

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΞΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
«ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΑΠΟΒΛΗΤΑ : ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ
ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΗ
ΚΑΙ/Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ – ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ»

ΧΙΟΝΙΔΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ
ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΓΙΔΑΡΑΚΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΧΑΝΙΑ
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2007

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ευάγγελο Γιδάρικο, για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε στην ανάθεση του θέματος καθώς και για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Μαρία για τη στήριξη και την αμέριστη ηθική συμπαράστασή της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση των Αστικών Στερεών Απορριμμάτων (ΑΣΑ) είναι παγκοσμίως ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα, ιδιαίτερα στις ανεπτυγμένες οικονομικά κοινωνίες οι οποίες παράγουν ολοένα και μεγαλύτερες ποσότητες απορριμμάτων. Οι διαδικασίες και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, πρέπει να είναι αποδεκτές από τεχνικής, οικονομικής και περιβαλλοντικής πλευράς και να έχουν την συναίνεση της κοινωνίας και των πολιτών.

Τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται ολοένα και περισσότερο επιτακτική η ανάγκη για την αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των ΑΣΑ, το οποίο λόγω των αλλαγών στις καταναλωτικές συνήθειες των ανθρώπων και την χρήση του πλαστικού και των υλικών συσκευασίας, συνεχώς αυξάνεται.

Στην παρούσα διατριβή μελετάται κατά πόσο είναι εφικτή και περιβαλλοντικά ασφαλής η ενεργειακή αξιοποίηση των απορριμμάτων σε επίπεδο Περιφέρειας Κρήτης με χρήση σύγχρονων μεθόδων θερμικής επεξεργασίας ή μηχανικής – βιολογικής επεξεργασίας.

Αρχικά γίνεται περιγραφή όλων των διαθέσιμων θερμικών μεθόδων επεξεργασίας των ΑΣΑ (αποτέφρωση, πυρόλυση, αεριοποίηση, τεχνική πλάσματος κλπ.) καθώς και της μηχανικής – βιολογικής επεξεργασίας με ιδιαίτερη αναφορά τόσο στην κομποστοποίηση όσο και στην αναερόβια χώνευση. Αναπτύσσονται αναλυτικά τα συστήματα ελέγχου των αέριων εκπομπών και γίνεται εκτενής αναφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε μιας από τις παραπάνω αναφερόμενες τεχνικές διαχείρισης καθώς και στα όρια που έχουν θεσπιστεί για τις αέριες εκπομπές και τα υγρά και στερεά υπολείμματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ισοζύγια μάζας – ρύπων και ενέργειας και παρουσιάζονται τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των ΑΣΑ της Περιφέρειας Κρήτης. Επιλέγονται τρία πιθανά σενάρια διαχείρισης των απορριμμάτων της Περιφέρειας Κρήτης. Υπολογίζονται η ενέργεια και οι εκπομπές που προκύπτουν από κάθε ένα σενάριο και γίνεται σύγκριση μεταξύ τους. Επίσης, παρατίθενται στοιχεία κόστους και προκύπτουν τα τελικά συμπεράσματα.

ABSTRACT

The treatment of Municipal Solid Waste (MSW) is worldwide one of the most important environmental issues, especially at the economically developed societies which continuously tend to produce much larger quantities of wastes. The processes and the methods that are being used must be acceptable by technical, economical and environmental point of view and they must also have public assent.

Over the last decades, due to the changes of the consuming habits of people and the larger use of plastic in package materials, the energy content of MSW is continuously increasing. Thus, there is an imperative need for energy recovery from MSW.

In this thesis, it is being studied whether the energy recovery of MSW of Prefecture of Crete using methods of thermal treatment or methods of mechanical – biological treatment, is practicable and environmentally safe.

At first there is a description of all the available methods of thermal treatment of MSW (incineration, pyrolysis, gasification, plasma technique etc) as well as mechanical – biological treatment with special reference to composting and anaerobic digestion. The air pollution control systems are being presented and there is an extensive reference to the environmental impacts that arise from every one of the above mentioned treatment techniques as well as the legislated limits of the air emissions and the liquid and solid residues. Next the mass, emission and energy balances are being presented as well as the qualitative and quantitative characteristics of the MSW of the Prefecture of Crete. Three potential treatment scenarios for the MSW of the Prefecture of Crete are being chosen. The energy and the emissions that come from every one of those scenarios are being estimated and there is a comparison between them. Additionally there are presented cost concerning data and the final conclusions are being introduced.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	4
2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Αποτέφρωση – Καύση.....	6
2.2.1 Συστήματα ελέγχου αέριας ρύπανσης.....	13
2.2.2 Διάγραμμα ροής.....	21
2.3 Πυρόλυση.....	22
2.4 Αεριοποίηση.....	27
2.5 Τεχνηκή πλάσματος.....	30
2.6 Καινοτόμες θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας.....	32
2.6.1 Θερμόλυση.....	33
2.6.2 Μέθοδος Siemens.....	34
2.6.3 Μέθοδος Thermoselect.....	35
2.6.4 Μέθοδος Noell.....	36
2.6.5 Μέθοδος EDDITH.....	37
2.6.6 Μέθοδος Von Roll.....	38
2.6.6.1 Διεργασία RCP.....	39
2.6.7 Μέθοδος TPS.....	39
2.6.8 Μέθοδος NKK.....	40
2.6.9 Μέθοδος PKA.....	41
2.6.10 Μέθοδος P.I.T. Pyroflam.....	42
2.6.11 Μέθοδος Nexus.....	42
2.6.12 Μέθοδος Andco Torrax.....	42
2.6.13 Μέθοδος WGT.....	44
2.7 Εκπομπές καινοτόμων τεχνολογιών.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΗΧΑΝΙΚΗ – ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (ΜΒΕ).....	47
3.1 Βασικές αρχές και συνοπτική περιγραφή λειτουργίας.....	47
3.2. Μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας αστικών στερεών αποβλήτων.....	48
3.2.1 Προεπεξεργασία Αστικών Στερεών Αποβλήτων.....	51
3.3 Κομποστοποίηση.....	51
3.3.1 Βασικές αρχές και συνοπτική περιγραφή λειτουργίας.....	51
3.3.2 Συστήματα και τεχνολογίες κομποστοποίησης.....	55
3.3.2.1 Ανοικτά συστήματα.....	56
3.3.2.2 Αναστρεφόμενα σειράδια.....	56
3.3.2.3 Αεριζόμενοι στατικοί σωροί.....	57
3.3.2.4 Κλειστά συστήματα.....	58
3.4 Αναερόβια χώνευση.....	58
3.4.1 Βασικές αρχές και συνοπτική περιγραφή λειτουργίας.....	58
3.4.2 Συστήματα και τεχνολογίες αναερόβιας χώνευσης.....	62
3.4.3 Διεργασίες αναερόβιας ζύμωσης των οργανικών στερεών αποβλήτων.....	66
3.4.3.1 Διεργασία Waasa.....	66
3.4.3.2 Διεργασία Valorga.....	67
3.4.3.3 Διεργασία Dranco.....	68
3.4.3.4 Διεργασία Kompogas.....	69
3.4.3.5 Διεργασία ΒΤΑ.....	70

3.4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αναερόβιας ζύμωσης σε μονάδα συγκριτικά με την αναερόβια ζύμωση σε ΧΥΤΑ.....	72
3.4.5 Επεξεργασία του ζυμωμένου υποστρώματος.....	72
3.5 Μηχανική επεξεργασία.....	73
3.5.1 Τεχνολογίες προετοιμασίας των αποβλήτων.....	73
3.5.2 Τεχνολογίες διαχωρισμού των αποβλήτων.....	74
3.6 Γενικευμένα κριτήρια αξιολόγησης καταλληλότητας των μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας.....	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

4.1 Αποτέφρωση.....	80
4.1.1 Αέρια.....	80
4.1.1.1 Ποιότητα αέριων εκπομπών.....	83
4.1.2 Υγρά.....	88
4.1.3. Στερεά.....	89
4.1.3.1 Ποιότητα στερεών υπολειμμάτων.....	89
4.1.4 Έλεγχος εκπομπών.....	91
4.2 Πυρόλυση – Αεριοποίηση.....	97
4.3 Κομποστοποίηση.....	98
4.4 Αναερόβια χώνευση.....	102
4.5 Μηχανική επεξεργασία.....	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

5.1 Ισοζύγια μάζας.....	107
5.1.1 Αποτέφρωση.....	107
5.1.2 Πυρόλυση.....	108
5.1.3 Αεριοποίηση.....	109
5.1.4 Μηχανική – βιολογική επεξεργασία.....	109
5.1.5 Αναερόβια χώνευση.....	110
5.2 Ισοζύγια ρύπων.....	111
5.2.1 Αποτέφρωση.....	111
5.2.2 Αεριοποίηση – Πυρόλυση.....	113
5.2.3 Εκπομπές Μηχανικής -Βιολογικής επεξεργασίας	114
5.2.4 Εκπομπές ΧΥΤΑ.....	114
5.3 Ισοζύγια ενέργειας.....	115
5.3.1 Αποτέφρωση.....	115
5.3.2 Πυρόλυση.....	118
5.3.3 Αεριοποίηση.....	119
5.3.4 ΧΥΤΑ.....	119
5.3.5 Μηχανική – βιολογική επεξεργασία	119
5.3.6 Αναερόβια χώνευση.....	120
5.4 Σύνοψη.....	120

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΑ

6.1 Η κατάσταση στην Κρήτη.....	122
6.2 Στρατηγικές και σενάρια.....	124
6.2.1 Ενεργειακή αξιοποίηση.....	125
6.2.1.1 Στρατηγική 0.....	125
6.2.1.2 Στρατηγική 1.....	125
6.2.1.3 Στρατηγική 2.....	126

6.2.2. Περιβαλλοντικές εκτιμήσεις.....	127
6.2.2.1 Στρατηγική 0.....	127
6.2.2.2 Στρατηγική 1.....	128
6.2.2.3 Στρατηγική 2.....	129
6.2.3 Κόστη διαφόρων στρατηγικών.....	134
6.3 Αποτελέσματα και αξιολόγηση.....	140
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	148

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, η συγκέντρωση του πληθυσμού σε μεγάλα αστικά κέντρα και η παράλληλη εκβιομηχάνιση, είχαν σαν συνέπεια την αύξηση των παραγόμενων απορριμμάτων και την ανάγκη οργάνωσης της διαδικασίας απόρριψής τους. Έτσι σταδιακά άρχισαν με την παρέμβαση της πολιτείας, στα μέσα της δεκαετίας του '60, να διατυπώνονται και να εφαρμόζονται κάποιοι κανόνες διαχείρισης των αστικών στερεών απορριμμάτων (ΑΣΑ). Κύριο γνώρισμα της περιόδου αυτής είναι η έλλειψη σαφούς επίδρασης της κρατικής και δημοτικής παρέμβασης στην υπάρχουσα κατάσταση της διαχείρισης των απορριμμάτων, που θα οδηγούσε στον επανακαθορισμό τους σε μια προσπάθεια βελτίωσης της κατάστασης. Μόλις στα τέλη της δεκαετίας του '60 η κοινωνία άρχισε να ενδιαφέρεται σοβαρά και να παίρνει υπόψη της τα αποτελέσματα της παρέμβασής της στον τομέα της διαχείρισης των ΑΣΑ, προσπαθώντας να βελτιστοποιήσει τη δράση της. Δυστυχώς στα χρόνια που ακολούθησαν δεν έγινε καμιά ουσιαστική προσπάθεια με συγκεκριμένο στόχο και φιλοσοφία και το ζήτημα αντιμετωπίστηκε με ευκαιριακά και πρόχειρα μέτρα που το μόνο αποτέλεσμα που είχαν ήταν η μεγέθυνση του προβλήματος.

Σήμερα, έπειτα από όλα αυτά τα χρόνια αδράνειας και κωλυσιεργίας από τους φορείς της πολιτείας, το ζήτημα της διαχείρισης των αστικών στερεών απορριμμάτων αποτελεί πρώτη προτεραιότητα για την κοινωνία μας. Η συνεχώς αυξανόμενη ποσότητα των ΑΣΑ, η αλλαγή της φυσικής τους σύνθεσης, με κύριο γνώρισμα την αύξηση του χαρτιού και του πλαστικού έχουν οδηγήσει σε μια ριζική ανατροπή της ήδη διαταραγμένης από την προηγούμενη περίοδο, οικολογικής ισορροπίας, που εκφράζεται κύρια από την δυσκολία του φυσικού περιβάλλοντος να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στο ρόλο του σαν τροφοδότη υλικών (προοπτική εξαντλησιμότητας πολλών πρώτων υλών και ενεργειακών πόρων) και αποδέκτη αποβλήτων (αδυναμία αφομοίωσης των τεράστιων ποσοτήτων απορριμμάτων, αυξανόμενο ποσοστό τοξικών και μη αποικοδομήσιμων υλικών).

Οι βασικές αρχές πάνω στις οποίες στηρίζεται ο σχεδιασμός της διαχείρισης των απορριμμάτων στη σύγχρονη κοινωνία είναι:

- Μείωση απορριμμάτων στην πηγή τους.
- Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των απορριμμάτων.
- Ανάκτηση ενέργειας από ακατέργαστα υλικά.
- Διαχείριση απορριμμάτων και
- Διάθεση των υπολειμμάτων από την χρήση και άλλων αναπόφευκτων απορριμμάτων.

Τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα παρατηρείται μία μεγάλη ανάπτυξη των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Παρόλα αυτά, δε υπάρχουν ουσιαστικές εξελίξεις σε ότι αφορά την ολοκληρωμένη διαχείριση των αποβλήτων, δηλαδή την εισαγωγή στο σύστημα διαχείρισης μεθόδων επεξεργασίας πριν από την ταφή για την ανάκτηση χρήσιμων υλικών και ενέργειας.

Η εφαρμογή ολοκληρωμένων σχεδίων διαχείρισης των στερεών αποβλήτων, έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση νέων προσεγγίσεων στα συστήματα διαχείρισης, τα οποία πλέον δεν είναι δυνατό να βασίζονται στην αξιολόγηση μίας μεμονωμένης τεχνολογίας, αλλά στο συνδυασμό διαφόρων τεχνολογιών, λαμβάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής των στερεών αποβλήτων. Ακόμη όμως

και στα ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης, ο ρόλος των χώρων υγειονομικής ταφής (ΧΥΤ) παραμένει σημαντικός, καθότι συνεχίζει να αποτελεί το καταληκτικό σημείο της διαχείρισης, αλλά πλέον όχι ως χώρος υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), αλλά ως χώρος υγειονομικής ταφής υπολειμμάτων (ΧΥΤΥ).

Η Ελλάδα καλείται να εφαρμόσει μια σειρά από εθνικές αποφάσεις και Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης που:

- Δεσμεύουν την χώρα σε άμεση εισαγωγή τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων.
- Κάνουν πολύ αυστηρότερους τους κανόνες λειτουργίας των ΧΥΤΑ.
- Εισάγουν σημαντικές αλλαγές στην κοστολόγηση των παρεχόμενων υπηρεσιών.
- Απαιτούν σημαντική αναβάθμιση και μετασχηματισμό των φορέων διαχείρισης.
- Απαιτούν αλλαγές στην διαδικασία σχεδιασμού και αδειοδότησης των έργων.

Οι απαιτήσεις που απορρέουν από την παραπάνω φιλοσοφία, ουσιαστικά καταδεικνύουν ότι ο ΧΥΤΑ θα εξακολουθήσει να υπάρχει σαν τρόπος διαχείρισης αλλά επειδή η μέθοδος αυτή είναι τελευταία στην ιεράρχηση των αρχών διαχείρισης των στερεών απορριμμάτων, θα πρέπει να κατασκευάζονται όσο το δυνατόν λιγότεροι και πιο ελεγχόμενοι ΧΥΤΑ.

Οι στόχοι που θέτει η ΚΥΑ Η.Π.29407/3508 για τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα είναι :

Μέχρι την 16η Ιουλίου του 2010, τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα που προορίζονται για χώρους ταφής πρέπει να μειωθούν στο 75% της συνολικής (κατά βάρος) ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που είχαν παραχθεί το 1995.

Μέχρι την 16η Ιουλίου του 2013, τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα που προορίζονται για χώρους ταφής πρέπει να μειωθούν στο 50% της συνολικής (κατά βάρος) ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που είχαν παραχθεί το 1995.

Μέχρι την 16η Ιουλίου του 2020, τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα που προορίζονται για χώρους ταφής πρέπει να μειωθούν στο 35% της συνολικής (κατά βάρος) ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που είχαν παραχθεί το 1995.

Σήμερα, στην Ελλάδα το 92% των ΑΣΑ καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής. Το ποσοστό αυτό είναι το υψηλότερο από όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και καταδεικνύει την αδυναμία και απροθυμία της χώρας να ακολουθήσει μεθόδους και τεχνικές που εφαρμόζονται στην Ευρώπη εδώ και πολλά χρόνια.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται επιτακτική η ανάγκη για μια ολοκληρωτική αλλαγή στον τρόπο αντιμετώπισης του ζητήματος σε εθνικό επίπεδο, ώστε να υιοθετήσουμε άμεσα νέες μεθόδους που θα δώσουν τη λύση στο πρόβλημα.

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης είναι η επιλογή μιας ορθής στρατηγικής διαχείρισης των αστικών στερεών απορριμμάτων σε επίπεδο Περιφέρειας Κρήτης. Στην αρχή γίνεται περιγραφή όλων των διαθέσιμων τεχνολογιών θερμικής επεξεργασίας τόσο αυτών που είναι ήδη σε εφαρμογή όσο και των καινοτόμων

διεργασιών που αναπτύσσονται συνεχώς. Στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια άλλη εφαρμοζόμενη μέθοδος διαχείρισης, η μηχανική και βιολογική επεξεργασία. Ακολουθεί η αναφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και στην ποιότητα των εκπομπών από τις διάφορες μεθόδους. Έπειτα, παρατίθενται τα ισοζύγια μάζας – ρύπων και ενέργειας για κάθε αναφερόμενη διεργασία. Στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των ΑΣΑ της Περιφέρειας Κρήτης εξετάζονται τρεις διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης, γίνεται ανάλυση των στοιχείων που αφορούν στη μάζα, στους ρύπους και στην ενέργεια που προκύπτουν από κάθε μια από αυτές και ακολουθεί η αξιολόγηση και η σύγκρισή τους. Στο τέλος επιλέγουμε βάσει των στοιχείων που αναπτύχθηκαν, την στρατηγική που φαίνεται να ανταποκρίνεται καλύτερα στην περίπτωση της Κρήτης και ακολουθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν και γενικές προτάσεις που είναι σε θέση να οδηγήσουν στην υλοποίηση και επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί.

2. ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

2.1. Εισαγωγή

Η θερμική επεξεργασία (Θ.Ε.) των στερεών αποβλήτων περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες μετατροπής του περιεχομένου τους σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα, με ταυτόχρονη ή συνεπακόλουθη αποδέσμευση θερμικής ενέργειας.

Οι σημαντικότεροι στόχοι της Θ.Ε. είναι:

- Η ελαχιστοποίηση της ποσότητας των αποβλήτων που οδηγούνται στους ΧΥΤΑ.
- Η αδρανοποίησή τους (μετατροπή τους σε υλικά λιγότερο επιβλαβή).
- Η εκμετάλλευση της θερμογόνου δύναμής τους προς ανάκτηση ενέργειας (θέρμανση, ηλεκτρικό ρεύμα, καύσιμη ύλη).
- Η μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης

Η θερμική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων (ΣΑ) διαθέτει τα εξής βασικά πλεονεκτήματα:

- Μειώνει τον όγκο τους σε μεγάλο βαθμό (έως και 90%).
- Μειώνει τη μάζα τους έως και 70%.
- Μπορεί να σχεδιασθεί τόσο για μικρές όσο και για μεγάλες ποσότητες αποβλήτων.
- Επιτυγχάνεται ανάκτηση και αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.
- Είναι ανταγωνιστική των συμβατικών καυσίμων (κάρβουνο, αέριο, πετρέλαιο) στην περίπτωση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της ΘΕ είναι:

- Υψηλό κόστος κατασκευής.
- Υψηλό κόστος λειτουργίας.
- Ανάγκη απασχόλησης εξειδικευμένου προσωπικού.
- Μη άμεση αξιοποίηση υλικών από τα απόβλητα.
- Δυσκολία αξιοποίησης της παραγόμενης θερμότητας (ιδίως σε μικρές εγκαταστάσεις).
- Χρήση δαπανηρών συστημάτων ελέγχου και παρακολούθησης της προκαλούμενης ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- Εκπομπές επικίνδυνων ρύπων μέσω των καυσαερίων.

Οι τεχνικές θερμικής επεξεργασίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: αποτέφρωση – καύση (incineration - combustion), αεριοποίηση (gasification), πυρόλυση (pyrolysis) και τεχνική του πλάσματος (plasma technology) ενώ υπάρχουν και οι καινοτόμες τεχνολογίες όπως θα δούμε παρακάτω.

2.2 Αποτέφρωση – Καύση

Η αποτέφρωση ή πιο κοινά η καύση των στερεών απορριμμάτων/αποβλήτων ουσιαστικά εκπροσωπεί μια αρκετά παλαιά και διαδεδομένη διεργασία, η οποία περιλαμβάνει την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών (850 έως 1500 °C), με παρουσία φλόγας, για την οξείδωση των επιμέρους στοιχείων αυτών, δηλαδή την ένωσή τους με το οξυγόνο

[Γιδαράκος Ε., 2006]. Στόχος της εν λόγω διεργασίας είναι η εξάτμιση, η αποσύνθεση και/ή η καταστροφή των οργανικών στοιχείων των απορριμμάτων, παρουσία οξυγόνου (είτε σε στοιχειομετρική αναλογία, είτε σε περίσσεια), καθώς και η ταυτόχρονη μείωση του προς τελική διάθεση όγκου τους [Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ., 2005].

Τα προϊόντα της διαδικασίας της αποτέφρωσης περιλαμβάνουν αέριες ενώσεις (π.χ. CO₂, οξείδια αζώτου, όξινα αέρια, κα), οι οποίες χρήζουν κατάλληλης επεξεργασίας πριν την έκλυσή τους στην ατμόσφαιρα και σχετικά αδρανή στερεά υπολείμματα (τέφρα), τα οποία εκπροσωπούν το 15 – 40% του βάρους της τροφοδοσίας του αποτεφρωτή και ενδέχεται να περιέχουν σημαντικούς ανόργανους ρύπους, όπως βαρέα μέταλλα. Στην περίπτωση της ατελούς καύσης των απορριμμάτων (έλλειψης οξυγόνου), η οποία είναι ανεπιθύμητη, στα παραγόμενα απαέρια συμπεριλαμβάνονται και σημαντικές ποσότητες CO. Ως εκ τούτου, προκειμένου να εξασφαλίζεται η πλήρης καύση των ΑΣΑ, πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις [Γιδαράκος Ε., 2006]:

- ο επαρκής ποσότητα καύσιμου υλικού και οξειδωτικού μέσου (O₂) στην εστία καύσης,
- ο επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας ανάφλεξης,
- ο σωστή αναλογία μίγματος (καύσιμης ύλης - οξυγόνου),
- ο συνεχής απομάκρυνση των απαερίων, τα οποία παράγονται κατά την καύση,
- ο συνεχής απομάκρυνση των υπολειμμάτων της καύσης.

Ένα ακόμη ιδιαίτερα σημαντικό προϊόν της διαδικασίας της αποτέφρωσης ΑΣΑ αποτελεί και η θερμότητα, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί ως έχει ή και να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια.

Τα κυριότερα είδη μονάδων αποτέφρωσης, που έχουν αναπτυχθεί, είναι δύο:

- ο μονάδες που απαιτούν ελάχιστη προεπεξεργασία των απορριμμάτων (μονάδες τύπου mass-fired),
- ο μονάδες που λειτουργούν με επεξεργασμένο RDF (Refuse-Derived Fuel) ως καύσιμο.

Οι μονάδες τύπου μαζικής καύσης (mass-fired) αποτελούν την πλειοψηφία των εγκατεστημένων μονάδων. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι τα απορρίμματα εισάγονται χωρίς καμία προεπεξεργασία στο θάλαμο καύσης, με αποτέλεσμα η λειτουργία της όλης μονάδας να είναι απλή. Βέβαια, το συγκεκριμένο γεγονός εγκυμονεί και κινδύνους για τη λειτουργία της μονάδας (π.χ. εισαγωγή ογκωδών ή ιδιαίτερα επικινδύνων αποβλήτων), που αντιμετωπίζονται με την αυστηρή επίβλεψη των εισαγομένων ΑΣΑ και με τη δυνατότητα χειροκίνητης διακοπής της εισαγωγής τους, όποτε αυτό θεωρηθεί αναγκαίο από τον επιβλέποντα.

Το δεύτερο είδος μονάδων αποτέφρωσης χρησιμοποιεί ως υλικό τροφοδοσίας το λεγόμενο RDF, το οποίο ουσιαστικά εκπροσωπεί ένα μίγμα συγκεκριμένων κλασμάτων των ΑΣΑ, το οποίο προκύπτει έπειτα από διαχωρισμό και μπορεί να περιλαμβάνει χαρτί, υφάσματα, δέρμα, ελαστικά, κα. [Σκορδύλης Α., 1997]. Στόχος είναι το τελικό μίγμα να έχει υψηλή θερμογόνο δύναμη. Μάλιστα, υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές που θα πρέπει να πληροί το RDF, οι οποίες ορίζονται από την ΚΥΑ 114218/1997 και είναι οι εξής:

- κατώτερη θερμογόνος δύναμη = 4.000kcal/g (16.744MJ/kg)
- υγρασία < 20%
- ποσοστό χαρτιού και πλαστικού > 95% (επί ξηρού βάρους).

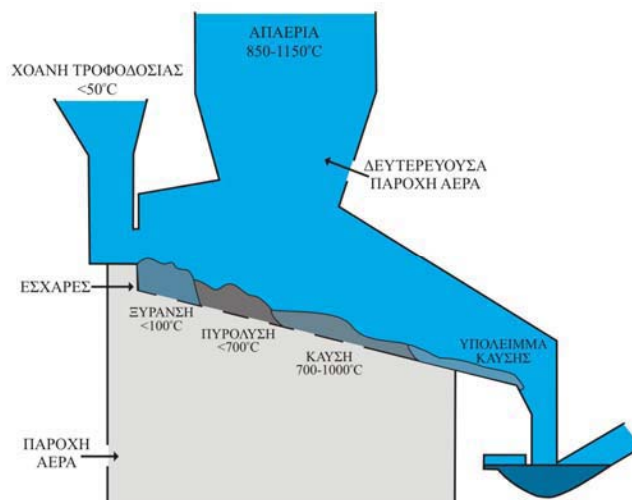
Η όλη διαδικασία λαμβάνει χώρα σε ειδικούς αποτεφρωτές, των οποίων η δυναμικότητα μπορεί να ποικίλει από 8 έως 25Mg/h [Vehlow J., 2006]. Ο δε τύπος αυτών επίσης ποικίλει, δεδομένου ότι κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη αποτεφρωτών, με διαφορετικά μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα έκαστος. Οι πλέον διαδεδομένοι τύποι αποτεφρωτών είναι:

- αποτεφρωτής κινούμενων εσχάρων,
- αποτεφρωτής περιστρεφόμενου κλιβάνου,
- αποτεφρωτής ρευστοποιημένης κλίνης.

-Αποτεφρωτής κινούμενων εσχάρων

Ένας αποτεφρωτής κινούμενων εσχάρων απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Όπως φαίνεται, τα βασικά στάδια που περιλαμβάνει κατά τη λειτουργία του είναι :

- Ξήρανση: Τα εισερχόμενα απορρίμματα λαμβάνουν θερμότητα με ακτινοβολία από τη φλόγα και με συναγωγή από την παροχή θερμού αέρα. Το αποτέλεσμα είναι η εξάτμιση της περιεχόμενης στα απορρίμματα υγρασίας και των πτητικών συστατικών.
- Πυρόλυση: Με την αύξηση της θερμοκρασίας τα περισσότερα πτητικά συστατικά εξατμίζονται.
- Ανάφλεξη: Η απαιτούμενη θερμότητα για την ανάφλεξη της καύσιμης ύλης προσδίδεται στα απορρίμματα μέσω ακτινοβολίας από τη φλόγα και τα τοιχώματα του φλογοθαλάμου.
- Αεριοποίηση και καύση: Η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας της πλήρους ανάφλεξης των απορριμμάτων προκαλεί την αεριοποίηση μιας ποικιλίας υλικών, που περιέχονται σε αυτά. Ο εναπομένον άνθρακας οξειδώνεται πλήρως, ενώ στο φλογοθάλαμο καίγονται τα απαέρια που παράχθηκαν από τις φάσεις της πυρόλυσης και της αεριοποίησης.
- Ολοκλήρωση της καύσης: Η ολοκλήρωση της καύσης αποδίδει ένα αρκετά αδρανοποιημένο (ανόργανο) στερεό υπόλειμμα στο τέλος της εσχάρας.



Σχήμα 2.1: Χαρακτηριστικά της μαζικής καύσης απορριμμάτων σε αποτεφρωτή με κινούμενες εσχάρες [Γιδαράκος Ε., 2006].

Μερικοί συνηθισμένοι τύποι εσχάρων είναι [Ανδρεαδάκης Α., 2001] :

Εσχάρα τύπου VKW : Αυτός ο τύπος είναι εγκατεστημένος σε πολλές χώρες της Ευρώπης, για παράδειγμα στο Dusseldorf της Γερμανίας, και το Edmonton του Ηνωμ. Βασιλείου. Αποτελείται από μία σειρά έξι κοίλων κυλίνδρων που μεταφέρουν προς τα κάτω τα στερεά απόβλητα υπό γωνία περίπου 30° ως προς το οριζόντιο επίπεδο και επιτυγχάνουν την απαιτούμενη ανάδευση. Κάθε κύλινδρος μπορεί να κινηθεί με διαφορετική ταχύτητα ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης καύση. Οι ταχύτητες αυτές συνήθως κυμαίνονται από 0.5-5 κύκλους ανά ώρα.

Εσχάρα τύπου Martin : Αυτή αποτελείται από μια εσχάρα που είναι εφοδιασμένη με κατακόρυφους άξονες διαδοχικά ακίνητους και κινητούς. Η κίνηση των αξόνων σπρώχνει το ρεύμα των ΑΣΑ προς τα πάνω υπό γωνία 30° αντίθετα με το νεοεισερχόμενο υλικό υποβοηθώντας έτσι την ξήρανση και την ανάφλεξή του.

Εσχάρα τύπου Volund : Αποτελείται από τρία επίπεδα που διαχωρίζονται από ένα φρεάτιο που επιτρέπει στο ρεύμα των ΑΣΑ να πέφτει από το ένα τμήμα στο άλλο. Στο κάθε επίπεδο το υλικό αναδεύεται με τη βοήθεια υδραυλικών μηχανισμών.

Εσχάρα τύπου Von Roll : Αποτελείται από μια σειρά επικλινών επιπέδων που έχουν την δυνατότητα να μετακινηθούν με την βοήθεια υδραυλικών βραχιόνων. Το ρεύμα των ΑΣΑ μετακινείται προς τα κάτω υπό γωνία 15° . Είναι εγκατεστημένη κυρίως στις ΗΠΑ και στην Ιαπωνία.

Εσχάρα τύπου De Bartolomeis : Είναι και αυτή πολυεπίπεδη με δυνατότητα μεταβολής του αριθμού και της κλίσης των επιπέδων.

Εσχάρα τύπου Widmer & Ernst : Η σπουδαιότερη διαφορά της με τους άλλους τύπους είναι η δυνατότητα της για διπλή κίνηση και προς τις δυο κατευθύνσεις.

- Αποτεφρωτής περιστρεφόμενου κλιβάνου

Ένας αποτεφρωτής περιστρεφόμενου κλιβάνου (Σχήμα 2.2) επεξεργάζεται με επιτυχία πολλά είδη απορριμμάτων και ρύπους, που άλλες τεχνολογίες δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν. Αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο κλίβανο, έναν μετακαυστήρα και ένα σύστημα ελέγχου των παραγόμενων αέριων εκπομπών.

Στους συμβατικούς περιστρεφόμενους κλιβάνους, ο κύλινδρος είναι οριζόντιος και περιστρέφεται περί του άξονά του. Το υλικό (πρέπει να υπάρχει σταθερή και συνεχής παροχή) αναδεύεται, καίγεται και οδηγείται στο άλλο άκρο με την κατάλληλη κλίση (2-4%). Η καταστροφή των οργανικών επιτυγχάνεται με συνδυασμό υψηλών θερμοκρασιών και κατάλληλου χρόνου παραμονής, ο οποίος επηρεάζει και το βαθμό ανάμιξης. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερος ο χρόνος παραμονής που απαιτείται για την καύση [Μουσιόπουλος Ν., Καραγιαννίδης Α., 2002].

Βασικές παράμετροι λειτουργίας ενός τέτοιου είδους αποτεφρωτή είναι:

- ο η θερμοκρασία εξόδου του περιστρεφόμενου κλιβάνου και του μετακαυστήρα, η οποία πρέπει να οδηγεί σε πλήρη αποτέφρωση των απορριμμάτων,
- ο η εσωτερική πίεση του κλιβάνου, που πρέπει να είναι αρνητική για την αποφυγή αέριων εκπομπών και σωματιδίων στην ατμόσφαιρα,
- ο ο ρυθμός παροχής αέρα (οξυγόνου) και των απορριμμάτων, έτσι ώστε οι συνθήκες λειτουργίας του καυστήρα να είναι οι βέλτιστες.

