πολυμερούς, δηλαδή μικροί κόκκοι αντί συσσωματωμάτων.
- Απόδοση σε ανακυκλωμένο πολυμερές.
- Ποιότητα του ανακυκλωμένου πολυμερούς, ιδιαίτερα επικεντρωμένη στη διατήρηση του μοριακού βάρους και των μηχανικών αντοχών.
- Μέγιστη δυνατή ανάκτηση του συστήματος διαλυτών που χρησιμοποιήθηκαν.

Στην περίπτωση μιγμάτων πολυμερών, η τεχνολογία που αναπτύσσεται εκμεταλλεύεται τη θερμοδυναμική ασυμβατότητα των πολυμερών: Τα πολυμερή διαχωρίζονται μεταξύ τους μέσω της εκλεκτικής διάλυσής τους σε έναν κατάλληλο διαλύτη, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία. Ακολούθως, κάθε πολυμερές ανακτάται από το διά-



λυμα με την προσθήκη ενός μη-διαλύτη. Η μέθοδος αυτή, γνωστή και ως τεχνολογία εκλεκτικής διάλυσης/επανακαταβύθισης (selective dissolution/precipitation), παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες τεχνικές ανακύκλωσης:

1. Σημαντική μείωση του όγκου των πλαστικών λόγω της διάλυσής τους σε έναν κατάλληλο διαλύτη.
2. Η αξία που προστίθεται στο πολυμερές κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού διατηρείται, ενώ το πολυμερές, ελεύθερο από προσμίξεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε εφαρμογή. Η επιλογή διαλύτη και μη-διαλύτη υπό κατάλληλες πειραματικές συνθήκες, μπορεί να οδηγήσει σε προϊόν που έχει ιδιότητες εφάμιλλες του παρθένου υλικού.
3. Υπάρχει η δυνατότητα απομάκρυνσης προσθέτων και ακαθαρσιών, είτε με διήθηση του διαλύματος, όταν οι ξένες προσμίξεις είναι αδιάλυτες, είτε με παραλαβή τους από το σύστημα διαλύτη μη-διαλύτη, όταν είναι αναμίξιμες με αυτό.
4. Τα πρόσθετα που διαχωρίζονται μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν.
5. Εκτός από τη θέρμανση κατά τη διάλυση (η οποία σχετίζεται με

την επιλογή του διαλύτη και των πειραματικών συνθηκών), καμιά περαιτέρω ατοικοδόμηση δεν προβλέπεται, λόγω της ίδιας της διεργασίας ανακύκλωσης.

6. Οποιοδήποτε ελαττωματικό υλικό, όπως συσσωματώματα πλέγματος λόγω προηγούμενης ατοικοδόμησης του πολυμερούς, απομακρύνονται κατά το στάδιο της εκλεκτικής διάλυσης.
7. Το καταβυθισμένο πολυμερές, παραλαμβάνεται σε κατάλληλη μορφή κόκκου, έτοιμο για περαιτέρω επεξεργασία, π.χ. τροφοδοσία σε μηχανές μορφοποίησης πολυμερών.

Κατ'αρχήν, έμφαση δόθηκε στην ανάπτυξη διεργασιών-πilotων (model processes) για ένα είδος πολυμερούς. Για συγκριτικούς λόγους, υποβλήθηκαν στη διαδικασία ανακύκλωσης και παρθένα πολυμερή και αντικείμενα απορριμμάτων, τα εξής:

1. Πολυ(χλωριούχο βινύλιο) και μπουκάλια πολυ(χλωριούχου βινυλίου).
2. Πολυστυρένιο και απόρριμμα αφρώδους πολυστυρενίου.
3. Πολυ(μεθακρυλικό μεθύλιο) και διακοσμητικοί υαλοπίνακες πολυ(μεθακρυλικού μεθυλίου).

4. Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας και φύλλα θερμοκηπίου από πολυαιθυλένιο.

Παράλληλα, βρίσκονται σε εξέλιξη πειράματα για τα ακόλουθα πολυμερή:

5. Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και μπουκάλια πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας.

6. Πολυπροπυλένιο και μπουκάλια πολυπροπυλενίου.

7. Ιονομερές και απορρίμματα παιχνιδιών από ιονομερές.

Τυπικές ιδιότητες, που προσδιορίζονται πειραματικά για το χαρακτηρισμό του ανακυκλωμένου πολυμερούς, είναι: Μοριακό βάρος. Κρυσταλλικότητα και θερμικές ιδιότητες. Προσδιορισμός εναπομείναντος σταθεροποιητή και άλλων προσθέτων. Ιξώδες τήγματος. Ιξώδες διαλυμάτων. Μηχανικές αντοχές. Κοκκομετρία.

Για όλα τα αναφερθέντα συστήματα, η εφαρμογή της μεθόδου οδήγησε σε προϊόντα που ανακτήθηκαν ποσοτικά με την μορφή κόκκων ή λεπτής σκόνης. Η ανάκτηση πολυμερούς, διαλύτη και μη-διαλύτη, προσέγγισε το 100%. Η διεργασία ανακύκλωσης δεν επηρεάζει κρίσιμες ιδιότητες των τελικών προϊόντων, ενώ υπάρχουν σαφείς ενδείξεις για απομάκρυνση των προσθέτων που αρχικά είχαν ενσωματωθεί στα πολυμερή. Με άλλα λόγια, η υπό μελέτη διεργασία, παρέχει πράγματι ανακυκλωμένα πολυμερή, με ποιότητα εφάμιλλη του παρθένου.

