

Ευθύμιος Π. Μπόκαρης

Τεχνολογία Ανακύκλωσης Πλαστικών



ISBN978-960-456-282-4

© Copyright, Μάϊος 2012, Ε. Μπόκαρης, Εκδόσεις Ζήτη

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

Φωτοστοιχειοθεσία

**Εκτύπωση
Βιβλιοδεσία**

Π. ΖΗΤΗ & Σία ΟΕ

18^ο χλμ Θεσσαλονίκης - Περαιάς
Τ.Θ. 4171 • Περαιά Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19
Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



www.ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ - ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΘΕΣΗ:

Αρμενοπούλου 27 - 546 35 Θεσσαλονίκη • Τηλ.: 2310-203.720 • Fax 2310-211.305
e-mail: sales@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ - ΕΝΩΣΗ ΕΚΔΟΤΩΝ ΒΙΒΛΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:

Στοά του Βιβλίου (Πεσμαζόγλου 5) - 105 64 ΑΘΗΝΑ • Τηλ.-Fax: 210-3211.097

ΑΠΟΘΗΚΗ ΑΘΗΝΩΝ - ΠΩΛΗΣΗ ΧΟΝΔΡΙΚΗ:

Ασκληπιδίου 60 - Εξάρχεια 114 71, Αθήνα • Τηλ.-Fax: 210-3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: www.ziti.gr

Πρόλογος

Η πολύ μεγάλη ανάπτυξη της βιομηχανίας πλαστικών με τα σημαντικά προβλήματα που διαμορφώνει η διάθεσή τους στο περιβάλλον οδηγεί στην απαίτηση της ανακύκλωσης τους. Η ανακύκλωση συμβάλλει στην μη-εξάντληση των φυσικών πόρων όπως και στην εξοικονόμηση ενέργειας που προέρχεται από τη μικρότερη ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή ανακυκλωμένων πλαστικών σε σχέση με τα αντίστοιχα πλαστικά από παρθένα ρητίνη.

Η παγκόσμια παραγωγή πλαστικών το 1950 ήταν πέντε εκατομμύρια τόνοι και το 2007 ανήλθε στα διακόσια εξήντα εκατομμύρια τόνους. 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. 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.

Τα πλαστικά απορρίμματα αποτελούν περίπου το 8% των στερεών δημοτικών απορριμμάτων (ΣΔΑ) και, ανάλογα με την χώρα, ανακυκλώνεται μόνο το 5-25% των πλαστικών. Για την καλλίτερη διαχείριση της ανακύκλωσης τα πλαστικά έχουν κωδικοποιηθεί σε 10-12 κύρια είδη, αν και παράλληλα υφίστανται χιλιάδες διαφορετικές ρητίνες και μίγματα. Επιπλέον περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό προσθέτων, όπως πληρωτικά υλικά, χρωστικές, αντιοξειδωτικά, και επιβραδυντικά πυρός (flame retardants) τα οποία επηρεάζουν τις διεργασίες της ανακύκλωσης.

Η ανακύκλωση των πλαστικών απορριμμάτων διακρίνεται σε:

- *Πρωτογενή ανακύκλωση:* τα ανακυκλωμένα πλαστικά είναι ίδιου ή παρόμοιου τύπου με αυτά από τα οποία προήλθαν
- *Δευτερογενή ανακύκλωση ή μηχανική ανακύκλωση:* τα ανακυκλωμένα πλαστικά εμφανίζουν μειωμένες ιδιότητες (μηχανικές ή θερμικές) σε σχέση με αυτά από τα οποία προήλθαν

- *Τριτογενή ανακύκλωση* [Θερμική Ανακύκλωση (πυρόλυση, θερμική διάσπαση, καταλυτική διάσπαση, αεριοποίηση, υδρογόνωση) – Χημική Ανακύκλωση]: παραγωγή κηροζίνης, βενζίνης, ντίζελ, χημικών, μονομερών κ.λπ.
- *Τεταρτογενή ανακύκλωση* (αποτέφρωση): ανάκτηση ενέργειας από πλαστικά απορρίμματα

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.

Στις αρχές της δεκαετίας του '90 κύρια επιλογή ήταν η *μηχανική ανακύκλωση*. Σήμερα το προβάδισμα διαθέτει η *καύση ή τεταρτογενής ανακύκλωση* (ανάκτηση ενέργειας), λόγω και της προώθησης της καύσης των στερεών δημοτικών απορριμμάτων (όπου τα πλαστικά συν-καίονται με τα δημοτικά), όπως και των δυσκολιών συλλογής-διαλογής και των συλλεγόμενων ποσοτήτων πλαστικών. Επίσης η *τριτογενής ανακύκλωση* περιορίζεται σε ειδικές κατηγορίες πλαστικών απορριμμάτων. Η σημαντική αλλαγή, από οικολογική άποψη, είναι κυρίως η δυνατότητα ανακύκλωσης περισσότερων τύπων πλαστικών απορριμμάτων. Στις αρχές της δεκαετίας του '90 ανακυκλώνονταν μόνο οικιακά πλαστικά συσκευασίας, ενώ σήμερα, πέραν των οικιακών, ένα ευρύ φάσμα πλαστικών, μεταξύ των οποίων και ειδικές κατηγορίες όπως, ελαστικά οχημάτων, πλαστικά ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, χαλιά κ.λπ..

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. Το ποσοστό που καταλαμβάνουν οι εφαρμοζόμενες τεχνολογίες είναι: δευτερογενής ανακύκλωση ή μηχανική ανακύκλωση (6%), τριτογενής ανακύκλωση (0.3%) και τεταρτογενής ανακύκλωση (14%).

Η *πρωτογενής ανακύκλωση* συνήθως πραγματοποιείται στο χώρο της βιομηχανικής παραγωγής των πλαστικών (σκάρτο πλαστικό) ως αποτέλεσμα αστοχιών της παραγωγής και δημιουργίας ελαττωματικών προϊόντων. Σχετικά με την *δευτερογενή ή μηχανική ανακύκλωση* ένα ποσοστό της τάξης του 15-20 % των πλαστικών απορριμμάτων θα μπορούσε να ανακυκλωθεί με τις συμβατικές διεργασίες της μηχανικής ανακύκλωσης. Πέραν του ρεύματος των πολυλεφινών υφίστανται πολλά ανάμικτα και επιμολυσμένα πλαστικά τα οποία μετατρέπο-

νται σε υποκατάστατα προϊόντων ξύλου τα οποία απαντώνται σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών, λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους και της αντοχής τους στις καιρικές συνθήκες.

Στην τριτογενή ανακύκλωση περιλαμβάνονται η Θερμική Ανακύκλωση: πυρόλυση (υψηλών θερμοκρασιών), θερμική διάσπαση (πυρόλυση χαμηλών θερμοκρασιών), καταλυτική διάσπαση, υδρογόνωση, αεριοποίηση και η Χημική Ανακύκλωση: υδρόλυση, γλυκόλυση και μεθανόλυση των πλαστικών πολυσυμπύκνωσης. Η πυρόλυση διεξάγεται απουσία αέρα ενώ η υδρογόνωση παρουσία υδρογόνου. Κατά την αεριοποίηση συμβαίνει μερική οξείδωση των υδρογονανθράκων.

Ο προσανατολισμός σε αυτές τις τεχνικές οφείλεται στη φύση και τη ποιότητα των ανάμικτων και επιμολυσμένων πλαστικών τα οποία επεξεργάζονται, και τα οποία πέραν της σύστασης τους ως μίγματα πλαστικών περιλαμβάνουν διάφορες προσμίξεις όπως, άμμο, σκόνη, αλουμινόχαρτο, χάρτινες ετικέτες και υπολείμματα τροφών. Με τις τεχνικές αυτές ανακυκλώνονται επίσης ειδικές κατηγορίες πλαστικών απορριμμάτων, όπως πλαστικά κατάλοιπα τεμαχισμού οχημάτων (ΚΤΟ), τα ελαστικά αυτοκινήτων και τα πλαστικά απορρίμματα ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ).

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. Στην πυρόλυση χρησιμοποιούνται ανάμικτα και πολυστρωματικά πλαστικά, με υψηλό βαθμό επιμολύνσεων. Ένας περιορισμός γι' αυτή τη διεργασία είναι το περιεχόμενο χλώριο των πλαστικών απορριμμάτων.

Στην αιχμή της πυρολυτικής διεργασίας βρίσκονται σήμερα η πυρόλυση χαμηλών θερμοκρασιών και η καταλυτική διάσπαση με την οποία λαμβάνονται υγρά καύσιμα σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80% και το προκύπτον καύσιμο είναι εντός των προδιαγραφών της βενζίνης, κεροζίνης, ντίζελ ή άλλων χρήσιμων υδρογονανθράκων. Στην καταλυτική διάσπαση χρησιμοποιούνται όξινοι καταλύτες όπως πυριτίου – αλουμίνας, ζεόλιθοι (HY, HZSM-5, μορντενίτης) ή αλκαλικές ενώσεις όπως το οξείδιο ψευδαργύρου. Το κύριο πρόβλημα της καταλυτικής διάσπασης είναι ότι οι καταλύτες, κατά την πορεία της διεργασίας, απενεργοποιούνται πάρα πολύ γρήγορα. Πολλές από τις πυρολυτικές διεργασίες βρίσκονται σήμερα στο στάδιο της εφαρμογής σε υψηλών προδιαγραφών εγκαταστάσεις.

Τέλος η *ανάκτηση της ενέργειας* των πλαστικών απορριμμάτων μπορεί να επιτευχθεί με *αποτέφρωση* (*τεταρτογενής ανακύκλωση*), το κόστος όμως απορ-

ρύπανσης εξαιτίας των επιπτώσεων στο περιβάλλον (με σημαντικότερη επίπτωση την παραγωγή διοξινών και φουρανίων), όπως και των προδιαγραφών της τροφοδοσίας ως προς τα περιεχόμενα ετεροάτομα είναι πάρα πολύ υψηλό. Πέραν της μονο-καύσης των πλαστικών απορριμμάτων εφαρμόζεται και η συν-καύση με άλλα καύσιμα, όπως στις υψικαμίνους, όπου και πάλι θα πρέπει να τηρούνται οι προδιαγραφές της τροφοδοσίας. Λόγω όλων αυτών των προβλημάτων (περιβαλλοντικών και οικονομικών) στη Γερμανία *απαγορεύεται η καύση των πλαστικών*.

Ως συμπέρασμα σχετικά με την παρουσίαση του συγκεκριμένου επιστημονικού και τεχνολογικού πεδίου, και με τις δεδομένες κοινωνικές προεκτάσεις αλλά και αλληλεπιδράσεις του θα πρέπει να σημειωθεί:

ότι η εξέλιξη της τεχνολογίας αν συνδυαστεί με την ελάττωση της χρήσης, επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση των υλικών (με Συλλογή-Διαλογή των υλικών στη Πηγή ή με Μηχανική Διαλογή), η κοινωνία θα οδηγηθεί σε μια σημαντική αύξηση του οικολογικού οφέλους και της ελαχιστοποίησης του οικονομικού κόστους.

Αυτό θα έχει σαν συνέπεια την υιοθέτηση των πιο φιλικών προς το περιβάλλον διεργασιών, όπως της *μηχανικής ανακύκλωσης* και όχι περισσότερων προβληματικών για το περιβάλλον και δαπανηρών για το πολίτη διεργασιών, όπως η *καύση*. Σχετικά με τις θερμικές επεξεργασίες που οδηγούνται σε παραγωγή καυσίμων, τα οποία κατηγορούνται ότι συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, θα πρέπει να προσανατολιστεί (όπως έχει αρχίσει και εφαρμόζεται και σήμερα στην πράξη) στην επεξεργασία περισσότερο των ανάμικτων και επιμολυσμένων πλαστικών απορριμμάτων που δεν μπορούν να τύχουν άλλης επιτυχούς επεξεργασίας, όπως και ειδικών κατηγοριών απορριμμάτων (π.χ. ΚΤΟ, ελαστικά οχημάτων, ΑΗΗΕ), με σκοπό την παραγωγή χημικών υψηλής αξίας (π.χ. μονομερή) λόγω των μειωμένων περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνεται και η Χημική Ανακύκλωση των πλαστικών, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την ανακύκλωση του PET με την οποία λαμβάνεται το υψηλής αξίας μονομερές καθιστώντας την διεργασία αυτή οικονομικά βιώσιμη.

Στο παρόν βιβλίο παρουσιάζεται διεξοδικά η *‘Τεχνολογία Ανακύκλωσης των Πλαστικών Απορριμμάτων’* και αναπτύσσονται οι αρχές των διεργασιών ανακύκλωσης, ο τεχνολογικός εξοπλισμός τους, το οικονομικό κόστος και οι επιπτώσεις τους στην ποιότητα των προϊόντων, το περιβάλλον και την ασφάλεια της υγείας του καταναλωτή. Ταυτόχρονα επειδή τα πλαστικά θεωρούνται ως μέρος

των στερεών δημοτικών απορριμμάτων (ΣΔΑ) αναπτύσσονται συνοπτικά και οι αντίστοιχες διεργασίες των δημοτικών απορριμμάτων, ο εξοπλισμός και η οικονομική τους βιωσιμότητα, όπως και οι δυνατότητες συν-διαχείρισης πλαστικών και δημοτικών απορριμμάτων. Τέλος φιλοδοξία του παρόντος βιβλίου είναι να παρουσιάσει την πρώτη ολοκληρωμένη εισαγωγή του θέματος στην ελληνική βιβλιογραφία και ευελπιστεί να αποτελέσει ένα κατάλληλο βοήθημα για τους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές, τους επιστήμονες Χημικούς, Φυσικούς, Βιολόγους, Υλικών, Χημικούς Μηχανικούς, Μηχανολόγους Μηχανικούς, Τεχνολόγους, Δημόσιους Οργανισμούς, Διευθύνσεις Περιβάλλοντος και όλους εκείνους που ενδιαφέρονται ή ασχολούνται με τα πλαστικά και εν γένει δημοτικά απορρίμματα και την ανακύκλωση τους.

Πολλές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω προς τις Εκδόσεις Π. Ζήτη & Σία Ο.Ε. για το εκπληκτικό αποτέλεσμα, χωρίς την βοήθεια των οποίων δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση αυτού του έργου.

Μάϊος 2012

Ευθύμιος Π. Μπόκαρης
Επίκουρος καθηγητής
Τομέας Βιομηχανικής Χημείας και Χημείας Τροφίμων
Τμήμα Χημείας
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Τι είναι τα πλαστικά

1.1 Η χημική δομή των πολυμερών.....	1
1.2 Σύνθεση πολυμερών	4
1.3 Θερμικές ιδιότητες πολυμερών	6
1.3.1 Ιδιότητες θερμοπλαστικών πολυμερών στην στερεά κατάσταση και την κατάσταση τήγματος	7
1.3.2 Προϋπόθεση για την οικονομικά βιώσιμη ανακύκλωση των πλαστικών η την επεξεργασία στην κατάσταση τήγματος	9
1.4 Από τα πολυμερή στα πλαστικά: Πρόσθετες ουσίες στα πλαστικά.....	9
1.5 Μέθοδοι επεξεργασίας και μορφοποίησης πολυμερών	10
1.5.1 Εκβολή ή Εξώθηση.....	11
1.5.1.1 Προσθήκη πρόσθετων.....	18
1.5.1.2 Διεργασίες εκβολέα	18
1.5.1.3 Συν-εκβολή	21
1.5.2 Χύτευση.....	23
1.5.2.1 Χύτευση με έγχυση θερμοπλαστικών	23
1.5.2.1.1 Μηχανές έγχυσης	23
1.5.2.1.2 Περιγραφή της διάταξης χύτευσης με έγχυση με σύστημα παλινδρομούντος κοχλία	27
1.5.2.2 Χύτευση με έγχυση θερμοσκληρυνόμενων πλαστικών.....	31
1.5.2.3 Χύτευση με συμπίεση (θερμοσκληρυνόμενων πλαστικών)	33
1.5.2.4 Χύτευση (μορφοποίηση) με εμφύσηση (blow molding)	35
1.5.2.4.1 Χύτευση (μορφοποίηση) με έγχυση και εμφύσηση	35
1.5.2.4.2 Χύτευση (μορφοποίηση) με εκβολή και εμφύσηση	36
1.5.3 Περιτροφική μορφοποίηση.....	39
1.5.4 Θερμική διαμόρφωση (θερμοπλαστικών)	41
1.5.5 Κυλίνδρωση	44
1.5.6 Ενίσχυση των θερμοσκληρυνόμενων πλαστικών κατά την μορφοποίηση. Η τεχνική pultrusion.....	46
1.5.7 Παραγωγή τεχνιτών ινών.....	48

Κεφάλαιο 2

Η αγορά των πλαστικών

2.1 Εφαρμογές και κατανάλωση πλαστικών.....	53
2.2 Τα πλαστικά ως υλικά συσκευασίας	62
2.3 Τα πλαστικά ως υλικά συσκευασίας στην Ελλάδα	64
2.4 Κύκλος ζωής πλαστικών προϊόντων	65
2.5 Γιατί η χρήση ή μη των πλαστικών	66
2.6 Νομοθεσία για τα πλαστικά και τα ανακυκλωμένα προϊόντα τους	71

Κεφάλαιο 3

Ανακύκλωση πλαστικών απορριμμάτων

3.1 Εισαγωγή στην ανακύκλωση των στερεών δημοτικών απορριμμάτων.....	75
3.2 Στερεά δημοτικά απορρίμματα	75
3.3 Τα περιβαλλοντικά οφέλη της ανακύκλωσης των υλικών συσκευασίας.....	77
3.3.1 Μείωση της συμβολής της καύσης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου....	77
3.3.2 Η συμβολή της Ελλάδας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου	78
3.3.3 Εξοικονόμηση ενέργειας.....	79
3.3.4 Εξοικονόμηση νερού.....	80
3.4 Τα πλαστικά στα απορρίμματα.....	80
3.5 Η αναγκαιότητα της ανακύκλωσης των πλαστικών.....	81
3.6 Ανακύκλωση μετακαταναλωτικών πλαστικών.....	82
3.7 Η κατάσταση σχετικά με τη μηχανική ανακύκλωση και τη καύση στις χώρες της ΕΕ σήμερα	85
3.8 Ευρωπαϊκές οδηγίες για την ανακύκλωση των υλικών συσκευασίας.....	87
3.9 Η θερμοδυναμική προσέγγιση της ανακύκλωσης πλαστικών	89
3.10 Κωδικοποίηση ανακυκλώσιμων πλαστικών.....	94

Κεφάλαιο 4

Τεχνολογία ανακύκλωσης πλαστικών

4.1 Ταξινόμηση πλαστικών απορριμμάτων και τεχνολογία (μέθοδοι) ανακύ- κλωσης	97
Ορισμοί σχετικά με τα απορρίμματα πλαστικών	97

4.2 Πηγές πλαστικών απορριμμάτων.....	99
4.2.1 Βιομηχανικά πλαστικά απορρίμματα.....	100
4.2.2 Μετακαταναλωτικά πλαστικά απορρίμματα	104
4.2.3 Σκάρτα και επιβλαβή πλαστικά απορρίμματα	105
4.3 Οι μέθοδοι ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων.....	106
4.4 Η ροή των πλαστικών απορριμμάτων στα στερεά απορρίμματα.....	110

Κεφάλαιο 5

Οικο-αποτελεσματικότητα ή Οικο-ισορροπία

Οικονομικό κόστος/Ενεργειακό όφελος των μεθόδων ανακύκλωσης

5.1 Εισαγωγή.....	111
5.2 Οικο-αποτελεσματικότητα και μέθοδοι ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων.....	115
5.2.1 Το οικονομικό κόστος των μεθόδων ανακύκλωσης με βάση το γερμανικό σύστημα συλλογής	116
5.2.1.1 Το κόστος της μηχανικής ανακύκλωσης.....	116
5.2.1.2 Το κόστος παραγωγής χημικών από μετακαταναλωτικά πλαστικά (τριτογενής ανακύκλωση).....	119
5.2.1.3 Το κόστος για αποτέφρωση και ανάκτηση ενέργειας	120
5.2.1.4 Το κόστος συλλογής/προ-επεξεργασίας επιβαρύνει το κόστος των μεθόδων ανακύκλωσης πλαστικών	121
5.2.2 Η μελέτη TNO (Οικο-αποτελεσματικότητα και μέθοδοι ανακύκλωσης)	123
5.2.2.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αποτίμηση του οικονομικού κόστους... ..	124
5.2.2.1.1 Σενάρια μελέτης	124
5.2.2.1.2 Η εκτίμηση του οικονομικού κόστους	127
5.2.2.1.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σεναρίων I, II, III και IV	131
5.2.2.1.4 Επίλογος	132
5.3 Το οικολογικό (ενεργειακό) όφελος της μηχανικής ανακύκλωσης πλαστικών	134
5.3.1 Ενεργειακά ή μη οφέλη της μηχανικής και τριτογενούς ανακύκλωσης ανάλογα με τα στάδια προ-επεξεργασίας.....	135
5.4 Εισαγωγή στην Οικο-ισορροπία	137
5.4.1 Η “αρχή” ανάλυσης της οικο-ισορροπίας.....	139
5.4.2 Είδη συστημάτων	142
5.4.2.1 Γραμμικά συστήματα.....	142
5.4.2.2 Δίκτυα Διανομής.....	142

5.4.2.3 Εκτεταμένα Συστήματα.....	144
5.4.3 Συστήματα Ανακύκλωσης	145
5.4.3.1 Ροές υλικών στον κλειστό βρόχο ανακύκλωσης χωρίς απώλειες	145
5.5.3.2 Ενεργειακές Ροές στην Ανακύκλωση Κλειστών Βρόχων.....	147
5.4.3.3 Ροές υλικών στην ανακύκλωση κλειστών βρόχων με απώλειες	152
5.4.3.4 Ενεργειακές ροές στην ανακύκλωση κλειστών βρόχων με απώλειες.....	153
5.4.3.5 Ροές υλικών στην ανακύκλωση ανοιχτού βρόχου	154
5.4.3.6 Ενεργειακές ροές στην ανακύκλωση ανοιχτού βρόχου.....	155
5.4.4 Κέρδη και ζημίες της ανακύκλωσης.....	157
5.4.4.1 Ενεργειακοί περιορισμοί στην Μηχανική Ανακύκλωση	158
5.4.4.2 Ενεργειακοί περιορισμοί στην τεταρτογενή ανακύκλωση (Ανάκτηση Ενέργειας).....	161
5.4.4.3 Ενεργειακοί περιορισμοί στην τριτογενή ανακύκλωση πλαστικών (Παραγωγή Πετροχημικών)	163

Κεφάλαιο 6

Πρωτογενής Ανακύκλωση

6.1 Εισαγωγή.....	165
6.2 Προβλήματα πρωτογενούς ανακύκλωσης	166
6.3 Μηχανισμοί αποδόμησης ανακυκλωμένων πλαστικών	167
6.4 Η επίδραση του ανακυκλωμένου πλαστικού στη σύσταση και τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Μαθηματικά μοντέλα πρόβλεψης	171
6.5 Τεμαχισμός του πλαστικού πριν την ανάμιξη με το παρθένο πολυμερές.....	178
6.6 Αυτόματα συστήματα πρωτογενούς ανακύκλωσης μέσα στη μονάδα παραγωγής.....	179

Κεφάλαιο 7

Δευτερογενής ή Μηχανική Ανακύκλωση

7.1 Εισαγωγή.....	183
7.1.1 Στάδια δευτερογενούς ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων	186
7.2 Στάδιο Α: Συλλογή	188
7.2.1 Συλλογή οικιακών πλαστικών απορριμμάτων	188
7.2.2 Προϋποθέσεις επιτυχίας της Συλλογής – Διαλογής στην Πηγή οικιακών πλαστικών απορριμμάτων.....	189

7.3	Στάδιο Β: Διαλογή και Ανάκτηση.....	191
7.3α	Μέθοδος μηχανικής διαλογής Bezner	194
7.3β	Αναγκαίες επισημάνσεις (μακρο- και μικρο-διαχωρισμοί)	196
7.3.1	Εξοπλισμός διαλογής πλαστικών απορριμμάτων στα ΚΔΑΥ.....	197
7.3.3.1	Χειρωνακτική διαλογή.....	197
7.3.1.2	Μηχανική ή Αυτόματη διαλογή	198
7.3.1.2.1	Οπτικός διαχωρισμός.....	198
7.3.1.2.1.1	Εφαρμογές.....	201
7.3.1.2.2	Φασματοσκοπικοί αισθητήρες	204
7.3.1.2.2.1	Εφαρμογές.....	206
7.3.1.2.2.1	Σχόλια για τις φασματοσκοπικές τεχνικές	212
7.3.2	Συστήματα αυτόματης διαλογής σε εφαρμοζόμενες διεργασίες Διαλογής - Ανάκτησης στην Αγγλία	213
7.4	Στάδιο Γ: Προ-επεξεργασία (μείωση μεγέθους – διαχωρισμός/καθα- ρισμός).....	218
7.4.1	Μείωση μεγέθους πλαστικών	221
7.4.1.1	Μηχανές τεμαχισμού.....	222
7.4.1.1.1	Γενικά.....	222
7.4.1.1.2	Τεμαχιστές πλαστικών απορριμμάτων	225
7.4.1.1.2.1	Μηχανές τεμαχισμού με περιστρεφόμενους δίσκους (shredders)	226
7.4.1.1.2.2	Περιστροφικοί κόπτες με περιστρεφόμενα μαχαίρια (rotary knife cutters) ή κοκκοποιητές (granulators).....	228
7.4.1.1.2.3	Κοχλιωτός τεμαχιστής	231
7.4.1.1.2.4	Μηχανές τύπου γκιλοτίνας	232
7.4.1.1.2.5	Εξειδικευμένοι περιστροφικοί κόπτες.....	233
7.4.1.1.2.6	Ολοκληρωμένο σύστημα περιστροφικού κόπτη (κοκκοποιητή) ..	234
7.4.1.2	Διαχωρισμός πολυστρωματικών πλαστικών υλικών με ταυτόχρονη μείωση μεγέθους	236
7.4.1.3	Τεχνικές αύξησης πυκνότητας (densifications processes) Μηχανές συσσωμάτωσης (agglomerators)	238
7.4.1.3.1	Δίσκοι συσσωμάτωσης.....	238
7.4.1.3.2	Συσσωμάτωση με συμπίεση	240
7.4.1.3.3	Συσσωμάτωση με ανάδευση	242
7.4.1.3.4	Ο κόπτης-συμπιεστής Erema	243
7.4.1.3.5	Νέα μέθοδος αύξησης πυκνότητας/συμπίεσης φιλμ	246
7.4.1.4	Τεχνικές κονιορτοποίησης	247
7.4.1.4.1	Δισκόμυλοι	247
7.4.1.4.2	Δισκόμυλος με εσωτερικό ανεμιστήρα.....	250
7.4.1.4.3	Κυλινδρόμυλος με δακτύλιους.....	250
7.4.1.4.4	Σφυρόμυλος	250

7.4.1.4.5 Συνδυασμός τεμαχιστή κρούσης-σφυρόμυλου (περιστροφικός μύλος, rotary grinder)	252
7.4.1.4.6 Υγρή πολτοποίηση	253
7.4.1.4.7 Διατμητική Εξώθηση σε στερεά κατάσταση (Solid State Shear Extrusion, SSSE).....	253
7.4.1.4.8 Κρυογενική άλεση	254
7.4.2 Τεχνικές διαχωρισμού/καθαρισμού	257
7.4.2.1 Εισαγωγή	257
7.4.2.2 Διαχωρισμός (Ταξινόμηση)	258
7.4.2.2.1 Κοσκίνιση	258
7.4.2.2.2 Αέριος ή υγρός διαχωρισμός	264
7.4.2.3 Έκπλυση και ξήρανση πλαστικών	267
7.4.2.3.1 Έκπλυση	267
7.4.2.3.2 Ξήρανση	268
7.4.2.3.2.1 Μηχανική Ξήρανση.....	269
7.4.2.3.2.2 Θερμική Ξήρανση.....	271
7.4.2.3.3 Παραδείγματα έκπλυσης και ξήρανσης απορριμμάτων φιλμ (PE και PVC) που χρησιμοποιούνται στο αγροτικό τομέα	272
7.4.2.4 Απομάκρυνση μελανιών εκτύπωσης και ανεπιθύμητων συστατικών από πλαστικά απορρίμματα (Μέθοδος NOREC).....	275
7.4.2.4.1 Εισαγωγή.....	275
7.4.2.4.2 Η Μέθοδος NOREC.....	277
7.4.2.5 Διαχωρισμός (Διαλογή).....	286
7.4.2.5.1 Διαλογή με βάση την πυκνότητα	286
7.4.2.5.1.1 Διαχωρισμός Επίπλευσης – Καταβύθισης με την επίδραση της βαρύτητας.....	288
7.4.2.5.1.2 Διαχωρισμός σε υδροκυκλώνες	291
7.4.2.5.1.3 Φυγόκεντροι.....	293
7.4.2.5.1.4 Εφαρμογές	295
7.4.2.5.1.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων επίπλευσης, υδροκυκλώνων και φυγόκεντρικών διαχωριστήρων	298
7.4.2.5.2 Διαλογή με βάση την επιλεκτική διαβροχή των πλαστικών	300
7.4.2.5.3 Ηλεκτροστατικός διαχωρισμός (διαλογή).....	304
7.4.2.5.3.1 Ηλεκτροστατικοί διαχωριστήρες περιστρεφόμενου κυλίνδρου (τυμπάνου)	305
7.4.2.5.3.2 Ηλεκτροστατικός διαχωρισμός των πλαστικών με διαχωριστήρες ελεύθερης πτώσης.....	307
7.4.2.5.4 Διαλογή με βάση την διαλυτότητα	312
7.4.2.5.5 Διεργασίες Θερμικής Διαλογής	317
7.5 Στάδιο Δ: Ομογενοποίηση – Πελλετοποίηση (Βασική διεργασία της μηχανικής ανακύκλωσης)	323
7.5.1 Εισαγωγή.....	323