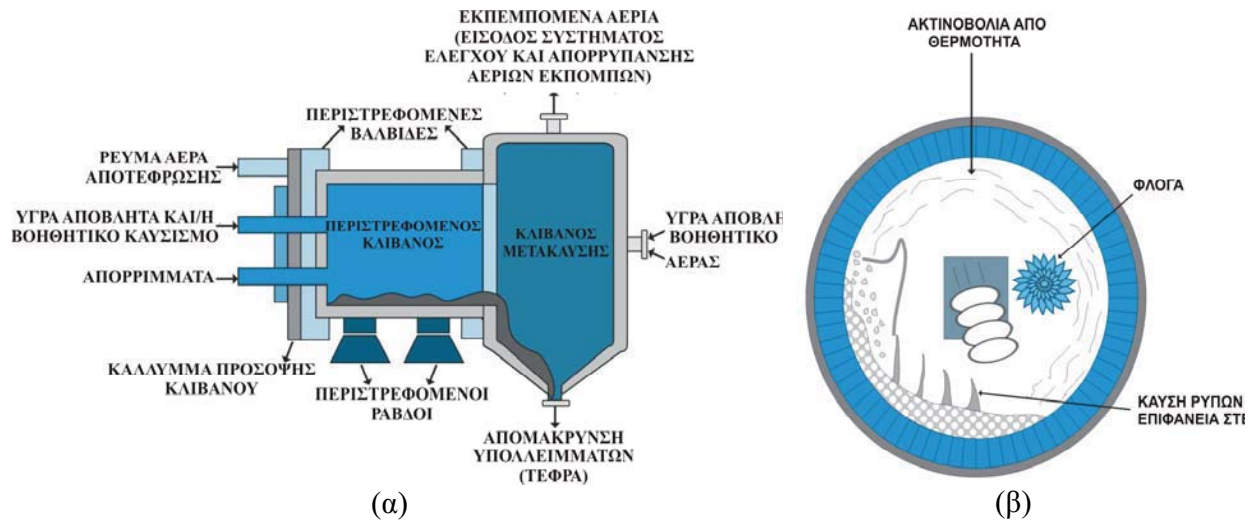
Η σύσταση των απαερίων καύσης αποτελεί δείκτη απόδοσης του κλιβάνου και δεδομένου ότι λειτουργεί με περίσσεια οξυγόνου, τα απαέρια θα πρέπει να περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις CO και υδρογονανθράκων και μειωμένες ποσότητες υπολειμμάτων αποτέφρωσης.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

- ο Έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί μεγάλη ποικιλία αποβλήτων.
- ο Τα απορρίμματα δε χρειάζονται προεπεξεργασία.
- ο Ελέγχεται εύκολα ο χρόνος παραμονής των απορριμμάτων στον κλίβανο.
- ο Επιτυγχάνεται αποτελεσματική επαφή με τον αέρα.

ενώ στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται τα παρακάτω:

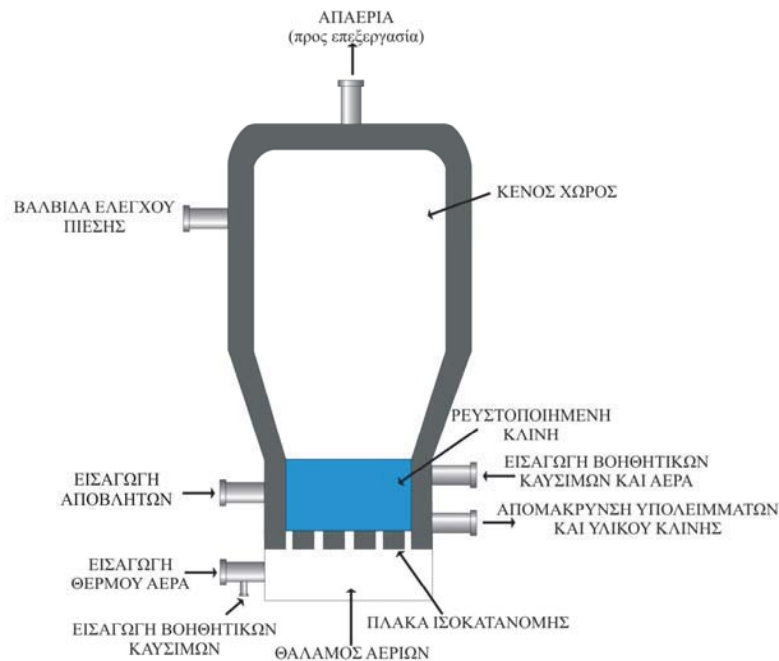
- ο Παραγωγή μεγάλης ποσότητας σωματιδίων λόγω υψηλής στροβιλότητας και τριβής που δημιουργείται στον κλίβανο.
- ο Απαιτείται μεγάλη ποσότητα περίσσειας αέρα (100-150%).
- ο Ένα μεγάλο μέρος της θερμότητας χάνεται με τη στάχτη.
- ο Είναι αναγκαίος συχνά ένας θάλαμος μετάκαυσης [Μουσιόπουλος Ν., Καραγιαννίδης Α., 2002].



Σχήμα 2.2 : (α) Αποτεφρωτής περιστρεφόμενου κλιβάνου [LaGrega M. et al., 2001], (β) Κάθετη τομή περιστρεφόμενου κλιβάνου [Freeman H., 1998].

- Αποτεφρωτής ρευστοποιημένης κλίνης

Ο αποτεφρωτής ρευστοποιημένης κλίνης (Σχήμα 2.3) χρησιμοποιεί ένα στρώμα άμμου ή αλουμίνας (κλίνη), πάνω στο οποίο εισάγονται τα απορρίμματα. Κάτω από το στρώμα αυτό διοχετεύεται αέρας με τέτοια παροχή, ώστε ολόκληρη η κλίνη να βρίσκεται σε αιώρηση και σε θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία ανάφλεξης των υφιστάμενων ρύπων. Το παρεχόμενο οξυγόνο, οι έντονες συνθήκες ανάμιξης και η αυξημένη θερμοκρασία έχουν ως αποτέλεσμα την εξάτμιση και την καταστροφή των οργανικών ρύπων.



Σχήμα 2.3 : Αποτεφρωτής ρευστοποιημένης κλίνης [LaGrega M. et al., 2001].

Βασική λειτουργική παράμετρο για το συγκεκριμένο είδος αποτεφρωτών αποτελεί η θερμοκρασία, η οποία ορίζεται σύμφωνα με την τροφοδοσία των απορριμμάτων, των παραγόμενων απαερίων και ενός βοηθητικού υλικού καύσης. Η τιμή της κυμαίνεται μεταξύ 750 – 880°C, χαμηλότερη σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες αποτέφρωσης, γεγονός που οφείλεται στην καλή ανάμιξη του προς επεξεργασία αποβλήτου. Το απαιτούμενο οξυγόνο καύσης και ο χρόνος παραμονής των απορριμμάτων αποτελούν επίσης σημαντικές παραμέτρους λειτουργίας ενός αποτεφρωτή ρευστοποιημένης κλίνης, οι οποίες καθορίζονται με βάση το ρυθμό τροφοδοσίας των προς επεξεργασία απορριμμάτων.

Οι υψηλές θερμοκρασίες που συντηρούνται στην άνω της κλίνης περιοχή και οι διαστάσεις του κλιβάνου παρέχουν επαρκή χρόνο παραμονής (περίπου 3-5 δευτερόλεπτα), έτσι ώστε όλες οι οσμές να οξειδώνονται. Παρόλα αυτά οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να συντελέσουν σε αύξηση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου και των βαρέων μετάλλων.

Η αμμώδης κλίνη λειτουργεί σαν μία δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας μέσα στον καυστήρα προσδίδοντας μία σημαντική θερμική αδράνεια στο σύστημα. Έτσι, τα συστήματα ρευστοποιημένης κλίνης μπορούν να αντιμετωπίσουν διακυμάνσεις στα χαρακτηριστικά των εισερχομένων στερεών, το περιεχόμενο σε ξηρά στερεά ή το ρυθμό τροφοδότησης. Επιπλέον, οι καυστήρες ρευστοποιημένης κλίνης μπορούν να αντιμετωπίσουν επιτυχώς με αποδοτικό από ενεργειακής άποψης τρόπο προσωρινές διακοπές (2-3 ημερών).

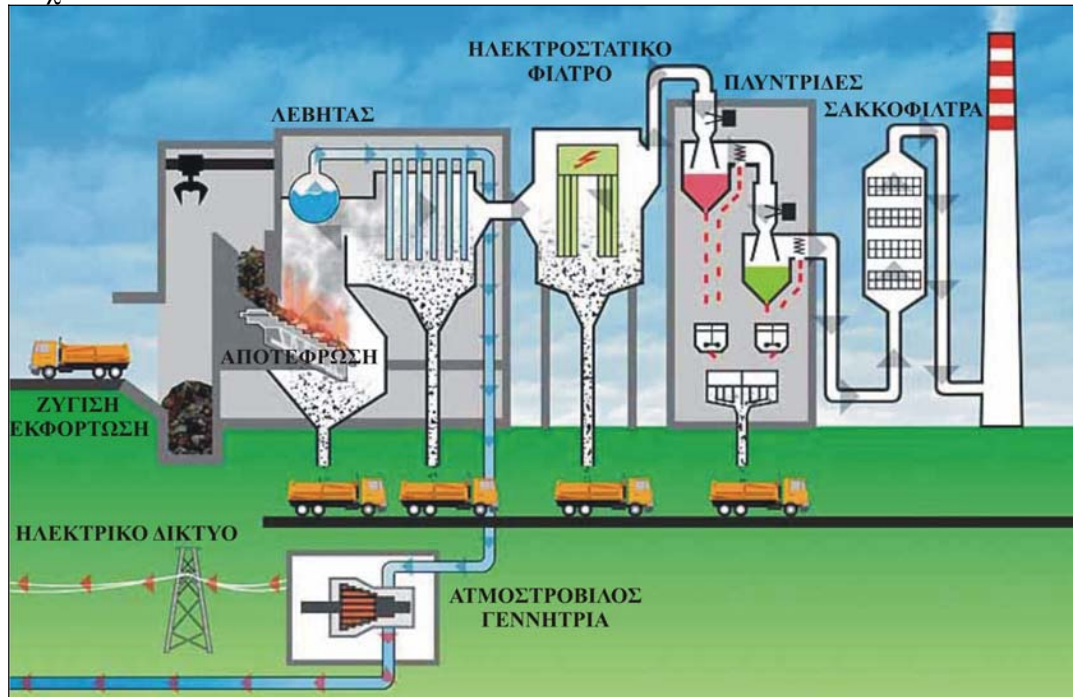
Η ικανότητα των καυστήρων ρευστοποιημένης κλίνης να συμμορφώνονται με τα αυστηρά κριτήρια για την ατμοσφαιρική ρύπανση και η αξιοσημείωτη αξιοπιστία και σταθερότητα αυτού του συστήματος καθιστούν τη διεργασία της ρευστοποιημένης κλίνης ως την πιο ενδεδειγμένη επιλογή [Smith 1992, WEF 1992].

Τα κύρια πλεονεκτήματα ενός αποτεφρωτή ρευστοποιημένης κλίνης περιλαμβάνουν τα εξής:

- αποφυγή εμφάνισης τοπικών διαφορών θερμοκρασίας και επομένως μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων, που είναι αποτέλεσμα ατελούς καύσης, λόγω διαφορών θερμοκρασίας,
- δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης δύσκολων καυσίμων, με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και τέφρα,
- αύξηση του βαθμού μετατροπής του καυσίμου και πιο αποδοτική αξιοποίηση του αέρα καύσης, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερες απαιτήσεις περίσσειας αέρα (στην προκείμενη περίπτωση περίπου 55% έναντι του συνήθους 100%).

Για την αξιοποίηση της παραγόμενης θερμότητας και την ανάκτηση ενέργειας, οι σύγχρονοι αποτεφρωτές διαθέτουν ειδικούς λέβητες (boilers), με τη βοήθεια των οποίων η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Στη συνέχεια, ο παραγόμενος ατμός χρησιμοποιείται είτε ως πηγή θέρμανσης, είτε ως μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση ατμοστρόβιλων και γεννητριών.

Μια ολοκληρωμένη μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 2.4) αποτελείται από επιμέρους τμήματα τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια :



Σχήμα 2.3 : Τυπική μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [www.bsu.hr].

I. Ζυγιστήριο

Το σύστημα ζύγισης των στερεών αποβλήτων πρέπει να είναι πρακτικό και να ελαχιστοποιεί το χρόνο παραμονής των οχημάτων σε αυτό.

II. Χώρος Υποδοχής

Λόγω του γεγονότος ότι η προσκόμιση των αποβλήτων δεν γίνεται σε συνεχή βάση (σε αντίθεση με την τροφοδοσία της εγκατάστασης) είναι απαραίτητη η ύπαρξη χώρου υποδοχής – προσωρινής αποθήκευσής τους. Ο σχεδιασμός του χώρου γίνεται με τρόπο τέτοιο, έτσι ώστε να εξασφαλίζονται τα εξής:

- ο χρόνος εκφόρτωσης να είναι όσο το δυνατό μικρότερος,
- να παραλαμβάνονται όλα τα προσκομιζόμενα απόβλητα,
- να επιτυγχάνεται ομογενοποίηση των προσκομιζόμενων προς τροφοδοσία αποβλήτων και
- να εξασφαλίζεται απρόσκοπτη τροφοδοσία της εγκατάστασης.

Επίσης, ο σχεδιασμός του χώρου υποδοχής πρέπει να βασίζεται στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Πιο συγκεκριμένα:

- ο πυθμένας του χώρου πρέπει να έχει κατάλληλη κλίση για την απομάκρυνση των στραγγισμάτων και των νερών έκπλυσης.
- Λόγω της δημιουργίας σκόνης πρέπει να προβλέπεται σύστημα απομάκρυνσης και ανανέωσης του αέρα.

- Για την αποφυγή έκλυσης οσμών αποφεύγεται η παραμονή των στερεών αποβλήτων στο χώρο για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των δύο ημερών.

III. Σύστημα τροφοδοσίας

Το σύστημα τροφοδοσίας (γερανός, ταινία) πρέπει να είναι προσαρμοσμένο στο ρυθμό και την ταχύτητα τροφοδοσίας της εγκατάστασης. Επίσης, βασική προϋπόθεση είναι η ισομερής τροφοδοσία της εστίας καύσης, η οποία επιτυγχάνεται μηχανικά ή υδραυλικά.

IV. Εσχάρες

Το σύστημα των εσχάρων αποτελεί ένα από τα πιο βασικά μέρη μιας εγκατάστασης καύσης. Οι εσχάρες είναι στερεωμένες στα τοιχώματα της εστίας καύσης πάνω σε φέροντα μηχανισμό και εκτελούν τις εξής λειτουργίες:

- μεταφορά των στερεών αποβλήτων
- επίτευξη ομοιόμορφης παροχής αέρα
- αναμόχλευση των υλικών στη ζώνη κύριας καύσης
- μεταφορά της παραγόμενης τέφρας

Οι εσχάρες πρέπει να επικαλύπτονται με υλικό υψηλής αντοχής σε μηχανικές καταπονήσεις καθώς και σε θερμικές και χημικές επιδράσεις. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δίδεται στην ανθεκτικότητά τους έναντι στο θείο και το χλώριο, τα οποία σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες δημιουργούν έντονες διαβρωτικές συνθήκες.

V. Εστίες Καύσης

Η ανάφλεξη των στερεών αποβλήτων στις εγκαταστάσεις καύσης επιτυγχάνεται με χρήση ειδικού καυστήρα, ο οποίος λειτουργεί με βοηθητικό καύσιμο. Βασικές παράμετροι για την σωστή λειτουργία των εστιών καύσης είναι:

- επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας
- επαρκής χρόνος καύσης
- επίτευξη συνθηκών στροβιλισμού / ομοιογενούς καύσης των αποβλήτων

VI. Λέβητας

Ο λέβητας είναι το σύστημα με το οποίο ανακτάται το ενεργειακό περιεχόμενο της καύσιμης ύλης, μέσω παραγωγής ατμού. Βασικές παράμετροι για τη σωστή λειτουργία του λέβητα είναι η πίεση, η θερμοκρασία και ο ρυθμός παραγωγής του ατμού. Η κατασκευή του φέρει εξωτερική επένδυση έτσι ώστε να επιτυγχάνεται στεγανοποίηση, αποφυγή εισροής αέρα και θερμομόνωσή του. Επιπλέον, τα υλικά κατασκευής του πρέπει να είναι ανθεκτικά τόσο στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό όσο και στις μεγάλες θερμοκρασιακές διαφορές που παρατηρούνται ανάμεσα στο εσωτερικό και το εξωτερικό της κατασκευής.

Επίσης, υφίσταται και δεύτερο εξωτερικό στρώμα μόνωσης για το οποίο δεν απαιτούνται ειδικές αντοχές σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (πυρίμαχα τούβλα, υαλοβάμβακας κλπ).

VII. Σύστημα απομάκρυνσης των υπολειμμάτων

Οι ποσοστιαίες ποσότητες υπολειμμάτων (κατά βάρος αποβλήτων) είναι οι εξής:

- υπολείμματα τα οποία εξέρχονται από τις εσχάρες: 20 - 35%

- ο υπολείμματα τα οποία διαπερνούν τις εσχάρες: 1 - 2%

Τα υπολείμματα συγκεντρώνονται σε χοάνες από όπου με ειδικό σύστημα μεταφέρονται για ψύξη.

VIII. Περιστροφικός Κλίβανος

Ο κλίβανος αποτελείται από το σύστημα υποδοχής, το δοσομετρικό σύστημα, τον περιστροφικό κύλινδρο, το σύστημα παροχής αέρα, τον επιπλέον καυστήρα, το θάλαμο μετάκαυσης και το σύστημα απομάκρυνσης της σκόνης και της τέφρας.

Το απόβλητο εισέρχεται στον κλίβανο όπου αναδεύεται και υφίσταται θερμική επεξεργασία. Ο κλίβανος πρέπει να είναι επενδυμένος με πυρίμαχα υλικά ενώ απαιτείται συνεχής και σταθερή παροχή αποβλήτων. Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον κλίβανο κυμαίνεται από 800 - 1400°C και η αποτελεσματική καύση επιτυγχάνεται με κατάλληλο συνδυασμό της θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής των αποβλήτων. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία τόσο μικρότερος χρόνος παραμονής απαιτείται και αντιστρόφως.

Λόγω του γεγονότος ότι ο χρόνος παραμονής των παραγόμενων αερίων στον κλίβανο είναι μικρός, για να επιτευχθεί πλήρης καύση τους τοποθετείται θάλαμος μετάκαυσης. Τα υπολείμματα του κλιβάνου οδηγούνται μέσω χοάνης στο σύστημα ψύξης, όπως περιγράφηκε παραπάνω.

IX. Εφεδρικοί καυστήρες

Κάθε εγκατάσταση καύσης στερεών αποβλήτων διαθέτει και εφεδρικούς καυστήρες, που τίθενται αυτομάτως σε λειτουργία όταν σημειωθεί πτώση της θερμοκρασίας των απαερίων κάτω από 850 °C [Φάττα Δ., 2006].

2.2.1 Συστήματα ελέγχου αέριας ρύπανσης

Οι μονάδες επεξεργασίας των παραγόμενων απαερίων, αποτελούν ένα ιδιαίτερα σημαντικό τμήμα των εγκαταστάσεων αποτέφρωσης ΑΣΑ και ένα από τα πιο δαπανηρά στάδια της όλης διαδικασίας. Η απομάκρυνση των ρύπων από τα απαέρια μπορεί να γίνει με ποικίλους τρόπους. Ο σχεδιασμός των διαφόρων συστημάτων δεν εξαρτάται τόσο από την ποιότητα των καθαρών αερίων που επιβάλλουν οι κανονισμοί και πρέπει να είναι σχεδόν η ίδια παντού στον κόσμο, όσο από το κόστος της επένδυσης και/ή λειτουργίας, τη χρήση ή τη διάθεση των υπολειμμάτων ή το διαθέσιμο χώρο που υπάρχει στην περίπτωση παλιών εγκαταστάσεων που απαιτούν αναβάθμιση.

Στις μέρες μας στις εγκαταστάσεις που είναι σε πλήρη λειτουργία συναντάμε κάθε είδους τεχνολογία και κάθε είδους συνδυασμό των βελτιωμένων επιλογών που προσφέρονται. Κάθε ένα σύστημα εγγυάται την εναρμόνιση με τα πιο αυστηρά όρια αερίων εκπομπών που υπάρχουν σήμερα. Η επιλογή της πιο κατάλληλης στρατηγικής καθαρισμού των απαερίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές συνθήκες. Σημαντικούς παράγοντες αποτελούν οι διοικητικές ρυθμίσεις (άδειες για υγρά απόβλητα, διάθεση των

στερεών υπολειμμάτων), οι επιλογές και οι αγορές για μια ενδεχόμενη ανάκτηση και τέλος το κόστος της επένδυσης και το λειτουργικό κόστος του συνόλου του συστήματος.

Στις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης απορριμμάτων χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες για την απομάκρυνση :

- της ιπτάμενης τέφρας
- των όξινων αερίων
- συγκεκριμένων ρύπων όπως Hg ή PCDD/Fs και
- των οξειδίων του αζώτου

Σε σύγχρονες εγκαταστάσεις ακολουθώντας την τάση να απλοποιούνται οι διαδικασίες καθαρισμού, κάποια από τα στάδια μπορούν να συνδυαστούν.

- Απομάκρυνση σωματιδίων

Από τις τρεις κύριες κατηγορίες αέριων ρύπων τα αιωρούμενα σωματίδια είναι ίσως εκείνα που ελέγχονται ευκολότερα. Ταξινομούνται είτε ανάλογα με το μέγεθός τους, είτε ανάλογα με την προέλευσή τους. Σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 1 μm θεωρούνται ως σκόνη και λόγω του μικρού μεγέθους δεν αποτίθενται στο έδαφος αλλά συμπεριφέρονται ως αέρια. Σωματίδια με διάμετρο μεγαλύτερη από 10 μm συνήθως εναποτίθενται στο έδαφος. Τα σωματίδια τέφρας που συναντώνται στα απαέρια ενός λέβητα με διάμετρο 100 μm ή μικρότερη ονομάζονται συνοπτικά ιπτάμενη τέφρα.

Η τεχνολογία για τον έλεγχο των αιωρουμένων σωματιδίων είναι η πρώτη που αναπτύχθηκε. Η απόδοση συλλογής ποικίλει σημαντικά ανάλογα με το σύστημα αλλά συνήθως κυμαίνεται από 50% για απλά μηχανικά συστήματα, μέχρι και περισσότερο από 99% για τους ηλεκτροστατικούς κατακρημνιστές. Οι διαχωριστές αιωρουμένων σωματιδίων μπορεί να βασίζονται στην ξαφνική μείωση της ταχύτητας των αερίων, στην απότομη αλλαγή της διεύθυνσης της ροής, στην πρόσκρουση του αερίου ρεύματος σε μία σειρά από πτερύγια, και στην χρήση κεντρομόλου δύναμης με ανεμιστήρα.

Το πρώτο βήμα στα περισσότερα συστήματα καθαρισμού απαερίων είναι η απομάκρυνση της ιπτάμενης τέφρας. Αυτό μπορεί να συμβεί μέσω

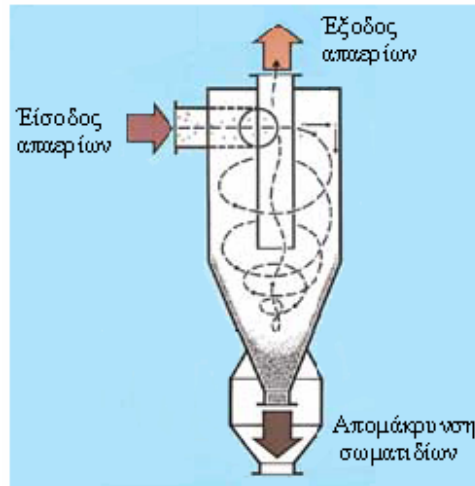
- κυκλώνων
- ηλεκτροστατικών φίλτρων (ESP) ή
- σακκόφίλτρων

i) Κυκλώνες

Οι κυκλωνικές διατάξεις στηρίζονται στην αύξηση της φαινόμενης διαφοράς πυκνότητας μεταξύ στερεού και αερίου όταν ασκείται φυγόκεντρη δύναμη (πολλαπλασιασμός της επιτάχυνσης της βαρύτητας g).

Τα απαέρια εισέρχονται εφαπτομενικά με υψηλή ταχύτητα σε έναν κάθετο κυλινδρικό θάλαμο με κωνικό πυθμένα (Σχήμα 2.5). Η κεντρομόλος δύναμη που ενεργεί πάνω στα σωματίδια τα κάνει να συγκρούονται στα τοιχώματα του θαλάμου και να κατακάθονται στον πυθμένα του από όπου και απομακρύνονται. Το αέριο διαφεύγει μέσω ενός κεντρικού σωλήνα. Λόγω της περιορισμένης ικανότητάς τους στην απομάκρυνση λεπτών

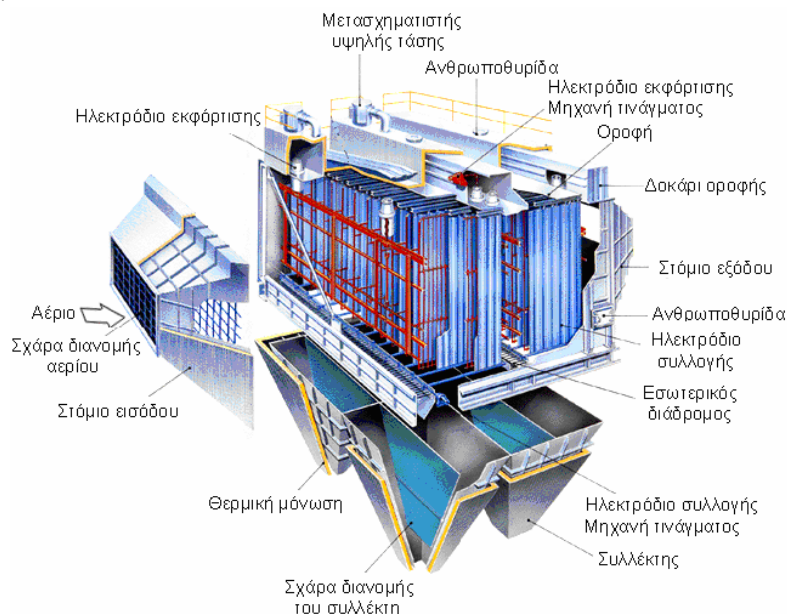
σωματιδίων οι κυκλώνες δεν συναντώνται πλέον σε σύγχρονες εγκαταστάσεις ή χρησιμοποιούνται για την προεπεξεργασία της ιπτάμενης τέφρας.



Σχήμα2.5 : Κυκλωνική διάταξη [Vehlow J., 2006].

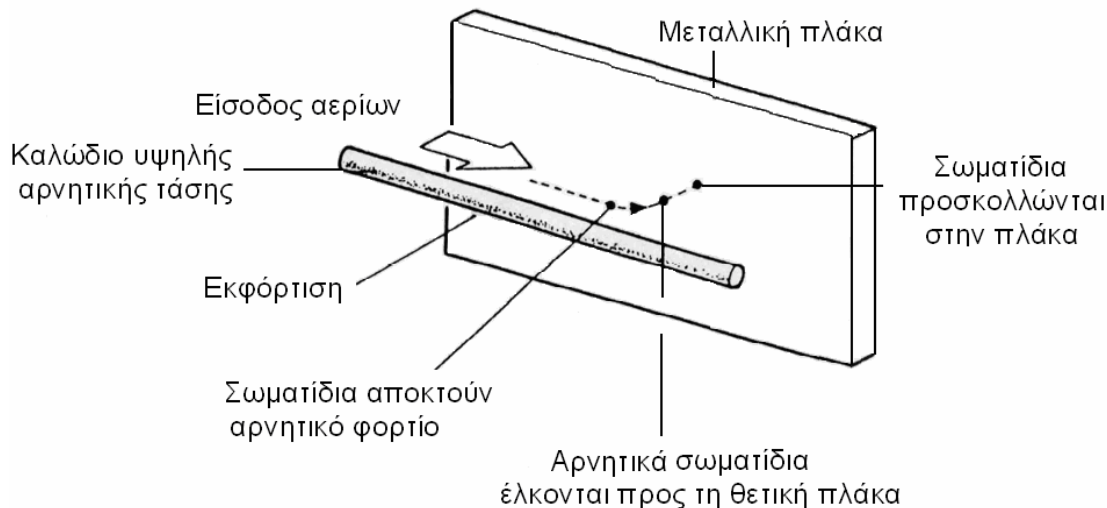
ii) Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές (ESP)

Λόγω του απλού σχεδιασμού τους, της μικρής απώλειας πίεσης και της εύκολης λειτουργίας τους οι ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές (ElectroStatic Precipitator) χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο σε εγκαταστάσεις αποτέφρωσης απορριμμάτων για το διαχωρισμό της ιπτάμενης τέφρας όσο και σε άλλες διεργασίες ανάφλεξης όπως σε εργοστάσια καύσης λιγνίτη. Ένας σύγχρονος ηλεκτροστατικός κατακρημνιστής (Σχήμα 2.6) που αποτελείται από τουλάχιστον δύο και συχνά τρεις τομείς εγγυάται ποσοστά απομάκρυνσης της τέφρας >99% στα σωματίδια με μεγέθη μεταξύ 0,01 και >100 μm . Οι ESP με τρεις τομείς μπορούν να επιτύχουν επίπεδα τέφρας στα καθαρά αέρια της τάξης του 1 mg/m^3 .



Σχήμα2.6 : Ηλεκτροστατικός κατακρημνιστής [Vehlow J., 2006].

Η βασική αρχή λειτουργίας των ηλεκτροστατικών κατακρημνιστών φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Η τάση λειτουργίας στους ηλεκτροστατικούς κατακρημνιστές είναι υψηλή (30.000 μέχρι 60.000V) και τα σωματίδια αποκτούν ένα φορτίο από τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόδια που κρέμονται μέσα στην ροή των αερίων. Λόγω του φορτίου αυτού δε, έλκονται από τις γειωμένες πλάκες, που περιοδικά, με τίναγμα, καθαρίζονται από την συγκεντρωμένη ύλη.

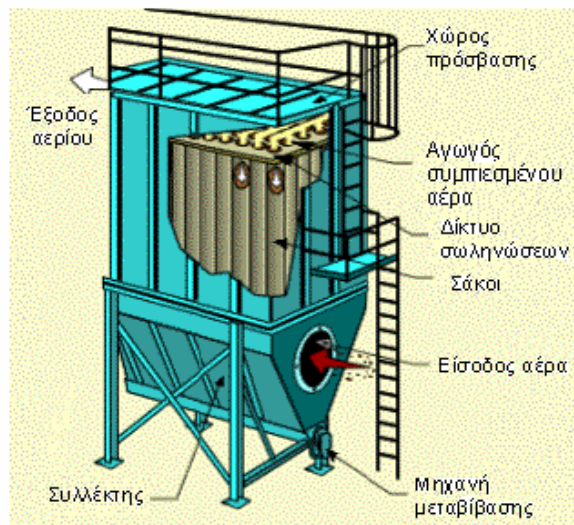


Σχήμα 2.7 : Βασική αρχή λειτουργίας ηλεκτροστατικού κατακρημνιστή.

iii) Σακκόφιλτρα

Ακόμα μικρότερες εκπομπές από αυτές των ESP, ειδικότερα για τα μικρότερου μεγέθους σωματίδια, μπορούν να επιτευχθούν με τα σακκόφιλτρα. Σ'αυτά, τα ακατέργαστα αερία περνούν από το εξωτερικό τμήμα προς το εσωτερικό, μέσα από υφασμάτινες σάκους που στηρίζονται σε μεταλλικά πλέγματα. Η ιπτάμενη τέφρα μένει στην εξωτερική επιφάνεια του φίλτρου και απομακρύνεται περιοδικά με την βοήθεια αέρα που φυσάει από το εσωτερικό. Αυτός ο καθαρισμός απελευθερώνει τα σωματίδια, τα οποία πέφτουν σε έναν συλλέκτη (Σχήμα 2.8). Τα σακκόφιλτρα εγγυώνται συγκεντρώσεις σκόνης στα καθαρά αέρια $< 1 \text{ mg/m}^3$.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στην περίπτωση των σακκόφιλτρων είναι το υψηλό κόστος συντήρησης, καθώς έχουν διάρκεια ζωής 18-36 μήνες. Για σακκόφιλτρα χρησιμοποιούνται συνήθως είτε σάκκοι από Teflon, είτε υφαντά φίλτρα από υαλοβάμβακα με διάφορα επιστρώματα.



Σχήμα 2.8 : Διάταξη σακκόφιλτρου [Vehlow J., 2006].

- Χημικός καθαρισμός απαερίων

Το βήμα που ακολουθεί την πρωτογενή καθίζηση της ιπτάμενης τέφρας στα συστήματα ελέγχου της αέριας ρύπανσης είναι συνήθως, ο χημικός καθαρισμός των απαερίων που μπορεί να λάβει χώρα με δύο κύριες μεθόδους:

- τις υγρές πλυντρίδες και
- τις στεγνές πλυντρίδες.

Η αρχή της μεθόδου των υγρών πλυντρίδων βασίζεται στην απορρόφηση των αερίων συστατικών από ένα υγρό. Η αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας διαδικασίας απορρόφησης εξαρτάται πρώτα από όλα από την διαθέσιμη επιφάνεια του υγρού που ελέγχει την μεταφορά μάζας από την αέρια στην υγρή φάση. Έτσι ο στόχος του σχεδιασμού τους είναι η επίτευξη μιας μεγάλης επιφάνειας επαφής μεταξύ του αερίου ρεύματος και μιας υγρής φάσης (συνήθως υδατικής) ώστε ο ρύπος να μεταφερθεί – διαλυθεί σ' αυτήν και να απομακρυνθεί από την αέρια φάση.

Όταν χρησιμοποιείται νερό η ρόφηση ονομάζεται φυσική ενώ όταν προστίθεται στο νερό και μια ένωση που αντιδρά με το ρύπο η ρόφηση ονομάζεται χημική. Στο χημικό καθαρισμό η διαλυμένη ένωση λειτουργεί ως συνεχής «καταβόθρα» (sink) για το ρύπο με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός απομάκρυνσής του από το αέριο ρεύμα.

Κατά το σχεδιασμό των συστημάτων χημικού καθαρισμού πρέπει να συνυπολογιστούν:

- Η αύξηση της απόδοσης σε απομάκρυνση (ή εναλλακτικά η επίτευξη της ίδιας απομάκρυνσης σε διάταξη μικρότερου όγκου).
- Η αύξηση του κόστους λόγω κατανάλωσης χημικών.
- Η ενδεχόμενη απαίτηση ανακύκλωσης του χημικού, προβλήματα αποθέσεων κλπ.

