

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μεθοδολογία και Τεχνολογικός
εξοπλισμός ανακύκλωσης πλαστικών υλικών.**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΜΑΥΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΘΩΜΑΣ (Α.Μ. 5111)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΡΑΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Ανωτάτου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στην τεχνολογία ανακύκλωσης των πλαστικών υλικών.

Η αξία της ανακύκλωσης των απορριμμάτων έχει πια αναγνωριστεί διεθνώς. Δεδομένης της ευρείας χρήσης των πλαστικών η ανακύκλωση των πλαστικών υλικών κατέχει μια ξεχωριστή θέση στο κεφάλαιο της ανακύκλωσης.

Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στη λεπτομερή παρουσίαση της τεχνολογίας όλων των μεθόδων ανακύκλωσης πλαστικών. Η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια διεπιστημονική προσπάθεια μηχανικών, χημικών, βιολόγων και άλλων επιστημόνων και συνεχώς εξελίσσεται με σκοπό την όσο γίνεται πιο αποδοτική ανακύκλωση.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή Δρα Παναγιωτάρα για την ανάθεση του θέματος καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.

Μαυρογιάννης Θωμάς

Μάιος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στη μελέτη των μεθόδων ανακύκλωσης πλαστικών υλικών. Το θέμα αναπτύσσεται σε επτά κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις ιδιότητες και τους τρόπους επεξεργασίας των πλαστικών και γίνεται μια αναφορά στην ιστορική εξέλιξη της επιστήμης των πολυμερών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη σημασία της ανακύκλωσης. Φυσικά δίνεται έμφαση στην ανακύκλωση των πλαστικών. Παρουσιάζονται οι τρόποι ταξινόμησης και κωδικοποίησης των πλαστικών που διευκολύνουν τη διαλογή τους που είναι ένα βασικό στάδιο της διαδικασίας ανακύκλωσης.

Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται με την πρωτογενή ανακύκλωση των πλαστικών η οποία πραγματοποιείται συνήθως στο χώρο της βιομηχανικής παραγωγής των πλαστικών και έχει σαν στόχο την επαναχρησιμοποίηση του σκάρτου πλαστικού που είναι αποτέλεσμα αστοχιών της παραγωγής και δημιουργίας ελαττωματικών προϊόντων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δευτερογενής ή μηχανική ανακύκλωση που είναι και η πιο σημαντική μέθοδος. Η δευτερογενής ανακύκλωση στοχεύει στην παραγωγή προϊόντων από ανακυκλωμένα πλαστικά που θα έχουν ιδιότητες όσο γίνεται πιο κοντά στις ιδιότητες των παρθένων υλικών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τριτογενής ανακύκλωση που περιλαμβάνει μία ποικιλία διαφορετικών τεχνικών. Με την τριτογενή ανακύκλωση μετατρέπονται θερμοπλαστικά και θερμοανθεκτικά πλαστικά σε υψηλής ποιότητας καύσιμα και χημικά και επεξεργάζονται πλαστικά απορρίμματα που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με άλλες διεργασίες ούτε τεχνολογικά αλλά κυρίως οικονομικά, λόγω των δαπανηρών σταδίων διαχωρισμού/καθαρισμού.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι της τεταρτογενούς ανακύκλωσης δηλαδή της αποτέφρωσης των πλαστικών απορριμμάτων με ανάκτηση ενέργειας.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΠΛΑΣΤΙΚΑ	
1.1 Γενικά.....	2
1.2 Πολυμερή.....	3
1.2.1 Χημική Δομή των Πολυμερών.....	3
1.2.2 Σύνθεση των Πολυμερών.....	4
1.2.3 Θερμικές Ιδιότητες Πολυμερών.....	5
1.2.4 Πρόσθετες Ουσίες στα Πλαστικά.....	6
1.2.5 Μέθοδοι Επεξεργασίας και Μορφοποίησης Πολυμερών.....	7
1.3 Πλαστικά Ευρείας Χρήσης.....	10
1.3.1 Θερμοπλαστικά Γενικών Εφαρμογών.....	10
1.3.2 Βιομηχανικά Θερμοπλαστικά.....	11
1.3.3 Θερμοσκληρυνόμενα Πλαστικά.....	12
1.3.4 Ελαστομερή.....	13
1.4 Ιστορία των Πλαστικών.....	13
1.5 Πλαστικά και Περιβάλλον.....	14
1.6 Κύκλος Ζωής των Πλαστικών.....	15
1.7 Η Αγορά των Πλαστικών.....	17
2. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ	
2.1 Γενικά.....	19
2.2 Σημασία της Ανακύκλωσης.....	21

2.3 Ανακύκλωση των Πλαστικών Υλικών.....	22
2.3.1 Η Αναγκαιότητα της Ανακύκλωσης των Πλαστικών Υλικών..	22
2.3.2 Ταξινόμηση Πλαστικών Απορριμμάτων.....	23
2.3.3 Κωδικοποίηση Ανακυκλώσιμων Πλαστικών.....	24
2.3.4 Μέθοδοι Ανακύκλωσης Πλαστικών.....	25
2.4 Ευρωπαϊκές Οδηγίες για την Ανακύκλωση Υλικών Συσκευασίας...	27

3. ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

3.1 Γενικά.....	29
3.2 Η Επίδραση του Ανακυκλωμένου Πλαστικού στη Σύσταση και τις Ιδιότητες του Τελικού Προϊόντος.....	29
3.3 Αυτόματα Συστήματα Πρωτογενούς Ανακύκλωσης.....	34

4. ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

4.1 Γενικά.....	37
4.2 Στάδια Δευτερογενούς Ανακύκλωσης.....	39
4.3 Συλλογή.....	41
4.3.1 Συστήματα Συλλογής Οικιακών Απορριμμάτων.....	41
4.3.2 Συστήματα Συλλογής Βιομηχανικών και Εμπορικών Απορριμμάτων.....	44
4.3.3 Συστήματα Συλλογής Γεωργικών Απορριμμάτων.....	45
4.3.4 Πλαστικά Απορρίματα Οικοδομής.....	46
4.4 Διαλογή-Ανάκτηση.....	47
4.4.1 Γενικά.....	47
4.4.2 Μέθοδος Μηχανικής Διαλογής Bezner.....	49
4.4.3 Μακρο-Διαχωρισμοί.....	51
4.5 Μείωση Μεγέθους.....	52
4.5.1 Γενικά.....	52
4.5.2 Τεμαχισμός.....	53
4.5.3 Τεχνικές Συσσωμάτωσης / Αύξησης Πυκνότητας.....	58

4.5.4 Τεχνικές Κονιορτοποίησης.....	61
4.6 Τεχνικές Καθαρισμού/διαχωρισμού.....	64
4.6.1 Μικρο-Διαχωρισμοί.....	64
4.6.2 Διεργασίες Πλύσης.....	66
4.6.3 Έλεγχος Καθαρότητας.....	66
4.6.4 Αποθήκευση Πλαστικών Αποβλήτων μετά το Διαχωρισμό...	67
4.7 Ομογενοποίηση-Πελλετοποίηση... ..	67
4.7.1 Γενικά.....	67
4.7.2 Ο Εκβολέας.....	69
4.7.3 Φίλτρα Διήθησης Προσμίξεων του Τήγματος Ανακυκλωμένων Πλαστικών.....	71
4.8 Βελτίωση Ποιότητας Προϊόντων Δευτερογενούς Ανακύκλωσης.....	72
4.9 Μηχανικές Ιδιότητες Προϊόντων Δευτερογενούς Ανακύκλωσης.....	73

5. ΤΡΙΤΟΓΕΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

5.1 Γενικά.....	75
5.2 Θερμική Ανακύκλωση.....	76
5.3 Πυρόλυση.....	79
5.4 Θερμική Διάσπαση.....	81
5.5 Θερμική/Καταλυτική Αποδόμηση.....	82
5.5.1 Η Ιδέα της Καταλυτικής Αποδόμησης.....	82
5.5.2 Χαρακτηριστικά.....	83
5.5.3 Διάγραμμα Ροής.....	83
5.6 Υδρογόνωση.....	87
5.7 Αεριοποίηση.....	89
5.8 Τεχνολογίες Πλάσματος.....	90
5.9 Η Διεργασία Thermoselect.....	91
5.10 Χημική Ανακύκλωση.....	93

6. ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ	
6.1 Γενικά.....	96
6.2 Η Αντίδραση της Καύσης.....	98
6.3 Τύποι Αποτεφρωτήρων.....	99
6.4 Συστήματα Αποτέφρωσης Μαζικής Καύσης.....	101
6.4.1 Συστήματα Αποτέφρωσης Μαζικής Καύσης με Μηχανικό Αποτεφρωτήρα Σχάρας.....	101
6.4.2 Συστήματα Αποτέφρωσης Μαζικής Καύσης με Περιστροφικό Κλίβανο.....	108
6.5 Αποτεφρωτήρες RDF.....	110
6.6 Αρθρωτοί Αποτεφρωτήρες.....	112
6.7 Αποτεφρωτήρες Ρευστοποιημένης Κλίνης.....	113
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	115
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	117

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σαν θέμα την τεχνολογία ανακύκλωσης πλαστικών. Τα πλαστικά είναι μια κατηγορία υλικών με τεράστιο εύρος εφαρμογών σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η κατανάλωση πλαστικών σε παγκόσμιο επίπεδο συνεχώς αυξάνεται και συνεπώς τα πλαστικά αποτελούν ένα πολύ σημαντικό ποσοστό των απορριμμάτων κάθε είδους. Τα προβλήματα που προκύπτουν από τη διάθεση των πλαστικών απορριμμάτων στο περιβάλλον καθιστούν επιτακτική την ανακύκλωσή τους.

Στόχος της ανακύκλωσης είναι η επαναχρησιμοποίηση του απορριπτόμενου υλικού κυρίως ως πρώτη ύλη αλλά και για την παραγωγή ενέργειας. Η αξιοποίηση των απορριμμάτων έχει σαν αποτέλεσμα την εξοικονόμηση παρθένων πρώτων υλών και ενέργειας με σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικά βήματα εξέλιξης των τεχνολογιών ανακύκλωσης πλαστικών υλικών. Έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές τεχνικές οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες οι οποίες θα περιγραφούν αναλυτικά στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Η επιλογή των τεχνικών ανακύκλωσης των πλαστικών απορριμμάτων χαρακτηρίζεται από διαφοροποιήσεις ανάλογα με την εξέλιξη των επιμέρους διεργασιών, των τιμών των παραγομένων προϊόντων, των κοινωνικών/πολιτικών πιέσεων και των συνακόλουθων νομοθετικών ρυθμίσεων που τίθενται σχετικά με την ασφάλεια των ανακυκλωμένων προϊόντων στην υγεία των πολιτών όσο και των επιπτώσεων τους στο περιβάλλον. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στην επιλογή της διεργασίας ανακύκλωσης εξαρτώνται από τη φύση του πολυμερούς, το πεδίο εφαρμογής του και το επίπεδο επιμόλυνσης, σε συνυπολογισμό με τη σταθερή τροφοδοσία των πλαστικών απορριμμάτων και του οικονομικού κόστους της τεχνολογίας.

1. ΠΛΑΣΤΙΚΑ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο όρος πλαστικό είναι κοινή ονομασία που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια ευρεία ποικιλία συνθετικών ή ημισυνθετικών οργανικών στερεών υλικών. Το πλαστικό αποτελεί πλέον το πιο διαδεδομένο υλικό για τις περισσότερες χρήσεις στην καθημερινή ζωή. Οι τομείς εφαρμογών των πλαστικών είναι η οικοδομή, η συσκευασία, ο ηλεκτρικός-ηλεκτρονικός εξοπλισμός, οι μεταφορές, η γεωργία, τα έπιπλα, τα οικιακά σκεύη και άλλα. Η ζήτηση και η παραγωγή πλαστικών υλικών συνεχώς αυξάνεται λόγω του τεράστιου εύρους εφαρμογών τους και των πολλών πλεονεκτημάτων τους.

Τα πλαστικά σαν υλικά έχουν πάρα πολλά πλεονεκτήματα τα οποία τα καθιστούν σχεδόν αναντικατάστατα σε πολλές εφαρμογές. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους είναι:

- Η εύκολη μορφοποίησή τους και το ότι μπορούν να παίρνουν το σχήμα μητρών πολύπλοκης μορφής.
- Η χαμηλή πυκνότητά τους, είναι δηλαδή προϊόντα χαμηλού ειδικού βάρους.
- Είναι θερμοκοί και ηλεκτρικοί μονωτές.
- Το χαμηλό κόστος.
- Η μη διαπερατότητα όσον αφορά το νερό και τα αέρια.
- Νέοι τύποι πολυμερών και σύνθετων υλικών ενισχυμένων με συνθετικές ίνες παρουσιάζουν υψηλή απόδοση και μακρά διάρκεια χρήσης (χρησιμοποιούνται εκτενώς στην αεροπορική και διαστημική βιομηχανία).
- Η δυνατότητα εκτύπωσης στην επιφάνειά τους.
- Διάφορες χρήσιμες ειδικές ιδιότητες π.χ. μερικές φορές είναι διαφανή.

Παρόλα αυτά, τα πλαστικά παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα όπως:

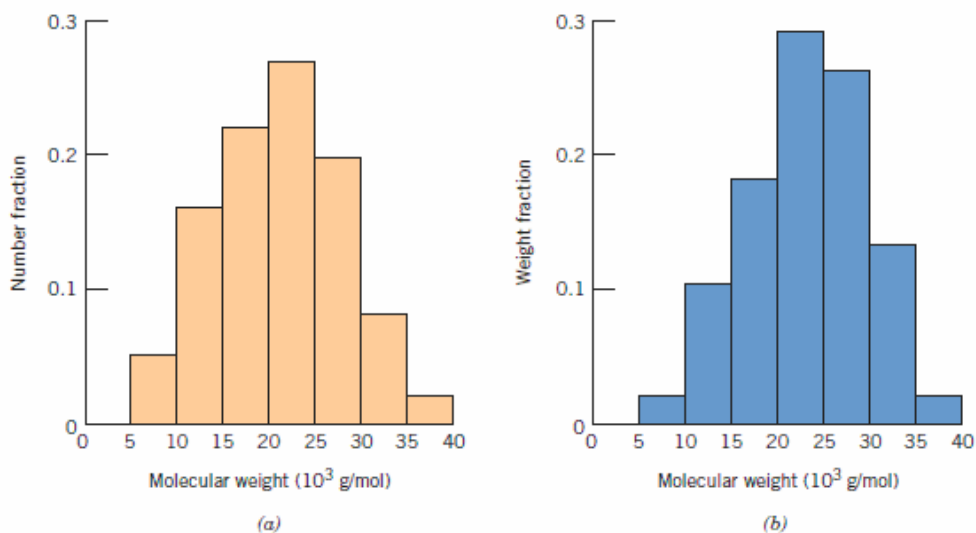
- Η μικρή αντοχή τους και η ακαμψία
- Τα θερμοκρασιακά όρια επεξεργασίας τους
- Η παραμόρφωση που παρουσιάζουν υπό την επίδραση εξασκούμενης δύναμης (έρπουν).

1.2 ΠΟΛΥΜΕΡΗ

1.2.1 Χημική Δομή των Πολυμερών

Τα πλαστικά είναι σχεδόν αποκλειστικά πολυμερή μεγάλου μοριακού βάρους, εξ ου και η ονομασία πολλών εξ αυτών φέρει το πρόθεμα πολυ-, και που μπορεί να περιέχουν πρόσθετα, οργανικά ή μη, για βελτίωση των ιδιοτήτων τους (μηχανική αντοχή, εμφάνιση, χρώμα κ.τ.λ.). Κύριο συστατικό παρασκευής τους είναι οι συνθετικές ρητίνες που διακρίνονται σε "εποξειδικές" και "ακρυλικές".

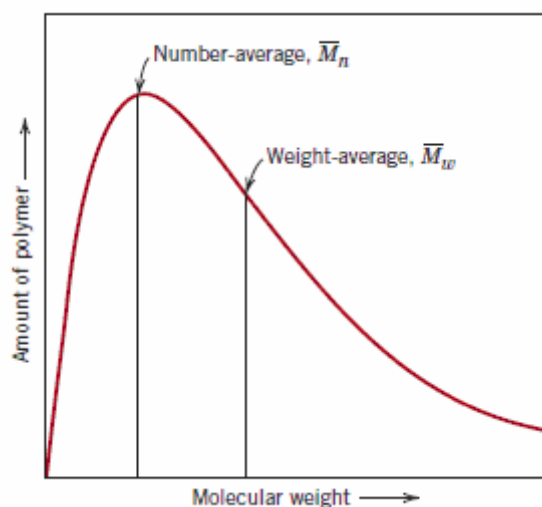
Τα πολυμερή, είναι υψηλού μοριακού βάρους αλυσίδες, τα κύρια στοιχεία των οποίων είναι άτομα άνθρακα. Τα άτομα άνθρακα σχηματίζουν τέσσερις χημικούς δεσμούς, οι δυο των οποίων χρησιμοποιούνται για την δημιουργία της κύριας αλυσίδας και οι άλλοι δυο ενώνονται με τους παράπλευρους υποκαταστάτες.



Σχήμα 2.1 Υποθετική κατανομή του μοριακού βάρους ενός πολυμερούς (α) βάσει του μέσου μοριακού βάρους κατά αριθμό και (b) βάσει του μέσου μοριακού βάρους κατά βάρος [1].

Το μήκος της μοριακής αλυσίδας του πολυμερούς μπορεί να ποικίλει, αλλά τα υλικά με τεχνολογικό ενδιαφέρον έχουν μοριακό βάρος πάνω από 10.000 και μέχρι το 1.000.000. Το μοριακό βάρος των πολυμερών ορίζεται από την μέση τιμή μοριακού βάρους και την κατανομή μοριακού βάρους (σχήμα 2.1). Το μέσο μοριακό βάρος μετράται σαν μέσο μοριακό βάρος κατά βάρος ή μέσο μοριακό βάρος κατ' αριθμό (σχήμα 2.2). Ο λόγος των δυο παραπάνω μεγεθών καλείται συντελεστής διασποράς. Το μέσο μοριακό βάρος και η κατανομή μοριακού βάρους είναι πάρα πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά των

πολυμερών διότι επηρεάζουν τις ιδιότητες τους κατά την διαδικασία επεξεργασίας τους (π.χ. αντοχή, τάση, διαλυτότητα κ.τ.λ.).



Σχήμα 1.2 Κατανομή των μοριακών βαρών για ένα τυπικό πολυμερές [1].

Ένας εναλλακτικός τρόπος να εκφραστεί το μέσο μέγεθος της αλυσίδας των πολυμερών είναι ο βαθμός πολυμερισμού (degree of polymerization, DP) ο οποίος εκφράζει το μέσο αριθμό μονομερών ανά αλυσίδα. Ο βαθμός πολυμερισμού είναι ίσος με το πηλίκο του μέσου μοριακού βάρους κατά βάρος διά το μοριακό βάρος του μονομερούς.

Επομένως τα πλαστικά υλικά αποτελούν μια μεγάλη ομάδα υλικών τα οποία αποτελούνται εξολοκλήρου ή κατά μέρος από συνδυασμούς του άνθρακα με οξυγόνο, υδρογόνο, άζωτο και άλλα οργανικά ή ανόργανα συστατικά. Είναι στερεά σε συνθήκες περιβάλλοντος αλλά σε κάποια στάδια της μεταποίησής τους είναι υγρά, επομένως ικανά να αποκτήσουν διάφορα σχήματα, πιο συχνά μέσω της εφαρμογής, είτε ταυτόχρονα είτε ξεχωριστά, θέρμανσης και πίεσης. Η χημική δομή του πολυμερούς, έχει σημαντική επίδραση στις μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες του πλαστικού.

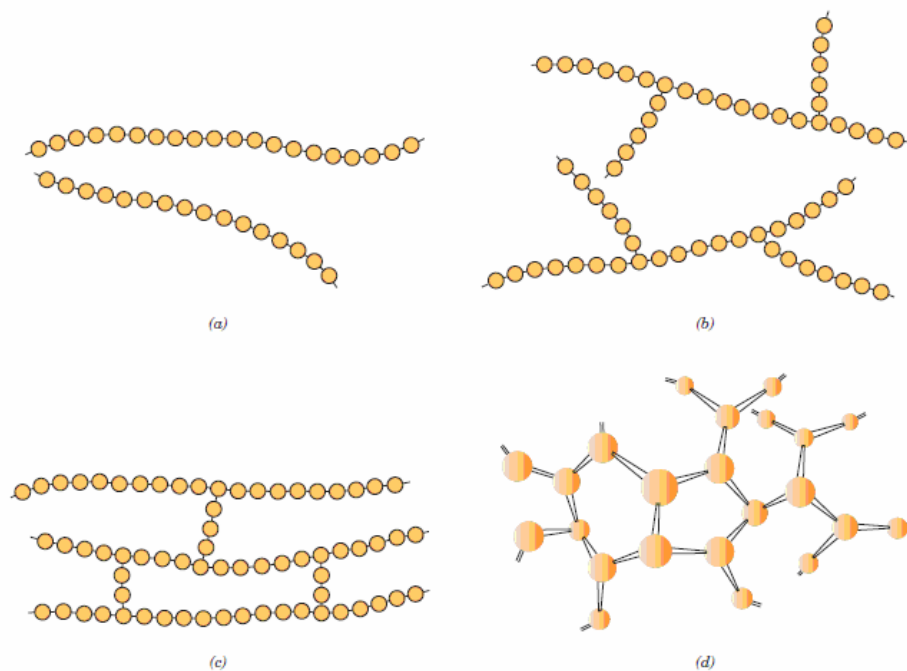
1.2.2 Σύνθεση των Πολυμερών

Τα πολυμερή δημιουργούνται από μονομερή, που αποτελούν την επαναλαμβανόμενη μοριακή μονάδα (ή δομική μονάδα), ως αποτέλεσμα των ακόλουθων μηχανισμών:

- *Καταλυτικός πολυμερισμός*, χρησιμοποιώντας ως καταλύτες, μέταλλα μετάπτωσης, με τα οποία συντίθενται στερεοκανονικά πολυμερή, και τα οποία μπορούν να κρυσταλλωθούν. Η μη στερεοκανονικότητα των πολυμερών έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό άμορφων πολυμερών.

- *Πολυσυμπύκνωση* ανόμοιων μονομερών που το καθένα περιέχει δυο δραστικές ομάδες (πχ. δικαρβονικά οξέα και διαλκοόλες ή διαμίνες). Κατά τον μηχανισμό αυτό ως δομική μονάδα λαμβάνεται το νέο μονομερές που προκύπτει από τη συμπύκνωση των μονομερών (π.χ. ο αντίστοιχος εστέρας ενός δικαρβονικού οξέος και μιας διόλης).
- *Αλυσωτή αντίδραση* μονομερών (βινυλο-μονομερών). Στον μηχανισμό αλυσωτών αντιδράσεων το ενεργό κέντρο είναι ρίζα ή κατιόν ή ανιόν και ως δομική μονάδα λαμβάνεται το αντίστοιχο βινυλομερές.

Τα πολυμερή υφίσταται είτε με την μορφή ελεύθερων αλυσίδων ή ως μοριακά δίκτυα. Τα ελεύθερα μόρια (αλυσίδες) μπορεί να είναι είτε γραμμικά είτε να φέρουν πλάγιες αλυσίδες σε σχέση με την κύρια αλυσίδα. Στο σχήμα 1.3 φαίνονται τα γραμμικά πολυμερή, τα διακλαδωμένα, αυτά που περιέχουν έναν αριθμό σταυροδεσμών και τα δικτυωμένα πολυμερή. Τα πολυμερή στη στερεά κατάσταση μπορεί να είναι πλήρως άμορφα ή να διαθέτουν κάποιο βαθμό κρυσταλλικότητας (ημικρυσταλλικά).



Σχήμα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων ειδών μοριακής δομής: (α) γραμμική, (β) διακλαδωμένη, (γ) με σταυροδεσμούς, (δ) δικτυωμένη. Οι κύκλοι παριστάνουν τα μονομερή [1].

1.2.3 Θερμικές Ιδιότητες Πολυμερών

Στα άμορφα πολυμερή, οι αλυσίδες τους είναι περιπλεγμένες, και έχουν την μορφή ενός θυσάνου (κουβαριού). Η κίνηση των αλυσίδων

αυξάνεται με την θερμοκρασία. Κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία, που καλείται θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, T_g , οι αλυσίδες δεν έχουν την απαραίτητη ενέργεια για να κινούνται. Το πολυμερές καθίσταται σκληρό και εύθραυστο. Αντίθετα τα κρυσταλλικά πολυμερή περιλαμβάνουν μικρούς κρυσταλλίτες όπου μεταξύ των αλυσίδων αναπτύσσονται δευτερογενείς δεσμοί (π.χ. δεσμοί υδρογόνου), οι οποίοι περιορίζουν την κίνηση των μοριακών αλυσίδων και ενισχύουν την αντοχή του υλικού στην αύξηση της θερμοκρασίας.

Τα πλαστικά που αποτελούνται από ελεύθερες αλυσίδες καλούνται θερμοπλαστικά. Τα υλικά αυτά τήκονται με θέρμανση και στερεοποιούνται όταν ψύχονται, επιτρέποντας έτσι την επεξεργασία τους στην κατάσταση τήγματος. Ένα μοριακό δίκτυωμα μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή σταυροδεσμών, δηλαδή, μορίων που μπορούν να σχηματίσουν τρεις τουλάχιστον δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων (Σχ. 1.5γ). Όσο ο βαθμός δικτύωσης αυξάνει, τόσο αυξάνει και η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g). Τα θερμοπλαστικά είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και τους διαλύτες.

Τα δικτυωμένα πολυμερή ονομάζονται θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοανθεκτικά. Τα θερμοσκληρυνόμενα, εμφανίζουν δικτυωμένες δομές στις τρεις διαστάσεις και αντί να μαλακώνουν, αποσυντίθενται κατά τη θέρμανση. Είναι άμορφα, σκληρά στερεά, άτηκτα και δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία.

Τα ελαστομερή (ελαστικά) εμφανίζουν δομή ενδιάμεση με αυτή των θερμοσκληρυνόμενων και των θερμοπλαστικών, με τις μοριακές αλυσίδες να δικτυώνονται με γέφυρες θείου κατά τον βουλκανισμό. Λόγω του μεγάλου βαθμού ευελιξίας των αλυσίδων έχουν τη δυνατότητα της υπερελαστικότητας, επιδέχονται δηλαδή πολύ μεγάλη παραμόρφωση και κατά την αποφόρτιση, ταχύτατη πλήρη επαναφορά.

1.2.4 Πρόσθετες Ουσίες στα Πλαστικά

Η ρητίνη, πριν τη μετατροπή της σε πλαστικά προϊόντα, σχεδόν πάντα, αναμιγνύεται με διάφορα πρόσθετα διαφορετικής φύσης και σύστασης με στόχο τη βελτίωση της διαδικασίας επεξεργασίας και μορφοποίησης, τη σταθερότητα του προϊόντος και τις μηχανικές προδιαγραφές σε συγκεκριμένες εφαρμογές (π.χ. έκθεση του υλικού σε εκπεμπόμενη ακτινοβολία UV, σε οξείδωση ή σε διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες).

Τέτοια πρόσθετα συνήθως είναι:

- Θερμοσταθεροποιητές (1%) (Αντιοξειδωτικά)
- Φωτο-σταθεροποιητές (5%)
- Πλαστικοποιητές (40%)
- Ενισχυτικά αντοχής (10%)
- Χρωστικές (5%)

- Επιβραδυντές καύσης (15%)
- Αφριστικοί παράγοντες (2%)
- Πληρωτικά υλικά (40%)

Επιπλέον χρησιμοποιείται μια σειρά προσθέτων ως αντιθλωτικά, αντιστατικοί παράγοντες, παράγοντες που λειτουργούν ως σταυροδεσμοί, χημικοί παράγοντες που διευκολύνουν την εξώθηση (εκβολή) του τήγματος, λιπαντικά, απενεργοποιητές μετάλλων, οπτικοί λαμπρυντές, τροποποιητές ιδιοτήτων, κ.ά [4].

Η παρουσία τους, όπως επίσης και τα χημικά που χρησιμοποιούνται στην αρχή ή το τέλος του πολυμερισμού, αποτελεί παράγοντα πολυπλοκότητας στην ανακύκλωση των πρώτων υλών.

1.2.5 Μέθοδοι επεξεργασίας και μορφοποίησης πολυμερών

Με τον όρο επεξεργασία και μορφοποίηση των πολυμερών περιλαμβάνονται όλες εκείνες οι τεχνικές μετατροπής ακατέργαστου πολυμερούς σε αντικείμενα επιθυμητού σχήματος. Από τις πιο κοινές τεχνικές μορφοποίησης των πολυμερών είναι η εκβολή και η χύτευση (με έγχυση ή με συμπίεση).

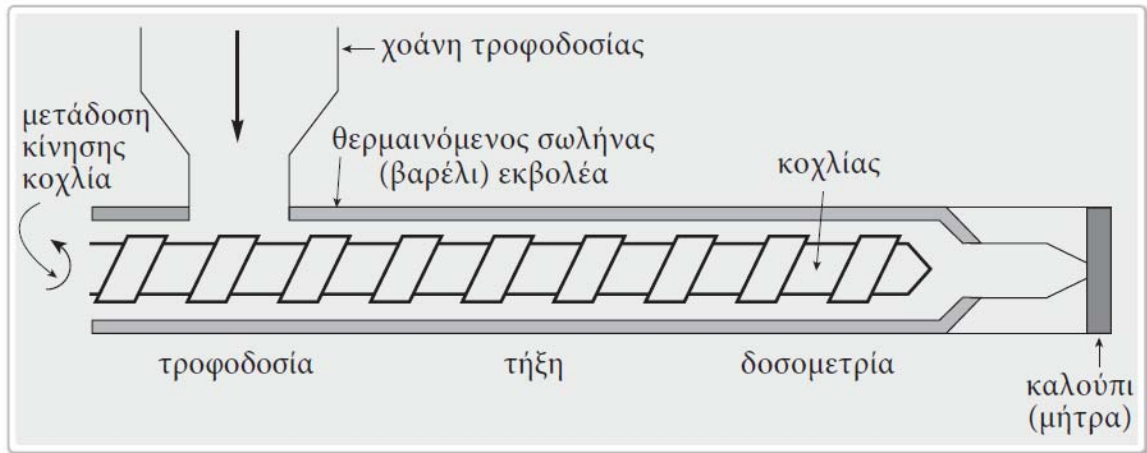
Οι τεχνικές αυτές απαιτούν πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που απαιτούνται για την μορφοποίηση του χάλυβα, του αλουμινίου ή του γυαλιού, και επομένως το μικρότερο ενεργειακό κόστος είναι το πιο ελκυστικό χαρακτηριστικό της επεξεργασίας των πολυμερών. Έχουν όμως και τα πολυμερή το σύμφυτο μειονέκτημα τους: τη χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και την αργή τήξη. Για την ελαχιστοποίηση του προβλήματος χρησιμοποιούνται, για την μεταφορά του πολυμερούς, περιστρεφόμενοι κοχλίες, που επιτρέπουν στους κόκκους ή στην σκόνη του πολυμερούς να θερμαίνονται ομοιόμορφα με τον συνδυασμό εξωτερικών θερμαντικών στοιχείων και της θερμότητας τριβής που αναπτύσσεται κατά την μεταφορά.

Η μορφοποίηση με την τεχνική της χύτευσης με έγχυση περιλαμβάνει την τήξη του πολυμερούς κατά την επαφή του με τα θερμά τοιχώματα ενός κυλίνδρου και την έγχυση του στην κοιλότητα ενός καλουπιού.

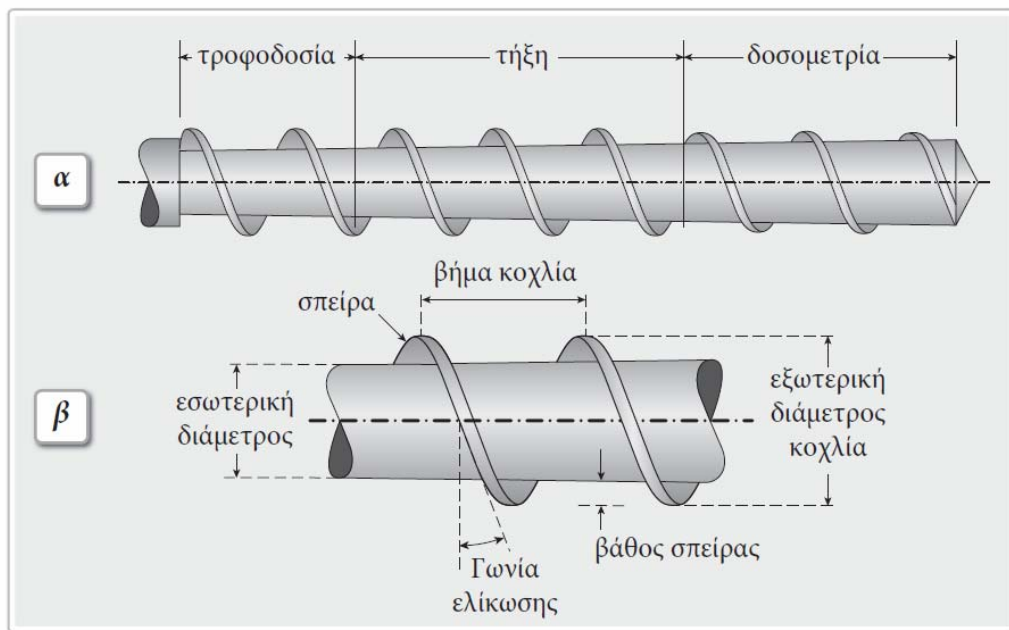
Η μορφοποίηση με εκβολή πάλι περιλαμβάνει την φάση τήξης του πολυμερούς, όπως και στην χύτευση με έγχυση, μόνο που αντί για έγχυση του πολυμερούς στο καλούπι (μήτρα), το πολυμερές υπό μορφή τήγματος πιέζεται να διέλθει μέσω ενός στενώματος, το οποίο αποτελεί και τη μήτρα.

Η διαδικασία μορφοποίησης με εκβολή ή εξώθηση πραγματοποιείται σε ειδικές μηχανές που καλούνται εκβολείς. Στο Σχήμα 1.4 φαίνεται, σχηματικά, ένας μονοκόχλιος εκβολέας που αποτελεί τον χαρακτηριστικό εκπρόσωπο των μηχανών συνεχούς εκβολής. Η δομή του κοχλίου φαίνεται στο Σχήμα 1.5. Η σκόνη του πολυμερούς προωθείται σε

ένα εξωτερικά θερμαινόμενο σωλήνα (βαρέλι) μέσω ενός περιστρεφόμενου κοχλία. Τήκεται καθώς προχωρά στο βαρέλι και πιέζεται διαμέσου ενός καλούπι (μήτρας) όπου παίρνει και την τελική του μορφή.



Σχήμα 1.4 Μονοκόχλιας εκβολέας [2].

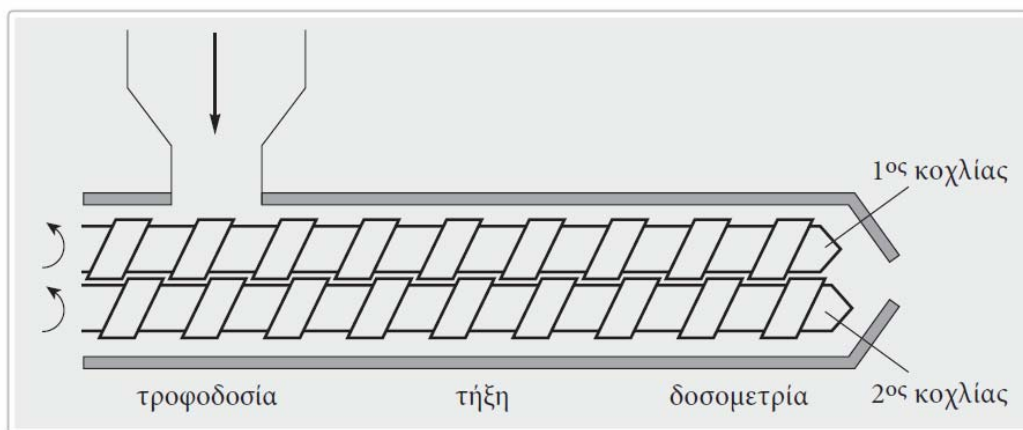


Σχήμα 1.5 α) Ζώνες λειτουργίας κοχλίας, β) Λεπτομέρειες κοχλίας [2].

Οι αεριζόμενοι εκβολείς έχουν ενσωματώσει στο σώμα του βαρελιού ειδικούς εξόδους για την απομάκρυνση πτητικών προϊόντων που δημιουργούνται από ίχνη μονομερούς που δεν έχουν αντιδράσει, την υγρασία, το διαλύτη από τη διαδικασία πολυμερισμού ή προϊόντα αποδόμησης των μακρομοριακών αλυσίδων.

Οι εκβολείς διακρίνονται σε δυο τύπους: συνεχούς και ασυνεχούς λειτουργίας. Οι συνεχούς λειτουργίας διακρίνονται σε μονοκόχλιους, οι οποίοι φέρουν έναν μόνο περιστρεφόμενο κοχλία στο βαρέλι (Σχήμα 1.4) και σε διπλοκόχλιους, οι οποίοι φέρουν δυο κοχλίες στο βαρέλι (Σχήμα 1.6). Στην περίπτωση των διπλοκόχλιων εκβολέων, όταν η κοχλίες περιστρέφονται με την ίδια φορά χαρακτηρίζονται ως ομόστροφοι, ενώ με αντίθετη φορά ως ετερόστροφοι. Στους εκβολείς συνεχούς λειτουργίας περιλαμβάνονται επίσης οι εκβολείς δίσκων, επειδή για την επεξεργασία του πολυμερούς χρησιμοποιούνται δίσκοι, και οι εκβολείς τυμπάνου.

Στους ασυνεχούς λειτουργίας περιλαμβάνονται οι εκβολείς που χρησιμοποιούν έμβολο για την τήξη και προώθηση του πολυμερούς. Ο σχεδιασμός των κοχλιών εξώθησης είναι ένα ενδιαφέρον και σύνθετο τεχνικό πρόβλημα. Οι κοχλίες βελτιστοποιούνται για το συγκεκριμένο πολυμερές το οποίο εξωθείται. Ο σχεδιασμός του κοχλία απαιτεί συνδυασμό της μηχανικής των στερεών, της ρευστομηχανικής και της μεταφοράς θερμότητας.



Σχήμα 1.6 Διπλοκόχλιος εκβολέας [2].

Οι διαστάσεις και η μορφή του στενώματος αντιστοιχούν στις διαστάσεις και τη μορφή της διατομής του επιθυμητού προϊόντος μορφοποίησης. Η εκβολή μπορεί να είναι μια διαδικασία συνεχούς ή ασυνεχούς λειτουργίας, ενώ η χύτευση με έγχυση είναι μια κυκλική διαδικασία μορφοποίησης όπου η τελική μορφή του προϊόντος παραλαμβάνεται από ένα καλούπι το οποίο αποτελείται από δυο μέρη που ανοιγοκλείνουν συνεχώς.

Λαμβάνοντας υπόψη την ευρεία ποικιλία των πολυμερικών τύπων και την ακόμα ευρύτερη ποικιλία των αντικειμένων που γίνονται από αυτά, είναι εύκολο να καταλάβει κανείς ότι εκτός αυτών που

αναφέρθηκαν παραπάνω υπάρχει μία πληθώρα ειδικών τεχνικών επεξεργασίας και μορφοποίησης. Μερικές από αυτές είναι: η χύτευση με εμφύσηση, η χύτευση με συμπίεση και θέρμανση, η κυλίνδρωση και η ινοποίηση τήγματος [4].

1.3 ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΕΥΡΕΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ

1.3.1 Θερμοπλαστικά Γενικών Εφαρμογών

Τα σημαντικότερα θερμοπλαστικά γενικών εφαρμογών είναι το πολυαιθυλένιο, το πολυβινυλοχλωρίδιο, το πολυπροπυλένιο, το πολυστυρόλιο, ο πολύ(μεθακρυλικός μεθυλεστέρας), τα φθοριωμένα πλαστικά και άλλα.

Το πολυαιθυλένιο (PE) παρασκευάζεται με πολυμερισμό του αιθυλενίου ($CH_2 = CH_2$) και απαντάται σε δύο τύπους: το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE) και το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE). Είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο πλαστικό λόγω του χαμηλού κόστους του και των χαρακτηριστικών του. Έχει ικανοποιητική αντοχή, καλή ευκαμπτότητα σε μια ευρεία περιοχή θερμοκρασιών και εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες. Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν δοχεία, ηλεκτρικές μονώσεις, σωλήνες, είδη οικιακής χρήσης και παιχνίδια.

Το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) παρασκευάζεται με πολυμερισμό του βινυλοχλωριδίου ($CH_2 = CHCl$). Η ευρεία χρήση του οφείλεται στην υψηλή αντοχή του έναντι προσβολής από χημικά μέσα και στη μοναδική ικανότητά του να αναμειγνύεται με διάφορα πρόσθετα για την παραγωγή υλικών με μια ποικιλία ιδιοτήτων. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή σωλήνων, πλαισίων παραθύρων, επίπλων, υποδημάτων κ. ά.

Το πολυπροπυλένιο (PP) παρασκευάζεται με πολυμερισμό του προπυλενίου ($CH_2 = CHCH_3$). Εμφανίζει ιδιαίτερα ελκυστικές ιδιότητες όπως μεγάλη αντοχή στην προσβολή από χημικά μέσα και στην υγρασία, θερμική αντοχή, χαμηλή πυκνότητα και σκληρότητα επιφανείας. Οι περισσότερες συνηθισμένες εφαρμογές του πολυπροπυλενίου είναι η παραγωγή ειδών οικιακής χρήσης, εξαρτημάτων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών, σωλήνων, ινών και φιαλών διαφόρων τύπων, αποθηκευτικών δοχείων κ.ά.

Το πολυστυρόλιο (PS) παρασκευάζεται με πολυμερισμό του στυρολίου που προκύπτει από την αντικατάσταση ενός υδρογόνου του αιθυλενίου από ένα βενζολικό δακτύλιο. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή αντικειμένων με χύτευση, αποθηκευτικών δοχείων κ.ά. Το διογκωμένο (αφρώδες) πολυστυρόλιο προκύπτει με τη βοήθεια μέσων

διόγκωσης και χρησιμοποιείται σε πολλούς τύπους ως μέσο συσκευασίας και θερμομονωτικό υλικό.

Ο πολυ(μεθακρυλικός μεθυλεστέρας) (PMMA) είναι περισσότερο γνωστός με την εμπορική ονομασία Plexiglas ή Lutice και είναι το σπουδαιότερο υλικό από μία ομάδα θερμοπλαστικών υλικών γνωστών ως ακρυλικών πολυμερών. Ο PMMA είναι άμορφος ως προς τη δομή, διαυγής, έχει υψηλή διαπερατότητα από το φως και παρουσιάζει υψηλή αντοχή έναντι προσβολής από χημικά μέσα. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή παραθύρων αεροσκαφών και σκαφών θαλάσσης, φεγγιτών, προστατευτικών καλυμμάτων κ.ά.

Τα φθοριωμένα πλαστικά παράγονται από μονομερή που περιέχουν ένα ή περισσότερα άτομα φθορίου. Παρουσιάζουν ένα συνδυασμό ειδικών ιδιοτήτων κατάλληλων για πολλές εφαρμογές. Τα φθοριωμένα πλαστικά με τη μεγαλύτερη χρήση είναι το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE ή Teflon) και το πολυχλωροτριφθοροαιθυλένιο (PCTFE).

1.3.2 Βιομηχανικά Θερμοπλαστικά

Ως βιομηχανικό θερμοπλαστικό θεωρείται εκείνο που παρουσιάζει ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που το καθιστούν πολύ χρήσιμο για βιομηχανικές εφαρμογές. Τα σημαντικότερα βιομηχανικά θερμοπλαστικά είναι τα πολυαμίδια, οι πολύ(ανθρακικοί εστέρες), οι πολυακετάλες και οι θερμοπλαστικοί πολυεστέρες.

Τα πολυαμίδια (nylons) είναι θερμοπλαστικά που η κύρια αλυσίδα τους αποτελείται από δομικές μονάδες που συνδέονται με το λεγόμενο αμιδικό δεσμό. Το σημαντικότερο πολυαμίδιο είναι το nylon 6,6. Τα πολυαμίδια χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την κατασκευή οδοντωτών τροχών και ρουλεμάν που λειτουργούν χωρίς λιπαντικό, αντιτριβικών στοιχείων μηχανών και εξαρτημάτων ηλεκτρολογικής χρήσης.

Οι πολύ(ανθρακικοί εστέρες) αναφέρονται στο εμπόριο κυρίως με τις ονομασίες Lexan και Macrolon. Τυπικές εφαρμογές τους οι οδοντωτοί τροχοί, τα προστατευτικά κράνη, οι προπέλες σκαφών, τα παράθυρα, τα τερματικά υπολογιστών κ.ά.

Οι πολυακετάλες είναι μια οικογένεια πολυμερών που έχουν αντικαταστήσει τα μέταλλα σε πολλές εφαρμογές λόγω του χαμηλότερου κόστους. Τα πιο γνωστά μέλη της οικογένειας αυτής είναι τα πολυοξυμεθυλένια που παράγονται με πολυμερισμό της φορμαλδεΰδης. Έχουν μεγάλη αντοχή εφελκυσμού, εξαιρετική διάρκεια ζωής κατά την κόπωση και μεγάλη αντοχή στη φθορά. Χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή ζωνών ασφαλείας και χερουλιών παραθύρων. Οι μηχανολογικές εφαρμογές περιλαμβάνουν μηχανικούς συνδέσμους, φτερωτές αντλιών, οδοντωτούς τροχούς, ρουλεμάν κ.ά.

Οι πιο γνωστοί θερμοπλαστικοί πολυεστέρες είναι ο πολύ(τερεφθαλικός αιθυλενεστέρας) (PET) και ο πολύ(τερεφθαλικός βουτυλενεστέρας) (PBT). Οι εφαρμογές του PBT περιλαμβάνουν ηλεκτρονόμους, πλακέτες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, φτερωτές αντλιών, βαλβίδες άρδευσης κ.ά. Η κύρια εφαρμογή του PET είναι στην περιοχή παραγωγής συνθετικών ινών. Χρησιμοποιείται ακόμη για την παραγωγή μαγνητικών ταινιών και φιαλών κατάλληλων για συσκευασία αναψυκτικών που περιέχουν διοξείδιο του άνθρακα.

1.3.3 Θερμοσκληρυνόμενα Πλαστικά

Τα πλεονεκτήματα των θερμοσκληρυνόμενων πλαστικών για βιομηχανικές εφαρμογές είναι ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα:

- Υψηλή θερμική σταθερότητα
- Υψηλή σκληρότητα και ακαμπτότητα
- Πολύ καλή σταθερότητα διαστάσεων
- Αντοχή σε ερπυσμό και σε παραμόρφωση υπό την επίδραση φορτίου
- Μικρό βάρος
- Υψηλές ηλεκτρομονωτικές και θερμομονωτικές ιδιότητες.

Τα σημαντικότερα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι:

- Οι φαινολικές ρητίνες που αναφέρονται με την εμπορική ονομασία βακελίτης. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα στους τομείς του ηλεκτρικού εξοπλισμού, στα εξαρτήματα μηχανών, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην παραγωγή βερνικιών και πολυστρωματικών υλικών κ.ά.
- Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές εφαρμογές λόγω των εξαιρετικών ηλεκτρομονωτικών ιδιοτήτων τους, ως προστατευτικά και επικαλυπτικά μέσα λόγω των καλών μηχανικών τους ιδιοτήτων τους και της αντοχής τους έναντι προσβολής από χημικά μέσα. Ακόμη χρησιμοποιούνται ως βασικό υλικό (matrix material) για την παραγωγή σύνθετων υλικών. Μειονέκτημά τους είναι το σχετικά υψηλό κόστος.
- Οι ακόρεστοι πολυεστέρες χρησιμοποιούνται βασικά ως κατασκευαστικά υλικά με τη μορφή ενισχυμένων με ίνες γυαλιού προϊόντων με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες.
- Τα αμινοπλαστικά (αμινικές ρητίνες) περιέχουν την αμινομάδα ($-NH_2$). Οι δύο σπουδαιότεροι τύποι αμινικών ρητινών είναι οι ρητίνες ουρίας-φορμαλδεΐδης και οι ρητίνες μελαμίνης-φορμαλδεΐδης. Οι πρώτες χρησιμοποιούνται ως συνδετικά υλικά στην παραγωγή του νοβοπάν, στην επικάλυψη επίπλων, στην παραγωγή βερνικιών, συγκολλητικών και πολυστρωματικών

υλικών. Οι ρητίνες μελαμίνης-φορμαλδεΐδης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ειδών οικιακής χρήσης, κουμπιών, λαβών, πόμολων κ.ά. Επίσης αποτελούν πρώτες ύλες για την παραγωγή βερνικιών για ηλεκτρικές εφαρμογές.

1.3.4 Ελαστομερή

Το βουλκανισμένο φυσικό ελαστικό χρησιμοποιείται στα λάστιχα κάθε είδους μεταφορικών μέσων. Επίσης χρησιμοποιείται στα στηρίγματα των μηχανών και λόγω της ικανότητάς του να αντέχει σε μεγάλα φορτία για μεγάλες περιόδους υπό συμπίεση χρησιμοποιείται στα θεμέλια κτιρίων.