7.5.2 Η διεργασία μηχανικής ανακύκλωσης.....	325
7.5.3 Φίλτρα διήθησης προσμίξεων τήγματος ανακυκλωμένων πλαστικών απορριμμάτων	329
7.5.3.1 Τύποι φίλτρων.....	331
7.5.3.1.1 Διατάξεις αλλαγής φίλτρου με ασυνεχή ροή τήγματος.....	331
7.5.3.1.2 Διατάξεις αλλαγής φίλτρου με συνεχή ροή τήγματος.....	332
7.5.3.1.3 Φίλτρα μεγάλης επιφάνειας.....	338
7.5.4 Μηχανική Ανακύκλωση Πολυολεφινών.....	341
7.5.4.1 Μηχανική ανακύκλωση HDPE με τη διεργασία Bezner.....	343
7.5.4.2 Μηχανική ανακύκλωση HDPE με τη μέθοδο M.A. Industries.....	345
7.5.4.3 Δευτερογενής (μηχανική) ανακύκλωση PVC.....	346
7.5.5 Μηχανική ανακύκλωση ανάμικτων πλαστικών απορριμμάτων.....	350
7.5.5.1 Προ-επεξεργασία, ομογενοποίηση-μορφοποίηση	350
7.5.5.2 Τεχνολογικός εξοπλισμός ομογενοποίησης - μορφοποίησης ανάμικτων πλαστικών.....	352
7.5.5.2.1 Διεργασίες εκβολής - έγχυσης (intrusion)	353
7.5.5.2.1.1 Η μηχανή Klobbie.....	353
7.5.5.2.1.2 Ο εκβολέας ET/1 (Extruder Technology 1)	355
7.5.5.2.2 Διεργασίες συνεχούς εκβολής	357
7.5.5.2.2.1 Η τεχνολογία CPRR/WEI	358
7.5.5.2.2.2 Η διεργασία συνεχούς εκβολής Greiner & Sohne.....	362
7.5.5.2.3 Διεργασίες μορφοποίησης με πίεση υπό συνθήκες μεταφοράς μάζας	364
7.5.5.2.3.1 Η διεργασία Reverzer της Mitsubishi	365
7.5.5.2.3.2 Διεργασία Remaplan	368
7.5.5.2.4 Συσσωμάτωση – Μορφοποίηση.....	369
7.5.6 Οικονομικά δεδομένα των υποκατάστατων προϊόντων ξύλου από ανάμικτα πλαστικά απορρίμματα	371
7.6 Ποιότητα προϊόντων δευτερογενούς ανακύκλωσης πλαστικών.....	372
7.6.1 Παράγοντες που υποβαθμίζουν την ποιότητα προϊόντων από ανά- μικτα πλαστικά απορρίμματα.....	372
7.6.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες μιγμάτων πλαστικών που έχουν υποστεί δευτεροβάθμια ανακύκλωση.....	374
7.6.3 Σχέση σύστασης - μορφολογίας – ιδιοτήτων των προϊόντων που παράγονται από ανάμικτα πλαστικά	377
7.6.3.1 Σύσταση των ανάμικτων πλαστικών NJCT.....	377
7.6.3.2 Μακροσκοπικά χαρακτηριστικά του προφίλ των υποκατάστατων προ- ϊόντων ξύλου	379
7.6.3.3 Η επίδραση του χρόνου σε πειράματα θλίψης δοκιμίων από ανακυκλω- μένα ανάμικτα πλαστικά NJCT	380

7.6.3.4 Βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των προϊόντων των ανάμικτων πλαστικών NJCT	381
7.6.3.5 Μικρογραφήματα SEM των προϊόντων από μίγματα R-PS/NJCT	382
7.6.4 Χημική τροποποίηση του μίγματος πλαστικών απορριμμάτων.	
Βελτιστοποίηση μηχανικών ιδιοτήτων	385
7.6.4.1 Σταθεροποιητές	385
7.6.4.1.1 Είδη σταθεροποιητών	388
7.6.4.1.2 Παραδείγματα σταθεροποίησης ανακυκλωμένων πλαστικών	392
7.6.4.1.3 Συμπεράσματα	400
7.6.4.2 Συμβατοποιητές.....	401
7.6.4.2.1 Ετερογενή και ομογενή μίγματα	402
7.6.4.2.2 Αναμιξιμότητα των πλαστικών με την παρουσία συμβατοποιητών στα ετερογενή μίγματα	403
7.6.4.2.3 Σχετικά με τη δυνατότητα ανάμιξης πολυμερών.....	404
7.6.4.2.4 Παράγοντες που επιδρούν στην ανάμιξη δυο πολυμερών	406
7.6.4.2.4.1 Η επιλογή των παραμέτρων διαλυτότητας.....	406
7.6.4.2.4.2 Η επίδραση της θερμοκρασίας	408
7.6.4.2.4.3 Άλλοι παράγοντες	409
7.6.4.2.5 Ο ρόλος των συμβατοποιητών στα ετερογενή μίγματα.....	409
7.6.4.2.6 Ιδιότητες συμβατοποιητών	411
7.6.4.2.7 Τεχνικές παρασκευής μιγμάτων	412
7.6.4.3 Παραγωγή προϊόντων με δομή ‘σάντουιτς’ από ανάμικτα πλαστικά μέσω διεργασιών συν-εκβολής και συν-έγχυσης.....	413
7.6.4.3.1 Η διεργασία της συν-εκβολής (συν-εξώθησης).....	413
7.6.4.3.2 Μορφοποίηση με συν-έγχυση.....	413
7.6.4.4 Η χρήση των πλαστικών απορριμμάτων ως πληρωτικών υλικών.....	414

Κεφάλαιο 8

Τριτογενής Ανακύκλωση Πλαστικών (Θερμική Ανακύκλωση – Χημική Ανακύκλωση)

8.1 Εισαγωγή.....	417
8.1.1 Περιορισμοί ως προς την περιεκτικότητα σε χλώριο τροφοδοσίας τριτογενούς ανακύκλωσης	418
8.1.2 Μέθοδοι τριτογενούς ανακύκλωσης	420
8.1.2.1 Θερμική ανακύκλωση πλαστικών.....	420
8.1.2.1.1 Σχετικά με την πυρόλυση και θερμική διάσπαση.....	422
8.1.2.1.2 Συνεργατική δράση διεργασιών θερμικής ανακύκλωσης.....	423
8.1.2.1.3 Διυλιστήριο ορυκτού πετρελαίου.....	423

8.1.2.1.4 Τα χαρακτηριστικά και οι χημικές ιδιότητες του παραγόμενου υπολείμματος απόσταξης πετρελαίου υπό κενό	428
8.1.2.1.5 Τεχνολογίες για την αναβάθμιση υπολειμμάτων απόσταξης υπό κενό	429
8.1.2.2 Χημική Ανακύκλωση	430
8.2 Θερμική Συν-επεξεργασία πλαστικών απορριμμάτων με δημοτικά απορρίμματα	431
8.2.1 Εισαγωγή στη Θερμική Επεξεργασία Στερεών Δημοτικών Απορριμμάτων	431
8.2.1.1 Καύση δημοτικών απορριμμάτων (τεταρτογενής ανακύκλωση)	432
8.2.1.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της καύσης των απορριμμάτων	433
8.2.1.2 Μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας τριτογενούς ανακύκλωσης στερεών δημοτικών απορριμμάτων	434
8.2.1.2.1 Πυρόλυση/αεριοποίηση/υγροποίηση/τεχνολογία πλάσματος	434
8.2.1.2.2 Πυρόλυση (pyrolysis)	435
8.2.1.2.2.1 Προϊόντα πυρόλυσης	437
8.2.1.2.2.2 Ανάλυση προϊόντων πυρόλυσης	438
8.2.1.2.2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της πυρόλυσης	443
8.2.1.2.2.4 Τύποι αντιδραστήρων πυρόλυσης δημοτικών απορριμμάτων	444
8.2.1.2.2.5 Τεχνολογία πυρόλυσης δημοτικών απορριμμάτων	446
8.2.1.2.2.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της πυρόλυσης	452
8.2.1.2.3 Αεριοποίηση (gasification)	454
8.2.1.2.3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αεριοποίησης	456
8.2.1.2.4 Προδιαγραφές αερίου πυρόλυσης και αερίου σύνθεσης	456
8.2.1.2.5 Τεχνολογία πλάσματος	459
8.2.1.3 Η εφαρμοζόμενη σήμερα τεχνολογία θερμικής επεξεργασίας	461
8.2.1.3.1 Διεργασία R21 Mitsui Babcock (πυρόλυση + καύση)	461
8.2.1.3.2 Διεργασία Thermoselect (πυρόλυση/αεριοποίηση με προσαγωγή οξυγόνου υψηλής θερμοκρασίας)	466
8.2.1.3.3 Διεργασία Noell (πυρόλυση + αεριοποίηση)	466
8.2.1.3.4 Διεργασία Ebara (αεριοποίηση ρευστοποιημένης κλίνης)	467
8.2.1.3.5 Διεργασία EDDITh (θερμική διάσπαση/καύση αερίων/παραγωγή carbor)	467
8.2.1.3.6 Διεργασία RCP (πυρόλυση + τήξη)	468
8.2.1.3.7 Διεργασία αεριοποίησης TPS (Terminska Processor)	470
8.2.1.3.8 Διεργασία PKA	470
8.2.1.3.9 Διεργασία PIT Pyroflam	472
8.2.1.3.10 Διεργασία NKK	472
8.2.1.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τεχνολογιών θερμικής επεξεργασίας ...	473
8.2.1.5 Οικονομικά στοιχεία σχετικά με τις διεργασίες θερμικής επεξεργασίας ...	474

8.2.1.5.1 Συμπεράσματα. Δεδομένα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στις τεχνικο-οικονομικές μελέτες των θερμικών διεργασιών	476
8.3 Διεργασίες θερμικής επεξεργασίας τριτογενούς ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων	477
8.3.1 Πυρόλυση πλαστικών απορριμμάτων.....	477
8.3.1.1 Εισαγωγή.....	477
8.3.1.2 Πλεονέκτημα της πυρόλυσης έναντι της αποτέφρωσης	479
8.3.1.3 Μηχανισμός αντιδράσεων πυρόλυσης πλαστικών.....	479
8.3.1.3.1 Παραπροϊόντα της πυρόλυσης πλαστικών	482
8.3.1.4 Αφαλογόνωση της τροφοδοσίας και των προϊόντων της διεργασίας πυρόλυσης	484
8.3.1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν το μηχανισμό πυρόλυσης και την κατανομή των προϊόντων στις βιομηχανικές διεργασίες	484
8.3.1.5.1 Δομή και χημική σύσταση πολυμερούς	486
8.3.1.5.2 Η εξάρτηση των προϊόντων της πυρόλυσης από τη θερμοκρασία	491
8.3.1.5.3 Η επίδραση του χρόνου αντίδρασης στη κατανομή των προϊόντων της πυρόλυσης.....	494
8.3.1.5.4 Τύπος αντιδραστήρα.....	495
8.3.1.6 Συστήματα πυρόλυσης πλαστικών απορριμμάτων που βασίζονται σε αντιδραστήρα περιστροφικού κλιβάνου	503
8.3.1.6.1 Διεργασία πυρόλυσης VEBA με αντιδραστήρα περιστροφικού κλιβάνου	505
8.3.1.7 Συστήματα πυρόλυσης πλαστικών απορριμμάτων που βασίζονται σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης	507
8.3.1.7.1 Τεχνολογία αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης.....	509
8.3.1.7.2 Το σύστημα ρευστοποιημένης κλίνης του Πανεπιστημίου του Αμβούργου	518
8.3.1.7.2.1 Σύσταση προϊόντων πυρόλυσης (σε αέριο, υγρό και υπόλειμμα) πλαστικών και άλλων υλικών με τη διεργασία του Αμβούργου ...	524
8.3.1.7.2.2 Η πυρόλυση ανάμικτων πλαστικών στον αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης του Πανεπιστημίου του Αμβούργου	528
8.3.1.7.2.3 Πυρόλυση των ΚΤΟ στον αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης του Πανεπιστημίου του Αμβούργου	531
8.3.1.7.2.4 Πυρόλυση ελαστικών οχημάτων στον αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης του Πανεπιστημίου του Αμβούργου	531
8.3.1.7.2.5 Η μονάδα πυρόλυσης στο Ebenhausen με βάση την διεργασία του Πανεπιστημίου του Αμβούργου. Η οικονομική της βιωσιμότητα	534
8.3.1.8 Προδιαγραφές πετροχημικών προϊόντων	535
8.3.2 Θερμική διάσπαση	536
8.3.2.1 Εισαγωγή στην Θερμική διάσπαση ή πυρόλυση χαμηλών θερμοκρασιών (cracking).....	536

8.3.2.1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή της πυρόλυσης/θερμικής διάσπασης. Η μετατόπιση των στόχων.....	537
8.3.2.2 Θερμική διάσπαση VS πυρόλυσης.....	538
8.3.2.3 Το πλεονεκτήματα της θερμικής διάσπασης	541
8.3.2.4 Η επίδραση της θερμοκρασίας στα προϊόντα θερμικής διάσπασης πλαστικών.....	541
8.3.2.5 Τύποι αντιδραστήρων θερμικής διάσπασης	553
8.3.2.6 Διεργασίες θερμικής διάσπασης	555
8.3.2.6.1 Διεργασίες θερμικής διάσπασης που βασίζονται σε αντιδραστήρες αναδεδυμένου δοχείου υγροποίησης.....	555
8.3.2.6.1.1 Διεργασία BASF (Ludwigschafen).....	555
8.3.2.6.2 Διεργασίες θερμικής διεργασίας που βασίζονται σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης.....	559
8.3.2.6.2.1 Διεργασία BP Chemicals Polymer	559
8.3.2.6.3 Η αποδομητική εκβολή ως τεχνική της θερμικής διάσπασης.....	567
8.3.2.6.3.1 Εισαγωγή.....	567
8.3.2.6.3.2 Η εξέλιξη της αποδομητικής εκβολής.....	570
8.3.2.6.3.3 Τύποι εκβολέα	571
8.3.2.6.3.4 Τυπική εγκατάσταση αποδομητικής εκβολής	571
8.3.2.6.3.5 Οι δυνατότητες της αποδομητικής εκβολής.....	573
8.3.2.6.3.6 Οικονομική βιωσιμότητα της αποδομητικής εκβολής	575
8.3.2.6.3.7 Διεργασίες θερμικής διάσπασης που βασίζονται σε εκβολέα αποδόμησης	576
8.3.2.6.3.8 Διεργασίες θερμικής διάσπασης που βασίζονται σε αντιδραστή- ρα κοχλιωτού κλιβάνου.....	579
8.3.2.6.3.9 Διεργασίες θερμικής διάσπασης που βασίζονται σε αντιδραστή- ρα περιστροφικού κλιβάνου	583
8.3.3 Θερμική/Καταλυτική Αποδόμηση πλαστικών απορριμμάτων.....	585
8.3.3.1 Εισαγωγή.....	585
8.3.3.2 Μηχανισμός καταλυτικής αποδόμησης.....	587
8.3.3.2.1 Δευτερογενείς αντιδράσεις και προϊόντα	590
8.3.3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της θερμικής και καταλυτικής απο- δόμησης.....	592
8.3.3.4 Διάγραμμα ροής της διεργασίας θερμικής/καταλυτικής αποδόμησης ή διάσπασης	593
8.3.3.5 Βελτιστοποίηση του ισοζυγίου μάζας υψηλής αξίας προϊόντων	598
8.3.3.5.1 Επίδραση της θερμοκρασίας.....	599
8.3.3.5.2 Επίδραση του καταλύτη στη θερμική διάσπαση.....	601
8.3.3.6 Καταλυτικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στην καταλυτική διάσπαση πλαστικών απορριμμάτων.....	611
8.3.3.7 Καταλυτική διάσπαση πολυолеφινών	617

8.3.3.8 Η επίδραση της φύσης του καταλύτη και της θερμοκρασίας στην παραγωγή βενζίνας	630
8.3.3.9 Τύποι διεργασιών θερμικής/καταλυτικής διάσπασης	641
8.3.3.9.1 Η διεργασία της άμεσης, ταυτόχρονης θερμικής και καταλυτικής διάσπασης	642
8.3.3.9.2 Η διεργασία της διαδοχικής θερμικής/καταλυτικής διάσπασης	644
8.3.3.9.3 Η διεργασία της διαδοχικής θερμικής διάσπασης και καταλυτικής κατεργασίας με υδρογόνο (hydrotreatment)	645
8.3.3.10 Τύποι αντιδραστήρων διεργασιών θερμικής/καταλυτικής διάσπασης	647
8.3.3.10.1 Αντιδραστήρες αναδευόμενου δοχείου	648
8.3.3.10.2 Αντιδραστήρες σταθερής κλίνης	651
8.3.3.10.3 Κοχλιωτοί κλίβανοι	653
8.3.3.10.4 Αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης	656
8.3.3.11 Διεργασίες θερμικής/καταλυτικής διάσπασης προς εμπορική εκμετάλλευση.....	657
8.3.3.11.1 Διεργασία Thermofuel.....	657
8.3.3.11.2 Διεργασία Smuda	662
8.3.3.11.3 Διεργασία Nanofuel	665
8.3.3.11.4 Διεργασία Reentech	668
8.3.3.11.5 Διεργασία Blowdec.....	672
8.3.3.11.6 Διεργασίες Likun και Fuji	672
8.3.3.12 Οικονομική βιωσιμότητα μονάδων θερμικής/καταλυτικής διάσπασης πλαστικών απορριμμάτων.....	674
8.3.4 Υδρογόνωση.....	676
8.3.4.1 Εισαγωγή.....	676
8.3.4.2 Τα πλεονεκτήματα της υδρογόνωσης έναντι της αποτέφρωσης.....	678
8.3.4.3 Η μονάδα υδρογόνωσης Veba Oil στο Bottrop (Γερμανία)	678
8.3.4.3.1 Η διεργασία VCC υδρογόνωσης των υπολειμμάτων της υπό κενό απόσταξης αργού πετρελαίου	679
8.3.4.3.2 Η διεργασία VCC υδρογόνωσης των πλαστικών απορριμμάτων.....	681
8.3.4.3.2.1 Ισοζύγιο μάζας και ποιότητα προϊόντων	689
8.3.4.3.2.2 Ισοζύγιο ενέργειας.....	692
8.3.4.3.2.3 Οικονομική βιωσιμότητα της διεργασίας υδρογόνωσης VCC (Bottrop)	693
8.3.4.4 Ευοίωνες προοπτικές. Υδρογόνωση των πλαστικών απορριμμάτων στη Σ. Αραβία	695
8.3.4.5 Καταλυτική υδρογόνωση.....	695
8.3.4.6 Πυρόλυση και υδρογονοεπεξεργασία (Hydroprocessing).....	700
8.3.4.6.1 Οικονομική βιωσιμότητα της διεργασίας πυρόλυσης/υδρογονοεπεξεργασίας.....	702
8.3.4.7 Καταλυτική υδρογόνωση ή υδρογονοεπεξεργασία πλαστικών αναμιγμένων με γαιάνθρακα ή βαρέα κλάσματα πετρελαίου ή κηρό	703

8.3.4.7.1 Καταλυτική υδρογόνωση πλαστικών σε ανάμιξη με γαιάνθρακα	704
8.3.4.7.2 Καταλυτική υδρογόνωση πλαστικών σε ανάμιξη με βαρέα κλάσματα πετρελαίου για παραγωγή καυσίμων.....	705
8.3.4.7.3 Πυρόλυση-υδρογονοεπεξεργασία πλαστικών/κηρών (Fischer-Tropsch).....	710
8.3.5 Αεριοποίηση.....	714
8.3.5.1 Εισαγωγή.....	714
8.3.5.2 Πλεονεκτήματα της αεριοποίησης έναντι της αποτέφρωσης	716
8.3.5.3 Η αεριοποίηση του άνθρακα και του πετρελαίου προηγήθηκε της αερι- ποίησης των απορριμμάτων (και των πλαστικών)	716
8.3.5.3.1 Διεργασίες αεριοποίησης άνθρακα	717
8.3.5.3.2 Διεργασίες αεριοποίησης βαρέων κλασμάτων πετρελαίου (αεριο- ποίηση τήγματος)	720
8.3.5.3.3 Διεργασίες αεριοποίησης πλαστικών απορριμμάτων και εγκατα- στάσεις σε λειτουργία	723
8.3.5.3.4 Διεργασίες αεριοποίησης πλαστικών με αντιδραστήρες εξαναγκα- σμένης ροής και σταθερής κλίνης	725
8.3.5.3.4.1 Διεργασία Texaco.....	725
8.3.5.3.4.2 Διεργασία Voest-Alpine AG (αεριοποίηση σε υψηλή θερμο- κρασία).....	726
8.3.5.3.4.3 Μερική οξείδωση με την διεργασία Flame	728
8.3.5.3.4.4 Διεργασία Veba	730
8.3.5.3.4.5 Διεργασία Thermoselect	734
8.3.5.3.4.6 Διεργασία Schwarze Pump αεριοποίησης λιγνίτη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	743
8.3.5.3.4.7 Μονάδες αεριοποίησης λιγνίτη και πλαστικών οι οποίες βασι- ζονται στις διεργασίες Energiewerke Schwarze Pumpe AG.....	745
8.3.5.3.5 Διεργασίες αεριοποίησης πλαστικών με αντιδραστήρες ρευστοποι- ημένης κλίνης.....	748
8.3.5.3.5.1 Διεργασία Lurgi Eco-Gas	748
8.3.5.3.5.2 Διεργασία Eisenmann	749
8.3.5.3.5.3 Διεργασία Winkler.....	750
8.3.5.3.5.4 Διεργασία TwinRec (Ebara)	751
8.3.5.4 Σύσταση αερίου σύνθεσης και εφαρμογές	755
8.3.5.5 Οικονομική βιωσιμότητα των μονάδων αεριοποίησης	759
8.4 Χημική Ανακύκλωση (Διάσπαση με σολβολυτικές διεργασίες).....	760
8.4.1 Χημική διάσπαση πλαστικών απορριμμάτων.....	760
8.4.2 Ανακύκλωση PET.....	763
8.4.2.1 Τεχνολογίες ανακύκλωσης PET	766
8.4.2.2.1 Μηχανική ανακύκλωση PET	768
8.4.2.1.2 Χημική ανακύκλωση PET	769
8.4.2.1.2.1 Γλυκόλυση.....	769

8.4.2.1.2.2 Μεθανόλυση.....	773
8.4.2.1.2.3 Υδρόλυση.....	775
8.4.2.1.2.4 Υδρόλυση PET σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης	777
8.4.2.1.2.5 Σύνθεση PET.....	778
8.4.2.1.3 Θερμική Ανακύκλωση.....	778
8.4.2.1.3.1 Πυρόλυση PET.....	778
8.4.2.1.3.2 Καταλυτική διάσπαση PET.....	781
8.5 Τριτογενής Ανακύκλωση: Περιβαλλοντικές προοπτικές – Οικονομικοί περιορισμοί	782
8.5.1 Η θερμική και χημική ανακύκλωση ως δυνατή εναλλακτική λύση ανακύκλωσης πλαστικών	782
8.5.2 Η αποτελεσματικότητα της θερμικής επεξεργασίας για ιδιαίτερες κατηγορίες πλαστικών	785
8.5.2.1 Κατάλοιπα τεμαχισμού οχημάτων (ΚΤΟ).....	785
8.5.2.2 Απορρίμματα ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) ...	790
8.5.2.3 Ελαστικοί τροχοί οχημάτων	791
8.5.3 Η σημερινή κατάσταση σχετικά με την τριτογενή ανακύκλωση των πλαστικών απορριμμάτων.....	792
8.5.3.1 Η κατάσταση στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ΗΠΑ και Ιαπωνία	792
8.5.3.2 Η εφαρμογή και ανάπτυξη της τριτογενούς ανακύκλωσης στην Ιαπωνία.....	793
8.5.4 Επικρίσεις, Εθνικές και Πολιτικές Διαμάχες για την ανακύκλωση και τις επιλογές της	794
8.5.5 Υγιεινή και ασφάλεια των ανακυκλωμένων πλαστικών.....	796
8.5.6 Συμπεράσματα σχετικά με την τριτογενή ανακύκλωση των πλαστικών απορριμμάτων.....	797

Κεφάλαιο 9

Τεταρτογενής Ανακύκλωση Πλαστικών (Ανάκτηση Ενέργειας)

9.1 Αποτέφρωση στερεών δημοτικών απορριμμάτων (ΣΔΑ) με ανάκτηση ενέργειας	801
9.1.1 Η αντίδραση της καύσης.....	803
9.1.2 Τύποι αποτεφρωτήρων	804
9.1.2.1 Συστήματα αποτέφρωσης μαζικής καύσης.....	807
9.1.2.1.1 Συστήματα αποτέφρωσης μαζικής καύσης με μηχανικό αποτεφρωτήρα σχάρας.....	807

9.1.2.1.2 Συστήματα αποτέφρωσης μαζικής καύσης με περιστροφικό κλίβανο, MB-RK (Mass Burn Rotary Kiln)	814
9.1.2.2 Αρθρωτοί ή μικρής χωρητικότητας αποτεφρωτήρες (modular)	816
9.1.2.3 Αποτεφρωτήρες RDF	818
9.1.2.4 Συστήματα με αποτεφρωτήρα ρευστοποιημένης κλίνης	820
9.1.3 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα αποτεφρωτήρων	823
9.1.4 Ενέργεια από την καύση απορριμμάτων	823
9.1.5 Σχετικά με την τεχνολογία αποτέφρωσης. Κριτική, περιορισμοί και όρια	827
9.1.5.1 Τα όρια εκπομπών μονάδων αποτέφρωσης	834
9.1.6 Καύση και έλεγχος της ρύπανσης	836
9.1.6.1 Επεξεργασία καυσαερίων	836
9.1.6.2 Επεξεργασία υγρών αποβλήτων	845
9.1.6.3 Παραδείγματα διεργασιών απορρύπανσης των αέριων εκπομπών μονάδων αποτέφρωσης	850
9.1.6.4 Επεξεργασία τέφρας πυθμένα	853
9.2 Αποτέφρωση πλαστικών απορριμμάτων με ανάκτηση ενέργειας	853
9.2.1 Εισαγωγή	853
9.2.2 Συν-αποτέφρωση πλαστικών απορριμμάτων με στερεά δημοτικά απορρίμματα (ΣΔΑ)	856
9.2.2.1 Η επίδραση των πλαστικών στην θερμογόνο δύναμη των στερεών δημοτικών απορριμμάτων (ΣΔΑ)	856
9.2.2.2 Η επίδραση της αναλογίας πλαστικών/στερεών δημοτικών απορριμμάτων στην αντίδραση και τα προϊόντα της καύσης	860
9.2.3 Τα πλαστικά ως καύσιμο PDF (Plastic Derived Fuel)	866
9.2.3.1 Μονο-καύση πλαστικών απορριμμάτων (PDF) με ανάκτηση ενέργειας	867
9.2.3.1.1 Εισαγωγή	867
9.2.3.1.2 Προδιαγραφές PDF	870
9.2.3.1.3 Συστήματα αποτεφρωτήρων μονο-καύσης PDF	872
9.2.3.2 Συν-καύση των πλαστικών (PDF) με άλλα παραδοσιακά καύσιμα (άνθρακα, πετρέλαιο)	878
9.2.3.2.1 Εισαγωγή	878
9.2.3.2.2 Πλεονεκτήματα της συν-καύσης PDF/συμβατικών καυσίμων στη διεργασία της καύσης	880
9.2.3.2.3 Η επίδραση των ανάμικτων πλαστικών στα αέρια και το στερεό υπόλειμμα κατά την συν-καύση τους με άνθρακα σε ατμολέβητες ...	881
9.2.3.3 Τα πλαστικά απορρίμματα ως καύσιμο στους κλιβάνους παραγωγής τσιμέντου (ως μερικό υποκατάστατο άνθρακα/κωκ)	883
9.2.3.4 Τα πλαστικά απορρίμματα ως αναγωγικό μέσο στην υψικάμινο	887
9.2.3.4.1 Διεργασία Υψικαμίνου	888

9.2.3.5 Επισκόπηση της μονο-καύσης, συν-αποτέφρωσης και συν-καύσης των πλαστικών απορριμμάτων (PDF) με συμβατικά καύσιμα	891
9.2.3.5.1 Χαρακτηριστικά αποτεφρωτήρων για την υποδοχή πλαστικών απορριμμάτων	891
9.2.3.5.2 Εκπομπές αερίων ρύπων και στερεά κατάλοιπα από την αποτέφρωση πλαστικών απορριμμάτων.....	892
9.2.3.5.2.1 Οξείδια	892
9.2.3.5.2.2 Ετερο-άτομα.....	892
9.2.3.5.2.3 Διοξίνες και φουράνια.....	893
9.2.3.5.2.4 Στερεά υπολείμματα	895
9.2.3.5.2.5 Επεξεργασία υγρών αποβλήτων	897

Κεφάλαιο 10

Διάθεση των στερεών δημοτικών απορριμμάτων (ΣΔΑ) (Τα πλαστικά ως μέρος των ΣΔΑ)

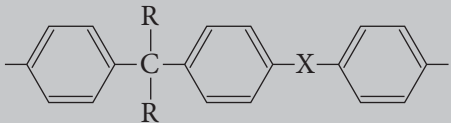
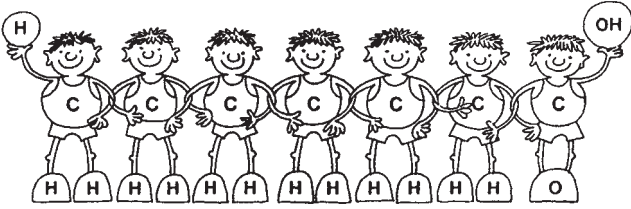
10.1 Εισαγωγή.....	899
10.2 Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ)	903
10.3 Από τους ΧΥΤΑ στους ΧΥΤΥ. Ανάκτηση χρήσιμων υλικών και βιολογική επεξεργασία δημοτικών απορριμμάτων	908
10.4 Ανάκτηση ανακυκλώσιμων υλικών συσκευασίας.....	910
10.4.1 Διαλογή στην πηγή (ΔσΠ)	910
10.4.1.1 Μέθοδοι ΔσΠ	911
10.5 Μηχανική – Βιολογική Επεξεργασία (ΜΒΕ)	913
10.5.1 Μηχανική Διαλογή – Αερόβια Βιολογική Επεξεργασία (Κομποστοποίηση).....	914
10.5.2 Μηχανική Διαλογή – Αναερόβια Βιολογική Επεξεργασία	918
10.5.2.1 Αντιδραστήρας χώνευσης και παράγοντες που επηρεάζουν την χώνευση.....	919
10.5.2.2 Η διεργασία της αναερόβιας επεξεργασίας ΣΔΑ	922
10.5.2.3 Εμπορικά συστήματα Μηχανικής – Αναερόβιας Βιολογικής Επεξεργασίας	924
10.5.2.4 Οικονομική βιωσιμότητα	927
10.6 Τα πλαστικά στον ΧΥΤΑ.....	929
10.6.1 Εισαγωγή.....	929
10.6.2 Οι οδηγίες ταφής απορριμμάτων σε χώρες της Ευρωπαϊκής Κοινότητας	930