Η επιλογή διαλύτη (υγρής φάσης) γίνεται βασιζόμενη στις παρακάτω παραμέτρους:

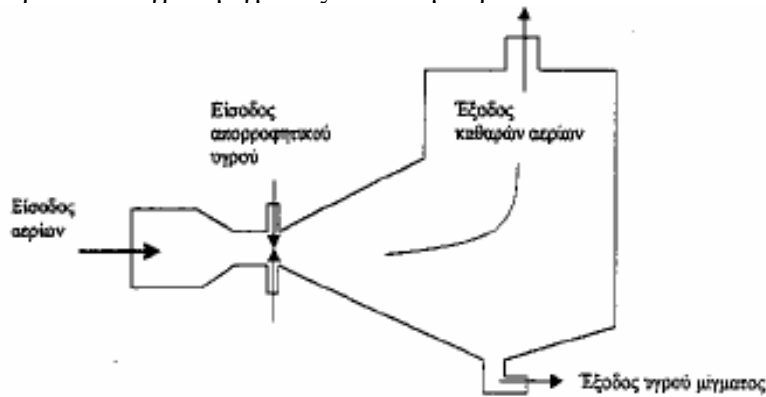
- Διαλυτότητα των ααεριών. Γενικώς, επιδιώκεται ανάλογη χημική φύση με το προς απομάκρυνση αέριο.
- Πτητικότητα του υγρού. Όσο πιο χαμηλή γίνεται για να μην υπάρχουν απώλειες, αφού το αέριο ρεύμα μετά την επαφή θα βγαίνει κορεσμένο.
- Διαβρωτικότητα.
- Ιξώδες. Επιδιώκεται χαμηλό ιξώδες για μικρή πτώση πίεσης, καλή ροή και καλούς συντελεστές μεταφοράς.
- Χημική σταθερότητα.
- Χαμηλό σημείο πήξης.

Οι διάφορες διατάξεις που εφαρμόζονται είναι:

- καθαριστές με διάταξη venturi,
- πύργοι με πληρωτικό υλικό,
- πύργοι με δίσκους,
- πύργοι ψεκασμού.

i) Διάταξη Venturi

Στη διάταξη venturi (Σχήμα 2.9) έχουμε ομοροή υγρού και αερίου ρεύματος. Στο στόμιο εισόδου του υγρού, λόγω της στένωσης αυξάνεται η ταχύτητα του αερίου (και των στερεών, αν περιέχει) – προβλεπόμενη από το ισοζύγιο ενέργειας (σχέση Bernoulli) – και δημιουργούνται τύρβες οι οποίες ενισχύουν την αποτελεσματικότητα της απορρόφησης. Ταυτόχρονα ελαττώνεται το μέγεθος των σταγονιδίων κάτι που επιδρά αυξητικά στην απόδοση. Στη συνέχεια, λόγω ελάττωσης της ταχύτητας γίνεται ο διαχωρισμός αερίου και υγρού μίγματος και απομακρύνονται.



Σχήμα 2.9 : Διάταξη Venturi [Γρηγοροπούλου Ε., 2005].

ii) Πύργοι πληρωτικού υλικού

Είναι γεμάτοι με αδρανές πληρωτικό υλικό που προσφέρει μεγάλη ειδική επιφάνεια (ανά μονάδα όγκου πύργου) και μικρή αντίσταση στη ροή (πτώση πίεσης). Το υγρό ρέει σε λεπτό στρώμα (αντιροή). Η διάταξη δεν μπορεί να λειτουργήσει όταν στα απαέρια περιέχονται και αιωρούμενα σωματίδια (φράξιμο των διακένων).

iii) Πύργοι με δίσκους

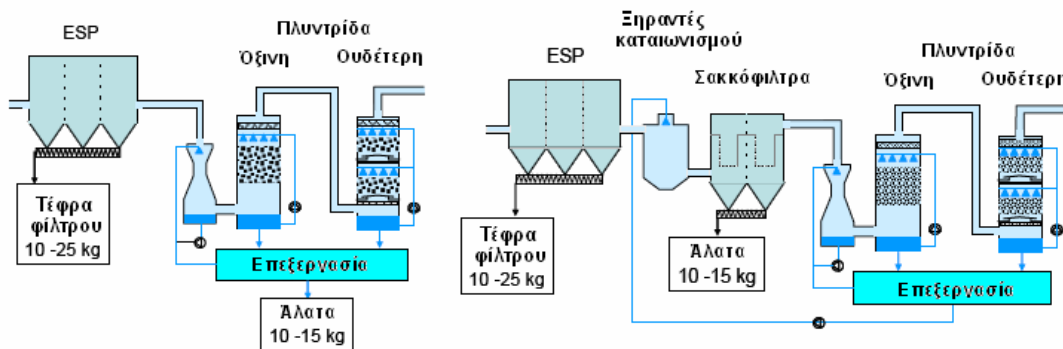
Περιέχουν οριζόντιους δίσκους οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι ώστε να προσφέρουν αυξημένη διεπιφάνεια αερίου – υγρού. Το υγρό ρέει από την κορυφή του πύργου δημιουργώντας ένα λεπτό στρώμα πάνω στους δίσκους. Οι δίσκοι είναι διάτρητοι και το

αέριο ρεύμα διέρχεται μέσα από τις οπές. Η διάταξη δεν μπορεί να λειτουργήσει στην περίπτωση ύπαρξης σωματιδίων.

iv) Πύργοι ψεκασμού

Επεξεργάζονται μεγάλες παροχές αερίων με μικρή πτώση πίεσης και έχουν υψηλές αποδόσεις για χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων. Χρησιμοποιούνται και για την απομάκρυνση αιωρούμένων σωματιδίων. Γενικώς, έχουν χαμηλότερη απόδοση από τα άλλα συστήματα, αλλά έχουν χαμηλότερο κόστος (πάγιο και λειτουργικό) [Γρηγοροπούλου Ε., 2005].

Η χρήση πλυντριδών είναι μια κοινή στρατηγική στις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης απορριμμάτων στην κεντρική Ευρώπη. Σήμερα, στις περισσότερες περιπτώσεις συναντάται ως μια εγκατάσταση δύο σταδίων ξεκινώντας με έναν όξινο καθαριστή που ακολουθείται από ένα ουδέτερο ή ελαφρώς αλκαλικό καθαριστή. Ο όξινος καθαριστής είναι τύπου venturī ή ψεκασμού και μειώνει την θερμοκρασία των απαερίων από 180-200 °C στους 63-65 °C. Κατά το δεύτερο στάδιο χρησιμοποιούνται κυρίως πύργοι με πληρωτικό υλικό. Οι υγρές πλυντρίδες λειτουργούν με ή χωρίς (που είναι και το σύστημα που προτιμάται στις μέρες μας) την αποδέσμευση υγρών εκροών (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10 : Υγρή πλυντρίδα με εκροή υγρών αποβλήτων (αριστερά) και χωρίς (δεξιά) [Vehlow J., 2006].

Τα συστήματα δύο σταδίων έχουν πολύ υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης για τα αλογόνα HF, HCl και HBr, για τον υδράργυρο και για το SO₂ και έτσι οι συγκεντρώσεις αυτών των συστατικών στα απαερία μειώνονται εύκολα πολύ κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπών.

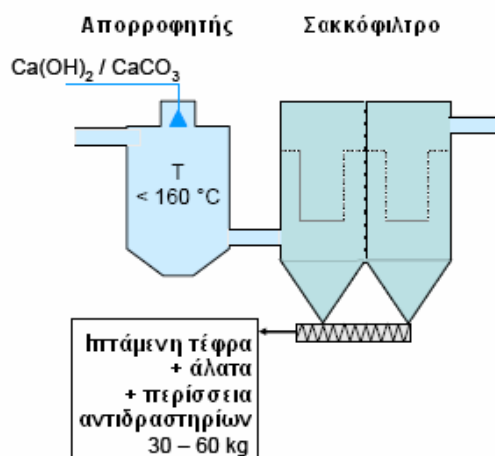
Οι υγρές πλυντρίδες αρχικά λειτουργούσαν με την απελευθέρωση υγρών εκροών, κάτι το οποίο απαιτούσε την αδρανοποίηση και την αποτελεσματική απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων ή άλλων τοξικών ρύπων. Τα επιτρεπόμενα όρια για την εκροή των υγρών σε ένα σύστημα αποχέτευσης είναι πολύ αυστηρά και για την επίτευξή τους απαιτείται μεγάλη προσπάθεια κυρίως για τον Hg και το Cd.

Οι αρχές συχνά απαγορεύουν την αποδέσμευση των υγρών αποβλήτων. Σ' αυτές τις περιπτώσεις οι διαλύτες καθαρισμού πρέπει να εξατμιστούν, κάτι το οποίο γίνεται με τη βοήθεια ψεκαστών ξήρανσης που βρίσκονται αμέσως μετά τον βραστήρα (Σχήμα 2.10 δεξιά). Τα στερεά υπολείμματα απομακρύνονται από τη ροή του αερίου με τη βοήθεια

ενός σακκόφιλτρου. Μια άλλη μέθοδος για την εξάτμιση των διαλυτών καθαρισμού είναι με την ξήρανσή τους σε εξωτερικές συσκευές θερμαινόμενες με ατμό.

Οι διεργασίες των στεγνών και ημι-στεγνών πλυντρίδων είναι απλές και κατά συνέπεια φτηνές σε ότι αφορά το κόστος αγοράς τους και χρησιμοποιούνται σε πολλές εγκαταστάσεις σε όλο τον κόσμο. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο απορροφητής εισάγεται είτε απευθείας στο αγωγό των απαερίων είτε στον ψεκαστή ξήρανσης κατάντι του βραστήρα σε ξηρή μορφή (ξηρή διεργασία) ή σαν λάσπη (ημι-ξηρή διεργασία). Τα υπολείμματα καθαρισμού στις περισσότερες περιπτώσεις αφαιρούνται από τα απαέρια μέσω σακκόφιλτρων. Σε κάποιες εγκαταστάσεις, λαμβάνει χώρα και ο διαχωρισμός της ιπτάμενης τέφρας πριν τη διάταξη του ψεκαστή ξήρανσης. Για αυτό το σκοπό στις περισσότερες περιπτώσεις τοποθετούνται κυκλώνες.

Η στεγνή πλυντρίδα μπορεί να εφαρμοστεί με τη βοήθεια διάφορων αντιδραστηρίων όπως ασβεστόλιθου, CaCO_3 , οξειδίου του ασβεστίου, CaO , ασβέστη, και Ca(OH)_2 . Στις μέρες μας δεν χρησιμοποιούνται πλέον διεργασίες που χρησιμοποιούν CaCO_3 και CaO καθώς δεν εγγυώνται την εναρμόνισή τους με τα συνηθισμένα όρια εκπομπών. Μια τυπική διάταξη στεγνής πλυντρίδας φαίνεται στο Σχήμα 2.11 [Vehlow J., 2006].



Σχήμα 2.11 : Διάταξη στεγνής πλυντρίδας [Vehlow J., 2006].

Αποτίμηση πλυντρίδων απαερίων

Πλεονεκτήματα:

- Σχετικά μικρή πτώση πίεσης (σε σύγκριση με πύργους ρόφησης σε στερεά).
- Κατασκευή από πλαστικό, συνεπώς αντοχή στη διάβρωση.
- Ικανότητα επίτευξης μεγάλων ρυθμών μεταφοράς.
- Ευελιξία σε μεταβολή μεγέθους (προσθήκη τμημάτων).
- Χαμηλό πάγιο κόστος.
- Μικρές απαιτήσεις σε χώρο.
- Ικανότητα συλλογής σωματιδίων ταυτοχρόνως.

Μειονεκτήματα:

- Αποθέσεις (σωματιδίων ή αλάτων) δημιουργούν προβλήματα στη λειτουργία.
- Οι κατασκευές από πλαστικό είναι ευαίσθητες σε θερμοκρασιακές αλλαγές.

- Έχουν υψηλό κόστος συντήρησης. [Γρηγοροπούλου Ε., 2005].

-Μείωση NOx

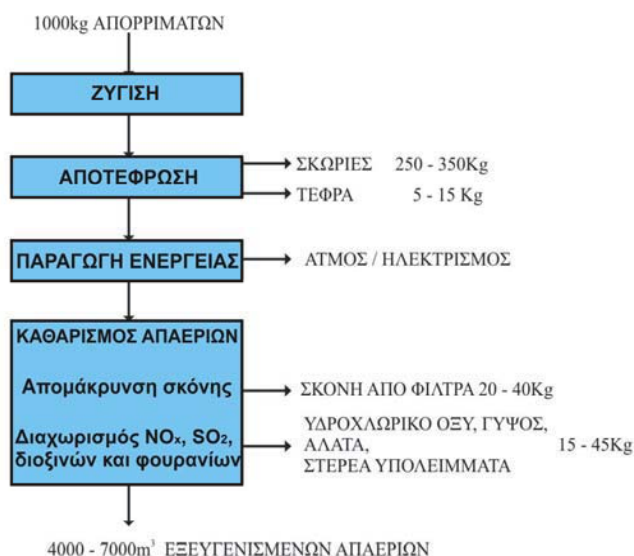
Για τη βελτίωση των εκπομπών NOx ακολουθούνται δύο στρατηγικές:

- η μη καταλυτική απομάκρυνση (NSCR) με την είσοδο αμμωνίας ή κάποιας άλλης ένωσης του αζώτου στην θερμή φλόγα του αερίου σε θερμοκρασία 950 °C ή
- η επιλεκτική καταλυτική μείωση (SCR) σε θερμοκρασία 250 - 300 °C, στις περισσότερες περιπτώσεις στο τέλος του καθαρισμού των απαερίων αφού το αέριο έχει ξαναθερμανθεί.

Και με τις δύο στρατηγικές επιτυγχάνεται η εναρμόνιση με τα όρια της οδηγίας της Ε.Ε. περί αποτέφρωσης των απορριμμάτων που είναι 200 mg/m³. Παρόλα αυτά στην περίπτωση που απαιτούνται ακόμα χαμηλότερες εκπομπές η μέθοδος SCR έχει καλύτερα αποτελέσματα [Vehlow J., 2006].

2.2.2 Διάγραμμα ροής

Βάσει των παραπάνω, η διεργασία της αποτέφρωσης των ΑΣΑ μπορεί να περιγραφεί σχηματικά από το διάγραμμα ροής του ακόλουθου σχήματος (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12 : Διάγραμμα ροής μιας τυπικής σύγχρονης εγκατάστασης αποτέφρωσης αστικών απορριμμάτων [Γιδαράκος Ε., 2006].

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι για τον συνολικό έλεγχο της διαδικασίας της αποτέφρωσης, αλλά και των παραγόμενων αέριων ρύπων, κρίνεται αναγκαία η συχνή δειγματοληψία και η ανάλυση της σύστασης των:

- εισερχόμενων στερεών απορριμμάτων,
- παραγόμενων στερεών (υπολείμματα – ιπτάμενη τέφρα),
- παραγόμενων απαερίων,
- υγρών αποβλήτων, που παράγονται κατά την επεξεργασία των απαερίων.

2.3 Πυρόλυση

Η πυρόλυση (Εικόνα 2.1) αποτελεί μια σχετικά νέα θερμική διεργασία, η οποία αν και αναπτύχθηκε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, μόλις τα τελευταία 20 – 30 χρόνια άρχισε να εφαρμόζεται στην επεξεργασία ΑΣΑ. Γενικά, δεν αποτελεί μια ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδο θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ, τουλάχιστον στην Ευρώπη, λόγω της μειωμένης ενεργειακής απόδοσης και οικονομικής βιωσιμότητάς της. Παρόλα αυτά, μη Ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Ιαπωνία, διαθέτουν εγκαταστάσεις πυρόλυσης στερεών απορριμμάτων, οι οποίες λειτουργούν αποδοτικά εδώ και πολλά χρόνια, γεγονός το οποίο πιθανότατα οφείλεται στις διαφορές των χαρακτηριστικών των απορριμμάτων τους (π.χ. ως προς το ποσοστό του οργανικού κλάσματος και τη θερμογόνο δύναμή τους), σε σχέση με εκείνα των Ευρωπαϊκών χωρών [Alibardi L., Cossu R., 2006].



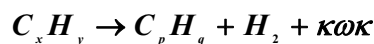
Εικόνα 2.1 : Εγκατάσταση πυρόλυσης [Φάττα Δ., 2006].

Η πυρόλυση εκπροσωπεί την θερμική αποσύνθεση των οργανικών συστατικών των απορριμμάτων, που λαμβάνει χώρα απουσία οξυγόνου (ή ελάχιστων ποσοτήτων οξυγόνου) και άλλων παραγόντων πρόκλησης αεριοποίησης, όπως CO₂, ατμός, κα. [Bilitewski B., 2006^b]. Τα απορρίμματα βρίσκονται μέσα σε ασάλινους αγωγούς και δεν έρχονται σε άμεση επαφή με φλόγα, καθιστώντας εφικτή την παραγωγή αερίων, χωρίς την άμεση καύση αυτών. Οι αρχικές αντιδράσεις της όλης διαδικασίας είναι ενδόθερμες, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι για την πραγματοποίησή τους απαιτείται η παροχή ενέργειας, είτε εξωτερικά, είτε εσωτερικά από την ελεγχόμενη καύση των προς επεξεργασία απορριμμάτων [Alibardi L. and Cossu R., 2006].

Οι αρχικές αντιδράσεις της πυρόλυσης περιλαμβάνουν κυρίως διασπάσεις, κατά τις οποίες χαμηλής πτητικότητας οργανικά συστατικά μετατρέπονται σε άλλα περισσότερο πτητικά συστατικά:

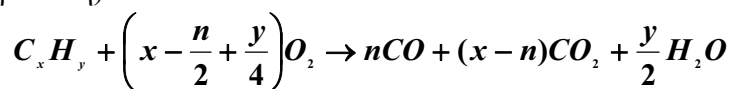


Επίσης, στις αρχικές αντιδράσεις πυρόλυσης περιλαμβάνονται συμπυκνώσεις, αφυδρογονώσεις και αντιδράσεις σχηματισμού δακτυλίων, οι οποίες προκαλούν τη μετατροπή των χαμηλής πτητικότητας οργανικών ενώσεων σε ένα στερεό ανθρακούχο υπόλειμμα (char - κωκ):

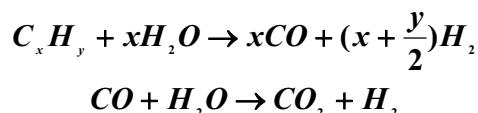


Τα πτητικά συστατικά που δημιουργούνται κατά τη διεξαγωγή των παραπάνω αντιδράσεων συμμετέχουν σε δευτερεύουσες αντιδράσεις και μπορούν να μετατραπούν σε ελαφρύτερα προϊόντα, αέρια ή κάρβουνο.

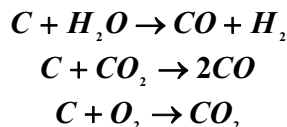
Κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης λαμβάνουν χώρα και άλλες αντιδράσεις των οργανικών ρύπων. Στην περίπτωση που υπάρχει οξυγόνο, πραγματοποιείται σχηματισμός μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα, σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση (οξειδωτική πυρόλυση):



Επίσης, τα υπάρχοντα οργανικά συστατικά είναι δυνατόν να αλληλεπιδράσουν με το νερό, σύμφωνα με τις εξής αντιδράσεις:

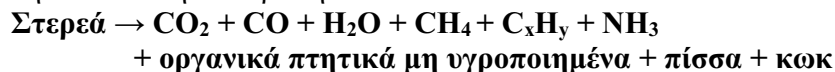


Τέλος, το ανθρακούχο στερεό υπόλειμμα (κωκ) που παράγεται κατά την πυρόλυση μπορεί να εξαερωθεί σε διοξείδιο του άνθρακα ή οξυγόνο, σύμφωνα με τις ακόλουθες αντιδράσεις:



Οι παραπάνω αντιδράσεις πραγματοποιούνται από όλων των ειδών τους οργανικούς ρύπους, που δύναται να περιέχονται στα προς επεξεργασία απορρίμματα. Ανάλογα με τη σύστασή τους, παράγονται και διαφορετικά προϊόντα, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν οξείδια του αζώτου, υδρόθειο, υδροχλώριο, υδροκυάνιο και άλλες επικίνδυνες ενώσεις που χρήζουν ειδικής επεξεργασίας πριν απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα.

Τυπικά, η πυρόλυση των οξυγονωμένων υδρογονανθράκων σε στερεά μορφή λαμβάνει χώρα σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



Στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την πυρόλυση των ΑΣΑ, οι οποίες κυμαίνονται από 100 έως 900°C, έχουμε την απομάκρυνση των πτητικών ενώσεων και τη διάσπαση πολύπλοκων υδρογονανθράκων σε απλούστερες ενώσεις. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται και ανθρακοποίηση χαμηλής θερμότητας ή καταστρεπτική

δίλυση [Bilitewski B., 2006^b]. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι επιμέρους αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την πυρολυτική αποδόμηση οργανικών ενώσεων.

Πίνακας 2.1: Πυρολυτική αποδόμηση οργανικών ενώσεων [Bilitewski B. et al., 1997].

Θερμοκρασία (°C)	Χημική αντίδραση
100 έως 120	Θερμική ξήρανση, αφυδάτωση
250	Αναγωγή, αποθείωση, μοριακή διάσπαση H ₂ O και CO ₂ , διάσπαση πολυμερισμένων μορίων, έναρξη διαχωρισμού H ₂ S
340	Διάσπαση δεσμών αλειφατικών ενώσεων, έναρξη διάσπασης μεθανίου και άλλων αλειφατικών ενώσεων
380	Φάση ανθρακοποίησης, συγκέντρωση άνθρακα στα υπολλείμματα
400	Διάσπαση δεσμών άνθρακα-οξυγόνου και άνθρακα-αζώτου
400 μέχρι 600	Αποσύνθεση ασφαλτούχων υλικών προς σχηματισμό χαμηλής θερμοκρασίας ελαιώδους φάσης και πίσσας
600	Διάσπαση ασφαλτούχων υλικών προς θερμοανθεκτικά υλικά (αέρια, μικρής αλυσίδας υδρογονάνθρακες), σχηματισμός αρωματικών ενώσεων (προϊόντων βενζολίου)
>600	Διμερισμός ολεφινών (αιθυλενίου) σε βουτυλένιο, αφυδρογόνωση προς σχηματισμό βουταδιένιου, αντίδραση αιθυλενίου προς σχηματισμό κυκλοεξανίου, θερμική αρωματοποίηση προς σχηματισμό βενζολίου και αρωματικών ενώσεων υψηλής πτητικότητας.

Με την πυρόλυση των στερεών απορριμμάτων σχηματίζονται τα εξής προϊόντα:

- αέρια: κυρίως υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα, κα., ανάλογα με τη σύσταση των απορριμμάτων,
- υγρά: ελαιώδες κλάσμα με υψηλή πυκνότητα και ιξώδες, που περιέχει απλά καρβοξυλικά οξέα (π.χ. οξικό οξύ), κετόνες (π.χ. ακετόνη), αλκοόλες (π.χ. μεθανόλη), καθώς και σύνθετους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες,
- στερεά: σχεδόν καθαρός άνθρακας (κωκ) και αδρανή υλικά (γυαλί, μέταλλα, κα.), που υπάρχουν στα απορρίμματα.

Στον Πίνακα 2.2 φαίνεται το ισοζύγιο των υλικών πυρόλησης.

Πίνακας 2.2 : Ισοζύγιο υλικών πυρόλησης [Ανδρεαδάκης Α. 2001].

Θερμοκρασία [°C]	Απορρίμματα [kg]	Αέρια [kg]	Οξέα και Πίσσες [kg]	Υπόλειμμα [kg]	Τελική μάζα [kg]
480	100	12.33	61.08	24.71	98.12
650	100	18.64	59.18	21.80	99.62
800	100	23.69	59.67	17.24	100.59
900	100	24.36	58.70	17.67	100.73

Με περαιτέρω επεξεργασία τα υγρά προϊόντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συνθετικό καύσιμο, καθώς το ενεργειακό περιεχόμενό τους εκτιμάται γύρω στα 1,6 MJ/kg. Το ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων αερίων, ανάλογα με το υλικό

εισόδου, κυμαίνεται μεταξύ 12.500 και 46.000kJ/Nm³ [Bilitewski B., 2006^b]. Επιπλέον, τα παραγόμενα στερεά μπορούν να επεξεργαστούν περαιτέρω για την ανάκτηση υλικών.

Αν η πυρόλυση λαμβάνει χώρα σε χαμηλές θερμοκρασίες (~500°C), τότε στα αέρια υπάρχουν και αρωματικές ενώσεις και φαινόλες. Για το λόγο αυτό, τις περισσότερες φορές η πυρόλυση συνδυάζεται με τη διεργασία της αποτέφρωσης των παραγόμενων αερίων σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η αναλογία των προαναφερόμενων προϊόντων εξαρτάται σημαντικά από τις κάτωθι παραμέτρους:

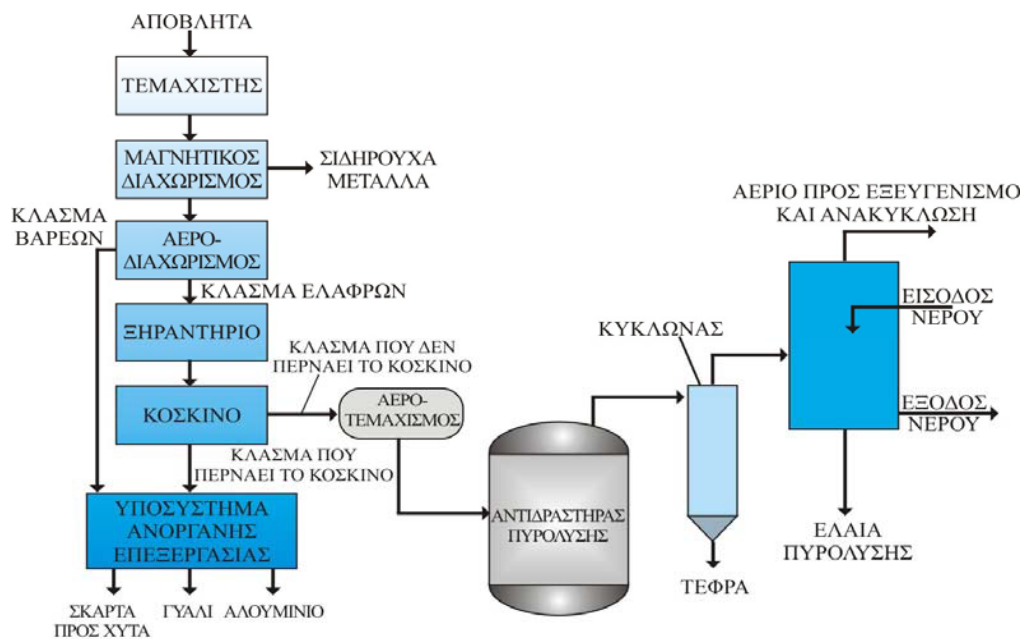
- τη σύσταση του αποβλήτου,
- τις συνθήκες θέρμανσης,
- τη θερμοκρασία πυρόλυσης,
- τον χρόνο αντίδρασης.

Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει αισθητά το στερεό υπόλειμμα, ελαττώνει το υγρό κλάσμα και αυξάνει τα αέρια προϊόντα. Στον Πίνακα 2.3 φαίνεται η σύνθεση αερίων πυρόλυσης σε σχέση με την θερμοκρασία [Α. Ανδρεαδάκης, 2001].

Πίνακας 2.3 : Σύνθεση αερίων πυρόλυσης [Α. Ανδρεαδάκης, 2001].

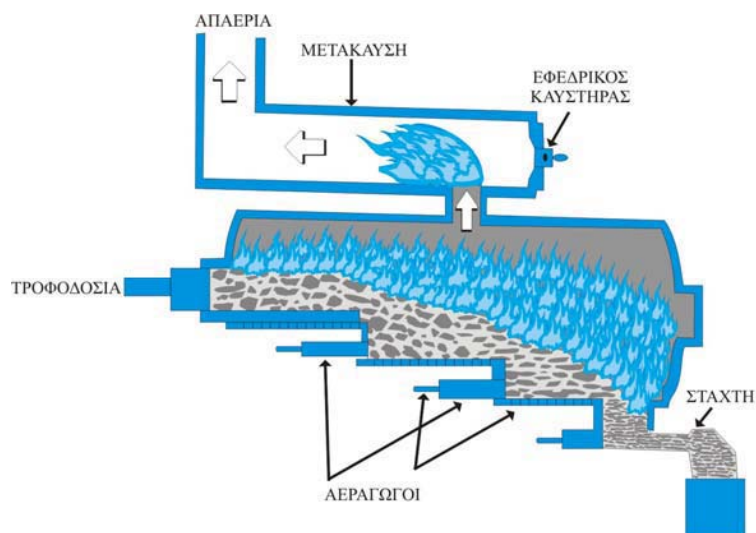
Αέρια % κατά όγκο	500°C	650°C	800°C	900°C
H	5.56	16.58	28.55	32.48
CH ₄	12.43	15.91	13.73	10.45
CO	33.50	30.49	34.12	35.25
CO ₂	44.77	31.78	20.59	18.31
C ₂ H ₄	0.45	2.18	2.24	2.43
C ₂ H ₆	3.03	3.06	0.77	1.07
Σύνολο	99.74	100.0	100.00	99.99

Για την εφαρμογή της διεργασίας της πυρόλυσης απαιτείται προεπεξεργασία (Σχήμα 2.13) των απορριμμάτων (απομάκρυνση μετάλλων, γυαλιού, κα.), έτσι ώστε στο θάλαμο πυρόλυσης να οδηγείται μόνο το οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων.



Σχήμα 2.13 : Διάγραμμα ροής της διεργασίας της πυρόλυσης [Γιδαράκος Ε., 2006].

Η πυρόλυση συνήθως λαμβάνει χώρα σε κοινούς αποτεφρωτές, όπου απλά αναπτύσσονται χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με την αποτέφρωση, διαθέτοντας όμως τις ίδιες δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας και παράλληλα παραγωγής «καυσίμων» (αέριων και υγρών). Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 2.14) παρουσιάζεται ένας τυπικός πυρολυτικός αντιδραστήρας.



Σχήμα 2.14 : Πυρολυτικός αντιδραστήρας με ελεγχόμενη παροχή οξυγόνου [Γιδαράκος Ε., 2006].

2.4 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση (Εικόνα 2.2) αποτελεί επίσης μια σχετικά νέα και μη ευρέως διαδεδομένη, στην Ευρώπη, μέθοδο θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ. Ουσιαστικά, περιλαμβάνει την μετατροπή του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων σε ένα μίγμα καύσιμων αερίων, μέσω μερικής οξείδωσης αυτού σε υψηλές θερμοκρασίες (400 έως 1500 °C) [Alibardi L. και Cossu R., 2006].



Εικόνα 2.2 : Εγκατάσταση αεριοποίησης [Φάττα Δ., 2006].

Ένα από τα πιο συνηθισμένα λάθη είναι η ταύτιση της πυρόλυσης με την αεριοποίηση των απορριμμάτων. Οι δύο μέθοδοι έχουν ομοιότητες, όπως τη μετατροπή των απορριμμάτων σε αέρια, στερεά και υγρά καύσιμα, αλλά παρουσιάζουν και βασική διαφορά κατά την εφαρμογή τους, η οποία μπορεί να συνοψιστεί ως εξής [Φάττα Δ., 2007]:

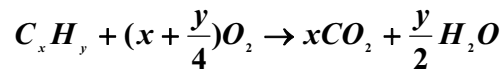
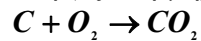
- Η πυρόλυση χρησιμοποιεί εξωτερική πηγή θερμότητας για να ενεργοποιηθούν οι ενδόθερμες αντιδράσεις θερμικής διάσπασης των απορριμμάτων, σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου.
- Η αεριοποίηση είναι αυτοσυντηρούμενη (χωρίς εξωτερική πηγή ενέργειας μετά το στάδιο της ανάφλεξης) και χρησιμοποιεί πρόσθετο καύσιμο αέριο, όπως για παράδειγμα ατμό, διοξείδιο του άνθρακα, αέρα ή οξυγόνο, για την επιπλέον μετατροπή των οργανικών υπολειμμάτων σε αέρια προϊόντα. Η ενέργεια που απαιτείται για την αντίδραση αεριοποίησης παράγεται με καύση μέρους του οργανικού υλικού στον αντιδραστήρα αεριοποίησης.

Στόχος της αεριοποίησης είναι η ατελής καύση των απορριμμάτων και η παραγωγή αερίου αποτελούμενου από CO, H₂ και αέριους υδρογονάνθρακες, το οποίο παρουσιάζει υψηλό θερμικό περιεχόμενο.

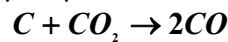
Η αεριοποίηση αποτελεί, θεωρητικά, το επόμενο στάδιο της πυρόλυσης, κατά το οποίο το υπολειμματικό κωκ της πυρόλυσης οξειδώνεται σε θερμοκρασίες >800°C, παρουσία περιορισμένων (μη στοιχειομετρικών) ποσοτήτων οξυγόνου. Η αεριοποίηση, όπως και η πυρόλυση, είναι μια διεργασία, η οποία μπορεί να αποτελέσει είτε τμήμα (σε συνδυασμό με τη διεργασία της αποτέφρωσης), είτε το σύνολο της θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ.

Οι κύριες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία της αεριοποίησης είναι [Γιδαράκος Ε., 2006]:

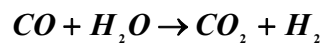
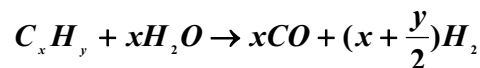
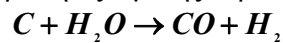
- Οξείδωση (εξώθερμη)



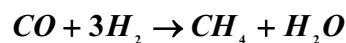
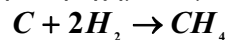
- Αντίδραση Boudouard (ενδόθερμη)



- Αντίδραση εξάτμισης νερού (ενδόθερμη)



- Αντίδραση σχηματισμού μεθανίου (εξώθερμη)



Τα τελικά προϊόντα της αεριοποίησης είναι:

- αέριο πλούσιο σε μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και κορεσμένους υδρογονάνθρακες (κυρίως μεθάνιο), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο,
- στερεό υπόλειμμα, που αποτελείται από άνθρακα και αδρανή,
- συμπυκνωμένο υγρό υπόλειμμα, που παρουσιάζει σύσταση παρόμοια με αυτή του υγρού κλάσματος, που παράγεται κατά την πυρόλυση.