Τα συνθετικά ελαστικά καλύπτουν το 70% περίπου της παγκόσμιας αγοράς των ελαστικών. Έχουν τεράστιο εύρος εφαρμογών. Ενδεικτικά αναφέρουμε τους ιμάντες μεταφοράς, τα βιομηχανικά λάστιχα νερού, τους σωλήνες, ως μονωτικά υλικά, ως πρώτη ύλη για παραγωγή χρωμάτων, βερνικιών και σύνθετων υλικών κ.ά.

1.4 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

Η ιστορία των πλαστικών μπορεί να θεωρηθεί ότι ξεκίνησε το 1840 με την ανακάλυψη του Charles Goodyear της μεθόδου “βουλκανισμού” του φυσικού καουτσούκ. Διαδικασία σύμφωνα με την οποία κατά την κατεργασία του καουτσούκ με θείο προσδίδονται σε αυτό ελαστικές ιδιότητες. Οι εξελίξεις συνεχίστηκαν με χημικές βελτιώσεις φυσικών υλικών μέχρι το 1909 που ο Leo Baekeland μετά από επτά χρόνια έρευνας δημιούργησε τον Βακελίτη (από φαινόλη και φορμαλδεΐδη), το πρώτο απόλυτα συνθετικό υλικό. Τότε ξεκινάει η ουσιαστική ιστορία των πλαστικών.

Η επιστήμη των πολυμερών γεννήθηκε, πραγματικά, τη δεκαετία του 1920, όταν ο γερμανός χημικός Hermann Staudinger εισήγαγε για πρώτη φορά την έννοια του μακρομορίου. Μια θεώρηση που ερχόταν σε αντίθεση με την προγενέστερη εκδοχή του Naegeli περί "μεγαλομορίου" διαστάσεων κολλοειδούς, το οποίο αποτελούσε άθροισμα μικρότερων μορίων συνδεδεμένων με ασθενείς δεσμούς ακαθόριστης φύσεως. Η θεωρία του Staudinger άρχισε να αποκτά υποστηρικτές στη δεκαετία του '30 και ο ίδιος βραβεύτηκε με το βραβείο Nobel το 1953.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι σταθμοί στην ιστορία των πλαστικών.

- Πρώτος ο Γάλλος Henri Braconnot, το 1832, παρασκεύασε νιτρική κυτταρίνη, η βιομηχανική παραγωγή της οποίας άρχισε το 1846, μετά από βελτιώσεις του Christian Freidrich Schonbein.

- Το 1838, ο Γάλλος χημικός Henri Victor Regnault παρατήρησε το σχηματισμό στερεής ουσίας, από βινυλοχλωρίδιο, μετά από έκθεση του στο φως. Η έρευνα αυτή όμως δεν είχε συνέχεια.
- Η μετατροπή του καουτσούκ, με την προσθήκη θείου, σε ελαστικό καλύτερων ιδιοτήτων παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Αμερικανό Charles Goodyear (1840). Το 1844, για τη διαδικασία αυτή, καθιερώθηκε ο όρος βουλκανισμός, μετά από εισήγηση του Αγγλου ερευνητή Thomas Hancock.
- Ο Alexander Parkes παρασκεύασε το πρώτο πλαστικό πολυμερές το 1855.
- Το 1870, με τη συνδυασμένη έρευνα των John Wesley και Isaiah S.Hyatt, παρασκευάστηκε η συνθετική κυτταρίνη (celluloid). Η σύνθεση της στηρίχθηκε στην πλαστικοποίηση της νιτρικής κυτταρίνης με καμφορά.
- Η αναζήτηση υποκατάστατων της εύφλεκτης νιτρικής κυτταρίνης από σταθερότερα υλικά, οδήγησε στη σύνθεση νέων υλικών. Το 1910, ο Leo Hendrik Baekeland συνέθεσε την πρώτη θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη: το βακελίτη.
- Στην περίοδο του μεσοπολέμου ανακαλύφθηκαν και αναπτύχθηκαν τα θερμοπλαστικά πολυμερή όπως: πολυστυρένιο (PS), πολυαιθυλένιο (PE), πολυπροπυλένιο (PP), χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC).
- Ο Wallace Carothers παρασκεύασε το συνθετικό πλαστικό "Νάylon" (Nylon) το 1935 στα εργαστήρια της εταιρείας *DuPont*.
- Το 2003 η παγκόσμια ετήσια παραγωγή πολυμερών άγγιζε τα 150 με 200 εκατομμύρια τόνους προϊόντων και συναγωνίζεται εκείνη του χάλυβα.

1.5 ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Τα πλαστικά υλικά είναι πολύ ανθεκτικά στη διάβρωση και συχνά ευρισκόμενα ανεξέλεγκτα στο φυσικό περιβάλλον προκαλούν αντιαισθητικό και δυσάρεστο αποτέλεσμα. Γνωστό είναι επίσης, πώς κάποια πλαστικά όταν καίγονται εκλύουν τοξικούς ατμούς. Η παραγωγή του πλαστικού υλικού γίνεται από το πετρέλαιο και έτσι η χρήση του επιβαρύνει σημαντικά το περιβάλλον καθώς και η διάσπασή του στη θάλασσα απαιτεί δέκα με είκοσι χρόνια. Αν δεν ανακυκλώνονται, προκαλούν σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Τα πλαστικά απορρίμματα διακρίνονται σε κάποιες κατηγορίες ανάλογα με τις πηγές από τις οποίες προέρχονται:

- Βιομηχανικά (απόβλητα παραγωγής)
- Εμπορικά (πλαστικά από εμπορικά καταστήματα, υπηρεσίες κλπ.)

- Σπιτικά (υλικά συσκευασίας, οικιακά σκεύη)
- Πλαστικά από οικοδομές, κατασκευές (πλαστικά ηλεκτρικών εφαρμογών, πλαστικά πατώματα, ταπετσαρίες)
- Πλαστικά από εξειδικευμένες πηγές (δοχεία χημικών)

Η πλαστική συσκευασία έχει τον κυριότερο λόγο στα πλαστικά απορρίμματα διότι είναι εύχρηστη και χρησιμοποιείται ευρύτατα σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας. Αξίζει να σημειωθεί σ' αυτό το σημείο, ότι η πλαστική συσκευασία επινοήθηκε για την προστασία των αγαθών και την εξασφάλιση της σωστής μεταφοράς τους. Οι σύγχρονες συσκευασίες έχουν βοηθήσει στην εξάλειψη του ποσοστού των αλλοιωμένων τροφίμων. Η συσκευασία πρέπει να αποθηκεύσει σωστά το προϊόν, να το μεταφέρει σωστά καθώς επίσης και να το προστατέψει στη διανομή του/ Υπολογίζεται ότι χωρίς τα πλαστικά η συσκευασία θα ζύγιζε πολύ περισσότερο και συνεπώς θα χρειαζόταν περισσότερη ενέργεια κατά τη μεταφορά και διανομή.

Την ίδια στιγμή όμως, υπολογίζεται ότι περίπου 2.000 πλαστικές σακούλες και μπουκάλια ανευρίσκονται ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο στη Μεσόγειο, ενώ χιλιάδες θαλασσοπούλια μπλέκονται με πλαστικές σακούλες και πνίγονται από αυτές. Περίπου 200 θαλάσσια είδη πεθαίνουν κάθε χρόνο γιατί καταπίνουν πλαστικές συσκευασίες. Οι πλαστικές σακούλες αποτελούν το 15% όλων των σκουπιδιών που εκβράζονται κάθε χρόνο στις παραλίες.

Σύμφωνα με έρευνες, ένα πλαστικό μπουκάλι, του οποίου η χρήση περιορίζεται σε μερικά λεπτά της ώρας, κάνει μέχρι και 450 χρόνια να διασπαστεί ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται. Άρα η ενέργεια που περικλείουν, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να αξιοποιηθεί με κάποιο τρόπο εάν ανακυκλωθούν ή επαναχρησιμοποιηθούν.

1.6 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

Ο χρόνος του κύκλου ζωής του πλαστικού εξαρτάται από τη διάρκεια της χρήσης του. Στον πίνακα 1.1 φαίνεται ο χρόνος του κύκλου ζωής των πλαστικών στις διάφορες εφαρμογές. Η συσκευασία έχει γενικά τον μικρότερο κύκλο ζωής και η πλειοψηφία αυτών των πλαστικών υλικών εισέρχεται στο ρεύμα απορριμμάτων μέσα σε δύο χρόνια.

Πίνακας 1.1 Χρόνος κύκλου ζωής πλαστικών σε διάφορες εφαρμογές [2]

Προϊόν	Χρόνος ζωής (σε χρόνια)	Προϊόν	Χρόνος ζωής (σε χρόνια)
Συσκευασία	< 2	Αυτοκίνητα	2-10
Νεωτερισμοί	< 1	Δίσκοι γραμμοφώνου	10
Φωτογραφικά φιλμ	< 1	Είδη ταξιδιού	10
Διαθέσιμα (είδη δεί- πνου, νοσοκομειακά υλικά)	< 1	Συσκευές	10
Φύλλα κατασκευών	2	Έπιπλα	10
Υποδήματα	2	Φωτογραφικές μηχανές	10
Ενδυμασία	4	Σύρματα και καλώδια	15
Οικιακά	5	Ηλεκτρικός εξοπλισμός	15
Παιχνίδια	5	Ανθεκτικά εργαλεία, σκεύη	15
Κοσμήματα	5	Όργανα	15
Είδη αθλητισμού	7	Μαγνητικές ταινίες	15
		Κατασκευές	25

Βέβαια για ένα συγκεκριμένο πλαστικό υλικό συσκευασίας, ο κύκλος ζωής του εξαρτάται ισχυρά από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Για παράδειγμα το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LPDE) όταν χρησιμοποιείται σαν υλικό συσκευασίας π.χ. παλετών, σε μορφή μεμβράνης, για μεταφορά και διανομή σε σούπερ μάρκετ και καταστήματα τροφίμων έχει μικρό χρόνο ζωής που δεν υπερβαίνει τους έξι μήνες. Όταν όμως χρησιμοποιείται στην παραγωγή οικιακών συσκευών και ηλεκτρονικών ο χρόνος ζωής του αυξάνεται στα δύο χρόνια. Τέλος, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μονωτικών μεμβρανών στην οικοδομή ή γενικότερα σε στεγανοποίηση, ο χρόνος ζωής του μπορεί να φτάσει τα 100 χρόνια.

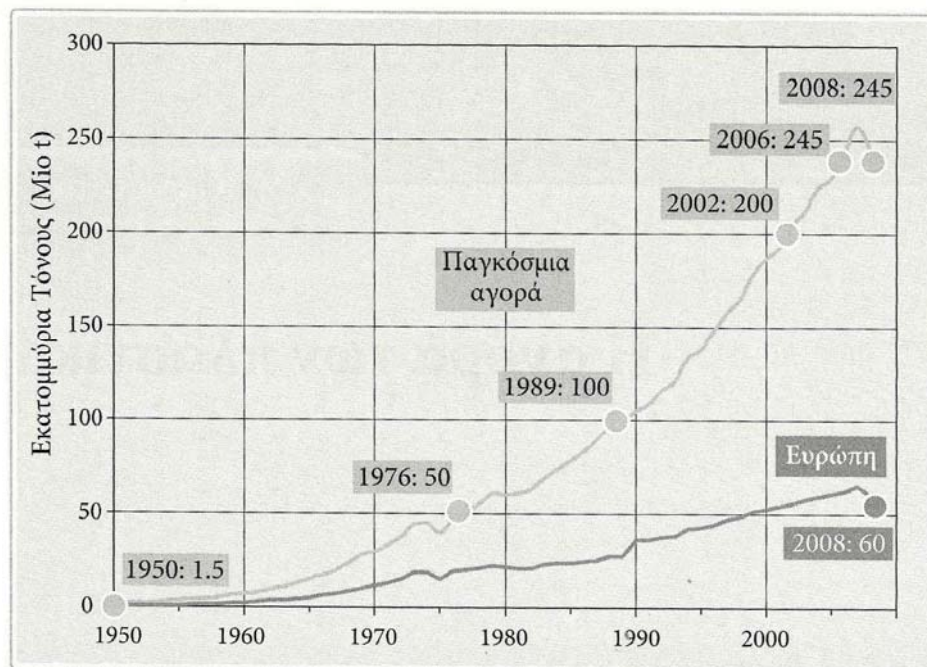
Ο χρόνος του κύκλου ζωής επηρεάζει την ποσότητα των παραγόμενων πλαστικών που θα βρεθούν στα απορρίμματα. Όπως φαίνεται στον πίνακα 1.2 προϊόντα με μέσο χρόνο ζωής έως 2 χρόνια αποτελούν το 63,5%, ενώ με μέσο χρόνο ζωής 2 έως 10 χρόνια το 25,2% των στερεών πλαστικών απορριμμάτων. Για πλαστικά προϊόντα με χρόνο ζωής από 10 έως 20 χρόνια το ποσοστό είναι 11,3% και για μέσο όρο ζωής πάνω από 20 χρόνια το ποσοστό είναι ασήμαντο.

Πίνακας 1.2 Σύσταση των πλαστικών απορριμμάτων σε σχέση με το χρόνο του κύκλου ζωής των εφαρμογών τους [2]

Μικρό (<2 έτη)	Μέσο (2-10 έτη)	Μεγάλο (10-20 έτη)	Πολύ μεγάλο (>20 έτη)
63,5%	25,2%	11,3%	Πολύ μικρό ποσοστό

1.7 Η ΑΓΟΡΑ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

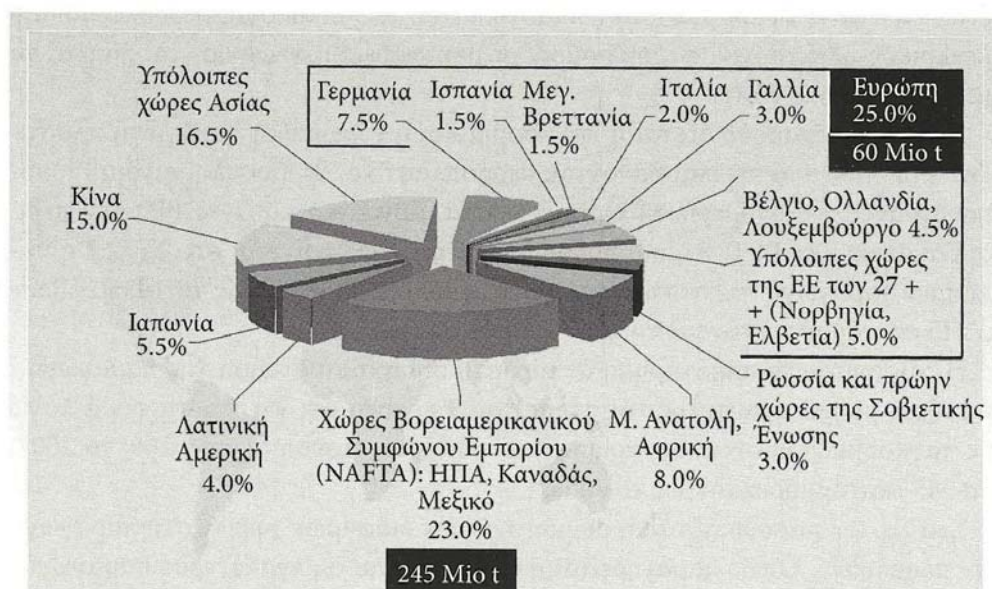
Στο σχήμα 1.7 παρουσιάζεται η παγκόσμια και η ευρωπαϊκή παραγωγή πλαστικών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η παραγωγή πλαστικών συνεχώς αυξάνεται. Η παγκόσμια παραγωγή από 1,5 εκατομμύριο τόνους το 1950 έφτασε τα 245 εκατομμύρια τόνους το 2008. Ο ετήσιος ρυθμός αύξησης είναι της τάξης του 9%. Να σημειωθεί ότι για πρώτη φορά παρουσιάστηκε πτώση από τα 260 εκατομμύρια τόνους το 2007 στα 245 εκατομμύρια τόνους το 2008 λόγω της παγκόσμιας οικονομικής κρίσης. Εάν ληφθεί υπόψη η αύξηση του γήινου πληθυσμού και η παράλληλη ανάπτυξη της Κίνας και της Ινδίας η αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης πλαστικών αναμένεται εκρηκτική.



Σχήμα 1.7 Παγκόσμια παραγωγή πλαστικών από το 1950 έως το 2010 [7].

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση Κατασκευαστών Πλαστικών (APME) το 2007 στην Ευρώπη καταναλώθηκαν εξήντα πέντε εκατομμύρια τόνοι πλαστικών που αντιστοιχούν στο 25% της παγκόσμιας παραγωγής με το κλάδο της συσκευασίας να απορροφά το 37% της κατανάλωσης πλαστικού. Στην Ελλάδα ο τομέας της βιομηχανίας πλαστικών αποτελεί μια σημαντική συνιστώσα της Εθνικής Οικονομίας με τις πωλήσεις πλαστικών προϊόντων και σωλήνων να φθάνουν το 2007 στα 1.39 δις ευρώ.

Στο σχήμα 1.8 παρουσιάζεται η συμμετοχή των διαφόρων χωρών στην παραγωγή των πλαστικών το 2008. Η Ευρώπη είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός πλαστικών με ποσοστό 25% επί της παγκόσμιας παραγωγής και ακολουθούν οι χώρες της Βορείου Αμερικής με ποσοστό 23%.



Σχήμα 1.8 Η συμμετοχή των διαφόρων χωρών στην παγκόσμια παραγωγή των πλαστικών το 2008 [7].

2. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ανακύκλωση απορριμμάτων είναι η διαδικασία με την οποία επαναχρησιμοποιείται εν μέρει ή ολικά οτιδήποτε αποτελεί έμμεσα ή άμεσα αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας και το οποίο στην μορφή που είναι δεν αποτελεί πλέον αγαθό για τον άνθρωπο. Στην διαδικασία αυτή συνήθως τα απορρίμματα μετατρέπονται σε πρώτες ύλες από τις οποίες παράγονται νέα αγαθά.

Μέρος της διαδικασίας της ανακύκλωσης είναι και η μετατροπή βλαβερών για το περιβάλλον υλικών σε λιγότερο ή και καθόλου βλαβερά. Με τον τρόπο αυτό γίνεται ομαλότερα η επανένταξή τους στο φυσικό περιβάλλον το οποίο ουσιαστικά ολοκληρώνει την διαδικασία την ανακύκλωσης με φυσικό τρόπο. Παράδειγμα μιας τέτοιας περίπτωσης είναι η μετατροπή οικιακών λυμάτων σε τέτοια μορφή ώστε να είναι λιγότερο βλαβερά σε αντίθεση με την κατευθείαν εναπόθεσή τους π.χ. στην θάλασσα.



Σχήμα 2.1 Το σύμβολο της ανακύκλωσης [6].

Στο σχήμα 2.1 φαίνεται το διεθνώς καθιερωμένο σύμβολο της ανακύκλωσης το οποίο πολλές φορές αναφέρεται και ως «κύκλος του Möbius». Βασίστηκε στην ανακάλυψη του August Ferdinand Möbius, μεγάλου μαθηματικού του 19ου αιώνα, όπου μια λωρίδα χαρτιού

διπλωμένη μια φορά και ενωμένη στις άκρες της σχηματίζει μια συνεχόμενη μονογωνική, μονόπλευρη επιφάνεια. Το σύμβολο σχεδιάστηκε ως μια ταινία του Möbius, για να συμβολίσει τη συνέχεια μέσα σε μια πεπερασμένη οντότητα.

Η ανακύκλωση δεν είναι κάτι νέο. Οι άνθρωποι αχολούνται με την ανακύκλωση εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Και όχι μόνο οι άνθρωποι. Η φύση μας έδειξε τον δρόμο με την ανακύκλωση των φυτών, δέντρων, εντόμων κ.τ.λ.

Η ιστορία της ανακύκλωσης άρχισε την εποχή του Χαλκού. Τότε έλιωναν τα μεταλλικά αντικείμενα τούς έτσι ώστε αυτά να μπορούν να παράγουν νέα προϊόντα. Η ανακύκλωση χαρτιού ξεκίνησε στη Μεγάλη Βρετανία το 1921 και εδραιώθηκε, κυρίως λόγω της μείωσης των πόρων εξαιτίας του Δεύτερου Παγκόσμιου Πολέμου. Το 1970 σε συνέδριο για την ανακύκλωση αποφάσισαν να σηματοδοτούνται με λογότυπο τα ανακυκλώσιμα προϊόντα. Τη δεκαετία του 1970 ξεκίνησε και η ανακύκλωση αλουμινίου, καταναλώνοντας μόνο το 5% της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή νέων ποσοτήτων αλουμινίου. Το 1973 η πόλη του Berkeley στη Καλιφόρνια των Η.Π.Α. ήταν από τις πρώτες πόλεις που εφάρμοσαν πρόγραμμα ανακύκλωσης εφημερίδων.

Το 1987 το απορριμματοφόρο πλοίο Mobro 4000 μετέφερε τα απορρίμματα από τη Νέα Υόρκη στη Βόρεια Καρολίνα, όπου δεν τα δέχτηκαν. Εστάλη έπειτα στην Μπελίτζ, όπου επίσης απορρίφθηκαν. Τελικά το πλοίο επέστρεψε στη Νέα Υόρκη και τα απορρίμματα αποτεφρώθηκαν. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε έντονες συζητήσεις για τη διάθεση και την ανακύκλωση των απορριμμάτων.

Ένα άλλο γεγονός που ενθάρρυνε τις προσπάθειες ανακύκλωσης σημειώθηκε το 1989, όταν στη πόλη Berkeley απαγορεύτηκε η χρήση του πολυστυρολίου σε συσκευασίες, που χρησιμοποιούσαν τα Mac Donald's για να διατηρήσουν ζεστά τα χάμπουργκερς. Μια επίδραση αυτής της απαγόρευσης ήταν να αυξηθεί η οργή της Dow Chemical, της παγκόσμιας και σημαντικότερης εταιρίας παρασκευής πολυστυρολίου, η οποία οδήγησε στην πρώτη προσπάθεια απόδειξης ότι και τα πλαστικά μπορούν να ανακυκλωθούν. Στις Η.Π.Α η βιομηχανία της ανακύκλωσης αντιπροσωπεύει σήμερα 236 δισεκατομμύρια δολάρια, 1,1 εκατομμύρια μισθωτούς και 5600 επιχειρήσεις. Ο Μπαράκ Ομπάμα καθιέρωσε την «Ημέρα της Ανακύκλωσης» στις 25 Νοεμβρίου (από το 2009).

Σήμερα η ανακύκλωση αποτελεί μια βασική έννοια της σύγχρονης διαχείρισης των αποβλήτων. Τα ανακυκλώσιμα υλικά, αποκαλούμενα επίσης "recyclables" ή "recyclates", μπορούν να προέλθουν από πολλές πηγές, συμπεριλαμβανομένων των σπιτιών, των δημόσιων υπηρεσιών και των βιομηχανιών.

Περιλαμβάνουν το γυαλί, το χαρτί, το αλουμίνιο και άλλα μέταλλα όπως ο χαλκός και ο σίδηρος, την άσφαλτο, τα κλωστοϋφαντουργικά

προϊόντα και τα πλαστικά. Οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές πρέπει να ανακυκλώνονται όχι μόνον γιατί η τοποθέτηση τους σε χώρους ταφής απορριμμάτων επιβαρύνει το περιβάλλον αλλά και γιατί βλάπτει την υγεία μας.

Τα βιοδιασπάσιμα απόβλητα, όπως τα υπολείμματα τροφίμων ή τα απόβλητα κήπων και καλλιεργείων, είναι επίσης ανακυκλώσιμα με τη βοήθεια μικροοργανισμών μέσω της λιπασματοποίησης (κομποστοποίησης) ή της αναερόβιας χώνευσης.

Για να λειτουργήσει αποδοτικά ένα πρόγραμμα ανακύκλωσης σε μία κοινωνία πρέπει να συνεργαστούν κάποιοι παράγοντες, αυτοί είναι:

- Οι καταναλωτές
- Οι οργανισμοί για την προστασία του περιβάλλοντος
- Η αρμόδια διοίκηση
- Η ανάπτυξη της τεχνολογίας

Το 2010 η Ελλάδα βρισκόταν δυστυχώς στην τελευταία θέση στην Ευρωπαϊκή Ένωση ως προς την ανακύκλωση. Ένας λόγος είναι ότι δεν υπάρχουν για τους πολίτες και τις εταιρίες κίνητρα να συμμετέχουν σε προγράμματα ανακύκλωσης.

2.2 ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Η μείωση των απορριμμάτων δεν είναι το μοναδικό όφελος από την ανακύκλωση. Πολλοί τομείς ακόμα επηρεάζονται θετικά από την ανακύκλωση.

Η ανακύκλωση έχει σαν βασική συνέπεια τη μείωση της ρύπανσης και των κινδύνων για την υγεία που συνδέονται με την υγειονομική ταφή και την αποτέφρωση. Ο χώρος ταφής ρυπαίνει μεγάλες περιοχές για αιώνες και παράγει υγρά απόβλητα, τα οποία μπορούν να μολύνουν τα υπόγεια ύδατα. Η καύση παράγει τοξική τέφρα, και εκπομπές ρυπογόνων αερίων. Η ανακύκλωση αποτρέπει ένα μεγάλο μέρος των απορριμμάτων να σταλεί στις παραπάνω μεθόδους διαχείρισης, οι οποίες είναι επικίνδυνες για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

Συγκεντρωτικά, τα οφέλη που προκύπτουν από την ανακύκλωση είναι τα παρακάτω:

- Μειώνονται τα απορρίμματα και τα προβλήματα διαχείρισής τους
- Εξοικονομούνται ενέργεια και φυσικοί πόροι, που λαμβάνονται συνεχώς από τη φύση.
- Μειώνεται η ρύπανση της ατμόσφαιρας, του εδάφους και των υπόγειων υδάτων (ελαφρύνεται, έτσι, η επιβάρυνση του περιβάλλοντος).
- Εξοικονομείται η ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή όλων των προαναφερθέντων αντικειμένων.

- Επιτυγχάνεται μακροπρόθεσμη πτώση (ή μη αύξηση) των τιμών των προϊόντων, καθώς δεν απαιτείται εκ νέου παραγωγή πρώτης ύλης.
- Σώζεται η υγεία όλων των κατοίκων του πλανήτη και διασφαλίζεται το καλύτερο μέλλον των παιδιών.
- Δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας σε τομείς θετικών ενεργειών για την διάσωση του πλανήτη.
- Δημιουργείται ευχάριστη αίσθηση και ικανοποίηση για τη συμμετοχή στην βελτίωση του περιβάλλοντος και των συνθηκών ζωής.

2.3 ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.3.1 Η Αναγκαιότητα της Ανακύκλωσης των Πλαστικών Υλικών

Τα πλαστικά υλικά αποτελούν το 9% των δημοτικών απορριμμάτων στην Ελλάδα. Το αντίστοιχο ποσοστό για την Ευρώπη είναι 7%. Η αναγκαιότητα της ανακύκλωσης των πλαστικών απορριμμάτων προβάλλει από όσα ήδη έχουν αναπτυχθεί στην προηγούμενη ενότητα γενικά για την ανακύκλωση αλλά και από την επικινδυνότητα της ελεύθερης διάδοσης των πλαστικών.

Τα πλαστικά δεν αποδομούνται στο περιβάλλον με αποτέλεσμα όπου επικάθενται να μην επιτρέπουν τη βλάστηση καθώς επίσης οι πλαστικές σακούλες που κόβονται εύκολα καταλήγουν στα στομάχια των ζώων με συνέπεια το θάνατό τους. Επίσης περιέχουν τοξικά πρόσθετα τα οποία εκπλένονται και εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα.

Έτσι, λόγω των επιπτώσεών τους αλλά και της δυνατότητας αξιοποίησής τους η ανακύκλωση των πλαστικών υλικών καθίσταται επιτακτική ανάγκη. Αν και η ανακύκλωσή είναι πολύ σημαντική διαδικασία όσον αφορά την διαχείριση των πλαστικών, υπάρχουν πολλά εμπόδια στην ολοκλήρωσή της διότι:

- Η συλλογή των πλαστικών αποβλήτων είναι δύσκολη.
- Στη διάρκεια της διαδικασίας ένα ποσοστό των απορριμμάτων παραμένει ως απόβλητο εξαιτίας των ουσιών που περιέχουν τα πλαστικά.
- Δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ανακύκλωση εάν δεν προηγηθεί διαχωρισμός των διαφορετικών ειδών πλαστικού. Τα PET, PP, PVC, PE δεν μπορούν να αναμειχθούν ώστε να παραχθεί δευτερογενής ύλη ενώ το PVC δεν πρέπει να ανακυκλωθεί.

Μετά το διαχωρισμό τους τα πλαστικά μπορούν να αξιοποιηθούν:

- για την κατασκευή προϊόντων με παραπλήσιες ιδιότητες με τα παρθένα υλικά και προϊόντων με ιδιότητες κατώτερες των παρθένων υλικών,

- ως καύσιμα για την παραγωγή θερμότητας,
- για την παραγωγή οργανικών ενώσεων, με πυρόλυση και χημική ανακύκλωση

2.3.2 Ταξινόμηση Πλαστικών Απορριμμάτων

Η κατάταξη των πλαστικών απορριμμάτων ακολουθεί τη μεθοδολογία Milgrom σύμφωνα με την οποία λαμβάνεται υπόψη η ευκολία ανακύκλωσης όπως και το σημείο στη γραμμή παραγωγής, χρήσης/κατανάλωσης και διάθεσης στο οποίο δημιουργούνται τα πλαστικά απορρίμματα. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή τα πλαστικά απορρίμματα κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Βιομηχανικά Πλαστικά Απορρίμματα.

Τα πλαστικά απορρίμματα που δημιουργούνται από διάφορους τομείς της βιομηχανίας.

2. Μετακαταναλωτικά Πλαστικά Απορρίμματα.

Τα πλαστικά απορρίμματα που προέρχονται από τον καταναλωτή.

3. Σκάρτα Πλαστικά Απορρίμματα (*Scrap Plastics, SP*).

Τα πλαστικά απορρίμματα που μπορούν να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία και να μετατραπούν σε εμπορικά αποδεκτά προϊόντα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα θερμοπλαστικά.

4. Επιβλαβή μη-Επεξεργαζόμενα Πλαστικά Απορρίμματα (*Nuisance Plastics, NP*).

Ως επιβλαβή χαρακτηρίζονται τα πλαστικά που κατά τη διάθεσή τους ή την καύση τους αποδεσμεύουν ή διασπώνται σε τοξικά προϊόντα. Γενικά θεωρούνται ως επιβλαβή τα πλαστικά απορρίμματα που δεν μπορούν να τύχουν ανακύκλωσης, σύμφωνα με τις υπάρχουσες τεχνοοικονομικές συνθήκες, με συνέπεια είτε να διατίθενται στους ΧΥΤΑ είτε να αποτεφρώνονται. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά.

Σε κάποιες νεότερες ταξινομήσεις των πλαστικών απορριμμάτων επιπλέον των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη στην κατάταξη Milgrom, λαμβάνεται υπόψη και η σύστασή τους. Σε αυτήν την περίπτωση οι κατηγορίες των πλαστικών απορριμμάτων είναι:

1. Σκάρτο Πλαστικό (*producer or home scrap*).

Αυτά που παράγονται κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής παραγωγής ή συλλέγονται όπως για παράδειγμα οι επιστρεφόμενες συσκευασίες.

2. Ανάμεικτα Πλαστικά (*Commingled Plastics*).

Μείγματα πλαστικών απορριμμάτων με γνωστή σύσταση, ουσιαστικά ελεύθερα από μη πλαστικές προσμείξεις.

3. Μετακαταναλωτικό Σκάρτο (*Post Consumer Scrap*).

Πλαστικά απορρίμματα οικιακών και βιομηχανικών/εμπορικών εφαρμογών τα οποία μπορούν να περιέχουν και μη πλαστικές προσμείξεις.

4. Επιβλαβή Πλαστικά (Nuisance Plastics).

Όσα από τα ανάμεικτα πλαστικά ή τα μετακαταναλωτικά σκάρτα δεν μπορούν να ανακυκλωθούν.

2.3.3 Κωδικοποίηση Ανακυκλώσιμων Πλαστικών

Υπάρχουν πάνω από 50 ομάδες πλαστικών με εκατοντάδες διαφορετικές ποικιλίες η κάθε μία. Το μεγάλο αυτό πλήθος κατηγοριών καθιστά δύσκολη και χρονοβόρα την διαλογή και επεξεργασία τους.

Πίνακας 2.1 Κωδικοποίηση των κύριων ανακυκλώσιμων πλαστικών [2]

Κωδικός Αριθμός Πολυμερούς	Ονομασία Πολυμερούς	Χρήσεις Πολυμερούς
 PET	Πολυτερεφθαλικός αιθυλεστέρας	Φιάλες αναψυκτικών, εδώδιμων ελαίων και πόσιμο νερού Συσκευασία έτοιμων φαγητών
 HDPE	Πολυαιθυλένιο Υψηλής πυκνότητας	Φιάλες γάλακτος, υγρών καθαρισμού, χυμών και σαμπουάν
 PVC	Πολυβινυλοχλωρίδιο	Παλαιότερα φιάλες χυμών, μεταλλικού νερού, συσκευασίες φαγητού, συσκευασίες σαμπουάν. Σήμερα σκληροί σωλήνες αποχέτευσης, επικαλύψεις καλωδίων, συνθετικά κουφώματα, εύκαμπτοι σωλήνες ποτίσματος
 LDPE	Πολυαιθυλένιο Χαμηλής πυκνότητας	Σακούλες απορριμμάτων, σακούλες σούπερ-μάρκετ
 PP	Πολυπροπυλένιο	Συσκευασίες μαργαρίνης, πόματα φιαλών, καλαμάκια, φιάλες σιροπιωδών τροφίμων. Επίσης φιλμ και ίνες
 PS	Πολυστυρόλιο	Κεσεδάκια γιαουρτιών, πλαστικά μαχαιροπήρουνα, συσκευασίες αυγών και κρέατος, παιχνίδια, πλαίσια συσκευασίας ηλεκτρονικών
 Άλλο	Όσα πολυμερή δεν ανήκουν στις κατηγορίες 1-6	Όσα πολυμερή δεν ανήκουν στις κατηγορίες 1-6, π.χ. μελαμίνη κ.λ.π.

Όλοι οι κύριοι τύποι πλαστικών που είναι ανακυκλώσιμοι χαρακτηρίστηκαν το 1980 από τον Σύνδεσμο Βιομηχανιών Πλαστικών (Society of Plastics Industry) στις ΗΠΑ με έναν κωδικό αριθμό ο οποίος περιβάλλεται από το τρίγωνο των τριών βελών του συμβόλου της ανακύκλωσης και το μονόγραμμα του πολυμερούς κάτω από το τρίγωνο (πίνακας 2.1). Με την κωδικοποίηση αυτή διευκολύνεται η ταυτοποίηση και διαλογή των κυριότερων τύπων πλαστικών.

2.3.4 Μέθοδοι Ανακύκλωσης Πλαστικών

Η πιο γενικά αποδεκτή ταξινόμηση των μεθόδων ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων περιλαμβάνει τις παρακάτω κατηγορίες:

- Πρωτογενής Ανακύκλωση: Η επεξεργασία που υφίστανται τα σκάρτα πλαστικά απορρίμματα μετατρέπόμενα σε ίδιου ή παρόμοιου τύπου πλαστικά με αυτά από τα οποία προήλθαν.
- Δευτερογενής ή Μηχανική Ανακύκλωση: Η επεξεργασία που υφίστανται τα σκάρτα πλαστικά απορρίμματα μετατρέπόμενα σε προϊόντα υποβαθμισμένων ιδιοτήτων (μηχανικών ή θερμικών) σε σχέση με αυτά από τα οποία προήλθαν.
- Τριτογενής Ανακύκλωση: Η ανάκτηση πετρελαίου και υψηλής αξίας προϊόντων δύλισης από πλαστικά απορρίμματα.
- Τεταρτογενής Ανακύκλωση: Η ανάκτηση ενέργειας από πλαστικά απορρίμματα.

Εξαιτίας όμως της συνεχώς εξελισσόμενης μεθοδολογίας κατεργασίας των πλαστικών απορριμμάτων σε συνάρτηση με τις οικονομικές και τεχνολογικές συνθήκες δεν υφίσταται πάντα σαφής διάκριση μεταξύ των επιβλαβών μη επεξεργαζόμενων πλαστικών (NP) και των επεξεργαζόμενων σκάρτων πλαστικών (SP) καθώς επίσης μεταξύ τριτογενούς και δευτερογενούς ανακύκλωσης. Παραδείγματος χάριν τα απορρίμματα των φαινολικών ρητινών που μέχρι πρότινος κατατάσσονταν στα επιβλαβή πλαστικά απορρίμματα τώρα ανακυκλώνονται και συμπεριλαμβάνονται στα σκάρτα πλαστικά απορρίμματα.

Ακόμα, η διάκριση μεταξύ πρωτογενούς και δευτερογενούς ανακύκλωσης είναι αρκετές φορές αυθαίρετη. Η ανακύκλωση φαινολικών πολυμερών θεωρείται δευτερογενής αν και πολύ συχνά χρησιμοποιείται στην παραγωγή του ίδιου προϊόντος με μικρή αλλοίωση των ιδιοτήτων.

Παρόμοια προβλήματα αντιμετωπίζονται και στη διάκριση μεταξύ τριτογενούς και τεταρτογενούς ανακύκλωσης. Μερικές εγκαταστάσεις αποτέφρωσης χρησιμοποιούν μια διαδικασία δύο βημάτων στην οποία τα απορρίμματα πρώτα πυρολύονται και στη συνέχεια τα προϊόντα της πυρόλυσης αποτεφρώνονται. Αν και σκοπός της τεταρτογενούς ανακύκλωσης είναι η ανάκτηση ενέργειας το γεγονός όμως ότι τα

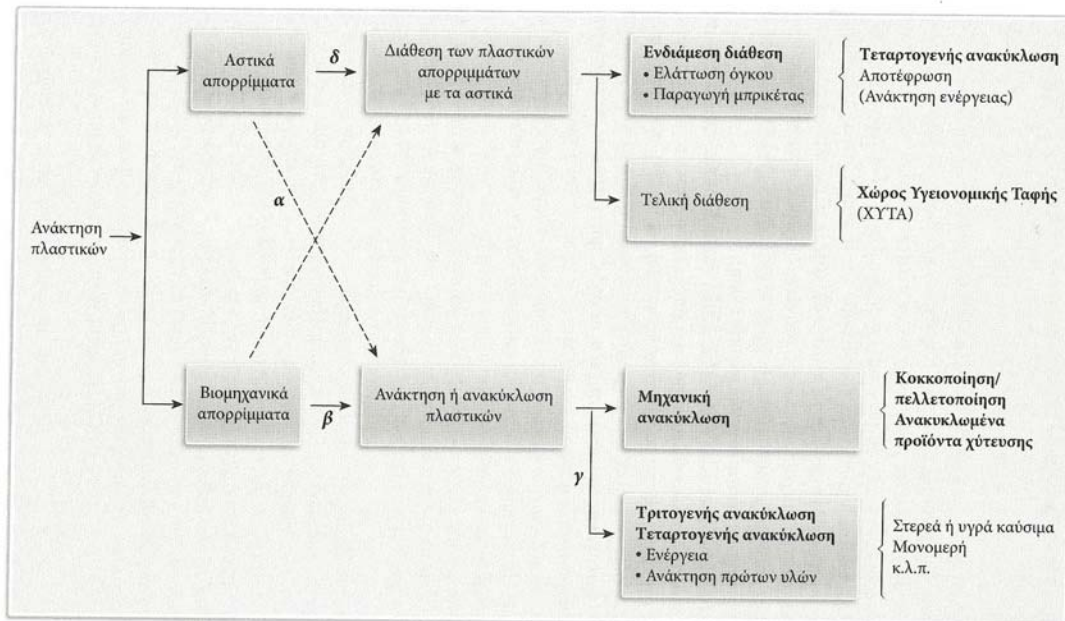
απορρίμματα μετατρέπονται πρώτα σε ένα διαφορετικό τύπο καυσίμου κατατάσσει τη διαδικασία αυτή στην κατηγορία της τριτογενούς ανακύκλωσης.

Στο σχήμα 2.2 φαίνονται οι διεργασίες παραγωγής πλαστικών υλικών καθώς και μέθοδοι ανακύκλωσης των πλαστικών απορριμμάτων. Αρχικά έχουμε τη διαδικασία παραγωγής της ρητίνης. Από το πετρέλαιο λαμβάνονται τα μονομερή τα οποία μέσω πολυμερισμού μετατρέπονται σε ρητίνες. Από τη βιομηχανία ρητίνης μέσω διαφόρων επεξεργασιών παράγεται το τελικό πλαστικό προϊόν που στέλνεται στην αγορά για κατανάλωση. Για τα πλαστικά απορρίμματα που σχηματίζονται μετά το στάδιο της κατανάλωσης, καθώς και για τα βιομηχανικά πλαστικά απορρίμματα που σχηματίζονται στα διάφορα ενδιάμεσα στάδια της παραγωγής των πλαστικών όλοι οι εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισής τους δίνονται στο σχήμα 2.2.

Ο επικρατέστερος μέχρι τώρα τρόπος διαχείρισης αλλά και με τα περισσότερα περιβαλλοντικά προβλήματα είναι η απόθεση των πλαστικών απορριμμάτων στους χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ). Αντί της ταφής όμως τα πλαστικά απορρίμματα μπορούν να υποστούν τη λεγόμενη δευτερογενή ή μηχανική ανακύκλωση. Έτσι το περιβάλλον δεν ρυπαίνεται, μειώνεται απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή πλαστικών προϊόντων σε σχέση με τα παρθένα πλαστικά και τέλος δεν επιβαρύνεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τα πλαστικά απορρίμματα για να σταλούν στη μηχανική ανακύκλωση θα πρέπει να συλλεχθούν και να υποστούν την κατάλληλη προεπεξεργασία. Μετά σε μορφή πελλετών φέρονται στο στάδιο μορφοποίησης του κύκλου των πλαστικών. Αν τα ανακτημένα πλαστικά είναι διαφορετικής φύσης (μείγμα π.χ. πολυαιθυλενίου, πολυστυρολίου και πολυβινυλοχλωριδίου) λαμβάνονται λόγω της ανάμειξης υποβαθμισμένης ποιότητας πλαστικά προϊόντα. Η διεργασία αυτή αντιστοιχεί στη δευτερογενή ανακύκλωση πλαστικών απορριμμάτων και τα ανακτημένα πλαστικά, μετά την επεξεργασία τους, αναμειγνύονται με παρθένο πολυμερές και φέρονται στο στάδιο της μορφοποίησης.

Αν όμως το ανακτημένο πλαστικό είναι ενός είδους ή επαναχρησιμοποιείται στην ίδια τη μονάδα μορφοποίησής του πράγμα που σημαίνει ότι δεν έχει επιμολυνθεί από άλλο υλικό, πλαστικό ή μη πλαστικό, η διεργασία αντιστοιχεί στην πρωτογενή ανακύκλωση. Συνήθως η πρωτογενής ανακύκλωση μέσα στην ίδια τη βιομηχανική μονάδα παραγωγής του πλαστικού προϊόντος, εάν το πλαστικό είναι επεξεργαζόμενο (π.χ. θερμοπλαστικό) και διατηρεί σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες του παρθένου υλικού.



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα ροής όπου φαίνονται οι διεργασίες παραγωγής πλαστικών προϊόντων από πρώτες ύλες όπως και οι μέθοδοι ανακύκλωσης των πλαστικών απορριμμάτων [2].

Ο τρίτος τρόπος διαχείρισης είναι η λεγόμενη τριτογενής ανακύκλωση κατά την οποία λαμβάνονται πρώτες χημικές ύλες (π.χ. με τη διεργασία της πυρόλυσης) από τις οποίες παράγονται τα μονομερή και στη συνέχεια οι αντίστοιχες ρητίνες.

Τέλος, ο τέταρτος τρόπος είναι η τεταρτογενής ανακύκλωση, δηλαδή, η χρήση των πλαστικών απορριμμάτων ως καυσίμων (καύση σε ειδικούς αποτεφρωτήρες) για την παραγωγή ενέργειας. Στους δύο τελευταίους τρόπους διαχείρισης πλαστικών απορριμμάτων χρησιμοποιούνται διαφορετικής φύσης ανακτημένα πλαστικά τα οποία δεν μπορούν να υποστούν μηχανική ανακύκλωση εξαιτίας της ανάμειξης και επιμόλυνσης με άλλες προσμείξεις οι οποίες αυξάνουν το κόστος επεξεργασίας (διαχωρισμού) ή λόγω της φύσης των πλαστικών (π.χ. θερμοσκληρυνόμενα).

2.4 ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ

Το μεγάλο ποσοστό των υλικών συσκευασίας στα οικιακά απορρίμματα (συμπεριλαμβανομένων των πλαστικών) κάνει πιο εύκολο το έργο της ανακύκλωσης. Σε όλη την Ευρώπη έχει γίνει κτήμα των πολιτών της ότι η ανακύκλωση των υλικών συσκευασίας συμβάλλει όχι μόνο στην προστασία του περιβάλλοντος αλλά ταυτόχρονα στην

εξοικονόμηση ενέργειας και πρώτων υλών. Στην κατεύθυνση αυτή συμβάλλει και η Οδηγία 94/62/ΕΚ, όπως και η αντίστοιχη του 2001, οι οποίες αφορούν όλες τις Ευρωπαϊκές χώρες σχετικά με τα απορρίμματα συσκευασίας. Με βάση αυτές τις οδηγίες θα έπρεπε οι χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέχρι το 2006 να ανακυκλώνουν το 50% του συνόλου των υλικών συσκευασίας. Η Ελλάδα, όπως η Πορτογαλία και η Ιρλανδία επειδή δυστυχώς υπολείπονταν κατά πολύ αυτού του στόχου έλαβαν παράταση εφαρμογής το 2009.

Σύμφωνα με την Οδηγία 94/62/ΕΚ η συλλογή των πλαστικών απορριμμάτων είναι μέρος της υποχρεωτικής ανακύκλωσης που τίθεται από την Οδηγία για την συσκευασία και τους Εθνικούς Νόμους που απορρέουν από αυτήν. Για το λόγο αυτό στις διάφορες χώρες της Ευρώπης συστήθηκαν Συστήματα Διαχείρισης Πλαστικών Απορριμμάτων.

Είναι ενδιαφέρον ότι οκτώ χώρες της Ευρώπης (Ολλανδία, Ελβετία, Δανία, Νορβηγία, Γερμανία, Σουηδία, Αυστρία και Βέλγιο) κάλυψαν το στόχο του 50% της ανακύκλωσης πλαστικών συσκευασίας από το 2000. Αντίθετα στην Ελλάδα ανακυκλώθηκαν το 2006, 886.000 τόνοι που αντιστοιχούν στο 20% της συνολικής παραγωγής ανακυκλώσιμων υλικών της χώρας.

Στην Ελλάδα ιδρύθηκε το 2001 η Ελληνική Εταιρεία Αξιοποίησης Ανακύκλωσης (ΕΕΑΑ ΑΕ) από βιομηχανικές και εμπορικές εταιρείες οι οποίες είναι κατασκευαστές υλικών συσκευασίας είτε διαθέτουν προϊόντα συσκευασίας στην αγορά. Η ΕΕΑΑ ΑΕ σύμφωνα με το νόμο 2939/01 και την υπ' αριθμ. 106453/20-2-2003 απόφαση ΥΠΕΧΩΔΕ οργανώνει το Σύστημα Συλλογικής Εναλλακτικής Διαχείρισης για τα απορρίμματα συσκευασίας ως απόρροια της Οδηγίας 94/62/ΕΚ η οποία υποχρεώνει τις επιχειρήσεις που διαθέτουν συσκευασμένα προϊόντα στην αγορά να μεριμνήσουν για την ανακύκλωση των συσκευασιών τους. Ταυτόχρονα ιδρύθηκαν εταιρείες ανακύκλωσης ιδιαίτερων κατηγοριών απορριμμάτων όπως η Ανακύκλωση Συσκευών ΑΕ που αφορά απόβλητα και ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

3. ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η πρωτογενής ανακύκλωση, δηλαδή, η διεργασία επεξεργασίας του σκάρτου πλαστικού αναμιγμένου με το παρθένο πολυμερές χρησιμοποιεί ομοιόμορφα πλαστικά απορρίμματα τα οποία δεν έχουν μολυνθεί με άλλα υλικά για την παραγωγή νέων πλαστικών προϊόντων. Πρωτογενή ανακύκλωση μπορούν να υποστούν όλα τα υπολείμματα που προέρχονται από την παραγωγή αλλά και τα σκάρτα ή άχρηστα πλαστικά προϊόντα τα οποία είναι εκτός προδιαγραφών. Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο σε θερμοπλαστικά διότι οι επανειλημμένες θερμάνσεις μπορεί να προκαλέσουν θερμική αποσύνθεση και να μειωθούν οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Πέραν του περιβαλλοντικού οφέλους, η πρωτογενής ανακύκλωση έχει και σημαντικό οικονομικό ενδιαφέρον.