Σε εξέλιξη έρευνα, που ενέχει όλα τα πολυμερή που έχουν μελετηθεί μέχρι τώρα, είναι προανατολισμένη αφ' ενός σε μίγματα πλαστικών απορριμμάτων και αφ' ετέρου σε αριστοποίηση συνθηκών και αύξηση μεγέθους της διεργασίας. Από την άλλη πλευρά, καίτοι η υπεροχή της μεθόδου, σε σχέση με την τριτογενή και τετατογενή ανακύκλωση είναι μάλλον προφανής, μια συστηματική οικονομική ανάλυση κρίνεται αναγκαία.

Με βάση τα προαναφερθέντα, το Ε.Μ.Π. σήμερα, μπορεί να προτείνει μια λύση στο θέμα του διαχωρισμού των πλαστικών απορριμμάτων, που αποτελεί και τη βασική δυσχέρεια, εάν η υψηλή ποιότητα του τελικού προϊόντος τεθεί ως στόχος.

Σε διεθνή κλίμακα, η πορεία που προτείνεται, μια διεργασία χαμηλών

πίεσεων-χαμηλών θερμοκρασιών, ας τονισθεί εδώ, συγκρίνεται με μια διεργασία εκλεκτικής διάλυσης - στιγμιαίας εξάτμισης (flash devolatilization), η οποία και αυτή εφαρμόζεται σε μίγματα θερμοπλαστικών. Η μέθοδος παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1989, είναι δηλαδή μεταγενέστερη της προσπάθειας στο Ε.Μ.Π., και αποτελεί αποτέλεσμα της συνεργασίας του Rensselaer Polytechnic Institute (New York, Η.Π.Α.) και της μελετητικής εταιρείας M.W. Kellog. Τα διάφορα πολυμερή διαλύονται σε ένα διαλύτη σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Τα διαλύματα, αφού υποβληθούν σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (10-40 atm, 250 °C), οδηγούνται σε ένα χώρο κενού, όπου υφίστανται τη στιγμιαία εξάτμιση, με αποτέλεσμα το διαχωρισμό διαλύτη και πολυμερούς. Η εταιρεία Kellog έχει στόχο την ανάπτυξη μιας πιλοτικής διάταξης δυναμικότητας 100 lb/hr, ενώ σε επόμενο στάδιο προβλέπεται και η κατασκευή εργοστασίου δυναμικότητας 32.000 t/yr.

## Συμπέρασμα

Γίνεται φανερό ότι η τελική επιλογή της πιο αποδοτικής μεθόδου ανακύκλωσης θα αναζητηθεί μέσα σε ένα πλέγμα κοινωνικο-οικονομικο-τεχνικών παραγόντων, όπως:

1. Η πηγή από την οποία θα προέλθει το πλαστικό απόρριμμα και η μέθοδος συλλογής αυτού.
2. Η αγορά που θα απορροφήσει το ανακυκλωμένο πλαστικό και οι απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.
3. Η κοινωνική αποδοχή του ανακυκλωμένου πλαστικού.
4. Η τιμή της πρώτης ύλης (παρθένου πολυμερούς) και άρα η οικονομική βιωσιμότητα της κάθε μεθόδου, λαμβάνοντας υπόψη και την πιθανή επιβολή «πράσινου» φόρου, με βάση την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει».
5. Η κρατική παρέμβαση στην καθιέρωση της ανακύκλωσης ως ζωτικού κρίκου στην αλυσίδα της βιομηχανικής παραγωγικής διαδικασίας και καθημερινής ζωής.

## Βιβλιογραφία

1. M.T. Dennison, «The Plastics Waste Issue - A European View», Based on speech delivered to the Dewitt Petrochemical Review - Houston, Texas, 20th March 1991.
2. Anon., Summary Document of APME (Association of Plastics Manufacturers in Europe), «Plastics Recovery in Perspective» (1990).
3. R.D. Leaversush, *Modern Plastics International*, pp. 26-29, July 1991.
4. T.F. Yen, «Recycling and Disposal of Solid Wastes, Industrial Agricultural Domestic», Ann Arbor Science Publishers Inc. (1974).
5. K.E. Battle, A.P. Moore, E.B. Nauman, J.C. Lynch, «Plastics Recycling by Selective Dissolution». The DeWitt Conference, March 25-27, 1992.
6. K.F. Drain, W.R. Murphy, M.S. Otterburn, *Conservation & Recycling*, 4(4), 201 (1981).
7. E.M. Kampouris, C.D. Papaspyrides, C.N. Lekakou, *Polymer Eng. Sci.*, 28(8), 534 (1988).
8. C.D. Papaspyrides, D.C. Diakoulaki, *J. Vinyl Technol.*, 8(2), 83 (1986).
9. E.M. Kampouris, C.D. Papaspyrides, C.N. Lekakou, *Conservation & Recycling*, 10(4), 315 (1987).
10. E.M. Kampouris, D.C. Diakoulaki, C.D. Papaspyrides, *J. Vinyl Technol.*, 8(2), 79 (1986).
11. C.D. Papaspyrides, S.Gouli, J.G. Poulakis, *Polymer Recovery* (1993), in press.
12. S.Gouli, J.G. Poulakis, C.D. Papaspyrides, *Polymer Recovery* (1993), in press.
13. C.D. Papaspyrides, J.G. Poulakis, P.C. Varelidis, *Resources, Conservation and Recycling*, accepted.
14. C.D. Papaspyrides, J.G. Poulakis, 1st Intl. Exhibition and Conf. on Environmental Technology for the Mediterranean Region (HELECO 93), Athens, April 1-4, 1993, Proc., 203-212.