Η ταχύτητα και η πορεία της αντίδρασης αεριοποίησης, καθώς επίσης και η σύσταση των παραγόμενων προϊόντων, εξαρτώνται από τις εξής παραμέτρους:

- το μέγεθος, τη διάμετρο των πόρων και την εσωτερική δομή της καύσιμης ύλης,
- την περιεχόμενη υγρασία,
- την επιφάνεια επαφής στερεών-αερίων,
- την αναπτυσσόμενη πίεση και θερμοκρασία,
- τον χρόνο παραμονής των ΑΣΑ εντός του θαλάμου πυρόλυσης

Τα παραγόμενα απαέρια εξαρτώνται από το είδος του μέσου αεριοποίησης. Στην περίπτωση που υπάρχει τροφοδοσία με αέρα, λόγω της παρουσίας του ατμοσφαιρικού αζώτου, η θερμογόνος δύναμη του αέριου προϊόντος είναι χαμηλή και κυμαίνεται γύρω

στα $0,35 \text{ MJ/m}^3$. Η δε τυπική σύστασή του είναι η εξής: 10% CO_2 , 20% CO , 15% H_2 , 2% CH_4 , 53% N_2 .

Στην περίπτωση που η τροφοδοσία αποτελείται από καθαρό οξυγόνο, το ενεργειακό περιεχόμενο του αέριου προϊόντος αυξάνεται στα $0,7 \text{ MJ/m}^3$. Η δε τυπική σύστασή του είναι η ακόλουθη :14% CO_2 , 50% CO , 30% H_2 , 4% CH_4 , 1% C_xH_y , 1% N_2 .

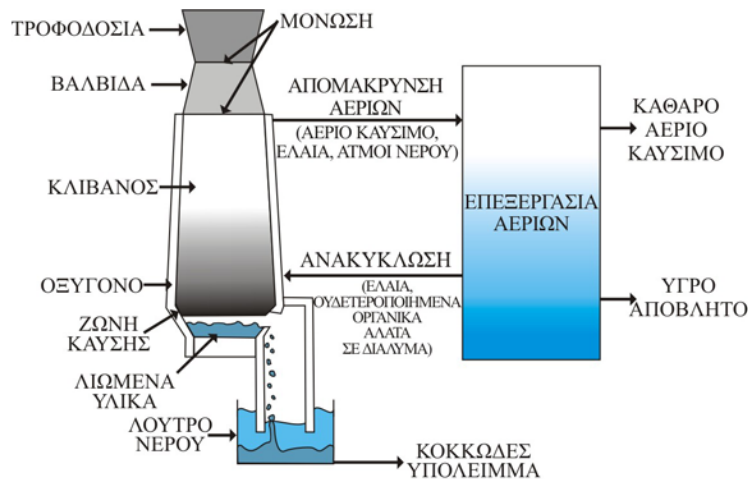
Το παραγόμενο αέριο μπορεί να αξιοποιηθεί κατά διάφορους τρόπους, όπως για:

- ο καύση για παραγωγή ατμού,
- ο τροφοδοσία μηχανής εσωτερικής καύσης, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας,
- ο κίνηση αεριοστροβίλου και ατμοπαραγωγή σε συνδυασμένο κύκλο,
- ο τροφοδοσία του δικτύου αερίου πόλης,
- ο τροφοδοσία σε βιομηχανία, όπως τσιμεντοβιομηχανία, για απ' ευθείας καύση σε εστία.

Το στερεό υπόλειμμα παρουσιάζει προσροφητικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του ενεργού άνθρακα του εμπορίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις τριτοβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων ή νερού, που προορίζεται για διάφορες χρήσεις.

Η ταχύτητα αντίδρασης αεριοποίησης εξαρτάται εκτός από την θερμοκρασία και από το πορώδες, τη διάμετρο των πόρων και από την εσωτερική δομή της καύσιμης ύλης. Απορρίμματα, που έχουν προέρθει από πυρόλυση, αεριοποιούνται ευκολότερα από μη επεξεργασμένα απορρίμματα. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση συμπαγούς συνεκτικού υλικού σε σχέση με χαλαρό ψαθυρό υλικό.

Στο Σχήμα 2.15 απεικονίζεται ένα τυπικό διάγραμμα ροής της διεργασίας της αεριοποίησης απορριμμάτων.



Σχήμα 2.15 : Διάγραμμα ροής της διεργασίας της αεριοποίησης [Γιδαράκος Ε., 2006].

Υπάρχουν πέντε βασικοί τύποι αεριοποιητών: (1) κάθετης σταθερής κλίνης, (2) οριζόντιας σταθερής κλίνης, (3) ρευστοποιημένης κλίνης, (4) πολλαπλών εστιών, (5) περιστροφικού κλιβάνου. Οι τρεις πρώτοι τύποι είναι οι πιο ευρέως διαδεδομένοι [Ανδρεαδάκης Α, 2001].

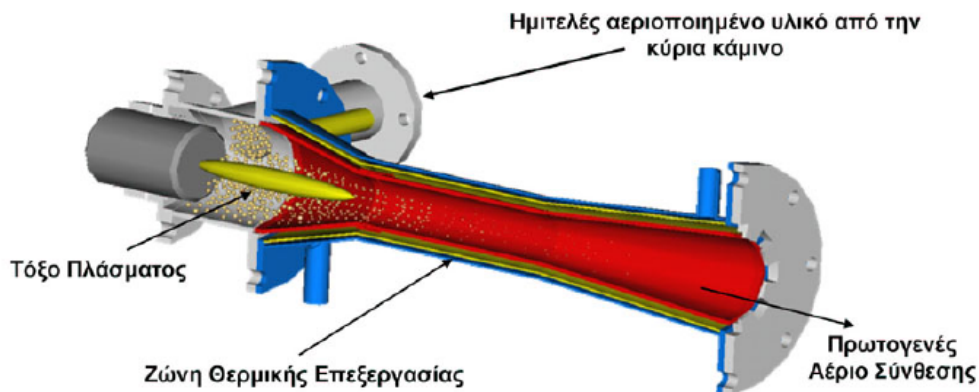
2.5 Τεχνική Πλάσματος

Η τεχνική του πλάσματος (Εικόνα 2.3) είναι μια καινούρια μέθοδος για την επεξεργασία των αποβλήτων σε υψηλές θερμοκρασίες, με την οποία τα απόβλητα μετατρέπονται μέσω του ηλεκτρισμού σε εύφλεκτο αέριο και σε ένα αδρανές υπόλειμμα.



Εικόνα 2.3 : Εγκατάσταση πλάσματος [Φάττα Δ., 2006].

Ο όρος πλάσμα (plasma) περιγράφει κάθε αέριο του οποίου τουλάχιστον ένα ποσοστό των ατόμων ή μορίων του είναι μερικά ή ολικά ιονισμένο. Ο ιονισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Στην περίπτωση της επεξεργασίας αποβλήτων με την τεχνική του πλάσματος, το αέριο μεταπίπτει στην κατάσταση του πλάσματος συνήθως με τη βοήθεια της θερμότητας που δημιουργείται από ηλεκτρική αντίσταση τόξου στήλης πλάσματος (Σχήμα 2.16). Το τόξο αυτό βρίσκεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων (άνοδος και κάθοδος) και αποτελείται από ένα ηλεκτρικά αγώγιμο αέριο, μετατρέποντας έτσι τον ηλεκτρισμό σε θερμότητα. Διάφορα αέρια όπως το αργό, το ήλιο, το μεθάνιο και ο ατμός μπορεί να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνονται πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές θερμικής επεξεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, η μέση θερμοκρασία του αερίου μπορεί να υπερβεί τους 6.000°C .



Σχήμα 2.16 : Αεριοποιητής πλάσματος (ΠΥΡΟΓΕΝΕΣΙΣ ΑΒΕΕ).

Το αέριο σε κατάσταση πλάσματος, παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη χημική δραστηριότητα συγκριτικά με τα περισσότερα αέρια σε μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις και μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε μια ποικιλία χημικών διαδικασιών. Τα πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση της τεχνολογίας αυτής προκύπτουν κατά κύριο λόγο από την υψηλή κινητική ενέργεια που χαρακτηρίζει τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια του πλάσματος, αλλά και τα άτομα του ουδέτερου αερίου. Η μερική μεταφορά αυτής της ενέργειας στις χημικές ενώσεις κάνει δυνατές χημικές αντιδράσεις, οι οποίες δεν θα μπορούσαν να ενεργοποιηθούν από τις εξώθερμες αντιδράσεις των συμβατικών διαδικασιών καύσης.

Εφαρμόζοντας την τεχνική του πλάσματος, λαμβάνει χώρα η αεριοποίηση / υαλοποίηση του περιεχομένου των εισερχομένων στερεών αποβλήτων. Πιο συγκεκριμένα, υπό την επίδραση των πολύ υψηλών θερμοκρασιών, το οργανικό κλάσμα των αποβλήτων αεριοποιείται και σχηματίζει το αέριο σύνθεσης (μίγμα μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου) και απαέρια. Ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου να λάβει χώρα η καταστροφή των οργανικών ενώσεων εξαρτάται από την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας και το χρόνο παραμονής των οργανικών ενώσεων στην ιονισμένη ατμόσφαιρα ή σε υψηλή θερμοκρασία. Παράλληλα, το ανόργανο μέρος των αποβλήτων μετατρέπεται σε τηγμένο υπόλειμμα, το οποίο μετά από ψύξη σχηματίζει ένα σταθερό, αδρανές, υψηλής πυκνότητας υαλώδες υλικό.

Τα τελικά προϊόντα από την εφαρμογή της τεχνολογίας του πλάσματος είναι:

- **Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης**, το οποίο προκύπτει από την πλήρη αεριοποίηση όλων των πτητικών συστατικών (οργανικό μέρος των αποβλήτων) του εισερχόμενου ρεύματος. Η σύσταση του αερίου καθώς και το ενεργειακό του περιεχόμενο, εξαρτώνται άμεσα από το είδος και το οργανικό περιεχόμενο του εισερχόμενου προς επεξεργασία ρεύματος αποβλήτων. Το παραπάνω μίγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποδοτικό καύσιμο στη μονάδα πλάσματος μειώνοντας με τον τρόπο αυτό το λειτουργικό κόστος ή εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εμπορεύσιμο προϊόν.
- **Το υαλώδους μορφής αδρανές υλικό**, το οποίο δημιουργείται από την υαλοποίηση του ανόργανου μέρους των επεξεργαζόμενων αποβλήτων. Το υπόλειμμα αυτό είναι ομογενές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κατασκευαστικό υλικό σε διάφορες εφαρμογές (π.χ. κατασκευή δρόμων, κατασκευή τούβλων και πλακιδίων πολύ υψηλής ποιότητας, κατασκευή υλικών πεζοδρόμησης, κ.λ.π.).
- **Τα απαέρια**, τα οποία ύστερα από κατάλληλα επεξεργασία διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα. Αναφορικά με τα ανώτατα επιτρεπτά όρια των εκπομπών από μονάδες που χρησιμοποιούν την τεχνολογία του πλάσματος, ισχύουν τα ίδια όρια με τις υπόλοιπες μονάδες θερμικής επεξεργασίας.
- **Τα υγρά απόβλητα**, τα οποία προκύπτουν από τη διαδικασία καθαρισμού των απαερίων. Ανάλογα με την ποιοτική και ποσοτική σύσταση των αποβλήτων αυτών, είναι δυνατόν να απαιτείται εγκατάσταση επεξεργασίας τους έτσι ώστε να είναι ασφαλής η τελική τους διάθεση.

Σε κάθε περίπτωση όμως, αναφορικά με τις επιτρεπτές τιμές στις παραγόμενες εκπομπές, αυτές ταυτίζονται με το σύνολο των τεχνικών θερμικής επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων.

Η τεχνολογία αυτή είναι κατάλληλη για την επεξεργασία μιας μεγάλης ποικιλίας αποβλήτων που έχουν υψηλό ποσοστό ανόργανων συστατικών και χαμηλή θερμική αξία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα μεγάλο ποσοστό της απαιτούμενης θερμότητας δίνεται από το πλάσμα και όχι από την οξείδωση των αποβλήτων.

Σε διεθνές επίπεδο, η χρήση της τεχνολογίας αυτής βρίσκεται σε πιλοτικό – επιδεικτικό στάδιο κυρίως επειδή :

- Η εφαρμογή της μεθόδου και το κόστος λειτουργίας μιας μονάδας πλάσματος είναι πολύ υψηλό
- Το τόξο του πλάσματος επιτρέπει το λιώσιμο μικρών μόνο ποσοτήτων αποβλήτων, κάτι που καθιστά μεγάλες ποσότητες αποβλήτων ακατάλληλες για επεξεργασία με αυτή τη μέθοδο.
- Δεν υπάρχει η κατάλληλη εμπειρία σε μεγάλη χρονική κλίμακα.

Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η τεχνολογία αυτή δεν είναι η κατάλληλη τεχνολογική επιλογή για την επεξεργασία των «καθημερινών» αποβλήτων και μπορεί να εφαρμοστεί κυρίως σε επικίνδυνα και ραδιενεργά απόβλητα.

Εν τούτοις, η τεχνική αυτή μπορεί να εξελιχθεί και να επεκταθεί σε ευρεία κλίμακα, ειδικά εάν ληφθούν υπόψη τα εξής:

- Οι μονάδες πλάσματος χαρακτηρίζονται από συγκριτικά μικρότερες απαιτήσεις χώρου, σε σχέση με τις άλλες θερμικές μεθόδους επεξεργασίας.
- Η άνοδος της θερμοκρασίας σε υψηλά επίπεδα επιτρέπει την επεξεργασία των αποβλήτων σε ένα κύριο στάδιο, περιορίζοντας την πολυπλοκότητα της μεθόδου.
- Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται οδηγούν σε αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα.
- Η μέθοδος παρουσιάζει σημαντική ευελιξία αναφορικά με το είδος των προς επεξεργασία αποβλήτων και επιπλέον, οδηγεί στην παραγωγή λιγότερων αερίων, μειωμένου ρυπαντικού φορτίου σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους καύσης.

2.6 Καινοτόμες θερμικές μέθοδοι επεξεργασίας

Οι καινοτόμες μέθοδοι Θ.Ε. συνδυάζουν την καύση, την πυρόλυση και την αεριοποίηση και οι μονάδες εφαρμογής τους αποτελούνται από τυποποιημένες κατασκευές συμβατικών μονάδων. Οι σπουδαιότεροι λόγοι της γρήγορης εξάπλωσης των νέων μεθόδων είναι τα προκύπτοντα, λόγω εφαρμογής τους, οικολογικά (ελάχιστες εκπομπές αέριων ρύπων και μικρές ποσότητες τηγμένης σκωρίας μέσω διαχωρισμού πλύσης), ενεργειακά (εξοικονόμηση και ενεργειακή ανεξάρτηση) και οικονομικά (φθηνότερη κατασκευή) οφέλη. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των μεθόδων Noell και Thermostelect (βλ. παρακάτω), όχι μόνο οι ποσότητες των ρύπων είναι ελάχιστες αφού η

αεριοποίηση λαμβάνει χώρα με καθαρό οξυγόνο, αλλά επίσης παράγεται ηλεκτρική ενέργεια με την αξιοποίηση του αέριου σύνθεσης.

2.6.1 Θερμόλυση

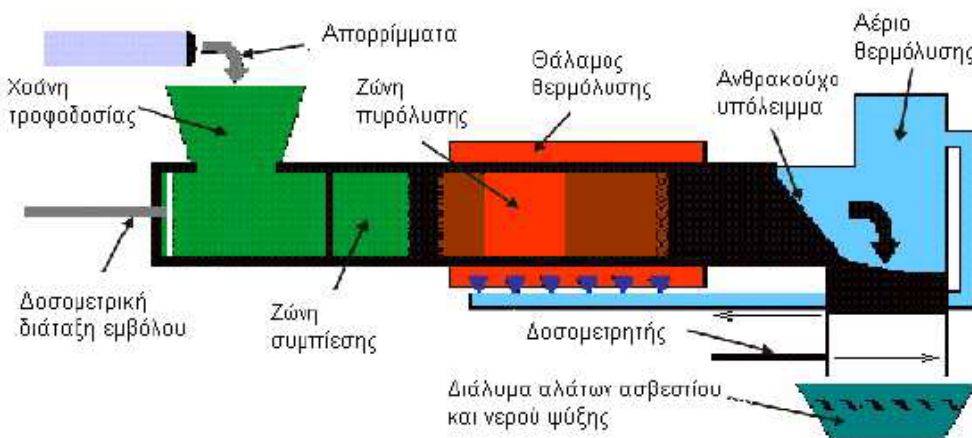
Κατά τη μέθοδο αυτή (Σχήμα 2.17) παράγεται ανθρακούχο υπόλειμμα με την εμπορική ονομασία «carbor». Είναι παρόμοια με την επεξεργασία διύλισης (cracking) που χρησιμοποιείται στα διυλιστήρια για την παραγωγή διαφόρων κλασμάτων του αργού πετρελαίου. Η τεχνική αυτή ανταποκρίνεται στις ανάγκες περιοχών με μικρό πληθυσμό και τουριστικών περιοχών με έντονη διακύμανση του πληθυσμού. Από την άποψη αυτή συζητείται η καταλληλότητά της για περιπτώσεις όπως τα Ελληνικά νησιά. Τα στάδια της μεθόδου είναι:

- (α) Μηχανική επεξεργασία–διαχωρισμός–αποθήκευση.
- (β) Ξήρανση σε εναλλάκτη θερμότητας αντιρροής (διαχωρισμός αέριας φάσης και στερεάς προς αντιδραστήρα).
- (γ) Θερμόλυση της στερεάς φάσης στο θάλαμο (αποικοδόμηση στους 5000 °C).
- (δ) Επεξεργασία στερεών προϊόντων (αδρανών).
- (ε) Επεξεργασία της ιλύος.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι:

- Η ανάκτηση των μετάλλων για επαναχρησιμοποίηση (αν δεν έχουν φτάσει στο σημείο τήξης).
- Η μικρή κατανάλωση ύδατος.
- Η παραγωγή εμπορεύσιμου Carbor.
- Το χαμηλό ρυπαντικό φορτίο των παραγόμενων υγρών και αερίων αποβλήτων.
- Τα χαμηλά κόστη κατασκευής και επεξεργασίας.

Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του CARBOR μοιάζουν με αυτά του λιγνίτη ενώ συγκρινόμενο με συμβατικά βιομηχανικά καύσιμα, παρουσιάζει το σημαντικό πλεονέκτημα της χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κλιβάνους (τσιμεντοβιομηχανία, πλινθοποιία), χωρίς ιδιαίτερες επενδύσεις για την αποθήκευσή του.

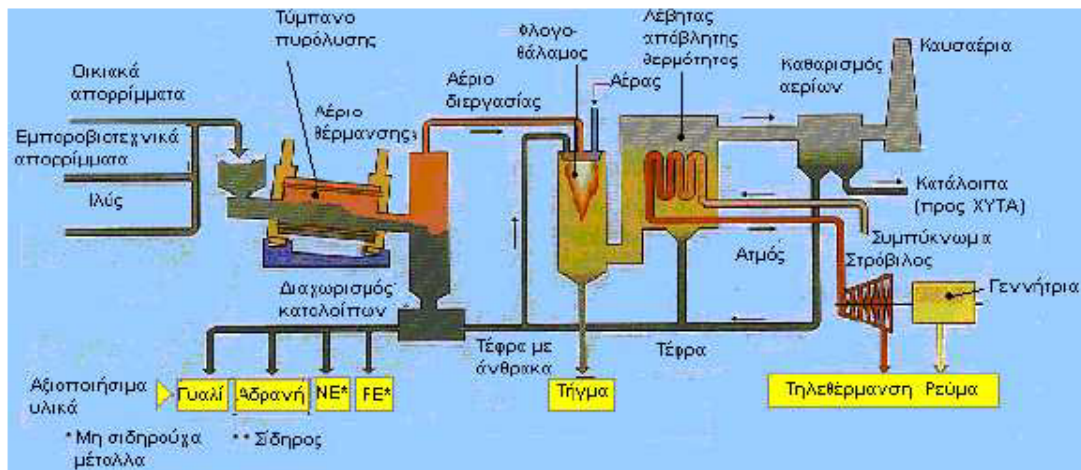


Σχήμα 2.17 : Η μέθοδος της θερμόλυσης [Μουσιόπουλος Ν., Καραγιαννίδης Α., 2002].

2.6.2 Μέθοδος Siemens

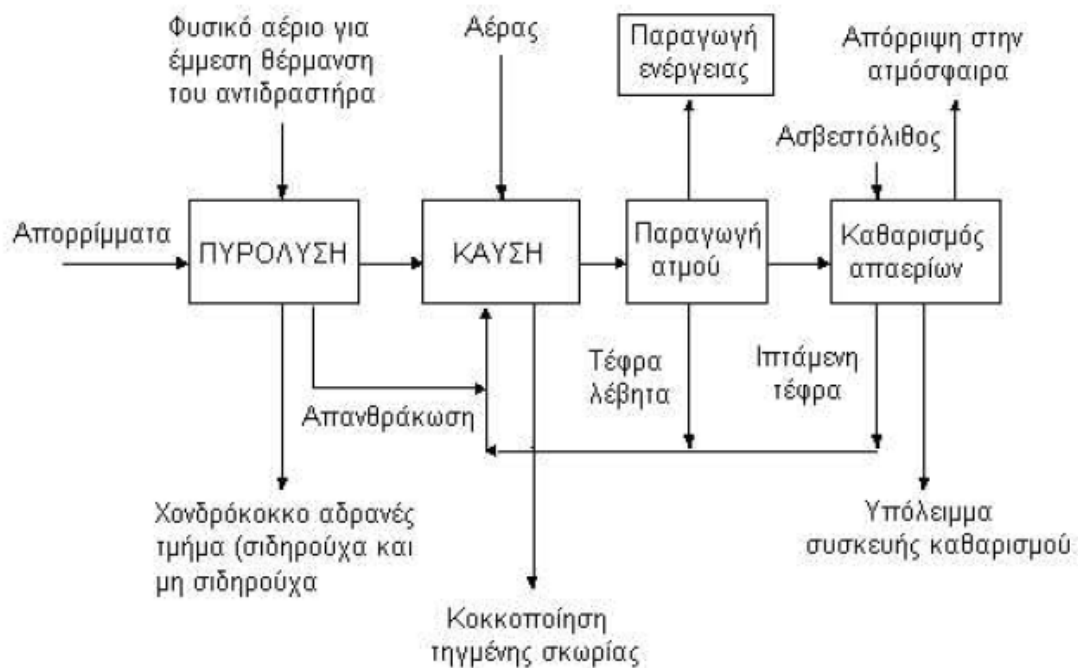
Η Siemens από τα μέσα της δεκαετίας του '90 ξεκίνησε στην Ευρώπη τη διεργασία της Θερμικής Ανακύκλωσης Αποβλήτων (Thermal Waste Recycling Process). Είναι μια διαδικασία κατάλληλη για την επεξεργασία αστικών απορριμμάτων, αστικών λυμάτων και ιλύος και αυτή τη στιγμή στην Ιαπωνία υπάρχουν 7 νεόδμητες εγκαταστάσεις σε λειτουργία που επεξεργάζονται από 150 έως 450 τόνους ΑΣΑ την ημέρα.

Η διεργασία αυτή απαιτεί προεπεξεργασία των απορριμμάτων με περιστροφικό κόπτη και αποτελεί ένα συνδυασμό της πυρόλυσης και της αποτέφρωσης σε υψηλές θερμοκρασίες. Το σύστημα χρησιμοποιεί έναν οριζόντιο αντιδραστήρα μέσα στον οποίο τα απόβλητα πυρολύονται σε θερμοκρασία 450 °C για περίπου μια ώρα. Στη συνέχεια τα παραχθέντα αέρια της πυρόλυσης καίγονται μαζί με την τέφρα της πυρόλυσης σε ένα θάλαμο αποτέφρωσης που λειτουργεί σε θερμοκρασία 1300 °C. Η παραγόμενη ενέργεια στο θάλαμο ανάφλεξης χρησιμοποιείται για την αύξηση του ρεύματος στους 400 °C για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήματα 2.18, 2.19).



Σχήμα 2.18 : Μονάδα Siemens.

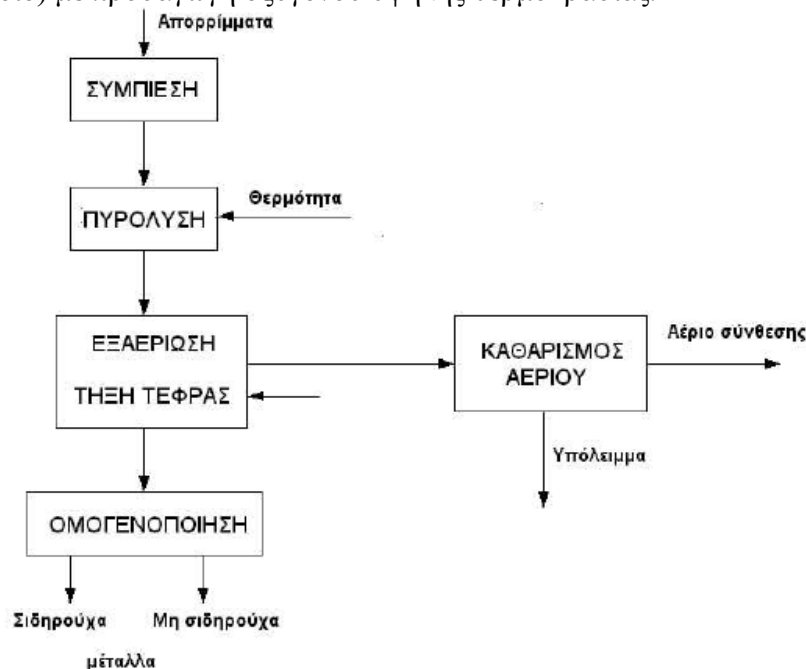
Οι θερμοκρασίες του θαλάμου ανάφλεξης είναι αρκετά υψηλές ώστε να μετατρέψουν την αδρανή τέφρα σε σκωρία η οποία στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή οδοστρωμάτων. Τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι το σύστημα μπορεί να παράγει περίπου 405 kWh ανά τόνο αποβλήτων, κάτι που αντιστοιχεί σε ποσοστό απόδοσης της τάξης του 17%..



Σχήμα 2.19 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου Siemens.

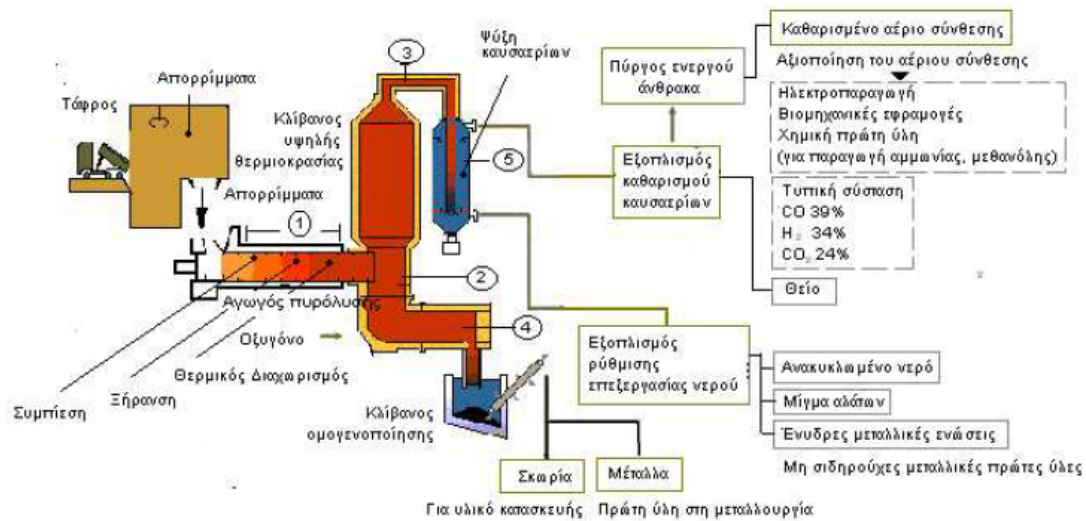
2.6.3 Μέθοδος Thermoselect

Η μέθοδος Thermoselect (Σχήμα 2.20) πρωτοεφαρμόστηκε το 1989 και είναι μια διαδικασία που συνδυάζει ήπια πυρόλυση (στο πρώτο στάδιο) με αεριοποίηση (στο δεύτερο στάδιο) με παραγωγή οξυγόνου υψηλής θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.20 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου Thermoselect.

Ένα από τα χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι ότι απαιτείται ελάχιστη ή μηδενική προεπεξεργασία των αποβλήτων. Στη διεργασία αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ΑΣΑ χωρίς καμιά διαλογή. Τα απόβλητα τοποθετούνται σε ένα θάλαμο, όπου μέσω υδραυλικής πίεσης συμπιέζονται στο ένα πέμπτο του αρχικού τους όγκου. Στη συνέχεια διέρχονται διαμέσου ενός θερμαινόμενου κυλινδρικού καναλιού θερμοκρασίας 300 °C όπου λαμβάνει χώρα η ξήρανσή τους και η πυρόλυση. Στο τέλος του οριζώντιου αυτού σωληνωτού αντιδραστήρα, τα στερεά υλικά εισέρχονται σε έναν υψηλής θερμοκρασίας οξυγόνου αεριοποιητή. Τα αέρια και τα στερεά πυρολυτικά προϊόντα αεριοποιούνται στη συνέχεια σε θερμοκρασία 1200 °C στην κορυφή του αεριοποιητή και υαλοποιούνται σε θερμοκρασίες 2000 °C στο κάτω μέρος του αεριοποιητή. Το μίγμα των αερίων εξέρχεται από τον αντιδραστήρα με θερμοκρασία 1200 °C και ψύχεται απότομα με τη χρήση νερού σε θερμοκρασία κάτω των 70 °C σε λιγότερο από ένα τρίτο του δευτερολέπτου. Τα αέρια στη συνέχεια καθαρίζονται με τη χρήση ενός συνδυασμού φίλτρων και ενεργού άνθρακα και ψύχονται περαιτέρω για την μείωση της υγρασίας τους. (Σχήμα 2.21).



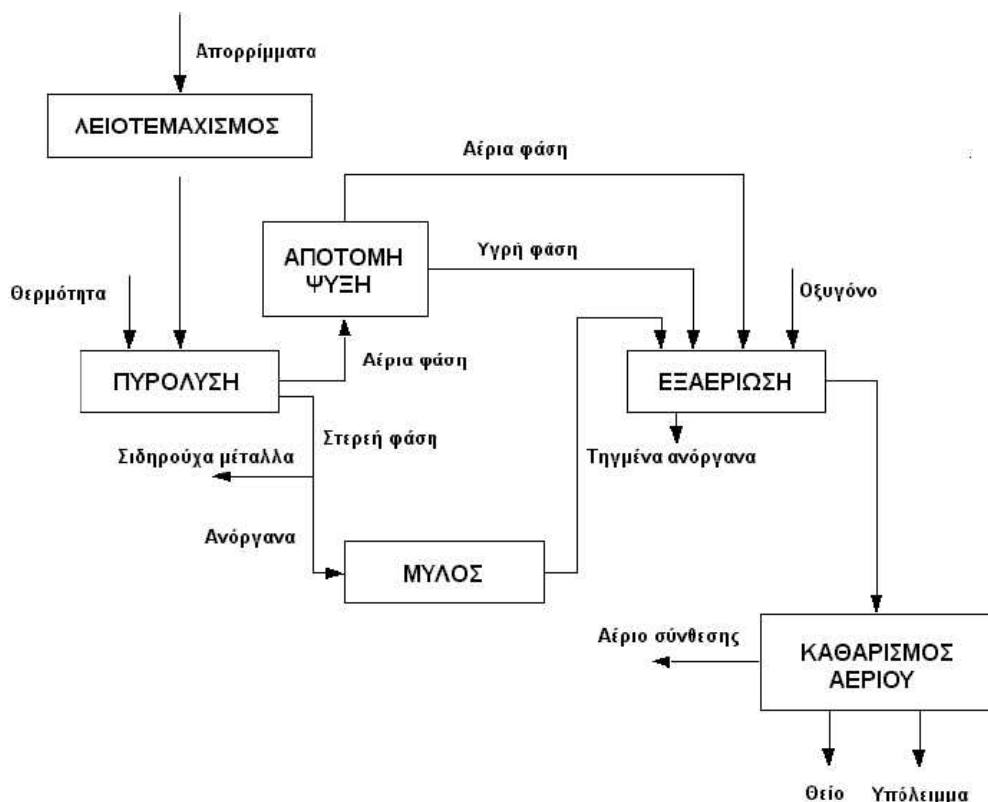
Σχήμα 2.21 : Μονάδα Thermoselect [Μουσιόπουλος Ν., Καραγιαννίδης Α., 2002].

Το παραγόμενο μίγμα αερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έρευνες έχουν δείξει [Malkow, 2004] ότι το σύστημα μπορεί να έχει απόδοση, που κυμαίνεται από 11 – 40 % εξαρτώμενη από τον κύκλο παραγωγής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί. Σε ένα από τα εργοστάσια που χρησιμοποιείται στην Ιταλία παράγεται ενέργεια 200-500 kWh ανά τόνο αποβλήτων με κατώτερη θερμογόνο δύναμη περίπου 12 MJ/kg.

2.6.4 Μέθοδος Noell

Η μέθοδος NOELL είναι μια θερμική διεργασία δύο βημάτων όπου τα απόβλητα αρχικά πυρολύονται μέσα σε έναν εξωτερικά θερμαινόμενο περιστρεφόμενο κλίβανο σε θερμοκρασία περίπου 550 °C, για περίπου μια ώρα και στη συνέχεια αεριοποιούνται με τη χρήση οξυγόνου σε θερμοκρασίες 1400-2000 °C και πιέσεις 2-50 ατμοσφαιρών (Σχήμα 2.22).