Η διαδικασία της πρωτογενούς ανακύκλωσης απαιτεί αρχικά τον τεμαχισμό των ελαττωματικών προϊόντων και τη μετατροπή τους σε μικρά κυλινδρικά τεμάχια (pellets) για να μπορούν να αναμειχθούν με το παρθένο πολυμερές. Ο τεμαχισμός του σκάρτου πλαστικού λαμβάνει χώρα συνήθως στο χώρο παραγωγής του πλαστικού προϊόντος.

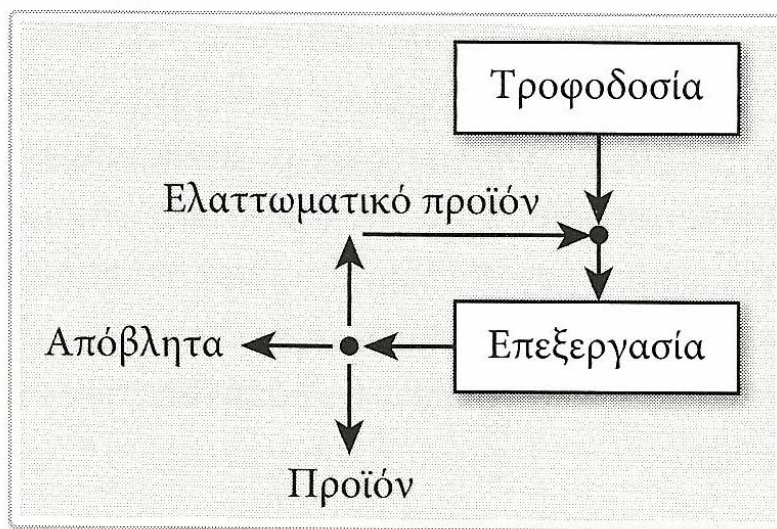
Στην πρωτογενή ανακύκλωση εμφανίζονται τα παρακάτω προβλήματα:

- Η αποδόμηση των πλαστικών λόγω θερμικής επανεπεξεργασίας έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια χαρακτηριστικών όπως η εμφάνιση και η ανθεκτικότητα σε χημικά καθώς και την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων.
- Η μόλυνση του κύριου πλαστικού προϊόντος από την πιθανή μόλυνση του σκάρτου πλαστικού.
- Η δυσκολία επεξεργασίας πλαστικών αποβλήτων τα οποία είναι ογκώδη και χαμηλής πυκνότητας όπως τα φιλμ και οι αφροί.

3. 2 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΤΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΤΕΛΙΚΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί η επίδραση της διαδοχικής προσθήκης ανακυκλωμένου πλαστικού στη σύσταση και τις ιδιότητες

του τελικού προϊόντος. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται ένα διάγραμμα ροής της πρωτογενούς ανακύκλωσης πλαστικών στο χώρο παραγωγής. Το σκάρτο πλαστικό συλλέγεται κατευθείαν σε σάκους από τη μηχανή χύτευσης με έγχυση. Διαδοχικά το περιεχόμενο του σάκου αναμειγνύεται με παρθένο πολυμερές και υφίσταται επεξεργασία. Ένα τμήμα των ελαττωματικών πλαστικών αποβάλλεται ως απόβλητο.



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα ροής προϊόντος κατά την πρωτογενή ανακύκλωση πλαστικών [2].

Μετά τον πρώτο κύκλο παραγωγής το προϊόν θα αποτελείται από πολυμερές που έχει υποστεί μία επεξεργασία και από πολυμερές που έχει υποστεί δύο επεξεργασίες (ανακυκλωμένο πολυμερές). Έτσι η σύσταση του προϊόντος μετά τον πρώτο κύκλο παραγωγής θα είναι:

$$ps = F \cdot (k + r) \quad (3.1)$$

όπου ps ο ρυθμός παραγωγής του προϊόντος (σε μονάδες μάζα/χρόνος), F η συνολική τροφοδοσία (παρθένο και ανακυκλωμένο πολυμερές σε μονάδες μάζα/χρόνος) και k , r η αναλογία του παρθένου και του ανακυκλωμένου πολυμερούς αντίστοιχα προς την ολική τροφοδοσία. Στον δεύτερο κύκλο παραγωγής η σύσταση του προϊόντος θα είναι:

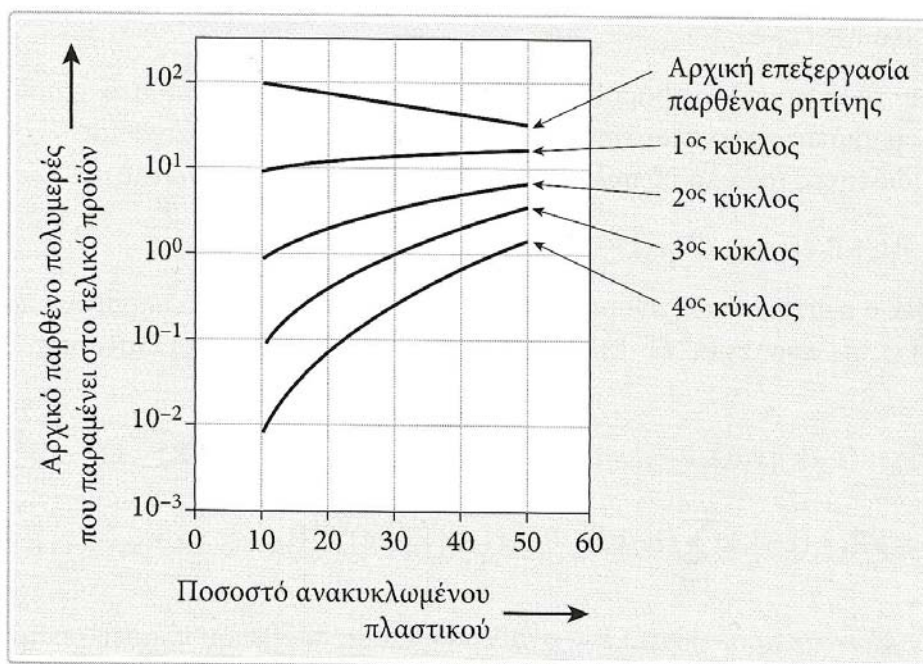
$$ps = F \cdot [k + r \cdot (k + r)] = F \cdot (k + kr + r^2) \quad (3.2)$$

όπου k , kr , r^2 είναι τα ποσοστά του υλικού που έχουν υποστεί έναν, δύο ή τρεις κύκλους επεξεργασίας αντίστοιχα.

Μετά από n κύκλους επεξεργασίας η σύσταση του προϊόντος θα δίνεται από την εξίσωση:

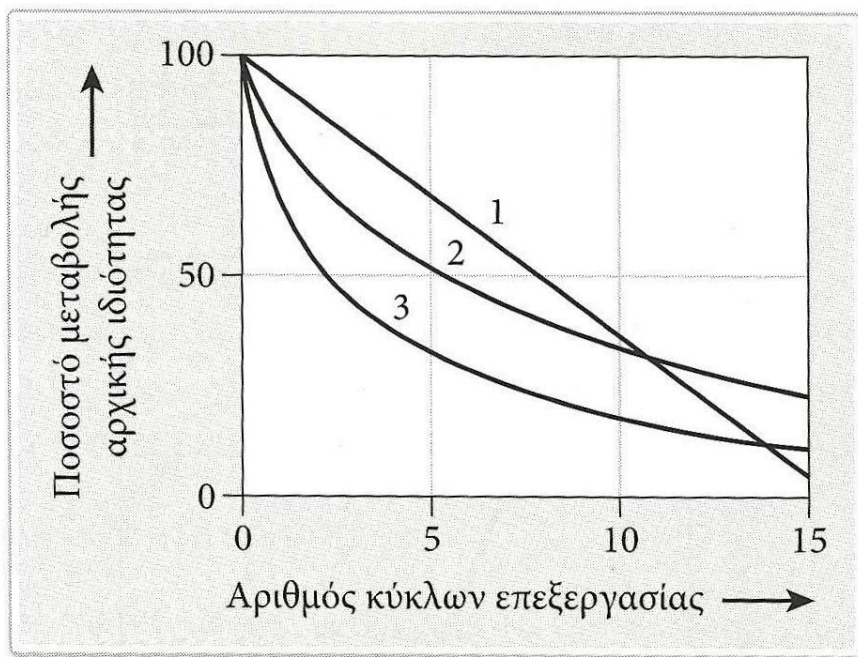
$$ps = F \cdot \left[\sum_{j=0}^{n-1} kr^j + r^n \right] \quad (3.3)$$

Στο σχήμα 3.2 φαίνεται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα το ποσοστό του αρχικού παρθένου πολυμερούς που παραμένει στο τελικό προϊόν ως συνάρτηση του ποσοστού του ανακυκλωμένου πλαστικού, r , στην τροφοδοσία και του αριθμού των κύκλων επεξεργασίας.

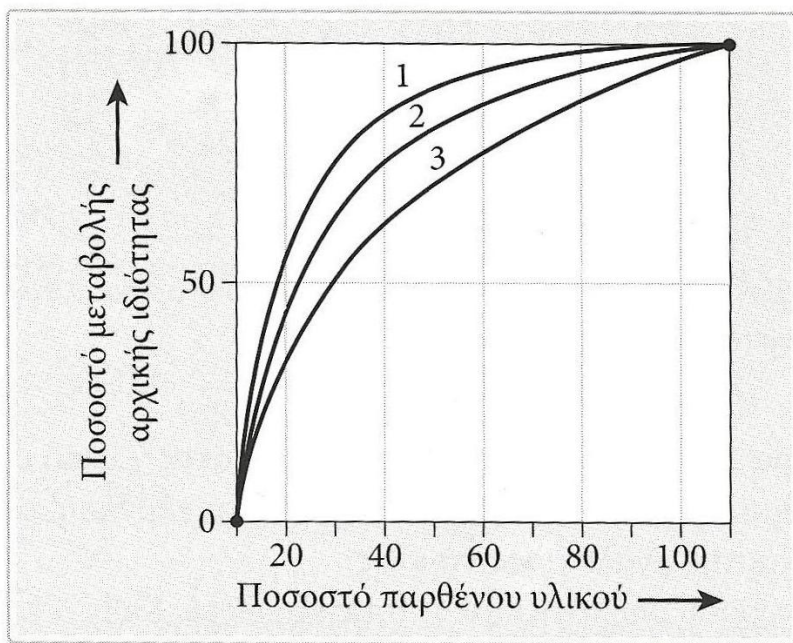


Σχήμα 3.2 Το ποσοστό του αρχικού παρθένου πολυμερούς (που έχει υποστεί n κύκλους επεξεργασίας) και παραμένει στο τελικό προϊόν συναρτήσει του ποσοστού του ανακυκλωμένου πλαστικού που χρησιμοποιείται στην τροφοδοσία και του πλήθους των κύκλων επεξεργασίας [2].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η παρουσία στο τελικό προϊόν ενός πλαστικού που έχει υποστεί επανειλημμένη θερμική επεξεργασία επηρεάζει τις ιδιότητές του. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται παραδείγματα όπου η επίδραση αυτή έχει υπολογιστεί ποσοτικά.



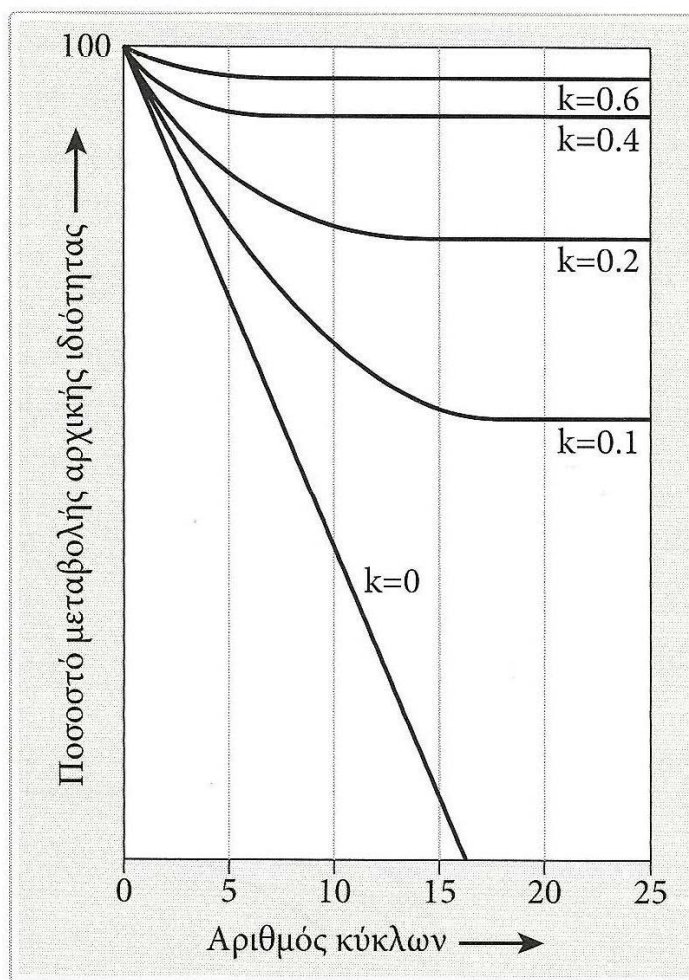
Σχήμα 3.3 Μεταβολή ιδιοτήτων συναρτήσει του αριθμού των κύκλων επεξεργασίας [2].



Σχήμα 3.4 Το ποσοστό μεταβολής της αρχική; Ιδιότητας συναρτήσει του ποσοστού του παρθένου υλικού [2].

Στο σχήμα 3.3 φαίνονται τυπικές καμπύλες μεταβολής των ιδιοτήτων του προϊόντος συναρτήσει του αριθμού των κύκλων επεξεργασίας. Καμπύλες σαν αυτές του σχήματος 3.3 λαμβάνονται σε δείγματα που έχουν υποστεί επεξεργασία και στα οποία έχουν μελετηθεί οι ιδιότητές τους πριν και μετά την προσθήκη του ανακυκλωμένου υλικού.

Με βάση τις τιμές που περιέχονται σε αυτές τις καμπύλες υπολογίζονται οι ιδιότητες των δειγμάτων σε σταθερή κατάσταση. Τα αποτελέσματα αυτού του υπολογισμού φαίνονται στο σχήμα 3.4. Στο σχήμα αυτό βλέπουμε για παράδειγμα ότι για να διατηρηθεί το 90% της αρχικής ιδιότητας (καμπύλη 3, μη γραμμική μεταβολή ιδιοτήτων) θα πρέπει μόνο το 20% του ανακυκλωμένου πλαστικού να προστεθεί ενώ στην περίπτωση γραμμικής μεταβολής (καμπύλη 1) απαιτείται 60%.

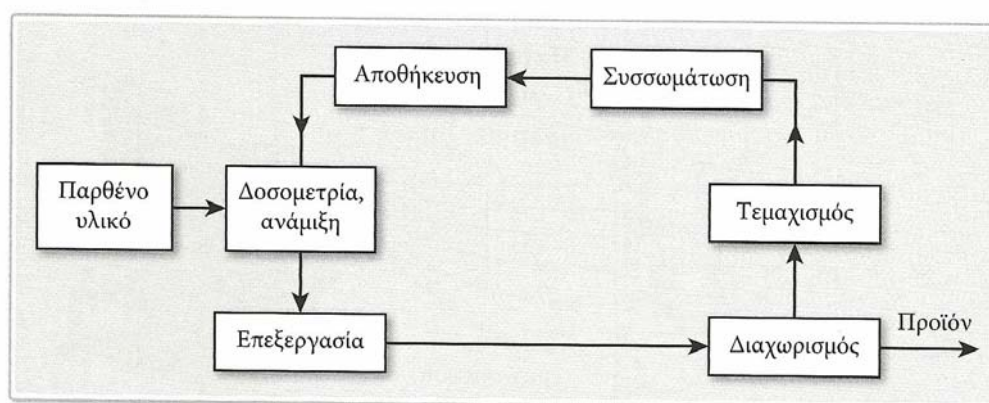


Σχήμα 3.5 Μεταβολή των ιδιοτήτων συναρτήσει του αριθμού των κύκλων και του κλάσματος του παρθένου υλικού [2].

Επίσης στο σχήμα 3.5 φαίνεται η εξάρτηση της ιδιότητας από το κλάσμα, k , του παρθένου πλαστικού στο μίγμα. Η ευθεία γραμμή ($k=0$) αντιπροσωπεύει την περίπτωση που το ποσοστό του ανακυκλωμένου είναι 100%. Με προσθήκη μόνο 10% παρθένου πλαστικού ($k=0,1$) αυξάνεται η σταθερή κατάσταση στο 54%. Αντίστοιχα το 90% και το 95% επιτυγχάνονται για $k=0,4$ και $k=0,6$ αντίστοιχα.

3.3 ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

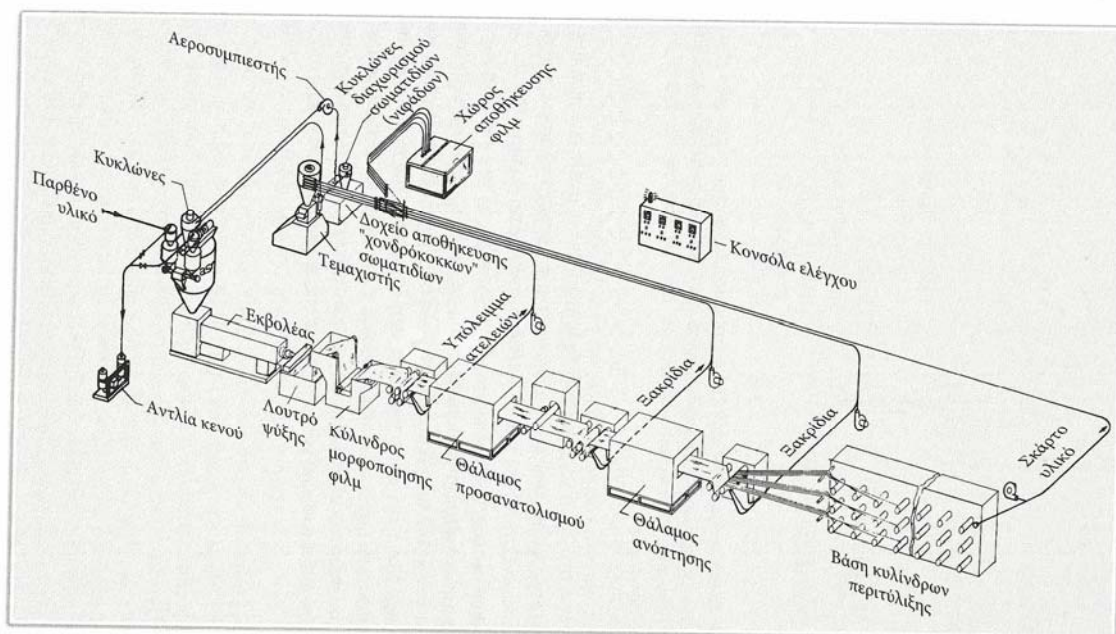
Στο σχήμα 3.6 φαίνεται το διάγραμμα ροής ενός συστήματος αυτόματης ανακύκλωσης ενσωματωμένου στη γραμμή παραγωγής. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του πλαστικού προϊόντος (εκβολέας ή μηχανή χύτευσης με έγχυση) παράγει και απορρίμματα που προέρχονται από τα ξακρίδια που σχηματίζονται στα τελειώματα της επιφάνειας του προϊόντος κατά τη μορφοποίησή του στο καλούπι. Επίσης παράγονται και τα σκάρτα πλαστικά προϊόντα που είναι ελαττωματικά ή εκτός προδιαγραφών. Τα απορρίμματα αυτά διαχωρίζονται μέσα στη μονάδα παραγωγής από το προϊόν και μεταφέρονται στον τεμαχιστή. Στη συνέχεια συλλέγονται σε ειδικά δοχεία. Από τα δοχεία αποθήκευσης μεταφέρονται στο τμήμα δοσομετρίας και ανάμιξης όπου αναμειγνύονται με παρθένο πολυμερές σε μια καθορισμένη αναλογία και στη συνέχεια το μίγμα που προκύπτει κατευθύνεται στον εξοπλισμό επεξεργασίας.



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ροής ενός συστήματος αυτόματης ανακύκλωσης πλαστικού απορρίμματος ενσωματωμένου στη γραμμή παραγωγής [2].

Στο σχήμα 3.7 φαίνεται το σύστημα αυτόματης ανακύκλωσης ενσωματωμένου στη γραμμή παραγωγής της Process Control Corporation

στο οποίο γίνεται ανακύκλωση υλικών χαμηλής πυκνότητας (φυλλόμορφες μεμβράνες).

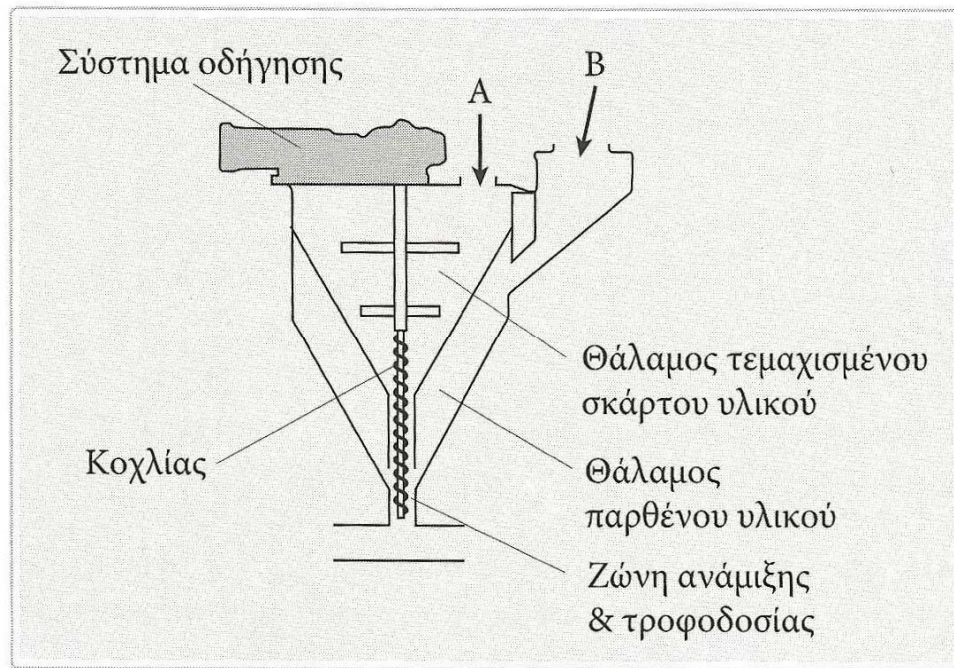


Σχήμα 3.7 Σύστημα αυτόματης ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων ενσωματωμένου στη γραμμή παραγωγής της Process Control Corporation [2].

Στην διεργασία αυτή ανακυκλώνονται άμεσα μέσα στο χώρο της παραγωγής των μεμβρανών όλα τα υπολείμματα που προέρχονται από ατέλειες της παραγωγής (ξακρίδια και σκάρτες μεμβράνες). Τα ξακρίδια ωθούνται συνεχώς με αεροσυμπιεστή από τη γραμμή παραγωγής στον τεμαχιστή. Οι άχρηστες μεμβράνες συλλέγονται σε μπομπίνες και στη συνέχεια μεταφέρονται και αυτές στον τεμαχιστή. Το τεμαχισμένο πλαστικό απόρριμμα ωθείται με αεροσυμπιεστή στο διπλό θάλαμο τροφοδοσίας της μηχανής εκβολής μέσω ενός κυκλώνα. Η διάταξη της χοάνης της τροφοδοσίας του εκβολέα (σχήμα 3.8) όπου γίνεται η ανάμιξη του παρθένου και του σκάρτου πολυμερούς φέρει ένα εσωτερικό τοίχωμα. Το σκάρτο πλαστικό τοποθετείται στον επάνω και το παρθένο πολυμερές στον κάτω θάλαμο.

Ο κοχλίας προωθεί το σκάρτο υλικό στη ζώνη ανάμιξης με τον κατάλληλο ρυθμό. Το παρθένο υλικό φέρεται στο κάτω μέρος της χοάνης υπό την επίδραση του βάρους. Η διατομή του θαλάμου είναι η κατάλληλη ώστε να εξασφαλίζεται ότι η παροχή είναι η απαιτούμενη. Μετά την ομογενοποίηση στη ζώνη ανάμιξης των δύο ρευμάτων με τη βοήθεια του κοχλίου, το μίγμα ωθείται στον εκβολέα. Πιθανή μείωση της παροχής του σκάρτου υλικού εξισορροπείται αυτόματα από την αύξηση

της παροχής του παρθένου υλικού για να μην διακοπεί η γραμμή παραγωγής.



Σχήμα 3.8 Χοάνη τροφοδοσίας εκβολέα συστήματος αυτόματης ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων ενσωματωμένου στη γραμμή παραγωγής. Ο θάλαμος A περιέχει το σκάρτο πλαστικό και ο θάλαμος B περιέχει το παρθένο πολυμερές [2].

4. ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η δευτερογενής ανακύκλωση εφαρμόζεται σε πλαστικά απορρίμματα που δεν μπορούν να υποστούν άμεση επεξεργασία, όπως κατά τη διάρκεια της πρωτογενούς ανακύκλωσης. Οι λόγοι της μη άμεσης επεξεργασίας είναι:

- Η υψηλή μόλυνση των πλαστικών απορριμμάτων με μη πλαστικά υλικά, όπως άμμο, μέταλλα κ.ά.
- Η διαφορετική φύση των ίδιων των πλαστικών απορριμμάτων έχει ως συνέπεια τη δημιουργία ενός μίγματος πλαστικών ασύμβατων μεταξύ τους και την παραγωγή προϊόντος με μειωμένες μηχανικές ιδιότητες.
- Η αδυναμία ομοιόμορφης και μη αναπαραγωγίσιμης σύστασης της τροφοδοσίας των ανακυκλωμένων πλαστικών έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή και υποβάθμιση των ιδιοτήτων των πλαστικών προϊόντων.

Τα πλαστικά παράγονται από τα πολυμερή με κατάλληλη επεξεργασία και διατίθενται στην αγορά και την κατανάλωση. Τα πολυμερή με τη σειρά τους συντίθενται από τα μονομερή. Συνεπώς τα απορρίμματα των πλαστικών προέρχονται είτε από το βιομηχανικό στάδιο της σύνθεσης και της παραγωγής τους, ως αποτέλεσμα των αστοχιών της παραγωγής και ονομάζονται βιομηχανικά απορρίμματα, είτε κατά την απόσυρση τους με τη λήξη της εφαρμογής και της λήξης τους στη αγορά και στην κατανάλωση – στο τέλος του κύκλου ζωής τους- και ονομάζονται μετακαταναλωτικά απορρίμματα.

Τα πλαστικά απορρίμματα που μπορούν να υποστούν δευτερογενή ανακύκλωση είναι:

- Μετακαταναλωτικά πλαστικά απορρίμματα τα οποία έχουν ανακτηθεί από στερεά δημοτικά απορρίμματα (ΣΔΑ). Αυτά συνίστανται από ένα σχετικά σταθερής σύστασης μίγμα ανακυκλούμενων πλαστικών με μεγάλο ποσοστό μη πλαστικών επιμολύνσεων.
- Μετακαταναλωτικά πλαστικά απορρίμματα που προέρχονται από επιστρεφόμενες συσκευασίες. Αυτές περιλαμβάνονται κυρίως στα οικιακά πλαστικά απορρίμματα. Αφορά συνήθως πλαστικά συσκευασίας, φυλλόμορφες μεμβράνες, φιάλες γάλακτος, νερού,

απορρυπαντικών και αναψυκτικών. Συνήθως αποτελούνται από ένα είδος πλαστικού με μικρή ποσότητα μη πλαστικών υλικών. Στα πλαστικά αυτά επιτυγχάνεται εύκολα η διαδικασία Συλλογής-Διαλογής στην πηγή (στο σπίτι ή σε κάδους)

- Βιομηχανικά πλαστικά απορρίμματα από ένα είδος πλαστικού που όμως έχει τέτοιο βαθμό επιμόλυνσης από άλλα μη πλαστικά υλικά, ώστε δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί στη δευτερογενή κατανάλωση. Βιομηχανικά πλαστικά απορρίμματα αυτό του είδους παράγονται στις βιομηχανίες αυτοκινήτων, επίπλων, ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών, οικοδομικές εφαρμογές και μεταφορές. Τα υλικά αυτά στο τέλος του κύκλου της ζωής τους απαντώνται ως μετακαταναλωτικά πλαστικά απορρίμματα και ως καλύτερη μέθοδος διαχείρισης τους θεωρείται η τριτογενής ανακύκλωση.
- Μίγματα βιομηχανικών πλαστικών απορριμμάτων. Είναι μίγματα βιομηχανικών πλαστικών απορριμμάτων που προέρχονται από διαφορετικές βιομηχανικές πηγές και κατά συνέπεια περιέχουν διαφορετικά πλαστικά με μικρό συνήθως ποσοστό μη πλαστικών επιμολύνσεων. Ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματά τους αποτελεί η διακύμανση της σύστασής τους με το χρόνο.

Το πρόβλημα της ανακύκλωσης των πλαστικών είναι ότι τα ρεύματα των μετακαταναλωτικών ή βιομηχανικών πλαστικών απορριμμάτων δεν διατίθενται σε «καθαρή μορφή». Είναι αναμιγμένα με άλλα υλικά όπως χαρτί, ξύλο, μέταλλα, πολυμερή άλλου είδους ή ακαθαρσίες όπως χώμα κ.α. για να ανακυκλωθούν θα πρέπει να υποστούν προ-επεξεργασία, δηλαδή τις διεργασίες διαχωρισμού-καθαρισμού με αποτέλεσμα να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα των προϊόντων.

Ο τεχνολογικός εξοπλισμός της δευτερογενούς ανακύκλωσης περιλαμβάνει είτε τον συνηθισμένο εξοπλισμό μορφοποίησης των πλαστικών με τα προβλήματα εμπλοκής που μπορεί να προκαλούνται εξαιτίας της ανομοιομορφίας των πλαστικών απορριμμάτων είτε ειδικό εξοπλισμό επεξεργασίας με μειονέκτημα το υψηλό κόστος επένδυσης.

Τα προϊόντα δευτερογενούς ανακύκλωσης δεν χαρακτηρίζονται από την ποιότητα των ιδιοτήτων τους σε σχέση με τα αρχικά πλαστικά ενώ είναι φανερό ότι για να καταστεί οικονομικά συμφέρουσα η δευτερογενής ανακύκλωση θα πρέπει η διαδικασία να έχει το χαρακτήρα της μαζικής παραγωγής.

4.2 ΣΤΑΔΙΑ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΟΥΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Για να καταστούν τα πλαστικά απορρίμματα κατάλληλα για μορφοποίηση απαιτείται μια σειρά διεργασιών. Έτσι η μηχανική ή δευτερογενής ανακύκλωση για να είναι υψηλής απόδοσης θα πρέπει να ακολουθηθούν με ακρίβεια τα διάφορα στάδια επεξεργασίας έτσι ώστε τα διάφορα κλάσματα να είναι καθαρά και κατάλληλου μεγέθους για την ανάμιξη με το παρθένο υλικό. Όπως ήδη έχει αναφερθεί και στην πρωτογενή ανακύκλωση απαιτείται επεξεργασία του σκάρτου πλαστικού πριν την επαναχρησιμοποίηση του, όπως τεμαχισμός (μείωση μεγέθους) του σκάρτου πλαστικού. Επίσης οι μέθοδοι για ανάκτηση θερμότητας και ενέργειας (τριτογενής και τεταρτογενής ανακύκλωση) απαιτούν επίσης τα πλαστικά απόβλητα να έχουν καθαριστεί και να έχουν υποστεί διάφορα στάδια διαχωρισμού.

Τα διάφορα στάδια δευτερογενούς ανακύκλωσης (Σχήμα 4.1) είναι τα εξής:

A. Συλλογή

B. Διαλογή - Ανάκτηση

Γ. Προ-επεξεργασία (διαχωρισμός/καθαρισμός)

Δ. Ομογενοποίηση

E. Βελτίωση ιδιοτήτων

ΣΤ. Έρευνα αγοράς - Σχεδιασμός - Προώθηση (Marketing)

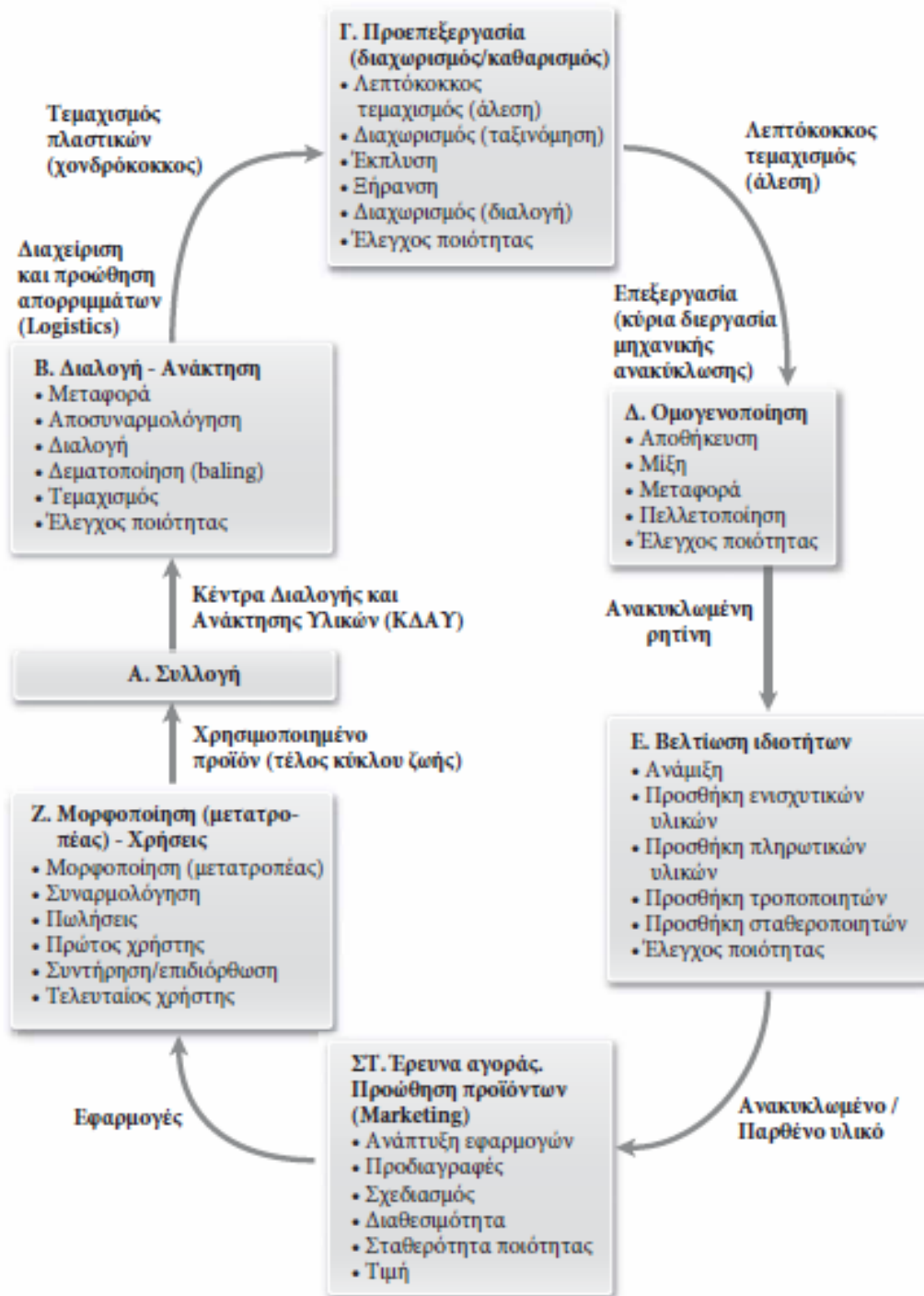
Z. Μορφοποίηση (μετατροπέας) – Χρήσεις

Τα πλαστικά απορρίμματα ανάλογα με το σύστημα Συλλογής είτε ως ανεξάρτητο ρεύμα (π.χ. επιστρεφόμενες φιάλες) είτε μαζί με τα άλλα ανακυκλώσιμα υλικά (χαρτί, μέταλλο, γυαλί) φέρονται στα Κέντρα Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών (ΚΔΑΥ), όπου λαμβάνει χώρα η Διαλογή και Ανάκτηση των πλαστικών.

Εάν τα πλαστικά φέρονται στα ΚΔΑΥ ως ανεξάρτητο ρεύμα πολλών πλαστικών, διαχωρίζονται ανά είδος πολυμερούς ή παραμένουν ως ρεύμα πλαστικών πολλών ειδών. Εάν, όμως, συλλέγονται μαζί με τα άλλα ανακυκλώσιμα υλικά τότε διαχωρίζονται από αυτά ως ρεύμα πλαστικών. Το τελευταίο ακολουθεί την πορεία του ανεξάρτητου ρεύματος πλαστικών που προαναφέρθηκε. Τέλος τα διαμορφούμενα ρεύματα πλαστικών συμπιέζονται, δεματοποιούνται σε μπάλες και προωθούνται στο στάδιο Προ-επεξεργασίας δηλαδή διαχωρισμού/καθαρισμού.

Στο στάδιο της Προ-επεξεργασίας τα πλαστικά απορρίμματα υφίστανται διαχωρισμό στα συστατικά τους (ανά είδος πολυμερούς), εάν πρόκειται για μίγμα, καθώς και καθαρισμό (διαχωρισμό) του κάθε ρεύματος πλαστικών από τις προσμίξεις τους, όπως χώμα, χαρτί (π.χ. ετικέτες), μέταλλα (π.χ. καπάκια) κ.τ.λ. Πριν το διαχωρισμό γίνεται

λεπτόκοκκος τεμαχισμός (μείωση του μεγέθους) των πλαστικών απορριμμάτων.



Σχήμα 4.1 Στάδια δευτερογενούς ανακύκλωσης βάσει της ανάλυσης Burgdorf [2].

Το καθαρισμένο ρεύμα σκάρτου πλαστικού στη συνέχεια μετατρέπεται στη κατάλληλη μορφή (πελλέτες) ώστε να τροφοδοτήσει τη μηχανή μορφοποίησης. Για το σκοπό αυτό προωθείται σε εκβολέα και επαναπλαστικοποιείται με ομογενοποίηση σε κατάσταση τήγματος. Ο εκβολέας φέρει νηματοειδή μήτρα, διαμέσου της οποίας εξαναγκάζεται να διέλθει το τήγμα του πλαστικού, και εφόσον το νηματοειδές τήγμα ψυχθεί σε λουτρό οδηγείται σε στερεά μορφή στον πελλετοποιητή. Για την αναβάθμιση της ποιότητας του τελικού προϊόντος θα πρέπει στη χοάνη του εκβολέα να προστεθούν διάφορα πρόσθετα, όπως πλαστικοποιητές και σταθεροποιητές. Η προσθήκη των πρόσθετων δηλ. η βελτίωση των ιδιοτήτων των πλαστικών μπορεί να συμβεί σε επόμενο στάδιο, κατά την ανάμιξη με το παρθένο πολυμερές.

Στη συνέχεια το μίγμα ανακυκλωμένης/παρθένας ρητίνης οδηγείται στη μηχανή μορφοποίησης για τη παραγωγή του τελικού προϊόντος και τη διάθεση του σε χρήση, εφόσον προηγηθεί ο σχεδιασμός του, δηλαδή το στάδιο του marketing.

4.3 ΣΥΛΛΟΓΗ

Η συλλογή των πλαστικών απορριμμάτων, αφορά τόσο τα βιομηχανικά πλαστικά απορρίμματα (όταν δεν μπορεί να γίνει πρωτογενής ανακύκλωση) όσο και τα μετακαταναλωτικά πλαστικά απορρίμματα. Τα βιομηχανικά συλλέγονται στους χώρους παραγωγής και φέρονται στα ΚΔΑΥ. Από τα μετακαταναλωτικά πλαστικά το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ανάκτηση των πλαστικών συσκευασίας που συναντώνται στα στερεά δημοτικά απορρίμματα (ΣΔΑ) και συγκεκριμένα τα οικιακά. Επίσης, δύο ειδικές κατηγορίες με ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι τα γεωργικά και τα οικοδομικά πλαστικά απορρίμματα.

4.3.1 Συστήματα συλλογής οικιακών απορριμμάτων

Η συλλογή των οικιακών πλαστικών απορριμμάτων γίνεται με τους εξής τρόπους:

A) Κεντρικοί κάδοι στις γειτονιές. Η τοποθεσία των κάδων πρέπει να γίνεται σε εύκολα και συχνά προσβάσιμες τοποθεσίες από τους κατοίκους, όπως μεγάλα πολυκαταστήματα, πολιτιστικοί χώροι, χώροι αναψυχής κ.α. Η σωστή τοποθεσία των κάδων είναι σημαντική έτσι ώστε να επιτύχουμε υψηλούς ρυθμούς συλλογής και να αποφύγουμε την υποβάθμισή τους. Ο σχεδιασμός των κάδων πρέπει να περιλαμβάνει μια ξεκάθαρη ένδειξη, αν είναι απαραίτητο και εικονόγραμμα, για τα αποδεκτά υλικά. Πρέπει επίσης να αποφευχθεί η εναπόθεση μη επιθυμητών υλικών.

Β) Τα ανακυκλώσιμα απορρίμματα διαχωρίζονται από τα μη ανακυκλώσιμα από τον καταναλωτή. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά με την ονομασία ‘kerbside collection schemes’ (‘συστήματα περισυλλογής από το δρόμο’). Μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο μεθόδους:

- Boundary ή Home Collection (Ενοριακή ή Οικιακή συλλογή). Σε κάθε σπίτι παρέχεται από το Δήμο είτε ένας άκαμπος περιέκτης 50 lt, είτε πλαστικές τσάντες με κωδικό χρώμα. Στη δεύτερη περίπτωση τα προς ανακύκλωση υλικά τοποθετούνται από τους καταναλωτές, στη συνέχεια, σε κάδους της γειτονιάς, οι οποίοι εκφορτώνονται από ειδικό οχήματα. Ένας προκαταρκτικός διαχωρισμός των υλικών στα είδη τους (γυαλί, χαρτί, πλαστικά κ.τ.λ.) γίνεται στο όχημα συλλογής, ενώ για να εξασφαλιστεί ο μέγιστος ικανοποιητικός βαθμός διαχωρισμού, ακολουθεί και νέος διαχωρισμός εντός των εγκαταστάσεων διαλογής.
- Integrated Collection (Ολοκληρωμένη συλλογή): Εφαρμόζεται συνήθως με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος περιλαμβάνει δυο οικιακούς κάδους, ένας για τα ανακυκλώσιμα και ένας για τα μη ανακυκλώσιμα υλικά, ενώ η συλλογή γίνεται ξεχωριστά, π.χ. κατά εναλλασσόμενες εβδομάδες. Η διαλογή ανά είδος υλικού γίνεται στο όχημα, απαιτείται όμως σχολαστικότερη διαλογή σε σχέση με αυτής της ενοριακής συλλογής. Μερικοί από τους κάδους μπορεί να έχουν στο εσωτερικό τους χωρίσματα ώστε να γίνεται ένας πρώτος χονδρικός διαχωρισμός. Ο δεύτερος τρόπος απαιτεί από τα νοικοκυριά να χωρίσουν τα ανακυκλώσιμα από τα μη ανακυκλώσιμα σε σακούλες διαφορετικού τύπου. Η συλλογή γίνεται την ίδια βδομάδα και για τα δύο είδη υλικών, χρησιμοποιώντας ένα όχημα χωρισμένο σε δύο διαμερίσματα.

Γ) Κεντρικά container parks χρησιμοποιούνται συνήθως για την συλλογή ογκωδέστερων αντικειμένων όπως έπιπλα, σωλήνες, παράθυρα κ.ά. Υπάρχει ξεχωριστό κιβώτιο για τα πλαστικά. Για μερικά πολυμερή όπου η καθαρότητα του υλικού είναι σημαντική, μπορεί να υπάρχει ξεχωριστό κιβώτιο. Τα Container parks μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προσωρινοί ή μόνιμοι χώροι συλλογής.

Δ) Μηχανικοί κάδοι απόρριψης συγκεκριμένων πλαστικών συσκευασιών (μπουκαλιών συνήθως) έξω από τα πολυκαταστήματα. Τέτοια συστήματα δέχονται και συνθλίβουν τα υλικά επιστρέφοντας το παράβολο (deposit) για κάθε κομμάτι. Η μέθοδος αυτή βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στην Ιταλία.

Ο στόχος των συστημάτων συλλογής είναι να συλλέγουν, με λογικό κόστος υλικά καλής ποιότητας. Εάν η συλλογή γίνεται για πολλά είδη πλαστικών μαζί, τότε οι συλλεγόμενες ποσότητες θα είναι μεγαλύτερες από ότι θα ήταν για ένα είδος. Το σύστημα συλλογής

πολλών ειδών μαζί, έχει μεγαλύτερο ρυθμό συλλογής και χάρη σε αυτό μικρότερο κόστος. Παρόλα αυτά μπορεί να έχουμε χαμηλή ποιότητα του λαμβανόμενου προϊόντος, αύξηση του κόστους επεξεργασίας ή ακόμα και έλλειψη ενδιαφερομένων για την αγορά του προϊόντος. Αυτό σε αντίθεση με τη συλλογή ενός μόνο πολυμερούς, οπότε έχουμε χαμηλό ρυθμό συλλογής και υψηλότερο κόστος διάθεσης, αλλά η ποιότητα του προϊόντος και το κόστος επεξεργασίας είναι σε επιθυμητά επίπεδα.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του 'kerbside collection schemes' σε σχέση με τους κάδους στις γειτονιές, εκτός από το μεγαλύτερο ρυθμό συλλογής είναι ότι επιτρέπεται ο οπτικός έλεγχος ποιότητας των συλλεχθέντων απορριμμάτων από τις ομάδες αποκομιδής. Σε περίπτωση που τα απορρίμματα δεν είναι καλά ταξινομημένα, η συλλογή μπορεί να απορριφθεί, τοποθετώντας μια αυτοκόλλητη ετικέτα στον κάδο εξηγώντας τους λόγους για τους οποίους απορρίφθηκε. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνονται οι απαιτήσεις ως προς τα ανακυκλώσιμα υλικά και δημιουργείται στους πολίτες μεγαλύτερο αίσθημα ευθύνης ως προς τα απορρίμματά τους.

Η συλλογή και επεξεργασία των οικιακών απορριμμάτων εμφανίζει τη μεγαλύτερη δυσκολία, όχι μόνο γιατί περιέχει μια ευρεία ποικιλία διαφορετικών ειδών, αλλά και εξαιτίας της χαμηλής πυκνότητας των πλαστικών. Πρέπει, δηλαδή, να συλλεχθεί ένας μεγάλος όγκος πλαστικών αποβλήτων για να επιτύχουμε μια ικανοποιητική μάζα υλικών. Το ποσοστό των πλαστικών στα δημοτικά απόβλητα των διαφόρων Ευρωπαϊκών χωρών κυμαίνεται από περίπου 8% έως περίπου 15%. Τα δημοτικά απόβλητα περιλαμβάνουν τα οικιακά απόβλητα καθώς και απόβλητα που προέρχονται από μικρά καταστήματα, λιανοπωλητές, καφετέριες, εστιατόρια και ξενοδοχεία.

Τα τρία κύρια πολυμερή που παρουσιάζονται στα οικιακά απόβλητα είναι τα LDPE, PP και HDPE και αποτελούν το 60% των οικιακών πλαστικών απορριμμάτων, ενώ τα κύρια έξι θερμοπλαστικά αποτελούν το 90% του συνόλου.

Περίπου το 70% των οικιακών απορριμμάτων που απορρίπτονται αφορά τη συσκευασία. Αυτά μπορούν να ταξινομηθούν στα άκαμπτα πλαστικά, όπως μπουκάλια και φιλμ, και στα εύκαμπτα, όπως τσάντες και περίβλημα συσκευασίας. Παρόλο τον αυξημένο ρυθμό διάθεσης αυτών των υλικών, πολλά από αυτά δεν είναι κατάλληλα, διαθέσιμα σε ικανοποιητικές ποσότητες ή εφικτά για τη συλλογή και ανακύκλωση τους, αν και αυτό εξαρτάται πάντα από τη μέθοδο ανακύκλωσης που υιοθετείται.

Πλαστικά που χρησιμοποιούνται για τη συσκευασία πετρελαίου, διαλυτών ή φυτοφαρμάκων μπορεί να είναι ακατάλληλα για ανακύκλωση εξαιτίας της δυσκολίας απομάκρυνσης υπολειμμάτων αυτών των προϊόντων. Επίσης το χρώμα ή οι οσμές των πλαστικών απορριμμάτων,

μπορούν να επηρεάσουν το κόστος του συσκευασμένου προϊόντος. Τέλος το κόστος συλλογής του φίλμ (βάρος/όγκος), καθώς επίσης η μειωμένη καθαρότητά του, μειώνουν την ελκυστικότητα ως προς τη συλλογή του από 'βρώμικες' οικιακές πηγές. Ωστόσο, τα παραδείγματα δείχνουν ότι είναι δυνατόν να απομονωθούν συγκεκριμένα ομοιογενή και καθαρά ρεύματα πλαστικών τα οποία είναι κατάλληλα για ανακύκλωση, όπως είναι τα μπουκάλια από PET και HDPE.