10.6.3 Μια πρώτη κατηγοριοποίηση των πλαστικών ως απορριμμάτων σε χώρες της Ευρώπης.....	932
10.6.4 Η συμπεριφορά των ενταφιασμένων πλαστικών απορριμμάτων, όπως πρόκυψε από εκσκαφή	935
<i>Συντιμήσεις Πολυμερών</i>	<i>939</i>
<i>Βιβλιογραφία</i>	<i>941</i>
<i>Ευρετήριο Όρων</i>	<i>947</i>

Τι είναι τα πλαστικά

1.1 Η χημική δομή των πολυμερών

Τα πλαστικά συνιστούν μια γενική ομάδα συνθετικών ή φυσικών υλικών, τα οποία κυρίως συνίστανται από μακρομόρια ή πολυμερή, δηλ. υψηλού μοριακού βάρους αλυσίδες, τα κύρια στοιχεία των οποίων είναι άτομα άνθρακος. 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. Στο Σχ. 1.1α απεικονίζονται τα πολυμερή των οποίων η κύρια αλυσίδα αποτελείται από άτομα άνθρακα (δεσμοί C-C). Πέραν όμως της ανθρακικής αλυσίδας, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1α, υπάρχουν και αλυσίδες που περιλαμβάνουν ετεροάτομα (Σχ. 1.1β) ή αρωματικούς πυρήνες (Σχ. 1.1γ). Στον Πίν. 1.1 παρουσιάζεται μια σειρά πολυμερών των οποίων η κύρια αλυσίδα αποτελείται από άτομα άνθρακα. Όταν οι δυο παράπλευροι υποκαταστάτες της ανθρακικής αλυσίδας είναι υδρογόνα, τότε σχηματίζεται το πολυαιθυλένιο. Όταν το ένα από τα δυο υδρογόνα αντικαθίσταται από ετεροάτομο (π.χ. χλώριο, σχηματίζεται το πολυβινυλοχλωρίδιο, ή από αρωματικό πυρήνα το πολυστυρένιο, κ.λπ.) Το μήκος της μοριακής αλυσίδας του πολυμερούς μπορεί να ποικίλει, αλλά τα υλικά με τεχνολογικό ενδιαφέρον έχουν μ.β. πάνω από 10.000 μέχρι το 1.000.000. Το μοριακό βάρος των πολυμερών ορίζεται από την μέση τιμή μοριακού βάρους και την κατανομή μοριακού βάρους (Σχ. 1.2). Στο Σχ. 1.2, παρουσιάζεται η κατανομή των μοριακών βαρών των πολυμερών Α και Β. Το Β έχει μεγαλύτερο μέσο μοριακό βάρος και στενότερη μοριακή κατανομή. Το μέσο μοριακό βάρος μετράται σαν μέσο μοριακό βάρος κατά βάρος ή μέσο μοριακό βάρος κατ' αριθμό. Ο λόγος των δυο παραπάνω μεγεθών καλείται

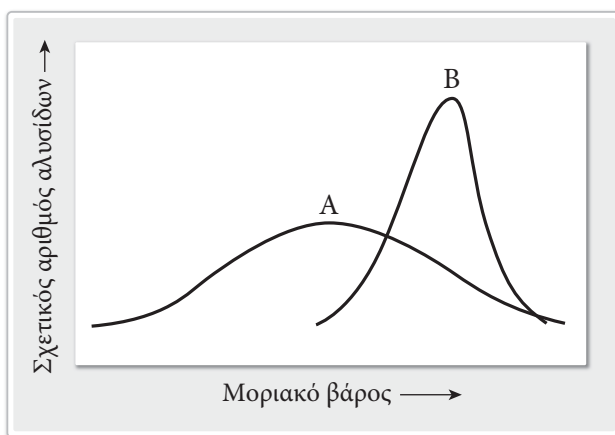
Μοριακή δομή	Γραμμικές αλυσίδες μακρομορίων με:
$ \begin{array}{ccccccccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & & & \\ & & & & & & & & \\ - & \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} & - \\ & & & & & & & & \\ & \text{H} & \text{R} & \text{H} & \text{R} & \text{H} & & & \end{array} $	α) δεσμούς C—C
$ \begin{array}{ccccccc} & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} & \\ & & & & & & \\ - & \text{C} & - & \text{X} & - & \text{C} & - & \text{X} & - & \text{C} & - \\ & & & & & & & & \\ & \text{H} & & & & \text{H} & & & \end{array} $	β) ετεροάτομα
	γ) αρωματικές ομάδες
<p>Οι χορευτές αναπαράστουν τα ανθρακοάτομα της αλυσίδας του μακρομορίου και το κράτημα των χεριών τους, τους δεσμούς μεταξύ των ανθρακατόμων</p>	
	

Σχήμα 1.1: Χημική δομή των πολυμερών

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.λπ.). 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 σχή-

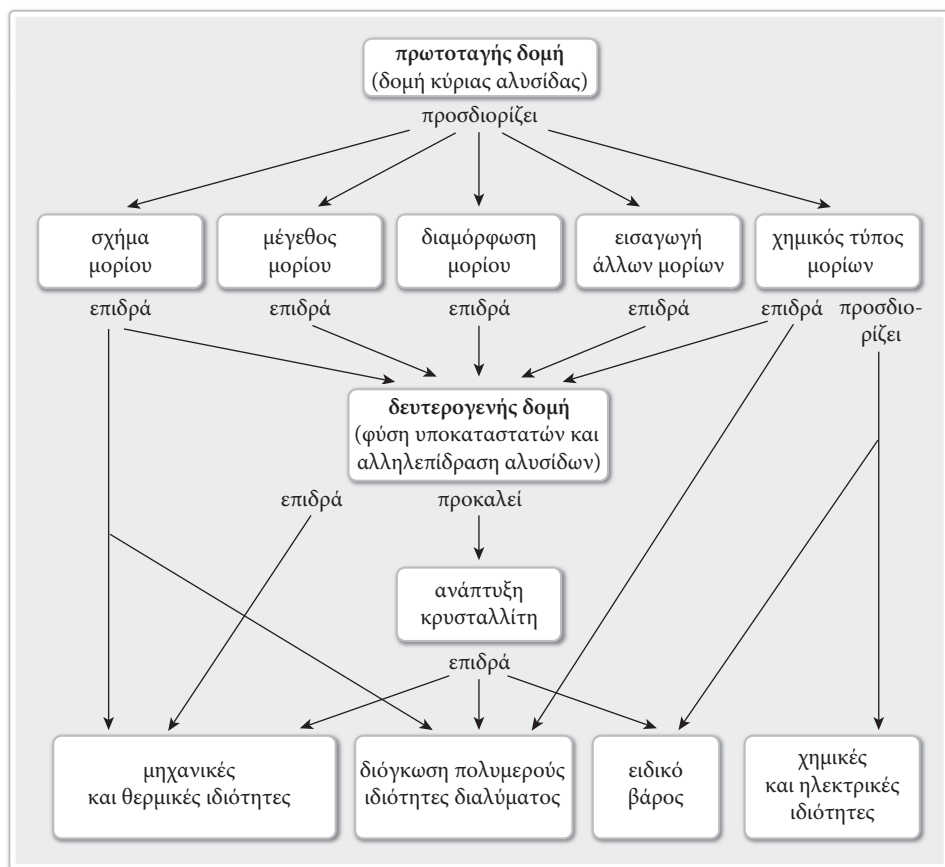
Πίνακας 1.1: Δομικές μονάδες πολυμερών ανθρακικής αλυσίδας

Πολυμερές	Δομική μονάδα
Πολυαιθυλένιο	$-\text{CH}_2-$
Πολυβινυλοχλωρίδιο	$-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$
Πολυπροπυλένιο	$ \begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} $
Πολυστυρένιο	$ \begin{array}{c} -\text{CH}_2-\text{CH}- \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} $

**Σχήμα 1.2:** Κατανομή μοριακού βάρους

ματα, 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. Κι αυτό γιατί τα δομικά στοιχεία του πολυμερούς (Πίν. 1.1), είναι τα μονομερή, των οποίων η σύσταση επηρεάζει τόσο την φύση της κύριας αλυσίδας, όσο και τις αλληλεπιδράσεις των υποκαταστατών μεταξύ των αλυσίδων. Η εξάρτηση των ιδιοτήτων του πλαστικού από την χημική δομή παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχ. 1.3. Η επίδραση της φύσης του πολυμερούς στις θερμικές ιδιότητες φαίνεται στο Σχ. 1.4.


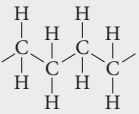
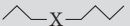
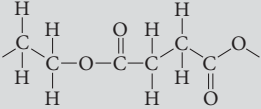
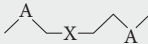
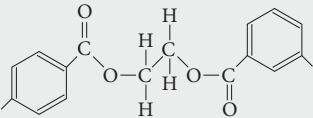
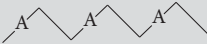
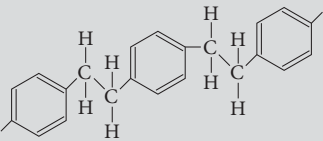
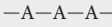
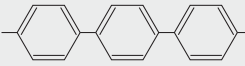

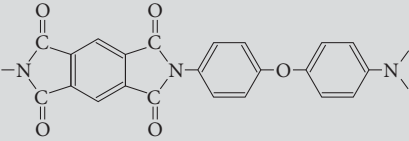
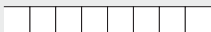
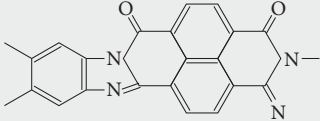

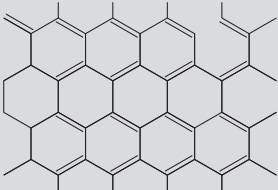


Σχήμα 1.3: Σχέσεις χημικής δομής και ιδιοτήτων

1.2 Σύνθεση 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 μη-

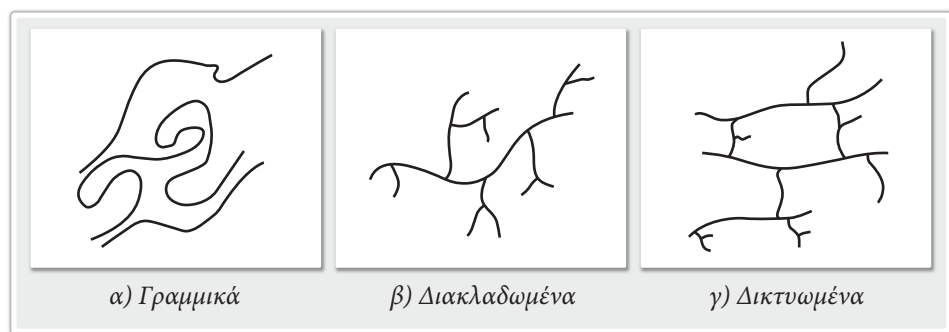
Συμβολισμός δομής	Συντακτικός τύπος και ονοματολογία	Περιοχή θερμοκρασιών που 'μαλακώνει' το πολυμερές
 γραμμική αλυσίδα με δεσμούς C—C	 πολυαιθυλένιο	100°C
 γραμμική αλυσίδα που περιλαμβάνει ετεροάτομα (X)	 πολυεστέρας π.χ. αδιπικού οξέος-γλυκόλης	70°C
 γραμμική αλυσίδα που περιλαμβάνει ετεροάτομα (X) και αρωματικούς δακτυλίους (A)	 πολυ(τερεφθαλικός αιθυλενεστέρας) (PET)	260°C
 γραμμική αλυσίδα που περιλαμβάνει αρωματικούς πυρήνες (A)	 πολυξυλυλένιο	400°C
 γραμμική αλυσίδα μόνο από αρωματικούς δακτυλίους (A)	 πολυφαινυλένιο	600°C
 αλυσίδα μακρομορίου που παρεμβάλλονται πολυμερή σκάλας	 πολυ-διφαινυλοξιδιπυρομελλιτιμίδιο	450 - 1000°C
 πολυμερές σκάλας	 πολυιμιδαζοβενζοφαινανθρολίνη	300 - 480°C
 φυλλώδης δομή	 γραφίτης	3600°C (υπό N ₂)

Σχήμα 1.4: Επίδραση χημικής δομής στις θερμικές ιδιότητες των πολυμερών

χανισμό 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 Σχ. 1.5 φαίνονται τα γραμμικά πολυμερή (Σχ. 1.5α), τα διακλαδωμένα (Σχ. 1.5β) και τα δικτυωμένα πολυμερή (Σχ. 1.5γ). Τα πολυμερή στη στερεά κατάσταση μπορεί να είναι πλήρως άμορφα ή να διαθέτουν κάποιο βαθμό κρυσταλλικότητας (ημικρυσταλλικά).



Σχήμα 1.5: Αρχιτεκτονική πολυμερών. α) γραμμικά, β) διακλαδωμένα, γ) δικτυωμένα

1.3 Θερμικές ιδιότητες πολυμερών

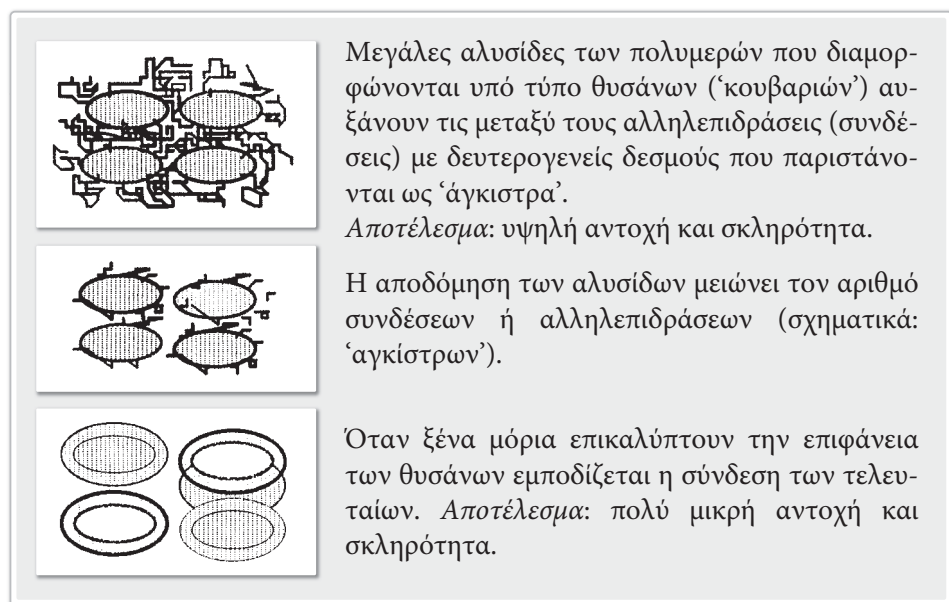
Στα *άμορφα πολυμερή*, οι αλυσίδες τους είναι περιπλεγμένες, και έχουν την μορφή ενός θυσάνου (κουβαριού). Η κίνηση των αλυσίδων αυξάνει με την θερμοκρασία. Κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία, που καλείται θερμοκρασία **υαλώδους μετάπτωσης**, T_g , οι αλυσίδες δεν έχουν την απαραίτητη ενέργεια για να 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, δηλ. 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 δικτυωμένα πολυμερή ονομάζονται **θερμοσκληρυνόμενα** ή **θερμοανθεκτικά**. Τα θερμοσκληρυνόμενα, εμφανίζουν δικτυωμένες δομές στις τρεις διαστάσεις και αντί να μαλακώνουν, αποσυντίθενται κατά τη θέρμανση. Όλα τα πλαστικά που βρίσκονται στο εμπόριο είναι θερμοπλαστικά.

Τα **ελαστομερή** εμφανίζουν δομή ενδιάμεση με αυτή των θερμοσκληρυνόμενων και των θερμοπλαστικών, με τις μοριακές αλυσίδες να δικτυώνονται με γέφυρες θείου κατά τον βουλκανισμό.

1.3.1 Ιδιότητες θερμοπλαστικών πολυμερών στην στερεά κατάσταση και την κατάσταση τήγματος

Η συμπεριφορά της ροής του τήγματος πολυμερούς, εκφράζεται συνήθως με το ιξώδες, το οποίο εξαρτάται από το μοριακό μήκος της αλυσίδας. Όσο πιο μικρές οι αλυσίδες τόσο πιο εύκολη η ροή. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται με το μοντέλο του Σχ. 1.6. Οι μοριακές αλυσίδες με την θερμική κίνηση περιστρέφονται γύρω από τον άξονα της αλυσίδας και λαμβάνουν μια τυχαία διαμόρφωση θυσάνου (κουβαριού) στη κατάσταση τήγματος. Στην κατάσταση τήγματος μεταβαίνει το πολυμερές όταν υπερβεί την θερμοκρασία στην οποία αρχίζει να 'μαλακώνει' (softening temperature). Τότε, μεταξύ των θυσάνων, κυρίως των εξωτερικών τμημάτων των αλυσίδων των θυσάνων, αναπτύσσονται δευτερογενείς δεσμοί, δηλ. δεσμοί υδρογόνου, διπόλου-διπόλου και Van Der Waals. Οι δεσμοί αυτοί μπορούν να παρασταθούν σαν 'νηματοειδή άγκιστρα' ή ως βρόχοι, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.6. Όσο μεγαλύτερη η αλυσίδα τόσο μεγαλύτερος ο αριθμός των βρόχων. Βέβαια οι μεγάλες αλυσίδες ελαττώνουν την ροή του τήγματος, λόγω των πολλών βρόχων που αναπτύσσονται, αυξάνουν όμως τις μηχανικές συμπεριφορές του υλικού στην στερεά κατάσταση. Στις πρακτικές εφαρμογές των υλικών αυτό που μας ενδιαφέρει, με σκοπό την εύκολη επεξεργασία τους, είναι το χαμηλό ιξώδες από την μια και οι ισχυρές μηχανικές ιδιότητες από την άλλη. Όταν οι αλυσίδες του πολυμερούς υφίστανται αποδόμηση τότε ελαττώνονται οι βρόχοι των μορίων και επομένως 'σπάνε' τα 'νηματοειδή άγκιστρα'



Σχήμα 1.6: Σχηματική περιγραφή των αλληλεπιδράσεων ή ‘συνδέσεων’ με δευτερογενείς δεσμούς μεταξύ των θυσάνων μακρομοριακών αλυσίδων σε τήγμα:

- α) πλήρης ‘σύνδεση’,
- β) ελάττωση ‘σύνδεσης’ λόγω αποδόμησης αλυσίδων,
- γ) σχηματισμός φάσεων

που συνδέουν τους θυσάνους των μοριακών αλυσίδων, όπως φαίνεται στην δεύτερη εικόνα του Σχ. 1.6. Έτσι αυξάνει η ρευστότητα του τήγματος αλλά μειώνεται η αντοχή του υλικού στην στερεά κατάσταση. Άρα το υλικό καθίσταται εύθραυστο σε κρούση. Στην τρίτη περίπτωση του Σχ. 1.6 ξένα πολυμερή έχουν εναποτεθεί στους θυσάνους εμποδίζοντας την προσέγγισή τους. Ουσιαστικά μιλάμε για μίγμα πολυμερών που δεν έχουν συμβατότητα μεταξύ τους και τα συστατικά του μίγματος διακρίνονται σε διαφορετικές φάσεις. Γενικά το υλικό που λαμβάνεται από ασύμβατο μίγμα πολυμερών εμφανίζει πολύ κακές μηχανικές ιδιότητες στην στερεά κατάσταση, εκτός του μίγματος πολυαιθυλενίου με 5% πολυπροπυλένιο. Η βελτιστοποίηση των μηχανικών συμπεριφορών των μιγμάτων επέρχεται με την ‘ομογενοποίηση’ των συστατικών του μίγματος, με την χρήση συμβατοποιητών. Έτσι επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση των συμπεριφορών του τήγματος και των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού στη στερεά κατάσταση.

1.3.2 Προϋπόθεση για την οικονομικά βιώσιμη ανακύκλωση των πλαστικών ή την επεξεργασία στην κατάσταση τήγματος

Από όσα αναπτύχθηκαν παραπάνω η πιο συμφέρουσα οικονομικά ανακύκλωση πλαστικών απορριμμάτων είναι η περίπτωση κατά την οποία αποτελούνται από ένα είδος θερμοπλαστικού συστατικού. Στην περίπτωση αυτή, μειώνεται σημαντικά το κόστος, επιτυγχάνοντας παράλληλα καλή ποιότητα και υψηλή αξία του νέου προϊόντος. Επιπλέον θα πρέπει το προϊόν να είναι, όσο το δυνατό, πιο καθαρό, ώστε να μην απαιτεί πλύσιμο, και επομένως κατανάλωση ενέργειας. Τέλος, ο τεμαχισμός ή κοκκοποίηση (άλεση) του ανακυκλωμένου υλικού θα πρέπει να είναι ικανοποιητικός πριν την τήξη και μορφοποίηση. Αυτές άλλωστε είναι και οι κύριες διαδικασίες στην γραμμή ανακύκλωσης πλαστικών. Εάν πάλι το προς ανακύκλωση πλαστικό έχει υποστεί αποδόμηση, μετά από πολύχρονη χρήση, τότε οι αλυσίδες του έχουν διασπαστεί, με αποτέλεσμα το προϊόν που θα προκύψει από την διαδικασία της ανακύκλωσης να είναι πιο εύθραυστο. Σε αυτήν την περίπτωση για να επιτευχθεί υψηλής ποιότητας υλικό θα πρέπει να αναμιχθεί με παρθένο υλικό, και σε υψηλά ποσοστά, 60-70%, έτσι ώστε να αναπτυχθούν οι μοριακοί βρόχοι, όπως στο παρθένο υλικό (Σχ. 1.6). Η αποδόμηση του παρθένου υλικού αποφεύγεται με την προσθήκη σταθεροποιητών. Οι σταθεροποιητές είναι χημικά μόρια που απορροφούν την ακτινοβολία, η οποία αποτελεί την κύρια αιτία αποδόμησης των πολυμερών.

Το συμπέρασμα που συνάγεται είναι πως όταν το ανακυκλωμένο πλαστικό είναι ενός συστατικού και δεν είναι αποδομημένο, λαμβάνονται μέσω τήγματος, υλικά πολύ υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων όπως το παρθένο υλικό. Για να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα σε αποδομημένο πλαστικό απαιτούνται πιο δαπανηρές διαδικασίες επεξεργασίας.

Θα πρέπει, όμως, να αναφερθεί ότι στα πλαστικά ο καθαρισμός δεν είναι εύκολος, διότι περιέχουν χρώματα και άλλα είδη υλικών, τα οποία απαιτούν δαπανηρούς μηχανολογικούς εξοπλισμούς για την απομάκρυνση τους, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος καθαρισμού και να μειώνονται τα οικονομικά και οικολογικά οφέλη.

1.4 Από τα πολυμερή στα πλαστικά: 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 αντι-θολωτικά, 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. 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.

1.5 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

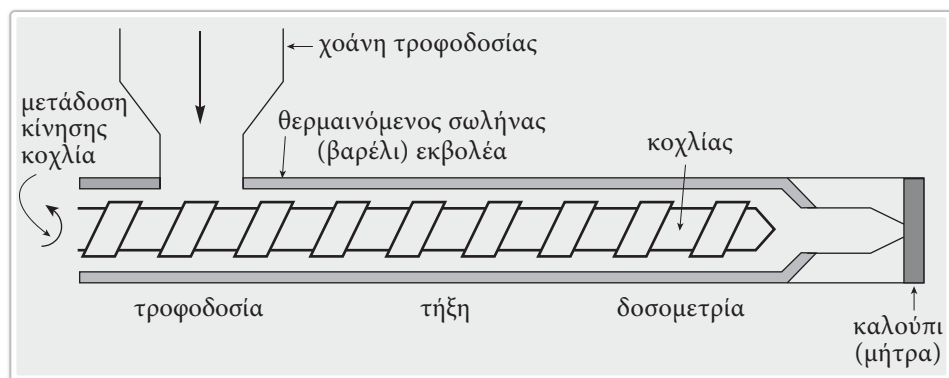
* Ως επεξεργασία χαρακτηρίζεται η ομογενοποίηση του τήγματος πολυμερούς μετά την προσθήκη διάφορων ουσιών (προσθέτων) που βελτιώνουν τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος (πλαστικού). Η ομογενοποίηση συνοδεύεται από την κοκκοποίηση ή πελλετοποίηση, η οποία έχει ως σκοπό τη μετατροπή του τήγματος σε μορφή μικρών στερεών κόκκων που είναι απαραίτητοι για την τροφοδοσία των εγκαταστάσεων μορφοποίησης. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την επεξεργασία και μορφοποίηση των πολυμερών στην §4.2.1.

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*. 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, μια πλήρης περιγραφή και ανάλυση της μυριάδας των τεχνικών επεξεργασίας που έχουν εμφανιστεί κατά τη διάρκεια των ετών θα ήταν αδύνατη εδώ. Εδώ, περιγράφουμε τις κοινές τεχνικές επεξεργασίας, εισάγουμε τη σχετική ορολογία, και εξετάζουμε το πώς οι διάφορες τεχνικές είναι βασισμένες στις βασικές αρχές των ιξωδοελαστικών πολυμερικών υλικών.

Μεταξύ των βασικών διεργασιών μορφοποίησης των πλαστικών, συμπεριλαμβανομένων των φιλμ και των συνθετικών ινών περιλαμβάνονται η *εκβολή*, η *χύτευση με έγχυση*, η *χύτευση με εμφύσηση*, η *χύτευση με συμπίεση*, η *χύτευση με συμπίεση και θέρμανση*, η *κυλίνδρωση* και η *ινοποίηση τήγματος*.

1.5.1 Εκβολή ή Εξώθηση

Τα θερμοπλαστικά αντικείμενα με ομοιόμορφη διατομή μορφοποιούνται με

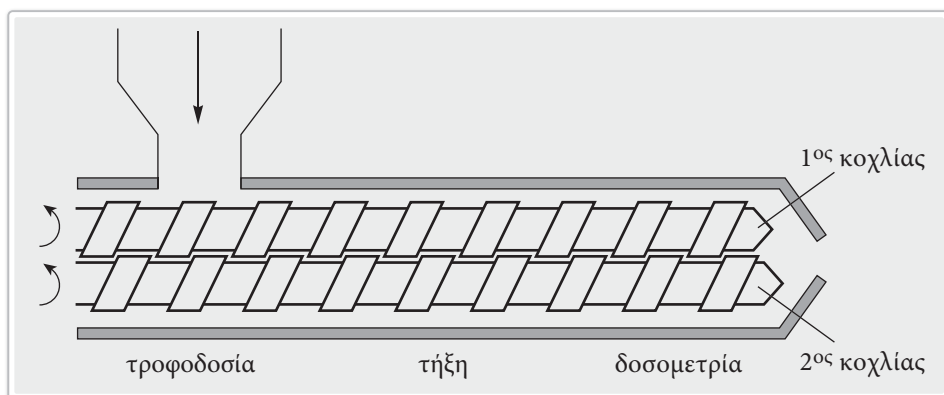


Σχήμα 1.7: Μονοκόχλιος εκβολέας

εκβολή (εξώθηση). Η διαδικασία μορφοποίησης με εκβολή ή εξώθηση πραγματοποιείται σε ειδικές μηχανές που καλούνται *εκβολείς*. Στο Σχ. 1.7 φαίνεται, σχηματικά, ένας *μονοκόχλιος εκβολέας* που αποτελεί τον χαρακτηριστικό εκπρόσωπο των μηχανών συνεχούς εκβολής. Η δομή του κοχλία φαίνεται στο Σχ. 1.9. Η σκόνη του πολυμερούς προωθείται σε ένα εξωτερικά θερμαινόμενο σωλήνα (βαρέλι) μέσω ενός *περιστρεφόμενου κοχλία*. Τήκεται καθώς προχωρά στο βαρέλι και πιέζεται διαμέσου ενός *καλουπιού* (μήτρας) όπου παίρνει και την τελική του μορφή. 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 (Σχ. 1.7) και σε *διπλοκόχλιους*, οι οποίοι φέρουν δυο κοχλίες στο βαρέλι (Σχ. 1.8). 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 κοχλίων 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 ρευστών/στερεών και της μεταφοράς θερμότητας.



Σχήμα 1.8: Διπλοκόχλιος εκβολέας με ομόστροφους επαπτόμενους κοχλίες

Εκβολέας

Στην συνέχεια αναπτύσσεται η διεργασία *μονοκόχλιου εκβολέα* (Σχ. 1.7).