Εκτός από ΑΣΑ η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για βιομηχανικά όσο και για επικίνδυνα απόβλητα. Το παραγόμενο αέριο είναι μέσης θερμικής αξίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλα αέρια. Ένα μέρος του αερίου μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του περιστρεφόμενου κλιβάνου. Η απόδοση του συστήματος φτάνει το 13% που είναι ένα καλό ποσοστό για μικρού μεγέθους εφαρμογές. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν τρεις εγκαταστάσεις σε Γερμανία και Ηνωμένο Βασίλειο που χρησιμοποιούν την μέθοδο αυτή.



Σχήμα 2.22 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου Noell.

2.6.5 Μέθοδος EDDITH

Η μέθοδος EDDITH (Σχήμα 2.23) βασίζεται σε μια διάταξη πυρολυτικού περιστρεφόμενου τυμπάνου. Μετά τη διαλογή και την ξήρανσή τους, τα απόβλητα εισέρχονται στο περιστρεφόμενο πυρολυτικό τύμπανο όπου και πυρολύονται σε θερμοκρασία 450 - 550 °C με χρόνο παραμονής περίπου τριάντα λεπτά. Το παραγόμενο αέριο καίγεται σε θερμοκρασία 1100 °C ώστε να δώσει την απαιτούμενη θερμότητα για την ξήρανση του ατμού.

Η μέθοδος αποτελείται από τα παρακάτω τρία βασικά στάδια:

- (α) Επεξεργασία απορριμμάτων.
- (β) Θερμόλυση.
- (γ) Επεξεργασία και αποθήκευση στερεού καυσίμου.



Σχήμα 2.23 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου EDDITH.

Η εταιρία που εφαρμόζει τη μέθοδο υποστηρίζει ότι το ανθρακούχο υπόλειμμα με την εμπορική ονομασία carbon μπορεί να καθαριστεί και να διαχωριστεί από μέταλλα, άλλα αδρανή και διαλυτά άλατα και να χρησιμοποιηθεί ως στερεό καύσιμο. Ακόμα όμως και αν ο καθαρισμός είναι αποτελεσματικός φαίνεται ότι αυτό θα γίνει με μεγάλο οικονομικό και ενεργειακό κόστος, κάτι που το καθιστά μη ενδεδειγμένη λύση.

Σήμερα υπάρχουν δύο εργοστάσια που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία στη Γαλλία και τρία στην Ιαπωνία.

2.6.6 Μέθοδος Von Roll

Η εταιρία Von Roll έχει αναπτύξει διάφορες μεθόδους επεξεργασίας για μια μεγάλη ποικιλία αποβλήτων (Σχήμα 2.24). Ακολουθώς παρουσιάζεται μία από αυτές.



Σχήμα 2.24 : Τεχνολογίες ΔΑ από την εταιρία Von Roll.

2.6.6.1 Διεργασία RCP

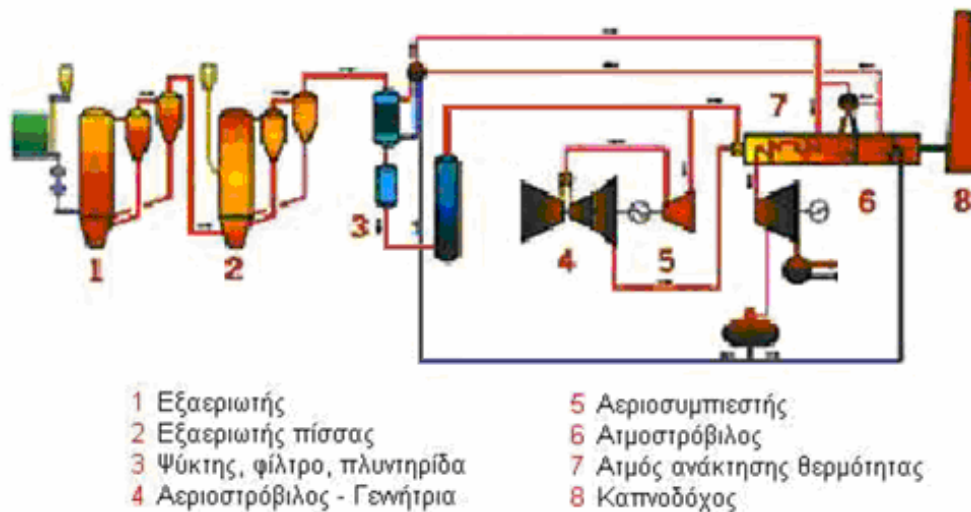
Η διεργασία RCP (Recycled Clean Product) είναι μια διεργασία κινούμενων εσχαρών και τήξεως και έχει εφαρμογή στην επεξεργασία ΑΣΑ, υπολειπόμενων απορριμμάτων από ανακύκλωση και τεμαχισμένα υπολείμματα αυτοκινήτων. Η μέθοδος αυτή αποτελείται ουσιαστικά από τρία βήματα τα οποία περιλαμβάνουν ένα θάλαμο πυρόλυσης με σχάρες που λειτουργεί σε θερμοκρασία περίπου 500 °C, έναν οξειδοαναγωγικό κλίβανο τήξεως και έναν περιστρεφόμενο αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης. Αρχικά λαμβάνει χώρα η πυρόλυση και στη συνέχεια το πυρολυτικό κωκ και τα όποια μη χρησιμοποιημένα πυρολυτικά αέρια εισέρχονται στον κλίβανο τήξεως όπου οι υψηλές θερμοκρασίες και το προστιθέμενο οξυγόνο προκαλούν την τήξη όλων των στερεών υλικών. Τα υπολειπόμενα αέρια από τον κλίβανο αναφλέγονται μετέπειτα στον περιστρεφόμενο αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης σε θερμοκρασίες <1000 °C. Η μέθοδος στοχεύει στην αξιοποίηση της σκωρίας από τη τσιμεντοβιομηχανία και για αυτό προσανατολίζεται κυρίως στην απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων.

Αν και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αυτή είναι γνωστές ο συνδυασμός τους οδηγεί στην αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος. Στη Γερμανία αυτή τη στιγμή λειτουργεί μια μικρή εγκατάσταση που χρησιμοποιεί τη μέθοδο αυτή πιλοτικά.

2.6.7 Μέθοδος TPS

Η τεχνολογία TPS (Terminska Processor) (Σχήμα 2.25) χρησιμοποιεί μια διαδικασία αεριοποίησης με τη βοήθεια ενός συνδιασμού αφρίζοντα αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης και περιστρεφόμενου αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης που λειτουργούν σε θερμοκρασία 850 °C, κάτω από το όριο τήξεως της τέφρας, και κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση. Οι αντιδραστήρες αυτοί τροφοδοτούνται με θερμό αέρα, τεμαχισμένα ΑΣΑ και πελλέτες RDF. Ο αέρας χρησιμοποιείται ως παράγοντας αεριοποίησης/ρευστοποίησης. Ένα μέρος του αέρα εισέρχεται στον αεριοποιητή διαμέσου του κάτω μέρους του και το υπόλοιπο διαμέσου του πάνω μέρους του. Αυτός ο τρόπος διανομής του αέρα προκαλεί διαφορά πυκνότητας μέσα στο δοχείο. Στο κάτω τμήμα τα βαρύτερα τεμάχια έχουν αρκετό χρόνο παραμονής ώστε να αεριοποιηθούν ενώ στο πάνω μέρος τα ελαφρύτερα-μικρότερα τεμάχια μεταφέρονται στη ροή του αερίου. Το αέριο και τα διαχωρισμένα αυτά στερεά στη συνέχεια οδηγούνται σε ένα θερμό κυκλώνα όπου τα στερεά απομακρύνονται και οδηγούνται εκ νέου στην ρευστοποιημένη κλίνη. Το αέριο εισέρχεται σε ένα περιστρεφόμενο κλίβανο ρευστοποιημένης κλίνης μέσα στον οποίο γίνεται το σπάσιμο της πίσσας και των υδρογονανθράκων. Το θερμό αέριο καθαρίζεται και αναφλέγεται σε ένα βραστήρα ή οδηγείται σε μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιλοτικές εγκαταστάσεις λειτουργούν στην Ιταλία, τη Σουηδία και τη Βραζιλία



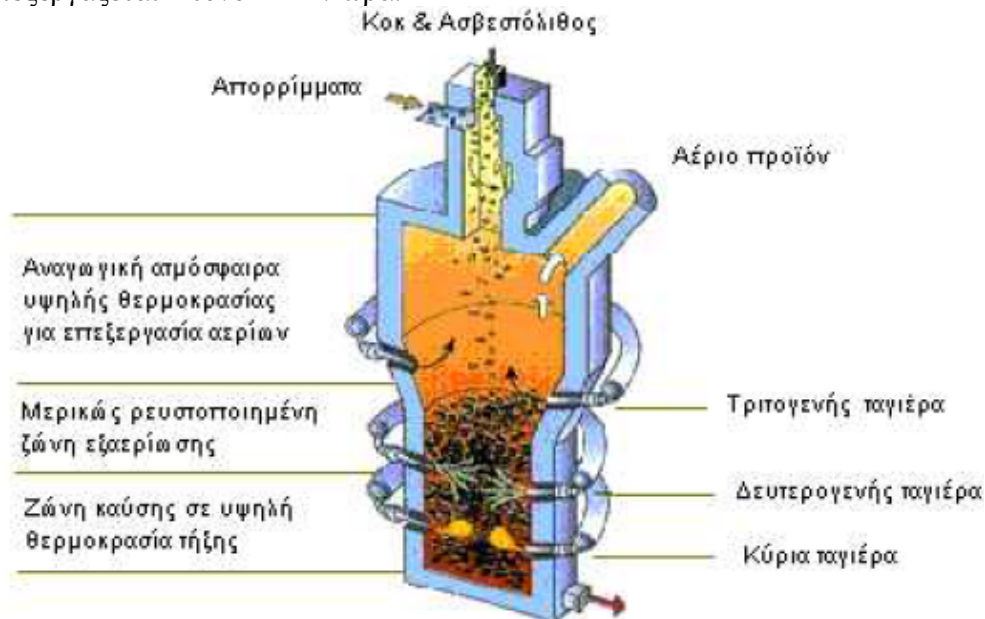
Σχήμα 2.25 : Η διαδικασία αεριοποίησης TPS [Μουσιόπουλος Ν., Καραγιαννίδης Α., 2002].

2.6.8 Μέθοδος NKK

Η NKK είναι μια μεγάλη ιαπωνική εταιρία που έχει αναπτύξει μια τεχνολογία τήξεως των απορριμμάτων χρησιμοποιώντας την αεριοποίηση. Η εγκατάσταση που λειτουργεί στηριζόμενη στη μέθοδο NKK (Σχήμα 2.26), αποτελείται από τρεις μονάδες αεριοποίησης και τήξης υψηλής θερμοκρασίας. Τα απορρίμματα αεριοποιούνται σε θερμοκρασίες $>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ και στη συνέχεια τήκονται σε κλίβανο.

Η εγκατάσταση έχει τη δυνατότητα να επεξεργασθεί όχι μόνο οικιακά απορρίμματα αλλά και άλλα υλικά όπως κεραμικά και γυαλί και με τη πλήρη τήξη τους να προκύψει ανακυκλώσιμη τηγμένη λάσπη χωρίς μεταλλικά στοιχεία.

Στην Ιαπωνία λειτουργεί πιλοτικά μια εγκατάσταση που χρησιμοποιεί αυτή τη μέθοδο και επεξεργάζεται 1 τόνο ΑΣΑ / ώρα.



Σχήμα 2.26 : Σχηματική παράσταση της μεθόδου NKK.

2.6.9 Μέθοδος PKA

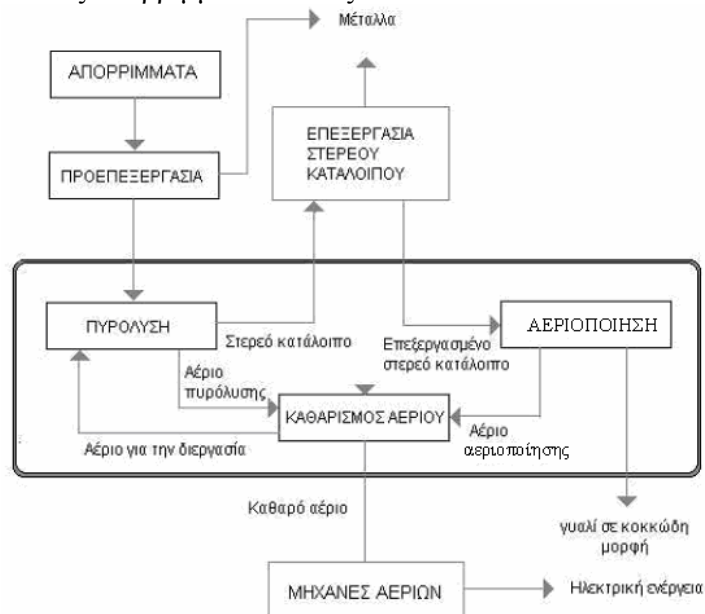
Η μέθοδος PKA (Pyrolyse Kraft Anlagen) είναι ένας συνδυασμός πυρόλυσης, αεριοποίησης, και τήξεως (Σχήμα 2.27). Τα ΑΣΑ προεπεξεργάζονται ώστε να αφαιρεθούν υλικά όπως γυαλί, μέταλλα και άλλα που μπορούν να ανακυκλωθούν. Η πυρόλυση λαμβάνει χώρα σε ένα περιστρεφόμενο κλίβανο σε θερμοκρασία 500 °C και χρόνο παραμονής περίπου μια ώρα. Μέρος του αερίου που παράγεται από τη διαδικασία χρησιμοποιείται για την εξωτερική θέρμανση του κλιβάνου. Το πυρολυτικό αέριο που περιέχει πίσσα στη συνέχεια αεριοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες 1200 -1300 °C με την προσθήκη οξυγόνου και στη συνέχεια ψύχεται και καθαρίζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της τελικής χρήσης. Από το πυρολυτικό στερεό κατάλοιπο μπορεί να γίνει ανάκτηση μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών.

Η μέθοδος είναι κατάλληλη για την επεξεργασία των παρακάτω αποβλήτων:

- Χρησιμοποιημένα λάστιχα.
- Απόβλητα τεμαχισμού αυτοκινήτων.
- Υλικά συσκευασίας.
- Επικίνδυνα απόβλητα.
- Οικιακά απόβλητα.
- Απόβλητα βιολογικού καθαρισμού.

Η εταιρία Gibros PEC που ανέπτυξε την μέθοδο υποστηρίζει ότι η διεργασία έχει σχεδόν μηδενικές εκπομπές : όλα τα ρεύματα εξόδου (παραγόμενο αέριο, μέταλλα, αδρανή) μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε προς πώληση είτε προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

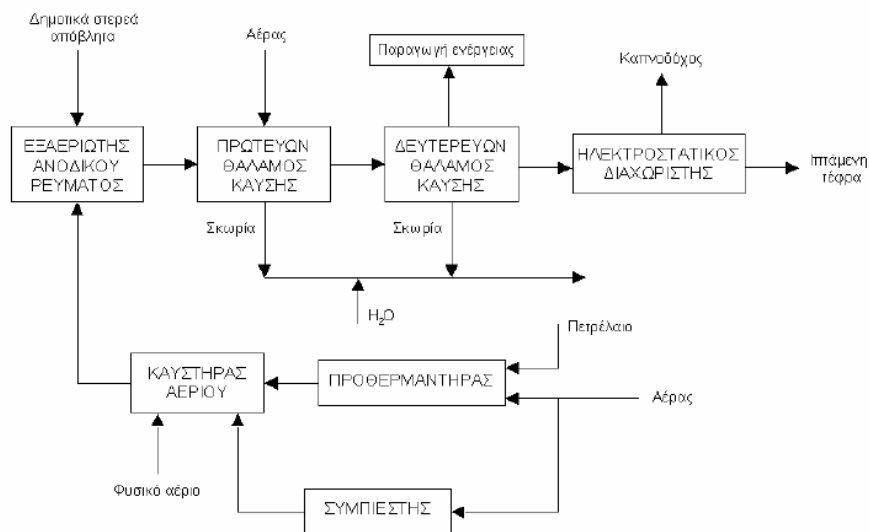
Σήμερα υπάρχουν δύο συστήματα PKA εγκατεστημένα στη Γερμανία τα επεξεργάζονται περίπου 30.000 τόνους απορριμμάτων / έτος.



Σχήμα 2.27 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου PKA.

2.6.10 Μέθοδος P.I.T. Pyroflam

Η μέθοδος P.I.T. (Σχήμα 2.28) είναι μία πυρολυτική μέθοδος που βασίζεται στη θέρμανση ποσότητας υδρογονανθράκων (απουσία οξυγόνου) σε χαμηλές θερμοκρασίες (450-750⁰C). Η θέρμανση των οργανικών έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπασή τους και την παραγωγή ενός αερίου και ενός υπολείμματος πλούσιου σε άνθρακα που στη συνέχεια μετατρέπεται σε καύσιμο αέριο με αεριοποίηση. Η μέθοδος στηρίζεται στην πυρόλυση υπό κενό και αναπτύχθηκε αρχικά με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας από χρησιμοποιημένα ελαστικά και ξύλο. Σήμερα χρησιμοποιείται και για την επεξεργασία των δημοτικών και βιομηχανικών ΣΑ.



Σχήμα 2.28 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου P.I.T.

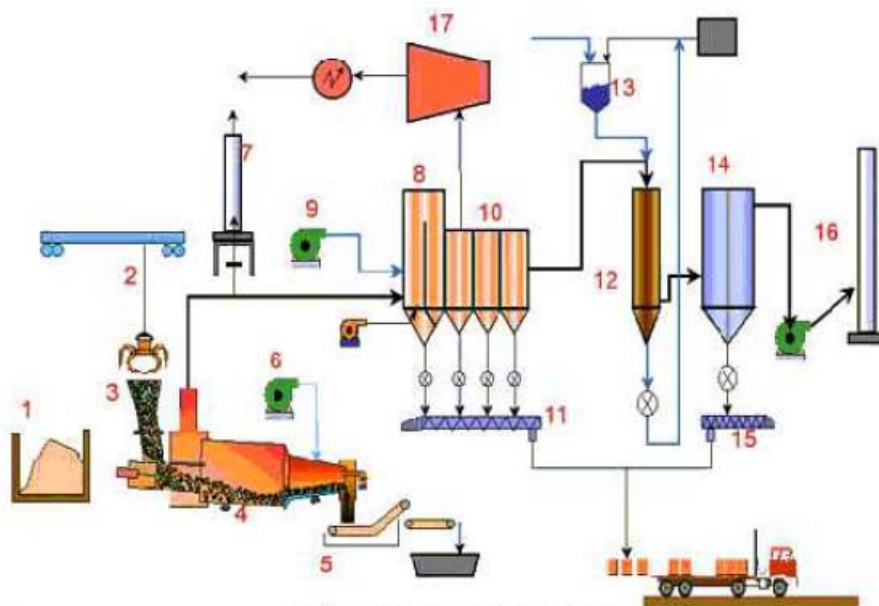
2.6.11 Μέθοδος Nexus

Η διεργασία χρησιμοποιεί έναν περιστρεφόμενο κλίβανο και μπορεί να επεξεργαστεί ΑΣΑ, λάστιχα και μη επικίνδυνα απορρίμματα. Αρχικά, τα ΑΣΑ προεπεξεργάζονται για να ομοιογενοποιηθούν και στη συνέχεια εισέρχονται στον κλίβανο απουσία οξυγόνου, όπου πυρολύονται σε θερμοκρασία 650 °C και πίεση 700 mbar. Ο χρόνος παραμονής στον κλίβανο κυμαίνεται ανάλογα με την υγρασία των απορριμμάτων και μπορεί να φτάσει έως τις οκτώ ώρες. Τέλος, ακολουθεί η ψύξη του στερεού υπολείμματος. Το οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων μετατρέπεται μέσω της διαδικασίας αυτής σε ανθρακούχο υπόλειμμα πυρόλυσης, αέρια καύσης και υγρούς υδρογονάνθρακες.

Αυτή τη στιγμή στη Γαλλία λειτουργεί πιλοτικά ένα εργοστάσιο που επεξεργάζεται 5.500 τόνους ΑΣΑ/ έτος ενώ σχεδιάζεται ένα ακόμη δυναμικότητας 33.000 τόνων ΑΣΑ / έτος.

2.6.12 Μέθοδος Andco Torrax

Η μέθοδος Andco Torrax (Σχήμα 2.29) αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ το 1968 από την εταιρία Torrax Systems και έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας μιας ποικιλίας αποβλήτων (δημοτικά, νοσοκομειακά, βιομηχανικά).



- | | | | |
|---|-------------------------------|----|---|
| 1 | Τάφρος | 10 | Λέβητας απόβλητης θερμότητας |
| 2 | Γερανογέφυρα με αρπάγη | 11 | Συλλογή ιπτάμενης τέφρας |
| 3 | Φρέατο τροφοδοσίας | 12 | Αντιδραστήρας καθαρισμού καυσαερίων |
| 4 | Συσκευή πυρόλυσης | 13 | Προετοιμασία πρόσθετων ουδετεροποίησης |
| 5 | Ανακυκλώσιμα στερεά κατάλοιπα | 14 | Σακκόφιλο |
| 6 | Ανεμιστήρας αέρα διεργασίας | 15 | Συλλογή υπολειμμάτων από τον καθαρισμό των καυσαερίων |
| 7 | Καπνοδόχος ανάγκης | 16 | Καπνοδόχος |
| 8 | Θάλαμος μετάκαυσης | 17 | Ατμοστρόβιλος |
| 9 | Ανεμιστήρας αέρα καύσης | | |

Σχήμα 2.29 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου Andco Torrax. [Μουσιόπουλος Ν., Καραγιαννίδης Α., 2002].

Η μέθοδος αυτή σχεδιάστηκε ώστε να μετατρέπει το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ σε αναφλέξιμο αέριο το οποίο στη συνέχεια μπορεί να παράγει ατμό. Το σύστημα αποτελείται από πέντε κύριους παράγοντες: 1) τον προθερμαντήρα του αέρα, 2) τον αεριοποιητή, 3) τον δευτερεύον θάλαμο ανάφλεξης, 4) τον βραστήρα και 5) τον εξοπλισμός καθαρισμού αερίων.

Τα ΑΣΑ οδηγούνται στον αεριοποιητή ο οποίος είναι μια κυλινδρική στήλη με 12 έως 15 μέτρα ύψος και 1.8 έως 2.7 μέτρα διάμετρο. Τα απορρίμματα αρχικά ξηραίνονται, πυρολύονται σε θερμοκρασία έως 1100 °C και μετατρέπονται σε αναφλέξιμο αέριο. Τα πυρολυτικά αέρια στη συνέχεια εγκαταλείπουν τον αντιδραστήρα σε θερμοκρασίες 400-500 °C και εισέρχονται στον δευτερεύοντα θάλαμο ανάφλεξης όπου αναμιγνύονται με αέρα και καίγονται. Τα αέρια που δημιουργούνται στη συνέχεια οδηγούνται στο βραστήρα για την παραγωγή ατμού. Ο ατμός αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα απαέρια οδηγούνται στα συστήματα καθαρισμού τα οποία αποτελούνται κατά κύριο λόγο από ηλεκτροστατικούς κατακρημνιστές.

Τεχνικές δυσκολίες συναντώνται κατά τη διοχέτευση των αερίων του αντιδραστήρα καθώς πρόβλημα αποτελεί και ο υπερβολικός θόρυβος.

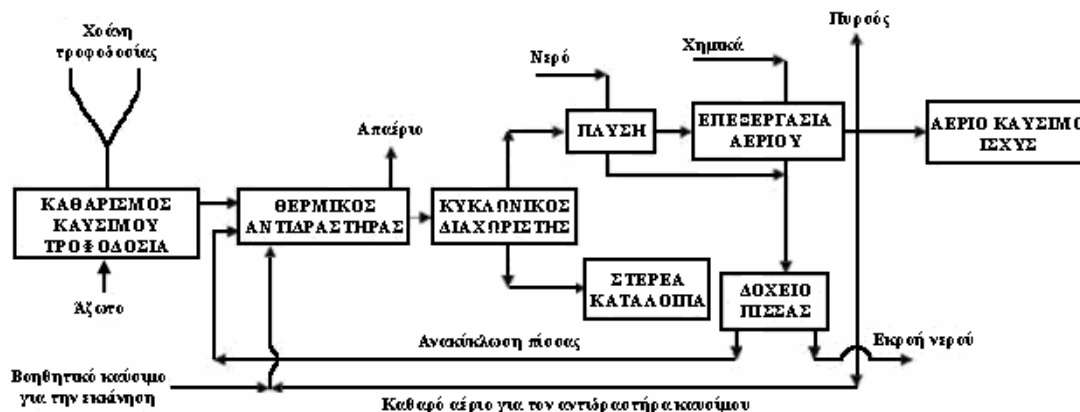
Σήμερα λειτουργούν 5 εργοστάσια σε Ευρώπη και ΗΠΑ στα οποία επιτυγχάνεται μείωση του όγκου των απορριμμάτων κατά 80-85% ενώ η ανάκτηση της ενέργειας σε θέρμανση και ηλεκτρισμό ανέρχεται στο 62-68%.

2.6.13 Μέθοδος WGT

Με τη μέθοδο WGT (Waste Gas Technology) (Σχήμα 2.30) επιτυγχάνεται η αεριοποίηση των συστατικών των απορριμμάτων που είναι πλούσια σε άνθρακα και η παραγωγή αερίου που διασπάται σε υδρογονάνθρακες μικρότερου μοριακού βάρους και υδρογόνο. Τα απορρίμματα αρχικά ξηραίνονται, προεπεξεργάζονται μηχανικά ώστε να αφαιρεθούν τα άκαυστα υλικά και κοκκοποιούνται στο βέλτιστο μέγεθος. Η αεριοποίηση λαμβάνει χώρα σε ένα κυλινδρικό αντιδραστήρα σε θερμοκρασίες 700 - 900 °C απουσία οξυγόνου. Τα αέρια από τον αντιδραστήρα πλένονται ώστε να απομακρυνθούν οι ρύποι και στη συνέχεια οδηγούνται σε γεννήτριες προς παραγωγή ενέργειας. Τα στερεά υπολείμματα αναφλέγονται επίσης σε ένα βραστήρα ατμού.

Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να επεξεργαστούν διαφορετικά ήδη απορριμμάτων συμπεριλαμβανομένων των ΑΣΑ, ιλύων, πλαστικών και ΔΞΥΛ.

Σήμερα στη Μεγάλη Βρετανία υπάρχει μια εγκατάσταση που χρησιμοποιεί αυτή την τεχνολογία πιλοτικά [Evaluation of Conversion Technology Processes and Products. University of California, 2004].



Σχήμα 2.30 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου WGT (Waste Gas Technology).

2.6 Εκπομπές καινοτόμων τεχνολογιών

Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εκπομπές διάφορων ρύπων από εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν κάποιες από τις προαναφερθέντες καινοτόμες μεθόδους θερμικής επεξεργασίας, σε σύγκριση με τα όρια που ισχύουν στις ΗΠΑ και στη Γερμανία. Στην τελευταία στήλη παρουσιάζεται η απόδοσή τους σε ηλεκτρική ενέργεια.

**Πίνακας 2.4 : Αποτελέσματα εκπομπών για εγκαταστάσεις διάφορων κανοτόμων μεθόδων θερμοκλής επεξεργασίας και απόδοσης ηλεκτρικής ενέργειας
[Evaluation of Conversion Technology Processes and Products, University of California, 2004]**

	PM mg/m ³	NOx mg/m ³	CO mg/m ³	TOC mg/m ³	SO ₂ mg/m ³	Dioxins/ furan (ng/ m ³)	HCl mg/m ³	HF mg/m ³	Cd mg/m ³	Pb mg/m ³	Hg mg/m ³	Ενέργεια kWh/Mg
Όρια US EPA	18,4	219,8	89,2		61,2		29,1		0,01533	0,1533	0,0613	
Όρια German (17thBImSchV)	10	200	50		50	0,10	10		0,03	0,50	0,03	
PKA	2,3	54	38	2,3	7,7	0,02	2,3	0,15	0,002		0,002	280
P.I.T.	4,2-5,2	61-189	0,5-2,5	0,2-0,5	0,0-5,6	0,002	1,7-5	<0,1			0,05	
Thermoselect	0,84	21,76	2,95		0,16	0,0007-0,0011			0,001	0,013	0,0018	450
Thide-Eddith		470	50	<15	<200		30	<1				
TPS	3-7	200-300	2,5-5		5-15	0,013	0,6-2	<0,1	<0,004	0,005	0,008-0,05	550
Nexus												390
Siemens												410
Von roll												380

Από τον πίνακα διαπιστώνουμε ότι οι μέθοδοι PKA, PIT και Thermoselect πληρούν όλα τα όρια τόσο του Γερμανικού όσο και του κανονισμού των Η.Π.Α για τις αέριες εκπομπές. Η μέθοδος Thide-Eddith υπερβαίνει τα όρια για τις εκπομπές NO_x, SO₂, και HCl ενώ η TPS υπερβαίνει μόνο το όριο για τις εκπομπές των NO_x. Από πλευράς ενέργειας η απόδοση των διαφόρων διεργασιών κυμαίνεται από 250-700 kWh/Mg με μια μέση τιμή περίπου 450 kWh/Mg. Την καλύτερη απόδοση εμφανίζουν οι μέθοδοι Thermoselect και TPS. Σε κάθε περίπτωση η απόδοση μπορεί να αυξηθεί αν γίνει κατάλληλη προεπεξεργασία των απορριμμάτων και απομάκρυνση των ανόργανων υλικών.

3. ΜΗΧΑΝΙΚΗ – ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (MBE)

3.1. Βασικές αρχές και συνοπτική περιγραφή λειτουργίας

Η Μηχανική-Βιολογική Επεξεργασία (MBE) δεν είναι μια σαφώς καθορισμένη μέθοδος επεξεργασίας, αλλά περισσότερο ένας γενικευμένος όρος που περιγράφει μια ευρεία ομάδα διεργασιών που συνδυάζονται με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους προκειμένου να διαχωρίσουν και να ανακτήσουν υλικά από τα ΑΣΑ. Πρόκειται δηλαδή για μια «οικογένεια» τεχνολογιών επεξεργασίας, που μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους τόσο ως προς την πολυπλοκότητα, και συνεπώς το κόστος, όσο και ως προς τους τελικούς στόχους της επεξεργασίας. Η απόδοση των διαφορετικών συνδυασμών μπορεί να ποικίλει ευρέως και κάθε προσέγγιση έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Κατά συνέπεια δεν υπάρχει συνδυασμός που να αποτελεί την «βέλτιστη λύση» αλλά κάποιοι συνδυασμοί μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλοι για συγκεκριμένες συνθήκες και έργα [DEFRA, 2005b, Archer et al. 2005a].

Οι εγκαταστάσεις MBE συνδυάζουν μια ποικιλία μηχανικών και βιολογικών διεργασιών με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τα επιθυμητά προϊόντα και τους στόχους της επεξεργασίας. Οι μηχανικές διεργασίες χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση των ξηρών ανακυκλώσιμων και ενός ομογενοποιημένου στερεού καυσίμου (RDF – refuse derived fuel ή SRF – solid refuse fuel) ενώ οι βιολογικές για την απομάκρυνση της υγρασίας από τα απόβλητα (βιολογική ξήρανση), τη σταθεροποίηση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος και την παραγωγή (χαμηλής ποιότητας) κομποστ και/ή βιοαερίου. Σε πολύ αδρές γραμμές η MBE μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός δύο μονάδων: ενός κέντρου διαλογής και ανάκτησης υλικών (ΚΔΑΥ) και μιας μονάδας βιολογικής επεξεργασίας. Οι κυριότερες διεργασίες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν:

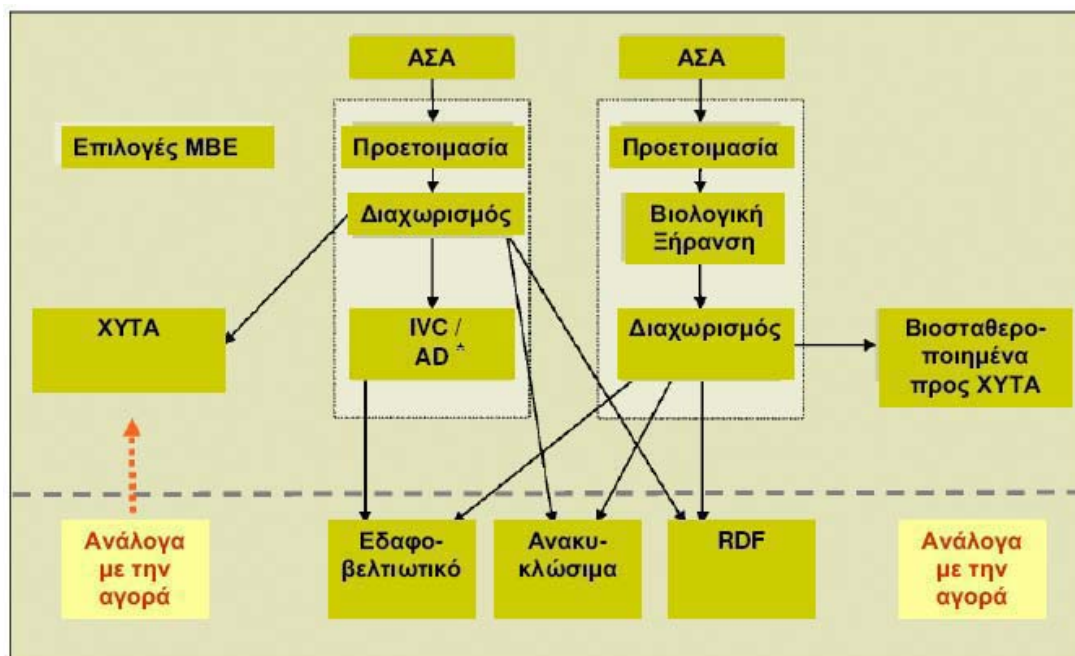
- Τεχνικές διάνοιξης σάκων (διατάξεις τύπου μεταλλικών ταινιών, κοχλία, χτενιού, λάμας, κλπ).
- Τεχνικές μείωσης του μεγέθους (κονιορτοποίηση και τεμαχισμός, σε τεμαχιστές, περιστρεφόμενα τύμπανα, κλπ).
- Τεχνικές διαχωρισμού (βάση μεγέθους, αεροδιαχωρισμού, βαλλιστικού διαχωρισμού και άλλες διεργασίες μηχανικής ταξινόμησης των αποβλήτων)
- Τεχνικές μαγνητικού διαχωρισμού για το διαχωρισμό των σιδηρούχων μετάλλων και επαγωγικών ρευμάτων, για το αλουμίνιο.
- Βιολογική ξήρανση.
- Κομποστοποίηση του εμπλουτισμένου οργανικού κλάσματος.
- Αναερόβια χώνευση.