Τα σημαντικότερα εμπόδια που παρουσιάζονται στην ανακύκλωση των οικιακών απορριμμάτων είναι τα εξής:

- Υψηλή διασπορά του υλικού
- Ενδεχομένως βαριές επιμολύνσεις
- Διαφορετικά χρώματα και πιθανές αγορές
- Απαγορεύσεις της ανακύκλωσης κλειστού κυκλώματος (closed loop)

4.3.2 Συστήματα συλλογής βιομηχανικών και εμπορικών απορριμμάτων

Τα πλαστικά απορρίμματα που προέρχονται από εμπορικούς τομείς, μικρές βιομηχανίες και επιχειρήσεις περιέχουν κατά ένα μεγάλο ποσοστό απόβλητα συσκευασίας. Τα πιο κοινά από αυτά είναι:

- (Θερμο)συστελλόμενο Φίλμ
- Εμπορευματοκιβώτια
- Μεγάλες σακούλες
- Παλέτες
- Κλούβες
- Διογκωμένο πολυστυρένιο

Πολλά από τα παραπάνω, όπως οι παλέτες και οι κλούβες επαναχρησιμοποιούνται. Σαν αποτέλεσμα αυτού, το ετήσιο ποσοστό πλαστικών που είναι διαθέσιμο για συλλογή είναι πολύ μικρότερο από αυτό των οικιακών απορριμμάτων.

Η συσκευασία αντιπροσωπεύει ποσοστό μεγαλύτερο του 80% των συλλεχθέντων πλαστικών απορριμμάτων που παράγονται από αυτούς τους τομείς. Για τη συσκευασία, ο ευρωπαϊκός μέσος όρος είναι 8,7 kg ανά κάτοικο το χρόνο, με μεγάλη απόκλιση ανάμεσα στις χώρες. Η Ολλανδία είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός απορριμμάτων αυτής της κατηγορίας με 12,9 kg ανά κάτοικο το χρόνο, ενώ η Φινλανδία παράγει 4,9 kg ανά κάτοικο το χρόνο. Και σε αυτήν την περίπτωση τα πιο κοινά πολυμερή που χρησιμοποιούνται για τη συσκευασία είναι το HDPE και το LDPE.

Η συλλογή αυτών των απορριμμάτων έχει συνήθως καλύτερα αποτελέσματα, απ'ότι η συλλογή οικιακών απορριμμάτων. Υπάρχουν δύο κυρίως λόγοι. Πρώτον τα απορρίμματα συγκεντρώνονται σε λιγότερες τοποθεσίες από ότι τα οικιακά που είναι γεωγραφικά

διάσπαρτα. Δεύτερον, τα απορρίμματα από τις βιομηχανίες είναι πιο καθαρά και ευκολότερα αναγνωρίσιμα. Ωστόσο σε μερικούς επαγγελματικούς τομείς, όπως ο γεωργικός και ο κατασκευαστικός, παράγονται ποσότητες φίλμ προς ανακύκλωση με επιμολυντές, όπως χώμα ή υγρασία.

Οι επαγγελματικοί τομείς χρησιμοποιούν συνήθως τις υπηρεσίες των ιδιωτικών συλλεκτών, οι οποίες καθιερώνουν τις μορφές συλλογής, τα ποιοτικά κριτήρια και την τιμή. Υπάρχουν ωστόσο και περιπτώσεις όπου οι τοπικές και περιφερειακές αρχές οργανώνουν τη συλλογή, χρησιμοποιώντας τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις και την δημόσια υποδομή.

4.3.3 Συστήματα συλλογής γεωργικών απορριμμάτων

Η χρήση των πλαστικών στην γεωργία έχει αυξηθεί εντυπωσιακά τα τελευταία χρόνια. Έχει αντικαταστήσει το γυαλί στα θερμοκήπια και έχει γίνει το υλικό για την συσκευασία. Χρησιμοποιείται ευρέως για την συντήρηση των ζωοτροφών και σε διάφορες γεωργικές εφαρμογές όπως επικάλυψη της συγκομιδής αλλά και του εδάφους.

Αν και τα πλαστικά στη γεωργία αποτελούν μόλις το 2,5% της κατανάλωσης πλαστικών, το 2002 αντιπροσώπευαν στην Ευρώπη 953.000 τόνους. Τα πλαστικά για άρδευση και συστήματα ξήρανσης, παρέχουν αποτελεσματικές λύσεις στην ανάπτυξη της σοδειάς. Η αύξηση των πλαστικών σε αυτό τον τομέα μεταξύ 2000 και 2002 ήταν 3%. Τα πιο κοινά πλαστικά απορρίμματα προερχόμενα από τη γεωργία είναι :

- Φίλμ χορταριού: Είναι το μέσο για τη συντήρηση της ζωοτροφής. Είναι συνήθως από πολυαιθυλένιο, ενώ η επιμόλυνση τους υπολογίζεται στο 50% του συνολικού βάρους.
- Φίλμ θερμοκηπίων: Αντικατέστησαν το γυαλί γιατί είναι φθηνότερα και πιο εύκολα στην εγκατάσταση και απομάκρυνσή τους. Η δυσκολία στην ανακύκλωση αυτών έγκειται στο γεγονός της υποβάθμισής τους από την UV ακτινοβολία και από την παρουσία υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων, υγρασίας και ρύπων.
- Παλέτες: Είναι συνήθως από HDPE. Μπορούν εύκολα να επαναχρησιμοποιηθούν και να ανακυκλωθούν.
- Φίλμ προστασίας και επικάλυψης συγκομιδών: Αυτά τα φίλμ είναι σε επαφή με το έδαφος και δεδομένου ότι είναι συνήθως λεπτά, η επιμόλυνση τους είναι αυξημένη και η ανακύκλωση δύσκολη. Η επιμόλυνση μπορεί να φθάσει το 80% τους βάρους, με το χώμα, τους ρύπους και την υγρασία να είναι οι κύριοι μολυσματικοί παράγοντες.
- Τσάντες: Στην γεωργία οι πλαστικές τσάντες χρησιμοποιούνται για τη συσκευασία του λιπάσματος, της τροφής και των σπόρων. Μπορεί να είναι και αυτές μολυσμένες με χημικά, πρόσθετα κ.ά.

- Κυλινδρικά δοχεία - Κάδοι: Δοχεία που περιείχαν αγροχημικά και ζωικά φάρμακα δεν ανακυκλώνονται, αλλά οδηγούνται προς καύση με ενεργειακή ανάκτηση. Δοχεία που δεν περιείχαν επικίνδυνα προϊόντα μπορούν να ανακυκλωθούν μηχανικά.

Τα σημαντικότερα εμπόδια στην ανακύκλωση αγροτικών απορριμμάτων είναι τα εξής:

- Υποβάθμιση από τη υπεριώδη (UV) ακτινοβολία (αλλαγή φυσικών και χημικών ιδιοτήτων).
- Αυξημένα επίπεδα επιμολύνσεων, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους επεξεργασίας.
- Χαμηλή πυκνότητα (30-50 kg/m³)
- Ευρεία γεωγραφική διασπορά του αποθέματος

Τα γεωργικά πλαστικά απορρίμματα έχουν κοινά χαρακτηριστικά με τα εμπορικά-βιομηχανικά. Οι πηγές αυτών είναι συγκεκριμένες, οπότε δεν είναι γεωγραφικά διάσπαρτες και είναι καθαρότερα και με υψηλότερη αξία από τα οικιακά απορρίμματα. Ωστόσο ο γεωργικός τομέας παράγει φιλμ προς ανακύκλωση, το οποίο μπορεί να μολυνθεί με χώμα, υγρασία κ.ά. και τα εμπορευματοκιβώτια να είναι μολυσμένα με επικίνδυνες ουσίες, όπως ζιζανιοκτόνα, εντομοκτόνα, λιπάσματα, γεγονός που περιορίζει την δυνατότητα ανακύκλωσης αυτών.

4.3.4 Πλαστικά απορρίμματα οικοδομής

Στον τομέα αυτό καταναλώνονται πάνω από 7 Mt πλαστικών, αποτελώντας το 17,6% της συνολικής κατανάλωσης πλαστικών στην Δυτική Ευρώπη.

Τα απόβλητα οικοδομών μπορούν να ταξινομηθούν σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες, που εξαρτάται από την προέλευσή τους:

- Κατεστραμμένα υλικά (π.χ. σωληνώσεις, μονώσεις, παράθυρα κ.τ.λ.)
- Επιπρόσθετα υλικά (π.χ. στεγανωτικές ουσίες, χρώματα κ.τ.λ.)
- Ενδιάμεσα και πρόδρομα προϊόντα (π.χ. πετρελαιοειδή απόβλητα)
- Απόβλητα Συσκευασίας

Τα απόβλητα συσκευασίας από οικοδομές και κατεδαφίσεις υπολογίζονται στο 2%, ενώ περίπου το 10% των αποβλήτων αυτών αποτελούνται από PP και PE.

Τα περισσότερα από τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται στην οικοδομή, είναι για μακροπρόθεσμες εφαρμογές (π.χ. κουφώματα και πλαίσια παραθύρων, σωλήνες, μονωτικός αφρός, ηλεκτρικά καλώδια κ.ά.). Παραδείγματος χάριν η διάρκεια ζωής αντικειμένων από PVC (όπως σωλήνες και πλαίσια παραθύρων) υπολογίζεται στα 50 έτη και πάνω. Η επιλεκτική συλλογή αποβλήτων από κατεδάφιση είναι περίπλοκη και δαπανηρή. Εντός της Ε.Ε. οι ποσότητες αυτού του είδους αποβλήτων, ποικίλλουν από 189 kg ανά κάτοικο το χρόνο στη Σουηδία

(όπου τα ξύλινα οικοδομήματα είναι συνηθισμένα) σε 720 kg ανά κάτοικο το χρόνο στη Γερμανία.

Τα σημαντικότερα εμπόδια στην ανακύκλωση απορριμμάτων από οικοδομές και κατεδαφίσεις είναι τα εξής:

- Χαμηλό κόστος για την ταφή αυτών και περιορισμένοι έλεγχοι (έλλειψη οικονομικών κίνητρων-ανεπαρκής νομοθεσία).
- Απαιτούμενος χρόνος για τον επιτόπιο διαχωρισμό των υλικών.
- Κόστος συλλογής και μεταφοράς των υλικών.
- Επιμολύνσεις υλικών.

4.4 ΔΙΑΛΟΓΗ-ΑΝΑΚΤΗΣΗ

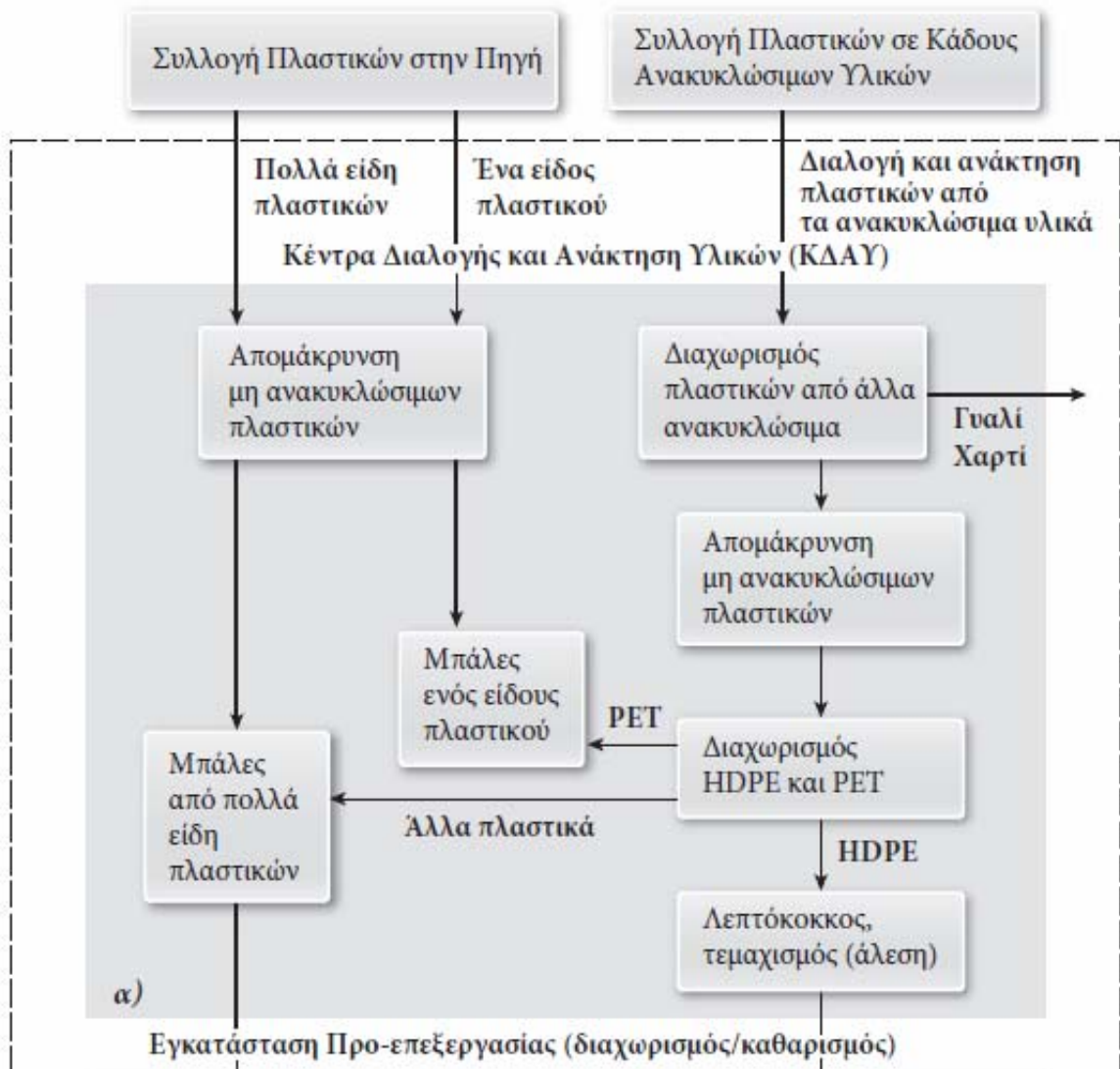
4.4.1 Γενικά

Τα συλλεγόμενα οικιακά πλαστικά απορρίμματα είτε στη Πηγή είτε σε Κάδους φέρονται στα ΚΔΑΥ. Στα ΚΔΑΥ λαμβάνει χώρα η διαλογή και η ανάκτηση των ανακυκλώσιμων υλικών στα είδη τους. Η λειτουργία τους στηρίζεται στη χειρωνακτική διαλογή ή στη μηχανική διαλογή. Η μηχανική διαλογή βασίζεται συνήθως στις αρχές του διαχωρισμού (διαλογής) με βάση τις ιδιότητες των υλικών, όπως η πυκνότητα, οι μαγνητικές και οπτικές ιδιότητες στις οποίες βασίζονται αντίστοιχα οι τεχνικές της επίπλευσης/καταβύθισης, του μαγνητικού και οπτικού διαχωρισμού. Οι διαχωρισμοί αυτού του σταδίου αποκαλούνται μακρο-διαχωρισμοί (macro-sorting).

Τα πλαστικά απορρίμματα που εισέρχονται στα ΚΔΑΥ (Σχήμα 4.2) αποτελούν μέρος των παρακάτω ρευμάτων:

- Το ρεύμα που περιέχει ένα μόνο είδος πλαστικού οδηγείται στα ΚΔΑΥ όπου αφού αφαιρεθούν χειρωνακτικά οι μη ανακυκλώσιμες πλαστικές ύλες (contras) συμπιέζεται και δεματιάζεται σε μπάλες. Στη συνέχεια οι μπάλες οδηγούνται σε εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας.
- Το ρεύμα που περιέχει πολλά είδη πλαστικών οδηγείται στα ΚΔΑΥ και αφού αφαιρεθούν χειρωνακτικά οι μη ανακυκλώσιμες πλαστικές ύλες συμπιέζεται και συσκευάζεται σε μπάλες που περιέχουν διάφορα πολυμερή. Στη συνέχεια οι μπάλες οδηγούνται σε εγκαταστάσεις καθαρισμού όπου γίνεται ένας προκαταρκτικός διαχωρισμός των πλαστικών στα είδη τους και στη συνέχεια προωθούνται στις εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας.
- Τα ανακυκλώσιμα υλικά (γυαλί, πλαστικά, χαρτί) που προέρχονται από συστήματα περισυλλογής από το δρόμο οδηγούνται στα ΚΔΑΥ όπου γίνεται διαχωρισμός στα είδη τους. Κατόπιν τα ανακυκλώσιμα πλαστικά υλικά υποβάλλονται σε διεργασίες αφαίρεσης των μη ανακυκλώσιμων πλαστικών. Τα ρεύματα

πλαστικών που προκύπτουν μπορούν να διοχετευτούν σε εγκαταστάσεις καθαρισμού, είτε με τη μορφή μπαλόν (ενός ή πολλών ειδών), είτε υπό τη μορφή τεμαχιδίων και στη συνέχεια προωθούνται στις εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας.



Σχήμα 4.2 Κέντρα Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών (ΚΔΑΥ) [2].



Σχήμα 4.3 Συμπύεση και δεματοποίηση (baling) των ρευμάτων των πλαστικών απορριμμάτων (ανά είδος ή ανά μίγμα) στα ΚΔΑΥ για να οδηγηθούν στις εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας [2].

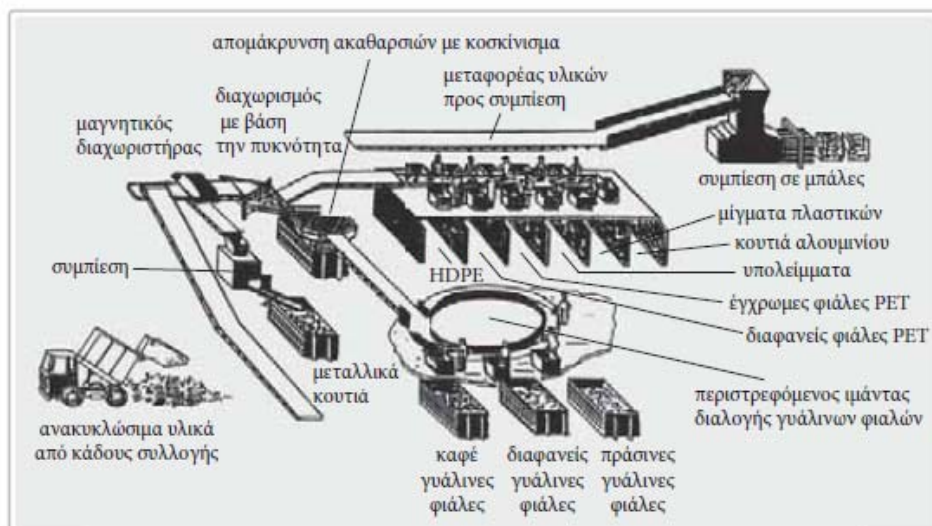
4.4.2 Μέθοδος Μηχανικής Διαλογής Bezner

Μια μέθοδος διαχωρισμού των πλαστικών από τα υπόλοιπα ανακυκλώσιμα απορρίμματα που εφαρμόζεται στα ΚΔΑΥ κυρίως στη Γερμανία είναι η μέθοδος Bezner. Η διεργασία αυτή μπορεί να αποδώσει μεγάλες ποσότητες καθαρών πλαστικών.

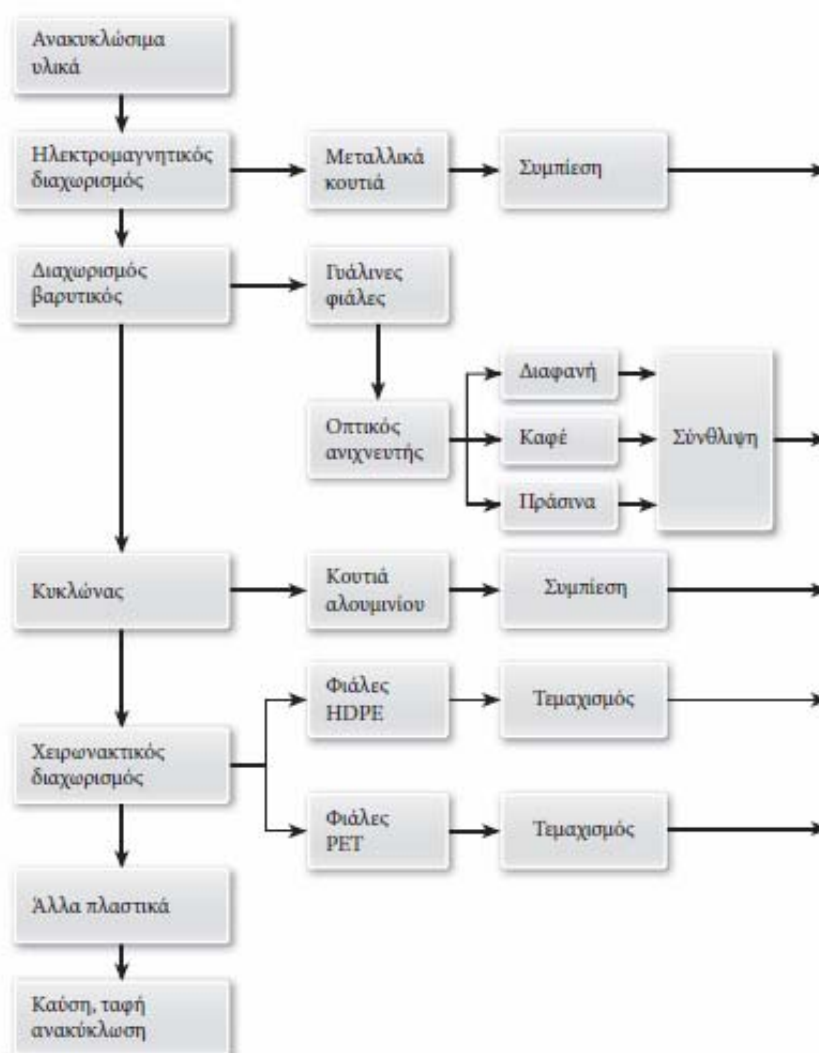
Αρχικά το ρεύμα των ανακυκλώσιμων υλικών οδηγείται σε μια σειρά παραπετασμάτων που έχουν κάποια κλίση έτσι ώστε τα βαρύτερα μπουκάλια από γυαλί να πέσουν προς τα κάτω ενώ τα ελαφρύτερα από πλαστικό και μέταλλο, διέρχονται ελεύθερα. Στη συνέχεια σύστημα μαγνητών απομακρύνει τα μεταλλικά κουτιά, τα οποία συνθλίβονται και πακετάρονται για πώληση στους εμπόρους. Τα αλουμινένια κουτιά διαχωρίζονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών δινών, συνθλίβονται και φορτώνονται σε ειδικά οχήματα που θα τα οδηγήσουν στους παραγωγούς αλουμινίου. Το γυαλί διαχωρίζεται ανάλογα με το χρώμα του, συνθλίβεται και πακετάρεται προς παραγωγή νέου γυαλιού.

Στη συνέχεια τα ρεύματα των χοντρικά διαχωρισμένων πλαστικών οδηγούνται στις εγκαταστάσεις καθαρισμού όπου γίνεται λεπτομερής διαχωρισμός και πλύσιμο. Τα πλαστικά γενικά διαχωρίζονται χειρωνακτικά σε τρία ρεύματα:

- α) Φιάλες HDPE, κύρια φιάλες γάλακτος, που στην συνέχεια τεμαχίζονται, και οδηγούνται στις εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας.
- β) Φιάλες PET, που ακολουθούν την ίδια διαδικασία με τις φιάλες HDPE.
- γ) Ανάμικτα πλαστικά τα οποία είτε οδηγούνται στις εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας ή αποστέλλονται σε ταφή ή καύση.



Σχήμα 4.4 Εικονική αναπαράσταση της μεθόδου Bezner [2].



Σχήμα 4.5 Η μέθοδος Bezner [2].

4.4.3 Μάκρο-Διαχωρισμοί

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο διαχωρισμός που λαμβάνει χώρα στο στάδιο Διαλογής και Ανάκτησης, δηλαδή στα είναι συνήθως μακρο-διαχωρισμός, ενώ ο διαχωρισμός στο στάδιο της προ-επεξεργασίας των πλαστικών είναι κατά βάση μικρο-διαχωρισμός, δηλαδή προηγείται τεμαχισμός.

Ο μακρο-διαχωρισμός αφορά τη διαλογή (ανά είδος πολυμερούς) αυτών καθαυτών των πλαστικών συσκευασιών (π.χ. φιαλών), μέσω της χειρωνακτικής, όσο και τη μηχανικής (αυτόματης) διαλογής. Γι' αυτό τα ρεύματα πλαστικών οδηγούνται από τα ΚΔΑΥ στις εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας υπό μορφή 'μπαλών'.

Ο διαχωρισμός γίνεται συνήθως με δύο τρόπους. Έχουμε λοιπόν τον χειρονακτικό και τον μηχανικό διαχωρισμό.

1. Χειρονακτικός διαχωρισμός: Μέχρι πρόσφατα αποτελούσε την πιο δημοφιλή μέθοδο διαχωρισμού, όπου κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό διαχώριζε οπτικά τα πλαστικά στα είδη τους. Η πλαστική συσκευασία διαχωρίζεται είτε από το χρώμα της είτε με την βοήθεια της ανάγνωσης κωδικών που αναγράφονται στις συσκευασίες. Πρόκειται για μέθοδο μειωμένων αποδόσεων με μεγάλα ποσοστά λαθών, και η εφαρμογή της κοστίζει αρκετά ώστε μπορεί να διπλασιάσει ή να τριπλασιάσει τις τιμές πώλησης της πρώτης ύλης.



Σχήμα 4.6 Χειρονακτικός διαχωρισμός σε κυλιόμενο μεταφορέα όπου φαίνονται και τα δοχεία συλλογής [2].

2. Μηχανικός διαχωρισμός: Εφαρμόζεται μια ποικιλία μεθόδων με σκοπό το διαχωρισμό των πλαστικών μπουκαλιών στα είδη τους:

- Διαχωρισμός με βάση τη πυκνότητα: Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για τον διαχωρισμό πλαστικών με διαφορές στην πυκνότητα. Είναι γνωστή και με την ονομασία μέθοδος επίπλευσης ή και καταβύθισης/επίπλευσης. Η αρχή λειτουργίας της στηρίζεται στην αξιοποίηση της διαφοράς ειδικού βάρους, δηλαδή τα βαρύτερα καθιζάνουν ενώ τα ελαφρύτερα επιπλέουν. Το σημαντικό πρόβλημα της μεθόδου έγκειται στο ότι δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός υλικών με παρόμοιες πυκνότητες.
- Ηλεκτρομαγνητικός διαχωρισμός: Πρόκειται για εξειδικευμένη μέθοδο διαχωρισμού που βασίζεται στον εντοπισμό του ατόμου χλωρίου του PVC με ακτίνες X. Ένας ανιχνευτής εντοπίζει τα άτομα χλωρίου μέσω του φθορισμού τους όταν σε αυτά επιδράσουν ακτίνες X. Ο ανιχνευτής μετρά τα εκλυόμενα ποσά ενέργειας και θέτει σε λειτουργία το σύστημα διαχωρισμού των μπουκαλιών PVC στο μεταφορέα. Πρόβλημα προκύπτει στην περίπτωση πολυμεμβρανωδών συσκευασιών όπου η μία είναι από PVC. Αυτή η μέθοδος μπορεί να συνδυαστεί με τη μέθοδο διαχωρισμού με βάση την πυκνότητα.
- Διαχωρισμός με φασματοσκοπία NIR (Near Infrared): Η μέθοδος αυτή αναλύει και χρησιμοποιεί τις χαρακτηριστικές απορροφήσεις των πλαστικών στο υπέρυθρο φάσμα για να τα διαχωρίσει. Η δέσμη NIR εστιάζεται στην επιφάνεια κάθε μπουκαλιού και η αντανάκλασή της μετριέται και αναλύεται φασματοσκοπικά.
- Φασματοσκοπία μάζας: Μπορεί να εντοπίσει χρωματισμένα, μολυσμένα ή πλαστικά μπουκάλια με περιεχόμενο, κάνοντας χρήση ακτίνας λέιζερ που θερμαίνει το δείγμα ή ανιχνεύοντας κάποιο γραμμικό κώδικα που δηλώνει το είδος του πλαστικού.
- Ηλεκτροστατικός διαχωρισμός: Χρησιμοποιείται ένα ηλεκτροστατικό πεδίο. Η μέθοδος στηρίζεται στο ότι τα διάφορα είδη πλαστικών έχουν διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές.

Αμέσως μετά τον μακρο-διαχωρισμό τα πλαστικά αλέθονται σε ειδικούς μύλους και ανεξάρτητα από το σύστημα συλλογής επιδέχονται μικρο-διαχωρισμούς και πλύσιμο.

4.5 ΜΕΙΩΣΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

4.5.1 Γενικά

Η μείωση μεγέθους των τεμαχιδίων του πλαστικού διευκολύνει τη μεταφορά και το ζύγισμα στους χώρους ανάκτησης και εξασφαλίζει την ομοιογένεια της τροφοδοσίας. Γι' αυτό αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι

των διεργασιών ανακύκλωσης. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου απαιτείται μείωση μεγέθους έτσι ώστε να ελαττωθεί ο όγκος του υλικού και να ελαχιστοποιηθούν οι δαπάνες μεταφοράς, είτε για να εξασφαλιστεί σταθερή παροχή τροφοδοσίας στον εξωθητή. Τυπικές τεχνικές μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η μείωση του μεγέθους των πλαστικών είναι:

- Ο χονδρόκοκκος τεμαχισμός (shredding)
- Ο λεπτόκοκκος τεμαχισμός ή κοκκοποίηση (granulation)
- Η αύξηση της πυκνότητας (densification)
- Η συμπίεση (compaction)
- Η συσσωμάτωση (agglomeration)
- Η κονιορτοποίηση (pulverization)

Ο τύπος του απαιτούμενου μηχανολογικού εξοπλισμού εξαρτάται από τη φύση του ανακυκλούμενου υλικού. Συχνά απαιτείται συνδυασμός δύο ή περισσότερων τεχνικών.

Η μείωση μεγέθους εφαρμόζεται επίσης για τον διαχωρισμό των ανακυκλούμενων πλαστικών από άλλα υλικά, όταν αυτά μετέχουν σε σύνθετα ή πολυστρωματικά υλικά όπως χαλιά, ταμπλώ αυτοκινήτων κ.ά. Αρχικά το σύνθετο υλικό υφίσταται τεμαχισμό σε τέτοιο βαθμό ώστε τα σωματίδια των διαφόρων υλικών να διαχωριστούν μεταξύ τους. Στη συνέχεια το μίγμα των σωματιδίων διαχωρίζεται π.χ. με τεχνικές που στηρίζονται στη διαφορά πυκνότητας των σωματιδίων.

4.5.2 Τεμαχισμός

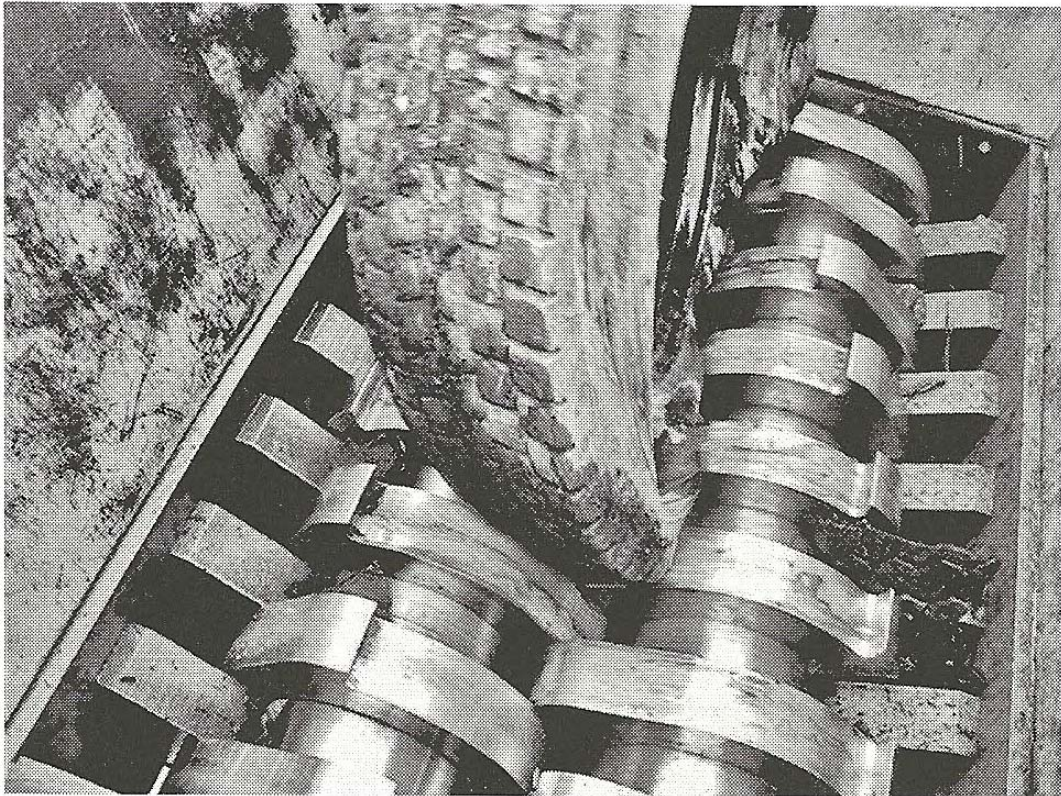
Τεμαχισμός θεωρείται η διάσπαση της δομής ενός στερεού με την επίδραση μηχανικής δύναμης. Η ελάττωση του μεγέθους επιτυγχάνεται με πτώση, άλεση (κρούση) ή κοπή. Δηλαδή οι θραυστήρες εφαρμόζουν μηχανική πίεση στα υλικά είτε με εναλλασσόμενη προσέγγιση/απομάκρυνση των επιφανειών είτε με συνεχή κίνηση των επιφανειών θραύσης είτε με πρόσκρουση των υλικών πάνω σε στάσιμη επιφάνεια.

Ο βαθμός απόδοσης της ελάττωσης μεγέθους των υλικών είναι σχετικά μικρός (0,1-2%) λόγω των απωλειών από τις τριβές και τις παραμορφώσεις των υλικών.

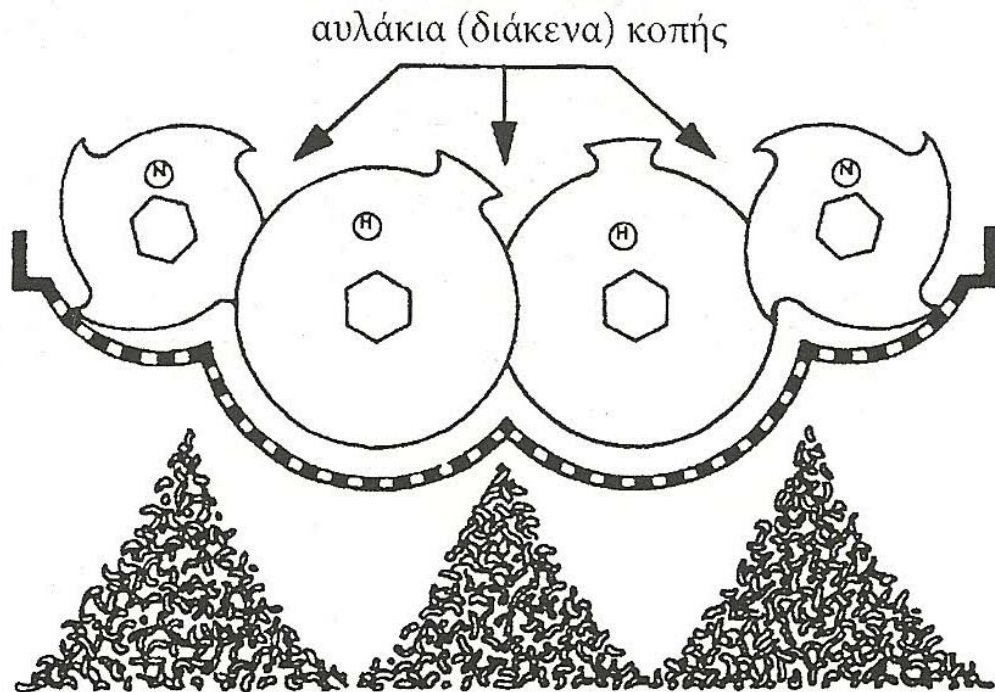
A) Μηχανήματα με Δίσκους Τεμαχισμού

Τα μηχανήματα αυτά διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται συνήθως σε δύο μη συγχρονισμένους ή τέσσερις συγχρονισμένους αντιστρεφόμενους άξονες εξοπλισμένους με δίσκους τεμαχισμού και με δακτυλίους διακένων. Η δράση τεμαχισμού πραγματοποιείται μεταξύ των παρακείμενων δίσκων.

Ο βαθμός τεμαχισμού καθορίζεται από τον αριθμό των εξοχών που φέρουν οι δίσκοι περιφερειακά και από το πλάτος των δίσκων. Οι μηχανές αυτές τεμαχισμού είναι κατάλληλες όταν πρόκειται για τροφοδοσία πλαστικών φιλμ, φύλλων, σωληνώσεων και καλωδίων. Οι δίσκοι είναι κατασκευασμένοι από ατσάλι για να αντέχουν στις υψηλές διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται π.χ. σε ελαστικά αυτοκινήτου (Σχήμα 4.7). Το μέγεθος των λαμβανομένων σωματιδίων είναι της τάξης των 50mm. Κάτω από τους περιστρεφόμενους δίσκους είναι τοποθετημένα κόσκινα για να επιτυγχάνεται σταθερό μέγεθος σωματιδίων (Σχήμα 4.8).



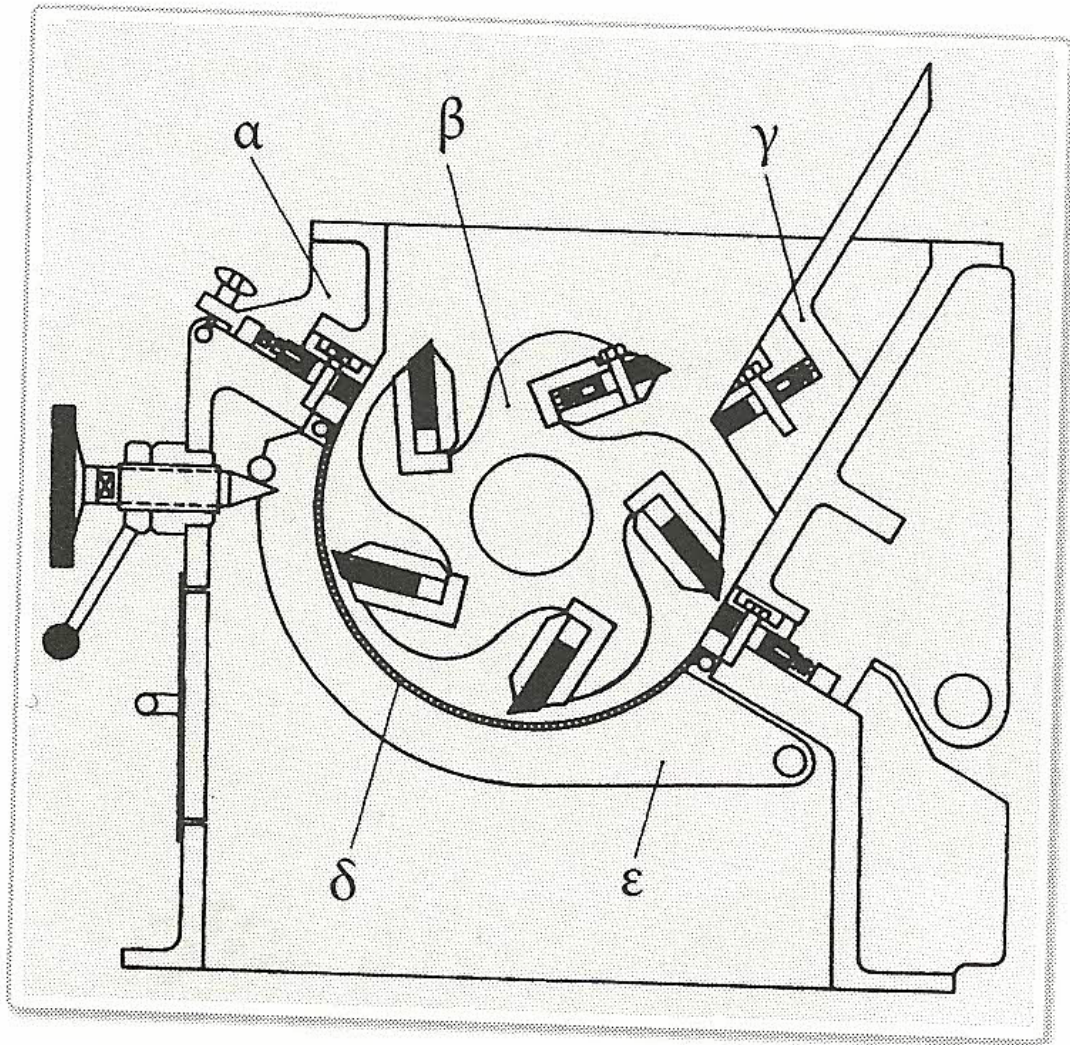
Σχήμα 4.7 Τεμαχισμός ελαστικών αυτοκινήτου σε μηχανή τεμαχισμού που αποτελείται από δύο περιστρεφόμενους άξονες με δίσκους [2].



Σχήμα 4.8 Σχηματική αναπαράσταση μηχανής τεμαχισμού με τέσσερις περιστρεφόμενους άξονες με δίσκους. Το πλαστικό απόρριμμα ωθείται στα διάκενα μεταξύ των δίσκων και τεμαχίζεται με τη βοήθεια των εξοχών που έχουν οι δίσκοι. Στη συνέχεια τα τεμαχίδια περνούν από κόσκινο ώστε να έχουμε ομοιόμορφη κατανομή σωματιδίων [2].

B) Περιστροφικοί κόπτες τεμαχισμού με περιστρεφόμενα μαχαίρια (κοκκοποιητές)

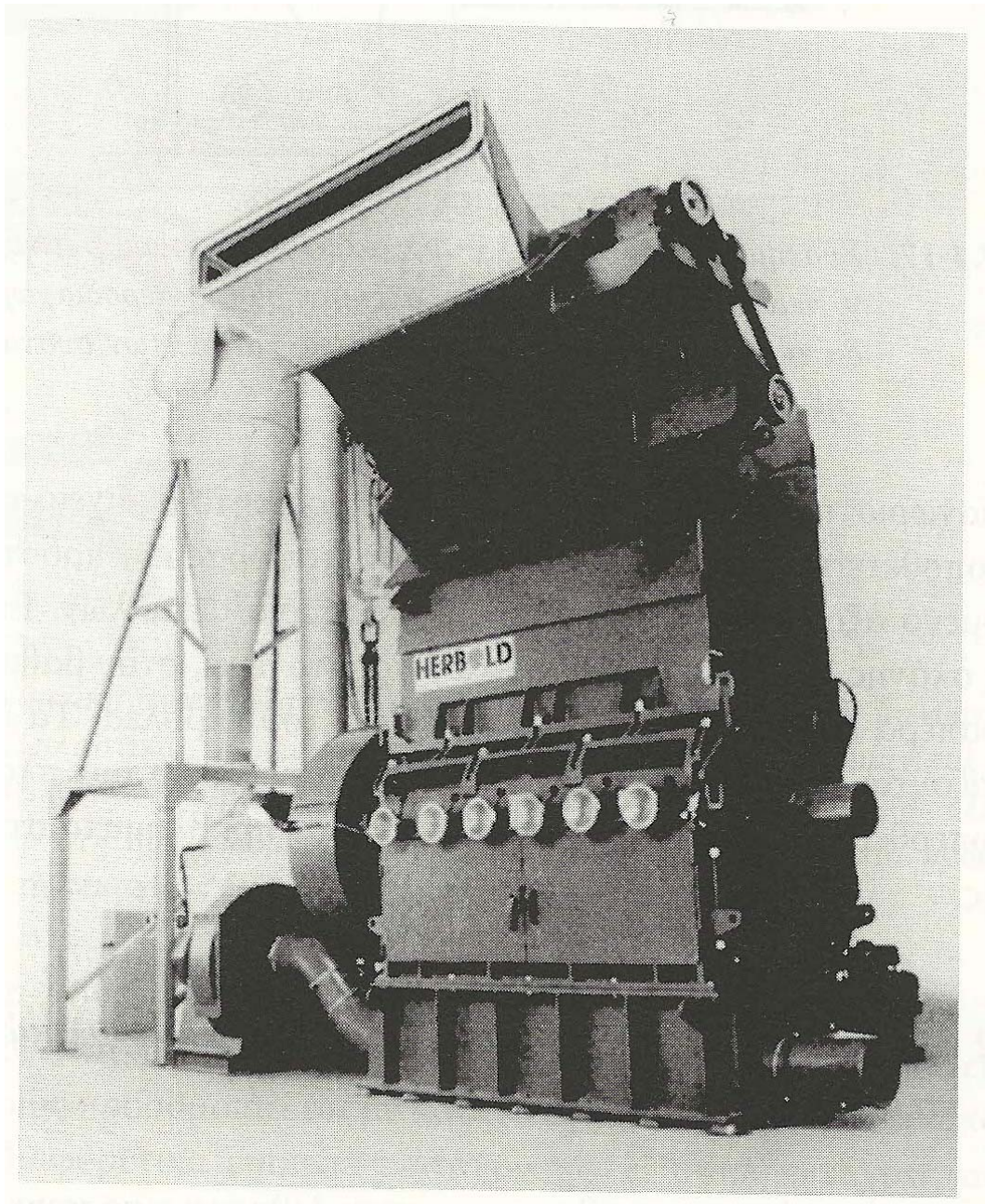
Είναι γνωστά και ως μαχαιρόμυλοι ή κοκκοποιητές διασταυρούμενων ψαλιδιών. Περιλαμβάνουν μαχαίρια τοποθετημένα επί περιστρεφόμενου άξονα (ρότορας) και ακόμη τρία ή τέσσερα σταθερά μαχαίρια σε σταθερό πλαίσιο περιμετρικά του άξονα (στάτορας). Το πλαστικό διοχετεύεται στο χώρο κοπής και τεμαχίζεται από τη δράση μεταξύ των περιστρεφόμενων και των σταθερών μαχαιριών (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9 Σχηματική παράσταση περιστροφικού κόπτη.
α) άρθρωση καπακιού, β) περιστρεφόμενος άξονας,
γ) κινούμενος οδηγός με σταθερό μαχαίρι,
δ) κόσκινο, ε) καλάθι κοσκίνου [2].

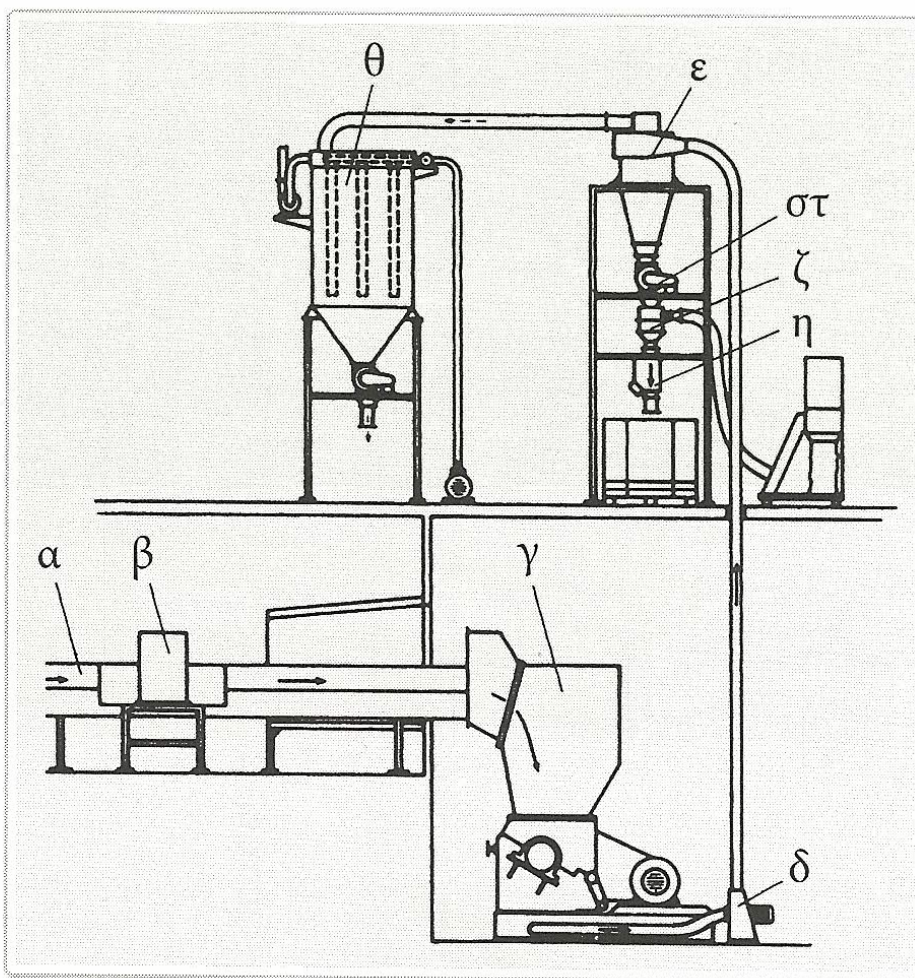
Οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούνται ευρύτατα επειδή εξασφαλίζουν μηχανική σταθερότητα, ευκολία αλλαγής των μαχαιριών και εύκολο καθάρισμα.