Πριν την εισαγωγή των πλαστικών στον εκβολέα (extruder) διέρχονται από τον κοκκοποιητή ή τον πελλετοποιητή με σκοπό την μετατροπή των πλαστικών σε ομοιόμορφα σωματίδια (κόκκους ή πελλέτες) ώστε να μην προκαλέσουν το φράξιμο της χοάνης τροφοδοσίας του εκβολέα (Σχ. 1.7). Από την χοάνη τροφοδοσίας εισέρχονται στον σωλήνα (βαρέλι) με τον κοχλία, ο οποίος τα προωθεί στην μήτρα. Ο κύλινδρος όμως θερμαίνεται με ηλεκτρικές αντιστάσεις και στην διαδρομή οι κόκκοι των πλαστικών τήκονται. Το τηγμένο πλαστικό εξαναγκάζεται από τον κοχλία να διέλθει από την μήτρα, όπου και μορφοποιείται. Το παραγόμενο προϊόν είτε ψύχεται στην ατμόσφαιρα, σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της T_g ή T_m , είτε διέρχεται διαμέσου λουτρού για να σταθεροποιηθούν οι διαστάσεις του. Τα συστήματα **εκβολής με κοχλία** αναπτύχθηκαν για την παραγωγή προϊόντων όπως πελλετών (pellets), δηλ. ομοιόμορφων κυλινδρικών τεμαχιδίων των παρθένων ρητινών ή των ανακυκλωμένων πλαστικών για τη μορφοποίησή τους, σωλήνων, επικαλύψεις καλωδίων, φύλλων, όπως και στη περίπτωση της χύτευσης με εκβολή και εμφύσηση.

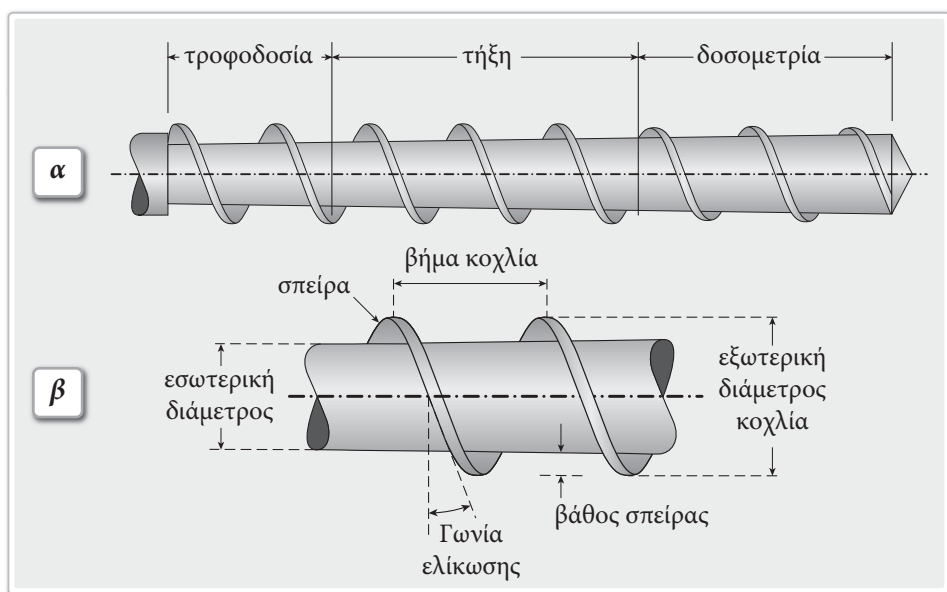
Μια εγκατάσταση εκβολής τήγματος αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Σύστημα μετάδοσης της κίνησης
- Χοάνη τροφοδοσίας
- Κοχλίας
- Σωλήνας (βαρέλι) του εκβολέα
- Σύστημα μεταφοράς θερμότητας
- Σύστημα ψύξης
- Μήτρα εκβολής

Δομή μονοβάθμιου κοχλία

Στο Σχ. 1.9α φαίνονται οι ζώνες λειτουργίας ενός κοχλία, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρύτατα στη μορφοποίηση των θερμοπλαστικών.

Στο Σχ. 1.9β φαίνεται η έλικα του κοχλία, το βήμα του κοχλία, η γωνία ελίκωσης, η εσωτερική και η εξωτερική διάμετρος κοχλία. Η συνήθης γωνία ελίκωσης είναι 17.7° , δηλ. βήμα κοχλία ίσο με την διάμετρο του, αν και μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ $2-20^\circ$. Η εξωτερική διάμετρος του κοχλία είναι λίγα χιλιοστά της ίντσας μικρότερη από την εσωτερική διάμετρο του βαρελιού. Η μικρή αυτή διαφορά μεταξύ βαρελιού και κοχλία εμποδίζει την συσσώρευση ρητίνης στο εσωτερικό τοίχωμα του βαρελιού και έτσι αυξάνεται η μεταφορά θερμότητας.



Σχήμα 1.9: α) Ζώνες λειτουργίας κοχλία, β) Λεπτομέρειες κοχλία

Ζώνες κοχλία

Υπάρχουν πολλών ειδών κοχλίες και οι οποίοι μπορούν να διαχωριστούν στις εξής ζώνες:

- α) ζώνη τροφοδοσίας,
- β) ζώνη τήξης,
- γ) ζώνη δοσομετρίας.

α) Ζώνη τροφοδοσίας

Στη ζώνη τροφοδοσίας το μίγμα των ψυχρών πλαστικών προωθείται από τον

κοχλία στην επόμενη ζώνη. Η τροφοδοσία του μίγματος στην επόμενη ζώνη εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού και την τριβή μεταξύ των πλαστικών και των μεταλλικών μερών του συστήματος εκβολής. Ο συντελεστής τριβής εξαρτάται από την μορφή και φύση του τροφοδοτούμενου υλικού, την τραχύτητα της επιφάνειας και της φύσης των μεταλλικών μερών. Όσο μικρότερη είναι η τριβή μεταξύ πελλετών και κοχλία και όσο μεγαλύτερη η τριβή μεταξύ πελλετών και σώματος του συστήματος εκβολής τόσο ταχύτερη η μεταφορά τους.

β) Ζώνη τήξης

Στη ζώνη τήξης το μίγμα των πλαστικών τήκεται και μεταβάλλεται σε τήγμα μεγάλης πυκνότητας και ομοιόμορφης θερμοκρασίας. Στην ζώνη αυτή δεν αναπτύσσεται πίεση στο υλικό, δηλ. τα τηγμένα πλαστικά οδεύουν στην επόμενη ζώνη με μηδενική πίεση. Σχεδιάζεται ακόμα έτσι ώστε ο αέρας να μην εγκλωβίζεται στο τήγμα αλλά να διαφεύγει στην ζώνη τροφοδοσίας.

γ) Ζώνη δοσομετρίας

Η ζώνη αυτή τροφοδοτείται με το τήγμα ομοιόμορφης θερμοκρασίας και ιξώδους. Το πάχος της εκγλυφής του κοχλία στη ζώνη αυτή είναι μικρότερο από κάθε άλλο τμήμα με αποτέλεσμα ο ρυθμός διάτμησης είναι μεγαλύτερος και η ανάμιξη πιο έντονη. Ουσιαστικά η πίεση που αναπτύσσεται στο κοχλία αναπτύσσεται σε αυτή την ζώνη, με μηδενική τιμή στην είσοδο της, αυξανόμενη κατά μήκος του κοχλία και παίρνει την μέγιστη τιμή στην έξοδο εκβολής.

Στη ζώνη αυτή εφαρμόζονται και όλες οι εξισώσεις που αφορούν την ροή πίεσης, την ροή οπισθέλκουσας και την ροή διαρροής. Η ροή οπισθέλκουσας είναι η κίνηση του πλαστικού προς την έξοδο και οφείλεται στην σχετική κίνηση του κοχλία ως προς τον κύλινδρο του εκβολέα. Είναι ευθέως ανάλογη του βάθους και του πλάτους της εκγλυφής, της ταχύτητας περιστροφής και της διαμέτρου του κοχλία. Η ροή πίεσης είναι αντίθετης φοράς στην ροή οπισθέλκουσας και οφείλεται στην πίεση που επικρατεί στην έξοδο, λόγω μήτρας, φίλτρου διήθησης κ.λπ.. Είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους του τμήματος δοσομετρίας και του ιξώδους του πολυμερούς και ευθέως ανάλογη του πλάτους και του βάθους της εκγλυφής και της διαφοράς πίεσης στο τμήμα δοσομετρίας του κοχλία.

Επομένως ο ρυθμός εξώθησης εάν αγνοήσουμε την ροή διαρροής είναι η ροή οπισθέλκουσας μείον την ροή πίεσης.

Έτσι ο σχεδιασμός της ζώνης δοσομετρίας, όπως και των καλουπιών, στηρίζεται στην εφαρμογή των ρεολογικών αρχών. Εντούτοις ο καθορισμός της διατομής των καλουπιών που απαιτείται για να παραγάγει μια επιθυμητή διατομή προϊόντων (εκτός από κυκλικά) είναι λίγο πολύ μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος. Τα ιξωδοελαστικά πολυμερή τήγματα διογκώνονται καθώς βγαί-

νουν από το καλούπι (ανακτώντας την αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια), και ο βαθμός διόγκωσης δεν μπορεί να προβλεφθεί αξιόπιστα.

Εκτός από τη διόγκωση των καλουπιών, όταν αυξάνεται η ταχύτητα εξώθησης, αρχίζει η παραμόρφωση του εξωθούμενου αντικειμένου. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως *θραύση τήγματος*. Αποδίδεται γενικά στην ελαστικότητα τήγματος, αλλά δεν υπάρχει προς το παρόν κανένας τρόπος ποσοτικής πρόβλεψης του. Μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την αύξηση του μήκους καλουπιού, την εξομάλυνση της εισόδου στο καλούπι, και την αύξηση της θερμοκρασίας του.

Ο λόγος μήκους προς την διάμετρο του κοχλία (L/D) είναι μια σημαντική παράμετρος κατά τον σχεδιασμό του εκβολέα, που στην περίπτωση των θερμοπλαστικών υλικών κυμαίνεται μεταξύ 16-32. Επομένως αύξηση του μήκους του κοχλία αυξάνει την ομοιομορφία θερμοκρασίας και ιξώδους και επομένως την απόδοση της εγκατάστασης.

Μονοκόχλιοι και διπλοκόχλιοι εκβολείς

Η απόδοση των μονοκόχλιων εκβολέων εξαρτάται από τη δυνατότητα προώθησης ή άντλησης του υλικού, που σημαίνει την υπέρβαση της αντίστασης του υλικού κατά την ροή του μεταξύ του περιστρεφόμενου κοχλία και του στάσιμου σωλήνα (βαρελιού). Ως αποτέλεσμα, οι μονοκόχλιοι εκβολείς δεν αποτελούν αντλίες θετικών μετατοπίσεων και τείνουν να δώσουν μια μάλλον ευρεία κατανομή των χρόνων παραμονής. Επιπλέον δεν πετυχαίνουν καλή ανάμιξη. Οι *ετερόστροφοι* (αντιθέτως περιστρεφόμενοι) *διπλοκόχλιοι εκβολείς* είναι ακριβείς αντλίες θετικών-μετατοπίσεων, ικανές να παράγουν τις υψηλές πιέσεις που χρειάζονται σε εφαρμογές εξώθησης συγκεκριμένου προφίλ. Οι *ομόστροφοι διπλοκόχλιοι εκβολείς*, αν και αντλίες μη θετικής μετατόπισης, με τον κατάλληλο σχεδιασμό κοχλιών μπορούν να δώσουν άριστη ανάμιξη και μια στενή κατανομή των χρόνων παραμονής (υποβάλλοντας όλο το υλικό ουσιαστικά στο ίδιο ιστορικό διάτμησης και θερμοκρασίας). Επομένως, χρησιμοποιούνται εκτενώς στις διεργασίες ανάμιξης πολυμερών, και μέχρι ενός σημείου ως συνεχείς αντιδραστήρες πολυμερισμού.

Κατά την λειτουργία των εκβολέων μέρος ή όλη η ενέργεια που απαιτείται για την τήξη του πολυμερούς παρέχεται από την ενέργεια του κινητήρα μέσω της έκλυσης ενέργειας που προκαλεί η μείωση του ιξώδους. Τα θερμαντικά στοιχεία στους εκβολείς απαιτούνται κυρίως για το ξεκίνημα και επειδή αρκετή θερμότητα δεν μπορεί πάντα να ανακτηθεί από εκεί από όπου παράχθηκε (ζώνες συμπίεσης και δοσολογίας) και να μεταφερθεί εκεί όπου απαιτείται (ζώνη τήξης). Στην πραγματικότητα, ψύξη μέσω των τοίχων του κυλίνδρου ή του πυρήνα του κοχλία είναι μερικές φορές απαραίτητη.

Δευτερογενής ή Μηχανική Ανακύκλωση

7.1 Εισαγωγή

Η δευτερογενής ανακύκλωση εφαρμόζεται σε πλαστικά απορρίμματα τα οποία δεν μπορούν να υποστούν άμεση επεξεργασία, όπως κατά την πρωτογενή ανακύκλωση. Οι λόγοι της μη άμεσης επεξεργασίας είναι:

- η υψηλή μόλυνση των πλαστικών απορριμμάτων με μη πλαστικά υλικά, όπως άμμο, μέταλλα κ.λπ.,
- η διαφορετική φύση των ίδιων των πλαστικών απορριμμάτων έχει ως αποτέλεσμα την 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 την μεταβολή και υποβάθμιση των ιδιοτήτων των πλαστικών προϊόντων, και
- για να είναι οικονομικά συμφέρουσα η δευτερογενής ανακύκλωση θα πρέπει η διαδικασία να έχει το χαρακτήρα μαζικής παραγωγής.

Τα πλαστικά, όπως έχει αναφερθεί, παράγονται από τα πολυμερή με κατάλληλη επεξεργασία και διατίθενται στην αγορά και την κατανάλωση. Τα πολυμερή με τη σειρά τους συντίθενται από τα μονομερή. Επομένως τα απορρίμματα των πλαστικών προέρχονται είτε από το βιομηχανικό στάδιο της σύνθεσης και της παραγωγής τους, ως αποτέλεσμα αστοχιών της παραγωγής και καλούνται *βιομηχανικά απορρίμματα*, είτε κατά την απόσυρσή τους με την λήξη της εφαρμογής και χρήσης τους, στην αγορά και την κατανάλωση, δηλ. στο τέλος του κύκλου ζωής τους και καλούνται *μετακαταναλωτικά απορρίμματα*.

Εδώ θα πρέπει να τονιστεί η αναγκαιότητα της ανακύκλωσης των πλαστικών

απορριμμάτων επειδή σύμφωνα με την οδηγία 1999/31/ΕΚ θεωρούνται ως *επικίνδυνα* και *επιβλαβή* κατά τη διάθεσή τους σε ΧΥΤΑ, λόγω διάσπασης ή εκχύλισης τους στα αποστραγγίσματα (§10.6.2).

Τα πλαστικά απορρίμματα τα οποία μπορούν να υποστούν δευτερογενή ανακύκλωση είναι:

- α) *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.
- β) *Μετακαταναλωτικά πλαστικά απορρίμματα* τα οποία προέρχονται κυρίως 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, δηλ. στο σπίτι, ή Συλλογής σε Κάδους.
- γ) *Βιομηχανικά πλαστικά απορρίμματα* από ένα είδος πλαστικού το οποίο όμως έχει τέτοιο βαθμό επιμόλυνσης από άλλα μη-πλαστικά υλικά ώστε δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί στη δευτερογενή ανακύκλωση. Βιομηχανικά πλαστικά απορρίμματα αυτού του είδους παράγονται στις βιομηχανίες αυτοκινήτων, επίπλων, ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών, οικοδομικές εφαρμογές και μεταφορές. Τα υλικά αυτά στο τέλος του κύκλου ζωής τους απαντώνται ως μετακαταναλωτικά πλαστικά απορρίμματα και ως καλύτερη μέθοδος διαχείρισής τους θεωρείται η τριτογενής ανακύκλωση.
- δ) *Μίγματα βιομηχανικών πλαστικών απορριμμάτων*. Πρόκειται για μίγματα βιομηχανικών πλαστικών απορριμμάτων τα οποία προέρχονται από διαφορετικές βιομηχανικές πηγές και επομένως περιέχουν διαφορετικά πλαστικά με μικρό συνήθως ποσοστό μη πλαστικών επιμολύνσεων. Ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματα τους είναι η διακύμανση της σύστασης τους με τον χρόνο.

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση των πλαστικών απορριμμάτων στηρίχτηκε στην πηγή προέλευσης, ενώ, όπως αναφέρθηκε και στην §4.2.1 ανάλογα με τη σύσταση και το είδος του πλαστικού τα ανακυκλώσιμα πλαστικά απορρίμματα χαρακτηρίζονται ως:

- *σκάρτο πλαστικό* (producer or home scrap) που παράγεται κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής παραγωγής ή συλλέγεται κατ' είδος πλαστικού όπως οι επιστρεφόμενες συσκευασίες,
- *ανάμικτα πλαστικά* (commingled plastics), δηλ. μίγματα πλαστικών απορριμμάτων με γνωστή σύσταση, συστατικά ελεύθερα από μη πλαστικές προσμί-

ξεις,

- μετακαταναλωτικό σκάρτο (post consumer scrap), δηλ. πλαστικά απορρίμματα οικιακών και βιομηχανικών/εμπορικών εφαρμογών τα οποία μπορεί να περιέχουν και μη πλαστικές προσμίξεις.

Στην ανάπτυξη του παρόντος κεφαλαίου χρησιμοποιείται η κατηγοριοποίηση με βάση τη σύσταση και το είδος του ελαστικού ως ευχρηστότερου.

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.λπ. Για να ανακυκλωθούν θα πρέπει να υποστούν προ-επεξεργασία, δηλ. τις διεργασίες διαχωρισμού/καθαρισμού ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα προϊόντων.

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

Τα προϊόντα της δευτερογενούς ανακύκλωσης δεν χαρακτηρίζονται από την ποιότητα των ιδιοτήτων τους σε σχέση με τα αρχικά πλαστικά. Τα μίγματα των πλαστικών απορριμμάτων κατά την δευτερογενή ανακύκλωση υφίστανται μια από τις παρακάτω διεργασίες:

- Το μίγμα των πλαστικών αναμειγνύεται με παρθένο υλικό και επεξεργάζεται σε εξειδικευμένες μηχανές μορφοποίησης. Τα λαμβανόμενα υλικά χαρακτηρίζονται από ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες με υψηλό όμως το κόστος των προϊόντων.
- Το μίγμα των πλαστικών απορριμμάτων χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με παρθένα πλαστικά, για την παραγωγή υλικών που χαρακτηρίζονται από δομή 'σάντουιτς'. Το μίγμα των πλαστικών αποτελεί τον πυρήνα του υλικού ενώ την επικάλυψη το παρθένο υλικό. Το πλεονέκτημα αυτών των υλικών είναι το χαμηλό κόστος και το μειονέκτημα ότι μόνο ορισμένοι τύποι πλαστικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν.
- Τα μίγματα των πλαστικών απορριμμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως πληρωτικά υλικά των πλαστικών. Τα πλαστικά εδώ παίζουν τον ρόλο του συγκολλητικού υλικού και οι μηχανικές ιδιότητες καθορίζονται από το πληρωτικό υλικό. Η χρήση αυτή του μίγματος πλαστικών είναι χαμηλού κόστους.
- Τα μίγματα των πλαστικών απορριμμάτων μπορούν να διαχωριστούν με χημικό τρόπο. Το πλεονέκτημα είναι οι πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος και το μειονέκτημα η αύξηση του κόστους.

7.1.1 Στάδια δευτερογενούς ανακύκλωσης πλαστικών απορριμμάτων

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.

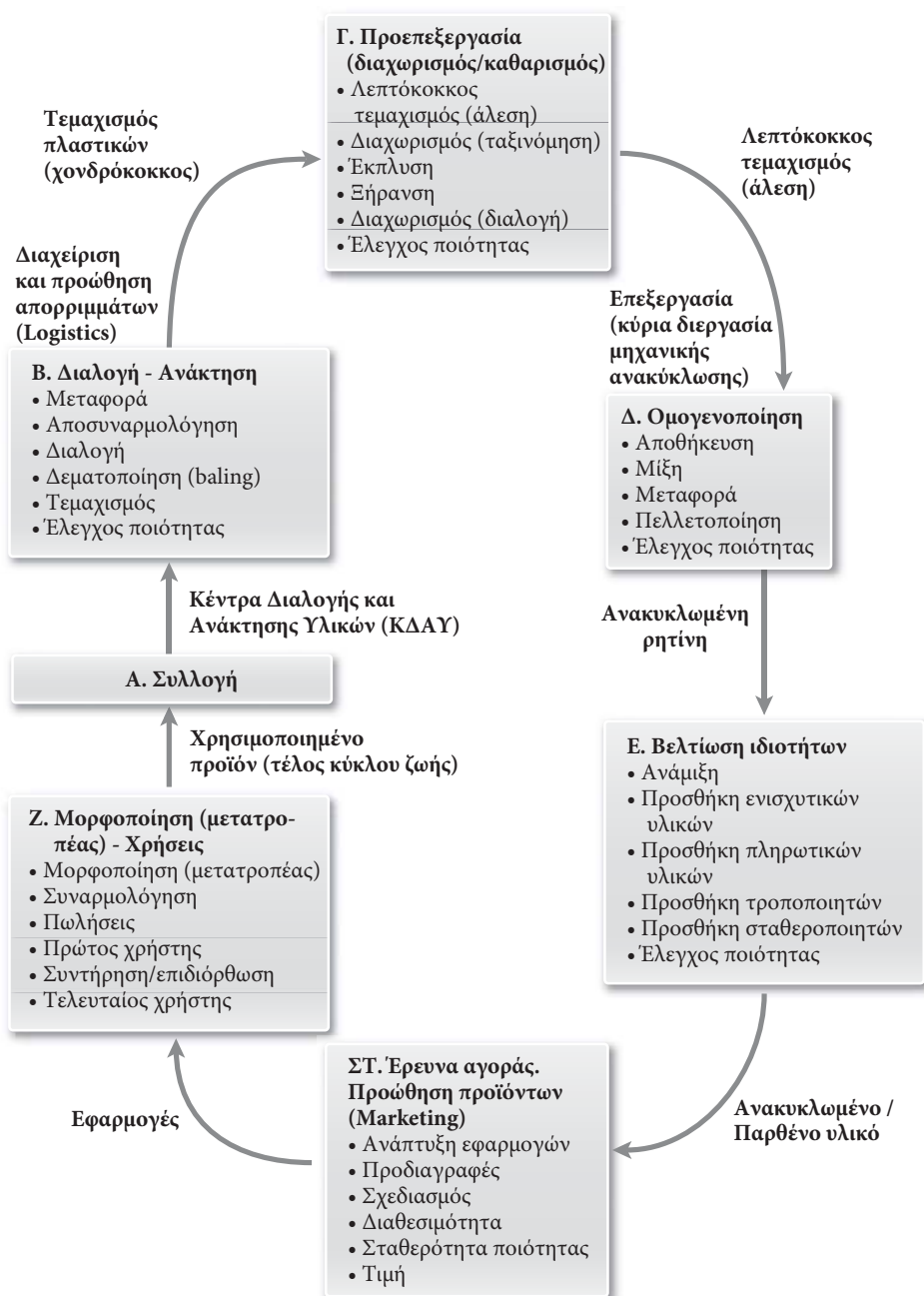
Τα διάφορα στάδια δευτερογενούς ανακύκλωσης φαίνονται στο Σχ. 7.1-1, τα οποία διακρίνονται στα εξής:

- A. Συλλογή,
- B. Διαλογή - Ανάκτηση,
- Γ. Προ-επεξεργασία (διαχωρισμός/καθαρισμός)
- Δ. Ομογενοποίηση,
- Ε. Βελτίωση ιδιοτήτων,
- ΣΤ. Έρευνα αγοράς - Σχεδιασμός - Προώθηση (Marketing) και
- Ζ. Μορφοποίηση (μετατροπέας) - Χρήσεις.

Τα πλαστικά απορρίμματα ανάλογα με το σύστημα **Συλλογής** (στάδιο Α), είτε ως ανεξάρτητο ρεύμα (π.χ. επιστρεφόμενες φιάλες) είτε μαζί με τα άλλα ανακυκλώσιμα υλικά (χαρτί, μέταλλο, γυαλί, πλαστικό) φέρονται στα **Κέντρα Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών (ΚΔΑΥ)**, όπου λαμβάνει χώρα η **Διαλογή και Ανάκτηση** (στάδιο Β) 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** δηλ. **διαχωρισμού/καθαρισμού** (στάδιο Γ).

Στο στάδιο της **Προ-επεξεργασίας** τα πλαστικά απορρίμματα υφίστανται



Σχήμα 7.1-1: Στάδια δευτερογενούς ανακύκλωσης πλαστικών που στηρίζεται στην ανάλυση Burgdorf

[Burgdorf P., Keller B. & Orth P., (1997), *Computer housings in material recycling loop* {<http://www.plastics.bayer.com/bayer/>} (28-9-2001)]

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.λπ. Του διαχωρισμού προηγείται λεπτόκοκκος τεμαχισμός (μείωση του μεγέθους των πλαστικών απορριμμάτων). 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** (στάδιο Δ) 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 (δες §4.2.1). Η προσθήκη των πρόσθετων δηλ. η **βελτίωση των ιδιοτήτων** των πλαστικών μπορεί να συμβεί σε επόμενο στάδιο (στάδιο Ε), 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 διάθεσή του σε **χρήση** (στάδιο Ζ), εφόσον προηγηθεί ο σχεδιασμός του, δηλ. το στάδιο ΣΤ του marketing.

7.2 Στάδιο Α: Συλλογή

Η συλλογή των πλαστικών απορριμμάτων, αφορά τόσο τα βιομηχανικά πλαστικά απορρίμματα (όταν δεν μπορεί να γίνει πρωτογενής ανακύκλωση) όσον και τα μετακαταναλωτικά πλαστικά απορρίμματα. Τα βιομηχανικά συλλέγονται στους χώρους παραγωγής και φέρονται στα Κέντρα (Σταθμούς) Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών (ΚΔΑΥ). Από τα μετακαταναλωτικά πλαστικά το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην ανάκτηση των πλαστικών συσκευασίας που συναντώνται στα στερεά δημοτικά απορρίμματα (ΣΔΑ) και συγκεκριμένα τα οικιακά.

7.2.1 Συλλογή οικιακών πλαστικών απορριμμάτων

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

- Παραμένουν αναμιγμένα με τα άλλα οικιακά απορρίμματα, συλλέγονται με την βοήθεια της Τοπικής Αυτοδιοίκησης και φέρονται με το σύνολο των α-

πορριμμάτων στους χώρους ταφής ή στους χώρους Μηχανικής Διαλογής από όπου διαχωρίζονται τα πλαστικά απορρίμματα ή χρησιμοποιούνται ως καύσιμη ύλη (δες παρακάτω Σχ. 10.3).

- Τα πλαστικά μαζί με τα άλλα ανακυκλώσιμα υλικά (χαρτί, γυαλί και μέταλλο) συλλέγονται χωριστά από τα οργανικά υπολείμματα των οικιακών απορριμμάτων. Για την συλλογή των ανακυκλώσιμων υλικών εφαρμόζεται είτε το σύστημα *Συλλογής στη Πηγή* είτε το σύστημα *Συλλογής σε Κάδους*.

Σύστημα Συλλογής – Διαλογής στη Πηγή των ανακυκλώσιμων υλικών

Τα πλαστικά αντικείμενα διαχωρίζονται από τον καταναλωτή στα είδη τους ή απλώς ως σύνολο (ανεξάρτητα είδους πολυμερούς) από τα υπόλοιπα ανακυκλώσιμα υλικά. Τα πλαστικά συλλέγονται σε πλαστικούς σάκους (ιδιαίτερου χρώματος) και με την βοήθεια του Φορέα Διαχείρισης των Δημοτικών Απορριμμάτων (στην Ελλάδα η Τοπική Αυτοδιοίκηση) φέρονται στα Κέντρα Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών (ΚΔΑΥ).

Σύστημα Συλλογής σε Κάδους των ανακυκλώσιμων υλικών

Τα πλαστικά μαζί με τα άλλα ανακυκλώσιμα υλικά (χαρτί, γυαλί και μέταλλο) φέρονται από τους καταναλωτές σε κοινούς κάδους (μπλε χρώματος στην Ελλάδα). Σε άλλες χώρες υφίσταται η συλλογή κάθε ανακυκλώσιμου υλικού σε ξεχωριστό κάδο και προφανώς ο καθένας είναι διαφορετικού χρώματος. Στην συνέχεια από τον Φορέα Διαχείρισης τα ανακυκλώσιμα υλικά φέρονται στα ΚΔΑΥ, όπου τα υλικά υφίστανται διαλογή στα είδη τους είτε χειρωνακτικά είτε με μηχανικά μέσα.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την συλλογή των οικιακών ανακυκλώσιμων υλικών είναι αυτός που εφαρμόζεται για την συλλογή των υπολοίπων δημοτικών απορριμμάτων. Δηλ. πλαστικοί σάκοι (από υλικό που βιοαποικοδομείται ή ανακυκλώνεται), μεταλλικοί ή πλαστικοί κάδοι (χωρητικότητας 50-1100 lt), οχήματα εφοδιασμένα με μηχανισμό εκκένωσης των κάδων και ειδικά containers που συνοδεύονται από αντίστοιχα γερανοφόρα οχήματα για την μεταφορά τους.

7.2.2 Προϋποθέσεις επιτυχίας της Συλλογής – Διαλογής στην Πηγή οικιακών πλαστικών απορριμμάτων

Για την επιτυχία των προγραμμάτων Συλλογής-Διαλογής στην Πηγή των οικιακών πλαστικών απορριμμάτων, δηλ. διαλογή των πλαστικών από τα άλλα

ανακυκλώσιμα υλικά, και διαλογή των πλαστικών μεταξύ τους, ανά είδος πολυμερούς, από τον ίδιο τον καταναλωτή στο σπίτι του, θα πρέπει να υπάρξει συνεργασία τοπικής αυτοδιοίκησης, πολιτών και βιομηχανίας πλαστικών.

Η βιομηχανία πλαστικών θα πρέπει να συμμορφωθεί με την νομοθεσία της ανακύκλωσης, όπως επίσης να δοθούν φορολογικά κίνητρα για την υιοθέτηση της και να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις για την απορρόφηση στην αγορά των ανακυκλωμένων προϊόντων.