Το κοινό στοιχείο όλων των μονάδων MBE είναι ότι χρησιμοποιούν διεργασίες μηχανικού διαχωρισμού για να διαχωρίσουν σύμμεικτα απόβλητα σε διαφορετικά ρεύματα και να ανακτήσουν κάποια ξηρά ανακυκλώσιμα. Επιπλέον, ανάλογα με το σχεδιασμό τους έχουν έναν ή περισσότερους από τους ακόλουθους στόχους:

- Να σταθεροποιήσουν επαρκώς το βιοαποδομήσιμο κλάσμα, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό επικάλυψης σε ΧΥΤΑ ή να ταφεί χωρίς να θεωρείται ως βιοαποδομήσιμο απόβλητο για τους στόχους της Οδηγίας για την Υγειονομική Ταφή [99/31/ΕΕ].

- Να παράγουν ένα εμπλουτισμένο οργανικό κλάσμα για κομποστοποίηση ή αναερόβια χώνευση. Το παραγόμενο υπόστρωμα σε αυτή την περίπτωση είναι χαμηλής ποιότητας και περιορισμένης χρήσης (π.χ. υλικό κάλυψης σε ΧΥΤΑ ή για αποκατάσταση λατομείων, ορυχείων κλπ.).
- Να παράγουν ένα διαχωρισμένο, σχετικά ομογενοποιημένο κλάσμα υψηλής θερμογόνου δύναμης, το οποίο αποτελείται κυρίως από χαρτί, πλαστικά και άλλα καύσιμα υλικά (RDF ή SRF), προς αξιοποίηση σε ειδική εγκατάσταση καύσης με ανάκτηση ενέργειας ή σε υπάρχοντες βιομηχανικούς κλιβάνους (π.χ. τσιμεντοβιομηχανία).

Το βιολογικό τμήμα της επεξεργασίας της ΜΒΕ μπορεί να λάβει χώρα πριν ή μετά τη μηχανική διαλογή, όπως παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 3.1. Καθεμιά από αυτές τις δύο προσεγγίσεις παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα, ενώ επιτυχημένες εφαρμογές έχουν και οι δύο [Τ.Ε.Ε., 2007].



Σχήμα 3.1 : Σχηματική αναπαράσταση των βασικών επιλογών διαμόρφωσης ενός συστήματος ΜΒΕ [DEFRA, 2005b].

*IVC : λιπασματοποίηση σε κλειστούς θαλάμους (In Vessel Composting)

AD : αναερόβια χώνευση (Anaerobic Digestion)

Η ΜΒΕ μπορεί να διακριθεί σε ένα τμήμα βιολογικής επεξεργασίας, αερόβιας ή αναερόβιας και ένα τμήμα μηχανικής επεξεργασίας, που απαρτίζεται από τεχνολογίες προετοιμασίας και διαχωρισμού των αποβλήτων (Σχήμα 3.1).

3.2 Μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας αστικών στερεών αποβλήτων

Οι μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας, όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους, μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε απόβλητα που επιδέχονται τέτοια επεξεργασία, δηλαδή σε βιοαποδομήσιμα ή οργανικά απόβλητα. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνεται μια

μεγάλη ποικιλία αγροτικών αποβλήτων και υπολειμμάτων (κοπριές, φυτικά υπολείμματα καλλιεργειών, απόβλητα εκκοκκιστηρίων βάμβακος, ελαιοπυρήνα κλπ), πολλά στερεά απόβλητα και υλίες από βιομηχανίες τροφίμων, η ιλύς βιολογικών καθαρισμών αστικών λυμάτων καθώς και το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών αποβλήτων (BAA). Το τελευταίο, υπόκειται στους περιορισμούς της Οδηγίας για την Υγειονομική Ταφή (99/31/ΕΕ) που επιβάλλουν τη σταδιακή εκτροπή του από τη διάθεση σε ΧΥΤΑ, από το 2010 έως το 2020 για την Ελλάδα.

Είναι εύλογο ότι τα μη βιοαποδομήσιμα υλικά που εισέρχονται σε μια μονάδα βιολογικής επεξεργασίας θα ληφθούν αναλλοίωτα στην έξοδό της. Στην περίπτωση των αστικών αποβλήτων τέτοια υλικά περιλαμβάνουν προσμείξεις ξένων σωμάτων, όπως γυαλί και πλαστικά, αλλά και μη βιοδιασπάσιμους ρύπους (βαρέα μέταλλα, εμμένοντες οργανικούς ρύπους - POPs), μη ορατούς μακροσκοπικά και μικροσκοπικά, που ανιχνεύονται όμως στο τελικό προϊόν, υποβαθμίζοντας την αξία του και περιορίζοντας τις δυνατότητες χρήσης του. Συνεπώς, η καθαρότητα των υλικών εισόδου καθορίζει αναπόφευκτα την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Όσον αφορά τα αστικά απόβλητα, οι μονάδες βιολογικής επεξεργασίας μπορούν να δεχθούν:

- Το βιοαποδομήσιμο κλάσμα μετά από διαλογή στην πηγή, το οποίο μετά από μια αερόβια φάση βιοσταθεροποίησης μπορεί να χαρακτηριστεί ως «κομπόστ» και χαρακτηρίζεται από υψηλή ποιότητα, χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων και πολλές διεξόδους διάθεσης, και

- Ένα εμπλουτισμένο σε βιοαποδομήσιμα υλικά κλάσμα, που προέρχεται από εγκαταστάσεις μηχανικής διαλογής, η ποιότητα του οποίου εξαρτάται από τις επιμέρους διεργασίες της μηχανικής διαλογής, σε κάθε περίπτωση όμως είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή του διαλεγμένου στην πηγή κλάσματος. Σε αυτή την περίπτωση η βιολογική επεξεργασία μπορεί να λειτουργήσει εξ' ίσου καλά όσον αφορά τις βιολογικά εξαρτώμενες παραμέτρους (καταστροφή παθογόνων - υγειανοποίηση και βιοσταθεροποίηση), όμως το τελικό προϊόν θα περιέχει όλες τις μη βιοδιασπώμενες προσμείξεις και ρύπους του υλικού εισόδου, και πιθανότατα σε υψηλότερες συγκεντρώσεις καθώς μέρος του οργανικού υλικού έχει αποδομηθεί σε διοξείδιο του άνθρακα. Σε αυτή την περίπτωση το τελικό προϊόν είναι ένα βιοσταθεροποιημένο υλικό, τύπου κομπόστ το οποίο μπορεί να διατεθεί σε ΧΥΤΑ χωρίς να παραβιάζει τις απαιτήσεις της Οδηγίας για την υγειονομική ταφή, έχει όμως περιορισμένες δυνατότητες άλλων χρήσεων στις περισσότερες χώρες της ΕΕ. Οι περιορισμοί αυτοί αναμένεται να επεκταθούν σε όλη την ΕΕ με υιοθέτηση σχετικής Οδηγίας με αυστηρές προδιαγραφές για το κομπόστ, η οποία πιθανότατα δεν θα επιτρέπει καν τη χρήση του όρου για τα προϊόντα της βιοεπεξεργασίας που δεν προέρχονται από διαχωρισμένα στην πηγή βιοαποδομήσιμα υλικά.

Διακρίνονται δύο βασικές μορφές βιοεπεξεργασίας οργανικών αποβλήτων: η κομποστοποίηση (αερόβια, θερμοφιλή βιο-οξειδωση) και η αναερόβια χώνευση. Η πρώτη οδηγεί στην παραγωγή ενός σταθεροποιημένου εδαφοβελτιωτικού, το κομπόστ, ενώ η δεύτερη στην παραγωγή ενέργειας (βιοαέριο) και ενός σχετικά σταθεροποιημένου υπολείμματος, το οποίο μετά από περεταίρω αερόβια σταθεροποίηση μπορεί να μετατραπεί επίσης σε κομπόστ και να έχει ανάλογες χρήσεις.

Κάθε μορφή βιοεπεξεργασίας βασίζεται στη δράση των μικροοργανισμών, πρόκειται δηλαδή για βιολογικά συστήματα, τα οποία, ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα του τεχνολογικού τους μέρους – και του κόστους τους – ρυθμίζονται από κάποιες βιολογικές αρχές που καθορίζουν το μέγιστο δυνατό ρυθμό αναπαραγωγής των μικροοργανισμών και διάσπασης των αποβλήτων. Συνεπώς, δεν υπάρχουν συστήματα που να επιτυγχάνουν την επεξεργασία των αποβλήτων σε 2-3 μέρες, αν και θα μπορούσαν να προσφέρουν μια πιο εντατική προεπεξεργασία, την οποία θα ακολουθήσει μια πιο εκτεταμένη περίοδος κύριας επεξεργασίας με τεχνολογίες χαμηλότερου κόστους.

Το βασικό όφελος των βιολογικών μεθόδων επεξεργασίας αποβλήτων έγκειται στη δυνατότητα επιστροφής των οργανικών υλικών στο έδαφος, ολοκληρώνοντας έτσι έναν σημαντικό οικολογικό κύκλο και υποκαθιστώντας μέρος των εισροών χημικών λιπασμάτων στη γεωργία. Η βιοεπεξεργασία έχει ιδιαίτερη σημασία για τις Μεσογειακές χώρες όπου οι κλιματικές συνθήκες και οι καλλιεργητικές πρακτικές έχουν σαν αποτέλεσμα έναν υψηλό ρυθμό αποδόμησης της οργανικής ουσίας στο έδαφος, φέρνοντας πολλές περιοχές στα όρια της απερίμωσης. Η βιοεπεξεργασία των οργανικών αποβλήτων, κάτω από προϋποθέσεις, έχει τη δυνατότητα να συμβάλλει στην αντιμετώπιση και των δύο αυτών προβλημάτων, της διαχείρισης των αποβλήτων και της υποβάθμισης της ποιότητας του εδάφους, προσθέτοντας τον κρίκο που λείπει ώστε να κλείσει αειφορικά ο κύκλος της οργανικής ύλης [T.E.E, 2007].

Απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιοποίηση του οργανικού μέρους των αποβλήτων είναι η τήρηση υψηλών ποιοτικών προδιαγραφών που να διασφαλίζουν τόσο την ανθρώπινη υγεία όσο και την προστασία του περιβάλλοντος γενικότερα (Lasaridi et al., 2006, Λαζαρίδη κ.α., 2002). Παράμετροι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος που συνήθως ρυθμίζονται από τη σχετική νομοθεσία, αποτελούν η συγκέντρωση σε βαρέα μέταλλα και άλλους πιθανούς τοξικούς ρυπαντές (PCBs, PAH, διοξίνες, υπολείμματα φυτοφαρμάκων), η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών για τον άνθρωπο ή τα φυτά, οι ξένες προσμίξεις (πλαστικό, αιχμηρά), η φυτοτοξικότητα κ.ά. Είναι σημαντικό να τονιστεί, ότι σήμερα η κυρίαρχη άποψη είναι, ότι δεν είναι εφικτό να παρασκευαστεί υψηλής ποιότητας, ασφαλές για αγροτική χρήση κομπόστ, από ΑΣΑ που δεν έχουν υποστεί διαλογή στην πηγή [Lasaridi et al., 2006, Λαζαρίδη κ.α., 2002].

Στην επιλογή μεθόδων βιοεπεξεργασίας των οργανικών αποβλήτων σημαντικό ρόλο παίζει ο στόχος της επεξεργασίας και η δυνατότητα διάθεσης των προϊόντων, η οποία θα πρέπει να εξετάζεται από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού. Το κομπόστ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος αγροτικών και θερμοκηπιακών εφαρμογών, μπορεί να περιορίσει τη διάβρωση του εδάφους, να βελτιώσει τη δομή και την υδατο-ικανότητα του εδάφους, να περιορίσει την ανάγκη χρήσης λιπασμάτων και να συμβάλλει στον έλεγχο ορισμένων φυτοπαθογόνων μικροοργανισμών. Ωστόσο, το κομπόστ που προέρχεται από αστικά απόβλητα και λάσπες δεν είναι πάντα κατάλληλο για αγροτική εφαρμογή, ειδικά αν δεν πληροί υψηλές ποιοτικές προδιαγραφές και η διάθεσή του δεν πρέπει να θεωρείται εκ των προτέρων εξασφαλισμένη. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της αναερόβιας χώνευσης, όπου η δυνατότητα αξιοποίησης της ενέργειας του παραγόμενου βιοαερίου, καθώς και η διασφάλιση της διάθεσης του στερεού καταλοίπου πρέπει να εξετάζονται από την αρχή, στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Σήμερα, και

έτσι όπως διαμορφώνονται οι ενεργειακές προτεραιότητες στην ΕΕ, ο κατάλληλος σχεδιασμός μπορεί να εξασφαλίσει την αξιοποίηση του βιοαερίου και σε συνδυασμό με στοχευμένες πολιτικές (π.χ. UK), να οδηγήσει σε οικονομικά βιώσιμες συνδυασμένες λύσεις αναερόβιας και αερόβιας επεξεργασίας [Last, 2006].

3.2.1 Προεπεξεργασία Αστικών Στερεών Αποβλήτων

Ο τύπος της απαιτούμενης προεπεξεργασίας των αποβλήτων, πριν εισέλθουν στην μονάδα της βιοεπεξεργασίας εξαρτάται από το είδος και την καθαρότητα των αποβλήτων. Προκειμένου για ΑΣΑ, οι απαιτούμενες διεργασίες είναι άμεσα συνδεδεμένες με το σύστημα συλλογής. Σε περίπτωση συλλογής σύμμεικτων ΑΣΑ, απαιτούνται πολύπλοκες εγκαταστάσεις μηχανικής διαλογής, για τον διαχωρισμό των ΑΣΑ κατά είδος, με τη βοήθεια μηχανικών και φυσικών μεθόδων όπως αναφέρονται παρακάτω. Τέτοια συστήματα απαιτούν προχωρημένη τεχνολογία και σημαντική επένδυση και αποδίδουν περιορισμένης καθαρότητας προϊόντα, συνεισφέρουν όμως στην επίτευξη των στόχων της Οδηγίας για την υγειονομική ταφή με έναν ευέλικτο και συχνά ανταγωνιστικό οικονομικά και περιβαλλοντικά τρόπο, ανάλογα με τις τοπικές περιστάσεις.

Στην περίπτωση που το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ συλλέγεται χωριστά, με διαλογή στην πηγή, απαιτείται πάλι μια προεπεξεργασία, ο βαθμός της οποίας εξαρτάται από την καθαρότητα του συλλεγόμενου υλικού και κατά συνέπεια, από την ενεργό συμμετοχή των πολιτών στο πρόγραμμα χωριστής διαλογής. Στην περίπτωση που εφαρμόζεται κάποιο πρόγραμμα διαλογής στην πηγή για άλλο ρεύμα των ΑΣΑ (π.χ. υλικά συσκευασίας), η διεθνής εμπειρία έχει δείξει ότι δεν παρατηρείται αξιόλογη βελτίωση στην ποιότητα του οργανικού κλάσματος και έτσι απαιτούνται περίπου οι ίδιες πολύπλοκες εγκαταστάσεις προεπεξεργασίας όπως και στην περίπτωση συλλογής σύμμεικτων αποβλήτων.

3.3 Κομποστοποίηση

3.3.1 Βασικές αρχές και συνοπτική περιγραφή λειτουργίας

Κομποστοποίηση είναι η ελεγχόμενη, αερόβια, βιολογική, οξειδωτική διαδικασία αποικοδόμησης και σταθεροποίησης οργανικών υλικών που λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες που οδηγούν στην ανάπτυξη θερμοκρασιών της θερμόφιλης περιοχής. Το τελικό προϊόν, το κομπόστ, πρέπει να είναι αρκετά σταθεροποιημένο για αποθήκευση και εφαρμογή στο έδαφος χωρίς ανεπιθύμητες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Κατά συνέπεια η κομποστοποίηση αποτελεί εξειδικευμένη μορφή βιοσταθεροποίησης αποβλήτων κατά την οποία οι συνθήκες υγρασίας και αερισμού είναι τέτοιες που να εξασφαλίζουν την ταχεία ανάπτυξη ελεγχόμενων υψηλών θερμοκρασιών ευνοϊκών για την ανάπτυξη και επικράτηση θερμοφίλων μικροοργανισμών. Πρόκειται δηλ. για μια ελεγχόμενη βιο-οξειδωτική διεργασία η οποία [Zucconi & de Bertoldi, 1987a, b]:

- Αφορά ετερογενή οργανικά υλικά σε στερεή κατάσταση.

- Περνάει από μια αρχική φάση αποικοδόμησης κατά την οποία αναπτύσσονται θερμοκρασίες της θερμοφίλης περιοχής και παράγονται πρόσκαιρα φυτοτοξικές ουσίες, και
- Οδηγεί σε μια κατάσταση σταθεροποίησης, το τελικό προϊόν της οποίας χαρακτηρίζεται ως ώριμο κομπόστ.

Κατά την κομποστοποίηση, με τη βοήθεια της μικροβιακής κοινότητας (βακτήρια, ακτινομύκητες και μύκητες) και της μεταβολικής της δραστηριότητας με τη βοήθεια ενδοκυτταρικών και εξωκυτταρικών ενζύμων, επιτυγχάνεται η τροποποίηση και αποικοδόμηση της οργανικής ύλης που οδηγεί [Haug, 1993]:

- στο σχηματισμό ενός πλήθους μεταβολικών προϊόντων και κλασμάτων, όπως χουμικών ουσιών και λιγνο-πρωτεϊνών,
- στην απελευθέρωση θρεπτικών στοιχείων από οργανικές ενώσεις και μεταφορά τους σε διαλυτά, ή αδιάλυτα ανόργανα άλατα, και
- στην έκλυση αερίων, όπως διοξειδίου του άνθρακα, υδρατμών, αμμωνίας, οξειδίων του αζώτου και από πιθανούς αναερόβιους θύλακες, μεθανίου και υδρόθειου.

Οι κυριότερες ομάδες οργανικών ουσιών που βρίσκονται στα ΒΑΑ είναι οι πρωτεΐνες (3-4%), τα λίπη (2-4%), τα σάκχαρα (8-10%), οι κυτταρίνες και ημικυτταρίνες (44-50%) και η λιγνίνη (12-15%). Τα υλικά που συνιστούν τα ΒΑΑ, ανάλογα με το βαθμό βιοαποδομησιμότητάς τους χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Εύκολα αποδομήσιμα υλικά (σάκχαρα, άμυλο, ημικυτταρίνες, μερικές πρωτεΐνες).
- Υλικά που χρειάζονται αρκετό διάστημα και κατάλληλες συνθήκες για να αποδομηθούν (κυτταρίνες, λίπη και ορισμένες πρωτεΐνες).
- Υλικά αρκετά ανθεκτικά στην αποδόμηση (λιγνίνες και κερατίνες).

Κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης διακρίνονται οι παρακάτω φάσεις, οι οποίες απαιτούν συνήθως διαφορετικούς χειρισμούς [Lasaridi, 1998]:

i) Αρχικά, οι μεσόφιλοι οργανισμοί δραστηριοποιούνται και η θερμοκρασία φτάνει τους 50°C περίπου.

ii) Στη συνέχεια αυξάνεται η θερμοκρασία μέχρι τους 65 °C περίπου και επικρατούν οι θερμοφίλοι οργανισμοί. Η φάση αυτή εξαρτάται από την ύπαρξη αποθεμάτων οξυγόνου και για αυτό πρέπει να λαμβάνονται μέτρα αερισμού της οργανικής μάζας. Επίσης, χρειάζονται μέτρα απομάκρυνσης της παραγόμενης θερμότητας (π.χ. με συχνή ανάδευση ή πρόσθετο αερισμό), γιατί η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αδρανοποίηση ή και θερμικό θάνατο των μικροοργανισμών, και συνεπώς επιβράδυνση της διεργασίας.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής σχεδόν όλοι οι παθογόνοι μικροοργανισμοί καταστρέφονται και το παραγόμενο προϊόν που χαρακτηρίζεται ως "φρέσκο κομπόστ" θεωρείται ως υγεινοποιημένο (sanitised). Το "φρέσκο κομπόστ" έχει μερικώς μόνο αποδομηθεί και δεν έχει ακόμη σταθεροποιηθεί, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί με κατάλληλο τρόπο για καλλιέργειες (π.χ. το χειμώνα σαν εδαφοβελτιωτικό, για προετοιμασία εδάφους). Η περαιτέρω αποσύνθεση και σταθεροποίηση γίνεται στο έδαφος με αποτέλεσμα τη βελτίωση της δομής του και την αυξημένη δράση της εδαφικής μικρο-χλωρίδας.

iii) Η οργανική μάζα σταθεροποιείται, η θερμοκρασία κατέρχεται βαθμιαία και η δραστηριότητα των μικροοργανισμών σταματά. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η πτώση της θερμοκρασίας από μόνη της, δεν αποτελεί απαραίτητα ένδειξη σταθεροποίησης του υλικού, καθώς η μικροβιακή δραστηριότητα μπορεί να παρεμποδιστεί από πλήθος άλλων παραγόντων, με συχνότερο την χαμηλή υγρασία, δίνοντας μια ψευδή εικόνα σταθεροποίησης.

Σε αυτή τη φάση, το παραγόμενο σταθεροποιημένο κομπόστ βρίσκεται στην πορεία της χουμοποίησης, δεν υπάρχει κίνδυνος φυτοτοξικότητας και είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί στο έδαφος ακόμη και όταν τα καλλιεργούμενα φυτά έχουν αναπτυχθεί (πρέπει πάντως να αποφεύγεται η άμεση επαφή με τις ρίζες - καλλιέργεια σε γλάστρες - επειδή μπορεί προσωρινά να ανασταλεί η ανάπτυξη).

iv) Το κομπόστ υποβάλλεται σε μια μεγάλη περίοδο χουμοποίησης και ωριμάζει. Το "ώριμο κομπόστ" είναι χρήσιμο υλικό για την παρασκευή τεχνητού υποστρώματος που έρχεται σε επαφή με τις ρίζες μεταφυτευμένων φυτών. Υγειονομικά είναι ασφαλές και η χρησιμότητα του στα φυτώρια, για την καλλιέργεια λουλουδιών και την εντατική καλλιέργεια, μπορεί να συγκριθεί μόνο μ' αυτήν του φυσικού χούμου.

Οι τρεις πρώτες φάσεις λαμβάνουν χώρα εντός μικρών χρονικών διαστημάτων (2-8 εβδομάδων ανάλογα με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου συστήματος), ενώ η ωρίμανση απαιτεί μήνες (περίπου 3 - 6 μήνες).

Διάφοροι παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, σύνθεση των αποβλήτων, το μέγεθος των τεμαχιδίων, το πορώδες και η δομή του υποστρώματος, ο αερισμός και η συγκέντρωση του οξυγόνου στη μάζα του υποστρώματος, και το pH καθορίζουν τους επικρατούντες κάθε φορά μικρο-οργανισμούς καθώς και την ένταση της μικροβιακής δραστηριότητας και κατά συνέπεια το ρυθμό της αποδόμησης και βιοσταθεροποίησης των αποβλήτων. Πιο συγκεκριμένα, σημαντικό ρόλο στην έκβαση της κομποστοποίησης παίζουν οι ακόλουθοι παράμετροι [T.E.E., 2007]:

i) Θερμοκρασία

Η δράση των μικροοργανισμών προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία αν δεν ελεγχθεί μπορεί να ξεπεράσει τους 75 °C, προκαλώντας αδρανοποίηση ή και θερμικό θάνατό τους. Σε όλα τα κεντρικά συστήματα κομποστοποίησης, η θερμοκρασία ελέγχεται ώστε να παραμένει πάνω από τους 55 °C και συχνά πάνω από τους 65 °C για τρεις τουλάχιστον ημέρες. Αυτό έχει ως συνέπεια την εξαφάνιση των παθογόνων μικροοργανισμών με αποτέλεσμα την εξυγίανση του προϊόντος.

Ωστόσο, οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσουν την καταστροφή και άλλων ομάδων μικροοργανισμών (π.χ. ακτινομύκητες), χρήσιμων για την αποδόμηση ανθεκτικών συστατικών του οργανικού κλάσματος π.χ. κυτταρίνες και λιγνίνες. Έτσι, θα πρέπει να γίνεται προσεκτικός έλεγχος της θερμοκρασίας με γρήγορη διέλευση από το θερμόφιλο στάδιο και διατήρηση κατόπιν της θερμοκρασίας σε χαμηλότερα επίπεδα, προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος της διεργασίας και να παραληφθεί προϊόν καλής ποιότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με ρύθμιση της συχνότητας των αναδεύσεων ή της παροχής του αερισμού.

ii) Αναλογία θρεπτικών συστατικών

Για να επιτευχθεί βέλτιστος βαθμός βιοσταθεροποίησης, είναι απαραίτητο να υπάρχουν τα θρεπτικά συστατικά για τους μικροοργανισμούς σε κατάλληλες αναλογίες. Τα βακτήρια χρησιμοποιούν τον άνθρακα ως πηγή ενέργειας και το άζωτο για την ανάπτυξή τους. Έτσι ο λόγος C/N είναι σε μεγάλο βαθμό καθοριστικός του ρυθμού της όλης διαδικασίας.

Το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ έχει συνήθως λόγο C/N κυμαινόμενο από 20:1 μέχρι 60:1 (μεγάλος λόγος σημαίνει π.χ. αυξημένη ποσότητα χαρτιού που προσφέρει C, έναντι υπολειμμάτων τροφών που προσφέρουν N). Είναι γενικά παραδεκτό ότι η βέλτιστη βιοσταθεροποίηση επιτυγχάνεται όταν ο λόγος C/N κυμαίνεται από 25:1 μέχρι 35:1. Όταν ο λόγος C/N είναι μεγαλύτερος του 35 στην αρχική οργανική ουσία, προκαλείται μια αργή αποσύνθεση που αυξάνει τον απαιτούμενο χρόνο επεξεργασίας. Οι μικροοργανισμοί υποχρεώνονται να αναπτύσσονται σε διαδοχικούς βιολογικούς κύκλους, οξειδώνοντας έτσι αργά το πλεόνασμα του άνθρακα μέχρι να φέρουν το λόγο C/N σε ευνοϊκές τιμές για το μεταβολισμό τους. Αν αντίθετα το αρχικό οργανικό υλικό παρουσιάζει τιμές C/N πάρα πολύ χαμηλές ευνοούνται απώλειες αζώτου με πτητικότητα της αμμωνίας, φαινόμενο ακόμη εντονότερο όταν συντρέχουν άλλες συνθήκες, όπως υψηλές τιμές θερμοκρασίας και pH.

Σε απόβλητα με υψηλό λόγο C/N είναι συχνή η προσθήκη ιλύος από εγκαταστάσεις καθαρισμού λυμάτων η οποία έχει λόγο C/N περίπου ίσο με 10, ενώ για χαμηλό λόγο C/N ενδείκνυται η προσθήκη υλικών πλούσιων σε C, όπως πριονίδι, κλαδιά ή άχυρα.

Το τελικό προϊόν (κομπόστ) πρέπει να ελέγχεται ώστε ο λόγος C/N να μην είναι μεγαλύτερος από 30:1 γιατί σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος κατά την εδαφική εφαρμογή του κομπόστ, να συνεχιστεί η αποδόμηση της οργανικής ουσίας από τους εμπιερχόμενους μικροοργανισμούς, οι οποίοι θα απορροφήσουν ακόμη και από το έδαφος το άζωτο – που είναι πολύτιμο στοιχείο ως λίπασμα - για την κυτταρική τους ανάπτυξη. Ωστόσο, αυτό εξαρτάται και από τη βιοδιαθεσιμότητα του άνθρακα στο κομπόστ και θα πρέπει να εξετάζεται σφαιρικότερα, με κατάλληλες μετρήσεις του βαθμού σταθεροποίησης του κομπόστ (αναπνευστική δραστηριότητα, δυναμικό αυτοθέρμανσης κ.ά.). Ο λόγος C/N από μόνος του δεν αρκεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του κομπόστ στο έδαφος, γι' αυτό και σταδιακά αντικαθίσταται από άλλες αναλύσεις στις προδιαγραφές ποιότητας των κομπόστ.

iii) Υγρασία

Η υγρασία αποτελεί βασικό παράγοντα για τη βιοσταθεροποίηση, επειδή η μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών λαμβάνει χώρα στην υγρή φάση. Η βέλτιστη υγρασία του υποστρώματος εξαρτάται από τη σύστασή του, από το μέγεθος των σωματιδίων, από τον αερισμό και από τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται. Κατά τη βιοσταθεροποίηση με τη μέθοδο των αναστρεφόμενων σειραδίων η ιδανική υγρασία είναι μεταξύ 40 και 60 %. Για υγρασία μικρότερη του 40% σύντομα αφυδατώνεται το υπόστρωμα εξαιτίας της μικροβιακής δραστηριότητας, με αποτέλεσμα να συμβαίνει φυσική αλλά όχι βιολογική σταθεροποίηση. Για υγρασία άνω του 70% μεταξύ των

σωματιδίων υπάρχει περίσσεια νερού με αποτέλεσμα να εμποδίζεται ο αερισμός και να ευνοείται η ανάπτυξη αναερόβιων θυλάκων.

Η υγρασία του τελικού προϊόντος δεν θα πρέπει να είναι υψηλή, ώστε να μην αποθηκεύεται, μεταφέρεται και πωλείται περίσσεια νερού.

iv) Αερισμός – Παροχή οξυγόνου

Η παρουσία οξυγόνου αποτελεί αποφασιστικό παράγοντα για τη διαδικασία της κομποστοποίησης, η οποία είναι εξ' ορισμού αερόβια, αφού το οξυγόνο είναι απαραίτητο για το μεταβολισμό και τη μικροβιακή αναπνοή καθώς και για την οξείδωση των οργανικών ενώσεων. Η σύσταση του αέρα μεταξύ των σωματιδίων αρχίζει να μεταβάλλεται μόλις αρχίσει η βιοοξειδωτική δραστηριότητα, καθώς αυξάνει σταδιακά η συγκέντρωση του CO₂ και μειώνεται η συγκέντρωση του O₂, με κίνδυνο τη δημιουργία εκτεταμένων αναερόβιων θυλάκων. Οι διαστάσεις των σειραδίων είναι παράγοντας που επηρεάζει αποφασιστικά τον αερισμό, όπως επίσης ο λεπτοτεμαχισμός των αποβλήτων, με τον οποίο αυξάνει η επιφάνεια των προς ζύμωση υλικών (διευκόλυνση προσβολής από μικροοργανισμούς) αλλά μειώνεται το πορώδες. Η κατανάλωση O₂ είναι ανάλογη με την ένταση της μικροβιακής δραστηριότητας και σε θερμοκρασίες 45 – 55 °C παρατηρείται η μέγιστη κατανάλωση οξυγόνου.

Ο αερισμός ωστόσο, κατά την κομποστοποίηση έχει διττό ρόλο: εκτός από την εξασφάλιση αερόβιων συνθηκών, η παροχή αέρα έχει στόχο και τον έλεγχο της θερμοκρασίας του σωρού, η οποία αλλιώς μπορεί να ανέλθει σε δυσμενή για τους μικροοργανισμούς επίπεδα (π.χ. άνω των 55–60 °C).

v) pH

Το αρχικό οργανικό κλάσμα έχει pH περίπου 7 (βέλτιστες τιμές για κομποστοποίηση 5.5 μέχρι 8.0). Τα βακτήρια προτιμούν pH ουδέτερο ενώ οι μύκητες όξινο. Κατά την έναρξη της βιοσταθεροποίησης το pH μειώνεται, επειδή κατά τα πρώτα στάδια της αποσύνθεσης και με τη δράση μιας οξυγενούς βακτηριακής μικροχλωρίδας, παράγονται οργανικά οξέα (π.χ. αμινοξέα). Στη συνέχεια η τιμή του αυξάνεται, επειδή αφ' ενός τα οργανικά οξέα καταναλώνονται και αφ' ετέρου, με την έναρξη της πρωτεϊνολυτικής διαδικασίας παράγεται άζωτο και αμμωνία, το δε υλικό μετατρέπεται σε αλκαλικό (το pH φτάνει μέχρι περίπου 8). Τελικά, το pH πέφτει λίγο και σταθεροποιείται σε ελαφρά αλκαλική περιοχή (7,5 έως 8,5) ενώ για την κανονική ανάπτυξη των φυτών συνίσταται περιοχή pH 5,5 έως 8,0.

3.3.2 Συστήματα και τεχνολογίες κομποστοποίησης

Η αυθόρμητη ή μερικώς ελεγχόμενη αποσύνθεση των οργανικών αποβλήτων με στόχο την αγροτική χρήση του παραγόμενου προϊόντος ήταν γνωστή εδώ και αιώνες. Ωστόσο, η οργάνωση της διαδικασίας στη μορφή των διαφόρων τεχνολογιών κομποστοποίησης συνέβη τις τελευταίες δεκαετίες, ως αποτέλεσμα της ανάγκης επεξεργασίας πιο απαιτητικών αποβλήτων, όπως τα ΑΣΑ και της αποτελεσματικότερης προστασίας του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.

Τα συστήματα κομποστοποίησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ανοικτά και κλειστά συστήματα (Πίνακας 3.1) [Τ.Ε.Ε., 2007].

Πίνακας 3.1 : Συστήματα κομποστοποίησης.

ΑΝΟΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (σειράδια)	ΚΛΕΙΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (βιοαντιδραστήρες και κλειστά κτίρια)
<ul style="list-style-type: none"> - Αναδεδυόμενοι σωροί (windrows) - Στατικοί σωροί (aerated static piles – ASP) <ul style="list-style-type: none"> ο με απορρόφηση αέρα ο με εμφύσηση αέρα ο με μεταβαλλόμενο αερισμό (απορρόφηση και εμφύσηση) ο με εμφύσηση ή/και απορρόφηση αέρα σε συνδυασμό με έλεγχο θερμοκρασίας 	<ul style="list-style-type: none"> Κάθετοι αντιδραστήρες <ul style="list-style-type: none"> - συνεχούς ροής - ασυνεχούς ροής Οριζόντιοι αντιδραστήρες <ul style="list-style-type: none"> - στατικοί - με κίνηση του υλικού

Στα ανοικτά συστήματα η κομποστοποίηση λαμβάνει χώρα στην ύπαιθρο ή σε ημίκλειστα κτίρια. Στα κλειστά συστήματα η κομποστοποίηση λαμβάνει χώρα σε ειδικά σχεδιασμένους βιοαντιδραστήρες ή σε κλειστά κτίρια, απ' όπου είναι εφικτή η απαγωγή και επεξεργασία του αέρα και των οσμών, οι οποίες αποτελούν σημαντικό πρόβλημα για πολλές μονάδες κομποστοποίησης, ειδικά όταν είναι εγκατεστημένες κοντά σε κατοικημένες περιοχές.

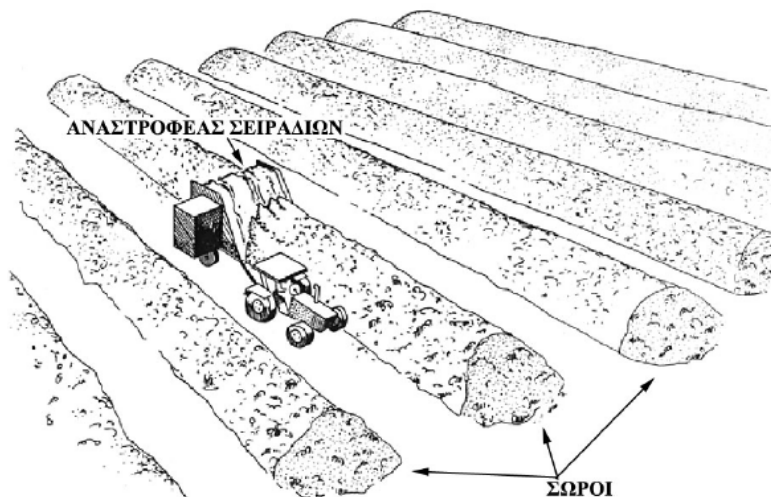
3.3.2.1 Ανοικτά συστήματα

Τα ανοικτά συστήματα ή σειράδια διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, ανάλογα με τη μέθοδο του αερισμού: i) στα αναστρεφόμενα σειράδια (windrows) και ii) στους αεριζόμενους στατικούς σωρούς (aerated static pile – ASP) και χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τα κλειστά συστήματα.

3.3.2.2 Αναστρεφόμενα σειράδια

Η επιφάνεια που καταλαμβάνεται από τα σειράδια πρέπει να είναι επιστρωμένη και να υπάρχει σύστημα αποχέτευσης και ύδρευσης. Αυτές είναι παράμετροι που επηρεάζουν το κόστος κεφαλαίου, όπως και ο τρόπος αερισμού των σειραδίων (με ανάδευση ή εμφύσηση- απορρόφηση αέρα). Βέλτιστο ύψος θεωρούνται τα 1,5 – 3,0m, αφού σε μικρότερα ύψη υπάρχουν μεγάλες απώλειες θερμότητας και κατά συνέπεια η θερμοκρασία είναι χαμηλή, ενώ σε μεγαλύτερα ύψη υπάρχει κίνδυνος εγκατάστασης αναερόβιων συνθηκών. Το πλάτος του σειραδιού δεν έχει μεγάλη επίδραση στη διεργασία (κυμαίνεται γύρω στα 3-5 m, ανάλογα με το μέγεθος του αναστροφέα), όπως και το μήκος που επιλέγεται συνήθως ως η ισοδύναμη παραγωγή μιας ημέρας ή ανάλογα με τη γεωμετρία της κομποστοπλατίας. Ένας τυπικός σχηματισμός φτάνει μέχρι 100m μήκος και μέχρι 5m πλάτος. Τα συστήματα αυτά είναι ανοικτά και λειτουργούν συνήθως κάτω από υπόστεγο. Η διατομή των σειραδίων είναι συνήθως τριγωνική με λόγο (πλάτος βάσης)/ύψος τουλάχιστον 2 (Σχήμα 3.2).

Η αναστροφή των σειραδίων είναι απαραίτητη για την παροχή οξυγόνου και τον έλεγχο της θερμοκρασίας στα συστήματα των αναστρεφόμενων σειραδίων, (1-2 φορές κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας) καθώς βελτιώνει τη δομή και το πορώδες του υλικού. Η αναστροφή μπορεί να επιτευχθεί είτε με φορτωτές είτε με ειδικά μηχανήματα αναστροφής του κομπόστ. Τα μηχανήματα αυτά φέρουν ατέρμονα κοχλία και περνώντας πάνω από τα σειράδια προκαλούν μια πλήρη στατική ανάδευση της μάζας τους. Οι αναστροφείς μπορεί να είναι ελκόμενοι από ένα τρακτέρ ή συναφές μηχάνημα (για μονάδες χαμηλής δυναμικότητας) ή αυτοκινούμενοι [Γιδαράκος Ε., 2005].



Σχήμα 3.2: Αναστροφέας σειραδίων [Γιδαράκος Ε., 2005].

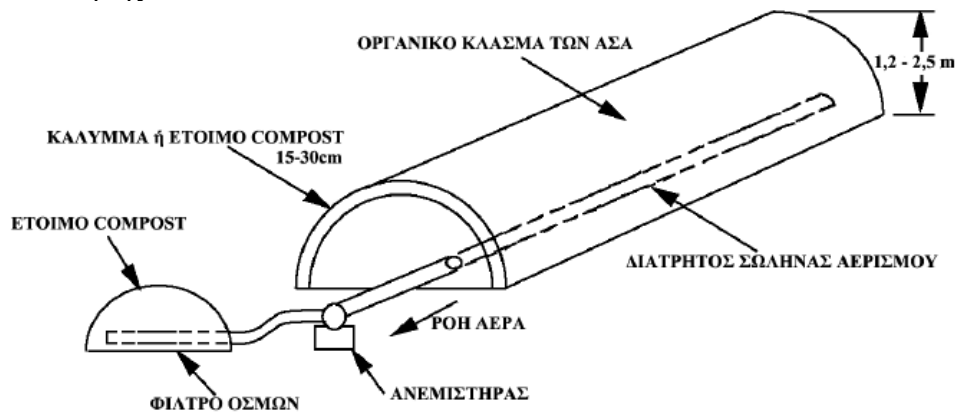
3.3.2.3 Αεριζόμενοι στατικοί σωροί

Η μέθοδος αυτή (Σχήμα 3.3) απαιτεί ομοίως την τοποθέτηση των υλικών προς λιπασματοποίηση σε σωρούς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως οι σωροί αεριζονται μηχανικά και τα συστήματα αυτά ονομάζονται και δυναμικά. Οι σωροί τοποθετούνται πάνω σε ένα δίκτυο αεριστήρων οι οποίοι παρέχουν τον απαραίτητο αέρα για τη λιπασματοποίηση. Ο αέρας είτε παρέχεται με θετική πίεση (τροφοδοσία αέρα στο σωρό) είτε με αρνητική πίεση (αναρρόφηση αέρα από το σωρό).

Μέσω σωστού προγραμματισμού της συχνότητας και της ποσότητας του αερισμού μπορεί να ελεγχθεί και η θερμοκρασία που αναπτύσσει ο σωρός, ενώ τα απαέρια μπορούν εύκολα να καθαριστούν από οσμές. Επειδή όμως οι σωροί δεν αναδεύονται υπάρχει το ενδεχόμενο η εξωτερική επιφάνεια του σωρού να μην αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία (550°C) για την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών. Για το λόγο αυτό τοποθετείται ένα κάλυμμα από έτοιμο compost, το οποίο δρα ως θερμομονωτικό. Οι απαιτήσεις χώρου για τη μέθοδο αυτή είναι αρκετά μικρότερες από τη μέθοδο των αναδευόμενων σωρών και έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους, όπως και οι αναστρεφόμενοι σωροί. Η περίοδος ωρίμανσης ανέρχεται από έξι έως δώδεκα (6-12) εβδομάδες [Γιδαράκος Ε., 2005].

Τα συστήματα αυτά μπορούν να είναι εντελώς ανοικτά (γεγονός που με βάση την ευρωπαϊκή νομοθεσία δεν επιτρέπεται για απόβλητα που περιέχουν υπολείμματα κρέατος - συμπεριλαμβανομένων και των αποβλήτων κουζίνας) ή στεγασμένα. Όσον αφορά τα

ΑΣΑ και τις συνιστώσες τους, τα συστήματα αυτά προσφέρονται για την επεξεργασία των αποβλήτων κήπου, που προκαλούν χαμηλή όχληση κατά την επεξεργασία τους, ενώ δεν απαιτούν ακριβές τεχνολογίες υψηλού επιπέδου για τον έλεγχο των παραμέτρων της κομποστοποίησης.



Σχήμα 3.3: Μέθοδος δυναμικά αεριζόμενων σωρών [Γιδαράκος Ε., 2005].

3.3.2.4 Κλειστά συστήματα

Στα συστήματα αυτά το προς λιπασματοποίηση μίγμα των ΑΣΑ τοποθετείται μέσα σε βιοαντιδραστήρα όπου και βιοαποικοδομείται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες αερισμού, υγρασίας και συνεχούς ανάδευσης. Οι αντιδραστήρες μπορούν να περιλαμβάνουν περισσότερα του ενός διαμερίσματα (π.χ. πολυώροφα σιλό), να περιστρέφονται ή να περιλαμβάνουν μηχανισμούς περιστροφής και ανάδευσης των υλικών και μπορούν να τοποθετηθούν ακόμα και μέσα σε κτίρια. Συνήθως είναι συστήματα συνεχούς ροής αλλά έχουν παρουσιαστεί και συστήματα batch. Σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι ότι η διαδικασία λαμβάνει χώρα κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες ώστε να επιταχύνεται η λιπασματοποίηση. Η μέθοδος αυτή αν και πιο πολύπλοκη από τις μεθόδους των σωρών παράγει ελάχιστες οσμές και ελάχιστα ή καθόλου στραγγίγματα. Επίσης η παροχή αέρα μπορεί να ελεγχθεί πλήρως, αφού με τη χρήση αισθητήρων οξυγόνου ο αέρας μπορεί να κατευθυνθεί ακριβώς στην περιοχή που παρουσιάζεται έλλειμμα οξυγόνου. Ο χρόνος ωρίμανσης ποικίλει από μία έως τέσσερις εβδομάδες. [Γιδαράκος Ε., 2005].

3.4 Αναερόβια χώνευση

3.4.1 Βασικές αρχές και συνοπτική περιγραφή λειτουργίας

Ο όρος «αναερόβια χώνευση» (ΑΧ) αναφέρεται στην ελεγχόμενη βιολογική αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων κάτω από συνθήκες έλλειψης οξυγόνου (αναερόβιες συνθήκες) και οδηγεί στην παραγωγή βιοαερίου (ένα μείγμα CH_4 και CO_2 το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας) και ενός υδαρούς υπολείμματος (digestate = χωνεμένη ιλύς). Η χωνεμένη ιλύς μπορεί να διατεθεί απ' ευθείας στο έδαφος ή να υποστεί περαιτέρω αερόβια επεξεργασία για τη σταθεροποίησή της και να μετατραπεί σε κομπόστ (με την προϋπόθεση ότι ικανοποιεί κάποια θεσμοθετημένα κριτήρια ποιότητας) [Τ.Ε.Ε., 2007].

Η αναερόβια χώνευση έχει χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως για αρκετές δεκαετίες για την επεξεργασία της βιολογικής ιλύος από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (ΜΕΛ) ή ρευστών αγροτικών αποβλήτων, αλλά μόνο σχετικά πρόσφατα εφαρμόζεται ως μέθοδος βιοεπεξεργασίας του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, συχνά σε συνδυασμό με ιλύ βιολογικών καθαρισμών και / ή κτηνοτροφικά απόβλητα [Λαζαρίδη κ.ά. 2003, DEFRA 2005a].

Η αναερόβια χώνευση στερεών αποβλήτων συχνά αναφέρεται και ως βιοαεριοποίηση (biogasification). Ο τελευταίος όρος υπονοεί τη μερική μετατροπή των στερεών αποβλήτων σε αέριο (βιοαέριο), κύριο συστατικό του οποίου είναι το καύσιμο μεθάνιο. Η παραγωγή του μεθανίου κάνει την αναερόβια χώνευση μία βιολογική διεργασία μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια (waste to energy). Η αναερόβια χώνευση, η οποία αποτελεί μία διεργασία που λαμβάνει χώρα αυθόρμητα σε αναερόβια περιβάλλοντα, όπως οι ορυζώνες, τα έλη, οι ΧΥΤΑ και οι χωματερές, μπορεί να λειτουργήσει κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε ειδικές εγκαταστάσεις, με στόχο τη μεγιστοποίηση του παραγόμενου μεθανίου καθώς και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών προβλημάτων και οχλήσεων (π.χ. διαφυγή μεθανίου, οσμές).

Η αναερόβια χώνευση περιλαμβάνει βιολογικές διεργασίες που μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις διακριτές φάσεις [ΕΑ, 2002b, Παναγιωτακόπουλος, 2002]:

- Υδρόλυση των πολυμερών οργανικών ενώσεων (λίπη, πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες) με τη βοήθεια ενζύμων που εκλύονται από υδρολυτικά βακτήρια και μετατροπή τους σε υδατοδιαλυτά προϊόντα μικρότερου μοριακού βάρους (μονοσακχαρίτες, αμινοξέα, κλπ).

- Ζύμωση των παραπάνω διαλυτών προϊόντων και μετατροπή τους σε μια ποικιλία ενδιάμεσων προϊόντων, όπως μικρού μήκους οργανικά οξέα, αλκοόλες, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και αμμωνία.

- Οξεογένεση, δηλαδή παραγωγή οξικού οξέος, διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου από τα προϊόντα του προηγούμενου σταδίου με τη βοήθεια υποχρεωτικά οξεογενών βακτηρίων. Στη φάση αυτή το διοξείδιο του άνθρακα είναι το κύριο συστατικό του βιοαερίου.

- Μεθανιογένεση, κατά την οποία τα προϊόντα της προηγούμενης φάσης μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα από τα μεθανιογενή βακτήρια.

Καθεμία από τις παραπάνω φάσεις λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια συγκεκριμένων ομάδων βακτηρίων, τα οποία ταξινομούνται με βάση τις τροφικές τους απαιτήσεις. Ταυτόχρονα, λαμβάνουν χώρα πολλές άλλες αντιδράσεις στις οποίες συμμετέχουν και ομάδες βακτηρίων, ανταγωνιστικές με τα μεθανιογενή. Η όλη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης εξαρτάται από την καλή ισορροπία και συνύπαρξη των παραπάνω ομάδων μικροοργανισμών, καθώς καμία από τις ομάδες δεν μπορεί να λειτουργήσει μόνη της. Έτσι, για παράδειγμα αν εκλείψουν τα αργά αναπτυσσόμενα μεθανιογενή βακτήρια, τότε το οξικό οξύ και τα άλλα οργανικά οξέα που παράγονται κατά τις προηγούμενες φάσεις δεν θα αποδομούνται και η οξύτητα του συστήματος θα αυξηθεί σταδιακά σε επίπεδα

που θα παρεμποδίζουν τόσο τη ζύμωση όσο και την οξεογένεση. Λόγω αυτής της αλληλεξάρτησης, η αναερόβια χώνευση είναι αρκετά πιο ευαίσθητη και απαιτητική διεργασία σε σχέση με την κομποστοποίηση και απαιτεί ένα υψηλότερο επίπεδο ελέγχου.

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διεργασία που λαμβάνει χώρα στην υγρή φάση και χρησιμοποιείται σε υποστρώματα με σχετικά χαμηλή συγκέντρωση στερεών και υγρασία που κυμαίνεται από 60 έως 95%. Για υγρά υποστρώματα (>80% υγρασία), το τελικό στάδιο της μεθανιογένεσης είναι συνήθως το περιοριστικό της όλης διεργασίας. Για τα στερεά υποστρώματα όμως (60-80% υγρασία), όπως τα ΑΣΑ, η περιοριστική φάση στη συνολική διεργασία είναι η υδρόλυση των στερεών, δηλαδή το πρώτο στάδιο. Σημειώνεται ότι τα ΑΣΑ θα πρέπει να αναμειχθούν με νερό ή άλλα υγρά απόβλητα προκειμένου να επιτευχθούν αυτά τα επίπεδα υγρασίας.

Η αναερόβια χώνευση μπορεί να λειτουργήσει σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, ωστόσο υπάρχουν δύο περιοχές θερμοκρασίας όπου η απόδοσή της βελτιστοποιείται:

- ο η μεσόφιλη (περίπου 35 °C) με εύρος από 30 °C έως 40 °C, και
- ο η θερμοφιλή περιοχή (περίπου 55 °C) με εύρος από 50 °C έως 65 °C.

Καθώς οι αναερόβιες διεργασίες δεν είναι έντονα εξώθερμες, η βιολογικά παραγόμενη θερμότητα δεν επαρκεί για τη διατήρηση της θερμοκρασίας στο βέλτιστο επίπεδο, ακόμη και για τη μεσόφιλη χώνευση. Έτσι, χρειάζεται η παροχή πρόσθετης, εξωτερικής θερμότητας, η οποία όμως μπορεί να προέλθει από την καύση του παραγόμενου βιοαερίου, η ποσότητα του οποίου επαρκεί τόσο για τη διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας όσο και για την παραγωγή περίσσειας ενέργειας (ηλεκτρισμού ή/και θερμότητας).

Άλλες παράμετροι που προσδιορίζουν την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης είναι το μέγεθος των σωματιδίων του υποστρώματος, ο λόγος άνθρακα προς άζωτο (C/N) και η πιθανή παρουσία τοξικών για τους μικροοργανισμούς ουσιών στο υπόστρωμα. Πιο συγκεκριμένα [Λαζαρίδη κ.ά., 2003]:

- Μέγεθος σωματιδίων

Το βέλτιστο μέγεθος των σωματιδίων εξαρτάται από το βαθμό βιοδιασπασιμότητας του υποστρώματος. Έτσι υποστρώματα με μικρή έως μέτρια βιοαποδομησιμότητα (π.χ. χαρτί) θα πρέπει να είναι τεμαχισμένα σε ένα σχετικά μικρό μέγεθος σωματιδίων. Αντίθετα, για ταχέως βιοαποδομήσιμα απόβλητα (π.χ. υπολείμματα φαγητών), το μικρό μέγεθος αποτελεί μειονέκτημα αφού οδηγεί σε μεγάλη παραγωγή οξέων τα οποία χαμηλώνουν το pH παρεμποδίζοντας την ανάπτυξη των περισσότερο «ευαίσθητων» μεθανιογενών βακτηρίων.

- Λόγος C/N

Για υποστρώματα με μέτρια έως υψηλή βιοαποδομησιμότητα (π.χ. χαρτί, υπολείμματα τροφών), ο βέλτιστος λόγος άνθρακα προς άζωτο κυμαίνεται μεταξύ 25 και 30 ενώ για βραδέως βιοαποδομούμενα υποστρώματα (π.χ. ξύλα), ο λόγος αυτός μπορεί και να ανέρχεται στο 40, καθώς σε αυτή την περίπτωση μόνο ένα μικρό μέρος του άνθρακα είναι άμεσα διαθέσιμο στους μικροοργανισμούς. Χαμηλές τιμές C/N γενικά έχουν σαν

αποτέλεσμα την μεγαλύτερη εκπομπή αζώτου με τη μορφή αέριας αμμωνίας, η συγκέντρωση της οποίας μπορεί να αποβεί τοξική για τον μικροβιακό πληθυσμό. Οι βέλτιστες τιμές C/N επιτυγχάνονται με την κατάλληλη μίξη συστατικών των αποβλήτων, κάτι που απαιτεί καλό σχεδιασμό για τα απόβλητα που δέχεται κάθε εγκατάσταση, την αποθήκευσή τους και την τροφοδοσία του βιοαντιδραστήρα.

- Πιθανή παρουσία τοξικών ουσιών στο υπόστρωμα

Η ύπαρξη ουσιών που μπορούν να έχουν αρνητική επίδραση στον μικροβιακό πληθυσμό είναι πιθανή σε ένα υπόστρωμα όπως τα ΑΣΑ (βαρέα μέταλλα, τοξικές οργανικές ενώσεις κλπ.). Κάποιες ουσίες (π.χ. ορισμένα μέταλλα όπως Cu και Zn) είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών κάτω από συγκεκριμένες συγκεντρώσεις, μεγαλύτερες όμως συγκεντρώσεις μπορούν να αποβούν τοξικές. Ο Πίνακας 3.5 παρουσιάζει τις παρεμποδιστικές κατά την αναερόβια χώνευση συγκεντρώσεις συγκεκριμένων ενώσεων [Λαζαρίδη κ.ά., 2003].

Εκτός λίγων εξαιρέσεων, η χρήση της βιοαεριοποίησης σε αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ) ήταν περιορισμένη παγκοσμίως έως και την αρχή της δεκαετίας του 1980. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας αυτής, παρατηρήθηκε μία βαθμιαία αύξηση στη χρήση της τεχνικής αυτής ως συνοδευτικής ή εναλλακτικής λύσης της πιο συχνά χρησιμοποιούμενης αερόβιας βιοεπεξεργασίας (κομποστοποίησης) των ΑΣΑ. Το ενδιαφέρον αυξήθηκε με την ανάπτυξη τεχνολογιών Αναερόβιας Χώνευσης Υψηλού Ποσοστού Στερεών (ΑΧΥΠΣ). Η ΑΧΥΠΣ διαφέρει από την παραδοσιακή αναερόβια χώνευση που χρησιμοποιείται ευρέως για την ιλύ των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, καθώς το ποσοστό στερεών του οργανικού υποστρώματος είναι τουλάχιστον 25% (και μπορεί να φτάσει το 40%), ενώ στην παραδοσιακή αναερόβια χώνευση το ποσοστό στερεών δεν υπερβαίνει το 5-10%, δηλαδή το υπόστρωμα έχει τη μορφή της λάσπης (slurry).

Πίνακας 5.5: Όρια παρεμποδιστικών συγκεντρώσεων ορισμένων ουσιών στο υγρό κλάσμα κατά την αναερόβια χώνευση ΑΣΑ.

ΟΥΣΙΑ	ΚΑΤΩΦΛΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ (mg/l)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Αέρια αμμωνία	1500 – 3000 mg/l (ως N)	Σε pH > 7.4
Αμμωνιακό κατιόν	3000 mg/l (ως N)	
Θειώδη (S-2)	50 – 100 mg/l	
Μέταλλα	< 10 συνήθως	
Na	3500	Θρεπτικό συστατικό σε επίπεδα 100 –200 mg/l
K	2500	Θρεπτικό συστατικό σε επίπεδα 200 –400 mg/l
Ca	2500	Θρεπτικό συστατικό σε επίπεδα 100 -200 mg/l
Mg	1000	Θρεπτικό συστατικό σε επίπεδα 75 –150 mg/l

3.4.2 Συστήματα και τεχνολογίες αναερόβιας χώνευσης

Τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των στερεών αποβλήτων μπορούν να ταξινομηθούν στη βάση τεσσάρων κύριων χαρακτηριστικών, που προσδιορίζουν και τον τύπο της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας: α) τη θερμοκρασία, β) τη συγκέντρωση των στερεών, γ) το σύστημα ανάμειξης και δ) τον αριθμό των φάσεων / αντιδραστήρων (Πίνακας 3.6). Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών μπορεί να περιγράψει τα περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα, αν και κάποια συστήματα παραμένουν ενδιάμεσα αυτών των κατηγοριοποιήσεων [ΕΑ, 2002b].

Πίνακας 3.6: Λειτουργικές παράμετροι των συστημάτων αναερόβιας χώνευσης [ΕΑ,2002b].

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ	ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΙΞΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΑΔΙΩΝ
Μεσόφιλο (~35 °C)	Χαμηλά στερεά (<10% ξ.ο.)	Μηχανική ανάδευση	Ενός σταδίου (ένας αντιδραστήρας)
Θερμόφιλο (~55 °C)	Μεσαία στερεά (10-25% ξ.ο.)	Ανάδευση μέσω των αερίων	Πολλαπλών σταδίων
	Υψηλά στερεά (>25% ξ.ο.)	Στρωτής ροής	
		Διακοπτόμενης τροφοδοσίας	

α) Θερμοκρασία

Όπως προαναφέρθηκε, η αναερόβια χώνευση λειτουργεί σε δύο εύρη θερμοκρασιών, το μεσόφιλο, περίπου στους 35°C και το θερμόφιλο, περίπου στους 55°C. Το πλεονέκτημα της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης είναι ότι είναι επαρκώς γνωστή και κατανοητή ως διεργασία, απαιτεί λιγότερη θέρμανση για τη λειτουργία της, επιτυγχάνει μεγαλύτερο βαθμό βιοσταθεροποίησης του οργανικού κλάσματος και θεωρείται πιο σταθερή / ανθεκτική λόγω της μεγαλύτερης βιοποικιλότητας των μικροοργανισμών που συμμετέχουν. Ωστόσο, η θερμόφιλη αναερόβια χώνευση θεωρείται ότι επιτυγχάνει υψηλότερη ταχύτητα βιοαποδόμησης, συνεπώς χρειάζεται μικρότερους χρόνους παραμονής, ενώ τα επιχειρήματα για μικρότερο βαθμό σταθεροποίησης του υποστρώματος δεν έχουν επιβεβαιωθεί στην πράξη σε εγκαταστάσεις πλήρους κλίμακας. Επιπλέον, η λειτουργία σε θερμόφιλα επίπεδα επιτυγχάνει ταχύτερη και πληρέστερη υγιεινοποίηση των αποβλήτων.

Η επιλογή του λειτουργικού συστήματος αναερόβιας χώνευσης ανάμεσα σε μεσόφιλα και θερμόφιλα συστήματα εξαρτάται από τις ειδικές τοπικές συνθήκες (διαθέσιμος χώρος, επιθυμητός βαθμός σταθεροποίησης, περεταίρω επεξεργασία και χρήση της χωνεμένης ύλης, θεσμικές απαιτήσεις υγιεινοποίησης κλπ).

β) Συγκέντρωση στερεών

Τα παραδοσιακά συστήματα αναερόβιας χώνευσης ύλης και υγρών αποβλήτων λειτουργούν σε μια πολύ χαμηλή συγκέντρωση στερεών, της τάξης του 5%, το οποίο προσιδιάζει στη φύση του υποστρώματος. Η χρήση της αναερόβιας χώνευσης για την

επεξεργασία ΑΣΑ δίνει τη δυνατότητα αύξησης της συγκέντρωσης των στερεών στο βιοαντιδραστήρα, γεγονός που προσφέρει δύο πλεονεκτήματα: αύξηση της παραγωγής βιοαερίου ανά μονάδα όγκου του βιοαντιδραστήρα και μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για θέρμανση του υποστρώματος.

Ωστόσο υπάρχουν όρια στη δυνατότητα αύξησης της συγκέντρωσης των στερεών. Οι μικροβιακές διεργασίες λαμβάνουν χώρα σε υγρή φάση και κατά συνέπεια απαιτούν ένα ελάχιστο ποσοστό υγρασίας της τάξης του 50-60%. Επιπλέον, τα τεχνικά προβλήματα άντλησης των αποβλήτων προς και από το βιοαντιδραστήρα απαιτούν το υπόστρωμα να είναι αρκετά ρευστό, περιορίζοντας έτσι τη μέγιστη συγκέντρωση στερεών στο 30-35% (π.χ. σύστημα DRANCO). Κάποια συστήματα παρακάμπτουν αυτό το πρόβλημα αποφεύγοντας πλήρως την άντληση των αποβλήτων και συνεπώς και τη συνεχή τροφοδότηση της μονάδας. Σε αυτά ο βιοαντιδραστήρας είναι διακοπτόμενης τροφοδοσίας και η φόρτιση και το άδειασμά του γίνονται με τη βοήθεια μεταφορικών ταινιών.

γ) Σύστημα μίξης

Η ανάγκη μίξης των αποβλήτων στο βιοαντιδραστήρα προκύπτει από την απαίτηση για καλή και ομοιόμορφη επαφή των μικροοργανισμών με το υπόστρωμα και για αποφυγή της τοπικής συγκέντρωσης των προϊόντων της χώνευσης καθώς και του διαχωρισμού των αποβλήτων σε ελαφρύ και βαρύ κλάσμα εντός του βιοαντιδραστήρα. Επιπλέον, στα περισσότερα συστήματα υπάρχουν κάποια προβλήματα διαχωρισμού και συγκέντρωσης του βιοαερίου, τα οποία αντιμετωπίζονται με τη μίξη.

Υπάρχουν δύο τρόποι ανάδευσης των αποβλήτων στο βιοαντιδραστήρα: μηχανική ανάδευση ή ανάδευση μέσω των αερίων, με διαφορετικά πλεονεκτήματα και τεχνικές δυσκολίες το καθένα. Επιπλέον, υπάρχουν συστήματα που αποφεύγουν πλήρως την ανάδευση εντός του αντιδραστήρα και τις τεχνικές δυσκολίες που αυτή συνεπάγεται, χρησιμοποιώντας διακοπτόμενη τροφοδοσία. Σε αυτή την περίπτωση, η απαιτούμενη μίξη επιτυγχάνεται με την κατάλληλη προετοιμασία του υποστρώματος εκτός του αντιδραστήρα καθώς επίσης και με την ανακύκλωση μέρους της επεξεργασμένης χωνεμένης υλύος. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός ανάδευσης σε αυτή την περίπτωση είναι εξωτερικός του βιοαντιδραστήρα, επιτρέποντας καλύτερο έλεγχο και συντήρηση. Τα συστήματα αυτά παρέχουν και μεγαλύτερη ασφάλεια στην εκτίμηση του χρόνου παραμονής των αποβλήτων σε ορισμένη θερμοκρασία, όπως απαιτείται για την υγιεινοποίησή τους.

δ) Αριθμός σταδίων

Οι βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες για τις βιολογικές διεργασίες που συμβαίνουν στις διακριτές φάσεις της αναερόβιας χώνευσης διαφέρουν ελαφρώς από φάση σε φάση. Συνεπώς, όταν η αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα εξ' ολοκλήρου σε ένα βιοαντιδραστήρα, δεν μπορούν να βελτιστοποιηθούν οι επιμέρους φάσεις της. Αντίθετα, ο διαχωρισμός της διεργασίας σε χωριστούς αντιδραστήρες, έτσι ώστε η υδρόλυση / οξεογένεση να λαμβάνουν χώρα ανεξάρτητα από τη μεθανιογένεση επιτρέπει την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των διαφορετικών φάσεων και αυξάνει τη συνολική ταχύτητα και απόδοση όλης της αναερόβιας χώνευσης. Βέβαια, αυτό το πλεονέκτημα

αντισταθμίζεται από το μειονέκτημα του αυξημένου κόστους του πρόσθετου βιοαντιδραστήρα και των συστημάτων μεταφοράς των αποβλήτων. Καθώς τα ΑΣΑ λόγω της ανομοιογένειάς τους έχουν κάποιες πρόσθετες δυσκολίες χειρισμού, οι περισσότερες εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες τείνουν να προτιμούν τις απλούστερες λύσεις και έτσι σήμερα επικρατούν στην αγορά τα συστήματα ενός σταδίου, παρά τη μειωμένη απόδοση σε σχέση με τα συστήματα δύο φάσεων.

Με βάση την παραπάνω κατηγοριοποίηση, διακρίνονται δύο κύρια συστήματα αναερόβιας χώνευσης στερεών αποβλήτων [Λαζαρίδη κ.ά., 2003]:

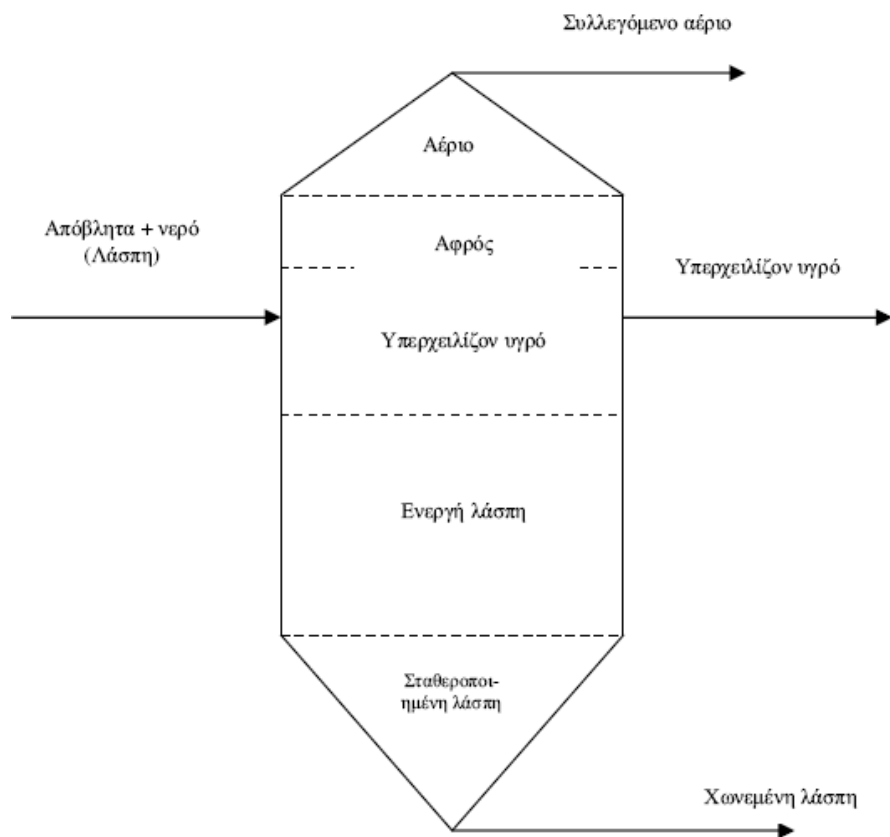
- το κλασσικό (Σ1) και
- το σύστημα υψηλού ρυθμού (Σ2).