Άλλες γνωστές τεχνικές τεμαχισμού είναι οι μηχανές τύπου γκιλοτίνας και οι κοχλιωτοί κόπτες.



Σχήμα 4.10 Περιστροφικός κόπτης [2].

Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα τεμαχισμού που περιλαμβάνει μάντα τροφοδοσίας, ανιχνευτή μετάλλων, περιστροφικό κόπτη, ανεμιστήρα για τη μεταφορά του αλέσματος, διαχωριστήρες σκόνης και ελαφρών συστατικών καθώς και φίλτρο αυτόματου καθαρισμού. Ο ανεμιστήρας εκτός από τη μεταφορά του αλεσμένου υλικού χρησιμοποιείται και για την ψύξη του θαλάμου κοπής ο οποίος θερμαίνεται κατά τη διαδικασία του τεμαχισμού. Ο διαχωριστήρας μετάλλων είναι απαραίτητο εξάρτημα αφού προστατεύει τον περιστρεφόμενο κόπτη από την παρουσία μετάλλων.



Σχήμα 4.11 Ολοκληρωμένο σύστημα κοκκοποίησης.
 α) μάντας τροφοδοσίας, β) ανιχνευτής μετάλλων,
 γ) περιστροφικός κόπτης, δ) ανεμιστήρας,
 ε) αεροδιαχωριστήρας, στ) θυρίδα εκροής,
 ζ) διαχωριστήρας σκόνης και λεπτών συστατικών,
 η) ανιχνευτής μετάλλων, θ) φίλτρο αυτόματου καθαρισμού [2].

4.5.3 Τεχνικές Συσσωμάτωσης / Αύξησης Πυκνότητας

Τα σωματίδια που προκύπτουν από τον τεμαχισμό πλαστικών φιλμ και αφρών λόγω της φύσης τους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν. Αυτό συμβαίνει γιατί λόγω της χαμηλής πυκνότητάς τους σχηματίζεται ένα ρεύμα αιωρούμενων νιφάδων που προκαλεί προβλήματα στη διαχείριση της τροφοδοσίας. Το επιθυμητό είναι ένα ρεύμα ελεύθερα ρεόντων κόκκων και για να επιτευχθεί πρέπει να αυξηθεί η πυκνότητα των υλικών αυτών μέχρι τα 400Kg/m^3 χρησιμοποιώντας τεχνικές συσσωμάτωσης.

Οι διεργασίες συσσωμάτωσης/αύξησης πυκνότητας δεν αποσκοπούν στο να λιώσουν το σκάρτο πολυμερές, αλλά στο να το

μαλακώσουν μέσω τοπικής θέρμανσης. Το αποτέλεσμα είναι ελεγχόμενη συσσωμάτωση των τεμαχιδίων του πλαστικού. Η συμπίεση της πλαστικής συσκευασίας πραγματοποιείται συνήθως μεταξύ 135 και 140°C. Η άνοδος της θερμοκρασίας προκύπτει από την παραγόμενη θερμότητα τριβής του πολυμερούς. Είναι σημαντικό να μην προσεγγισθεί η θερμοκρασία τήξης του πολυμερούς διότι, σε αυτή την περίπτωση, η διεργασία σύνθλιψης που ακολουθεί παρουσιάζει αστάθεια. Τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη συσσωμάτωση και σύνθλιψη των σκάρτων πλαστικών είναι:

- Μείωση του αποθηκευτικού χώρου,
- Οικονομική μεταφορά μεγάλου όγκου πλαστικών
- Βελτιωμένες ιδιότητες ροής,
- Αποτελεσματικότερη μέτρηση της ποσότητας τροφοδοσίας,
- Απουσία δημιουργίας, επιβλαβούς για την υγεία, σκόνης κατά τη διεργασία.

Υπάρχουν τρεις κυρίως τρόποι για τη συσσωμάτωση των πλαστικών απορριμμάτων: με δίσκους συσσωμάτωσης, με συμπίεση και με ανάδευση.

(α) Δίσκοι Συσσωμάτωσης

Το υλικό μετατρέπεται σε ρέοντες κόκκους υψηλής πυκνότητας περνώντας διαμέσου ειδικά σχεδιασμένων δίσκων συσσωμάτωσης. Το προϊόν της διαδικασίας ωθείται προς τις εξωτερικές περιοχές των δίσκων συσσωμάτωσης κατά την περιστροφή τους. Το υψηλής πυκνότητας έκβολο κοκκοποιείται στη συνέχεια με τη βοήθεια κοκκοποιητή καθοδικής φοράς.

(β) Συσσωμάτωση με Συμπίεση

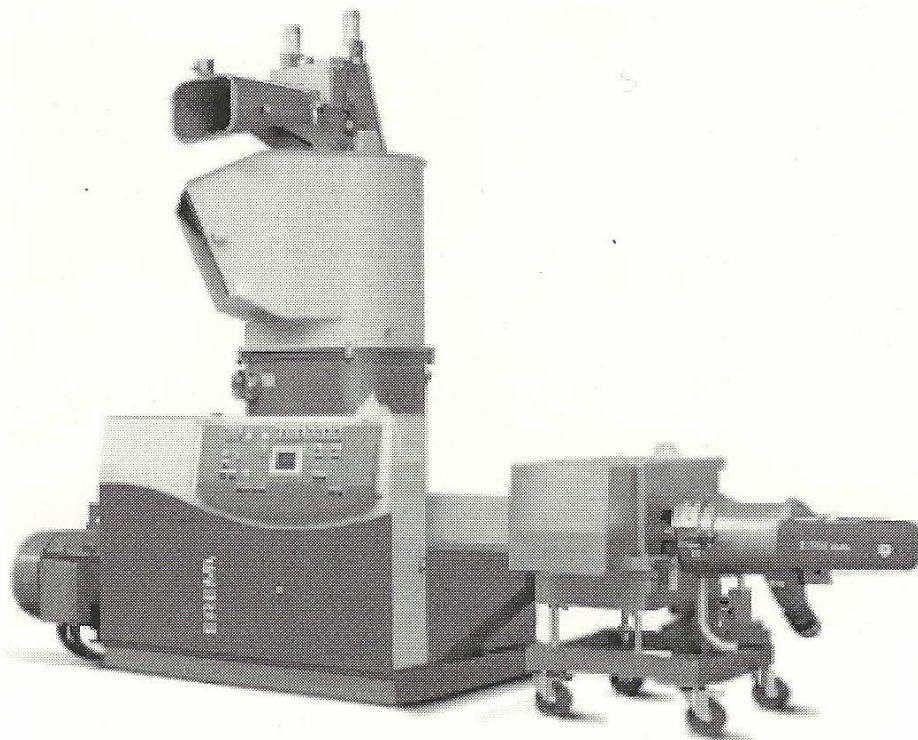
Κατά τη συσσωμάτωση με συμπίεση το υλικό συμπιέζεται σε τέτοιο βαθμό που παράγονται συνεκτικές, σταθερές, πελλέτες με συνεχή τρόπο. Στο πρώτο στάδιο, τραχείς κόκκοι υλικού τροφοδοτούνται εντός κατάλληλα διαμορφωμένου καλουπιού υπό την επίδραση εξωτερικής πίεσης. Στο δεύτερο στάδιο μια σειρά κυλίνδρων διατρέχει τη μάζα και τη συμπιέζει, αναγκάζοντάς την να περάσει μέσα από μια σειρά καναλιών που βρίσκονται στον πάτο του καλουπιού. Τελικά το το έκβολο κόβεται στην έξοδο με ένα περιστρεφόμενο μηχάνημα κοπής.

(γ) Συσσωμάτωση με Ανάδευση

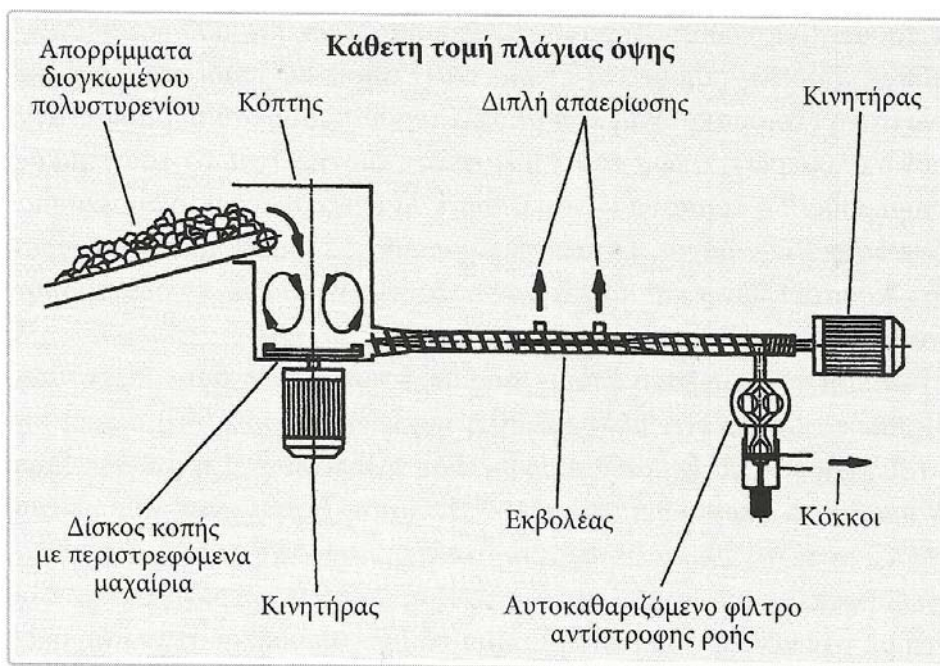
Κατά τη συσσωμάτωση με ανάδευση το πλαστικό αναδεύεται ζωηρά. Η ανάδευση προκαλεί συσσωμάτωση προς μεγάλης πυκνότητας σωματίδια.

Τα σωματίδια δεν προσκολλώνται μεταξύ τους, ως αποτέλεσμα της δράσης κάποιας εξωτερικής μηχανικής πίεσης, αλλά λόγω του υψηλού θερμικού φορτίου που παράγεται από την τριβή του υλικού με τα περιστρεφόμενα μαχαίρια. Η θερμοκρασία του πλαστικού προσεγγίζει έτσι το σημείο τήξης του. Μόλις συμβεί αυτό το υλικό ψύχεται απότομα ερχόμενο σε επαφή με πίδακες ψυχρού νερού. Το νερό εξατμίζεται άμεσα και παράγονται συσσωματώματα με μεγέθη 2-8 mm.

Για τα ογκώδη και ελαφριά πλαστικά η εταιρεία Erema ανέπτυξε ένα συνδυασμό κόπτη και συμπιεστή γνωστό ως εφαπτομενικού τύπου που μπορεί να επεξεργαστεί φιλμ, ίνες, αφρώδη πλαστικά κ.ά. Στο μηχάνημα αυτό το πλαστικό υλικό τεμαχίζεται, αναμειγνύεται, θερμαίνεται, ξηραίνεται και συσσωματώνεται σε ένα στάδιο. Επιπλέον τροφοδοτεί σταθερά έναν εφαπτομενικά προσαρτημένο εκβολέα.



Σχήμα 4.12 Το σύστημα Erema εφαπτομενικού τύπου [2].



Σχήμα 4.13 Σχηματική αναπαράσταση της συνολικής διαδικασίας Erema [2].

4.5.4 Τεχνικές Κονιορτοποίησης

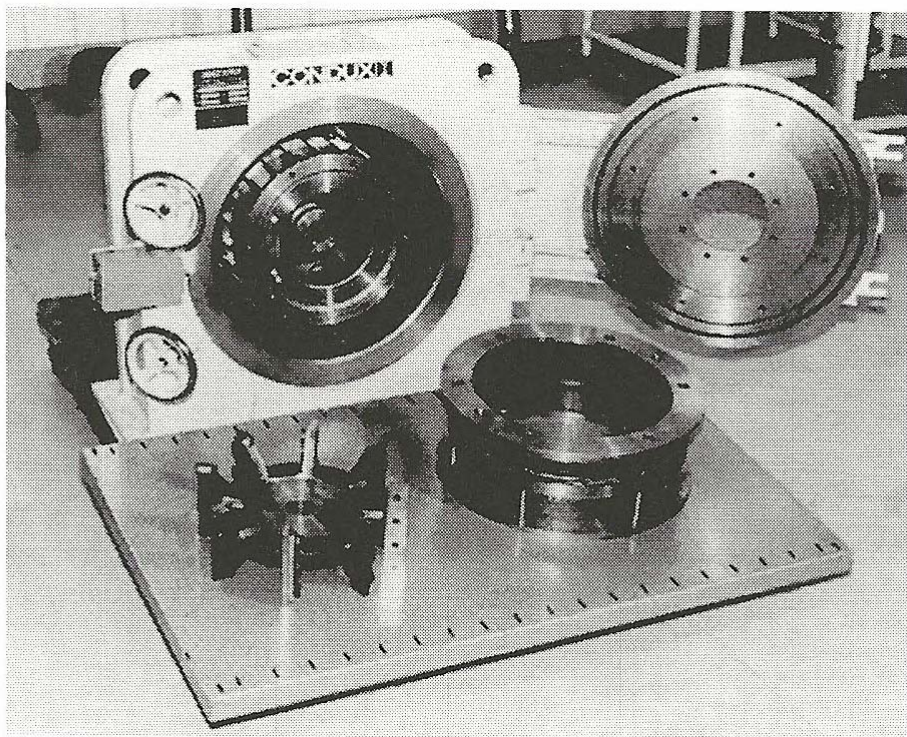
Για τη μετατροπή σκάρτου πλαστικού σε λεπτή, ρέουσα, σκόνη χρησιμοποιούνται μεγάλοι μύλοι κονιορτοποίησης. Τα κονιορτοποιημένα προϊόντα χαρακτηρίζονται από:

- Καλά χαρακτηριστικά ροής
- Υψηλή πυκνότητα
- Στενό εύρος κατανομής μεγέθους σωματιδίων
- Ομοιογενή σύσταση

Τα σωματίδια που προκύπτουν έχουν μέγεθος μικρότερο από 50 μm. Τα πολυμερή που υφίστανται αυτή την επεξεργασία είναι συνήθως οι πολυολεφίνες, τα πολυαμίδια, οι πολυεστέρες, οι πολυουρεθάνες, και το PVC. Η μείωση του μεγέθους των πλαστικών πραγματοποιείται στο χώρο σύγκρουσης με τη φτερωτή ενός ανεμιστήρα, ο οποίος συνδυάζεται με κατάλληλο κόσκινο στη βάση του. Η λεπτότητα των τεμαχιδίων της σκόνης καθορίζεται από το μέγεθος των οπών του κόσκινου. Το κυριότερο μειονέκτημα των τεχνικών κονιορτοποίησης εντοπίζεται στο ότι οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις άκρες των προεξοχών, είναι ικανές να προκαλέσουν μερική ανεπιθύμητη τήξη του πολυμερούς και την προσκόλλησή του σε αυτές. Κατά συνέπεια το επόμενο στάδιο είναι η μείωση της απόδοσης του μηχανήματος.

A) Μηχανήματα Κονιορτοποίησης με Δίσκους

Τα μηχανήματα αυτά είναι κατάλληλα για πλαστικά ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως το PE. Ο συνδυασμός αιχμηρότητας, υψηλών μηχανικών φορτίων και σύγκρουσης εντός του λεπτού διακένου μεταξύ των δύο δίσκων, κονιορτοποιεί το πλαστικό. Η κονιορτοποίηση διευκολύνεται με την παρουσία οδοντωτών προεξοχών επί των δίσκων. Επιτυγχάνεται εύκολα η απαιτούμενη λεπτότητα των σωματιδίων χωρίς να απαιτείται κόσκινο οπότε περιορίζεται ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα κατά την κονιορτοποίηση ευαίσθητων στη θερμοκρασία πολυμερών και συντελεί στην επίτευξη υψηλών αποδόσεων του μηχανήματος. Σε αρκετές περιπτώσεις επιτρέπεται η είσοδος αέρα στο χώρο κονιορτοποίησης προς αποφυγή υψηλών θερμοκρασιών, συσσωμάτωσης και θερμικής αποδόμησης του πολυμερούς.



Σχήμα 4.14 Δισκόμυλος κονιορτοποίησης με ανεμιστήρα [2].

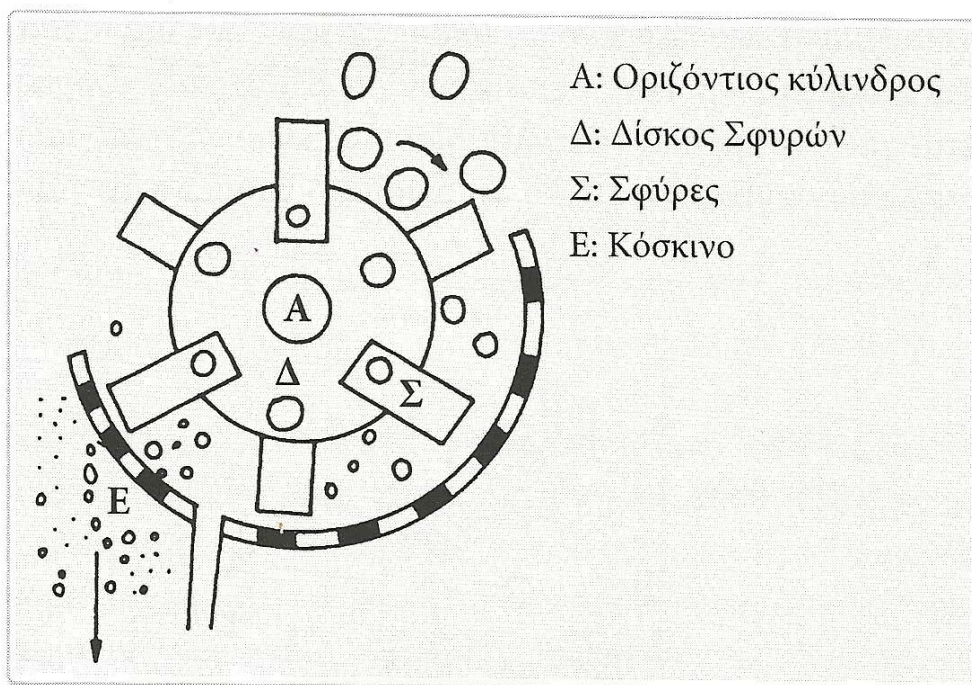
B) Διατμητική Εξώθηση σε Στερεά Κατάσταση

Είναι μια συνεχής διεργασία, ενός σταδίου, που μετατρέπει το μετακαταναλωτικό πλαστικό σκάρτο σε ομοιόμορφη σκόνη με κατανομή μεγέθους σωματιδίων 20-200 μm . Ο βασικός εξοπλισμός αποτελείται από εξωθητή συστρεφόμενου δίδυμου κοχλία και από σύνολο στοιχείων δημιουργίας διάτμησης, τοποθετημένων κατά μήκος των αξόνων. Η

θερμότητα, λόγω διάτμησης, απομακρύνεται από το πολυμερές με εξωτερική ψύξη. Το μυστικό της αποτελεσματικής μείωσης μεγέθους έγκειται στο να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός θερμοκρασίας πολυμερούς με όσο το δυνατόν υψηλότερους ρυθμούς διάτμησης. Η μέθοδος είναι πολύ καινούργια και προς το παρόν δεν έχει βρει βιομηχανική εφαρμογή.

Γ) Σφυρόμυλοι

Μια σειρά σφυριών που βρίσκονται τοποθετημένα έκκεντρα ως προς τον κεντρικό άξονα κονιορτοποιεί την εισερχόμενη τροφοδοσία. Πρόκειται για μέθοδο με αρκετά εκτεταμένη εφαρμογή στη βιομηχανία ανακύκλωσης, κυρίως λόγω της σχετικά φθηνής, εύκολα συντηρούμενης και υψηλών αποδόσεων κατασκευή της.

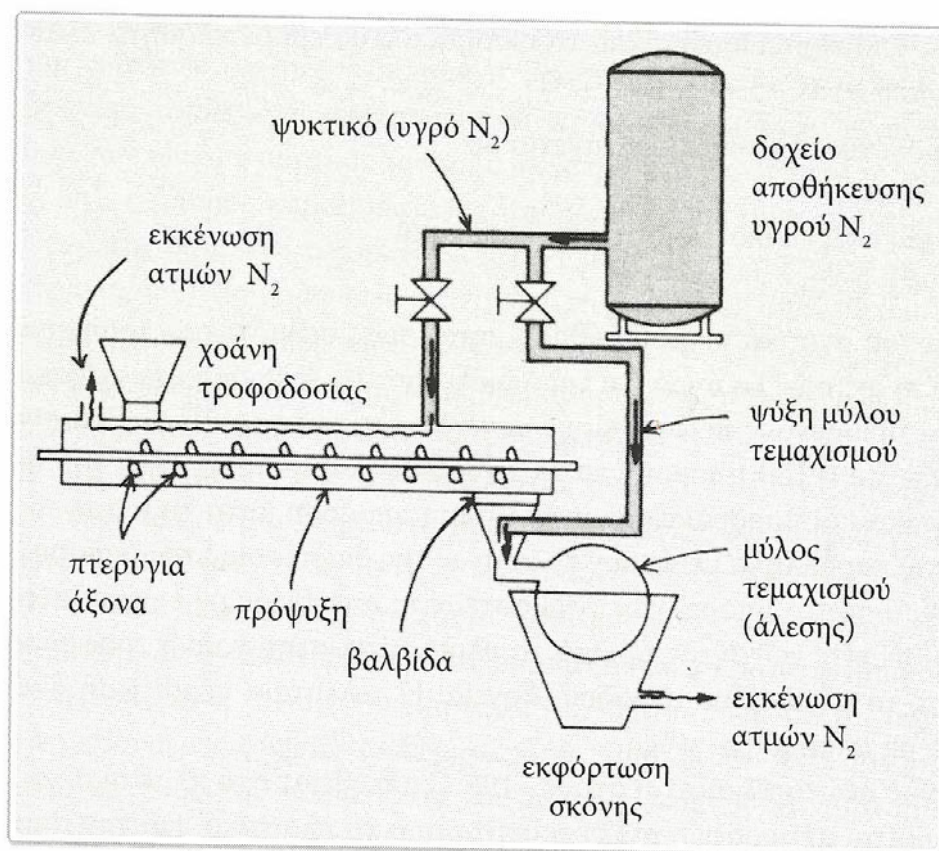


Σχήμα 4.15 Σχηματική αναπαράσταση ενός σφυρόμυλου [2].

Δ) Κρυογενική Κονιορτοποίηση

Η διεργασία εφαρμόζεται σε δύσκολα στην άλεση πολυμερή που είναι και θερμο-ευαίσθητα, όπως τα πλαστικοποιημένα φύλλα PVC. Το προς άλεση πλαστικό μεταφέρεται στο χώρο ψύξης όπου και ραντίζεται με υγρό άζωτο (θερμοκρασίας $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$). Το παγωμένο και εύθραυστο πολυμερές εισέρχεται στη συνέχεια στο μύλο άλεσης όπου και ραντίζεται με επιπλέον άζωτο αν οι αισθητήρες καταγράψουν αύξηση της θερμοκρασίας κατά την άλεση. Εξαιτίας του υψηλού κόστους του υγρού αζώτου, το τελευταίο ανακυκλώνεται, μέσω κατάλληλης διάταξης. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι λόγω των διαφορετικών

θερμοκρασιών μαλάκυνσης που παρουσιάζουν τα πλαστικά, είναι δυνατή η επιλεκτική κωνιορτοποίηση του ρεύματος των ανάμικτων πλαστικών.



Σχήμα 4.16 Κρυογενικό σύστημα άλεσης της Union Carbide [2].

4.6 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ/ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ

4.6.1 Μίκρο-διαχωρισμοί

Οι μικρο-διαχωρισμοί (micro-sorting) γίνονται σε επίπεδο μικρών τεμαχιδίων, αφού τα πλαστικά απορρίμματα έχουν συμπιεστεί και κομματιαστεί. Διαδέχονται συνήθως το μάκρο-διαχωρισμό, οπότε συνδυάζονται και με τον καθαρισμό. Οι μικροδιαχωρισμοί μπορεί να αποτελέσουν και το αρχικό στάδιο διαχωρισμού εφόσον τα ανάμικτα απορρίμματα ληφθούν υπό αλεσμένη μορφή. Πάντως τα αλεσμένα πλαστικά απαιτούν πιο περίπλοκες και δαπανηρές μεθόδους διαχωρισμού από τα μη αλεσμένα.

1. Μέθοδοι διαχωρισμού με βάση την πυκνότητα

- Διαχωρισμός με υδροκυκλώνα. Η συσκευή διαχωρίζει τα πλαστικά κομμάτια διαμέσου ενός φυγόκεντρου πεδίου που προκαλεί εσωτερικό ρεύμα ανοδικής φοράς και παρασύρει τα ελαφρύτερα τεμαχίδια. Ταυτόχρονα ένα εξωτερικό ρεύμα καθοδικής φοράς παρασύρει τα βαρύτερα τεμαχίδια. Οι υπάρχουσες επιμολύνσεις απομακρύνονται με το ρεύμα των βαρύτερων τεμαχιδίων.
- Διαχωρισμός με καταβύθιση. Πλαστικά τεμαχίδια με παρόμοιες πυκνότητες διαχωρίζονται σε λουτρό διαχωρισμού με την προσθήκη κροκιδιοποιητών. Και οι δύο αυτοί μέθοδοι διαχωρίζουν πλαστικά παρόμοιων πυκνοτήτων. Οι μέθοδοι εφαρμόζονται για τον διαχωρισμό πλαστικών που είναι δύσκολο να διαχωριστούν με μάκρο-μεθόδους, κυρίως λόγω μικρού μεγέθους, αλλά και για τον καθαρισμό του κύριου όγκου των πλαστικών τεμαχιδίων από τις ξένες προς ανακύκλωση, ύλες.

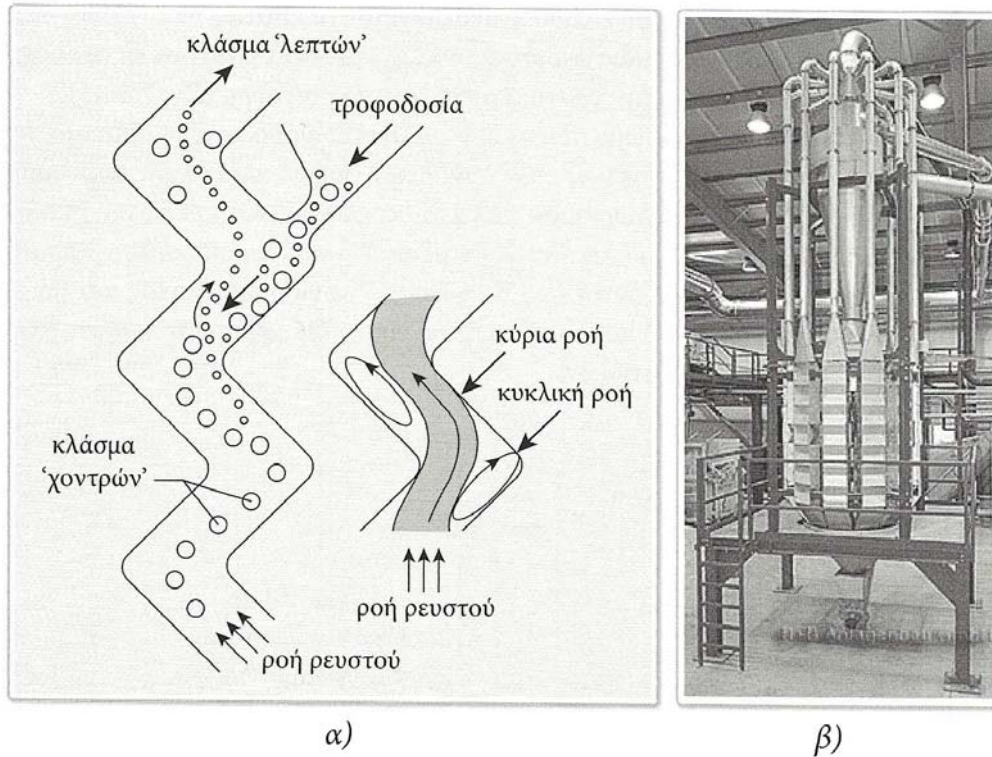
2. Διαχωρισμός με αφρισμό

Η μέθοδος εφαρμόζεται για να διαχωρίσει δύο τύπους πλαστικών με παρόμοιες πυκνότητες όπως το PVC και το PET. Συνήθως απαιτείται η προσθήκη ενός επιφανειοδραστικού μέσου πριν τον αφρισμό. Ο τελευταίος δημιουργείται με τη διοχέτευση φυσαλίδων αέρα διαμέσου της υγρής φάσης.

3. Αέριος Διαχωρισμός

Αντίθετα ρεύματα αέρα χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση ελαφρών τεμαχιδίων, πλαστικών ετικετών και ινών που έχουν προκύψει κατά την άλεση του υλικού. Όπως συμβαίνει και με τους υδροκυκλώνες, η απόδοση αυτών των διατάξεων είναι συνάρτηση της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων και της πυκνότητάς τους.

Υψηλής εκλεκτικότητας είναι οι ZIK-ZAK αεροδιαχωριστήρες (Σχήμα 4.17). Τα «χοντρά» συστατικά κινούνται προς τα κάτω ενώ τα «λεπτά» προς τα πάνω και διαχωρίζονται από την επίδραση του ρεύματος αέρα που κινείται αντιπαράλληλα στα «χοντρά». Στην περίπτωση που λεπτά σωματίδια παρασύρονται από τα χοντρά και κινούνται προς τα κάτω διαχωρίζονται υπό την επίδραση στροβιλισμών που αναπτύσσονται σε κάθε τμήμα του ζιγκ-ζαγκ αεροδιαχωριστήρα.



Σχήμα 4.17 α) Σχηματική παράσταση ενός ZIK-ZAK αεροδιαχωριστήρα.
 β) ZIK-ZAK αεροδιαχωριστήρας της εταιρείας Summit Systems Recycling Machinery που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό φιλμ από χαρτί [2].

4.6.2 Διεργασίες πλύσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο μικρο-διαχωρισμός εφαρμόζεται παράλληλα με διεργασίες πλύσης, που αποσκοπούν στον καθαρισμό και την απομάκρυνση των κολλών που έχουν χρησιμοποιηθεί για τις ετικέτες και τις βάσεις των περιεκτών. Συγκεκριμένα, ζεστό νερό (80 °C), μέσα στο οποίο βρίσκονται διαλυμένα ένα δραστικό μέσο μείωσης της επιφανειακής τάσης και καυστική σόδα, διαβρέχει τα τεμαχίδια για αρκετή ώρα με ταυτόχρονη ανάδευση. Στη συνέχεια τα τεμαχίδια ξεπλένονται με καθαρό νερό για την απομάκρυνση της καυστικής ουσίας και των προσμίξεων (κόλλες, άλλα πλαστικά). Το ζεστό διάλυμα της βάσης αποσκοπεί και στην ελάττωση των μικροβιολογικών επιμολύνσεων, για αυτό οι συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που επικρατούν πρέπει να είναι ισχυρότερες από αυτές ενός κλιβάνου αποστείρωσης.

4.6.3 Έλεγχος Καθαρότητας

Το τελικό στάδιο σε μια εγκατάσταση διαχωρισμού/καθαρισμού πλαστικών είναι ο έλεγχος ποιότητας ώστε να εξακριβωθεί η καθαρότητα

των τεμαχιδίων, με βάση τις οριζόμενες προδιαγραφές. Συγκεκριμένα ελέγχεται η παρουσία επιμολυντών όπως:

- Άλλα πλαστικά, διαφορετικά του πολυμερούς που μας ενδιαφέρει
- Χρωματισμένα πλαστικά τεμαχίδια του πολυμερούς που μας ενδιαφέρει
- Ίνες χαρτιού
- Αλουμίνιο
- Ξύλο και γυαλί
- Μικρόβια και τοξικές ουσίες
- Κόλλες
- Υγρασία

Ο εντοπισμός του αλουμινίου γίνεται με τη χρήση ανιχνευτών. Συνήθως τα ποσοστά επιμολύνσεων, μετά από ένα σωστό καθαρισμό, κυμαίνονται σε επίπεδα μικρότερα του 1%. Η δυσκολία έγκειται στην ελαχιστοποίηση των επιπέδων αυτών.

4.6.4 Αποθήκευση Πλαστικών Αποβλήτων μετά το Διαχωρισμό

Η βροχή δεν έχει επιπτώσεις στην ποιότητα των πλαστικών. Ωστόσο η υπεριώδης (UV) ακτινοβολία υποβαθμίζει τη φυσική και χημική δομή τους. Η επίδραση της UV ακτινοβολίας εξαρτάται από το είδος του πολυμερούς. Εάν τα πλαστικά πρέπει να αποθηκευτούν σε εξωτερικό χώρο, θα πρέπει να καλύπτονται για να προστατευτούν από την ακτινοβολία. Για την αποφυγή μολύνσεων από σκόνη και ρύπους, τα πλαστικά πρέπει να αποθηκευτούν σε καθαρό πάτωμα.

Όταν τα πλαστικά αποθηκεύονται σε εσωτερικό χώρο, πρέπει να εγκατασταθούν συστήματα πυρασφάλειας και πρόληψης. Τα πλαστικά είναι εύφλεκτα και ενώ συσκευασμένα είναι δύσκολο να αναφλεχτούν, είναι πολύ πιο εύκολο για τα μη συσκευασμένα. Όπως γίνεται κατανοητό, αυτά τα συστήματα πρέπει να ενσωματωθούν κατά τον σχεδιασμό των χώρων αποθήκευσης.

4.7 ΟΜΟΓΕΝΟΠΟΙΗΣΗ-ΠΕΛΛΕΤΟΠΟΙΗΣΗ

4.7.1 Γενικά

Τα πλαστικά απορρίμματα μετά το στάδιο της προ-επεξεργασίας τους φέρονται στο κύριο στάδιο της επεξεργασίας τους, την Ομογενοποίηση /Πελετοποίηση. Η Ομογενοποίηση-Πελετοποίηση των τεμαχισμένων, διαχωρισμένων και καθαρών πλαστικών σωματιδίων αποτελεί τη βασική διεργασία της μηχανικής ή δευτερογενούς ανακύκλωσης, ειδικά για τα ανάμικτα πλαστικά. Η ομογενοποίηση δηλαδή η ομοιόμορφη ανάμιξη των σωματιδίων των πολυμερών, μαζί με όλες εκείνες τις πρόσθετες ουσίες των πλαστικών που βελτιώνουν τις

ιδιότητες τους, είναι αναγκαία επειδή καθορίζει την ποιότητα του τελικού προϊόντος της δεδομένης τροφοδοσίας. Επιτυγχάνεται στην κατάσταση τήγματος χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά επεξεργασίας των θερμοπλαστικών υλικών. Στη συνέχεια το τήγμα μετατρέπεται σε πελλέτες, στην κατάλληλη δηλαδή μορφή για παραπέρα μορφοποίηση σε νέα πλαστικά προϊόντα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το στάδιο της προ-επεξεργασίας δεν είναι στάδιο αποκλειστικά της μηχανικής ανακύκλωσης. Τεχνικές της προ-επεξεργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο κατά τη πρωτογενή όσο και κατά τη τριτογενή/τεταρτογενή ανακύκλωση. Βέβαια στη μηχανική ανακύκλωση είναι σημαντικότερος ο διαχωρισμός/καθαρισμός των πλαστικών απορριμμάτων με σκοπό να εξασφαλιστεί η βέλτιστη τροφοδοσία.

Μετά την προ-επεξεργασία, το καθαρισμένο ρεύμα σκάρτου πλαστικού μετατρέπεται στη κατάλληλη μορφή (πελλέτες) ώστε να τροφοδοτήσει τη μηχανή μορφοποίησης. Για το σκοπό αυτό προωθείται σε εκβολέα και επαναπλαστικοποιείται με ομογενοποίηση σε κατάσταση τήγματος. Ο εκβολέας φέρει νηματοειδή μήτρα διαμέσου της οποίας εξαναγκάζεται να διέλθει το τήγμα του πλαστικού και εφόσον το νηματοειδές τήγμα ψυχθεί σε λουτρό οδηγείται σε στερεά μορφή στον πελλετοποιητή. Η πελλετοποίηση είναι αναγκαία επειδή έτσι αποφεύγεται ο μπλοκάρισμα των μηχανών μορφοποίησης με αποτέλεσμα την αποφυγή αστοχιών στο τελικό προϊόν.

Επιτυχής διαχωρισμός σε εργοστάσια προ-επεξεργασίας έχει κατορθωθεί κυρίως για τις πολυολεφίνες από μίγματα πλαστικών με αποτέλεσμα τη δημιουργία ανεξάρτητων, κατά είδος πολυμερών, ρευμάτων. Ο διαχωρισμός και η ανακύκλωση των πολυολεφινών είναι πάρα πολύ σημαντικά γιατί οι πολυολεφίνες αποτελούν το 60% των δημοτικών πλαστικών απορριμμάτων συσκευασίας.

Τα υπολειπόμενα ανάμικτα πλαστικά μετά την απομάκρυνση των πολυολεφινών, δεν υφίστανται τα υψηλού κόστους στάδια της προ-επεξεργασίας που έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα. Αυτό συμβαίνει διότι δεν είναι πάντα εύκολο να επιτευχθούν οικονομικές διεργασίες διαχωρισμού που να μπορούν να διαχωρίσουν τη μεγάλη ποικιλία των πλαστικών που βρίσκονται στα δημοτικά απορρίμματα και να παραχθούν καθαρά και ομογενοποιημένα υλικά.

Για τη χύτευση των ανάμικτων πλαστικών απορριμμάτων τα οποία μπορεί να είναι επιμολυσμένα με μη-πλαστικές προσμίξεις χρησιμοποιούνται κλασσικές διεργασίες μορφοποίησης. Αυτά τα πλαστικά προϊόντα της δευτερογενούς ανακύκλωσης εξαιτίας των πολύ κακών μηχανικών ιδιοτήτων δεν είναι ανταγωνιστικά με τα αρχικά πλαστικά αλλά με τα άλλα υλικά όπως το ξύλο, τα μέταλλα και το τσιμέντο. Σε σχέση όμως με τα τελευταία πολλές φορές εμφανίζουν

πολύ καλύτερες ιδιότητες. Αν και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι φθηνότερα των συμβατικών, τυχαίνουν όμως ευρύτερων εφαρμογών εξαιτίας της ανθεκτικότητάς τους και της μεγάλης διάρκειας ζωής τους χωρίς απαίτηση δαπανηρών συντηρήσεων. Επίσης εξαιτίας του τομέα εφαρμογών τους είναι μεγάλων γενικά διαστάσεων και οι διάφορες προσμίξεις, όπως και τα μη τηγμένα πλαστικά δεν επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές τους ιδιότητες.

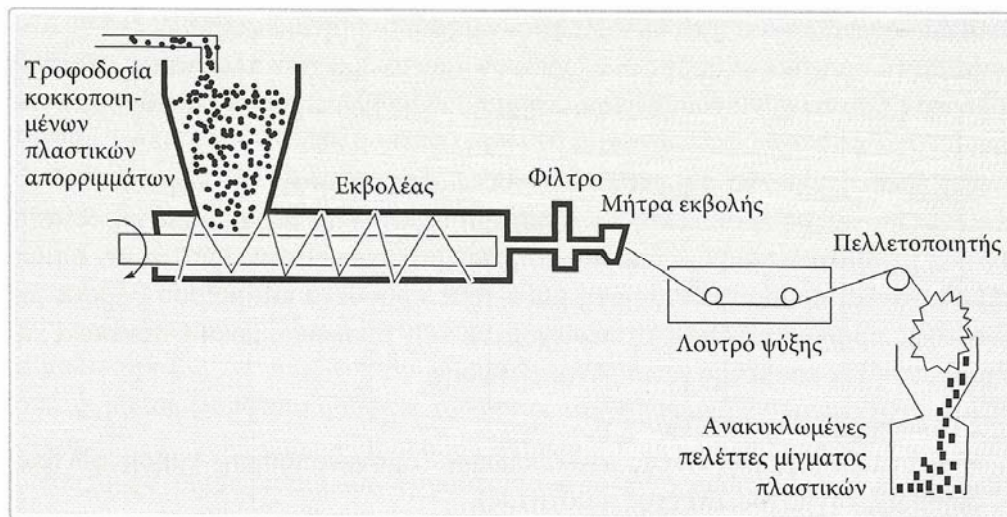
Τα λαμβανόμενα προϊόντα από τη μηχανική ανακύκλωση ανάμικτων πλαστικών απορριμμάτων χρησιμοποιούνται σε πλάκες πεζοδρομίων, πάγκους, τραπέζια πάρκων, φράκτες κ.α. και συνήθως είναι γκρίζων ή σκούρων αποχρώσεων, φέρουν στίγματα κ.α. μπορούν όμως να τύχουν χρωματισμού με τη μέθοδο θερμικού ψεκασμού ή να επικαλυφθούν με διακοσμητικά φιλμ. Μια εναλλακτική μέθοδος διαχωρισμού των ανάμικτων πλαστικών στα ομοπολυμερή που τα συνιστούν είναι η Χημική Ανακύκλωση που αναπτύσσεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι όπως στην πρωτογενή έτσι και στη δευτερογενή ανακύκλωση τα πολυμερή υφίστανται θερμική και φωτοαποδόμηση με συνέπεια την υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Επιπλέον επιμολύνονται προσροφώντας στη μάζα τους πρόσθετα και μικρού βάρους μη-πλαστικές προσμίξεις, όπως τα περιεχόμενα των συσκευασιών, με συνέπεια την επιμόλυνση της επόμενης γενιάς ανακύκλωσης.

4.7.2 Ο εκβολέας

Ο βασικός πυρήνας της Ομογενοποίησης-Πελλετοποίησης είναι ένας κοχλιωτός εκβολέας. Στο Σχήμα 4.18 απεικονίζεται σχηματικά ο κοχλιωτός εκβολέας όπου στην έξοδό του φέρει φίλτρο διήθησης και συνδέεται με πελλετοποιητή.

Το κοκκοποιημένο μίγμα φέρεται στην χοάνη τροφοδοσίας του εκβολέα. Με την περιστροφή του κοχλία το πλαστικό αφενός μεταφέρεται αφετέρου ομογενοποιείται και εξαναγκάζεται να διέλθει μέσω φίλτρου διήθησης από την νηματοιειδή μήτρα. Κατά τη μεταφορά του το πλαστικό διαμέσου του σωλήνα (βαρελιού) του εκβολέα τήκεται μετατρεπόμενο σε ιξώδες ρευστό. Η θερμότητα για την τήξη του υλικού προσδίδεται από ηλεκτρικές αντιστάσεις που είναι τοποθετημένες στο σωλήνα του εκβολέα, καθώς και από την ταχεία περιστροφή του κοχλία (θερμότητα διάτμησης). Το παχύρευστο τήγμα πλαστικού εξαναγκάζεται να διέλθει από την νηματοιειδή μήτρα και στη συνέχεια ψύχεται σε λουτρό για να οδηγηθεί τελικά σε στερεή μορφή, στο πελλετοποιητή.



Σχήμα 4.18 Κοχλιωτός εκβολέας-πελετοποιητής [2].

Στη δευτερογενή ανακύκλωση η οποία στηρίζεται στην ομογενοποίηση τήγματος θα πρέπει τα πλαστικά του μίγματος να υπόκεινται σε υψηλή ταχύτητα διάτμησης και υψηλή θερμοκρασία για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Για να επιτευχθεί καλή διασπορά θα πρέπει όλα τα συστατικά του μίγματος να είναι σε κατάσταση τήγματος. Βέβαια η υψηλή θερμοκρασία προκαλεί αποδήμηση των πολυμερών σε μικρότερα μόρια με χαμηλότερα σημεία τήξης, γι' αυτό το λόγο συνήθως μειώνονται οι χρόνοι παραμονής. Για να ελαττωθεί το κόστος του προϊόντος η διαδικασία πρέπει να περιλαμβάνει ένα και όχι δύο στάδια παραγωγής, όπως συμβαίνει στις διεργασίες μορφοποίησης όπου υπάρχει ένα είδος πλαστικού: ομογενοποίηση και πελετοποίηση στο πρώτο στάδιο και εκβολή ή έκχυση στο δεύτερο. Επίσης η σύσταση της τροφοδοσίας θα πρέπει να είναι σταθερή. Αν και η χρησιμοποιούμενη ενέργεια κατά την ανακύκλωση είναι μικρότερη της παραγωγής πλαστικού από παρθένα ρητίνη, το κόστος του εξοπλισμού της δευτερογενούς ανακύκλωσης είναι υψηλότερο.

Το σκάρτο πλαστικό θα πρέπει να είναι καλά κοκκοποιημένο επειδή υψηλοί λόγοι μήκους προς πάχος σωματιδίων μπορούν να προκαλέσουν φράξιμο της χοάνης τροφοδοσίας του εκβολέα. Τα σωματίδια που μπορούν να προκαλέσουν φράξιμο της τροφοδοσίας έχουν λόγο μήκους προς πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 4-10. Αντίθετα το πρόβλημα εμπλοκής της τροφοδοσίας αντιμετωπίζεται όταν ο λόγος αυτός κυμαίνεται μεταξύ 0.5-1. Το σκάρτο πλαστικό με αυτό το μέγεθος των σωματιδίων τροφοδοτείται στον εκβολέα και επαναπλαστικοποιείται.

4.7.3 Φίλτρα Διήθησης Προσμίξεων του Τήγματος Ανακυκλωμένων Πλαστικών

Επειδή πολλές εφαρμογές απαιτούν μηδενικά επίπεδα επιμόλυνσης των ανακυκλωμένων πελλετών, τοποθετούνται ειδικά φίλτρα στην έξοδο του εκβολέα. Έτσι το τήγμα φιλτράρεται από τις διάφορες επιμολύνσεις οι οποίες δεν κατέστη δυνατόν να παρακρατηθούν στο στάδιο της προεπεξεργασίας και μπορεί να είναι μέταλλα, χαρτιά, ίνες και ασύμβατα πολυμερή υψηλότερου σημείου τήξης από αυτό του πολυμερούς που υφίστανται την κατεργασία. Τα επίπεδα της στερεάς επιμόλυνσης θα πρέπει να είναι χαμηλότερα του 1% κ.β., ώστε να αποφεύγεται η τακτική συντήρηση του φίλτρου.

Για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της κοκκοποίησης των πλαστικών χρησιμοποιείται μαχαίρι για τον τεμαχισμό. Κατά τη διάρκεια της κοπής τεμαχίδια μετάλλου από τα μαχαίρια τεμαχισμού διεισδύουν στο εσωτερικό του υλικού. Επιπλέον είναι δυνατόν να αναμειχθούν ανεπιθύμητες ίνες από ξύλο, άμμος, σκόνη και τεμαχίδια χαρτιού. Επίσης κατά τη διάρκεια της εκβολής σχηματίζονται συσσωματώματα από τα διάφορα πρόσθετα των πλαστικών, όπως και η επανειλημμένη τήξη του πολυμερούς έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σωματιδίων πολυμερούς με κρυσταλλική δομή

Οι περιεχόμενες προσμίξεις στο τήγμα έχουν διάφορες επιπτώσεις τόσο στη διαδικασία εκβολής όσο και στην ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος. Οι «χοντρές» προσμίξεις πρέπει να απομακρυνθούν (φιλτραριστούν) από το τήγμα για να προστατευτεί ο εξοπλισμός, όπως είναι ο εκβολέας, η αντλία και η χύτρα χύτευσης. Μικρά άτηκτα κομμάτια πλαστικού μπορεί να προκαλέσουν ρωγμές ή ατέλειες στο προϊόν. Κρυσταλλικά σωματίδια του πολυμερούς έχουν επιπτώσεις στην ποιότητα και πρέπει να απομακρυνθούν από το σύστημα, ειδικά όταν το προϊόν πρέπει να τηρεί αυστηρές προδιαγραφές.

Η φύση των προσμίξεων του πολυμερούς καθορίζει το σύστημα φίλτρου και τον αριθμό mesh του φίλτρου. Ο απαιτούμενος αριθμός mesh συσχετίζεται με την επιφάνεια του φίλτρου με αποτέλεσμα να διατηρείται η απώλεια πίεσης σε αποδεκτά όρια.

Τα χρησιμοποιούμενα φίλτρα διακρίνονται στα φίλτρα επίπεδης πλάκας ή τύπου ταινίας και στα τριών διαστάσεων φίλτρα, όπως ο τύπος φύσιγγας, ο τύπος τυμπάνου (κατά τον οποίο το τήγμα του πολυμερούς διέρχεται δια των οπών του τοιχώματος του τυμπάνου) και ο τύπος παράλληλων δίσκων διαμέσου των οποίων διέρχεται με πίεση το τήγμα.

Τα φίλτρα είναι ουσιαστικά πλέγματα ή πορώδη ανθεκτικά υλικά τα οποία είναι σταθεροποιημένα σε διατάξεις (υποστηρίγματα) οι οποίες διακρίνονται σε διατάξεις συνεχούς ή ασυνεχούς ροής του τήγματος επιτρέποντας αντίστοιχα τη συνεχή ροή ή τη διακοπή της ροής του

τήγματος κατά την αλλαγή τους. Η αλλαγή του φίλτρου γίνεται είτε με την απομάκρυνσή του σε κατεύθυνση κάθετη στη ροή του τήγματος (φίλτρα συρόμενης πλάκας) οπότε διακόπτεται η ροή του, είτε με ταχεία και ελεγχόμενη κίνηση του φίλτρου (φίλτρο τύπου ταινίας), η οποία ελέγχεται από την πίεση του τήγματος και τη θερμοκρασία των σφραγιζόμενων επιφανειών. Στην περίπτωση αυτή δεν διακόπτεται η ροή του τήγματος. Υπάρχουν όμως και αυτόματα συστήματα αυτοκαθαρισμού του φίλτρου με αντιστροφή της ροής του τήγματος τα οποία εφαρμόζονται σε συστήματα επίπεδης πλάκας και τυμπάνου.