Οι πολίτες θα πρέπει να ενημερωθούν από την πολιτεία (Τοπική Αυτοδιοίκηση-Σχολεία) για την αναγκαιότητα και αποδοχή εφαρμογής της ανακύκλωσης (λόγω μείωσης των φυσικών πόρων και της κατανάλωσης ενέργειας για την παραγωγή των προϊόντων) με σκοπό την υιοθέτηση μιας συμπεριφοράς καθημερινότητας που να έχει αφομοιώσει πρακτικές ανακύκλωσης. Στην κατεύθυνση αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σε ικανό εύρος χρόνου, ενημερωτικά φυλλάδια, προπαγάνδισή της ανακύκλωσης από τα μέσα ενημέρωσης, συνεργασία με κοινωνικές οργανώσεις και συστηματική ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των μαθητών των σχολείων.

Μεταξύ των πρώτων προσπαθειών για την Συλλογή-Διαλογή των πλαστικών στην Πηγή συγκαταλέγεται το πράσινο δυαδικό σύστημα συλλογής στην Γερμανία, DSD (Duales System Deutschland).

Η οδηγία της 12/6/91 που αφορούσε την συλλογή των απορριμμάτων Συσκευασίας (Verpackungsverordnung) απαιτούσε από τους κατασκευαστές και τους εμπόρους να αποδεχτούν την επιστροφή και την ανακύκλωση των συσκευασιών που σχετίζονταν με την μεταφορά, την προστασία και την πώληση των προϊόντων. Οι κατασκευαστές και οι έμποροι αποδέχτηκαν το σύστημα επιστροφής των συσκευασιών μετέχοντας σε ένα σύστημα ανάκτησης που επεκτεινόταν σε όλη την Γερμανία και στηριζόταν ταυτόχρονα στην συμμετοχή των ίδιων των καταναλωτών. Μεταξύ των υλικών που συμπεριλαμβάνονται στο σύστημα συλλογής DSD είναι τα ελαφριά υλικά συσκευασίας και τα οικιακά πλαστικά.

Σύμφωνα με το σύστημα DSD τα οικιακά μετακαταναλωτικά πλαστικά (φιάλες, φιλμ, κύπελλα και αφροί) συλλέγονται στις λεγόμενες 'κίτρινες σακούλες' από τον καταναλωτή και μεταφέρονται στην συνέχεια για επεξεργασία. Η 'κίτρινη σακούλα' περιλαμβάνει πλαστικά, μέταλλα και σύνθετες συσκευασίες, τύπου tetrapack (π.χ. χάρτινες συσκευασίες γάλακτος). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η 'κίτρινη σακούλα' κατασκευάζεται από 100% πλαστικά απορρίμματα που συλλέγονται με το σύστημα DSD.

Τα συλλεγόμενα οικιακά πλαστικά (DSD) υφίστανται παραπέρα επεξεργασία μηχανικής ανακύκλωσης ή και τριτογενούς ανακύκλωσης για την μετατροπή

τους σε πρώτες χημικές ύλες και μονομερή. Η ανάκτηση ενέργειας (τεταρτογενής ανακύκλωση) με καύση των πλαστικών DSD δεν επιτρέπεται στην Γερμανία.

Στο τέλος του κεφαλαίου αναπτύσσεται το σύστημα διαχείρισης των πλαστικών απορριμμάτων στην Αγγλία.

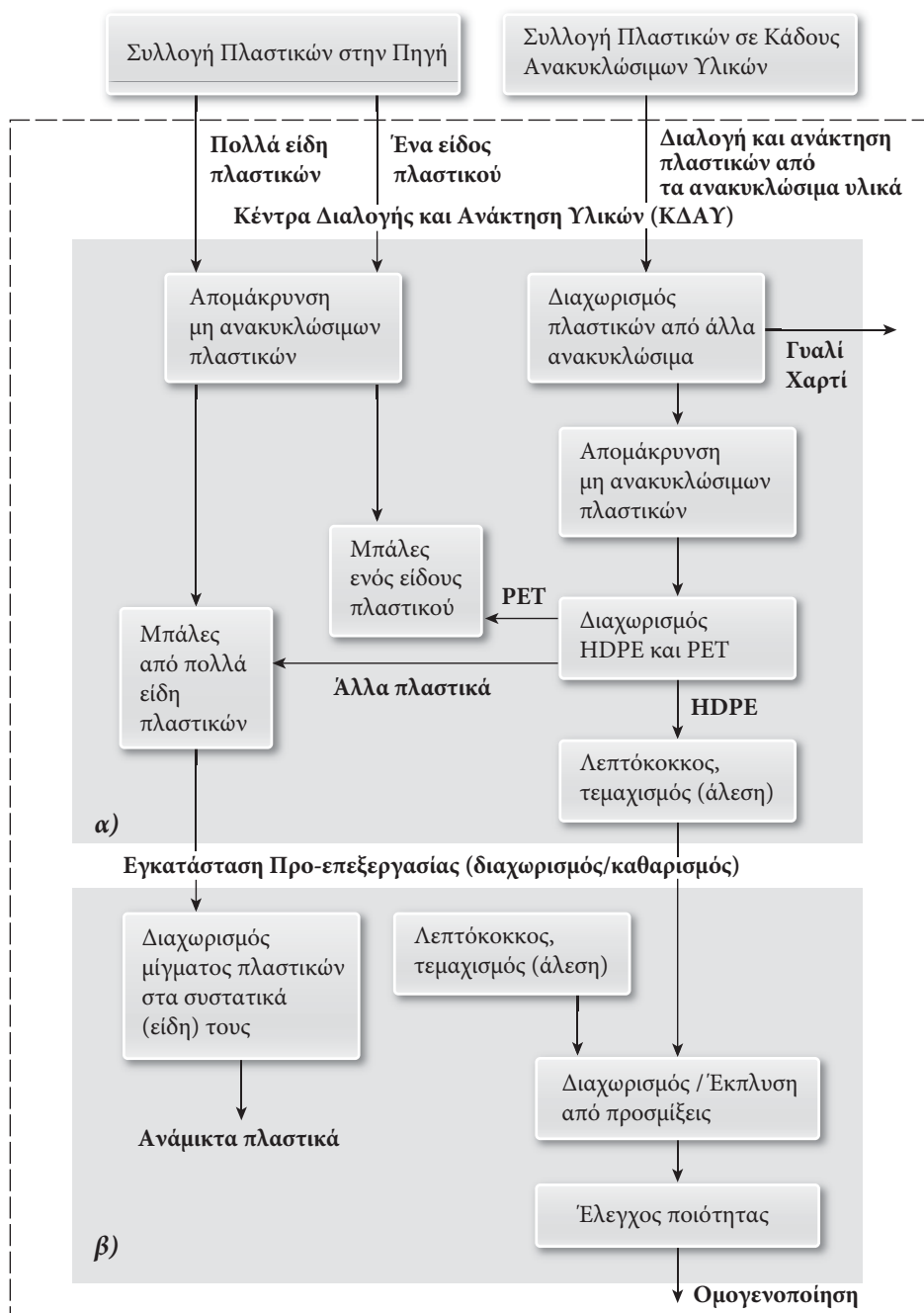
7.3 Στάδιο Β: Διαλογή και Ανάκτηση

Τα συλλεγόμενα οικιακά πλαστικά απορρίμματα είτε στη Πηγή είτε σε Κάδους φέρονται στα **Κέντρα Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών (ΚΔΑΥ)** (στάδιο Β, Σχ. 7.1-1). 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**.

Στο Σχ. 7.3-1α, φαίνεται η διαδικασία **διαλογής και ανάκτησης** πλαστικών ενώ στο Σχ. 7.3-1β το επόμενο στάδιο της **προ-επεξεργασίας** των πλαστικών δηλ. οι **εγκαταστάσεις διαχωρισμού και καθαρισμού** (στάδιο Γ, Σχ. 7.1-1) που θα αναπτυχθεί πληρέστερα στη §7.4. Αναφέρεται εδώ συνοπτικά ώστε να κατανοηθεί η πορεία των διεργασιών που υφίσταται το κάθε ρεύμα πλαστικών που εξέρχεται από τα ΚΔΑΥ και εισέρχεται στο στάδιο της προ-επεξεργασίας ώστε να είναι καταστεί κατάλληλο και να οδηγηθεί στη κύρια διεργασία της μηχανικής ανακύκλωσης την **ομογενοποίηση-πελλετοποίηση** (στάδιο Δ, Σχ. 7.1-1).

Τα πλαστικά απορρίμματα που εισέρχονται στα ΚΔΑΥ (Σχ. 7.3-1α) αποτελούν μέρος των παρακάτω ρευμάτων:

1. **Πλαστικά απορρίμματα** που προέρχονται από συστήματα συλλογής με επιστροφή (π.χ. φιάλες) είναι συνήθως **ενός είδους**, χωρίς να αποκλείεται και η παρουσία άλλων πολυμερών. Εάν πάλι π.χ. οι φιάλες δεν είναι ενός είδους πολυμερούς τότε διαχωρίζονται στα είδη τους. Από το ρεύμα του ενός είδους πολυμερούς αφαιρούνται χειρωνακτικά οι μη ανακυκλώσιμες ύλες, γίνεται έλεγχος της απομάκρυνσης τους και στη συνέχεια **συμπιέζεται** και **δεματιάζεται** σε **‘μπάλες’** (Σχ. 7.3-2) για να μεταφερθεί στις εγκαταστάσεις **προ-επεξεργασίας (διαχωρισμού και καθαρισμού)**.



Σχήμα 7.3-1: α) Κέντρα Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών (ΚΔΑΥ)

β) Εγκατάσταση προ-επεξεργασίας (διαχωρισμού/καθαρισμού) πλαστικών ανά είδος πολυμερούς



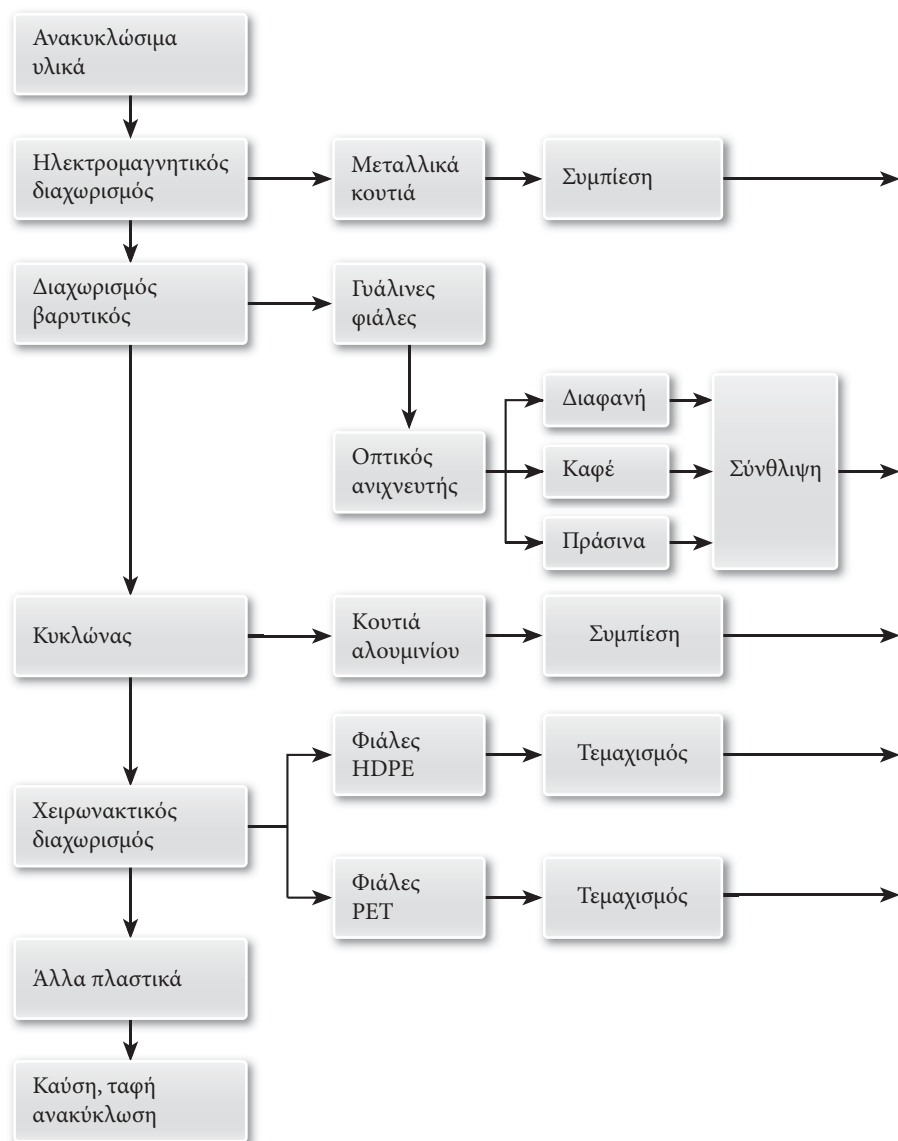
Σχήμα 7.3-2: Συμπίεση και δεματοποίηση (baling) των ρευμάτων των πλαστικών απορριμμάτων (ανά είδος ή ανά μίγμα) στα ΚΔΑΥ για να οδηγηθούν στις εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας (διαχωρισμού - καθαρισμού)

Στις εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας (διαχωρισμού και καθαρισμού) υφίστανται **λεπτόκοκκο τεμαχισμό** (αλέθονται) και οδηγούνται σε **μικροδιαχωρισμούς**, όπως απομάκρυνση πλαστικών προσμίξεων (καπάκια, πλαστικά ή μεταλλικά, ετικέτες, κόλλες, μελάνια) με ταυτόχρονη **έκπλυση** των σωματιδίων. Τέλος εφόσον γίνει έλεγχος της καθαρότητας των τεμαχιδίων πλαστικού οδηγούνται στο στάδιο της **ομογενοποίησης-πελλετοποίησης**.

2. Εάν τα πλαστικά συλλέγονται όλα μαζί, τότε από το ρεύμα που περιέχει **πολλά είδη πλαστικών** (Σχ. 7.3-1α) αφαιρούνται οι μη ανακυκλώσιμες πλαστικές ύλες, **συμπιέζεται** και **δεματιάζεται** σε **‘μπάλες’** που περιέχουν διάφορα πολυμερή. Οι **‘μπάλες’** οδηγούνται στις εγκαταστάσεις **προ-επεξεργασίας (διαχωρισμού και καθαρισμού)**, όπου υφίστανται προκαταρκτικό **μακρο-διαχωρισμό** των πλαστικών στα είδη τους και στη συνέχεια ακολουθούν οι διεργασίες του **μικροδιαχωρισμού**, οι οποίες αναφέρθηκαν στην περίπτωση του προηγούμενου ρεύματος.
3. Όταν τα **πλαστικά** συλλέγονται σε κάδους **ανακυκλώσιμων υλικών** (Σχ. 7.3-1α), τότε λαμβάνει χώρα, πρώτα, ο διαχωρισμός των υλικών στα είδη τους (γυαλί, χαρτί, μέταλλο, πλαστικά). Κατόπιν τα ανακυκλώσιμα πλαστικά υποβάλλονται σε διεργασίες σχηματισμού ρευμάτων είτε ενός είδους πολυμερούς, είτε ανάμικτων πλαστικών, τα οποία συμπιέζονται και δεματοποιούνται σε **‘μπάλες’** και υπό αυτή τη μορφή είτε υπό τη μορφή **τεμαχιδίων** (χονδρόκοκκων) οδηγούνται στις εγκαταστάσεις **προ-επεξεργασίας (διαχωρισμού/καθαρισμού)** και ακολουθούν τις διεργασίες των δυο παραπάνω ρευμάτων.

7.3α Μέθοδος μηχανικής διαλογής Bezner

Για τον διαχωρισμό των ανακυκλώσιμων υλικών στα ΚΔΑΥ εφαρμόζεται συνήθως η γερμανική μέθοδος μηχανικής διαλογής Bezner, το διάγραμμα ροής της οποίας φαίνεται στο Σχ. 7.3-3. Με την μέθοδο αυτή το ρεύμα των ανακυ-

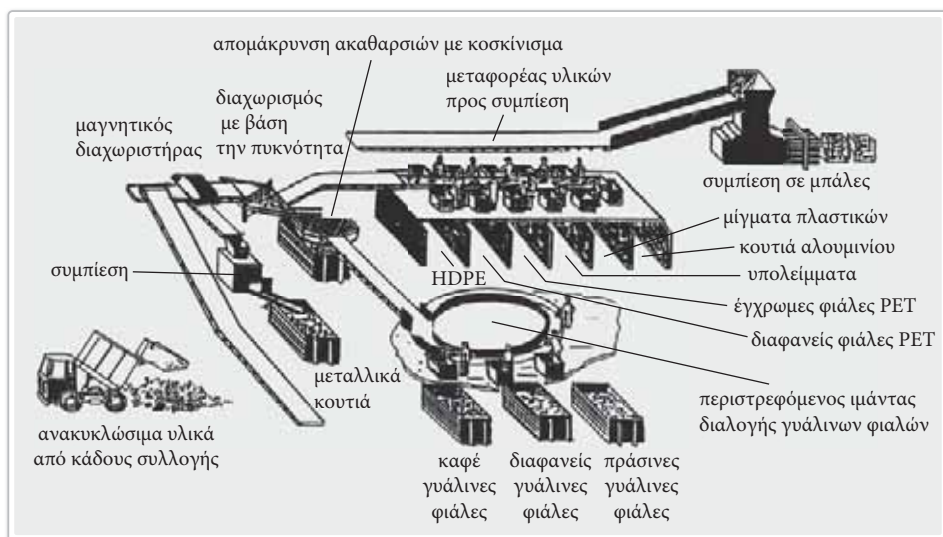


Σχήμα 7.3-3: Μέθοδος διαλογής Bezner

κλώσιμων υλικών διέρχεται από ηλεκτρομαγνητικό διαχωριστήρα για την απομάκρυνση των μεταλλικών υλικών και στην συνέχεια διαχωρίζονται σε κατηγορίες τα υλικά: γυαλί (φιάλες), αλουμίνιο (κουτιά) και πλαστικό. Τα πλαστικά διαχωρίζονται χειρωνακτικά σε τρία ρεύματα:

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

Η μέθοδος διαλογής Bezner παρουσιάζεται με ένα πιο εικονικό και παραστατικό τρόπο στο Σχ. 7.3-4.



Σχήμα 7.3-4: 'Εικονική' αναπαράσταση της μεθόδου Bezner

Τα πλαστικά που μετέχουν στα οικιακά πλαστικά απορρίμματα ως υλικά συσκευασίας είναι τα: HDPE, LDPE, LLDPE, PP, PET, PVC, PS και άλλα σε μικρότερο ποσοστό (Σχ. 2.5 και Πίν. 2.2). Τα κύρια πλαστικά φιαλών οικιακής χρήσης είναι τα HDPE και PET. Για το λόγο αυτό τα κύρια ρεύματα ανακτώμενων πλαστικών όπως φαίνεται και στα Σχ. 7.3-3 και 7.3-4 είναι τα HDPE, PET (κυρίως φιάλες).

7.3β Αναγκαίες επισημάνσεις (μακρο- και μικρο-διαχωρισμοί)

Θα πρέπει να τονιστεί, σχηματικά, ότι ο διαχωρισμός που λαμβάνει χώρα στο στάδιο **Διαλογής** και **Ανάκτησης**, δηλ. στα Κέντρα Διαλογής και Ανάκτησης Υλικών (ΚΔΑΥ), είναι συνήθως **μακρο-διαχωρισμός**, ενώ ο διαχωρισμός στο στάδιο της **προ-επεξεργασίας** των πλαστικών είναι κατά βάση **μικρο-διαχωρισμός**, δηλ. 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 (§7.3-1) Γι' αυτό τα ρεύματα πλαστικών οδηγούνται από τα ΚΔΑΥ στις εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας υπό μορφή 'μπαλών'.

Αντίθετα στο στάδιο της **προ-επεξεργασίας** (Σχ. 7.3-1), οι 'μπάλες' των πλαστικών από τα ΚΔΑΥ υφίστανται διάνοιξη και αλέθονται σε ειδικούς μύλους. Υφίστανται δηλ. **χονδρόκοκκο** ή **λεπτόκοκκο τεμαχισμό** (κοκκοποίηση) και ακολούθως επιδέχονται μια σειρά **μικρο-διαχωρισμούς**. Ακολουθεί η **έκπλυση**. Με τους **μικρο-διαχωρισμούς** επιτυγχάνεται υψηλή καθαρότητα του ρεύματος πλαστικών από τις πλαστικές και μη-πλαστικές προσμίξεις τους, με αντίτιμο την πολυπλοκότητα των διεργασιών και το υψηλό κόστος τους. Ενώ με τον μακρο-διαχωρισμό, π.χ. με την τεχνική της επίπλευσης δεν μπορούν να διαχωριστούν πλαστικά παρόμοιας πυκνότητας, αντίθετα με τον μικροδιαχωρισμό και μια αντίστοιχη διεργασία, π.χ. υδροκυκλώνας, επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός τους. Κι αυτό γιατί η επίπλευση βασίζεται στην καταβύθιση/επίπλευση των **φιαλών** σε σχέση με το μέσο επίπλευσης. Αντίθετα στους υδροκυκλώνες, οι οποίοι μοιράζονται την ίδια αρχή διαχωρισμού με την επίπλευση, επιτυγχάνεται ο **μικροδιαχωρισμός των τεμαχιδίων των πλαστικών** επειδή υποβάλλονται τα τελευταία επίπλεον σε ένα φυγοκεντρικό πεδίο, το οποίο προκαλεί ένα ανοδικής φοράς εσωτερικό ρεύμα που παρασύρει τα ελαφρύτερα τεμαχίδια, ενώ τα βαρύτερα παρασύρονται από ένα εξωτερικό, καθοδικής φοράς ρεύμα.

Άρα σημαντικός για τον μικροδιαχωρισμό είναι ο **τεμαχισμός** των πλαστικών. Ένας **χονδρόκοκκος τεμαχισμός** του ρεύματος πλαστικών, μπορεί επίσης να συμβεί για να μειωθούν οι δαπάνες μεταφοράς από τα ΚΔΑΥ στις εγκαταστάσεις προ-επεξεργασίας. Γενικότερα ο τεμαχισμός των πλαστικών μειώνει τα έξοδα μεταφοράς, αλλά ταυτόχρονα εξασφαλίζει ομοιογενή και σταθερή τροφοδοσία στις διεργασίες του διαχωρισμού, όπως και της ομογενοποίησης (π.χ. εκβολέα).

Η μηχανική ή αυτόματη ή πνευματική διαλογή των πλαστικών σε είδη στα ΚΔΑΥ, αφορά κυρίως τον **οπτικό διαχωρισμό** (διαλογή) των πλαστικών και ο

οποίος χρησιμοποιείται ευρύτατα, ενώ ο **μαγνητικός διαχωρισμός** χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό μεταλλικών αντικειμένων από πλαστικά. Μέσω των οπτικών ιδιοτήτων εντοπίζεται το κάθε είδος πολυμερούς και με άσκηση πνευματικής πίεσης εκτοπίζεται το πλαστικό αντικείμενο (π.χ. φιάλη). Ο τεχνολογικός εξοπλισμός της οπτικής διαλογής θα αναπτυχθεί παρακάτω στη §7.3.1.

7.3.1 Εξοπλισμός διαλογής πλαστικών απορριμμάτων στα ΚΔΑΥ

Όπως αναφέρθηκε στην §7.3, οι μέθοδοι διαλογής πλαστικών απορριμμάτων στα ΚΔΑΥ διακρίνονται σε :

- *Χειρωνακτική διαλογή ή διαλογή με τα χέρια και*
- *Μηχανική ή πνευματική ή αυτόματη διαλογή*

Οι μέθοδοι αυτές αφορούν διαλογή υλικών αντικειμένων από φυσικού μεγέθους μέχρι μεγέθους σωματιδίων και στηρίζονται σε έναν εξοπλισμό που περιλαμβάνει έναν συνδυασμό αισθητήρων και τεχνικών διαχωρισμού. Ουσιαστικά εξετάζουν κάθε υλικό ή κάθε σωματίδιο σύμφωνα με ιδιαίτερα κριτήρια.

7.3.3.1 Χειρωνακτική διαλογή

Είναι μια καθαρή μέθοδος διαλογής με τα χέρια. Το υλικό που πρόκειται να διαχωριστεί μεταβιβάζεται σε έναν κυλιόμενο μεταφορέα μπροστά από τους εργαζομένους, οι οποίοι αφαιρούν το υλικό και το ρίχνουν σε δοχεία ή σε κουτιά απορριμμάτων που βρίσκονται δίπλα τους (Σχ. 7.3-5). Η διαλογή με τα χέρια εφαρμόζεται στα οικιακά και βιομηχανικά απορρίμματα και στις εγκαταστάσεις διαχωρισμού καλωδίων με σκοπό τον προκαταρκτικό εμπλουτισμό των πλαστικών απορριμμάτων. Η επιλεκτικότητα της μεθόδου διαλογής είναι πολύ υψηλή. Παρα-



Σχήμα 7.3-5:
Κυλιόμενος μεταφορέας
όπου φαίνονται και τα δοχεία
συλλογής στο πλάϊ

Τριτογενής Ανακύκλωση Πλαστικών (Θερμική Ανακύκλωση – Χημική Ανακύκλωση)

8.1 Εισαγωγή

Όσο πιο διαφορετικού είδους και μολυσμένα είναι τα πλαστικά απορρίμματα τόσο πιο δύσκολο 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. 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 αυτή την περίπτωση, όμως, η επιμόλυνση των ανάμικτων πλαστικών θα είναι ακόμα μεγαλύτερη με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος διαχωρισμού. Έτσι η λύση της *τριτογενούς ανακύκλωσης*,, η οποία τυχαίνει υψηλότερου κόστους, φαίνεται να καθίσταται βιώσιμη και εναλλακτική της *μηχανικής ανακύκλωσης*.

Επιπλέον ιδιαίτερες κατηγορίες πλαστικών απορριμμάτων, όπως σύνθετα υλικά υπό μορφή φιλμ, καλωδίων κ.λπ. είναι πολύ δύσκολο να διαχωριστούν σε καθαρό πολυμερές. Ιδιαίτερα μεγάλη δυσκολία μηχανικής ανακύκλωσης παρουσιάζουν τα ανάμικτα οικιακά πλαστικά απορρίμματα, τα σκάρτα πλαστικά της αυτοκινητοβιομηχανίας και τα σκάρτα πλαστικά/σύνθετα υλικά των ηλεκτρονι-

κών και ηλεκτρολογικών εξοπλισμών. Των δύο τελευταίων κατηγοριών τα πλαστικά μετά τη χρήση τους συμπεριλαμβάνονται αντίστοιχα στα πλαστικά απορρίμματα των Οχημάτων Τέλους Κύκλου Ζωής (ΟΤΚΖ) και στα Απορρίμματα Ηλεκτρολογικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ). Αποτελεσματική μέθοδος ανακύκλωσης αυτού του τύπου πλαστικών απορριμμάτων είναι η Τριτογενής Ανακύκλωση.

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, δηλ. του κατά πόσον περιλαμβάνουν πλαστικά ιδιαίτερης σύνθεσης, κύρια αυτά που περιέχουν ετεροάτομα, όπως χλώριο, οξυγόνο, άζωτο και προέρχονται από PVC, PET, POM, PA και PUR, άλλες χλωριωμένες ενώσεις, μεταλλικούς σταθεροποιητές κ.λπ. 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.

8.1.1 Περιορισμοί ως προς την περιεκτικότητα σε χλώριο τροφοδοσίας τριτογενούς ανακύκλωσης

Είναι επιτακτική η ανάγκη, όπως ήδη έχει αναφερθεί, όλα τα πλαστικά απορρίμματα, ιδιαίτερα από τα νοικοκυριά, να καθαρίζονται και να αποστειρώνονται όσον το δυνατόν γρηγορότερα ώστε να αποθηκεύονται με ασφάλεια. Επίσης, πρέπει να συμπιέζονται ώστε να μπορούν να μεταφέρονται. Είναι, ακόμη, επιθυμητή η ομογενοποίηση και η υγροποίηση τους σε κάποιο βαθμό επειδή συνήθως ένα μεγάλο εύρος προϊόντων της τριτογενούς επεξεργασίας των πλαστικών απορριμμάτων που προκύπτουν, π.χ. από την πυρόλυση, αναμιγνύονται με τα υπολείμματα πετρελαίου που παράγονται υπό κενό στα διυλιστήρια, έτσι ώστε να τύχουν από κοινού παραπέρα αναμόρφωσης. Για το λόγο αυτό πρέπει να έχουν παρόμοια σύσταση. Ιδανική λύση, για το παράδειγμα που αναφέρθηκε, θα αποτελούσε η περίπτωση κατά την οποία τα προϊόντα της τριτογενούς επεξεργασίας είναι σε υγρή φάση σε θερμοκρασία δωματίου και απαλλαγμένα από ουσίες που

παρεμποδίζουν την παραπέρα επεξεργασία τους. Στην κατηγορία αυτών των ουσιών ανήκουν πρώτον, προσμίξεις όπως μέταλλα, χρώμα κ.λπ. και δεύτερον ενώσεις που περιέχουν ετεροάτομα και κυρίως αλογόνα. Τα ετεροάτομα εμφανίζονται είτε ως ενδιάμεσες οργανικές ενώσεις είτε ως σταθερές ανόργανες ενώσεις, π.χ. νερό, υδροχλώριο, υδροβρώμιο, υδροφθόριο, υδροκυάνιο και αμμωνία. Οι περισσότερες από αυτές είναι επικίνδυνες και διαβρωτικές και απαιτείται προσεκτική επιλογή για την παραγωγή υλικών όπως και μέθοδοι εξουδετέρωσής τους ή παρεμπόδισης των επιπτώσεών τους. Από τα αλογόνα το χλώριο είναι πάντα παρόν στα πλαστικά απορρίμματα και προέρχεται κατά κύριο λόγο από το PVC, όπως και από αλογονωμένες ενώσεις που χρησιμοποιούνται στα πλαστικά ως επιβραδυντές καύσης κ.λπ. Ειδικά για το χλώριο, το γερμανικό σύστημα συλλογής απορριμμάτων, DSD, έχει θέσει ως όριο περιεκτικότητας των πλαστικών απορριμμάτων το 6%, όταν πρόκειται για την τριτογενή επεξεργασία τους, π.χ. αεριοποίηση, υδρογόνωση κ.λπ. Ωστόσο, οι μόνες εγκαταστάσεις που πληρούν αυτές τις προδιαγραφές είναι το εργοστάσιο υδρογόνωσης Kohle-Öl-Anlage στο Bottrop και το εργοστάσιο αεριοποίησης LAUBAG επειδή σχεδιάστηκαν για αυτό το σκοπό. Τα υπόλοιπα εργοστάσια ορυκτού πετρελαίου ανέχονται μικρότερη συγκέντρωση χλωρίου.