4.8 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΟΥΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Για τη βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος προστίθενται μαζί με τα σωματίδια του πλαστικού στη χοάνη τροφοδοσίας του εκβολέα, διάφορα πρόσθετα όπως πλαστικοποιητές, σταθεροποιητές και συμβατοποιητές. Η προσθήκη των σταθεροποιητών, συμβατοποιών, και πληρωτικών υλικών μπορεί να γίνει σε επόμενο στάδιο εφόσον συμβαίνει ανάμιξη του πελλετοποιημένου ανακυκλωμένου πλαστικού με την παρθένα ρητίνη. Γενικά οι προστιθέμενες ουσίες θα πρέπει να είναι σε υγρή μορφή και αναμειγνύονται με την πλαστική τροφοδοσία, που όμως θα πρέπει να έχει υποστεί προθέρμανση. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεταφορέας των υγρών προσθέτων σκόνη παρθένου πλαστικού, υψηλού πορώδους για την αύξηση της απορροφητικότητας τους εξαιτίας του χαμηλού πορώδους του τηγμένου πλαστικού.

Οι πλαστικοποιητές είναι υγρές ή στερεές ενώσεις χαμηλού σημείου τήξεως, συνήθως εστέρες, όπως ο φθαλικός δι(2-αιθυλεξυλεστέρας) (DEHP), οι οποίες εισέρχονται μεταξύ των μακρομοριακών αλυσίδων του πολυμερούς και μειώνουν σημαντικά τις δυνάμεις Van der Waals που αναπτύσσονται με αποτέλεσμα οι αλυσίδες να αποκτούν μεγαλύτερη ευκινησία και το πολυμερές να καθίσταται πιο μαλακό και να μορφοποιείται ευκολότερα. Το 80-85% των πλαστικοποιητών χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή εύκαμπτου PVC. Όπως είναι ευνόητο τα πολυακρυλικά, τα πολυστυρένια, οι πολυολεφίνες και τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή δεν έχουν ανάγκη από πλαστικοποιητές.

Η προσθήκη σταθεροποιητών εξασφαλίζει αντοχή στο ανακυκλούμενο πλαστικό, τόσο κατά τη διάρκεια της διεργασίας, όσο και κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής του ως προϊόντος. Οι σταθεροποιητές προστίθενται σε μικρές ποσότητες και διακρίνονται σε:

- Σταθεροποιητές διεργασίας: πρόκειται για τους τριαλκυλοφωσφορώδεις εστέρες και τα φαινολικά αντιοξειδωτικά που εξασφαλίζουν τη σταθερότητα τήγματος.
- Σταθεροποιητές προστασίας κατά τη χρήση του ανακυκλωμένου πλαστικού προϊόντος: περιλαμβάνουν τους φωτοσταθεροποιητές φωτός (παρεμποδιστική αμίνη + απορροφητικός σταθεροποιητής υπεριώδους ακτινοβολίας) μαζί με τους σταθεροποιητές διεργασίας και χρησιμοποιούνται για να εξασφαλίσουν τη σταθερότητα χρώματος και τη συνοχή της πλαστικής μάζας.

Τέλος η βελτίωση της ποιότητας των τελικών προϊόντων επιτυγχάνεται με τη προσθήκη συμβατοποιητών. Με τους συμβατοποιητές επιδιώκεται ο έλεγχος της μορφολογίας του μίγματος των επεξεργαζόμενων πολυμερών και η πρόσφυση μεταξύ των δύο φάσεων. Με τον τρόπο αυτό, παρά την διατήρηση των φάσεων, επιτυγχάνεται η διατήρηση των ιδιοτήτων των συστατικών και βελτιώνονται οι ιδιότητες του μίγματος.

4.9 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΟΥΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Τα λαμβανόμενα προϊόντα από ανακύκλωση πλαστικών υφίστανται μια σειρά ελέγχων με σκοπό την εξασφάλιση της ποιότητας τους. οι σημαντικότερες ιδιότητες οι οποίες εξετάζονται είναι:

- Αντοχή σε εκφυλισμό (N/m^2). Πρόκειται για την αντίσταση που εμφανίζει ένα υλικό στον εφελκυσμό.
- Επιμήκυνση (%). Είναι η αύξηση του μήκους ενός υλικού όταν σε αυτό επιδρά μια τάση για ορισμένο χρόνο.
- Αντοχή σε κάμψη (N/m^2).
- Μέτρο κάμψης (N/m^2). Μετράται η ακαμψία του πλαστικού, προσδιορίζοντας την οριακή δύναμη που απαιτείται για την κάμψη ενός δείγματος του υλικού.
- Αντοχή σε κρούση με ή χωρίς εγκοπή (Notched izod impact strength, N/m). Πρόκειται για τον προσδιορισμό της τάσης εγκοπής που απαιτείται για να σπάσει το δείγμα του πλαστικού σε ορισμένο χρόνο.
- Θερμοκρασία κάμψης (παραμόρφωσης) υπό φόρτιση και θέρμανση (Heat deflection temperature. $^{\circ}C$). Πρόκειται για το μέτρο αντίστασης του πλαστικού σε παραμόρφωση υπό δεδομένη φόρτιση σε αυξανόμενες θερμοκρασίες.
- Δείκτης ιξώδους
- Σκληρότητα (Rockwell)

Η επιμήκυνση, όπως και η αντοχή σε κρούση επηρεάζονται σημαντικά από την επιμόλυνση του πλαστικού. Το μέτρο κάμψης, η θερμοκρασία, κάμψης και η τάση εκφυλισμού είναι καλοί δείκτες του επιπέδου συγκέντρωσης των πλαστικοποιητών. Τέλος ο δείκτης ιξώδους υποδεικνύει αν το υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διεργασίες μορφοποίησης με έγχυση. Το ιξώδες ρυθμίζεται με προσθήκη πολυμερών του ίδιου είδους αλλά διαφορετικού μοριακού βάρους ή με προσθήκη πλαστικοποιητή. Η αντοχή σε κρούση ρυθμίζεται με προσθήκη κατάλληλου τροποποιητή (modifier) και η σκληρότητα με ελάττωση του πλαστικοποιητή ή με προσθήκη μη πλαστικοποιημένου πολυμερούς.

5. ΤΡΙΤΟΓΕΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όσο πιο διαφορετικού είδους και όσο πιο μολυσμένα είναι τα πλαστικά απορρίμματα τόσο πιο δύσκολο είναι να τύχουν δευτερογενούς ή μηχανικής ανακύκλωσης. Τα πλαστικά είναι γενικά ασύμβατα μεταξύ τους και οι ιδιότητες των μιγμάτων είναι γενικά κατώτερες των παρθένων πλαστικών. Η ποιότητα των τελικών προϊόντων που παράγονται με μηχανική ανακύκλωση, πέρα από την τεχνολογία που εφαρμόζεται, εξαρτάται από τη σύσταση του μίγματος των απορριμμάτων προς ανακύκλωση. Για παράδειγμα, τα δευτερογενή προϊόντα, επειδή η ποιότητά τους είναι χαμηλότερη από αυτή του παρθένου υλικού, αποκλείονται από εφαρμογές που θα τα φέρουν σε επαφή με τρόφιμα.

Στις μέρες μας η μηχανική ανακύκλωση συγκεκριμένων πολυμερών (π.χ. πολυολεφίνες και PET) είναι οικονομικά βιώσιμη αλλά είναι αποτελεσματική μόνο για το 15-20% του συνόλου των πλαστικών απορριμμάτων. Για την αύξηση του επιπέδου ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων (π.χ. πλαστικά συσκευασίας) σε ποσοστά μέχρι και 40% προωθείται διεθνώς μια σειρά νομοθετικών πρωτοβουλιών. Σε αυτήν την περίπτωση, όμως, η επιμόλυνση των ανάμικτων πλαστικών θα είναι ακόμα μεγαλύτερη με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος διαχωρισμού.

Η ανάγκη ύπαρξης κατάλληλης τεχνολογίας ανάκτησης μετακαταναλωτικών πλαστικών, η οποία ταυτόχρονα θα εξασφαλίσει την άριστη ποιότητα των ανακυκλωμένων προϊόντων, οδήγησε στην εξέλιξη του τομέα της τριτογενούς ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων. Η λύση της τριτογενούς ανακύκλωσης έχει σημαντικά πλεονεκτήματα και έτσι παρά το υψηλότερο κόστος της φαίνεται να καθίσταται βιώσιμη και εναλλακτική της μηχανικής ανακύκλωσης.

Τα μολυσμένα και ανάμικτα πλαστικά που δεν μπορούν να τύχουν μηχανικής ανακύκλωσης χρησιμοποιούνται στην τριτογενή και τεταρτογενή ανακύκλωση των πλαστικών. Με την τριτογενή ανακύκλωση λαμβάνονται πρώτες ύλες για την παραγωγή νέων πολυμερών και γενικότερα πετροχημικών, ενώ με την τεταρτογενή ανακύκλωση ανακτάται ενέργεια από την καύση των απορριμμάτων.

Περιορισμοί λαμβάνονται και στις δυο αυτές διαδικασίες ανακύκλωσης ως προς την σύνθεση του μίγματος της τροφοδοσίας, δηλαδή του κατά πόσον περιλαμβάνουν πλαστικά ιδιαίτερης σύνθεσης,

κύρια αυτά που περιέχουν ετεροάτομα, όπως χλώριο, οξυγόνο, άζωτο. Τα εκλυόμενα αέρια και τα παραπροϊόντα που σχηματίζονται από αυτού του τύπου τις τροφοδοσίες είναι ρυπογόνα και επιβλαβή για την υγεία. Βέβαια ο καθαρισμός των αερίων της καύσης (τεταρτογενής ανακύκλωση), που διαφεύγουν στο περιβάλλον, είναι πιο δαπανηρός σε σχέση με τα επικίνδυνα παραπροϊόντα της τριτογενούς θερμικής επεξεργασίας, οπότε η τριτογενής ανακύκλωση καθίσταται πλεονεκτικότερη της καύσης.

Η τριτογενής ανακύκλωση περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα διεργασιών, που διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση το είδος του πολυμερούς που ανακυκλώνεται:

- Στη Θερμική ανακύκλωση (ή θερμόλυση), όπου η σχάση των πολυμερικών αλυσίδων επιτελείται μέσω καταλυτικών ή θερμικών μεθόδων, η σημαντικότερη εκ των οποίων είναι η διεργασία της πυρόλυσης. Οι διεργασίες αυτής της κατηγορίας χαρακτηρίζονται για τη σφοδρότητα των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας και ως εκ τούτου για τον τρόπο με τον οποίο επεμβαίνουν στην πολυμερική δομή. Κρίνονται κατάλληλες για τη μετατροπή πολυμερών προσθήκης (βινυλικά, ακρυλικά, φθοροπλαστικά και πολυολεφίνες) σε πετροχημικά προϊόντα (παράγωγα πετρελαίου) ενώ γενικά η πλαστική τροφοδοσία δεν είναι απαραίτητο να διατίθεται σε καθαρή μορφή.
- Στη Χημική (ή θερμοχημική) ανακύκλωση, όπου με τη βοήθεια χημικών αντιδράσεων επιτελείται σχάση των πολυμερικών δεσμών (αποπολυμερισμός). Τα προκύπτοντα μονομερή ή ολιγομερή υφίστανται λεπτομερή καθαρισμό και στη συνέχεια επαναπολυμερισμό προς νέα πολυμερή. Η ανακύκλωση των πλαστικών με χημικές διεργασίες λειτουργεί άριστα με τα πολυμερή που παράγονται με πολυμερισμό συμπύκνωσης (πολυεστέρες, νάυλον και πολυουρεθάνες), αλλά πρόσφατα έχουν μελετηθεί και διεργασίες χημικής ανακύκλωσης πολυμερών πολυμερισμού προσθήκης (π.χ. PVC).

5.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

Όπως αναφέρθηκε, ως θερμική ανακύκλωση ή θερμόλυση ή θερμική επεξεργασία ορίζεται το σύνολο των διεργασιών κατά τις οποίες το οργανικό συστατικό του πλαστικού απορρίμματος μετατρέπεται με θερμική διάσπαση (thermal cracking) σε υψηλής ποιότητας προϊόντα δύλισης όπως είναι η νάφθα (απόσταγμα πετρελαίου με σημείο ζέσεως 100-200°C), το αργό πετρέλαιο (ακατέργαστο πετρέλαιο) ή το αέριο σύνθεσης (μείγμα CO και H₂). Κατά την θερμική ανακύκλωση τα

πλαστικά απορρίμματα διασπώνται σε πετροχημικές πρώτες ύλες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή νέων πετροχημικών και πλαστικών προϊόντων, χωρίς καμία υποβάθμιση της ποιότητάς τους και χωρίς κανένα περιορισμό κατά την εφαρμογή τους.

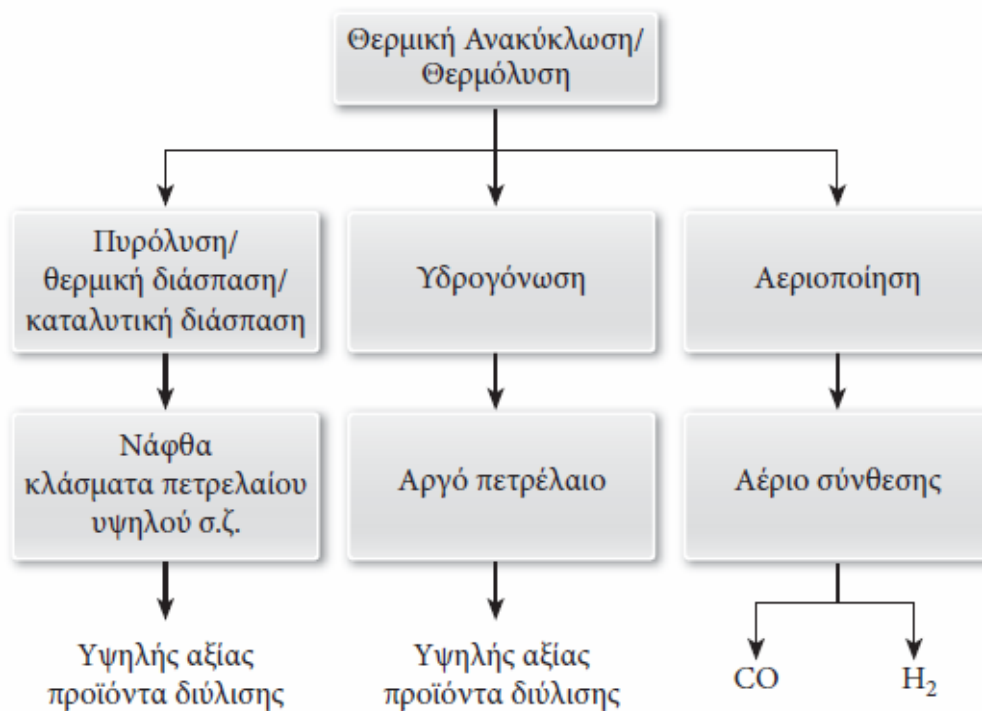
Τα μετακαταναλωτικά πλαστικά απορρίμματα αποτελούνται από την αλυσίδα του πολυμερούς, χημικούς επιμολυντές και έτερο-άτομα όπως το χλώριο, το οξυγόνο και το άζωτο. Επίσης διάφορες φυσικές ακαθαρσίες όπως πληρωτικά υλικά, χρωστικές ουσίες, σκόνη και ανόργανα υλικά, τα οποία προκύπτουν από ατελή διαχωρισμό όπως τα φύλλα αλουμινίου. Για να χρησιμοποιηθούν τα πλαστικά απορρίμματα ως πρώτη ύλη για νέα πλαστικά ή για την παραγωγή καυσίμου θα πρέπει:

- Οι πολυμερικές αλυσίδες να υποστούν θερμική διάσπαση
- Τα ετεροάτομα (χλώριο, οξυγόνο και άζωτο) να διαχωριστούν με χημικές μεθόδους
- Τα ανόργανα σωματίδια (π.χ. σκόνη, φύλλα αλουμινίου κ.τ.λ.) να διαχωριστούν με φυσικές μεθόδους. Μεταλλικά ή ορυκτής προέλευσης αντικείμενα πρέπει να απομακρύνονται εξαρχής από την διεργασία για να αποφεύγεται το μπλοκάρισμα και η διάβρωση των γραμμών ροής και των αντλιών.

Οι κύριες τεχνικές της τριτογενούς ανακύκλωσης των πλαστικών με θερμική επεξεργασία (Σχήμα 5.1) είναι οι εξής:

- Πυρόλυση (όταν η διαδικασία διάσπασης γίνεται απουσία αέρα και σε θερμοκρασία $T > 600 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Θερμική διάσπαση (ή πυρόλυση σε χαμηλότερη θερμοκρασία, $T \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Καταλυτική διάσπαση (ή θερμική διάσπαση παρουσία καταλυτών)
- Υδρογόνωση (διάσπαση παρουσία υδρογόνου)
- Αεριοποίηση (παρουσία ελεγχόμενης ποσότητας οξυγόνου και παραγωγής αερίου σύνθεσης).

Κατά την πυρόλυση, θερμική διάσπαση, καταλυτική διάσπαση και υδρογόνωση μετατρέπονται οι αλυσίδες των πολυμερών (υδρογονανθράκων) σε μικρότερα μόρια (με μηχανισμό ελευθέρων ριζών), από τα οποία παράγονται προϊόντα πετρελαίου. Αντίθετα κατά την αεριοποίηση συμβαίνει μερική οξείδωση των υδρογονανθράκων, με περιορισμένη ποσότητα οξυγόνου, κατά την οποία παράγεται αέριο σύνθεσης το οποίο είτε μετατρέπεται σε βενζίνη και ντίζελ με την διεργασία Fischer-Tropsch, είτε στην παραγωγή χημικών.



Σχήμα 5.1 Οι κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην τριτογενή ανακύκλωση πλαστικών με θερμόλυση [2].

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μονάδες π.χ. υδρογόνωσης υφίστανται σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις διυλιστηρίων πετρελαίου, και για τον λόγο αυτό οι διεργασίες υδρογόνωσης των πλαστικών απορριμμάτων εφαρμόζονται στις ήδη υπάρχουσες μονάδες. Αντίθετα οι μονάδες πυρόλυσης θα πρέπει να κατασκευαστούν εξ αρχής. Η μέθοδος αεριοποίησης εφαρμόστηκε διαδοχικά για τον γαιάνθρακα, κωκ, πετρέλαιο, φυσικό αέριο και τα πλαστικά.

Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μονάδων τριτογενούς ανακύκλωσης πλαστικών με θερμική επεξεργασία τα όρια εκπομπών αυτών των μονάδων όπως και των μονάδων καύσης (τεταρτογενής ανακύκλωση) καθορίζονται από την Οδηγία 2000/76/ΕΚ. Οι μέθοδοι θερμικής ανακύκλωσης υπερτερούν της καύσης ως προς τις μειωμένες εκπομπές αερίων οξειδίων π.χ. NO_x και κυρίως τις διοξίνες. Επίσης τα στερεά υπολείμματα των θερμικών διεργασιών περιέχουν μικρότερες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων σε σχέση με τα υπολείμματα της καύσης.

Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων των διεργασιών θερμικής ανακύκλωσης έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για αυτές τις τεχνολογίες. Επίσης με τη βελτίωση που έχει επιτευχθεί τελευταία της οικονομικής τους βιωσιμότητας οι τεχνικές της θερμικής ανακύκλωσης αποτελούν μία ελκυστική εναλλακτική λύση ως προς την

καύση των απορριμμάτων. Οι διάφορες μέθοδοι θερμικής ανακύκλωσης παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

5.3 ΠΥΡΟΛΥΣΗ

Η πυρόλυση των πλαστικών απορριμμάτων και των χρησιμοποιημένων ελαστικών αυτοκινήτων έχει μελετηθεί σε δεξαμενές τήξης (melting vessels), σε υψικαμίνους (blast furnaces), σε αντιδραστήρες εμβολικής ροής (tube reactors), σε περιδινώμενες κάμινους (rotary kilns), σε θαλάμους υψηλών θερμοκρασιών (cooking chambers) και σε αντιδραστήρες ρευστοστερεάς κλίνης (fluidized bed reactors). Η εξελικτική πορεία αυτών των διατάξεων αναδεικνύει τις περιδινώμενες κάμινους και τους αντιδραστήρες ρευστοστερεάς κλίνης ως τις καταλληλότερες διατάξεις πυρόλυσης πλαστικών, λόγω των ικανοποιητικών βαθμών ανάμιξης και μεταφοράς θερμότητας που επιτυγχάνουν.

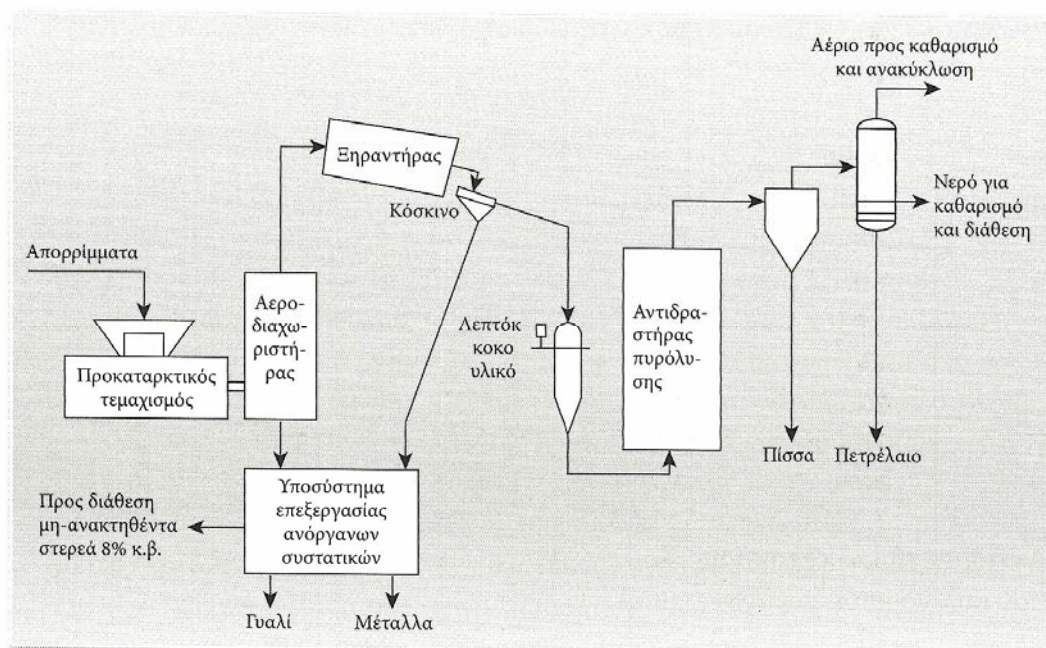
Η πυρόλυση είναι μια ενδόθερμη διαδικασία. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται ενέργεια υπό μορφή θερμότητας ώστε να πραγματοποιηθεί η αντίδραση. Η πυρόλυση είναι μια θερμική υποβάθμιση των προϊόντων που περιέχουν άνθρακα. Η διαδικασία συνήθως πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες της τάξης των 400-800 °C σε μια ατμόσφαιρα όπου το οξυγόνο είτε είναι πολύ περιορισμένο, είτε αποκλείεται, ώστε να εμποδιστεί η καύση. Σε αυτές τις θερμοκρασίες τα στερεά οργανικά υλικά εκπέμπουν αέρια και αποσυντίθενται. Τα προϊόντα της είναι στερεά, υγρά και αέρια, όπου οι ποσότητες αυτών εξαρτώνται από τη μέθοδο της πυρόλυσης και κάποιους παράγοντες όπως η θερμοκρασία, ρυθμός θέρμανσης, πίεση και χρόνος παραμονής. Παράγονται περισσότερα υγρά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες παράγονται περισσότερα αέρια. Ο χρόνος παραμονής των αποβλήτων στον αντιδραστήρα κυμαίνεται από 30 λεπτά έως 1 ώρα.

Γενικά η μέθοδος της πυρόλυσης δεν ενδείκνυται για την ανάκτηση των μονομερών. Η κατεργασία των πολυολεφίνων δίνει τα ακόλουθα κλάσματα (% κ.β.):

- Αέριο: 20-90 %
- Πετρέλαιο: 5-45 %
- Τέφρα και πληρωτικά υλικά: 0,2-10 %

Η σύσταση του αερίου είναι μεθάνιο, αιθάνιο, αιθυλένιο, προπυλένιο και βουτένιο. Η ανάκτηση αιθυλενίου και προπυλενίου, μέσω πυρόλυσης των πολυολεφίνων δεν ξεπερνά το 60% κ.β. Η υψηλότερη απόδοση σε μονομερή επιτυγχάνεται με τα πολυμερή PS και PMMA, όπου στο πρώτο αντίστοιχα λαμβάνεται 70% στυρένιο σε υγρή μορφή που πρέπει να καθαριστεί με δαπανηρές μεθόδους ώστε να

επαναπολυμεριστεί προς PS, ενώ στο δεύτερο λαμβάνεται 97% μονομερές MMA σε καθαρή μορφή.



Σχήμα 5.2 Διάγραμμα ροής της τεχνολογίας πυρόλυσης που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Garret Research and Development που έχει την έδρα της στο San Diego των ΗΠΑ [2].

Η ανύψωση της θερμοκρασίας αυξάνει το ποσοστό του παραγόμενου αερίου. Μια μικρή ανύψωση στους 540 °C αυξάνει την παραγωγή αερίου κατά 42% σε σχέση με τους 500 °C. Το αέριο αποτελείται από μεθάνιο, αιθένιο, προπένιο, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα. Υψηλές αποδόσεις σε πετρέλαιο (έως και 97 %) μπορούν να επιτευχθούν με πυρόλυση σε δεξαμενές τήξης. Την ιδανική τροφοδοσία αποτελούν εδώ οι πολυολεφίνες και το πολυστυρένιο. Τα κυριότερα συστατικά του παραγόμενου πετρελαίου (υγρού προϊόντος) είναι βενζένιο, τολουένιο και ναφθαλένιο. Το πετρέλαιο που προκύπτει έχει σε μεγάλο ποσοστό ακόρεστες ακραίες ομάδες και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται μόνο για θέρμανση. Η θερμική του αξία κυμαίνεται από 10900 έως 11700 Kcal/kg. Στην Ιαπωνία, εφαρμόζεται καταλυτική πυρόλυση που έχει ως τελικό προϊόν τη βενζίνη.

Τα πλεονεκτήματα της πυρόλυσης είναι τα εξής:

- Χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση
- Διαχείριση διαφόρων τύπων πλαστικών
- Δεν απαιτούνται αντιδραστήρια, ούτε υψηλές πιέσεις
- Όλοι οι ρυπαντές συγκεντρώνονται σε ένα στερεό προϊόν και δεν διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα

Τα μειονεκτήματα της πυρόλυσης είναι τα εξής:

- Συσσωμάτωση σωματιδίων η οποία φράζει σωληνώσεις και βάνες
- Η περιεκτικότητα σε υγρασία θα πρέπει να είναι μικρή
- Δεν συνίσταται το PET γιατί περιέχει οξυγόνο στην αλυσίδα.

5.4 ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ

Η πυρόλυση σε χαμηλή θερμοκρασία ($T \sim 500^{\circ}\text{C}$) ή θερμική διάσπαση (thermal cracking) διαφέρει από την πυρόλυση που γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες στο γεγονός ότι η κυρίαρχη αντίδραση σε αυτήν την περίπτωση είναι ο αποπολυμερισμός ή υγροποίηση δηλαδή η πυρόλυση υγρής φάσης με στόχο την μείωση των αρωματικών προϊόντων και των ελαφρών αερίων που παράγονται κατά την πυρόλυση υψηλών θερμοκρασιών. Τα κύρια προϊόντα είναι υγρά υψηλού σημείου ζέσεως ή κηροί. Τα προϊόντα αυτά υποβάλλονται σε περαιτέρω διεργασίες διάσπασης με ατμό (υδρογόνωση) ή σε διεργασίες καταλυτικής πυρόλυσης για την παραγωγή προϊόντων πετρελαίου υψηλής αξίας όπως βενζίνη και ντήζελ.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον μηχανισμό της θερμικής διάσπασης είναι:

- Η δομή και η χημική σύσταση του πολυμερούς
- Η θερμοκρασία
- Ο χρόνος αντίδρασης
- Ο τύπος του αντιδραστήρα στον οποίο γίνεται η θερμική διάσπαση.

Η θερμική διάσπαση των περισσότερων πλαστικών αρχίζει στους $\sim 300^{\circ}\text{C}$. Συνήθως στις περισσότερες διαδικασίες θερμικής διάσπασης επιλέγεται κατά μέσο όρο μια θερμοκρασία $400-500^{\circ}\text{C}$ ενώ τα πλαστικά βρίσκονται ήδη σε σε ιξώδη κατάσταση ή υγρή φάση. Για τη μετάβαση των πλαστικών από την στερεά στην ιξώδη κατάσταση και στη συνέχεια στη θερμοκρασία αντιδραστήρα συνήθως προηγείται τήξη του πλαστικού είτε σε εκβολέα είτε μέσω διάλυσης του πλαστικού σε θερμό διαλύτη.

Γενικά, πλην λίγων εξαιρέσεων, η κατάλληλη θερμοκρασία για την παραγωγή προϊόντων που θα οδηγήσουν στην παραγωγή πετροχημικών είναι μεταξύ 400 και 600°C , δηλαδή στο διάστημα θερμοκρασιών που διεξάγεται η θερμική διάσπαση, με ρύθμιση όμως του χρόνου παραμονής στον αντιδραστήρα ώστε να αποφευχθεί η υπερ-διάσπαση και η παραγωγή κωκ.

5.5 ΘΕΡΜΙΚΗ/ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ

5.5.1 Η Ιδέα της Καταλυτικής Αποδόμησης

Με την πυρόλυση τα πλαστικά απορρίμματα μετατρέπονται σε ευρείας κλίμακας προϊόντα υδρογονανθράκων, που διακρίνονται στο μη-συμπυκνώσιμο κλάσμα αερίων, στο υγρό κλάσμα πετρελαίου (ελαφρύ και βαρύ κλάσμα) που συνίσταται από παραφίνες, ολεφίνες, ναφθαλένια και αρωματικά και στο στερεό υπόλειμμα (π.χ. εξανθράκωμα ή κωκ). Η θερμική διάσπαση, αντίθετα, παράγει χαμηλής αξίας μίγματα υδρογονανθράκων ευρείας σύστασης, η οποία κυμαίνεται από τα ελαφρά αέρια των αλκανίων μέχρι και το κωκ. Τα κύρια προϊόντα της θερμικής διάσπασης είναι κηροί και τα οποία πρέπει να υποβληθούν σε παραπέρα επεξεργασία (υδρογόνωση, ή καταλυτική πυρόλυση) για την παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας, όπως βενζίνης, ντίζελ, ή ολεφινών.

Για τη βελτίωση των προϊόντων της θερμικής διάσπασης, για να ληφθούν εμπορεύσιμα προϊόντα πετρελαίου καθίσταται αναγκαίο είτε να βρεθούν οι κατάλληλες συνθήκες θερμικής διάσπασης είτε να υποστούν τα προϊόντα της καταλυτικής αποδόμησης. Με την καταλυτική αποδόμηση επιτυγχάνεται μια πιο στενή κατανομή των παραγομένων προϊόντων, ως προς τον αριθμό ατόμων άνθρακα που περιέχουν και το προκύπτον μίγμα υδρογονανθράκων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο (π.χ. ντίζελ, βενζίνη).

Ο συνδυασμός θερμικής διάσπασης και καταλυτικής αποδόμησης παρουσιάζει ένα μεγάλο ενδιαφέρον τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική άποψη. Τα πλεονεκτήματα της διεργασίας αυτή είναι:

- χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- διαχείριση πλαστικών απορριμμάτων που δε μπορούν να ανακυκλωθούν με άλλο εναλλακτικό τρόπο
- δεν απαιτείται η διοχέτευση ατμού ή υδρογόνου. Δεν απαιτείται συνδυασμός θερμικής διάσπασης με υδρογόνωση

Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας οφείλεται στην παρουσία του καταλύτη, ο οποίος μειώνει τη θερμοκρασία αντίδρασης και αυξάνει την ταχύτητα της λόγω της μείωσης της ενέργειας ενεργοποίησης.

Η προσθήκη βέβαια καταλύτη συνοδεύεται από αύξηση του κόστους. Για τη μείωση του κόστους προτιμώνται κυρίως οι εξαντλημένοι καταλύτες, FCC οι οποίοι διαθέτουν υψηλή δραστηριότητα και χρησιμοποιούνται αντίστοιχα στην καταλυτική πυρόλυση (Fluid Catalytic Cracking, FCC) των κλασμάτων πετρελαίου στις εγκαταστάσεις των διωλιστηρίων. Οι καταλύτες FCC αποτελούνται κυρίως από αργίλους και ζεόλιθους τύπου «Υ».

Η φύση των καταλυτών παίζει σημαντικό ρόλο στην καταλυτική αποδόμηση. Επιπλέον είναι δυνατόν να υποστούν απενεργοποίηση κατά

τη διάρκεια της αποδόμησης λόγω εναπόθεσης σε αυτούς υπολειμμάτων κωκ και άλλων προϊόντων, όπως ενώσεις που περιέχουν Cl και N. Για το λόγο αυτό απαιτείται προ-επεξεργασία των πλαστικών απορριμμάτων για την απομάκρυνση όλων εκείνων των συστατικών που επηρεάζουν τη δράση του καταλύτη.

5.5.2 Χαρακτηριστικά

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της θερμικής διάσπασης μαζί με τις βελτιώσεις που επιφέρει η καταλυτική διάσπαση στα προϊόντα της.

Χαρακτηριστικά θερμικής διάσπασης:

- υψηλή παραγωγή αερίων με ένα ή δύο άτομα άνθρακα (C_1 - C_2)
- οι ολεφίνες είναι λιγότερο υποκατεστημένες
- μερικές διολεφίνες σχηματίζονται σε υψηλές θερμοκρασίες
- η επιλεκτικότητα της μεθόδου για παραγωγή βενζίνης είναι χαμηλή, διότι παράγονται προϊόντα με ευρεία κατανομή μοριακών βαρών
- η παραγωγή αερίου και κωκ είναι υψηλή
- η ταχύτητα των αντιδράσεων είναι χαμηλή συγκρινόμενη με αυτή της καταλυτικής διάσπασης

Βελτιώσεις/διαφοροποιήσεις λόγω καταλυτικής αποδόμησης:

- υψηλή παραγωγή αερίων με τρία ή τέσσερα άτομα άνθρακα (C_3 - C_4)
- τα πρωτογενή προϊόντα είναι ολεφίνες οι οποίες μέσω ισομερίωσης σχηματίζουν μόρια υδρογονανθράκων με διακλαδώσεις
- η δυνατότητα της μεθόδου για παραγωγή βενζίνης είναι υψηλή και αυτό επειδή η κατανομή των μοριακών βαρών είναι στενή στην περιοχή των υδρογονανθράκων που αποτελούν τη βενζίνη
- οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες παράγονται από αφυδρογόνωση του ναφθαλενίου και διαμέσου της κυκλοποίησης των ολεφινών
- τα μεγαλύτερα μόρια είναι πιο δραστικά
- οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες δεν αντιδρούν
- οι παραφίνες παράγονται με μεταφορά υδρογόνου.

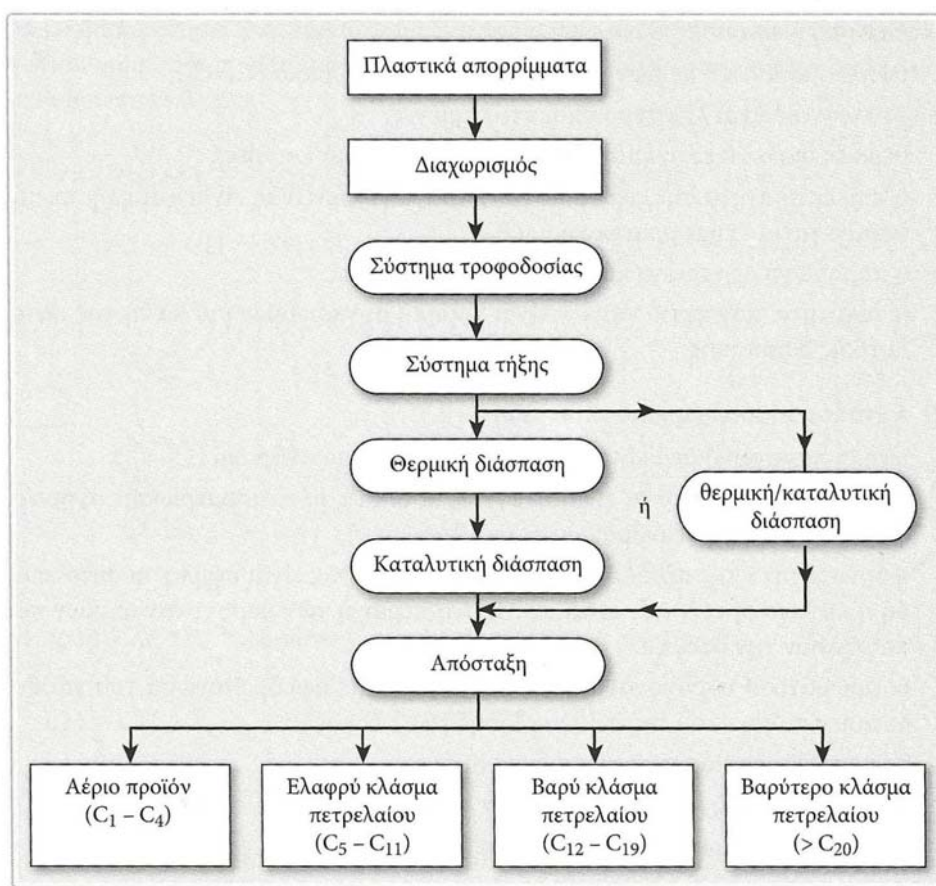
5.5.3 Διάγραμμα ροής

Στο σχ. 5.3 φαίνεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας θερμικής και καταλυτικής διάσπασης πλαστικών απορριμμάτων. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι η διεργασία της θερμικής διάσπασης ακολουθείται από το στάδιο της καταλυτικής διάσπασης.

Για οικονομικούς λόγους η διαδικασία θα πρέπει να έχει ένα «συμπαγή» χαρακτήρα ώστε να μπορεί να ελεγχθεί με ένα συνεχή και σταθερό τρόπο λόγω της μεταφοράς του υψηλής πυκνότητας υλικού σε κάθε μονάδα του συστήματος. Το υλικό αυτό μπορεί να μπλοκάρει τη γραμμή παραγωγής και να καταστήσει δύσκολο το συνεχή έλεγχο της μονάδας.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3 τα πλαστικά απορρίμματα πριν υποστούν θερμική διάσπαση υφίστανται διαχωρισμό. Τα πλαστικά, που προέρχονται από οικιακά, βιομηχανικά κ.α. απορρίμματα, είναι επιμολυσμένα με άλλα υλικά, όπως χώμα, σίδηρο ξύλο κ.α. Επίσης το ίδιο το μίγμα των πλαστικών περιέχει συνήθως πλαστικά, όπως PVC, PET κ.α. τα οποία δημιουργούν ανεπιθύμητες εκπομπές οι οποίες οφείλονται στην παρουσία ετεροατόμων, όπως του Cl, καθώς και υψηλό ποσοστό υπολείμματος σε εξανθράκωμα και κοκ, τα οποία δεν αποδομούνται κατά τη διαδικασία της θερμικής διάσπασης. Γι' αυτό τα πλαστικά αφενός διαχωρίζονται από τα μη πλαστικά υλικά (χαρτί, σίδηρο, αλουμίνιο, ξύλο κ.ά.), αφετέρου υφίστανται και μεταξύ τους διαχωρισμό σε ιδιαίτερες κατηγορίες όπως πολυολεφίνες, PVC, PET και θερμοανθεκτικά πλαστικά.

Μετά το στάδιο διαχωρισμού ακολουθεί το στάδιο τροφοδοσίας των διαχωρισμένων πλαστικών στον αντιδραστήρα τήξης. Το σύστημα της τροφοδοσίας φέρει συνήθως ιμάντα μεταφοράς, χοάνη και εκβολέα. Ανάλογα με τη φύση προέλευσης των πλαστικών απορριμμάτων (οικιακά, βιομηχανικά αγροτικά κ.α.) μπορεί να υπάρξει προθέρμανση ή όχι του μίγματος τροφοδοσίας στον εκβολέα. Με την προθέρμανση της τροφοδοσίας των πλαστικών μειώνεται ο χρόνος τήξης στον αντιδραστήρα τήξης οπότε αυξάνονται οι ταχύτητες παραγωγής. Σε ειδικές κατηγορίες πλαστικών απορριμμάτων, όπως τα φιλμ τα οποία είναι ογκώδη, επειδή είναι δύσκολο να επιτευχθεί συνεχής τροφοδοσία, προωθούνται στο σύστημα τήξης μετά από τήξη στο σύστημα τροφοδοσίας. Στην περίπτωση μη προθερμασμένης τροφοδοσίας θα πρέπει να εξασφαλίζεται με κατάλληλη διάταξη ένα σύστημα σταθερής παροχής του τεμαχισμένου υλικού σε μέγεθος αρκετών χιλιοστών.



Σχήμα 5.3 Τυπικό διάγραμμα ροής διεργασίας μετατροπής πλαστικών απορριμμάτων σε πετρέλαιο η οποία περιλαμβάνει συνδυασμό θερμικής και καταλυτικής διάσπασης [2].

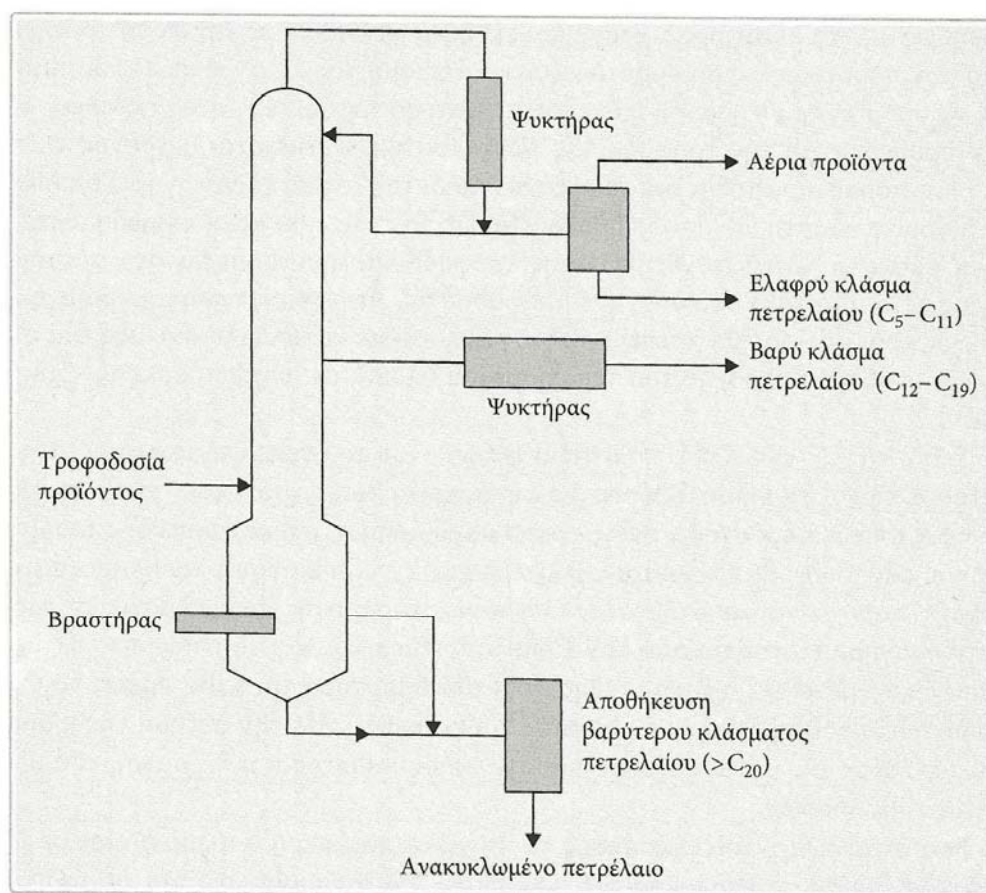
Στη συνέχεια ακολουθεί το στάδιο τήξης, όπου το σταθερό πλαστικό μετατρέπεται σε τήγμα χαμηλού ιξώδους. Αν υπάρχει αρκετός χρόνος να τηχθεί το πολυμερές στον αντιδραστήρα τήξης, η θερμική διάσπαση ή η καταλυτική αποδόμηση που ακολουθεί θα ελέγχεται καλύτερα χωρίς να δημιουργεί προβλήματα στη συνεχή παροχή του συστήματος. Ο χρόνος παραμονής των πλαστικών στον αντιδραστήρα εξαρτάται από τον τύπο του πλαστικού και το επιθυμητό ιξώδες. Έτσι για να μειωθεί ο χρόνος τήξης στον αντιδραστήρα τήξης θα πρέπει να έχει προηγηθεί προθέρμανση του μίγματος τροφοδοσίας. Με την αύξηση της κλίμακας μεγέθους της μονάδας, τόσο πιο αναγκαία καθίσταται η θέρμανση του μίγματος τροφοδοσίας.

Στο στάδιο θερμικής διάσπασης τα τηγμένα πολυμερή αποδομούνται σε μικρότερα μόρια σε θερμοκρασίες 300-450 °C και αναμορφώνονται σε υψηλής ποιότητας προϊόντα πετρελαίου.

Στη συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της καταλυτικής διάσπασης, δηλαδή της διάσπασης των υδρογονανθράκων που παρήχθησαν κατά το στάδιο της θερμικής διάσπασης σε ακόμα μικρότερα μόρια.

Οι διεργασίες θερμικής/καταλυτικής διάσπασης μπορούν να πραγματοποιηθούν:

1. σε δύο διαδοχικά στάδια κατά τα οποία προηγείται η θερμική και ακολουθεί η καταλυτική διάσπαση, ή
2. σε ένα ενιαίο στάδιο θερμικής/καταλυτικής αποδόμησης σε υγρή φάση μετά τη διεργασία τήξης.



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα ροής πύργου απόσταξης [2].

Τέλος το προϊόν της καταλυτικής διάσπασης διαχωρίζεται σε πύργο απόσταξης (Σχήμα 5.4) και λαμβάνονται τέσσερα διαφορετικά κλάσματα:

- αέριο προϊόν το οποίο συνήθως αντιστοιχεί σε υδρογονάνθρακες με ένα ως τέσσερα άτομα άνθρακα (C₁-C₂),

- ελαφρύ κλάσμα πετρελαίου που συνήθως περιλαμβάνει υδρογονάνθρακες με πέντε ως έντεκα άτομα άνθρακα (C₅-C₁₁) και αντιστοιχεί στην περιοχή υδρογονανθράκων της βενζίνης
- βαρύ κλάσμα πετρελαίου που συνήθως περιλαμβάνει υδρογονάνθρακες με δώδεκα ως δεκαεννέα άτομα άνθρακα (C₁₂-C₁₉) και αντιστοιχεί στην περιοχή υδρογονανθράκων του ντίζελ
- βαρύτερο κλάσμα υδρογονανθράκων με αριθμό ατόμων άνθρακα > C₂₀ όπου περιλαμβάνονται τα κηροειδή προϊόντα

Το ελαφρύ και το βαρύ κλάσμα που αντιστοιχούν σε βενζίνη και ντίζελ αποτελούν το κλάσμα των καυσίμων ενώ το βαρύτερο μη αποστάξιμο κλάσμα αποτελεί το κλάσμα των κηρών.

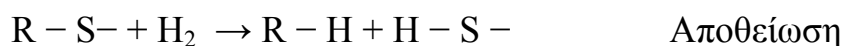
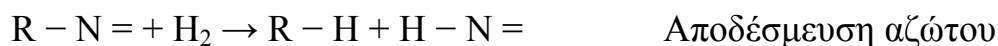
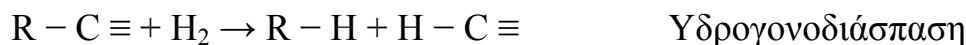
Ο διαχωρισμός των προϊόντων της θερμικής/καταλυτικής διάσπασης του παραγόμενου πετρελαίου σε κλάσματα λαμβάνει χώρα στον πύργο απόσταξης και εξαρτάται από τη διαβάθμιση της θερμοκρασίας κατά μήκος του πύργου απόσταξης, από τη θερμοκρασία του βραστήρα, από την αναλογία αναρροής του παραγόμενου πετρελαίου και την πίεση (κενού ή ατμοσφαιρική). Τα αέρια που εξέρχονται από την κορυφή του πύργου, μετά από ψύξη στον συμπυκνωτή, διαχωρίζονται και λαμβάνεται το αέριο προϊόν η βενζίνη. Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται συνήθως το νερό. Το αέριο προϊόν αποτελείται κυρίως από κορεσμένους υδρογονάνθρακες που περιέχουν από ένα έως τέσσερα άτομα άνθρακα και χρησιμοποιείται ως καύσιμο στη διεργασία της θερμικής διάσπασης. Η ποιότητα της βενζίνης που παράγεται εξαρτάται από τη διαβάθμιση της θερμοκρασίας στον πύργο απόσταξης.