Πίνακας 8.1-1: Προδιαγραφές περιεκτικότητας χλωρίου σε πλαστικά απορρίμματα για την παραγωγή προϊόντων πετρελαίου

Διεργασία	Χλώριο (%)	H ₂ O (%)	Αδρανή (%)	Άλλα
Ιξωδólυση	<2	<1	4.5	>93.5% πλαστικά
Αναγωγή σε υψικάμινο	<0.3	<10	<10	
Υδρογόνωση – σε υγρή φάση – σε αέρια φάση	<6 <0.005	<1	<4.5	
Διάσπαση με ατμό	<0.0005			
Καταλυτική διάσπαση	<0.005			
Μονάδα αναμόρφωσης κωκ	<0.002			
Πυρόλυση	<6	<3	<13	
Αέριο σύνθεσης – υγρά καύσιμα – στερεά καύσιμα – για καταλυτικές διεργασίες	<0.002 2.0-6.0 <0.0001	<0.5		Ιξώδες: 20-50 mPa · s (230°C)

Ο Πίνακας 8.1-1 δίνει τις τυπικές συγκεντρώσεις χλωρίου σε πλαστικά απορρίμματα για την παραγωγή προϊόντων πετρελαίου. Τα πλαστικά απορρίμματα ως ύλη τροφοδοσίας των διεργασιών διάσπασης και αναμόρφωσης κλασμάτων πετρελαίου πρέπει να πληρούν αυστηρές προδιαγραφές όσον αφορά την απομάκρυνση των αλογόνων. Αυτές οι προδιαγραφές καθορίζονται με βάση τεχνολογικά ή οικονομικά κριτήρια. Όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία των ποικίλης προέλευσης πλαστικών, τόσο πρέπει να πληρούνται οι προδιαγραφές.

8.1.2 Μέθοδοι τριτογενούς ανακύκλωσης

Η τριτογενής ανακύκλωση περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα διεργασιών, που διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες: την **θερμική ανακύκλωση** ή **θερμόλυση** ή **θερμική επεξεργασία** και την **χημική** ή **θερμο-χημική ανακύκλωση**.

Κατά την **θερμική ανακύκλωση** διασπώνται με **θερμικές μεθόδους** οι μακρομοριακές αλυσίδες των πολυμερών σε μικρότερα μόρια και λαμβάνονται από **μονομερή** μέχρι **κλάσματα πετρελαίου** όπως και **αέριο σύνθεσης**. Για παράδειγμα, η πυρόλυση πολυολεφινών οδηγεί προς παραγωγή υγρού κλάσματος σύστασης αντίστοιχης των κοινών καυσίμων. Στην **χημική ανακύκλωση** τα μόρια των πολυμερών διασπώνται με **χημικές μεθόδους** και ανακτώνται τα αντίστοιχα **μονομερή**, π.χ. η υδρόλυση του PET οδηγεί στην παραγωγή των μονομερών τереφθαλικού οξέος και αιθυλενογλυκόλης.

8.1.2.1 Θερμική ανακύκλωση πλαστικών

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 διύλισης όπως είναι η **νάφθα** (απόσταγμα πετρελαίου σ.ζ. 100-200°C), το **αργό πετρέλαιο** (ακατέργαστο) ή το **αέριο σύνθεσης**. 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 ποιότητας τους και χωρίς κανένα περιορισμό κατά την εφαρμογή τους.

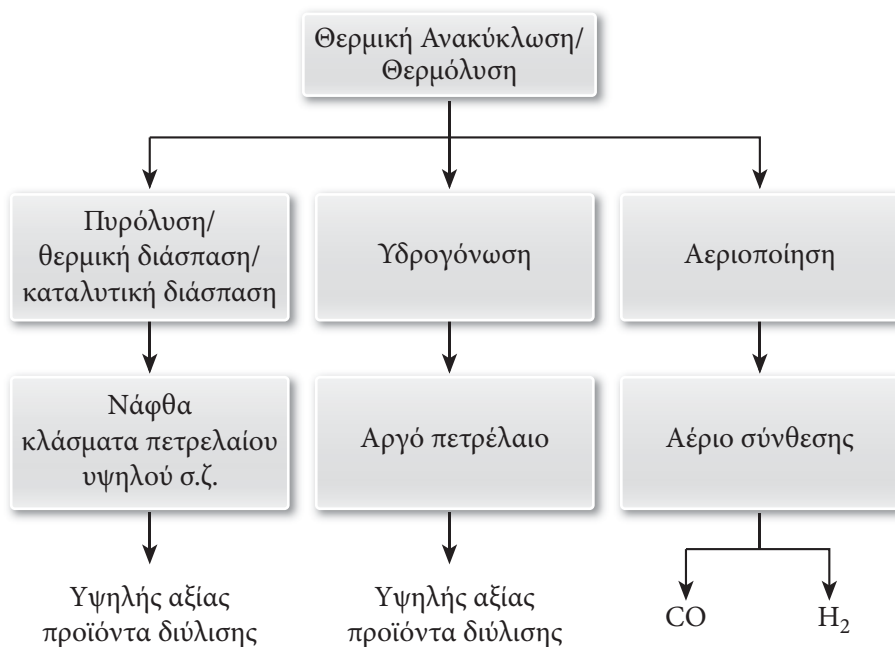
Τα μετακαταναλωτικά πλαστικά απορρίμματα αποτελούνται από την αλυσίδα του πολυμερούς, χημικούς επιμολυντές και έτερο-άτομα όπως το χλώριο, το οξυγόνο και το άζωτο. Επίσης διάφορες φυσικές ακαθαρσίες όπως πληρωτικά υλικά, χρωστικές ουσίες, σκόνη και ανόργανα υλικά, τα οποία προκύπτουν από ατελή διαχωρισμό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

μου 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.λ.π.) 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 φαίνονται στο Σχ. 8.1-1 και οι οποίες διακρίνονται στις παρακάτω:

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



Σχήμα 8.1-1: Οι κύριες τεχνικές της τριτογενούς ανακύκλωσης των πλαστικών με θερμική επεξεργασία

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 ($\text{CO} + \text{H}_2$) το οποίο είτε μετατρέπεται σε βενζίνη και ντίζελ με την διεργασία Fischer-Tropsch, είτε στην παραγωγή χημικών.

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. Σχετικά με το σχεδιασμό της μονάδας αεριοποίησης μπορεί να αφορά παράλληλη χρήση, όπως η μονάδα της Thermoselect στην πόλη Fondotoce της Ιταλίας, η οποία έχει σχεδιαστεί για δημοτικά απορρίμματα και χρησιμοποιείται και για πλαστικά απορρίμματα.

8.1.2.1.1 Σχετικά με την πυρόλυση και θερμική διάσπαση

Λόγω της διαφορετικής σύστασης των προϊόντων που λαμβάνονται κατά την πυρόλυση των πλαστικών σε σχέση με την θερμοκρασία πυρόλυσης, η πυρόλυση διακρίνεται στην:

- *πυρόλυση* που λαμβάνει χώρα σε υψηλότερες θερμοκρασίες ($T > 600^\circ\text{C}$), και στην
- *θερμική διάσπαση*, η οποία είναι κι αυτή διεργασία πυρόλυσης αλλά λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ($T < 500^\circ\text{C}$).

Εάν τα προϊόντα πυρόλυσης είναι *αέρια*, *πετρέλαιο* και *στερεό υπόλειμμα* με την πυρόλυση υψηλών θερμοκρασιών αυξάνονται τα αέρια και το πετρέλαιο και μειώνεται το στερεό υπόλειμμα. Στα παραγόμενα αέρια της πυρόλυσης υψηλών θερμοκρασιών περιέχονται ολεφίνες και αρωματικά έλαια.

Η επένδυση για μια εγκατάσταση πυρόλυσης υψηλών θερμοκρασιών, η οποία πρόκειται για μια καθαρή τεχνολογία, είναι πάρα πολύ υψηλή, όπως για παράδειγμα η μονάδα πυρόλυσης στη πόλη Ebenhausen (Γερμανία), όπου εφαρμόστηκε το πιλοτικό πρόγραμμα του Πανεπιστημίου του Αμβούργου. Αν και η ποιότητα των προϊόντων πετρελαίου της πυρόλυσης υψηλών θερμοκρασιών είναι υψηλότερη σε σχέση με τη πυρόλυση χαμηλών θερμοκρασιών (θερμική διάσπαση), η τελευταία είναι ενεργειακά και συνεπώς οικονομικά προτιμότερη. Η θερμική διάσπαση προκαλεί αποδόμηση των πολυμερών και ουσιαστικά υγροποίηση του μίγματος των πλαστικών, οπότε μειώνεται το κλάσμα των αερί-

ων προϊόντων και αυξάνεται το κλάσμα του υγρού προϊόντος, το οποίο στην θερμοκρασία των 100°C περίπου στερεοποιείται σε κηρώδη προϊόντα.

8.1.2.1.2 Συνεργατική δράση διεργασιών θερμικής ανακύκλωσης

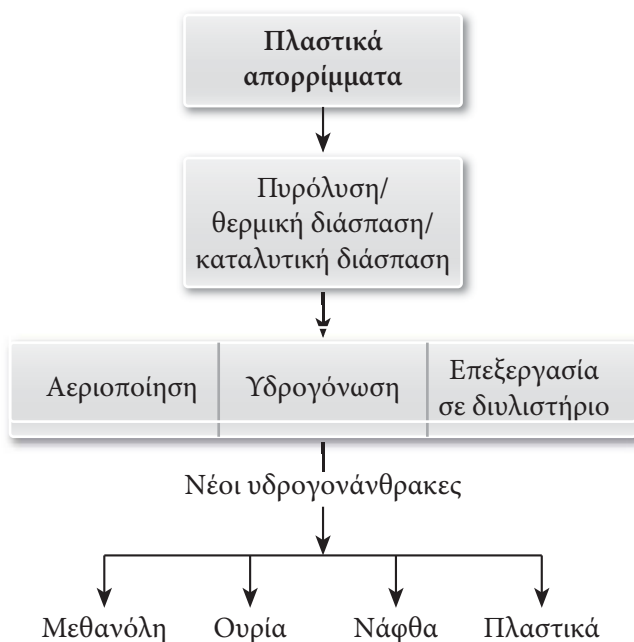
Τα προϊόντα της πυρόλυσης, ως ανάλογα των προϊόντων του πετρελαίου, για τον διαχωρισμό των συστατικών τους και την αναβάθμισή τους διοχετεύονται σε μονάδες διυλιστηρίου. Δηλ. τα προϊόντα πυρόλυσης πλαστικών απορριμμάτων αναμιγνύονται με τα αντίστοιχα κλάσματα πετρελαίου στις εγκαταστάσεις διυλιστηρίου και υφίστανται κοινή επεξεργασία (π.χ. κατεργασία με υδρογόνο - καταλυτική πυρόλυση) με σκοπό την αναμόρφωσή τους σε υψηλής αξίας προϊόντα διύλισης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η μείωση του κόστους της παραπέρα επεξεργασίας. Σε περιπτώσεις όπου η πυρόλυση υψηλών θερμοκρασιών αφορά την πυρόλυση εξειδικευμένων πλαστικών απορριμμάτων, όπως τα ελαστικά αυτοκινήτων, σε αντίθεση με τα αναμενόμενα προϊόντα της πυρόλυσης, το στερεό υπόλειμμα (κωκ) είναι το κυριότερο προϊόν και μπορεί να τύχει παραπέρα επεξεργασίας σε μονάδες αεριοποίησης (μερική οξείδωση του στερεού υπολείμματος και παραγωγή αερίου σύνθεσης, π.χ. η μονάδα της Veba Oel στην περιοχή Ruhr της Γερμανίας). Επίσης τα προϊόντα της θερμικής διάσπασης μπορούν να τύχουν παραπέρα επεξεργασία σε μονάδες υδρογόνωσης (μείωση μ.β. του αποπολυμερισμένου προϊόντος παρουσία υδρογόνου). Για παράδειγμα η θερμική διάσπαση της Veba στο Battrop (Γερμανία) που συνδυάζεται με υδρογόνωση. Δηλ. η πυρόλυση ή θερμική διάσπαση (ανάλογα και με την σύσταση των προϊόντων της και τον σκοπό που επιδιώκεται) μπορεί να συνδυαστεί με μονάδες διύλισης πετρελαίου ή υδρογόνωσης ή και αεριοποίησης.

Εφόσον τα προϊόντα πυρόλυσης ή θερμικής διάσπασης τύχουν μιας των παραπέρα επεξεργασιών λαμβάνονται πετροχημικά δηλ. καύσιμα (νάφθα), χημικές ενώσεις και μονομερή από τα οποία παρασκευάζονται εκ νέου πλαστικά (Σχ. 8.1-2).

Στη συνέχεια, επειδή όπως αναπτύχθηκε παραπάνω, τα προϊόντα της πυρόλυσης ή θερμικής διάσπασης των πλαστικών απορριμμάτων είναι προϊόντα πετρελαίου, τα οποία υφίστανται παραπέρα επεξεργασία σε μονάδες διυλιστηρίων ή και αναμειγνύονται με ενδιάμεσα προϊόντα της επεξεργασίας ορυκτού πετρελαίου, καλόν είναι να γίνει μια συνοπτική αναφορά στο κύκλο επεξεργασίας του ορυκτού πετρελαίου και των προϊόντων του, όπως και των αντίστοιχων διεργασιών.

8.1.2.1.3 Διυλιστήριο ορυκτού πετρελαίου

Το διυλιστήριο πετρελαίου (oil refinery) είναι μια βιομηχανική μονάδα όπου επεξεργάζεται το ορυκτό πετρέλαιο (crude oil) και το διαχωρίζει με απόσταξη

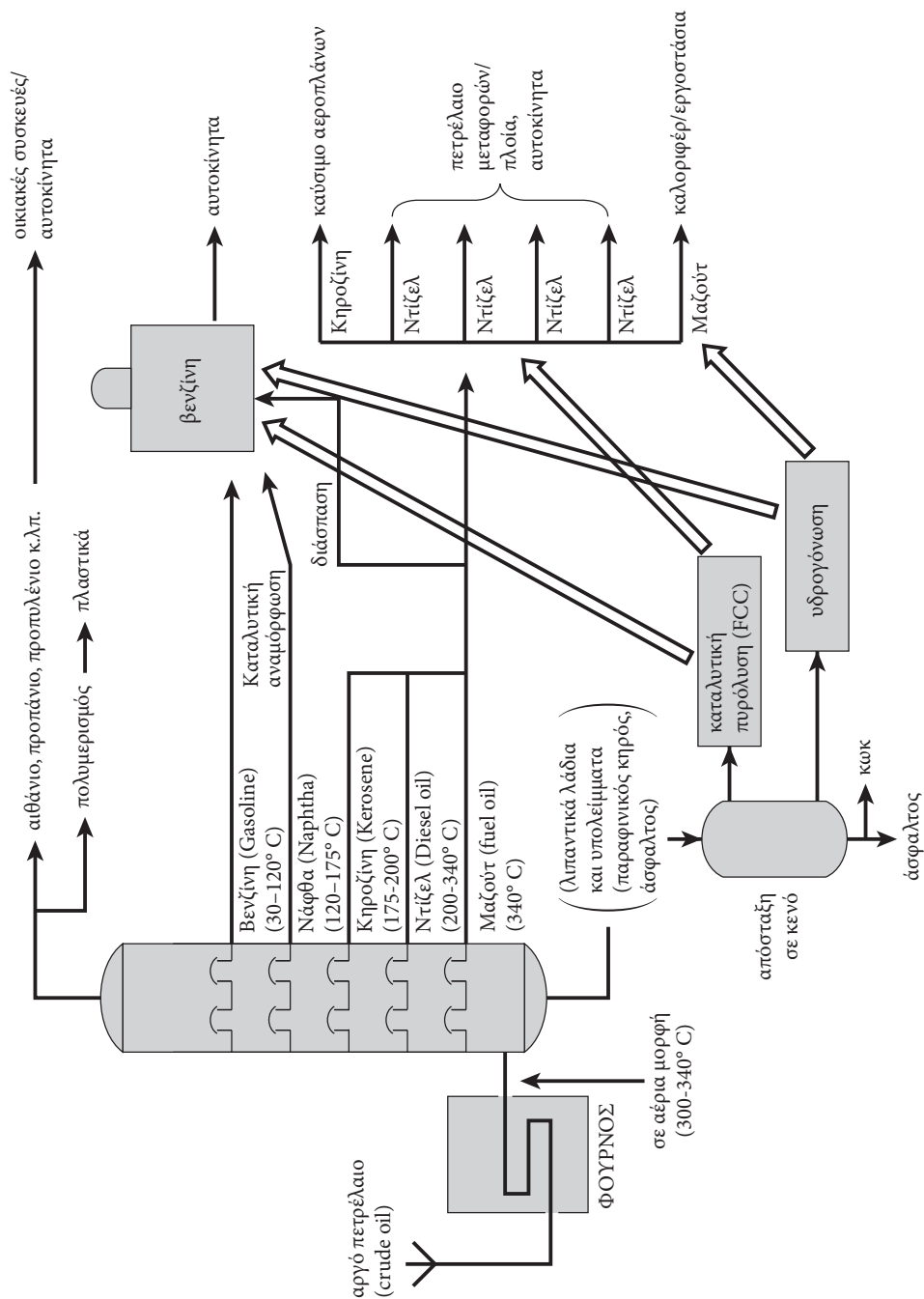


Σχήμα 8.1-2: Επεξεργασία των προϊόντων πυρόλυσης ή θερμικής διάσπασης με διύλιση, ή αεριοποίηση ή υδρογόνωση. Από τις διεργασίες αυτές λαμβάνονται καύσιμα (νάφθα), χημικές πρώτες ύλες και μονομερή από τα οποία παρασκευάζονται εκ νέου πλαστικά

(λόγω του διαφορετικού σ.ζ.) σε χρήσιμα προϊόντα, όπως βενζίνη, ντίζελ, μαζούτ, κηροζίνη, άσφαλτο και υδροποιημένα αέρια πετρελαίου. Στο Σχ. 8.1-3 φαίνεται σχηματικά το διάγραμμα ροής ενός διωλιστήριου πετρελαίου, τα προϊόντα επεξεργασίας και οι τομείς εφαρμογής τους.

Το ορυκτό πετρέλαιο χωρίς επεξεργασία δεν είναι γενικά χρήσιμο. Για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο πρέπει να απομακρυνθεί η ποσότητα θείου που περιέχει, ενώ τα ελαφρότερα συστατικά του σχηματίζουν στα δοχεία αποθήκευσης καυσίμων ατμούς που εκρήγνυνται και το καθιστούν επικίνδυνο. Το πετρέλαιο περιέχει υδρογονάνθρακες ποικίλου μ.β., όπως παραφίνες, αρωματικά, ναφθαλένια (ή κυκλοαλκάνια), αλκένια, διένια και αλκύνια. Πέρα από τις ενώσεις που φέρουν άτομα θείου και αζώτου και οι οποίες θα πρέπει να απομακρυνθούν, οι ενώσεις από τις οποίες αποτελείται συνίστανται κυρίως από άνθρακα και υδρογόνο και ένα μικρό αριθμό ατόμων οξυγόνου και παρουσιάζουν διαφορετικές χημικές και φυσικές ιδιότητες.

Με την απόσταξη του αργού πετρελαίου και την επεξεργασία των προκυπτόντων υδρογονανθράκων λαμβάνονται τα προϊόντα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα, λιπαντικά και στην παραγωγή *πετροχημικών προϊόντων*,



Σχήμα 8.1-3: Σχηματικό και συνοπτικό διάγραμμα ροής ενός διυλιστηρίου πετρελαίου, τα προϊόντα επεξεργασίας και οι τομείς εφαρμογής τους

Πίνακας 8.1-2: Ταξινόμηση σύμφωνα με τα βρετανικά στάνταρ για το υποθαλάσσιο μαζούτ (ISO 8217, 2005).

Όνομα	Χαρακτηρισμός	Χαρακτηρισμός	Τύπος	Μήκος αλυσίδας
No 1 μαζούτ	No 1 απόσταγμα	No 1 ντίζελ	Απόσταγμα	9-15
No 2 μαζούτ	No 2 απόσταγμα	No 2 ντίζελ	Απόσταγμα	10-20
No 3 μαζούτ	No 3 απόσταγμα	No 3 ντίζελ	Απόσταγμα	
No 4 μαζούτ	No 4 απόσταγμα	No 4 υπόλειμμα μαζούτ	Απόσταγμα/Υπόλειμμα	12-70
No 5 μαζούτ	No 5 υπόλειμμα	Βαρύ μαζούτ	Υπόλειμμα	12-70
No 6 μαζούτ	No 6 υπόλειμμα	Βαρύ μαζούτ	Υπόλειμμα	20-70

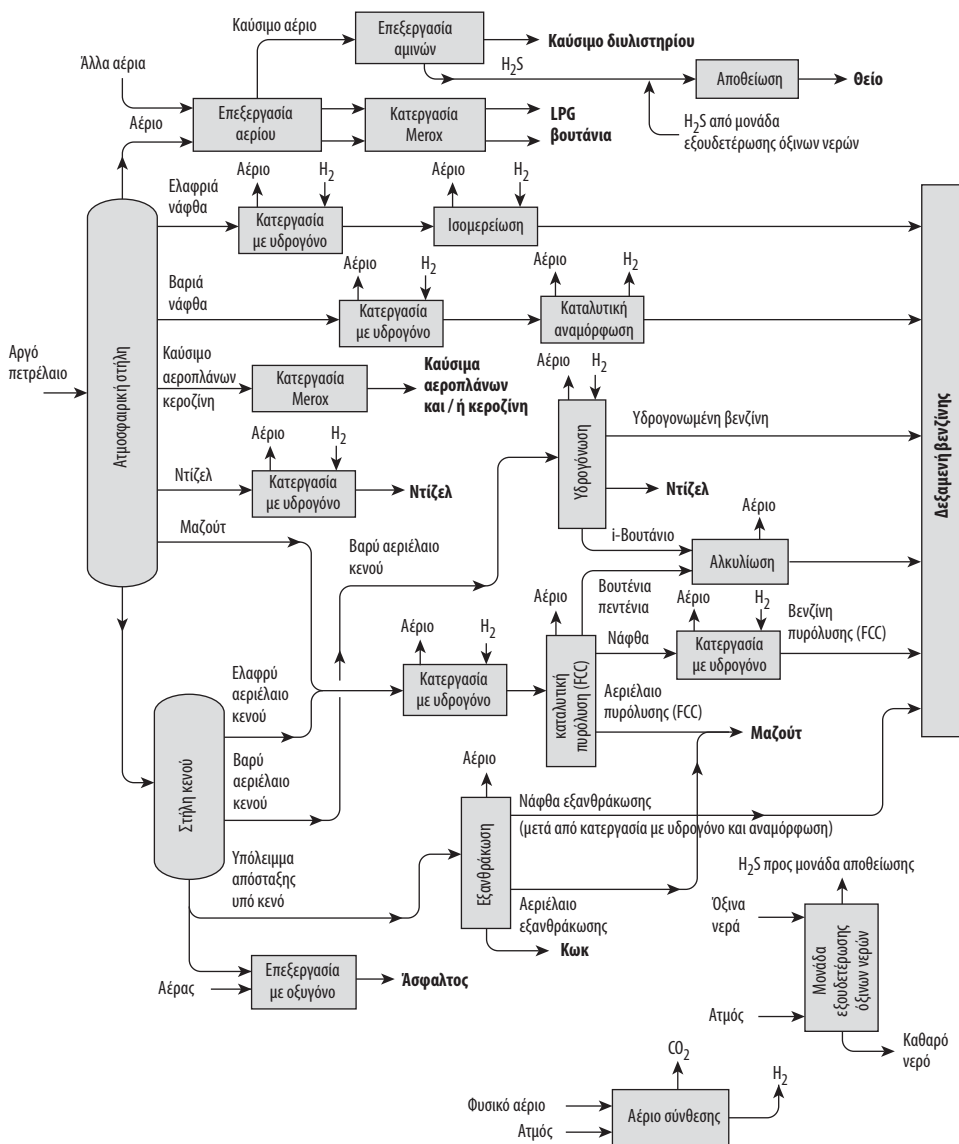
Πηγή: Wikipedia

όπως πλαστικά, απορρυπαντικά, διαλύτες, ελαστομερή και ίνες όπως νάιλον και πολυεστέρες (Σχ. 8.1-3). Τα διάφορα είδη ντίζελ που φαίνονται στο Σχ. 8.1-3 διαφοροποιούνται στον αριθμό άνθρακα των περιεχομένων υδρογονανθράκων, όπως φαίνεται στον Πίν. 8.1-2, σύμφωνα με τα βρετανικά στάνταρ για το υποθαλάσσιο μαζούτ (ISO 8217, 2005).

Τα προϊόντα του πετρελαίου που λαμβάνονται με απόσταξη υφίστανται παραπέρα επεξεργασία για την βελτίωση της καταλληλότητας τους σε εφαρμογές. Το κλάσμα του μαζούτ, που αποτελείται από μακράς αλυσίδες υδρογονάνθρακες, μπορεί να διασπαστεί σε μόρια μικρότερης αλυσίδας με διάφορους τρόπους όπως *καταλυτική πυρόλυση* (FCC) και κατεργασία με H_2 . Μικρότερα μόρια π.χ. όπως το ισοβουτάνιο και το προπυλένιο ή το βουτυλένιο μπορούν με διμερισμό ή αλκυλίωση να βελτιώσουν τα οκτάνια της βενζίνης. Η αναβάθμιση επίσης των οκτανίων της βενζίνης μπορεί να γίνει με καταλυτική αναμόρφωση, η οποία περιλαμβάνει την απομάκρυνση του υδρογόνου από τους υδρογονάνθρακες σχηματίζοντας υψηλότερης απόδοσης οκτανίων, όπως τα αρωματικά. Στο Σχ. 8.1-4 παρουσιάζεται ένα πιο λεπτομερές σχηματικό διάγραμμα σχετικά με την απόσταξη των κλασμάτων πετρελαίου και των επεξεργασιών που υφίστανται για την λήψη των τελικών προϊόντων που παρουσιάζονται στο Σχ. 8.1-3.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 8.1-4 τα προϊόντα που λαμβάνονται από την ατμοσφαιρική αποστακτική στήλη και τη στήλη κενού υφίστανται μια σειρά διεργασιών για την παραγωγή των τελικών προϊόντων. Μεταξύ αυτών είναι:

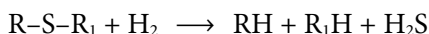
- Η *καταλυτική πυρόλυση* (FCC, Fluid Catalytic Cracking) η οποία εφαρμόζεται, π.χ. κατά την μετατροπή μαζούτ σε ελαφρές ολεφίνες και βενζίνη υψηλού αριθμού οκτανίων.



Σχήμα 8.1-4: Σχηματικό διάγραμμα της ροής ενός διυλιστηρίου πετρελαίου όπου περιλαμβάνονται λεπτομερέστερα τα ενδιάμεσα στάδια επεξεργασιών από τα αρχικά κλάσματα απόσταξης και υπολείμματος προς τα τελικά προϊόντα

- Η υδρογόνωση (Hydrogenation), η οποία διακρίνεται στην διάσπαση με υδρογόνο (hydrocracking) και την κατεργασία με υδρογόνο (Hydrotreating).

Η διάσπαση με υδρογόνο εφαρμόζεται κατά την διάσπαση των υδρογονανθράκων (σχάση δεσμού C–C) παρουσία υδρογόνου και λαμβάνονται μικρότερου μ.β. υδρογονάνθρακες. Η κατεργασία με υδρογόνο εφαρμόζεται για την παραγωγή καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε ετεροάτομα (θείο, άζωτο, κ.λπ.). Το υδρογόνο δηλ. χρησιμοποιείται για την μετατροπή των περιεχομένων ενώσεων στο πετρέλαιο που φέρουν ετεροάτομα σε ανάλογες ενώσεις των ετεροατόμων με το υδρογόνο, όπως και την αντίστοιχη παραγωγή υδρογονανθράκων κατά την αντίδραση:



8.1.2.1.4 Τα χαρακτηριστικά και οι χημικές ιδιότητες του παραγόμενου υπολείμματος απόσταξης πετρελαίου υπό κενό

Το πετρέλαιο, όπως αναφέρθηκε, είναι ένα σύνθετο μίγμα διάφορων αλειφατικών και αρωματικών ενώσεων, συμπεριλαμβανομένου του θείου, του αζώτου και των οργανομεταλλικών ενώσεων. Το παραγόμενο υπολείμμα απόσταξης πετρελαίου υπό κενό, που παραμένει στον πυθμένα της στήλης κενού (Σχ. 8.1-4) αποτελείται συνήθως από τα αμετάβλητα (θερμοανθεκτικά) και υψηλού μοριακού βάρους συστατικά του πετρελαίου, που παραμένουν μετά την απόσταξη των διάφορων κλασμάτων του με σ.ζ. μέχρι 500°C. Αυτές οι ενώσεις διαφέρουν μεταξύ τους στην πολικότητα και το μοριακό μέγεθος. Οι πιο πολικές ενώσεις αλληλεπιδρούν η μία με την άλλη για να διαμορφώσουν διάφορες μοριακές δομές και νέες ενώσεις.