5.6 ΥΔΡΟΓΟΝΩΣΗ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σκοπός της πυρόλυσης είναι η παραγωγή πετρελαίου και πετροχημικών από τα πλαστικά. Όμως η ποιότητα του πετρελαίου που παράγεται από την πυρόλυση συχνά δεν πληρεί τις τιθέμενες προδιαγραφές για τα καύσιμα. Τα μακρομόρια κατά την πυρόλυση διασπώνται σε υψηλής δραστηριότητας ελεύθερες ρίζες. Η επανένωση των ριζών αυτών οδηγεί στο σχηματισμό κλασμάτων υψηλού σημείου ζέσεως, αλλά και συχνά επικίνδυνες για το περιβάλλον θειούχες και χλωριούχες ουσίες, με συνέπεια την πτώση της ποιότητας του παραγόμενου πετρελαίου.

Ως υδρογόνωση (Hydrogenation) ή υδρογονοπυρόλυση ή υδρογονοδιάσπαση χαρακτηρίζεται η διαδικασία πυρόλυσης ή θερμικής διάσπασης των μακρομορίων παρουσία υδρογόνου. Στη διαδικασία αυτή

οι σχηματιζόμενες ρίζες αδρανοποιούνται κατόπιν αντίδρασής τους με το υδρογόνο. Η μερική πίεση του υδρογόνου θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να αποτρέπει επαναπολυμερισμό ή σχηματισμό κωκ. Πίεση υδρογόνου της τάξης των 200 atm εξασφαλίζει την περίσσεια υδρογόνου. Οι βασικές χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια υδρογόνωσης μιας πολυμερικής ουσίας είναι:



Η μη καταλυτική υδρογόνωση των πλαστικών πραγματοποιείται, παρουσία υδρογόνου, εντός κατάλληλου αντιδραστήρα υπό πιέσεις 150-300 bar και θερμοκρασίες 400-500 °C. Κάτω από αυτές τις συνθήκες τα παραγόμενα αλκάνια αποτελούνται κυρίως από μικρές ανθρακικές αλυσίδες, κυκλοαλκάνια και αρωματικούς υδρογονάνθρακες.

Μερικά βασικά χαρακτηριστικά της διεργασίας υδρογόνωσης είναι:

- Μέσω της διεργασίας υδρογόνωσης πραγματοποιείται ανάκτηση προϊόντων υψηλής θερμικής αξίας (δηλαδή υγρό καύσιμο που προσομοιάζει με βενζίνη ή καύσιμο ντίζελ για ποικίλες χρήσεις).
- Η υδρογόνωση θεωρείται καλύτερη μέθοδος θερμικής ανακύκλωσης πλαστικών από την πυρόλυση και την αεριοποίηση, διότι το παραγόμενο συνθετικό προϊόν αργού πετρελαίου (syncrude) μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως τροφοδοσία διωλιστηρίων χωρίς περαιτέρω επεξεργασία.
- Η υδρογόνωση εμφανίζει εξαιρετικές δυνατότητες στην απομάκρυνση των ετεροατόμων (Cl, N, O, S) που εντοπίζονται σε μεγάλες ποσότητες στο ρεύμα των ανάμικτων πλαστικών απορριμμάτων και δημιουργούν προβλήματα τόσο στην ποιότητα των λαμβανομένων προϊόντων όσο και στην υποδοχή τους στα διωλιστήρια για παραπέρα επεξεργασία.
- Προϊόντα υψηλής τοξικότητας όπως διοξίνες δεν επιβιώνουν, αλλά ούτε και παράγονται από τη διεργασία, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους διαχείρισης των πλαστικών απορριμμάτων (π.χ. καύση)

Το κυριότερο μειονέκτημα της υδρογόνωσης είναι ότι χαρακτηρίζεται από δαπανηρές διεργασίες επεξεργασίας των πλαστικών απορριμμάτων. Οι δαπάνες για την υδρογόνωση είναι περίπου 530 \$/tn

τροφοδοσίας, γεγονός που την καθιστά από τις ακριβότερες μεθόδους ανακύκλωσης πλαστικών.

Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της υδρογόνωσης:

Πλεονεκτήματα υδρογόνωσης:

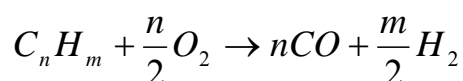
- Μετατροπή όλων των ετερο-ατόμων των αποβλήτων σε πολύτιμα προϊόντα διωλιστηρίου
- Παραγωγή προϊόντων υψηλής αξίας.
- Δεν παράγεται τοξικό παραπροϊόν.

Μειονεκτήματα υδρογόνωσης:

- Υψηλό κόστος.

5.7 ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

Η μέθοδος της αεριοποίησης πλεονεκτεί σε σχέση με την πυρόλυση και την υδρογονοδιάσπαση στο ότι μπορεί να διαχειριστεί με επιτυχία τα στερεά απορρίμματα, χωρίς να λάβει χώρα κανενός είδους διαλογή. Η αεριοποίηση λειτουργεί σε σκληρότερες συνθήκες από την πυρόλυση, αφού οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις λειτουργίας της κυμαίνονται πάνω από 900 °C και 60 bar. Η διεργασία πραγματοποιείται μέσω ελεγχόμενης προσθήκης 2. Η βασική αντίδραση αεριοποίησης γίνεται κατά το πρότυπο της παρακάτω εξίσωσης:



Το βασικό προϊόν είναι αέριο μίγμα CO και H₂. Το αέριο μίγμα είναι γνωστό ως 'syngas' και μπορεί να αξιοποιηθεί ως υποκατάστατο του φυσικού αερίου. Ενδιαφέρον είναι όμως το γεγονός ότι αν το 'syngas' διαχωριστεί στα συστατικά του, τότε τα τελευταία μπορούν να αξιοποιηθούν υπό τη μορφή υποκατάστατου καύσιμης ύλης με θερμική ενέργεια διπλάσια ή τριπλάσια αυτής του μίγματος. Το υπόλειμμα της ανόργανης στάχτης δεσμεύεται υπό τη μορφή υαλώδους υποστρώματος, που μπορεί να αξιοποιηθεί περαιτέρω ως συστατικό στην παραγωγή μπετόν και ασβεστοκονιάματος, εξαιτίας της υψηλής αδράνειας και ανθεκτικότητας που εμφανίζει στα οξέα. Το 'syngas' μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- Παραγωγή ευρείας ποικιλίας χημικών και καθαρών καυσίμων χρησιμοποιώντας γνωστές διεργασίες.

- Παροχή υδρογόνου για χρήση σαν χημικό ή σαν καύσιμο σε κελιά καυσίμων.
- Σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιείται απευθείας, μετά τον καθαρισμό του, για την τροφοδότηση μηχανών εσωτερικής καύσης ή τουρμπίνα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αεριοποίηση αποτελεί ελκυστική, από περιβαλλοντική σκοπιά, επιλογή διαχείρισης των πλαστικών απορριμμάτων διότι αποτρέπει το σχηματισμό διοξινών ή αρωματικών ενώσεων. Το ρεύμα εισόδου της διεργασίας χαρακτηρίζεται από μέσο ενεργειακό περιεχόμενο γύρω στα 10 MJ/kg και μπορεί να αποδώσει γύρω στα 800-1200Nm³/t ‘syngas’. Εν τέλει, η διεργασία καταλήγει σε μείωση του όγκου των εισαχθέντων απορριμμάτων γύρω στο 75 %.

Πλεονεκτήματα αεριοποίησης:

- Με μικρές τροποποιήσεις μπορεί να εφαρμοσθεί σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις.
- Δεν δημιουργούνται διοξίνες και οργανικές ενώσεις.
- Ενέργεια υπό μορφή αερίου μπορεί να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση

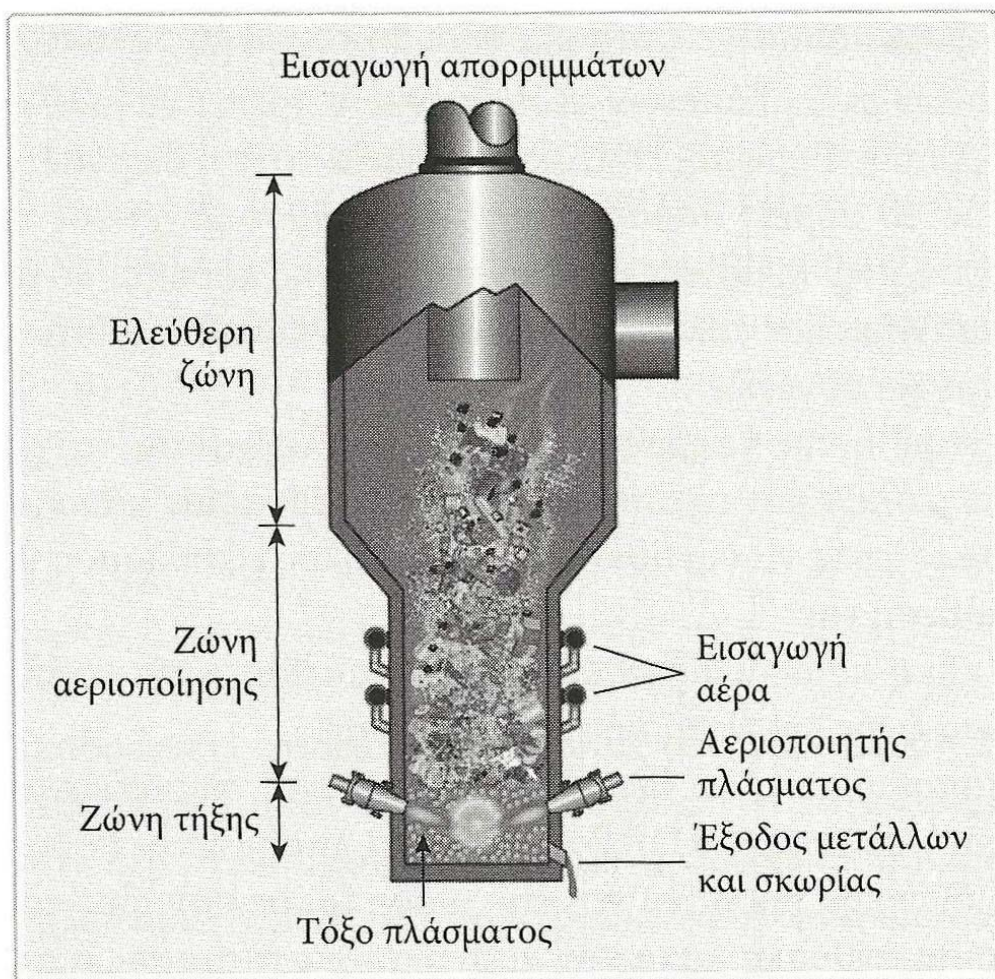
Μειονεκτήματα αεριοποίησης:

- Υψηλό κόστος.
- Χρειάζεται καθαρισμός του παραγόμενου αερίου σύνθεσης.
- Χαμηλή απόδοση ως προς την ανάκτηση ενέργειας.

5.8 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Είναι διεργασίες σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες (μεγαλύτερες των 3.000 °C) κατά τις οποίες γίνεται επεξεργασία των αποβλήτων. Το πλάσμα δημιουργείται με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε δύο αντίθετα φορτισμένους πόλους και αποτελεί ένα θερμό ιονισμένο αέριο. Στην κατάσταση πλάσματος μεταπίπτει κάθε αέριο του οποίου τουλάχιστον ένα ποσοστό των ατόμων ή μορίων του είναι μερικά ή ολικά ιονισμένο, δηλαδή έχει χάσει έναν αριθμό ηλεκτρονίων.

Η τεχνολογία πλάσματος είναι αεριοποίηση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Το αέριο σε κατάσταση πλάσματος παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη χημική δραστηριότητα λόγω της υψηλής κινητικής ενέργειας των ιόντων και των ηλεκτρονίων του πλάσματος καθώς επίσης και των μη-ιονισμένων ουδετέρων ατόμων του αερίου. Έτσι συμβαίνουν χημικές αντιδράσεις που δεν θα μπορούσαν να ενεργοποιηθούν με συμβατικούς τρόπους.



Σχήμα 5.5 Αεριοποίηση δημοτικών απορριμμάτων με την τεχνολογία πλάσματος της Westinghouse [2].

Στις συνθήκες αυτές καταστρέφονται όλες οι τοξικές ουσίες. Παρόλα αυτά οι τεχνολογίες πλάσματος εκπέμπουν σε μικρές ποσότητες διοξίνες και βαρέα μέταλλα. Επίσης δεν έχουν δοκιμαστεί επί μακρόν σε μεγάλη κλίμακα και έχουν φυσικά εξαιρετικά υψηλό κόστος εγκατάστασης καθώς επίσης και λειτουργικό κόστος.

5.9 Η ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ THERMOSELECT

Μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος αεριοποίησης προτάθηκε από την Ελβετική εταιρεία Thermoselect S.A. με έδρα το Λοκάρνο. Σκοπός της διεργασίας είναι η θερμική επεξεργασία οικιακών, βιομηχανικών, νοσοκομειακών και επικίνδυνων απορριμμάτων. Σύμφωνα με την εταιρεία η μέθοδος αυτή μπορεί να πετύχει την ανακύκλωση του 99.5%

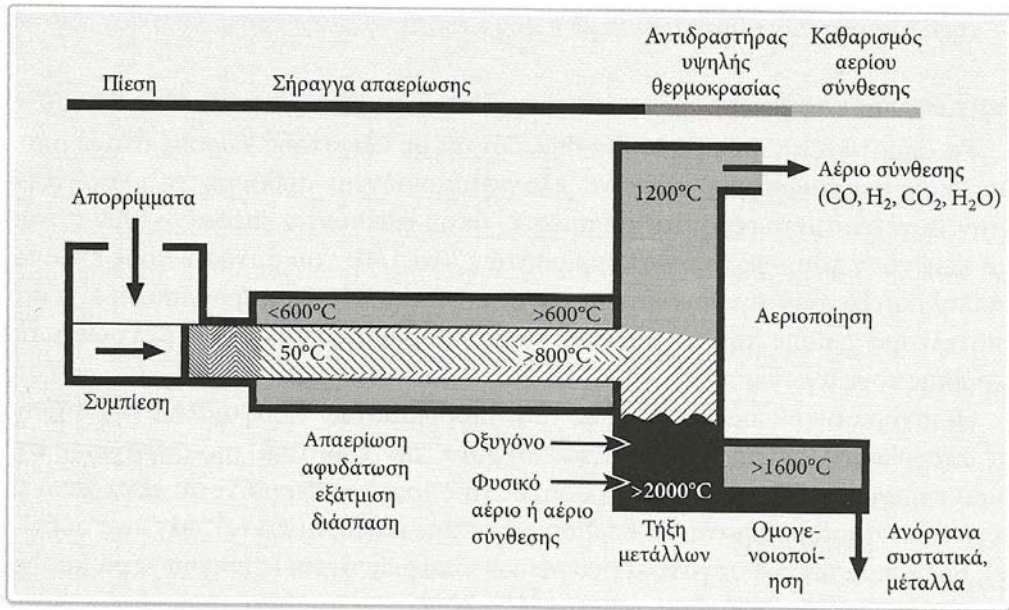
των απορριμμάτων. Το 1992 εγκαταστάθηκε στην πόλη Fondotoce της Ιταλίας η πρώτη μονάδα αεριοποίησης της Thermoselect με δυναμικότητα 4 τόνων/ώρα. Μία αντίστοιχη μονάδα εγκαταστάθηκε στην πόλη Chiba της Ιαπωνίας το 2000.



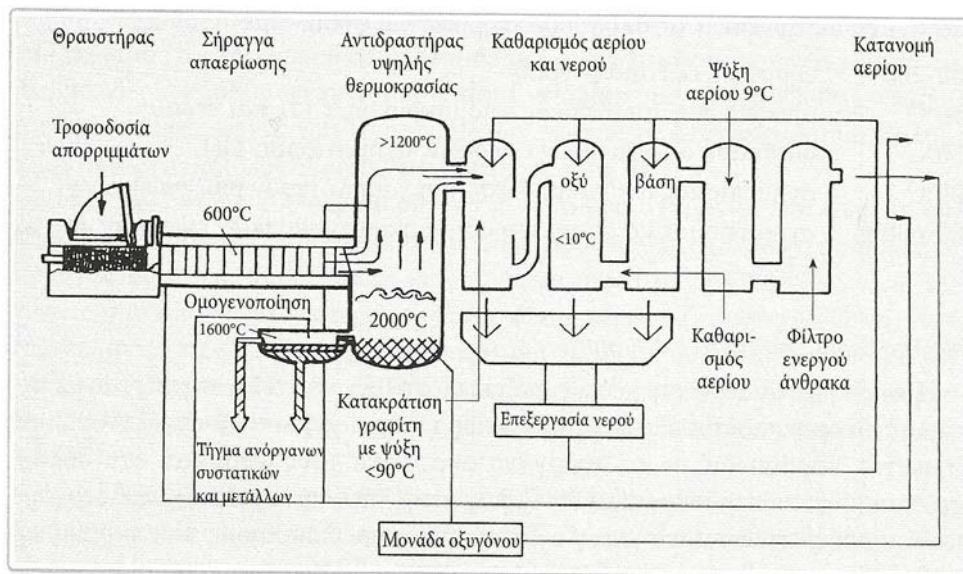
Σχήμα 5.6 Το εργοστάσιο αεριοποίησης στην πόλη Chiba της Ιαπωνίας που βασίζεται στη διεργασία Thermoselect [2].

Το ρεύμα των απορριμμάτων αρχικά συμπιέζεται, αφαιρούνται οι παραγόμενες αναθυμιάσεις (degassing) και πυρολύεται στους 600 °C. Έπειτα, τροφοδοτείται σε θερμαινόμενο αγωγό (gasifier), όπου και τήκεται σε θερμοκρασία 2000 °C. Εκεί τα οργανικά συστατικά μετατρέπονται σε άνθρακα και στη συνέχεια σε αέριο σύνθεσης (syngas). Το αέριο αφού καθαριστεί και συλλεχθεί αναφλέγεται σε αεροτουρμπίνα προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μονάδα αυτή παράγει 660 Kg αέριου μίγματος (syngas), 220 Kg ανόργανου απορυκτοποιημένου μίγματος (slag), 23 Kg μετάλλων και 18 Kg αλάτων ανά τόνο απορριμμάτων. Εναλλακτικά, το αέριο μπορεί να χρησιμεύσει και ως υποκατάστατο υγρών καυσίμων. Όλα τα ανόργανα συστατικά των απορριμμάτων μετατρέπονται σε πρώτες ύλες.



Σχήμα 5.7 Σχηματική απεικόνιση του οδηγού ή σήραγγας απαερίωσης και του αντιδραστήρα αεριοποίησης της Thermoselect [2].



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα ροής της διεργασίας Thermoselect [2].

5.10 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

Η διάσπαση των πλαστικών απορριμμάτων για ένα ευρύ φάσμα πλαστικών γίνεται ευκολότερα με χημικό τρόπο παρά με θερμική επεξεργασία. Η χημική διάσπαση διεξάγεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτές των διεργασιών θερμικής διάσπασης.

Κατάλληλα πλαστικά για χημική διάσπαση είναι τα πλαστικά πολυσυμπύκνωσης (πολυμερισμός με συμπύκνωση) τα οποία μπορούν να υποστούν την αντίστροφη αντίδραση της συμπύκνωσης όπως π.χ. την υδρόλυση. Τα πλαστικά αυτά φέρουν ετεροάτομα στην κύρια αλυσίδα τους και στις θέσεις αυτές διασπάται η αλυσίδα. Έτσι πολυμερή όπως οι πολυεστέρες, τα πολυαμίδια και οι πολυουρεθάνες με τη χρήση χημικών αντιδραστηρίων μετατρέπονται στα αντίστοιχα μονομερή τους τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την επανασύνθεση των πολυμερών. Αντίθετα, πολυμερή προσθήκης όπως τα βινυλο-πολυμερή (πολυολεφίνες) π.χ. πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο κ.τ.λ. είναι πιο δύσκολο να αποπολυμεριστούν στα πολυμερή τους λόγω τυχαίας σχάσης των δεσμών C-C της κύριας αλυσίδας τους. Τα τελευταία αποπολυμερίζονται με θερμικές διεργασίες.

Η χημική διάσπαση σε σχέση με τις θερμικές μεθόδους παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Η σύνθεση του προϊόντος είναι πιο ομοιόμορφη αν και σε κάποιες περιπτώσεις είναι αναγκαίος κάποιος διαχωρισμός και καθαρισμός των προϊόντων.
- Έχει μικρότερο κόστος.

Τα μειονεκτήματα της χημικής διάσπασης είναι:

- Η απαίτηση για καθαρότητα και ομοιομορφία της τροφοδοσίας.
- Η μη εφαρμογή σε μίγματα πλαστικών.

Το κύριο ενδιαφέρον εφαρμογής της μεθόδου εστιάζεται σήμερα στις πολυουρεθάνες και στους θερμοπλαστικούς πολυεστέρες λόγω των μεγάλων ποσοτήτων απορριμμάτων που παράγουν. Απορρίμματα πολυουρεθάνων παράγονται κατά την παραγωγή υλικών μηχανικών εφαρμογών και κατά την ανακύκλωση των αυτοκινήτων. Απορρίμματα πολυεστέρων προέρχονται κυρίως από πλαστικές φιάλες, φιλμ και υφάνσιμες ίνες.

Αφού τα πλαστικά συλλεχθούν και διαχωριστούν, διοχετεύονται υπό αλεσμένη και καθαρή μορφή στους χημικούς αντιδραστήρες, όπου λαμβάνουν χώρα οι χημικές αντιδράσεις του αποπολυμερισμού. Είναι σημαντικό η τροφοδοσία να αποτελείται από ένα είδος πολυμερούς και, όπου αυτό είναι εφικτό, η παρτίδα των πλαστικών να έχει το ίδιο ιστορικό. Το τελευταίο συντελεί, σε μεγάλο βαθμό, στον έλεγχο των επιπέδων επιμόλυνσης της τροφοδοσίας.

Η χημική ανακύκλωση εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι από τη φύση της η αντίδραση πολυμερισμού είναι αμφίδρομη και μετατοπίζει τη θέση ισορροπίας της προς τη μεριά σχηματισμού μονομερών. Είναι δυνατόν να επιλεγεί από την πολυμερική δομή κάποιο μονομερές ή oligομερές με πρόκληση της κατάλληλης αντίδρασης σχάσεως της

πολυμερικής αλυσίδας. Σε αντίθεση με την παραδοσιακή διεργασία δευτερογενούς ανακύκλωσης οι χημικές διεργασίες ελαχιστοποιούν τη συγκέντρωση ακαθαρσιών, όπως συμπολυμερή, καταλύτες, χρωστικές αλλά και προ-υπάρχουσες δομικές ατέλειες των πολυμερικών υλικών. Η χημική ανακύκλωση χρησιμοποιεί κατάλληλες σολβολουτικές αντιδράσεις, που προσδιορίζουν τη φύση των λαμβανόμενων μονομερών.

Οι αντιδράσεις που οδηγούν σε χημική διάσπαση των πλαστικών είναι οι λεγόμενες σολβολουτικές αντιδράσεις [4]:

- Η μεθανόλυση
- Η υδρόλυση
- Η γλυκόλυση

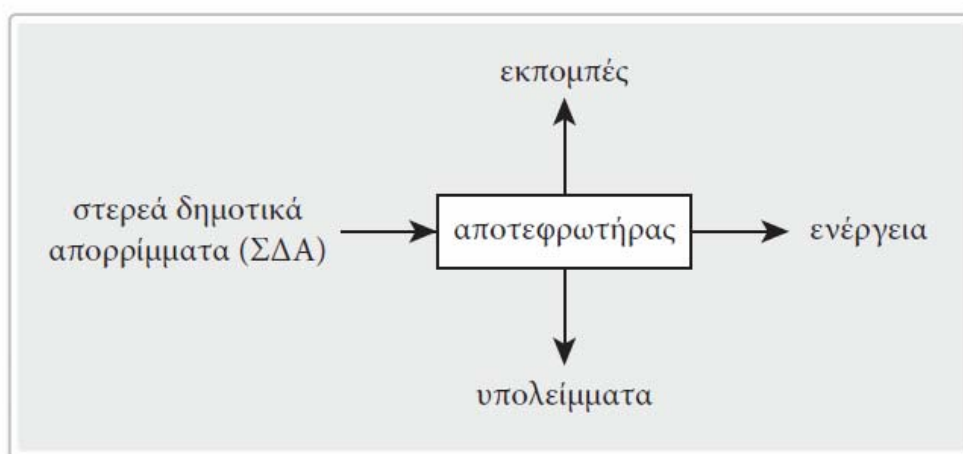
Κατά τη μεθανόλυση η αποδόμηση του πολυμερούς πολυσυμπύκνωσης πραγματοποιείται με μεθανόλη, κατά τη γλυκόλυση με γλυκόλες παρουσία καταλυτών και κατά την υδρόλυση με νερό σε διάφορα περιβάλλοντα (όξινο, αλκαλικό ή ουδέτερο). Εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας των πολυμερών υπάρχει και μία μεγάλη ποικιλία διαφορετικών αντιδράσεων μέσω των οποίων γίνεται η χημική αποδόμηση καθώς και των προϊόντων που θα πάρουμε σε κάθε περίπτωση.

6. ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ως αποτέφρωση ή καύση ή κλιβανισμός των απορριμμάτων θεωρείται η αναγωγή των καύσιμων απορριμμάτων σε αδρανές υπόλειμμα, με ελεγχόμενη καύση, σε υψηλή θερμοκρασία. Αυτή η διεργασία αποτελεί μία ανεξάρτητη μέθοδο διαχείρισης των πλαστικών που ονομάζεται τεταρτογενής ανακύκλωση. Η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για θέρμανση ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται η σχηματική απεικόνιση των εκροών μάζας και ενέργειας από ένα αποτεφρωτήρα και στο Σχήμα 6.2 φαίνεται η δομή μιας τυπικής μονάδας αποτέφρωσης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

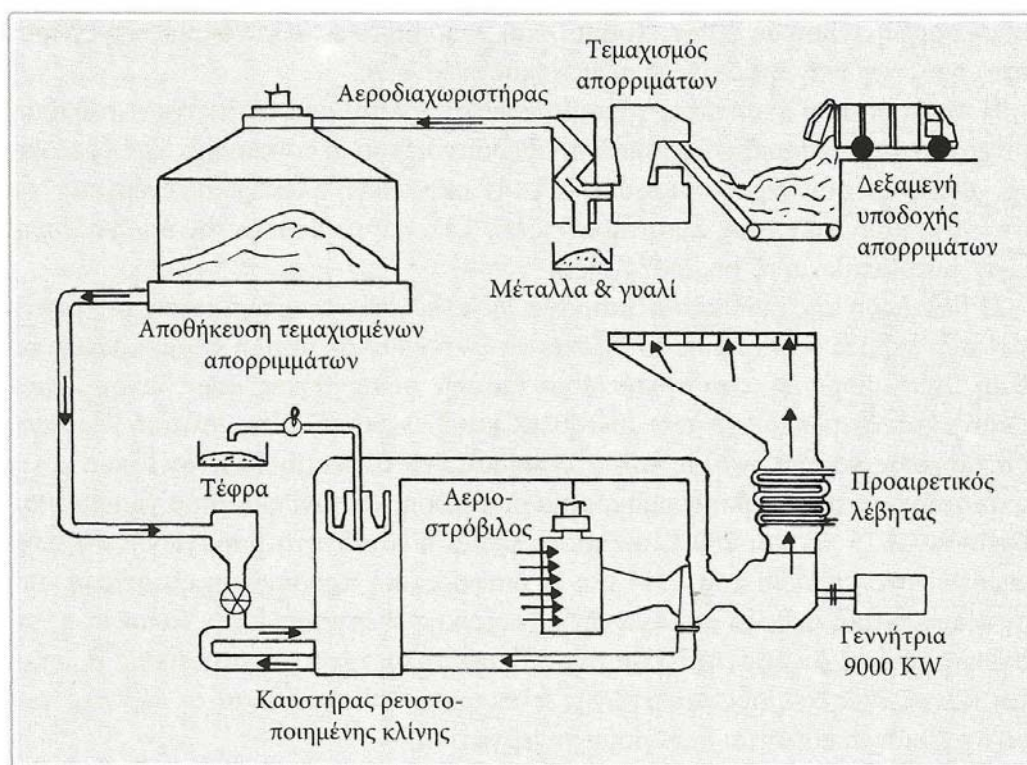
Κατά την αποτέφρωση μειώνεται το βάρος των σκουπιδιών κατά 80% και ο όγκος πάνω από 90%. Το υπόλειμμα διατίθεται σε χωματερές ή χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ). Τα σκουπίδια αποτελούν έναν υπολογίσιμο ενεργειακό πόρο επειδή η θερμογόνο δύναμή τους είναι 2500 Kcal/Kg, το μισό περίπου της θερμογόνου δύναμης του άνθρακα (κάρβουνου).



Σχήμα 6.1 Σχηματική απεικόνιση ροής αντιδρώντων-προϊόντων και ενέργειας σε έναν αποτεφρωτήρα [2].

Για να αξιολογηθεί η σημασία της ενεργειακής εκμετάλλευσης των απορριμμάτων δίνεται το ακόλουθο παράδειγμα. Εάν θεωρήσουμε μια

κατά μέσο όρο ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων (σκουπιδιών) της τάξης των 130.000 τόνων, η καύση τους απελευθεώνει θερμογόνο δύναμη ίση με 325 δισεκατομμύρια Kcal/Kg, η οποία ισοδυναμεί με 200.000 βαρέλια αργού πετρελαίου την ημέρα. Δηλαδή 1 τόνος απορριμμάτων αντιστοιχεί σε θερμογόνο δύναμη 1,5 βαρελιού πετρελαίου.



Σχήμα 6.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με διαβίβαση αερίων καύσης μονάδας αποτέφρωσης σε αερο-τουρμπίνα [2].

Η ανάκτηση ενέργειας από στερεά δημοτικά απορρίμματα γίνεται με τους ακόλουθους τρόπους:

- Μαζική καύση των σύμμικτων (ανεπεξέργαστων) δημοτικών απορριμμάτων ή κατόπιν προεπεξεργασίας (βιοξήρανση) του δευτερογενούς καυσίμου SRF (Solid Recovered Fuel).
- Παραγωγή καυσίμου από τα απορρίμματα του λεγόμενου RDF (Refuse Derived Fuels) για καύση σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις λεβήτων (δες §9.1.2.3 και Σχ. 10.1).
- Πυρόλυση. Με την πυρόλυση παράγεται μίγμα υδρογονανθράκων (πετρέλαιο) και αρωματικών υλών, αερίων και υπολείμματος. Πέραν της ανάκτησης υψηλής αξίας πετροχημικών προϊόντων από τα παραγόμενα προϊόντα της πυρόλυσης αυτά μπορούν να

χρησιμοποιηθούν επίσης ως καύσιμα για ανάκτηση θερμότητας και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

- Υδρογόνωση. Με υδρογόνωση, δηλαδή θέρμανση, υπό πίεση παρουσία H_2 , τα απορρίμματα μετατρέπονται σε πετρέλαιο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμική επεξεργασία (πυρόλυση + υδρογόνωση) μετατρέπει τα απορρίμματα σε υψηλής αξίας καύσιμο (πετρέλαιο) και αρωματικές ύλες.
- Αναερόβια χώνευση. Απουσία οξυγόνου το οργανικό μέρος των απορριμμάτων αποσυντίθεται και σχηματίζεται μεθάνιο που χρησιμοποιείται ως καύσιμο.

Τα πλαστικά απορρίμματα, λόγω της μεγάλης θερμογόνου δύναμης που διαθέτουν, συγκρίσιμης με αυτή των συμβατικών καυσίμων, είναι κατάλληλα για αποτέφρωση με σκοπό την παραγωγή θερμότητας και ενέργειας. Τα πλαστικά μπορούν να συναποτεφρωθούν (συν-καούν) με τα άλλα αστικά απορρίμματα ή σε ανεξάρτητες μονάδες αποτέφρωσης πλαστικών απορριμμάτων.

6.2 Η ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Για να είναι επιτυχής η καύση θα πρέπει να υπάρχει:

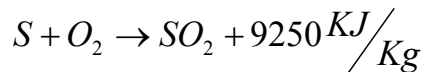
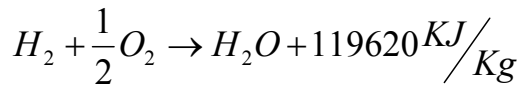
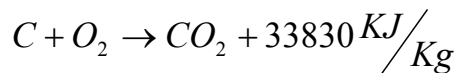
- αρκετή ποσότητα καυσίμου και οξυγόνου
- ικανοποιητική θερμοκρασία ανάφλεξης
- συνεχής απομάκρυνση των αερίων της καύσης και των υπολειμμάτων της

Κατά την καύση συμβαίνουν οι εξής διεργασίες:

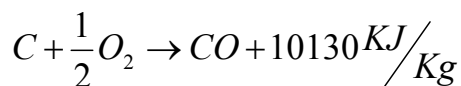
- Ξήρανση
- Θερμική διάσπαση των οργανικών
- Απαερίωση
- Κύρια καύση

Η ξήρανση επιτυγχάνεται με ακτινοβολία περίπου στους $100^{\circ}C$ και η απαιτούμενη θερμότητα εξαρτάται από την υγρασία και την σύσταση των απορριμμάτων. Η θερμική διάσπαση των οργανικών επιτυγχάνεται στους $200-900^{\circ}C$ και απομακρύνονται τα πτητικά υλικά. Κατά την απαερίωση συμβαίνει μετατροπή των ανθρακούχων υλικών σε καυσαέρια σε θερμοκρασίες $800-1150^{\circ}C$.

Η κύρια καύση περιλαμβάνει την οξείδωση του υλικού σε CO_2 , H_2O , SO_x και NO_x . Κατά την πλήρη καύση λαμβάνουν χώρα οι εξής αντιδράσεις:



Κατά την μη πλήρη καύση λαμβάνει χώρα η αντίδραση:



6.3 ΤΥΠΟΙ ΑΠΟΤΕΦΡΩΤΗΡΩΝ

Οι συνήθεις τύποι αποτεφρωτήρων είναι :

- Μηχανικός με σχάρες
- Περιστροφικός κλίβανος
- Ρευστοποιημένη κλίνη

Ανάλογα, κυρίως, με το χρησιμοποιούμενο τύπο καύσιμου (δηλαδή με ή χωρίς επεξεργασία των απορριμμάτων), και δευτερευόντως από τον αριθμό των θαλάμων καύσης, τον τύπο άρθρωσης των δομικών στοιχείων, το σχήμα (ορθογώνιο ή κυλινδρικό) και την χωρητικότητα των αποτεφρωτήρων, οι τελευταίοι διακρίνονται επίσης σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Αποτεφρωτήρες μαζικής καύσης (mass burn): Οι αποτεφρωτήρες αυτοί σχεδιάζονται έτσι ώστε να δέχονται ως τροφοδοσία σύμμεικτα (ανεπεξέργαστα) δημοτικά απορρίμματα ή το δευτερογενές καύσιμο SRF που προέρχεται από τα δημοτικά απορρίμματα με βιοξήρανση.
- Αποτεφρωτήρες RDF: Οι αποτεφρωτήρες αυτοί δέχονται ως τροφοδοσία το παραγόμενο από τα απορρίμματα καύσιμο RDF που μορφοποιείται σε πελλέτες ή μπρικέτες και προέρχεται από την μηχανική διαλογή ή την μηχανική-βιολογική επεξεργασία των απορριμμάτων.
- Αρθρωτοί αποτεφρωτήρες (modular): Οι αποτεφρωτήρες αυτοί φέρουν το όνομα τους από την δυνατότητα συναρμολόγησης των στοιχείων τους στο χώρο εγκατάστασης.

Η λειτουργία των αποτεφρωτήρων είναι ασυνεχής, όταν η χωρητικότητα τους κυμαίνεται στα επίπεδα των λίγων τόνων

απορριμμάτων ανά μέρα ενώ στα επίπεδα της τάξης των 1000 τόνων ανά μέρα η λειτουργία τους είναι συνεχής.

Οι τεχνολογίες μαζικής καύσης και RDF χρησιμοποιούνται συνήθως σε μεγάλης δυναμικότητας συστήματα αποτέφρωσης απορριμμάτων (>250 τόνων/μέρα) ενώ η τεχνολογία των αρθρωτών αποτεφρωτήρων σε μικρής κλίμακας μονάδες.

Το σχήμα του αποτεφρωτήρα είναι ορθογώνιο ή κυλινδρικό καθώς επίσης το σύστημα αποτέφρωσης μπορεί να φέρει όχι έναν αλλά πολλούς θαλάμους καύσης. Το μέγεθος και το σχήμα του θαλάμου καύσης καθορίζονται από τον κατασκευαστή και βασίζεται σε μια σειρά παραμέτρους, όπως: ρυθμός μεταφοράς στερεών και καυσαερίων, χρόνος παραμονής, θερμοκρασία καύσης και όγκος της δεξαμενής υποδοχής της τέφρας. Σε αρκετές περιπτώσεις στο σχεδιασμό περιλαμβάνονται δευτερογενείς θάλαμοι καύσης, οι οποίοι συνδέονται με τον πρωτογενή ώστε να εξασφαλίζονται οι βέλτιστες συνθήκες ολοκλήρωσης της καύσης.

Για την καύση των απορριμμάτων στον αποτεφρωτήρα απαιτείται εισαγωγή αέρα. Η εισαγωγή του αέρα γίνεται είτε από 'κάτω' είτε 'πάνω' από την εστία καύσης. Σε μηχανικό αποτεφρωτήρα με σχάρα η από 'κάτω' της εστίας διοχέτευση αέρα πραγματοποιείται διαμέσου και γύρω από τις σχάρες ενώ η από 'πάνω' της εστίας διαμέσου πιδάκων (jets) οι οποίοι τοποθετούνται στα πλαϊνά τοιχώματα ή στην οροφή του αποτεφρωτήρα. Έτσι επιτυγχάνεται η ολοκλήρωση της καύσης των εκλυόμενων καύσιμων αερίων που σχηματίζονται μέσω των αντιδράσεων καύσης στο κατώτερο τμήμα του κλιβάνου. Η ροή αέρα και των αερίων καύσης στο θάλαμο καύσης μπορεί να ελέγχεται με τη χρήση ανεμιστήρα.

Από τα κύρια προβλήματα των συστημάτων αποτέφρωσης που χρήζουν ιδιαίτερων χειρισμών είναι το στερεό υπόλειμμα της καύσης δηλαδή η τέφρα η οποία διακρίνεται σε ιπτάμενη τέφρα (μεταφέρεται με το ρεύμα των καυσαερίων) και σε τέφρα πυθμένα του θαλάμου καύσης. Η τέφρα αποτελεί το 20-40% κ.β. των εισαγομένων στον αποτεφρωτήρα απορριμμάτων. Η επεξεργασία των δυο ρευμάτων τέφρας μπορεί να γίνει από κοινού ή και ξεχωριστά. Η τέφρα που παράγεται κατά την αποτέφρωση είναι θερμή και θα πρέπει πριν τη διάθεση της να ψυχθεί. Η συνήθης μέθοδος ψύξης είναι η εμβάπτιση της σε νερό. Κατόπιν ακολουθεί η αφυδάτωση και η επεξεργασία της πριν την διάθεση, όπως και αντίστοιχα η επεξεργασία του χρησιμοποιούμενου νερού.

Σχετικά με τα εκπεμπόμενα καυσαέρια οι μονάδες αποτέφρωσης περιλαμβάνουν πολύπλοκα συστήματα ελέγχου της αέριας ρύπανσης ώστε να ικανοποιούν τα τιθέμενα όρια και να εξασφαλίζεται η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και η υγεία των πολιτών. Η πολυπλοκότητα και η ακρίβεια των συστημάτων αυτών προέρχεται από την δυνατότητα

ανίχνευσης επικίνδυνων ρυπαντών σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις της τάξης μεγέθους των ppm ή ppb. Οι κύριοι ρυπαντές παρουσιάζονται στο Πίν. 9.1, όπου φαίνονται και τα ποσοστά μείωσης τους με διάφορες μεθόδους απορρύπανσης.

Για τον σχηματισμό και την απελευθέρωση των λεγόμενων δυσκόλως απομακρυνόμενων οργανικών ρύπων, POP (Persistent Organic Pollutants) στους οποίους περιλαμβάνονται οι διοξίνες και τα φουράνια έχουν αναπτυχθεί οι ακόλουθες τρεις θεωρίες:

- α) τα POPs εισάγονται στον καυστήρα μαζί με την τροφοδοσία και εξέρχονται χωρίς να υποστούν κανένα μετασχηματισμό με την διεργασία,
- β) σχηματισμός κατά τη διεργασία της καύσης και
- γ) de novo σύνθεση στη ζώνη μετάκαυσης.

Μετά από μελέτες της σύστασης των εκπομπών των μονάδων αποτέφρωσης έχει επιβεβαιωθεί ότι η σύσταση των απορριμμάτων, ο σχεδιασμός του κλιβάνου, οι θερμοκρασίες στη ζώνη μετάκαυσης και οι δυνατότητες των συστημάτων ελέγχου και μείωσης της αέριας ρύπανσης είναι οι καθοριστικοί παράγοντες σχηματισμού και απελευθέρωσης των POPs. Το κόστος των σύγχρονων συστημάτων ελέγχου της αέριας μόλυνσης ανέρχεται στο 30% του κεφαλαιακού κόστους της μονάδας.

Οι μονάδες αποτέφρωσης απορριμμάτων, ως προς την λειτουργία τους, δεν έχουν καμία βασική διαφορά με τις υπόλοιπες μονάδες καύσης, παρουσιάζουν όμως διαφορές ως προς τους καυστήρες, ατμολέβητες, συστήματα καθαρισμού καυσαερίων κ.τ.λ. Ο λόγος για το ότι δεν υπάρχει συγκεκριμένη μέθοδος επεξεργασίας είναι το γεγονός ότι ανάλογα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων, τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων, τον τρόπο εκμετάλλευσης της θερμότητας και των υπολειμμάτων της καύσης αλλάζει και η τεχνολογία η οποία επιλέγεται. Το κεφάλαιο που θα επενδυθεί και το κόστος λειτουργίας παίζουν επίσης ρόλο στην επιλογή της μεθόδου αποτέφρωσης. Παρόλα αυτά κοινός στόχος όλων των μεθόδων είναι τα χαμηλά επίπεδα εκπομπής καυσαερίων, η χρήση της παραγόμενης ενέργειας και η παραγωγή όσο το δυνατόν λιγότερων υπολειμμάτων καύσης.

6.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ ΜΑΖΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

6.4.1 Συστήματα Αποτέφρωσης Μαζικής Καύσης με Μηχανικό Αποτεφρωτήρα Σχάρας

Ο όρος ‘αποτεφρωτήρες μαζικής καύσης’ αρχικά χρησιμοποιήθηκε για αποτεφρωτήρες οι οποίοι τροφοδοτούνταν με δημοτικά απορρίμματα τα οποία δεν υποβάλλονταν σε προ-επεξεργασία. Σήμερα αρκετά συστήματα αποτέφρωσης δέχονται ως τροφοδοσία ανεπεξέργαστα

δημοτικά απορρίμματα. Τα τυπικά συστήματα μαζικής καύσης βασίζονται σε μηχανικό αποτεφρωτήρα με σχάρα.

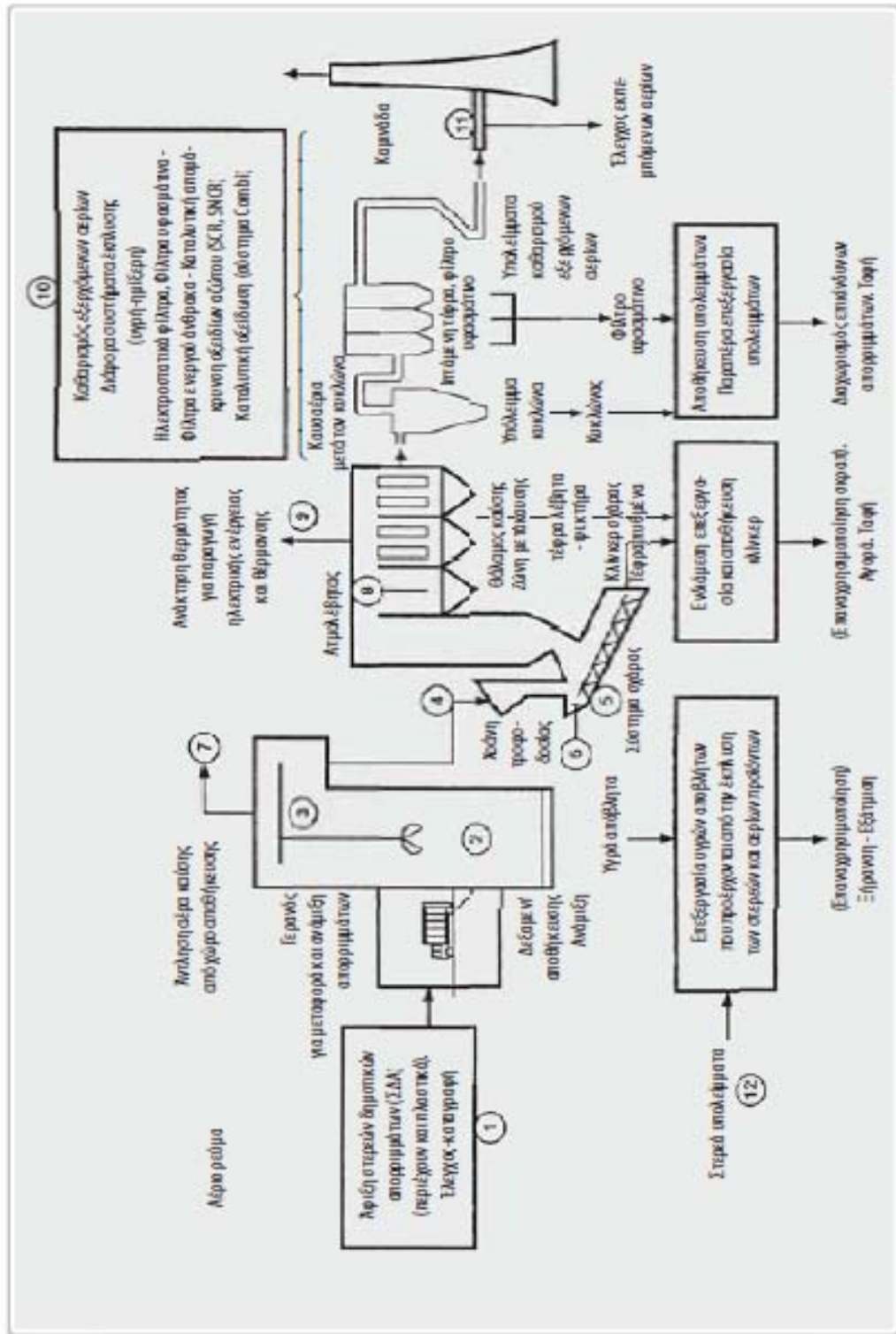
Υπάρχουν δυο κύριες υπο-κατηγορίες αντίστοιχων συστημάτων:

Μαζικής καύσης με ανθεκτικά τοιχώματα αποτεφρωτήρα, MB-REF (Mass Burn REFractory-walled systems)

Υπήρξε η παλιότερη γενιά αποτεφρωτήρων (τέλος δεκαετίας '70- αρχές δεκαετίας '80) οι οποίοι είχαν πρωταρχικά σχεδιαστεί για τη μείωση των απορριμμάτων στο 70-90% του όγκου τους. Τα συστήματα αυτά δεν διέθεταν ενσωματωμένους λέβητες (boilers) ώστε να ανακτάται η θερμότητα καύσης για την παραγωγή ενέργειας. Σε αυτού του τύπου τους αποτεφρωτήρες τα δημοτικά απορρίμματα τροφοδοτούνταν στον θάλαμο καύσης μέσω κινούμενης σχάρας, τύπου ιμάντα, ή με την βοήθεια εμβόλου. Ο αέρας που απαιτούνταν για τη καύση διαβιβαζόταν πάνω και κάτω από τη σχάρα σε περίσσεια (σε σχέση με το στοιχειομετρικά απαιτούμενο οξυγόνο για πλήρη καύση). Πολύ λίγες από αυτές τις μονάδες βρίσκονται σήμερα σε λειτουργία.

Μαζικής καύσης με τοιχώματα αποτεφρωτήρα διαρρεόμενα με νερό, MB-WW (Mass Burn WaterWall)

Αποκαλούνται έτσι επειδή φέρουν κατά μήκος των τοιχωμάτων του κλιβάνου μια σειρά από κατακόρυφους χαλύβδινους σωλήνες μέσω των οποίων αντλείται νερό. Οι αποτεφρωτήρες αυτοί διακρίνονται για τη μεγάλη απόδοση της καύσης σε σχέση με τους MB-REF. Αν και οι μειώσεις του όγκου των απορριμμάτων είναι παρόμοιες και στους δυο τύπους αποτεφρωτήρων, ο σχεδιασμός των MB-WW επιτρέπει την ικανοποιητική διαβίβαση αέρα έτσι ώστε να επιτυγχάνονται υψηλότερες θερμοκρασίες. Από τη θερμότητα καύσης παράγεται ατμός ο οποίος χρησιμοποιείται σε τουρμπίνα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 6.3 φαίνεται μια τυπική μονάδα μαζικής καύσης η οποία βασίζεται σε μηχανικό αποτεφρωτήρα με σχάρα. Η χωρητικότητα των μονάδων μαζικής καύσης κυμαίνεται μεταξύ 800 έως 2500 τόνων/μέρα.