Οι πολικές ενώσεις του υπολείμματος απόσταξης υπό κενό είναι αδιάλυτες στα κανονικά αλκάνια και είναι γνωστές ως ασφαλτένια (asphaltenes). Τα ασφαλτένια περιέχουν πολύ υψηλή συγκέντρωση των καταστρεπτικών ετεροστοιχείων (S, N, O και μέταλλα). Δομικά, τα ασφαλτένια είναι συμπυκνωμένα πολυπυρηνικά αρωματικά συστήματα. Ο αριθμός των αρωματικών πυρήνων μπορεί να ποικίλει από 6 έως 15. Λόγω της συμπυκνωμένης δομής τους, τα ασφαλτένια είναι εξαιρετικά θερμοανθεκτικά κατά τη διάρκεια των διαδικασιών επεξεργασίας. Βέβαια με την διαρκή επίδραση υψηλής θερμοκρασίας αποσυντίθενται βαθμιαία σε κωκ, στα τοιχώματα των αντιδραστήρων. Επίσης προσροφώνται στην επιφάνεια των καταλυτών και τους απενεργοποιούν. Την απενεργοποίηση των καταλυτών προκαλούν ακόμα τα μέταλλα που περιέχονται στα ασφαλτένια, φράζοντας τους πόρους του καταλύτη εντός μικρού χρονικού διαστήματος. Αυτά τα χαρακτηριστικά του υπολείμματος απόσταξης υπό κενό αποτρέπουν τον εξευγενισμό του στις μονάδες καταλυτικής πυρόλυσης (Fluid Catalytic Cracking, FCC) ή υδρογόνωσης (HydroCracking, HC) (Σχ. 8.1-4).

Στην περίπτωση της υδρογόνωσης η διάσπαση των αρωματικών ενώσεων των υπολειμμάτων, υπό τις καλύτερες συνθήκες δεν ξεπερνά το 75%. Αυτό οφείλεται, όπως αναφέρθηκε, στη σύντομη διάρκεια ζωής των καταλυτών, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται καταλύτες βασισμένοι σε ζεόλιθους.

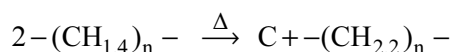
Στον Πιν. 8.1-3 φαίνονται οι σημαντικότερες ιδιότητες του υπολείμματος απόσταξης υπό κενό που προέρχεται από τα σαουδαραβικά πετρέλαια. Οι τρεις σημαντικότερες ιδιότητες, που χρήζουν βελτίωσης, είναι το θείο, τα μέταλλα και τα ασφαλτένια. Το θείο αποτελεί πρόβλημα κυρίως λόγω των περιβαλλοντικών αντιρρήσεων στις εκπομπές διοξειδίου θείου. Επομένως, μια πρωταρχική απαίτηση είναι η αφαίρεση τουλάχιστον μιας σημαντικής ποσότητας.

Πίνακας 8.1-3: Ιδιότητες των Σαουδαραβικών υπολειμμάτων απόσταξης υπό κενό (~538°C)

Ιδιότητες	Arabian light	Arabian medium	Arabian heavy
Πυκνότητα (° API)	8.53	6.15	5.60
Θείο (% κ.β.)	4.16	5.31	5.50
Υπόλειμμα άνθρακα (% κ.β.)	15.2	19.8	22.4
Βανάδιο + Νικέλιο (ppm)	76	92	194
Ασφαλτένιο (% κ.β.)	11.5	16.0	19.5
Αζωτο (% κ.β.)	0.29	0.24	0.37

8.1.2.1.5 Τεχνολογίες για την αναβάθμιση υπολειμμάτων απόσταξης υπό κενό

Τα υπολείμματα απόσταξης υπό κενό, εξαιτίας των περιεχομένων ασφατενίων και μετάλλων που απενεργοποιούν τους καταλύτες, δεν μπορούν να υποστούν καταλυτική αναβάθμιση. Γι' αυτό χρησιμοποιούνται οι λεγόμενες διεργασίες απομάκρυνσης άνθρακα (C-out). Σε αυτές περιλαμβάνονται η εξανθράκωση (coking) και η ιξωδόλυση (visbreaking), κατά τις οποίες απομακρύνεται ο άνθρακας ως κωκ και αυξάνεται ο λόγος H/C:



Εάν στο προϊόν εξανθράκωσης (π.χ. νάφθα) χρησιμοποιούνται καταλύτες διάσπασης, οι μολυσματικοί παράγοντες θείου και μετάλλων πρέπει και πάλι να αφαιρεθούν γιατί δηλητηριάζουν τον καταλύτη, όπως κατά την διεργασία των ελαφρών κλασμάτων αεριοελαίου με καταλυτική πυρόλυση (FCC) (Σχ. 8.1-4). Η

ιξωδόλυση είναι διεργασία επίσης βασισμένη στην αφαίρεση άνθρακα. Εντούτοις, χρησιμοποιεί μια απολύτως διαφορετική τεχνολογία. Είναι μια διεργασία εκχύλισης και χρησιμοποιείται ως διαλύτης το προπάνιο το οποίο παράγεται κατά την ίδια την διεργασία της απομάκρυνσης άνθρακα. Κατά την ιξωδόλυση η οποία είναι βασικά μια διεργασία πυρόλυσης, συμβαίνει πυρόλυση των πλευρικών αλυσίδων, των αλυσίδων δηλ. που είναι συνδεδεμένες με τον ναφθενικό ή αρωματικό πυρήνα, και οι οποίες απομακρύνονται σχηματίζοντας μεθυλομάδες ή αιθυλομάδες με συνέπεια την τελική παραγωγή προπανίου. Τα ασφαλτένια είναι αδιάλυτα στο προπάνιο (διαλυτά μόνο σε τολουόλιο) και διαχωρίζονται. Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι κάτω των 480°C συμβαίνει μόνο μερική πυρόλυση των ναφθενικών δακτυλίων. Πάνω από την θερμοκρασία αυτή αρχίζει η διάσπαση τους που οδηγεί σε αέρια, νάφθα, πετρέλαιο και κωκ.

Η δυσκολία υδρογόνωσης των υπολειμμάτων απόσταξης υπό κενό μπορεί να αντιμετωπιστεί καλλίτερα με την ανάμιξη αυτών των προϊόντων με τα αντίστοιχα της πυρόλυσης πλαστικών απορριμμάτων, όπως θα αναπτυχθεί στο κεφ. 8.5 της υδρογόνωσης.

Τέλος το παραγόμενο κωκ μπορεί να υποστεί μερική οξείδωση και να ληφθεί αέριο σύνθεσης.

8.1.2.2 Χημική Ανακύκλωση

Στην χημική ή *θερμο-χημική* ανακύκλωση η σχάση των πολυμερικών δεσμών προκαλείται με χημικές μεθόδους. Τα μονομερή ή ολιγομερή που λαμβάνονται, εφόσον καθαρισθούν, επαναπολυμερίζονται προς νέα πολυμερή. Η ανακύκλωση των πλαστικών με χημικές διεργασίες εφαρμόζεται επιτυχώς σε πολυμερή συμπίκνωσης (πολυουρεθάνες, νάιλον και πολυεστέρες) και μελετάται η εφαρμογή της σε πολυμερή προσθήκης, όπως το PVC. Στην χημική ανακύκλωση εφαρμόζονται οι τρεις *σολβολουτικές αντιδράσεις*:

- Γλυκόλυση
- Μεθανόλυση
- Υδρόλυση

Η χημική ανακύκλωση, όπως θα αναπτυχθεί ιδιαίτερα στο κεφ. 8.4, παρουσιάζει σημαντικά οικονομικά οφέλη επειδή παράγεται προϊόν υψηλής αξίας, δηλ. το μονομερές του αντίστοιχου πολυμερούς. Ειδικά εάν συνδυαστεί με Έσυλλογή στην Πηγή' οπότε μειώνεται σημαντικά το κόστος συλλογής-διαλογής. Ένα πετυχημένο παράδειγμα αποτελεί η χημική ανακύκλωση (γλυκόλυση) μετακαταναλωτικών φιαλών PET στην πόλη Teijin της Ιαπωνίας το 2000. Το ανακυκλωμένο PET χρησιμοποιείται για την παραγωγή ινών πολυεστέρα.

Τεταρτογενής Ανακύκλωση Πλαστικών (Ανάκτηση Ενέργειας)

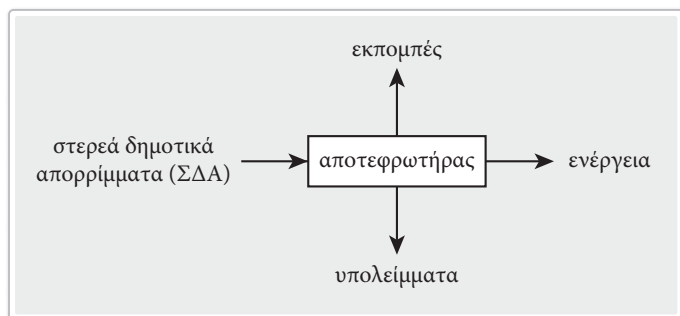
9.1 Αποτέφρωση στερεών δημοτικών απορριμμάτων (ΣΔΑ) με ανάκτηση ενέργειας

Ως *αποτέφρωση* ή *καύση** των απορριμμάτων θεωρείται η αναγωγή των καύσιμων απορριμμάτων σε αδρανές υπόλειμμα, με ελεγχόμενη καύση, σε υψηλή θερμοκρασία. Ταυτόχρονα η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για θέρμανση ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχ. 9.1 φαίνεται η σχηματική απεικόνιση των εκροών μάζας και ενέργειας από ένα αποτεφρωτήρα. .

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 θερμογόνος δύναμή τους είναι 2500 Kcal/Kg, το μισό περίπου της θερμογόνου δύναμης του άνθρακα (κάρβουνου).

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,

* Στο παρόν κεφάλαιο οι όροι *‘αποτέφρωση’* και *‘αποτεφρωτήρας’* είναι συνώνυμοι των όρων *‘καύση’* και *‘καυστήρας’*. Ως *‘αποτέφρωση’* και *‘αποτεφρωτήρας’* χαρακτηρίζονται η διεργασία και αντίστοιχα ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την καύση στερεών απορριμμάτων ή καυσίμων που παράγονται από στερεά απορρίμματα. Παλαιότερα, μέχρι τη δεκαετία του ’60, ο όρος *‘αποτεφρωτήρας’* δήλωνε τη μη-ελεγχόμενη καύση, ενώ σήμερα οι αποτεφρωτήρες επιτυγχάνουν υψηλούς βαθμούς ελέγχου της διεργασίας.



Σχήμα 9.1: Σχηματική απεικόνιση ροής αντιδρώντων-προϊόντων και ενέργειας σε έναν αποτεφρωτήρα

η καύση τους απελευθερώνει θερμογόνο δύναμη ίση με 325 δισεκατομμύρια Kcal/Kg, η οποία ισοδυναμεί με 200.000 βαρέλια αργού πετρελαίου την ημέρα. Δηλ. 1 τόνος απορριμμάτων αντιστοιχεί σε θερμογόνο δύναμη 1.5 βαρελιού πετρελαίου.

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, δηλ. 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.

Πλαστικά απορρίμματα

Τα πλαστικά απορρίμματα, λόγω της μεγάλης θερμογόνου δύναμης που δια-

θέτουν, 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 (μονο-καύσης)* πλαστικών απορριμμάτων.

Μετά την επισκόπηση της αποτέφρωσης των στερεών δημοτικών απορριμμάτων (κεφ. 9.1) θα αναπτυχθεί ιδιαίτερα η αποτέφρωση των πλαστικών απορριμμάτων (κεφ. 9.2).

9.1.1 Η αντίδραση της καύσης

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.

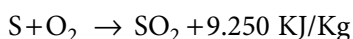
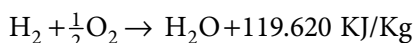
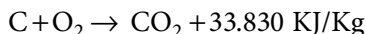
Η *ξηρανση* επιτυγχάνεται με ακτινοβολία περίπου στους 100°C και η απαιτούμενη θερμότητα εξαρτάται από την υγρασία και την σύσταση των απορριμμάτων.

Η *θερμική διάσπαση* των οργανικών επιτυγχάνεται στους 200-900°C και απομακρύνονται τα πτητικά υλικά.

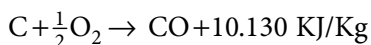
Κατά την *απαερίωση* συμβαίνει μετατροπή των ανθρακούχων υλικών σε καυσαέρια σε θερμοκρασίες 800-1150°C.

Η *κύρια καύση* περιλαμβάνει την οξείδωση του υλικού σε CO₂, H₂O, SO_x και NO_x.

Κατά την πλήρη καύση λαμβάνουν χώρα οι εξής αντιδράσεις:



Κατά την μη πλήρη καύση:



9.1.2 Τύποι αποτεφρωτήρων

Οι συνήθεις τύποι αποτεφρωτήρα είναι :

- ➔ μηχανικός με σχάρες,
- ➔ περιστροφικός κλίβανος, και
- ➔ ρευστοποιημένη κλίνη.

Ανάλογα, κυρίως, με το χρησιμοποιούμενο τύπο καύσιμου (δηλ. 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 βιο-ξήρανση.

- ➔ **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 δηλ. 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. Η ανάπτυξη των μεθόδων απορρύπανσης των καυσαερίων παρουσιάζεται στη §9.1.7.

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 σχη-

Πίνακας 9.1: Αέριοι ρυπαντές που εκλύονται από τις μονάδες αποτέφρωσης στερεών δημοτικών απορριμμάτων και η % μείωση τους με διάφορες μεθόδους απορρύπανσης

Ρυπαντές	Μέθοδοι ελέγχου	% μείωση του ρύπου
Οξείδια αζώτου (NO _x)	Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή Επιλεκτική μη καταλυτική αναγωγή Ανακυκλοφορία καυσαερίων Έλεγχος καύσης	10-60
Οξείδια θείου (SO _x) και HCl	Υγρός καθαρισμός* Ξηρός καθαρισμός** Υφασμάτινο φίλτρο Ηλεκτροστατικό φίλτρο	50-85 SO _x 75-90 HCl
Μονοξείδιο άνθρακα (CO) Βαρέα μέταλλα	Έλεγχος καύσης Ξηρός καθαρισμός Υφασμάτινο φίλτρο	50-90 70-95
Σωματίδια	Ηλεκτροστατικό φίλτρο	95-99.9
Τοξικές οργανικές ενώσεις (περιλαμβάνονται διοξίνες και φουράνια)	Ηλεκτροστατικό φίλτρο Υφασμάτινο φίλτρο Έλεγχος καύσης Συνδυασμός ξηρού καθαρισμού και υφασμάτινου φίλτρου	50-99.9

* Υγρός καθαρισμός ή υγρή έκπλυση ή πλυντρίδα υγρού τύπου (wet scrubber): ψεκασμός, συνήθως νερού στο ρεύμα των καυσαερίων για την έκπλυση οξίνων αερίων (κυρίως SO_x και HCl)

** Ξηρός καθαρισμός ή ξηρή έκπλυση ή πλυντρίδα ξηρού τύπου (dry scrubber): ψεκασμός ξηρού αντιδραστηρίου ή αιωρήματος στο ρεύμα των καυσαερίων (συνήθως κατακρατούνται HCl και NH₃)

ματισμού 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 εκμετάλλευ-

σης 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.

Παρ' όλα 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.

9.1.2.1 Συστήματα αποτέφρωσης μαζικής καύσης

9.1.2.1.1 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 Water Wall)

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 Σχ. 9-2 φαίνεται μια τυπική μονάδα μαζικής καύσης η οποία βασίζεται σε μηχανικό αποτεφρωτήρα με σχάρα. Η χωρητικότητα των μονάδων μαζικής καύσης κυμαίνεται μεταξύ 800 έως 2,500 τόνων/μέρα, ενώ το κόστος σε ευρώ ανέρχεται σε 90,000 έως 135,000/Mg/μέρα.

Τυπική μονάδα μαζικής καύσης (MB-WW) με μηχανικό αποτεφρωτήρα σχάρας

Μια μονάδα καύσης δημοτικών απορριμμάτων, η οποία βασίζεται σε μηχανικό αποτεφρωτήρα με σχάρα, φαίνεται στο Σχ. 9.2 και αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια:

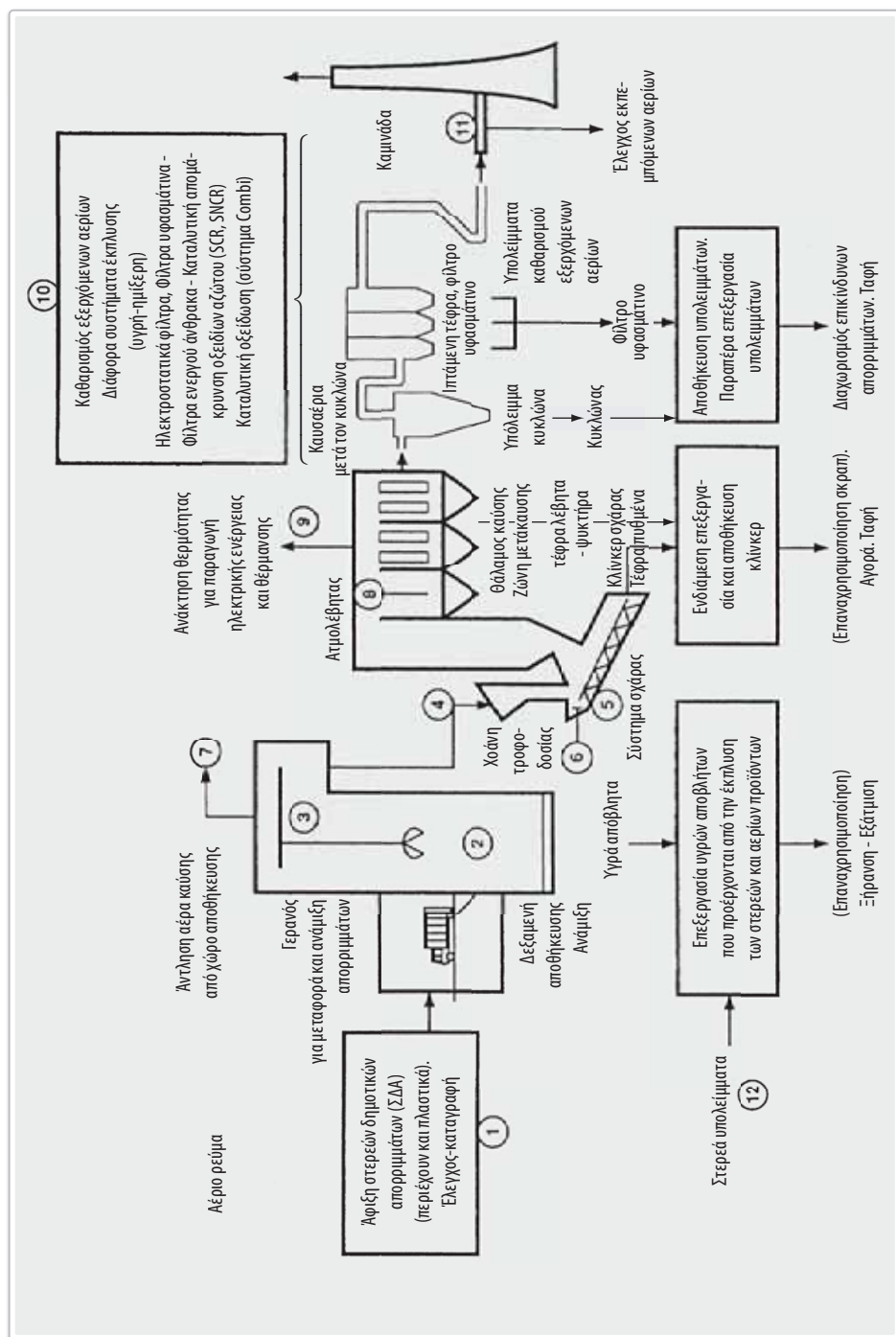
- υποδοχής των απορριμμάτων,
- τροφοδοσίας,
- θάλαμος καύσης,
- το σύστημα καθαρισμού αερίων της καύσης (π.χ. σύστημα ελέγχου αέριας ρύπανσης),
- απομάκρυνση τέφρας πυθμένα.

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 καλλίτερη δυνατή καύση των πτητικών ουσιών.



Σχήμα 9.2: Μονάδα μαζικής καύσης στερεών δημοτικών απορριμμάτων (ΣΔΑ) η οποία βασίζεται σε μηχανικό αποτέλεσμα

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.

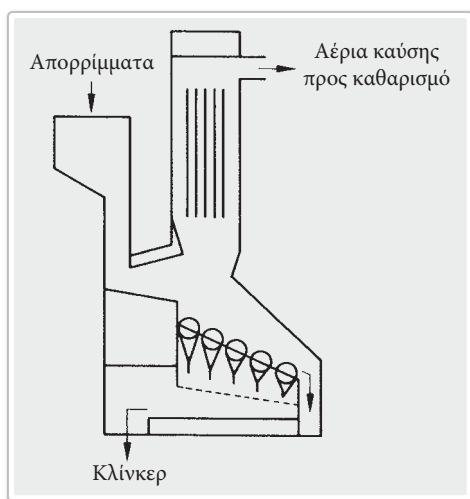
Τα καυσαέρια που παράγονται κατά την καύση, ψύχονται στον ατμολέβητα (8). Τα θερμά καυσαέρια μεταδίδουν την ενέργεια τους στις θερμαινόμενες επιφάνειες του ατμολέβητα ώστε να παραχθεί υπέρθερμος ατμός. Ο ατμός μεταφέρεται μέσω των σωληνώσεων (9) στις τουρμπίνες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο εξερχόμενος 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.

Τεχνολογία μηχανικού αποτεφρωτήρα με σχάρα

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. Το διάγραμμα ροής ενός συστήματος αποτέφρωσης με μηχανικό αποτεφρωτήρα παρουσιάζεται στο Σχ. 9.2, ενώ στο Σχ. 9.3 η σχηματική απεικόνιση του μηχανικού αποτεφρωτήρα.



Σχήμα 9.3:
Αποτεφρωτής με σχάρα

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.

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 όπως φαίνεται στο Πιν. 9.2.

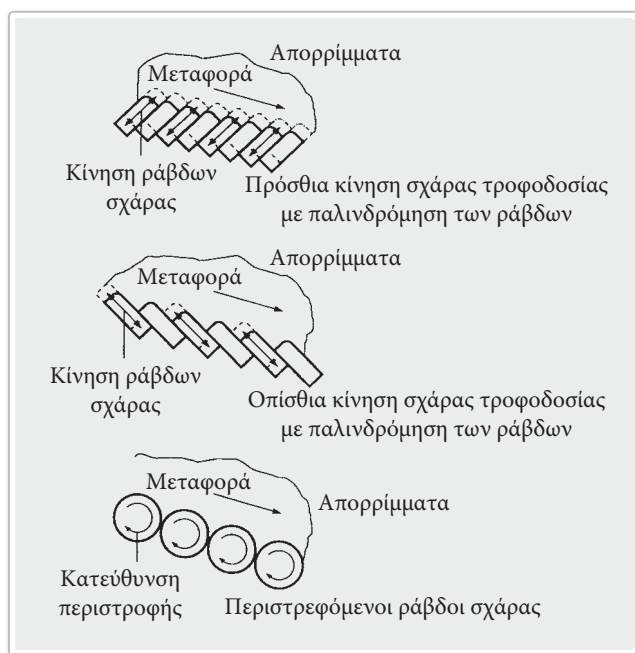
Ο μηχανικός αποτεφρωτήρας με σχάρα μετακινεί τα τεμαχισμένα απορρίμματα εντός του κλιβάνου καύσης, με παράλληλη τροφοδοσία αέρα, και επιτυγχάνει την πλήρη καύση των απορριμμάτων. Αυτό που απομένει από την καύση είναι αδρανή υπολείμματα. Με την τεχνική της καύσης σε σχάρα ελέγχεται εύκολα η διαδικασία και εξασφαλίζονται οι απαραίτητες θερμοδυναμικές συνθήκες ώστε να αντέχει ο αποτεφρωτήρας 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,

Πίνακας 9.2: Κατανομή των χρησιμοποιούμενων αποτεφρωτήρων (μηχανικοί με σχάρα και ρευστοποιημένης κλίνης) σε διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατά την περίοδο 1997-2006. Την ίδια επίσης περίοδο υπερσχύον κατά πολύ (μάλλον συντριπτικά) οι εγκαταστάσεις αποτέφρωσης απορριμμάτων ως προς αυτές της θερμικής επεξεργασίας (πυρόλυσης και αεριοποίησης) (Πηγή : Juniper Consultancy survey)

Θερμική επεξεργασία ή αποτέφρωση σε χώρες της Ευρώπης	Θερμική επεξεργασία	Αποτέφρωση	
	Πυρόλυση & αεριοποίηση	Ρευστοποιημένη κλίνη	Μηχανικός αποτεφρωτήρας με σχάρα
Βέλγιο	3%	10%	87%
Γαλλία	9%	34%	57%
Γερμανία	35%	10%	55%
Ισπανία	15%	35%	50%
Ιταλία	35%	30%	35%
Μεγάλη Βρετανία	14%	36%	50%
Ολλανδία	5%	10%	85%
Σκανδιναβία	4%	36%	60%

αποκλειστικά με πλαστικά, δημιουργεί πρόβλημα στην λειτουργία τους, λόγω της υψηλής θερμογόνου δύναμης των πλαστικών που είναι της τάξης των 34.0 MJ/kg.

Η τροφοδοσία των πλαστικών σε μηχανικούς αποτεφρωτήρες με σχάρα έχουν οδηγήσει πολλές φορές τις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης σε θερμικές υπερφορτώσεις. Παρ' όλα 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.



Σχήμα 9.4: Τύποι σχάρας

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 Σχ. 9.4. 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%. Αντί-

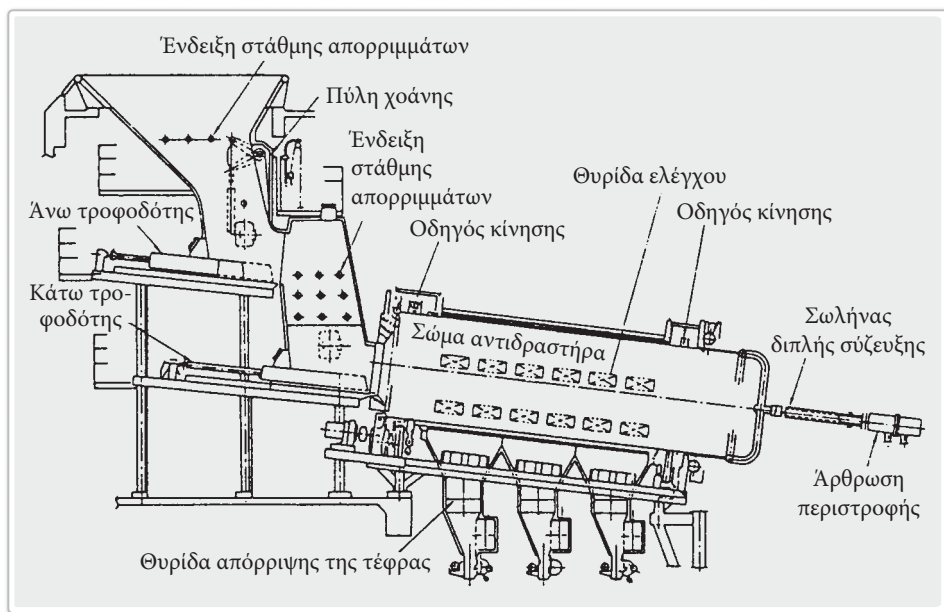
θετα υψηλότερες αποδόσεις (>60%) μπορούν να επιτευχθούν εάν ο ατμός χρησιμοποιείται για θέρμανση (στις εγκαταστάσεις της μονάδας ή στην γύρω περιοχή) και όχι για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

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

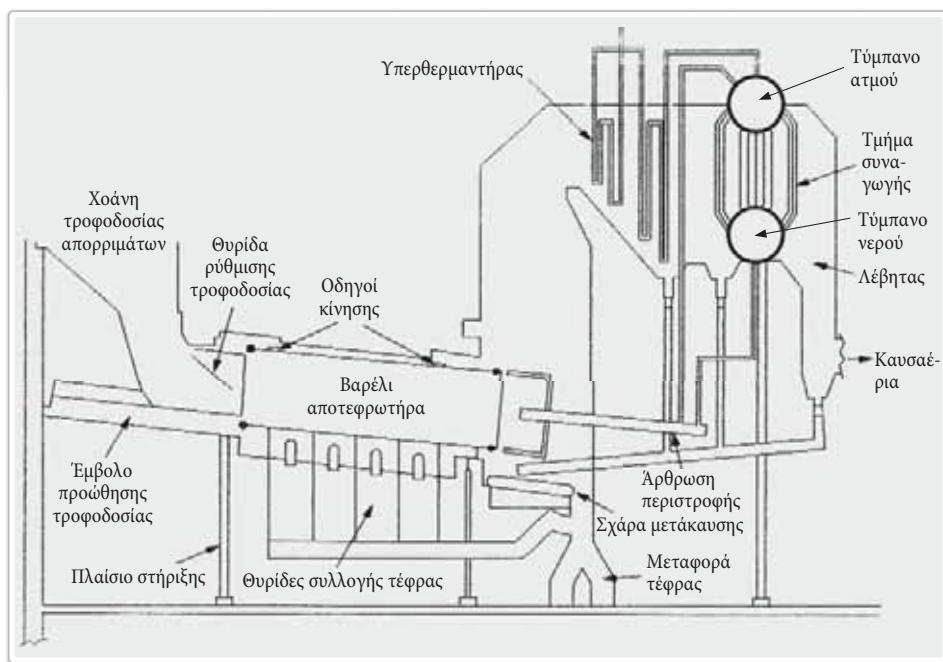
9.1.2.1.2 Συστήματα αποτέφρωσης μαζικής καύσης με περιστροφικό κλίβανο, MB-RK (Mass Burn Rotary Kiln)

Οι αποτεφρωτήρες περιστροφικού κλίβανου (Σχ. 9.5) 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 Σχ. 9.6 παρουσιάζεται διαγραμματικά μια μονάδα αποτέφρωσης με περιστροφικό κλίβανο, ο οποίος είναι εξοπλισμένος με λέβητα για ανάκτηση ενέργειας.

Το σχήμα του αποτεφρωτήρα περιστροφικού κλίβανου είναι κυλινδρικό και εσωτερικά αποτελείται από ανθεκτικά υλικά. Το σώμα του αποτεφρωτήρα έχει μια ελαφρά κλίση. Τα απορρίμματα τροφοδοτούνται στην κορυφή του κλίβανου μέσω εμβόλου. Με την περιστροφή του αποτεφρωτήρα (10 έως 20 περιστροφές



Σχήμα 9.5: Αποτεφρωτήρας περιστροφικού κλίβανου



Σχήμα 9.6: Μονάδα αποτέφρωσης με περιστροφικό κλίβανο, η οποία είναι εξοπλισμένη με λέβητα για ανάκτηση ενέργειας

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%.

Το πλεονέκτημα που εμφανίζουν οι αποτεφρωτήρες αυτού του τύπου, επειδή τα τοιχώματα τους αποτελούνται από σωλήνες διαρρέομενους 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.

Διάθεση των στερεών δημοτικών απορριμμάτων (ΣΔΑ) (Τα πλαστικά ως μέρος των ΣΔΑ)

10.1 Εισαγωγή

Στο Σχ. 10.1 παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο διάγραμμα διαχείρισης των στερεών δημοτικών απορριμμάτων (ΣΔΑ).

Στην χώρα μας η ελεύθερη διάθεση στην χωματερή (πορεία 5 στο Σχ. 10.1) είναι η πιο κοινή μέθοδος διάθεσης των στερεών δημοτικών απορριμμάτων. Με την διάθεση στην **χωματερή** των απορριμμάτων (σκουπιδιών) αφενός χάνονται πολύτιμα συστατικά τους, αφετέρου σημαντικά ποσά ενέργειας για την παραγωγή τους. Με την πρωτόγονη αυτή μέθοδο τα σκουπίδια διατίθενται σε ανοικτές περιοχές και αφήνονται να αποσυντεθούν. Το μόνο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος της. Αντίθετα παρουσιάζονται μια σειρά μειονεκτήματα. Πρώτον, οσμές, διασκορπισμός των ελαφρών σκουπιδιών από τον αέρα, τα τρωκτικά και τα πουλιά διαμέσου των οποίων μεταδίδονται διάφορες ασθένειες και επιδημίες. Δεύτερον, τα αποστραγγίσματα της χωματερής ρυπαίνουν τον υδροφόρο ορίζοντα ενώ η αυτανάφλεξη των σκουπιδιών συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και την ρύπανση του περιβάλλοντος. Τρίτον, την παραγωγή τοξικών ουσιών μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται οι διοξίνες, οι οποίες παράγονται όταν κατά την καύση των σκουπιδιών υπάρχουν χλωριωμένα πλαστικά και ιδιαίτερα το PVC.

Με την υπουργική όμως απόφαση 114218/1997 (*‘Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων’*), η οποία εναρμονίζει τις υποχρεώσεις της Ελλάδας με τις ευρωπαϊκές οδηγίες, τίθεται το πλαίσιο διαχείρισης των στερεών απορριμμάτων ώστε να μην διατίθενται στις χωματερές και καθορίζονται οι προδιαγραφές και οι τρόποι διαχείρισης των

απορριμμάτων στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Η ίδια υπουργική απόφαση επίσης καθόριζε:

- Μέχρι το 2007, κλείσιμο και εξυγίανση όλων των χωματερών.
- Μέχρι το τέλος του 2005, υποχρεωτική ανάκτηση όλων των συσκευασιών τουλάχιστον σε ποσοστό μέχρι 50%.
- Μέχρι το 2007, αύξηση της κομποστοποίησης των οργανικών υπολειμμάτων σε ποσοστό μέχρι 65%.
- Υποχρεωτική ανακύκλωση και εναλλακτική διαχείριση ειδικών απορριμμάτων όπως παλαιά οχήματα, ελαστικά αυτοκινήτων, ηλεκτρικές συσκευές, έπιπλα κ.ά.

Με την οδηγία 1999/31/ΕΚ τίθεται πιο ολοκληρωμένα το ζήτημα των ΧΥΤΑ (Χώρος Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων), διαχωρίζονται τα απορρίμματα σε κατηγορίες (δες §10.6.3) και καθορίζεται η επιδεκτικότητα των ΧΥΤΑ στις διάφορες κατηγορίες των απορριμμάτων. Επίσης προωθείται συγκεκριμένα η μείωση της διάθεσης των οργανικών στους ΧΥΤΑ. Ταυτόχρονα με την οδηγία 2004/12/ΕΚ με την οποία προωθείται η ανακύκλωση των υλικών συσκευασίας, τίθενται οι ουσιαστικές βάσεις για την ανάκτηση των συσκευασιών με την *Διαλογή στη Πηγή* (ΔσΠ) και τη *Μηχανική Διαλογή*, όπως και της *Βιολογικής Επεξεργασίας* των οργανικών. Έτσι με την ανάκτηση των υλικών (~40%) και την βιολογική επεξεργασία των οργανικών (~40%), παραμένει ένα μικρό υπόλειμμα της τάξης του 20% για διάθεση. Ο ΧΥΤΑ δέχεται πλέον μόνο υπολείμματα και ονομάζεται ΧΥΤΥ (Χώρος Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων). Ο συνδυασμός *Μηχανικής Διαλογής* – *Βιολογικής επεξεργασίας* ανέπτυξε μια σειρά διεργασίες που καταλήγουν στην παραγωγή *ανακυκλώσιμων υλικών*, *compost*, *RDF*, *SRF* και *βιοαερίου*.

Βασικός στόχος της διαχείρισης των απορριμμάτων καθίσταται η πρόληψη της παραγωγής τους, η προώθηση της ανάκτησης των υλικών, η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση, καθώς και η περιβαλλοντικά ασφαλής διάθεση τους. Οι πιο αποτελεσματικοί, περιβαλλοντικά και οικονομικά, μέθοδοι είναι οι γραμμές 1, 1' και 2, 2', 2'', 2''' του Σχ. 10.1. Αντίθετα με την καύση (γραμμή 3) χάνονται πολύτιμες πρώτες ύλες και τα αέρια της καύσης επιβαρύνουν το περιβάλλον και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Άλλωστε με τα αυστηρά όρια των συγκεντρώσεων των εκπομπών των μονάδων αποτέφρωσης που επιβάλλονται με την οδηγία 2000/76/ΕΚ το κόστος των εγκαταστάσεων και λειτουργίας, όπως και ο εξοπλισμός απορρύπανσης είναι πάρα πολύ υψηλός.

Συνοπτικά οι εναλλακτικές μέθοδοι διαχείρισης (γραμμές 1, 1' και 2) συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος (έδαφος, νερό, κλιματική αλλαγή) και των πρώτων υλών. Μια σημαντική συνιστώσα της διαχείρισης είναι η συμμετοχή των τελικών χρηστών και καταναλωτών, όπως προϋποτίθεται στη γραμμή 1 (Σχ. 10.1) όπου η ανάκτηση υλικών βασίζεται στη Διαλογή στη Πηγή.

Τα πλαστικά απορρίμματα ως μέρος των δημοτικών απορριμμάτων μετέχουν στις διάφορες γραμμές διαχείρισης των τελευταίων. Τα πλαστικά είτε διαχωρίζονται από τα δημοτικά απορρίμματα, ακολουθώντας τις γραμμές 1 και 2 (Σχ. 10.1) είτε ακολουθούν την κοινή πορεία με τα δημοτικά (γραμμές 3, 4, 5 στο Σχ. 10.1). Οι πορείες αυτές των πλαστικών δηλ. της ανάκτησης ή ανακύκλωσης ή της συνδιαχείρισης τους με τα δημοτικά, πέραν του Σχ. 10.1 έχουν συνοπτικά παρουσιαστεί και στο διάγραμμα ροής του Σχ. 4.3. Η ανάκτηση των πλαστικών από τα δημοτικά απορρίμματα και ο διαχωρισμός τους από τα ανακυκλώσιμα υλικά, όπως και ο διαχωρισμός των πλαστικών ανά είδος έχουν αναπτυχθεί, ήδη, στα διαγράμματα ροής Σχ. 7.2-1, Σχ. 7.2-2 και 7.2-13. Τα διαχωρισμένα πλαστικά είτε οδηγούνται σε μηχανική ανακύκλωση, είτε σε θερμική επεξεργασία, είτε σε αποτέφρωση (ως PDF), είτε σε συν-αποτέφρωση με τα δημοτικά απορρίμματα (γραμμή 3). Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσονται συνοπτικά οι πορείες διαχείρισης των δημοτικών απορριμμάτων και συγκεκριμένα οι πορείες 4, 1, 2, 2'' και 2'. Δεν θα σχολιαστεί η θερμική επεξεργασία και καύση των δημοτικών απορριμμάτων επειδή η ανάπτυξη τους έγινε στα κεφάλαια των αντίστοιχων διεργασιών των πλαστικών. Τέλος στο κεφάλαιο αυτό θα επισημανθεί στα πλαίσια της συνολικής διαχείρισης των απορριμμάτων η επικινδυνότητα και η τύχη των πλαστικών στους ΧΥΤΑ και η αναγκαιότητα εναλλακτικής τους διαχείρισης.

Στον Πίν. 10.1 υπολογίζεται ενδεικτικά το κόστος των διεργασιών διαχείρισης των δημοτικών απορριμμάτων που αναπτύχθηκαν παραπάνω. Όπως προκύπτει και από τον Πίν. 10.1 οι εναλλακτικές διεργασίες ΜΒΕ* αποτελούν την πιο συμβατή περιβαλλοντικά και οικονομικά λύση.

Πίνακας 10.1: Κόστος των διεργασιών διαχείρισης των δημοτικών απορριμμάτων

Διεργασία	Κόστος (€/τόνο)
Συλλογή – μεταφορά	40-170
Μηχανική διαλογή – κομποστοποίηση	35-75
Μηχανική διαλογή – αναερόβια επεξεργασία	80-125
ΧΥΤΑ	40-60
Καύση	85-109**
Μηχανική ανακύκλωση	10-80
Τριτογενής ανακύκλωση (πυρόλυση/αεριοποίηση)	104-167**

** Στοιχεία Πίν. 8.2-12. Το κόστος θραύσης καθίσταται μεγαλύτερο με τη μείωση των ορίων εκπομπών των αποτεφρωτήρων.

* Μηχανικής - Βιολογικής Επεξεργασίας

10.2 Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ)

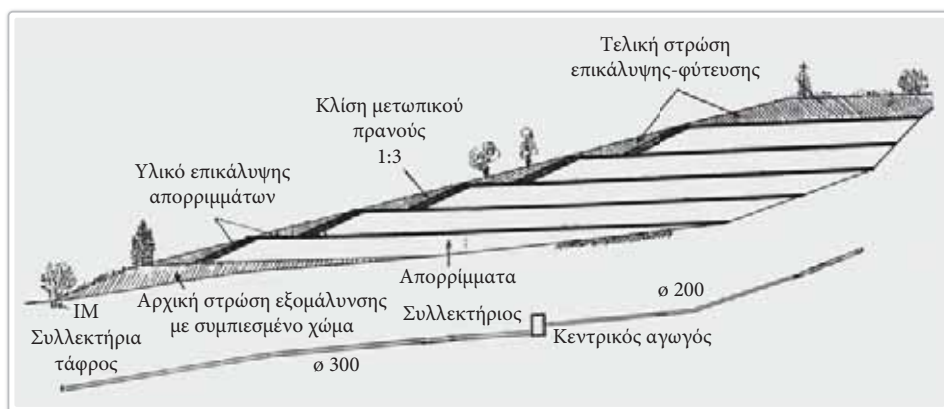
Η διαδικασία της υγειονομικής ταφής (πορεία 4 στο Σχ. 10.1) παρουσιάζει, σε αντίθεση με την χωματερή, τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Τα στερεά απορρίμματα διατίθενται με ένα ελεγχόμενο τρόπο σε ένα επιλεγμένο χώρο, όπου διασκορπίζονται και συμπιέζονται σε λεπτά στρώματα,
- Στη συνέχεια τα λεπτά στρώματα απορριμμάτων καλύπτονται καθημερινά, ή πιο συχνά εάν είναι αναγκαίο, με αντίστοιχα στρώματα συμπιεσμένου χώματος.

Με την πλήρωση του χώρου υγειονομικής ταφής, ο χώρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναψυχή, αγροτικές καλλιέργειες ή εμπορικές χρήσεις. Η πιο κοινή είναι η χρήση αναψυχής. Οι στρώσεις σκουπιδιών στο χώρο υγειονομικής ταφής έχουν πάχος περίπου 60 εκατοστών και συμπιέζονται. Ο βαθμός συμπίεσης και ο εξοπλισμός συμπίεσης εξαρτάται από τον τύπο των στερεών απορριμμάτων. Για την κάλυψη μιας στρώσης σκουπιδιών συνήθως, χρησιμοποιείται μια στρώση συμπιεσμένης άμμου, πάχους περίπου 6 ιντσών. Σαν τελική στρώση των επάλληλων στρώσεων σκουπιδιών και άμμου χρησιμοποιείται μια στρώση συμπιεσμένης άμμου πάχους 24 ιντσών. Το τελικό πάχος των στρώσεων σκουπιδιών και άμμου είναι 2.5-3 μέτρα. Για την αποφυγή στραγγισμάτων στον υδροφόρο ορίζοντα ο πυθμένας του ΧΥΤΑ καλύπτεται από μεμβράνη (συνήθως PVC) και η εγκατάσταση του ΧΥΤΑ χωροθετείται υπεράνω μη υδατοπερατών πετρωμάτων. Ταυτόχρονα εγκαθίσταται στον ΧΥΤΑ δίκτυο υπόγειων σωληνώσεων για την απομάκρυνση των αποστραγγισμάτων και επιβάλλεται η διέλευση τους από βιολογικό καθαρισμό, πριν την διάθεση τους στο περιβάλλον. Στο Σχ. 10.2 απεικονίζεται ο χώρος υγειονομικής ταφής απορριμμάτων.

Οι ΧΥΤΑ παράγουν βιοαέριο, ως αποτέλεσμα της αναερόβιας ζύμωσης των σκουπιδιών, το οποίο θα πρέπει να διαφεύγει στην ατμόσφαιρα επειδή εγκλωβιζόμενο προκαλεί εκρήξεις και φωτιές. Οι τελευταίες προκαλούν μια σειρά προβλήματα μεταξύ των οποίων και η παραγωγή διοξινών όταν στην μάζα των σκουπιδιών υπάρχει PVC. Παράλληλα το απελευθερούμενο βιοαέριο συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Για την αποφυγή των δυσάρεστων αυτών προβλημάτων τοποθετείται στην μάζα του ΧΥΤΑ σύστημα σωλήνων συλλογής του βιοαερίου το οποίο χρησιμοποιείται για θέρμανση και ηλεκτρική ενέργεια. Η λύση όμως αυτή δεν ενδείκνυται για μικρής δυναμικότητας ΧΥΤΑ.

Οι απαιτούμενες εκτάσεις για την εγκατάσταση ενός ΧΥΤΑ εξαρτώνται από τον πληθυσμό της πόλης. Υπολογίζεται ότι για 100,000 κατοίκους απαιτούνται 100 στρέμματα γης, τα οποία επαρκούν για 10-15 χρόνια.



Σχήμα 10.2: Τομή χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Πηγή: ‘Διαχείριση Απορριμμάτων στην Ελληνική Περιφέρεια’, Ελληνική Εταιρεία Τοπικής Ανάπτυξης και Αυτοδιοίκησης Α.Ε., Αθήνα, 1987)

➤ Στραγγίσματα

Στους πυθμένες των ΧΥΤΑ ή των κυψελών από τις οποίες συνίσταται ο πυθμένας (δηλ. τα ανεξάρτητα τμήματα του ΧΥΤΑ τα οποία πληρώνονται διαδοχικά) συγκεντρώνονται υγρά, τα καλούμενα **στραγγίσματα**, τόσο από την διείσδυση όμβριων υδάτων στο σώμα των απορριμμάτων, όσο και από την διαδικασία της βιολογικής τους αποδόμησης.

Η βιολογική αποδόμηση των απορριμμάτων διακρίνεται στην αερόβια και αναερόβια αντίστοιχα. Κατά την αερόβια, η οποία συμβαίνει στα επιφανειακά στρώματα των συμπιεσμένων απορριμμάτων, λόγω διείσδυσης του οξυγόνου, παράγονται διοξείδιο του άνθρακα, νερό και αποδομημένες ενώσεις του άνθρακα. Η συνεισφορά των διεργασιών αυτών στα στραγγίσματα είναι μικρή. Η δημιουργία των στραγγισμάτων στο στάδιο αυτό οφείλεται κυρίως στα όμβρια ύδατα που συμπαρασύρουν τις υδατοδιαλυτές ουσίες των απορριμμάτων.

Η αναερόβια αποδόμηση (χώνευση) του οργανικού κλάσματος διακρίνεται σε τρία στάδια. Στο πρώτο, τα στερεά και δυσδιάλυτα οργανικά οξέα υδrolύονται από κατάλληλα βακτήρια σε οργανικά οξέα, αλκοόλες, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Στο δεύτερο, μια ομάδα οξεοπαραγωγών βακτηρίων, μετατρέπει τα προϊόντα του πρώτου σταδίου σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τα δύο αυτά στάδια συνιστούν την *όξινη* ή *οξυγενή* φάση της αναερόβιας χώνευσης. Στην οξυγενή φάση, λόγω υψηλών ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα το pH κυμαίνεται μεταξύ 5,5-6,5 με αποτέλεσμα τη διάλυση των οργανικών και ανόργανων ουσιών στα στραγγίσματα. Μετά την όξινη φάση, λόγω της κατανάλωσης του οξυγόνου, το δυναμικό οξειδοαναγωγής μειώνεται με

αποτέλεσμα την έναρξη του τρίτου σταδίου ή αλλιώς αποκαλούμενου ως *φάση της μεθανογένεσης*. Τα μεθανοπαραγωγά βακτήρια διασπούν τα οξέα των οξεοπαραγωγών σε μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα (βιοαέριο) και νερό. Το κατάλληλο pH για την ανάπτυξη των μεθανοπαραγωγών βακτηρίων κυμαίνεται μεταξύ 6,5-7,5. Το στάδιο της μεθανογένεσης χαρακτηρίζεται από τον αργό ρυθμό του, εμφανίζεται μετά από 6 μήνες και μπορεί να διαρκέσει χρόνια.

Τα στραγγίσματα συνήθως συνίστανται από:

- Ανόργανα κατιόντα : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , NH_4^{++} , Fe^{++} , Mn^{++} , Cl^- , SO_4^- , HCO_3^-
- Βαρέα μέταλλα : Cd, Zn, Pb, Cu, Ni, Co
- Οργανικά υλικά εκφρασμένα σε BOD (βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο), COD (χημικά απαιτούμενο οξυγόνο) και TOC (ολικός οργανικός άνθρακας)
- Οργανικές ουσίες σε συγκεντρώσεις συνήθως $< 0.1 \text{ mg/l}$, όπως αρωματικοί υδρογονάνθρακες, φαινόλες και χλωριωμένες αλειφατικές ενώσεις.

Η σύσταση των στραγγισμάτων επηρεάζεται από τη βιολογική αποσύνθεση των βιοαποδομήσιμων συστατικών, τις διαδικασίες χημικής οξείδωσης, και τα διαλυμένα ανόργανα και οργανικά συστατικά των απορριμμάτων. Συνήθως διακρίνονται από:

- 1) υψηλό οργανικό φορτίο και
- 2) σημαντικές μεταβολές στη σύσταση τους ανάλογα με τον χρόνο ενταφιασμού και την παραγωγή της αντίστοιχης οξικής ζύμωσης ή μεθανογένεσης (Πίν. 10.2).

Πίνακας 10.2: Ποιοτική σύσταση στραγγισμάτων κατά την φάση οξικής ζύμωσης (νεαρά στραγγίσματα) και την φάση της μεθανογένεσης (γηρασμένα στραγγίσματα)

Παράμετρος	Οξυγενής φάση	Φάση μεθανογένεσης
PH	6.1	8
BOD ₅ (mg/l)	13,000	180
COD (mg/l)	22,000	3,000
SO ₄ (mg/l)	500	80
Ca (mg/l)	1,200	60
Mg (mg/l)	470	180
Fe (mg/l)	780	15
Mn (mg/l)	25	0.7
Zn (mg/l)	5	0.6

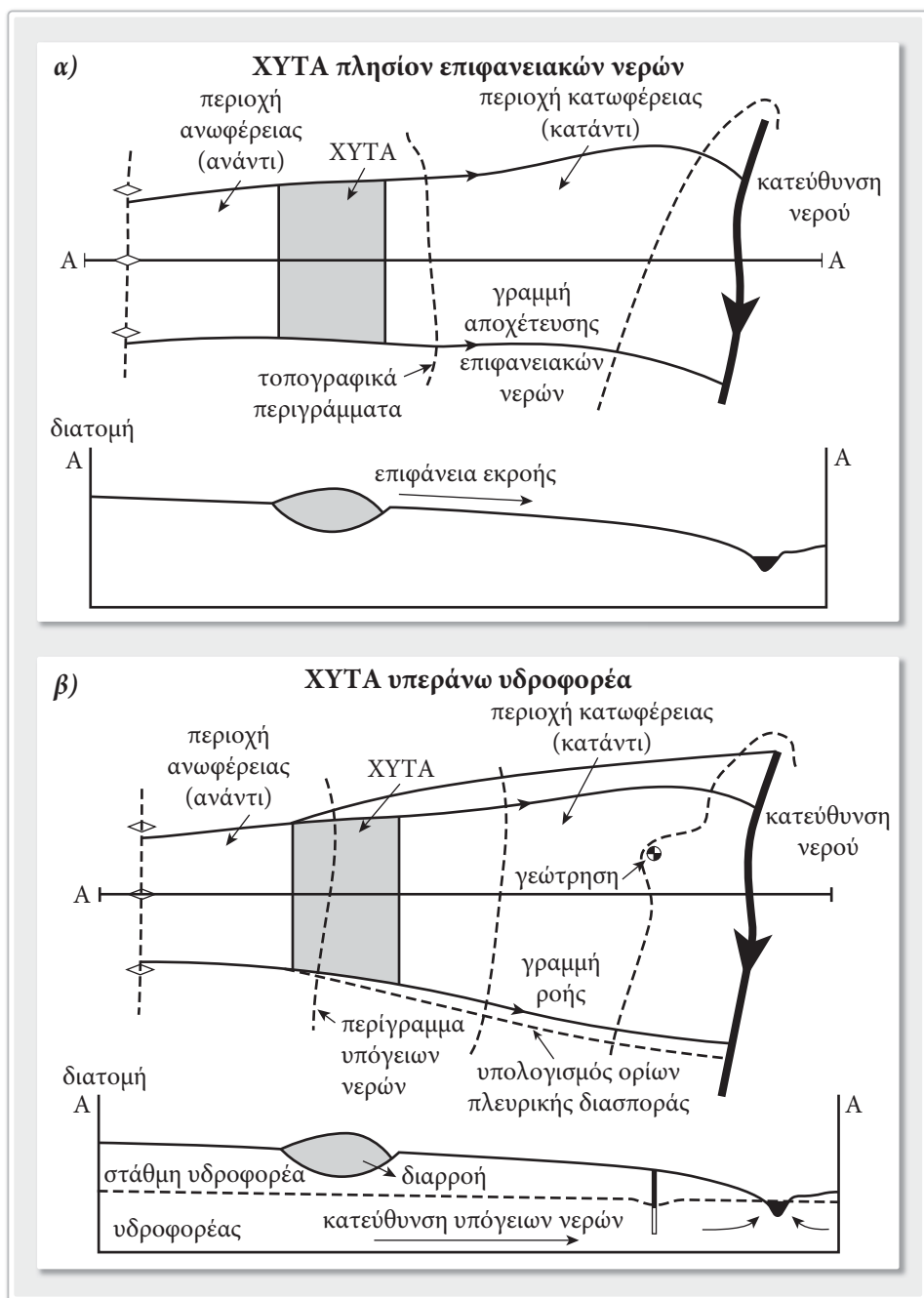
Η διαχείριση των στραγγισμάτων, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη μακροχρόνια διαχείριση των χώρων υγειονομικής ταφής.

Γενικά τα στραγγίσματα που παράγονται στους ΧΥΤΑ, αποτελούν έναν από τους μεγαλύτερους κινδύνους για το περιβάλλον, σχετικά με τη ρύπανση του εδάφους, των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, και συνεπώς απαιτούν πριν την τελική τους διάθεση κατάλληλη επεξεργασία.

Απαραίτητοι για την χωροθέτηση ΧΥΤΑ είναι οι υδρογεωλογικοί χάρτες ώστε να αποφευχθεί η ρύπανση επιφανειακών υδάτων και των υπόγειων υδάτων (υδροφορέα) από τα *στραγγίσματα*. Στο Σχ. 10.3α φαίνεται η χωροθέτηση του ΧΥΤΑ πλησίον επιφανειακών υδάτων και η γεωλογική διατομή της περιοχής. Λόγω του επικλινούς του εδάφους, όπως στην περίπτωση του Σχ. 10.3α τα εκρέόμενα από το ΧΥΤΑ στραγγίσματα μπορεί να ρυπάνουν διερχόμενα επιφανειακά νερά που βρίσκονται στο κατάντι του ΧΥΤΑ. Στο Σχ. 10.3β απεικονίζεται κάτω του πυθμένα του ΧΥΤΑ η ύπαρξη υπόγειων νερών, τα οποία επίσης μπορούν να ρυπανθούν από τα στραγγίσματα. Η ρύπανση των υπόγειων υδάτων (υδροφορέα) μπορεί να συμβεί είτε άμεσα με διαρροή των στραγγισμάτων λόγω μη καλής μόνωσης ή μη-υδατοστεγών πετρωμάτων στον πυθμένα του ΧΥΤΑ είτε έμμεσα με τη ρύπανση επιφανειακών υδάτων, όπως στην περίπτωση του Σχ. 10.3α, τα οποία όμως διέρχονται μέσω πετρωμάτων που βρίσκονται πολύ χαμηλότερα από το υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα (Σχ. 10.3β). Επίσης, η ρύπανση του υδροφορέα μεταφέρεται και στα νερά των γεωτρήσεων. Για τον αποκλεισμό και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις της επαφής των επιφανειακών νερών με τα στραγγίσματα ώστε να μην ρυπαίνονται τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, γεωτρήσεις, πηγές κ.λπ. επιβάλλεται η δημιουργία αναχωμάτων ή φίλτρων κατακράτησης των ρύπων και καθορίζονται με τα τοπογραφικά περιγράμματα, όπως φαίνεται στο Σχ. 10.3.

Για την εκτίμηση του κινδύνου μόλυνσης και ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από τα στραγγίσματα των χώρων υγειονομικής ταφής λαμβάνονται, συνοπτικά, υπόψη τα παρακάτω:

- Τα υδρολογικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής χωροθέτησης του ΧΥΤΑ
- Η επιλογή, εάν δυνατόν, μη υδατοπερατών πετρωμάτων
- Οι θέσεις και τα επιφανειακά χαρακτηριστικά πηγών, γεωτρήσεων (συμπεριλαμβανομένων και οχετών) κ.λπ., όπως και οποιαδήποτε εγκατάστασης που μπορεί να εισάγει μολύνσεις στα υπόγεια ύδατα
- Η ποιότητα των απορριμμάτων, η ταχύτητα πλήρωσης της κυψέλης, η συμπίεση των απορριμμάτων της κυψέλης, η πυκνότητα και διαπερατότητα των απορριμμάτων



Σχήμα 10.3: Επιπτώσεις των στραγγισμάτων,
 α) εγκατάσταση ΧΥΤΑ πλησίον επιφανειακών νερών,
 β) εγκατάσταση ΧΥΤΑ υπεράνω υδροφόρου οριζοντα

- Το ελάχιστο και μέγιστο επίπεδο της βάσης της κυψέλης
- Το πραγματικό η προτεινόμενο επιφανειακό επίπεδο κάθε κυψέλης του χώρου υγειονομικής ταφής πριν και μετά την αποκατάσταση
- Η ποιότητα των αποστραγγισμάτων (ελάχιστες και μέγιστες τιμές) και η χρονική μεταβολή της σύστασης τους
- Η ποιότητα υλικών επίστρωσης των απορριμμάτων και των χαρακτηριστικών τους
- Τύπος επένδυσης πυθμένα
- Πάχος επένδυσης
- Πιθανότητα εξασθένησης του συστήματος επένδυσης στο πυθμένα του ΧΥΤΑ
- Πιθανότητα διαρροής του συστήματος αποστράγγισης και πιθανότητα ρύπανσης επιφανειακών νερών
- Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία υδραυλικής αγωγιμότητας (κατ' εκτίμηση ή κατόπιν μετρήσεων)
- Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία ιοντανταλλακτικής ικανότητας (κατ' εκτίμηση ή κατόπιν μετρήσεων)
- Τα όρια της πλευρικής διασποράς στραγγισμάτων σε περίπτωση διαρροής.

10.3 Από τους ΧΥΤΑ στους ΧΥΤΥ. Ανάκτηση χρήσιμων υλικών και βιολογική επεξεργασία δημοτικών απορριμμάτων

Λόγω των απαιτούμενων εκτάσεων, των πιθανών προβλημάτων από την λειτουργία τους και της μη εκμετάλλευσης των υλικών συσκευασίας (εξάντληση των φυσικών πόρων, κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή τους και εμμέσως επιβάρυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου) με την οδηγία 99/31/ΕΚ τα ΧΥΤΑ μετατρέπονται σε ΧΥΤΥ (Χώρους Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων). Κι αυτό γιατί το 40% κ.β. περίπου των οικιακών απορριμμάτων είναι **υλικά συσκευασίας**, τα οποία μπορεί ο ίδιος ο καταναλωτής να συλλέξει και να διαχωρίσει. Τα υλικά συσκευασίας είναι:

- Χαρτί - χαρτόνι
- Μέταλλα
- Γυαλί
- Πλαστικά

Επίσης το 40% κ.β. περίπου των οικιακών απορριμμάτων είναι τα βιοαποδομήσιμα **οργανικά υπολείμματα** (υπολείμματα ζωικών και φυτικών τροφών) και