Σχήμα 6.3 Τυπική μονάδα μαζικής καύσης (MB-WW) με μηχανικό αποτεφρωτήρα σφάρας [2].

Μια μονάδα καύσης δημοτικών απορριμμάτων, η οποία βασίζεται σε μηχανικό αποτεφρωτήρα με σχάρα (Σχήμα 6.3) αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια:

- υποδοχής των απορριμμάτων,
- τροφοδοσίας,
- θάλαμος καύσης,
- το σύστημα καθαρισμού αερίων της καύσης (π.χ. σύστημα ελέγχου αέριας ρύπανσης),
- απομάκρυνση τέφρας πυθμένα.

Τα εισερχόμενα απορρίμματα ζυγίζονται και καταγράφονται από ένα σύστημα συλλογής δεδομένων (1). Τα απορριμματοφόρα ξεφορτώνουν ταυτοχρόνως στην δεξαμενή αποθήκευσης (2). Οι γερανοί (3) μετακινούν τα απορρίμματα μέσα στην δεξαμενή ώστε να αναμιγνύονται. Τα απορρίμματα της δεξαμενής ξαναζυγίζονται πριν μεταφερθούν στη χοάνη τροφοδοσίας (4) και στην συνέχεια οδηγούνται στο σύστημα σχαρών (5) του θαλάμου καύσης. Με την φόρτωση του θαλάμου καύσης μετράται το βάρος των απορριμμάτων και καταγράφεται σε έναν υπολογιστή. Ο υδραυλικός τροφοδότης (6) με τη λήψη του κατάλληλου σήματος από το σύστημα ρύθμισης χωρητικότητας του φούρνου, ωθεί τα απορρίμματα στο σύστημα σχαρών σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Η διεργασία της καύσης ελέγχεται συνεχώς και ιδιαίτερα στην ζώνη του συστήματος των σχαρών μέχρι η καύση των απορριμμάτων να είναι πλήρης. Μετά την καύση εξέρχεται από το κάτω μέρος των σχαρών μια ανθρακοποιημένη υαλώδης μάζα η οποία τυχαίνει παραπέρα επεξεργασίας.

Ο απαραίτητος αέρας που απαιτείται για την καύση αντλείται από τον χώρο αποθήκευσης (7). Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η διαφυγή σκόνης και οσμής στο περιβάλλοντα χώρο. Ο αέρας καύσης οδηγείται στην ζώνη των σχαρών και αποτελεί το δείκτη της ορθής καύσης. Η προθέρμανση του αέρα διευκολύνει τη καύση των χαμηλής θερμογόνου δύναμης συστατικών. Επίσης βελτιώνει τον έλεγχο των εξερχόμενων αερίων και των υπολειμμάτων. Ο αέρας καύσης κατανέμεται στα τμήματα των σχαρών (ξήρανσης, καύσης και μετάκαυσης). Η ανατάραξη του αέρα εξασφαλίζει την καλύτερη δυνατή καύση των πτητικών ουσιών.

Η σωστά ελεγχόμενη τροφοδοσία αέρα και ο επαρκής χρόνος παραμονής στην ζώνη υψηλής θερμοκρασίας είναι αναγκαία προϋπόθεση για την τέλεια καύση και την μείωση των συγκεντρώσεων των ρυπαντών. Επειδή η ρύθμιση της θερμοκρασίας στη ζώνη υψηλής θερμοκρασίας (850°C) δεν είναι εφικτή κατά την έναρξη ή την λήξη της καύσης, ο καυστήρας χρησιμοποιεί πετρέλαιο θέρμανσης ώστε να φέρει την ζώνη μετάκαυσης στην επιθυμητή θερμοκρασία. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται και σε περίπτωση που για οποιονδήποτε λόγο η

θερμοκρασία πέσει κάτω από 850°C, πράγμα το οποίο συμβαίνει σπάνια σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Τα καυσαέρια που παράγονται κατά την καύση, ψύχονται στον ατμολέβητα (8). Τα θερμά καυσαέρια μεταδίδουν την ενέργεια τους στις θερμαινόμενες επιφάνειες του ατμολέβητα ώστε να παραχθεί υπέρθερμος ατμός. Ο ατμός μεταφέρεται μέσω των σωληνώσεων (9) στις τουρμπίνες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο εξερχόμενος ατμός από τις τουρμπίνες αξιοποιείται στην παραγωγή ζεστού νερού ή στην θέρμανση. Η πολύ σημαντική διαδικασία καθαρισμού των καυσαερίων είναι το επόμενο βήμα. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται πολλοί διαφορετικοί τρόποι (10).

Η συνεχής μέτρηση και ο έλεγχος των επιπέδων εκπεμπόμενων καυσαερίων αποτελεί βασική προϋπόθεση πριν τα καυσαέρια απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα (11). Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έχουν αναλάβει αυτό το έργο. Οθόνες αλλά και υπολογιστικοί σταθμοί δίνουν την δυνατότητα απεικόνισης όχι μόνο της τρέχουσας εκπομπής αλλά και οποιασδήποτε διακύμανσης.

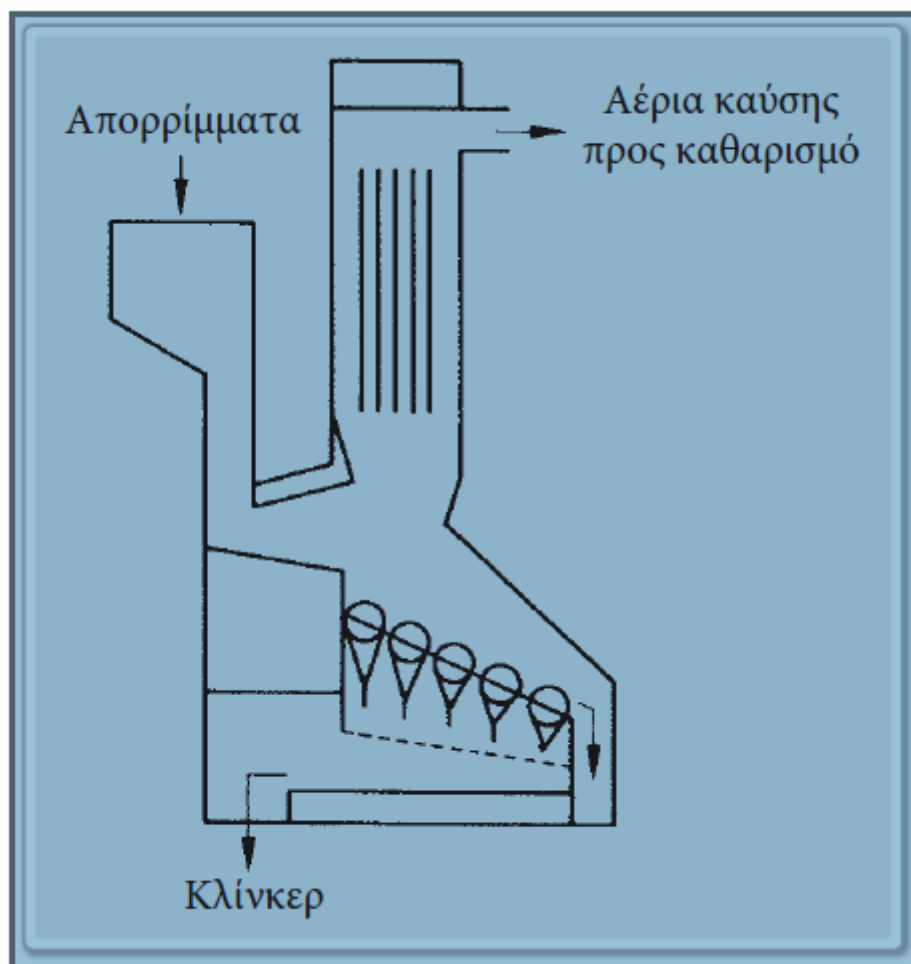
Ακόμη και όταν δεν δουλεύει μια εγκατάσταση συνεχίζονται να παράγονται υπολείμματα (12) καύσης. Ο τύπος, η ποσότητα και η σύσταση των υπολειμμάτων εξαρτάται, αφ' ενός από την ποσότητα και την ποιότητα των απορριμμάτων που επεξεργάστηκαν και αφ' ετέρου από την χρησιμοποιούμενη μέθοδο απορρύπανσης των καυσαερίων. Βασικά μια πρόχειρη διάκριση που μπορεί να γίνει στα υπολείμματα είναι σε επαναχρησιμοποιήσιμα και σε μη-επαναχρησιμοποιήσιμα.

Ακόμα και τα μη επαναχρησιμοποιήσιμα μπορούν να διαχωριστούν σε υπολείμματα τα οποία μπορούν να δεχτούν περαιτέρω επεξεργασία και σε αυτά που δεν μπορούν.

Στους μηχανικούς αποτεφρωτήρες η μεταφορά των απορριμμάτων στις ζώνες ξήρανσης, καύσης και μετάκαυσης, γίνεται με μηχανικούς χειρισμούς της κλίνης του αποτεφρωτήρα. Έτσι επιτυγχάνεται η πλήρης καύση. Στο Σχήμα 6.4 δίνεται η σχηματική απεικόνιση του μηχανικού αποτεφρωτήρα.

Από όλους τους διαθέσιμους τύπους αποτεφρωτήρα μόνο η τεχνική της καύσης σε σχάρα μπορεί να εξασφαλίσει αξιόπιστη λειτουργία σε μεγάλες ποσότητες απορριμμάτων. Υπάρχει αρκετή εμπειρία σχετικά με τα συστήματα καύσης σε σχάρα που μπορούν να διαχειριστούν μέχρι 100 τόνους/ώρα (t/h) ή 2500 τόνων/μέρα (t/d) σε κάθε γραμμή επεξεργασίας. Ανάλογα με τον αριθμό των γραμμών επεξεργασίας είναι δυνατόν να επιτευχθεί επεξεργασία μέχρι 2.000.000 τόνων/έτος (t/a). Οι υπόλοιπες τεχνικές δεν έχουν πετύχει ακόμα απόδοση μεγαλύτερη των 900 t/d για κάθε γραμμή επεξεργασίας. Παρ' όλα αυτά οι νέες συνδυαστικές τεχνικές καύσης όπως η τεχνική καύσης-αεριοποίησης με την εξέλιξη των θερμοσυλλεκτικών συστημάτων

αναμένεται να καταστούν ανταγωνιστικές της τεχνικής καύσης σε σχάρα. Προς το παρόν όμως έχουν εφαρμογή σε μικρότερους όγκους απορριμμάτων.

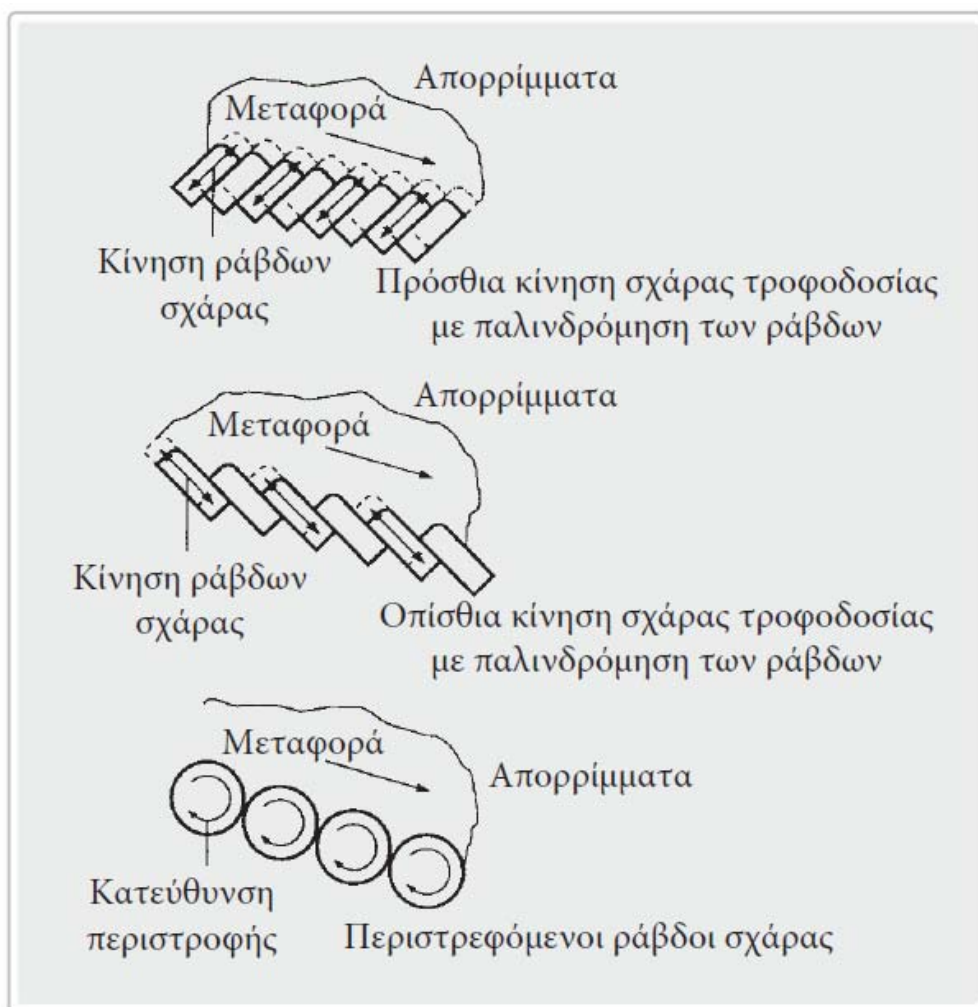


Σχήμα 6.4 Αποτεφρωτής με σχάρα [2].

Σύμφωνα με τα παραπάνω η τεχνική της καύσης σε σχάρα αποτελεί την πλέον διαδεδομένη και αποδοτική λύση η οποία χρησιμοποιείται για αποτέφρωση στο μεγαλύτερο μέρος των δημοτικών απορριμμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Ο μηχανικός αποτεφρωτής με σχάρα μετακινεί τα τεμαχισμένα απορρίμματα εντός του κλιβάνου καύσης, με παράλληλη τροφοδοσία αέρα, και επιτυγχάνει την πλήρη καύση των απορριμμάτων. Αυτό που απομένει από την καύση είναι αδρανή υπολείμματα. Με την τεχνική της καύσης σε σχάρα ελέγχεται εύκολα η διαδικασία και εξασφαλίζονται οι απαραίτητες θερμοδυναμικές συνθήκες ώστε να αντέχει ο αποτεφρωτής στις μηχανικές και θερμικές πιέσεις και να δίνει καλές αποδόσεις. Η θερμική πίεση (υπερφόρτωση) μπορεί να υπολογιστεί από

την θερμογόνο δύναμη των αναμιγμένων απορριμμάτων η οποία κυμαίνεται από 0.9 MJ/kg έως 13.0 MJ/kg. Αντίθετα, η λειτουργία των αποτεφρωτήρων, αποκλειστικά με πλαστικά, δημιουργεί πρόβλημα στην λειτουργία τους, λόγω της υψηλής θερμογόνου δύναμης των πλαστικών που είναι της τάξης των 34.0 MJ/kg.



Σχήμα 6.5 Τύποι σχάρας [2].

Η τροφοδοσία των πλαστικών σε μηχανικούς αποτεφρωτήρες με σχάρα έχουν οδηγήσει πολλές φορές τις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης σε θερμικές υπερφορτώσεις. Παρόλα αυτά το πρόβλημα λύνεται αν το πλαστικό και τα σύνθετα υλικά αναμειγνύονται με τα υπόλοιπα δημοτικά απορρίμματα ή στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ως καύσιμο μόνο το πλαστικό, οι υφιστάμενοι αποτεφρωτήρες με σχάρα υφίστανται τροποποιήσεις. Οι τροποποιήσεις αυτές είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση των υψηλότερων ποσών θερμότητας, λόγω των εισροών του πλαστικού και συσχετίζονται με την αποδοτικότητα του συστήματος μεταφοράς θερμότητας στο λέβητα, όπως και με το σύστημα ελέγχου

εκπομπής των καυσαερίων εξαιτίας της πιθανής αύξησης των ρύπων. Εκτός από αυτούς τους παράγοντες, η θερμότητα μπορεί επίσης να προκαλέσει υπερβολική διάβρωση του συστήματος των σωληνώσεων του λέβητα. Στην τελευταία περίπτωση η συνήθης αντιμετώπιση περιλαμβάνει την αντικατάσταση των ράβδων των σχαρών με αντίστοιχες υδρόψυκτες.

Η σχεδίαση των σχαρών πρέπει να παίρνει υπόψη την πληρότητα της καύσης και τον έλεγχο των ζωνών καύσης. Οι διάφοροι τύποι μηχανικής κίνησης της σχάρας φαίνονται στο Σχήμα 6.5. Τα περισσότερα διαδεδομένα συστήματα, σήμερα, διαθέτουν ράβδους οι οποίοι κινούνται παλινδρομικά ή είναι περιστρεφόμενοι.

Έτσι με τη παλινδρόμηση και τη περιστροφή των ράβδων αναδεύονται και μεταφέρονται τα απορρίμματα στις αντίστοιχες ζώνες καύσης. Για κάθε περίπτωση εγκατάστασης, οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες διαφοροποιούνται, ανάλογα με την επιθυμητή απόδοση επεξεργασίας και την μέθοδο θέρμανσης που χρησιμοποιείται. Τελικός πάντα στόχος της εγκατάστασης αποτέφρωσης είναι η όσο το δυνατόν ολοκλήρωση της αποτέφρωσης ώστε να υπάρχουν όσο το δυνατό λιγότερες ποσότητες ‘καύσιμων’ υλικών.

Ανάλογα με την ροή του αέρα ως προς την ροή των απορριμμάτων, οι αποτεφρωτήρες διακρίνονται σε παράλληλης, αντιπαράλληλης ή ενδιάμεσης ροής.

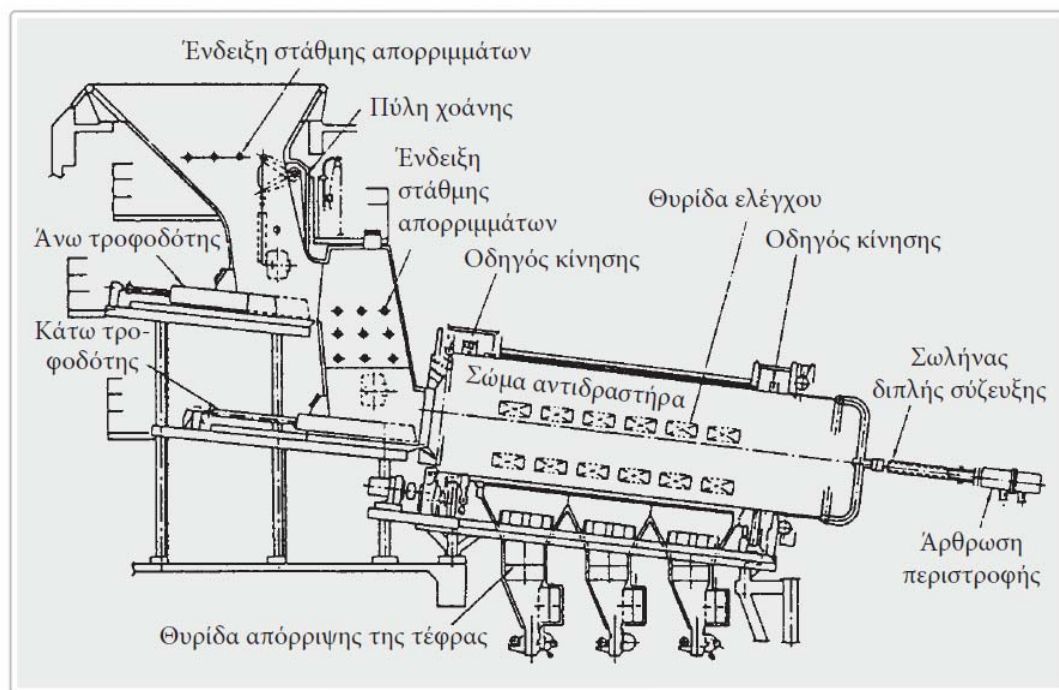
Οι θερμοκρασίες στον αποτεφρωτήρα κυμαίνονται από 200°C ως 1000°C ενώ οι θερμοκρασίες των ράβδων της σχάρας δεν υπερβαίνουν τους 400°C. Η υψηλή θερμοκρασία προκαλεί διάβρωση στο λέβητα ενώ η μείωση της αποτελεί ένα περιοριστικό παράγοντα ως προς την χρησιμοποίηση του ατμολέβητα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επειδή πέφτει σημαντικά η απόδοση του. Για θερμοκρασία, $T = 400^{\circ}\text{C}$ και πίεση, $P = 40 \text{ bar}$ η απόδοση του πέφτει στο 20%. Αντίθετα υψηλότερες αποδόσεις (>60%) μπορούν να επιτευχθούν εάν ο ατμός χρησιμοποιείται για θέρμανση (στις εγκαταστάσεις της μονάδας ή στην γύρω περιοχή) και όχι για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Για την πλήρη καύση απαιτείται ένας αρκετά μεγάλος χρόνος παραμονής. Επισημαίνεται πως οι μέσοι χρόνοι παραμονής στον αποτεφρωτήρα κυμαίνονται από 45 έως 60 min.

6.4.2 Συστήματα Αποτέφρωσης Μαζικής Καύσης με Περιστροφικό Κλίβανο

Οι αποτεφρωτήρες περιστροφικού κλίβανου MB-RK (Mass Burn Rotary Kiln) (Σχήμα 6.6) χρησιμοποιούνται τόσο για την καύση βιομηχανικών όσο και δημοτικών απορριμμάτων. Βασικά χαρακτηρίζονται για την ευελιξία τους στις ποιοτικές και ποσοτικές μεταβολές των απορριμμάτων και έχουν την δυνατότητα να δεχτούν για

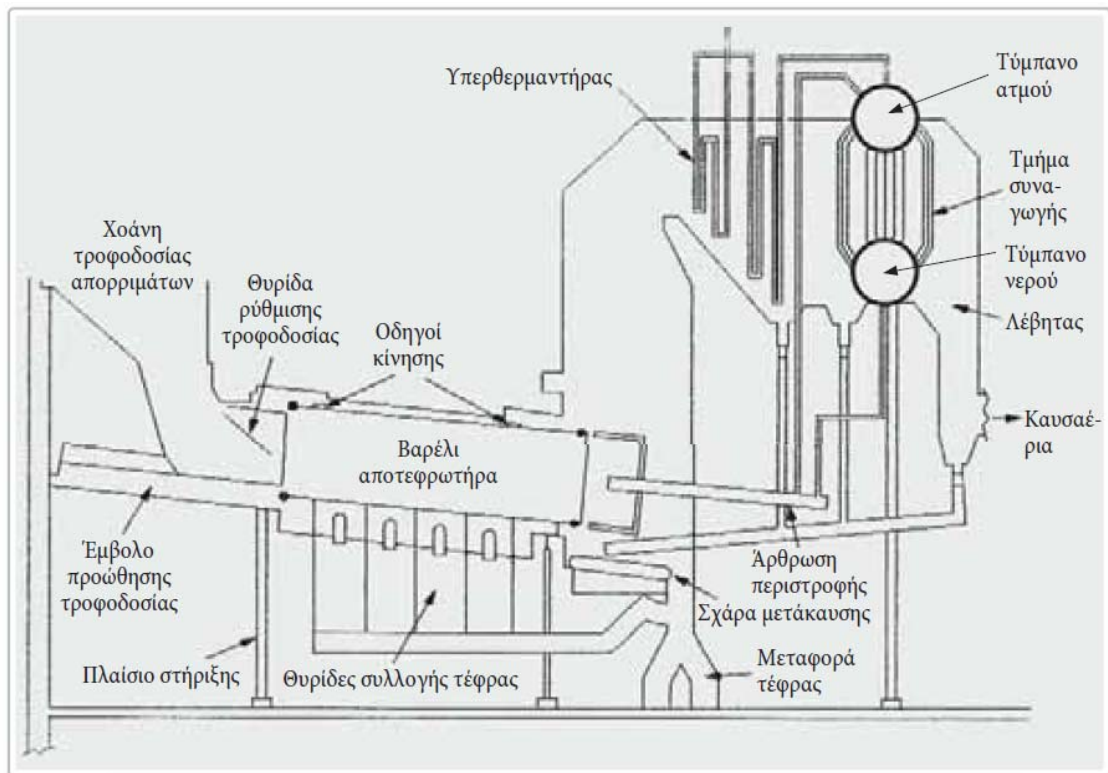
καύση ένα ευρύ φάσμα απορριμμάτων. Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται διαγραμματικά μια μονάδα αποτέφρωσης με περιστροφικό κλίβανο, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με λέβητα για ανάκτηση ενέργειας.



Σχήμα 6.6 Αποτεφρωτήρας περιστροφικού κλιβάνου [2].

Το σχήμα του αποτεφρωτήρα περιστροφικού κλιβάνου είναι κυλινδρικό και εσωτερικά αποτελείται από ανθεκτικά υλικά. Το σώμα του αποτεφρωτήρα έχει μια ελαφρά κλίση. Τα απορρίμματα τροφοδοτούνται στην κορυφή του κλιβάνου μέσω εμβόλου. Με την περιστροφή του αποτεφρωτήρα (10 έως 20 περιστροφές ανά ώρα) επιτυγχάνεται καλή ανάδευση των απορριμμάτων και ταυτόχρονα προωθούνται από την ζώνη ξήρανσης στην ζώνη καύσης όπου καίγονται σε θερμοκρασίες 800~1200°C.

Τα εξωτερικά τοιχώματα του αποτεφρωτήρα φέρουν ενσωματωμένους σωλήνες που διαρρέονται με νερό. Έτσι, παρά την απουσία πυρίμαχων τοίχων και κινούμενων μηχανικών μερών επιτυγχάνεται ικανοποιητική αποτέφρωση ακόμη και όταν αυξάνεται η περιεκτικότητα των απορριμμάτων σε πλαστικά. Επιπλέον με την περιστροφή και συνεπώς την συνεχή ανάδευση, μεγαλύτερη ποσότητα οξυγόνου έρχεται σε επαφή με τα απορρίμματα οπότε γίνεται πλήρης καύση και το ποσοστό των άκαυστων απορριμμάτων στην τέφρα είναι μικρότερο του 3%.

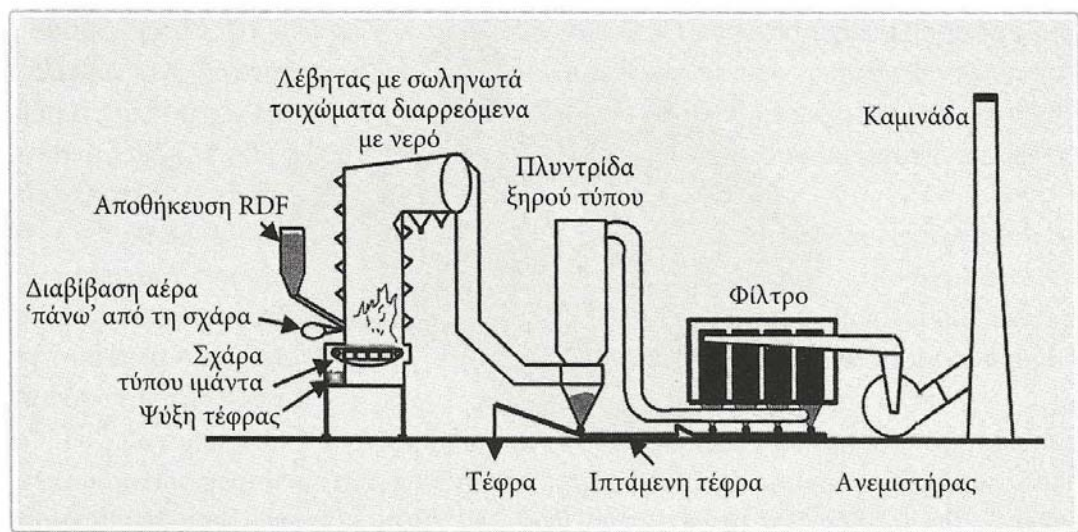


Σχήμα 6.7 Μονάδα αποτέφρωσης με περιστροφικό κλίβανο, η οποία είναι εξοπλισμένη με λέβητα για ανάκτηση ενέργειας [2].

Το πλεονέκτημα που εμφανίζουν οι αποτεφρωτήρες αυτού του τύπου, επειδή τα τοιχώματά τους αποτελούνται από σωλήνες διαρρεόμενους με νερό είναι η αποφυγή επικόλλησης σε αυτά μεγάλης ποσότητας τέφρας. Επίσης οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου, NO_x είναι μικρότερες των 100 ppm και δεν χρειάζεται μονάδα απονιτροποίησης (με βάση την Οδηγία BImSchV 19/08/2003 το όριο είναι 200). Οι μικρές συγκεντρώσεις NO_x οφείλονται στο ότι οι αποτεφρωτήρες περιστροφικού κλιβάνου δεν απαιτούν ψεκασμό αέρα με συνέπεια το άζωτο του αέρα να μην μετατρέπεται στα αντίστοιχα οξείδια.

6.5 ΑΠΟΤΕΦΡΩΤΗΡΕΣ RDF

Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται σε μεγάλης κλίμακας μονάδες αποτέφρωσης. Οι αποτεφρωτήρες RDF είναι παρόμοιοι στο σχεδιασμό με τις μονάδες μαζικής καύσης. Συνήθως φέρουν στον πυθμένα του κλιβάνου μια οριζόντια κινούμενη σχάρα τύπου ιμάντα σε αντίθεση με τους τρόπους ανάδευσης των περισσότερων σχαρών μηχανικού αποτεφρωτήρα. Πάνω στην κινούμενη σχάρα συγκρατείται η τέφρα και απομακρύνεται.



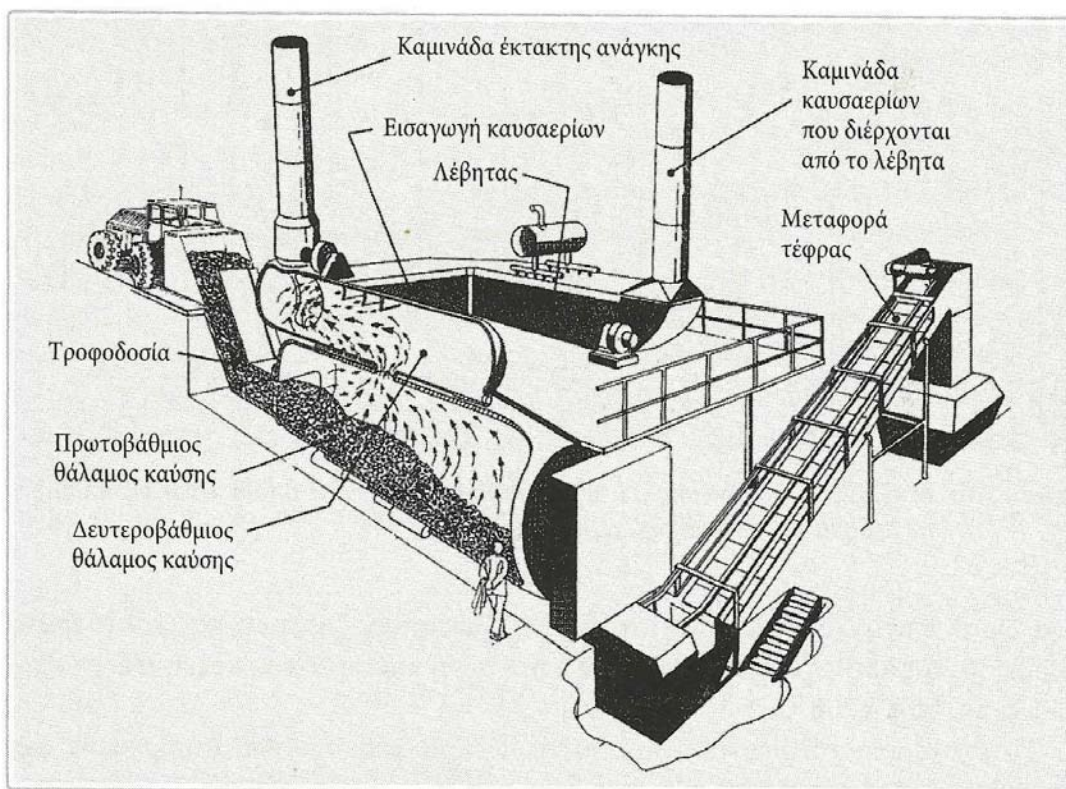
Σχήμα 6.8 Αποτεφρωτήρας RDF με ανάκτηση ενέργειας [2].

Το καύσιμο RDF (Refuse Derived Fuel) παράγεται από τα απορρίμματα. Τα απορρίμματα αποτελούνται από το οργανικό κλάσμα (μικρό μέγεθος υλικών) και το ξηρό κλάσμα (μεγάλο μέγεθος υλικών >250mm). Το οργανικό κλάσμα (υπολείμματα τροφών και υπολείμματα κήπου φυτικής προέλευσης) υποβάλλεται σε αερόβια βιολογική επεξεργασία για παραγωγή κομπόστ ή σε αναερόβια βιολογική επεξεργασία για παραγωγή βιοαερίου και ενέργειας. Το ξηρό κλάσμα αφού αφαιρεθούν τα μη-καύσιμα υλικά συμπιέζεται και σχηματίζεται το καύσιμο υλικό RDF σε μορφή πελλετών. Το πλεονέκτημα του καυσίμου RDF είναι ότι έχει λεπτότερη κατανομή μεγέθους σε σχέση με τα δημοτικά απορρίμματα, υψηλή πυκνότητα και ομοιόμορφο μέγεθος.

Συνήθως το καύσιμο εκτοξεύεται με σχετικά υψηλή ταχύτητα στο θάλαμο καύσης προκαλώντας ανάδευση των απορριμμάτων. Τα απορρίμματα μεταφέρονται στο πίσω μέρος της σχάρας ώστε να καλύπτουν τα 2/3 αυτής. Ο αέρας διαβιβάζεται πάνω και κάτω από τη σχάρα ώστε να ολοκληρωθεί η καύση. Αυτού του τύπου οι αποτεφρωτήρες λειτουργούν με περίσσεια αέρα από 80% έως 100%. Η ανάκτηση της θερμότητας καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω λέβητα ο οποίος φέρει ως τοιχώματα σωληνώσεις που διαρρέονται από νερό. Στο σχήμα 6.8 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα ενός αποτεφρωτήρα RDF με ανάκτηση ενέργειας. Η δυναμικότητα των αποτεφρωτήρων RDF κυμαίνεται από 200 έως 2700 τόνους/ημέρα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του καυσίμου RDF είναι η μεγάλη επιφάνεια που παρουσιάζει γεγονός που οδηγεί σε πιο αποδοτική καύση.

6.6 ΑΡΘΡΩΤΟΙ ΑΠΟΤΕΦΡΩΤΗΡΕΣ

Οι αρθρωτοί (modular) ή αλλιώς μικρής χωρητικότητας αποτεφρωτήρες χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την καύση των στερεών δημοτικών απορριμμάτων. Δεν απαιτούν προ-επεξεργασία των απορριμμάτων όπως και οι αποτεφρωτήρες μαζικής καύσης. Αποτελούνται από δύο θαλάμους καύσης, τον πρωτοβάθμιο και τον δευτεροβάθμιο (Σχήμα 6.9). Οι αποτεφρωτήρες αυτοί ονομάζονται αρθρωτοί γιατί οι δύο θάλαμοι καύσης, η καμινάδα, ο εναλλάκτης θερμότητας και το σύστημα τροφοδοσίας αποστέλλονται ως ξεχωριστές μονάδες (modules) και συναρμολογούνται στο χώρο εγκατάστασης. Η εγκατάσταση φυσικά απαιτεί κατασκευή θεμελιώσεων, χαλύβδινων υποδομών και περιβλημάτων ώστε να υποστηριχτεί η συναρμολόγηση των μονάδων. Η δυναμικότητα των αρθρωτών αποτεφρωτήρων κυμαίνεται από 4 έως 270 τόνους/ημέρα. Υπάρχει η δυνατότητα παράλληλης σύνδεσης πολλών αρθρωτών αποτεφρωτήρων με σκοπό την αύξηση της δυναμικότητας.



Σχήμα 6.9 Σχηματική απεικόνιση αρθρωτής μονάδας αποτέφρωσης [2].

Οι αρθρωτοί αποτεφρωτήρες διακρίνονται, ανάλογα με την ποσότητα του διαβιβαζόμενου αέρα, σε δύο μεγάλες κατηγορίες: σε περίσσειας και έλλειψης αέρα.

Στα αρθρωτά συστήματα περίσσειας αέρα και οι δύο θάλαμοι καύσης λειτουργούν με επίπεδα αέρα πολύ μεγαλύτερα από τις στοιχειομετρικές απαιτήσεις (100% έως 250% περίσσεια αέρα).

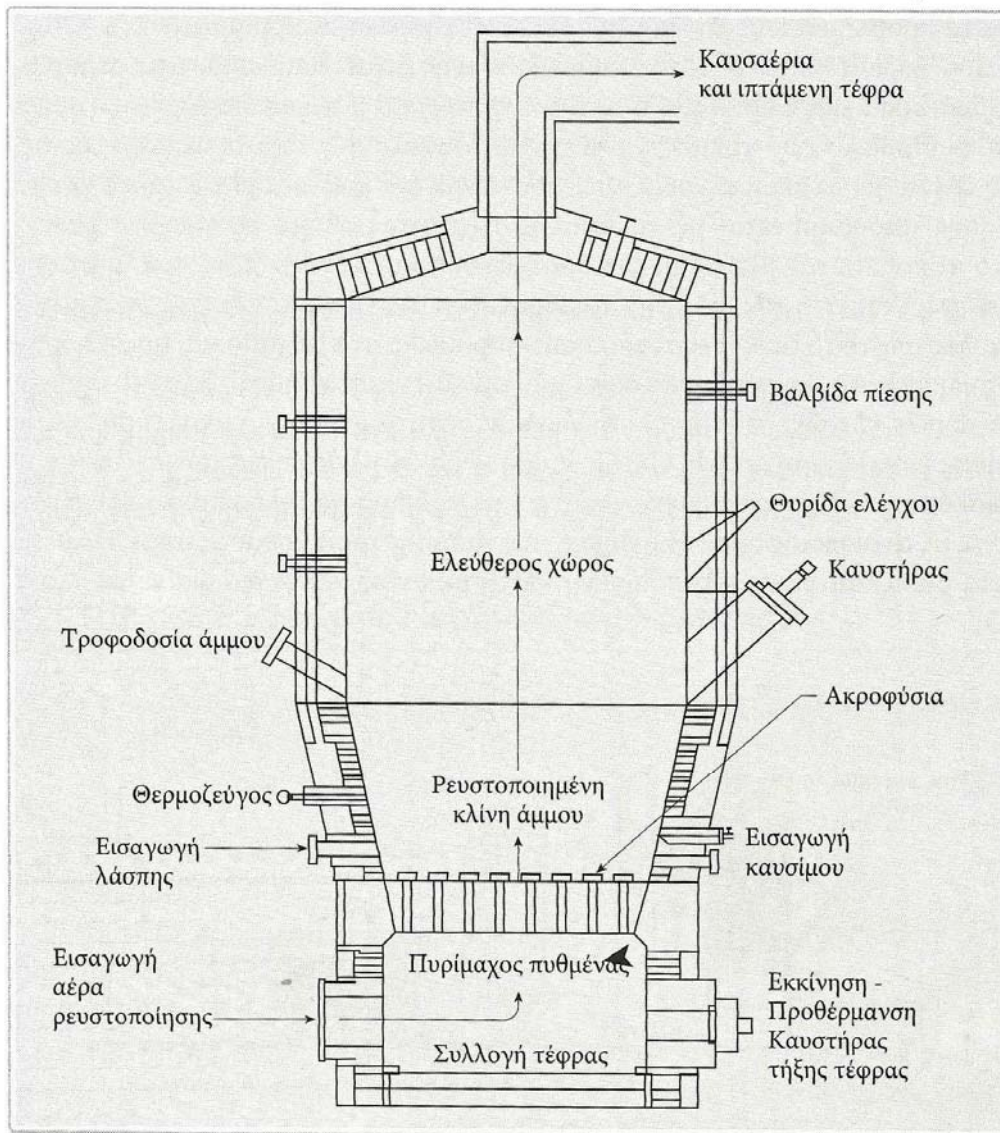
Στα αρθρωτά συστήματα έλλειψης αέρα ο αέρας διαβιβάζεται στον πρωτοβάθμιο θάλαμο σε υπο-στοιχειομετρικά επίπεδα. Τα προϊόντα της ατελούς καύσης των απορριμμάτων στον πρωτοβάθμιο θάλαμο μαζί με τα καυσαέρια εισέρχονται στον δευτεροβάθμιο θάλαμο. Στον δευτεροβάθμιο θάλαμο διαβιβάζεται σε περίσσεια ο αέρας και ολοκληρώνεται η καύση σε υψηλές θερμοκρασίες. Η υψηλή θερμοκρασία σε συνδυασμό με την τυρβώδη ανάμειξη των καυσαερίων έχει σαν αποτέλεσμα την καταστροφή των περισσότερων οργανικών ρυπαντών που σχηματίζονται.

Οι αρθρωτοί αποτεφρωτήρες είναι κατάλληλοι για βιομηχανικά απορρίμματα καθώς και για ειδικές περιπτώσεις απορριμμάτων όπως τα νοσοκομειακά.

6.7 ΑΠΟΤΕΦΡΩΤΗΡΕΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΚΛΙΝΗΣ

Στον αποτεφρωτήρα ρευστοποιημένης κλίνης ως μέσο ρευστοποίησης χρησιμοποιείται άμμος η οποία θερμαίνεται. Στη συνέχεια ο αποτεφρωτήρας τροφοδοτείται με ανεπεξέργαστα απορρίμματα ή RDF που καίγονται σε μικρό χρονικό διάστημα. Το καύσιμο εκτοξεύεται μέσα ή πάνω από την κλίνη διαμέσου θυρών στα τοιχώματα του αποτεφρωτήρα. Η άμμος της κλίνης αιωρείται κατά τη διάρκεια της καύσης με εισαγωγή αέρα κάτω από τη σχάρα με πολύ υψηλή ταχύτητα.

Με τη ρευστοποιημένη κλίνη επιτυγχάνεται πλήρης ή σχεδόν πλήρης καύση λόγω της άμεσης επαφής των στερεών σωματιδίων των απορριμμάτων με τους κόκκους άμμου που βρίσκονται σε υψηλή θερμοκρασία και την υψηλή αναλογία επιφάνειας σωματιδίου ανά όγκο. Οι χρόνοι παραμονής των απορριμμάτων είναι περίπου 4-5s. Οι αποτεφρωτήρες ρευστοποιημένης κλίνης περιλαμβάνουν λέβητα για την παραγωγή ατμού.



Σχήμα 6.10 Αποτεφρωτήρας ρευστοποιημένης κλίνης [2].

Το ενδιαφέρον για την αποτέφρωση με ρευστοποιημένη κλίνη συνεχώς αυξάνεται λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει:

- Έλεγχος της καύσης που εξαρτάται από τη μεταβολή της ποιότητας των απορριμμάτων.
- Έλεγχος της εκπομπής οξειδίων του αζώτου επειδή η θερμοκρασία στην οποία γίνεται η καύση στους αποτεφρωτήρες ρευστοποιημένης κλίνης είναι χαμηλότερη σε σχέση με άλλους αποτεφρωτήρες.
- Έλεγχος εκπομπών όξινων αερίων επειδή μπορούν να ψεκαστούν χημικά αντιδραστήρια στη μάζα της κλίνης.
- Εύκολος χειρισμός.
- Ικανοποιητική ελάττωση του όγκου των απορριμμάτων.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανακύκλωση συμβάλλει γενικά στη μείωση των αστικών αποβλήτων, τα οποία συλλέγονται από τις αρμόδιες υπηρεσίες και μεταφέρονται στους δυσεύρετους Χώρους Υγειονομικής Ταφής. Έτσι μειώνεται η ποσότητα των απορριμμάτων και εξοικονομείται χώρος.

Όσον αφορά τα οικονομικά οφέλη της ανακύκλωσης, αυτή συνεισφέρει σημαντικά στην εξοικονόμηση πρώτων υλών και ενέργειας. Επίσης, με την ανακύκλωση μειώνεται η ρύπανση της ατμόσφαιρας, του εδάφους και των υπόγειων υδάτων και συνεπώς οι κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία. Οι εκπομπές όλων των τεχνολογιών ανακύκλωσης πλαστικών είναι κάτω από τα όρια που θέτει η οδηγία 2000/76/EC, με την καύση να παρουσιάζει τις υψηλότερες εκπομπές.

Για την αξιολόγηση των διαφόρων τεχνολογιών ανακύκλωσης πλαστικών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες όπως:

- Κατανάλωση ενέργειας.
- Ποιότητα προϊόντων.
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Ιδιαιτερότητες τοπικού χαρακτήρα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια και εάν είναι δυνατή και συμφέρουσα η διαλογή των διαφόρων ειδών πλαστικών, τότε η δευτερογενής ανακύκλωση ενός ρεύματος είναι η πιο ελκυστική τεχνολογία ανακύκλωσης πλαστικών.

Εάν για κάποιο λόγο η διαλογή δεν είναι δυνατή τότε η δευτερογενής ανακύκλωση ανάμικτων πλαστικών για την παραγωγή προϊόντων χαμηλότερων απαιτήσεων συνεχίζει να είναι μια πολύ καλή επιλογή. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει αγορά για αυτά τα προϊόντα τότε τα πλαστικά απορρίμματα μπορούν να υποστούν πυρόλυση ή αεριοποίηση (τριτογενή ανακύκλωση) για την παραγωγή καυσίμων. Φυσικά και σε αυτήν την περίπτωση η διαλογή είναι απαραίτητη για την βελτιστοποίηση της τροφοδοσίας και τη μέγιστη απόδοση της διεργασίας. Ο αποπολυμερισμός προς μονομερή σπάνια θεωρείται οικονομικά αποδεκτή λύση εκτός από ειδικές μόνο περιπτώσεις.

Η καύση με ανάκτηση ενέργειας πρέπει να είναι η τελευταία λύση πριν από την ταφή όλων των απορριμμάτων χωρίς διαλογή σε ΧΥΤΑ. Προφανώς, οι αυστηρές προδιαγραφές κατασκευής και λειτουργίας και οι συχνοί έλεγχοι είναι απαραίτητα στοιχεία για να είναι η καύση ενεργειακά αποδοτική μέθοδος και να κρατούνται οι εκπομπές

επικινδύνων ρυπαντών κάτω από τα καθορισμένα όρια. Να σημειωθεί πάντως ότι η τεταρτογενής ανακύκλωση καταλαμβάνει σημαντικό ποσοστό στην ανακύκλωση πλαστικών παγκοσμίως κυρίως γιατί τα πλαστικά καίγονται μαζί με τα άλλα στερεά απορρίμματα χωρίς να προηγείται διαλογή.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η υγειονομική ταφή όλων των απορριμμάτων χωρίς καμία διαλογή σε ΧΥΤΑ είναι οικονομικά και κοινωνικά απαράδεκτη.

Δυστυχώς, η Ελλάδα βρίσκεται στις τελευταίες θέσεις μεταξύ των ευρωπαϊκών χωρών στην ανακύκλωση απορριμμάτων. Το ποσοστό ανάκτησης στερεών αποβλήτων φτάνει μόλις 20%, ενώ το υπόλοιπο 80% των σκουπιδιών οδηγείται σε υγειονομική ταφή. Σε κάποιες χώρες της Ευρώπης το ποσοστό ανάκτησης φτάνει το 70% και περισσότερο. Είναι σίγουρο ότι πρέπει να αλλάξει η στάση μας απέναντι στο θέμα της ανακύκλωσης. Πρέπει τα απόβλητα να θεωρούνται ως δυνητικά οικονομικός πόρος και να μην αντιμετωπίζονται μόνο ως πρόβλημα. Σύμφωνα με τη Eurostat, οι μέσοι όροι των κρατών - μελών της Ε.Ε. το 2008 ήταν: 5,5% αποτέφρωση, 46% ανάκτηση, 48,5% διάθεση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Callister W. and Rethwisch D., Materials Science and Engineering, John Wiley and Sons 2010.
2. Μπόκαρης Ε., Τεχνολογία Ανακύκλωσης Πλαστικών, εκδόσεις Ζήτη, 2012.
3. Λεζκίδου Μ. και Μπουντίνας Κ., Ανακύκλωση Πλαστικών, εκδόσεις Γζιόλα 2001.
4. Καραγιαννίδης Γ., Τεχνολογία Πολυμερών, εκδόσεις Ζήτη 2009
5. Παντελής Δ., Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, εκδόσεις Παπασωτηρίου 2008.
6. <http://wikipedia.org>
7. <http://www.Plasticsrecyclers.eu>
8. <http://www.ahpi.gr/>
9. <http://aix.meng.auth.gr/lhtee/education/>