Σ1: Κλασσικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, ενός αντιδραστήρα

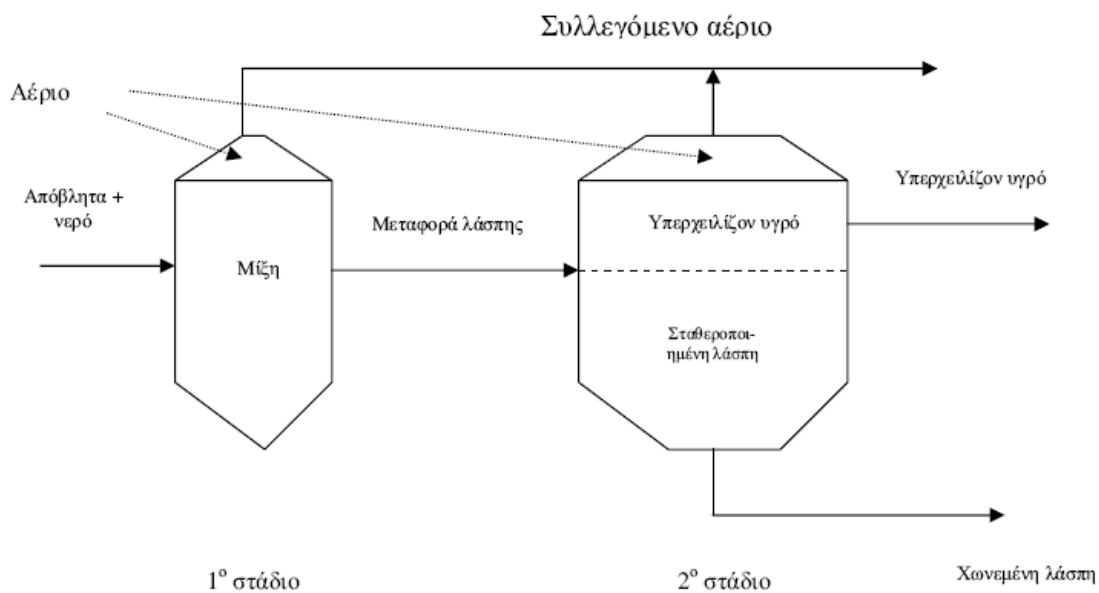
Αποτελείται από έναν αντιδραστήρα, με χρόνο παραμονής κάποιων εβδομάδων, στον οποίο συνήθως πραγματοποιείται ανάμιξη του περιεχομένου. Στόχος της ανάμιξης είναι η αποφυγή συσσώρευσης μεταβολικών προϊόντων που μπορούν να οδηγήσουν στη θανάτωση των ενεργών μικροβίων. Στην περίπτωση μη ανάμιξης, δημιουργούνται τέσσερα στρώματα εντός του αντιδραστήρα – όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, ενώ στην κορυφή αυτού γίνεται συλλογή του παραγόμενου αερίου.

Σ2: Σύστημα υψηλού ρυθμού

Τα συστήματα υψηλού ρυθμού αποτελούνται από δύο στάδια και περιλαμβάνουν τουλάχιστον δύο αντιδραστήρες που λειτουργούν σε σειρά (Σχήμα 3.5). Το ενεργό στάδιο της χώνευσης πραγματοποιείται στον πρώτο αντιδραστήρα. Τα περιεχόμενα του πρώτου αντιδραστήρα αναμιγνύονται πλήρως (με προσθήκη νερού) και ο χρόνος παραμονής είναι μερικές ημέρες. Στη συνέχεια, το περιεχόμενο του πρώτου αντιδραστήρα περνάει στο στάδιο 2, δηλαδή στον δεύτερο αντιδραστήρα. Στο στάδιο αυτό δεν γίνεται ανάμιξη και πραγματοποιείται καθίζηση του στερεού κλάσματος και διαχωρισμός του από το υγρό κλάσμα καθώς και από το αέριο κλάσμα (βιοαέριο), το οποίο συλλέγεται στην κορυφή του αντιδραστήρα. Το συλλεγόμενο αέριο του δεύτερου σταδίου συνδυάζεται με το συλλεγόμενο αέριο του πρώτου σταδίου, αφού και σε αυτό παράγεται βιοαέριο [T.E.E., 2007].



Σχήμα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση κλασσικού συστήματος ενός αντιδραστήρα (Σ1) [Τ.Ε.Ε., 2007].



Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος υψηλού ρυθμού (Σ2) [Τ.Ε.Ε., 2007].



Σχήμα 3.6. Εικόνα αντιδραστήρων αναερόβιας χώνευσης.

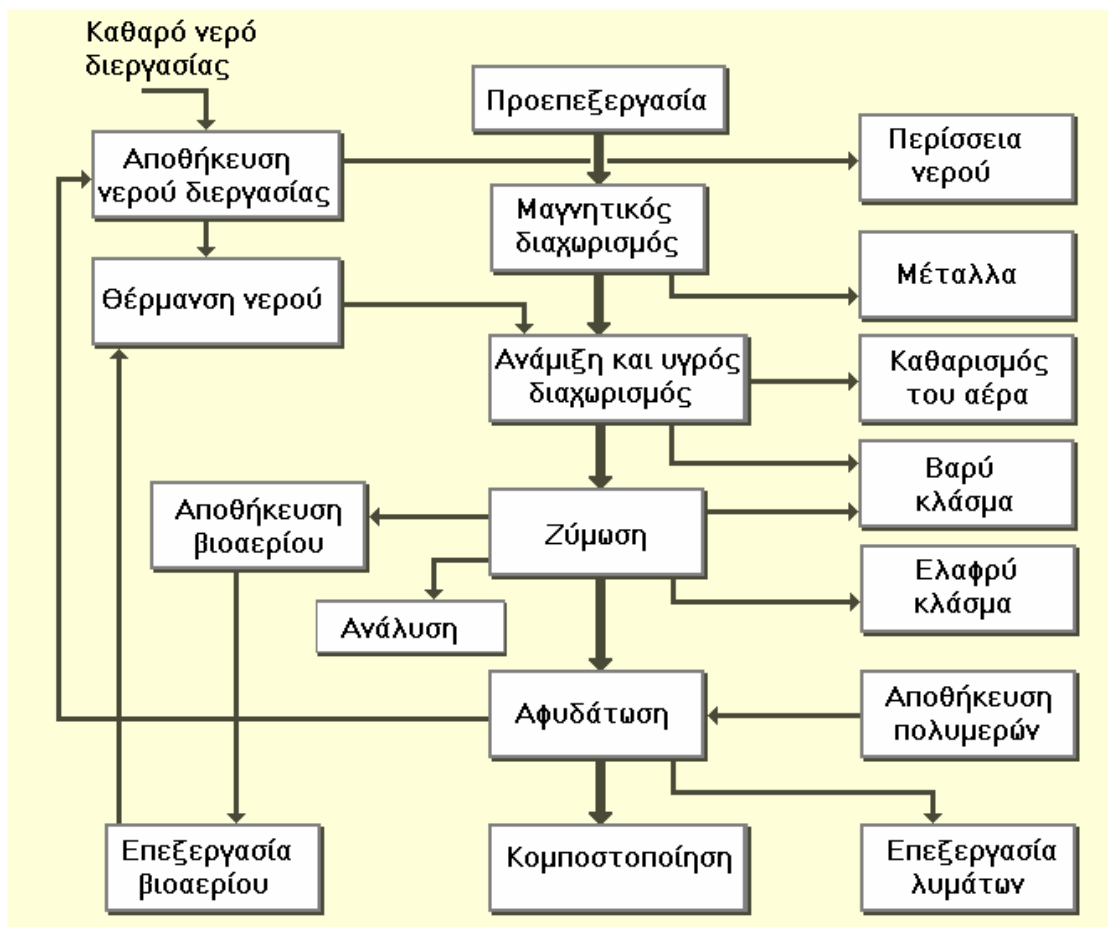
3.4.3 Διεργασίες αναερόβιας ζύμωσης των οργανικών στερεών αποβλήτων

Τα τελευταία 15 χρόνια, το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την αναερόβια ζύμωση ως διεργασία επεξεργασίας αποβλήτων είχε σαν συνέπεια την κατασκευή διαφόρων τύπων αντιδραστήρων που λειτουργούν είτε σε θεμόφιλες είτε σε μεσόφιλες θερμοκρασίες. Οι κυριότερες διεργασίες που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται σε εμπορικές μονάδες περιγράφονται στη συνέχεια [Μουσιόπουλος Ν., Καραγιαννίδης Α., 2002].

3.4.3.1 Διεργασία Waasa

Μέχρι το 2000 είχαν κατασκευαστεί 3 μονάδες που λειτουργούσαν με βάση τη διεργασία Waasa, ενώ άλλη μία ήταν υπό κατασκευή. Η δυναμικότητα των μονάδων κυμαίνεται μεταξύ 3.000-85.000 τόνων ανά έτος, ενώ οι συνθήκες λειτουργίας μπορεί να είναι είτε θεμόφιλες είτε μεσόφιλες. Στη μονάδα της Waasa λειτουργούν παράλληλα και οι δύο τύποι διεργασιών, με τη θεμόφιλη διεργασία να έχει ένα χρόνο παραμονής 10 ημέρες σε σύγκριση με τις 20 ημέρες του μεσόφιλου σχεδιασμού. Το διάγραμμα ροής της διεργασίας φαίνεται στο Σχήμα 3.7.

Η διεργασία έχει δοκιμαστεί για διάφορους τύπους αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένου και ενός μίγματος μηχανικά διαχωρισμένων δημοτικών ΣΑ και ιλύος υπονόμων, και λειτουργεί με ένα εύρος στερεών συστατικών 10-15% κ.β. Ο αντιδραστήρας είναι μία κλειστή δεξαμενή η οποία έχει υποδιαιρεθεί εσωτερικά για να υπάρχει ένας θάλαμος προζύμωσης. Η ανάμιξη επιτυγχάνεται με την έγχυση βιοαερίου δια μέσου της βάσης του αντιδραστήρα με τη βοήθεια αντλίας. Η απόδοση της λειτουργίας συνίσταται στην παραγωγή 100-150 m³ βιοαερίου ανά τόνο εισερχόμενων αποβλήτων, τη μείωση του όγκου κατά 60%, τη μείωση του βάρους κατά 50-60% και μια εσωτερική κατανάλωση βιοαερίου 20-30%. Το χωνευμένο υλικό μπορεί να επεξεργαστεί περαιτέρω με αερόβια κομποστοποίηση, αλλά αυτό εξαρτάται από την ποιότητα των αποβλήτων.



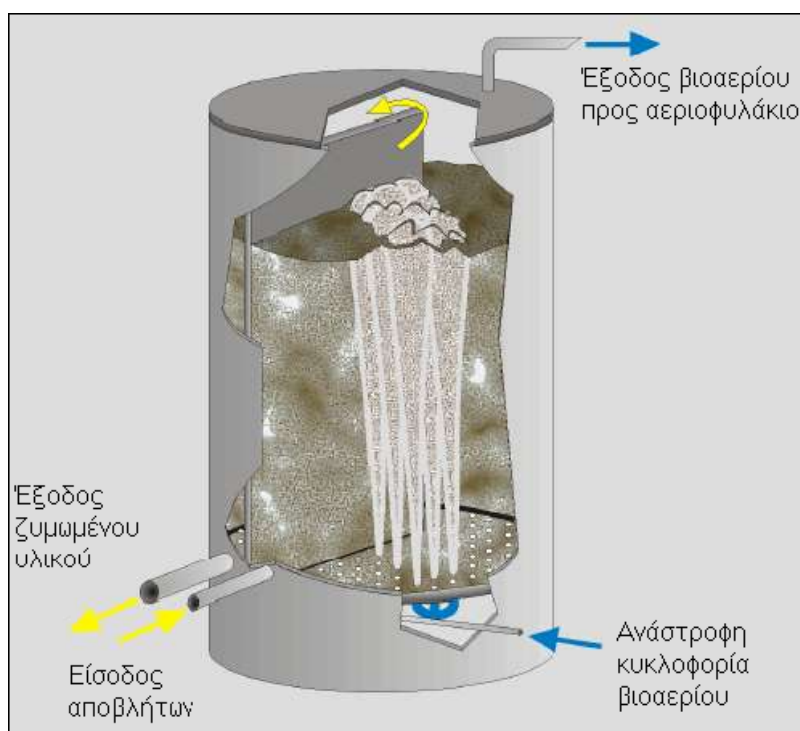
Σχήμα 3.7: Διάγραμμα ροής της διεργασίας Waasa (www.citec.fi).

3.4.3.2 Διεργασία Valorga

Η διεργασία της Valorga αναπτύχθηκε στη Γαλλία. Το σύστημα λειτουργεί τυπικά με περιεχόμενο σε στερεά ουσία 25-35% κ.β. και χρόνους παραμονής 18-25 ημέρες. Οι αντιδραστήρες είναι κάθετοι κύλινδροι με πλαινές τροχιές, για την κυκλοφορία του ζυμωμένου υλικού (Σχήμα 3.8). Περιέχουν έναν κάθετο, ενδιάμεσο, εσωτερικό τοίχωμα περίπου στα 2/3 της διαμέτρου. Η ανάμιξη μέσα στον αντιδραστήρα επιτυγχάνεται με την αναστροφή κυκλοφορία μιας μικρής ποσότητας βιοαερίου υπό πίεση. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της διαδικασίας είναι η πλήρης απουσία μηχανικών μερών μέσα στον αντιδραστήρα. Αυτό επιτρέπει την απρόσκοπτη λειτουργία σε συνθήκες υψηλής περιεκτικότητας σε στερεά με κυκλοφορία της ύλης χωρίς ιδιαίτερη συντήρηση μηχανικών συσκευών. Τα προς επεξεργασία απόβλητα αποτελούνται από ζυμώσιμα υλικά και απορρίμματα κήπων. Η ποσοτική και ποιοτική σύσταση των αποβλήτων φανερώνει μια εποχική διακύμανση που σχετίζεται με την εποχιακή ΠΑ κήπων. Η παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου κυμαίνεται μεταξύ 210-290 m³ ανά τόνο συνολικών πτητικών στερεών (TVS) που εισέρχονται στον αντιδραστήρα ή μεταξύ 80 - 160 m³ ανά τόνο εισερχόμενων αποβλήτων, ανάλογα με το είδος τους. Το παραγόμενο βιοαέριο περιέχει μεθάνιο κατά 55-60%, αλλά όταν καθαριστεί, το μεθάνιο φτάνει μέχρι και το 97%. Το καθαρό βιοαέριο μπορεί να διοχετευτεί στο δίκτυο αερίου, να χρησιμοποιηθεί

για παραγωγή ατμού βιομηχανικής χρήσης ή για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Το ζυμωμένο υλικό που βγαίνει από τους αντιδραστήρες λόγω της βαρύτητας εισάγεται κατευθείαν στις κοχλιόπρεσες για αφυδάτωση. Η υγρή ιλύς από τις πρέσες οδηγείται σε υδροκυκλώνιο για να αφαιρεθούν τα βαριά μόρια και σε μια μονάδα ιζηματοποίησης - φιλτραρίσματος για να απομακρυνθούν τα αιωρούμενα στερεά.

Τα στερεά συστατικά από τις πρέσες και το ταινιόφιλτρο αναμιγνύονται και αποθηκεύονται σε κλειστό χώρο για την πλήρη σταθεροποίησή τους κάτω από αερόβιες συνθήκες για 4 εβδομάδες. Το τελικό προϊόν είναι το κομπόστ. Για να προληφθεί οποιαδήποτε έκλυση οσμής, ο αέρας από τις μονάδες επεξεργασίας και του χώρου κομποστοποίησης διοχετεύεται προς καθαρισμό σε βιόφιλτρο.



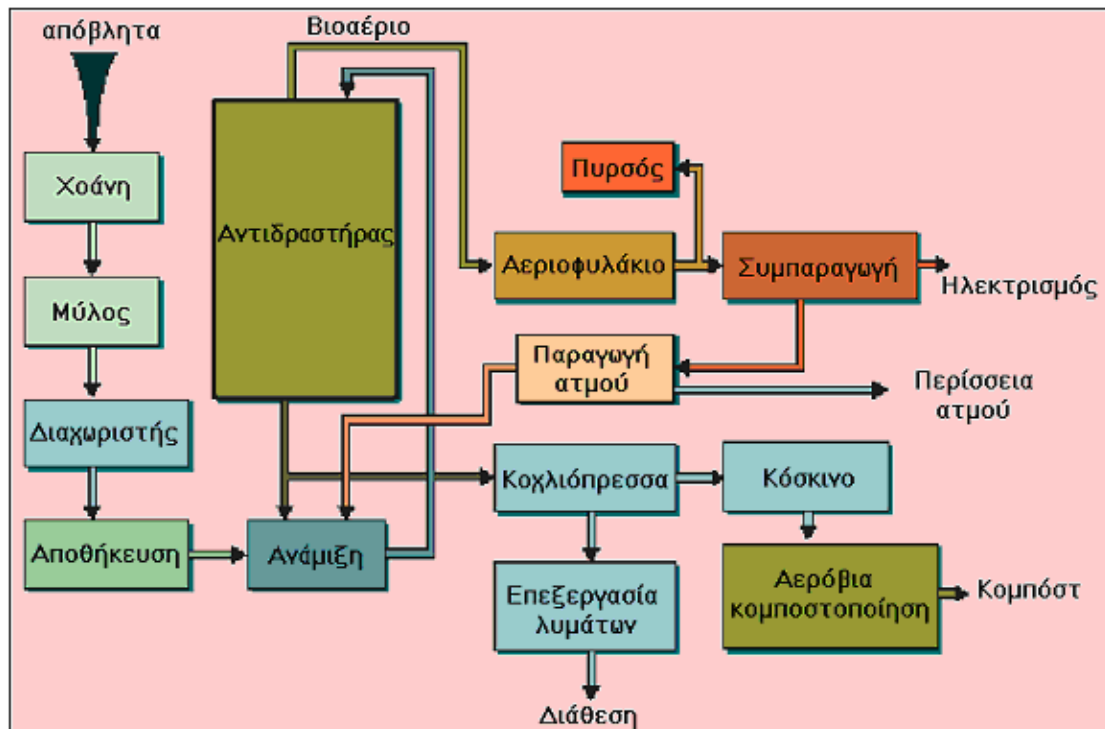
Σχήμα 3.8 : Ο αντιδραστήρας της μεθόδου Valorga [www.biomaster.nl].

3.4.3.3 Διεργασία Dranco

Το σύστημα της Dranco (Dry Anaerobic Composting) αναπτύχθηκε στο Gent του Βελγίου. Η διεργασία λειτουργεί κάτω από θερμοφίλες και ξηρές συνθήκες, με ένα περιεχόμενο σε στερεά συστατικά στον αντιδραστήρα μεταξύ 15 και 40% κ.β. Αναπτύχθηκε με σκοπό την επεξεργασία των στερεών οργανικών αποβλήτων και ειδικότερα του οργανικού κλάσματος των δημοτικών ΣΑ. Σαν τελικά προϊόντα λαμβάνονται ενέργεια με τη μορφή βιοαερίου και κομπόστ. Το διάγραμμα ροής της διεργασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9.

Τα απόβλητα που μεταφέρονται σε μια μονάδα Dranco υπόκεινται σε προεπεξεργασία, πριν οδηγηθούν μέσω αντλίας τροφοδότησης στον αντιδραστήρα. Εάν τα εισερχόμενα

απόβλητα είναι ανάμικτα, τότε τα πρώτα βήματα της διεργασίας Dranco συνίστανται στη μείωση του όγκου και στο διαχωρισμό των διαφορετικών κλασμάτων στη ροή των αποβλήτων. Τα οργανικά απόβλητα που έρχονται από την προεπεξεργασία αναμιγνύονται σε μια μονάδα ανάμιξης με ζυμωμένο υλικό από τον αντιδραστήρα. Κατά τη διάρκεια της ανάμιξης προσδίδεται θερμότητα για να επιτευχθεί η θερμοκρασία των 50 – 55 °C, η οποία είναι απαραίτητη για τη θερμοφιλή αντίδραση.



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα ροής της διεργασίας Dranco [Nue et al., 1992].

Η ζύμωση λαμβάνει χώρα σε ένα κατακόρυφο αντιδραστήρα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από χάλυβα. Ο αντιδραστήρας τροφοδοτείται από την κορυφή, ενώ το υπόλειμμα εξάγεται από τον πυθμένα. Ο χρόνος παραμονής των αποβλήτων στον αντιδραστήρα είναι περίπου 20 ημέρες. Μέρος του ζυμωμένου υλικού οδηγείται πίσω στη μονάδα ανάμιξης, ενώ το υπόλοιπο υγρασίας και στην αερόβια κομποστοποίηση. Μετά από 10 με 14 ημέρες παράγεται το κομπόστ, το οποίο είναι σταθεροποιημένο και υψηλής ποιότητας, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ΒΕ ή σαν λίπασμα στις γλάστρες. Η παραγωγή βιοαερίου κυμαίνεται μεταξύ 100-200 m³ ανά τόνο εισερχόμενων ΣΑ. Το 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται στη μονάδα, ενώ το υπόλοιπο διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

3.4.3.4 Διεργασία Kompostogas

Το σύστημα της Kompostogas αναπτύχθηκε στην Ελβετία και δέχεται οργανικά απόβλητα από σύστημα ΔσΠ. Λειτουργεί σε θερμοκρασίες 55-60 °C και το περιεχόμενο σε στερεά συστατικά είναι υψηλό. Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας. Τα απόβλητα συλλέγονται αρχικά σε μια δεξαμενή υποδοχής και στη συνέχεια οδηγούνται

στο τμήμα διαλογής, στον τεμαχιστή και στη δεξαμενή αποθήκευσης. Το προθερμασμένο, παχύρρευστο οργανικό υλικό εισέρχεται έπειτα στον οριζόντιο αντιδραστήρα ζύμωσης, όπου η βασική διεργασία λαμβάνει χώρα σε μια περίοδο 15 - 20 ημερών και αναδεύεται περιοδικά. Το στερεό υπόλειμμα υφίσταται μείωση της υγρασίας του σε κοχλιόπρεσσα και στη συνέχεια μεταφέρεται σε ένα αντιδραστήρα δευτερογενούς ζύμωσης, όπου πραγματοποιείται η μετατροπή του σε ώριμο κομπόστ με παρουσία ατμοσφαιρικού οξυγόνου. Το παραγόμενο βιοαέριο ($0,1 \text{ m}^3$ αερίου ανά kg οργανικού αποβλήτου) υφίσταται επεξεργασία και αποθηκεύεται σε αεριοφυλάκιο. Στη συνέχεια αντλείται στη μονάδα συμπαραγωγής όπου μετατρέπεται σε θερμική και ηλεκτρική ενέργεια. Εναλλακτικά, το βιοαέριο μπορεί να αναβαθμιστεί μέχρι 98% κ.ό. μεθάνιο και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στα οχήματα μεταφοράς.

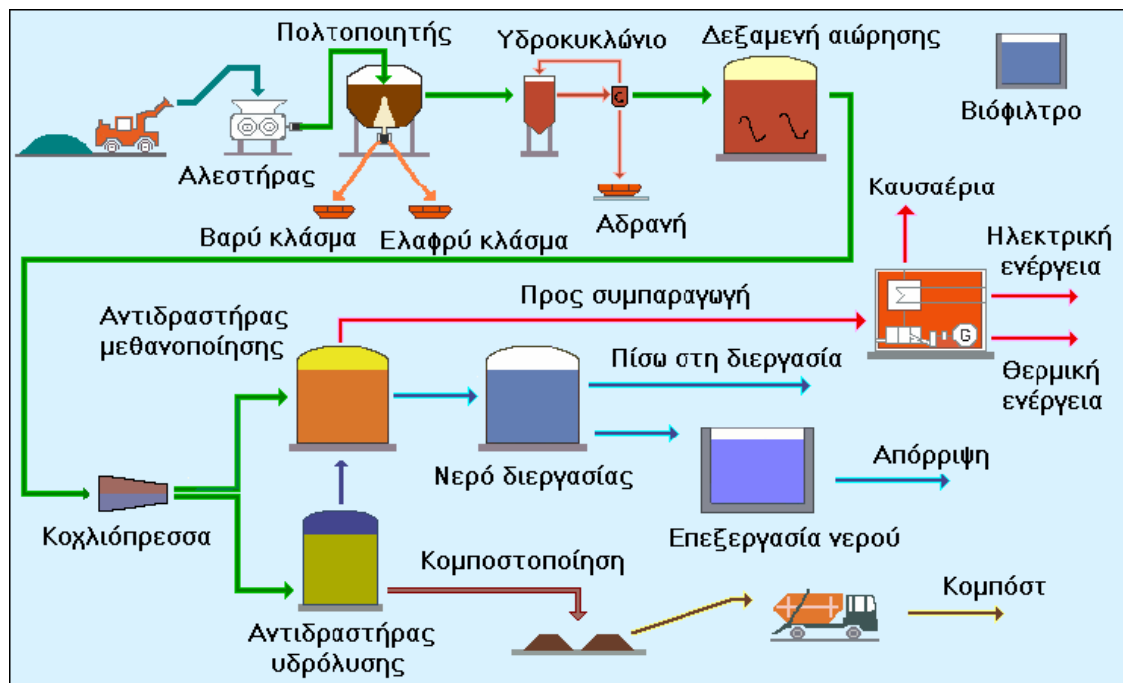


Σχήμα 3.10 : Διάγραμμα ροής της διεργασίας Kompostogas [www.kompostogas.ch].

3.4.3.5 Διεργασία ΒΤΑ

Η διεργασία της ΒΤΑ αναπτύχθηκε στη Γερμανία και συνδυάζει τη μηχανική με τη βιολογική επεξεργασία. Στη δεξαμενή πολτοποίησης το μίγμα τροφοδοσίας αναμιγνύεται με νερό διεργασίας. Απόβλητα όπως πλαστικά, υφάσματα, πέτρες και μέταλλα διαχωρίζονται μηχανικά με ένα κτένι καθαρισμού και ένα συλλέκτη βαρέων κλασμάτων. Από τα οργανικά που περιέχονται στο μίγμα παράγεται ένας παχύρρευστος, αντλήσιμος πολτός που μπορεί να επεξεργαστεί και να υποστεί ζύμωση. Ένα προαιρετικό αλλά σημαντικό στοιχείο της διεργασίας είναι το σύστημα απομάκρυνσης άμμου, το οποίο διαχωρίζει τα εναπομείναντα μικρά κομμάτια (άμμος, χαλίκια και γυαλιά) από τον πολτό

με τη βοήθεια ενός υδροκυκλόνιου, προστατεύοντας τη μονάδα από την απόξεση. Το γενικό διάγραμμα ροής φαίνεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα ροής της διεργασίας BTA [www.canadacomposting.com].

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τη βιολογική επεξεργασία του πολτού, σε σχέση με τη δυναμικότητα της μονάδας, την ανακτώμενη ενέργεια και το κομπόστ. Κατά τη μονοφασική ζύμωση ο πολτός υφίσταται αναερόβια ζύμωση σε έναν αντιδραστήρα. Αυτή η μέθοδος καθιστά δυνατή τη χρήση της τεχνολογίας BTA ακόμα και σε σχετικά μικρές, αποκεντρωμένες μονάδες διαχείρισης αποβλήτων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπάρχοντες αντιδραστήρες (π.χ. μιας μονάδας βιολογικού καθαρισμού ή μιας μονάδας παραγωγής βιοαερίου από αγροτικά απόβλητα) με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του επενδυτικού και λειτουργικού κόστους. Για μονάδες με δυναμικότητα πάνω από 50.000 τόνους ανά έτος αναπτύχθηκε η πολυφασική ζύμωση κατά την οποία διαχωρίζεται ο πολτός σε στερεή και υγρή φάση με τη χρήση φυγοκεντρικού διαχωριστή. Η υγρή φάση οδηγείται απ' ευθείας στον αντιδραστήρα όπου παραμένει 2 μέρες μέχρι να υποστεί μεθανοποίηση. Το στερεό υλικό, που περιέχει αδιάλυτες οργανικές ενώσεις, αναμειγνύεται ξανά με νερό και τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα υδρόλυσης. Μετά από 4 μέρες το υλικό υφίσταται μείωση υγρασίας ενώ το υγρό κλάσμα οδηγείται στον αντιδραστήρα μεθανοποίησης. Διανέμοντας τη διεργασία αποδόμησης σε διαφορετικούς αντιδραστήρες (αίωσης, υδρόλυσης και μεθανοποίησης) μπορούν να ρυθμιστούν ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης για όλα τα είδη των μικροοργανισμών. Αυτό επιτρέπει μια γρήγορη και εκτεταμένη αποδόμηση των οργανικών ενώσεων με υψηλή παραγωγή βιοαερίου. Για μονάδες με μεσαία δυναμικότητα είναι διαθέσιμη μια περαιτέρω παραλλαγή, η διφασική ζύμωση. Είναι βασισμένη στην ιδέα της πολυφασικής ζύμωσης αλλά χωρίς το διαχωρισμό υγρής/στερεής φάσης. Ο πολτός τροφοδοτείται σε έναν αντιδραστήρα υδρόλυσης, ο οποίος συνδέεται στη συνέχεια με έναν αντιδραστήρα μεθανοποίησης. Το βιοαέριο αποτελείται από μεθάνιο 60-65% κ.ό. Η παραγωγή

βιοαερίου καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες της μονάδας και το πλεόνασμα μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα και ηλεκτρισμό. Το κομπόστ σύμφωνα με τη μέθοδο ΒΤΑ προκύπτει μετά από αερόβια επεξεργασία που διαρκεί 1-3 εβδομάδες. Λόγω του υψηλού ποσοστού σε οργανικές ύλες και θρεπτικά συστατικά, αλλά και λόγω του χαμηλού περιεχόμενου σε άλατα και βαρέα μέταλλα, το υλικό αυτό βρίσκει μεγάλο εύρος εφαρμογών στον αγροτικό και φυτοκομικό τομέα.

3.4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αναερόβιας ζύμωσης σε μονάδα συγκριτικά με την αναερόβια ζύμωση σε ΧΥΤΑ

Τα πλεονεκτήματα της αναερόβιας ζύμωσης σε μονάδες είναι:

- Η ύπαρξη ενός κλειστού συστήματος που καθιστά δυνατή τη συλλογή και εκμετάλλευση του παραγόμενου βιοαερίου, σε αντίθεση με τους χώρους διάθεσης όπου συλλέγεται μόνο το 30-40% της συνολικής παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου.
- Το βιοαέριο που παράγεται σε μονάδα περιέχει περισσότερο μεθάνιο και επομένως έχει μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη.
- Καθίσταται δυνατή η ανάκτηση υλικών (κομπόστ).
- Η διαδικασία της βιοαποδόμησης είναι ταχύτερη από την αντίστοιχη των χώρων διάθεσης, όπου ορισμένα υλικά συνεχίζουν να βιοαποδομούνται μέχρι και 100 χρόνια.
- Οι μονάδες είναι ερμητικά κλεισμένες οπότε αποφεύγεται η εκπομπή οσμών.
- Οι απαιτούμενες εκτάσεις είναι πολύ μικρότερες από αυτές των χώρων διάθεσης.

Τα μειονεκτήματα στις μονάδες αναερόβιας ζύμωσης είναι:

- Υψηλότερο κόστος συλλογής του βιοαερίου από το αντίστοιχο ενός χώρου διάθεσης.
- Πολύπλοκη τεχνολογία και απαίτηση συνεχούς επίβλεψης.
- Επεξεργασία των υγρών αποβλήτων σε μονάδα βιολογικού καθαρισμού.

3.4.5 Επεξεργασία του ζυμωμένου υποστρώματος

Μετά την ολοκλήρωση της αναερόβιας βιολογικής αποδόμησης του οργανικού υλικού μέσα στον αντιδραστήρα, το στερεό υπόλειμμα (ζυμωμένο υλικό) απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά ως κομπόστ. Η επεξεργασία αυτή είναι αερόβια και φαίνεται στο Σχήμα 3.12. [Μουσιόπουλος Ν., 2002].



Σχήμα 3.12: Διεργασία κομποστοποίησης των οργανικών αποβλήτων [USEPA, 1996].

3.5 Μηχανική επεξεργασία

Οι κυριότερες τεχνολογίες προετοιμασίας και διαχωρισμού αποβλήτων παρουσιάζονται συνοπτικά ακολούθως.

3.5.1 Τεχνολογίες προετοιμασίας των αποβλήτων

Εδώ περιλαμβάνονται τεχνολογίες σκισίματος των σακουλών, ελάττωσης του μεγέθους και αποκατάστασης της ομοιομορφίας των αποβλήτων [Bardos 2004, DEFRA 2005b, EA 2002b], οι κυριότερες των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7: Κυριότερες τεχνολογίες μηχανικής προετοιμασίας των αποβλήτων.

Τεχνολογία	Αρχή λειτουργίας	Προβλήματα-Περιορισμοί
Σφυρόμυλοι (Hammer mill)	Τα απόβλητα υφίστανται σημαντική μείωση του μεγέθους τους με τη βοήθεια σφυριών που ταλαντώνονται	Καταπόνηση - φθορά των σφυρών, κονιορτοποίηση γυαλιού / αδρανών, ακατάλληλοι για δοχεία υπό πίεση
Περιστροφικοί κόπτες (Shredder)	Περιστρεφόμενα μαχαίρια ή δίσκοι περιστρέφονται με χαμηλή ταχύτητα και υψηλή ροπή. Η διατημητική τους δράση σχίζει ή τέμνει τα περισσότερα υλικά	Τα μεγάλα σκληρά αντικείμενα μπορούν να καταστρέψουν τους κόπτες, ακατάλληλοι για δοχεία υπό πίεση
Περιστρεφόμενα τύμπανα ή θραυστήρες κυλίνδρου (Rotating drum)	Το υλικό ανυψώνεται καθώς προσκολλάται στα τοιχώματα του τυμπάνου και κατόπιν πέφτει στο κέντρο, λόγω της βαρύτητας, επιτυγχάνοντας ανάδευση και ομογενοποίηση των αποβλήτων. Τα κοφτερά αντικείμενα που ενυπάρχουν στα απόβλητα (γυαλί, μέταλλα) συνεισφέρουν στη μείωση του μεγέθους των πιο μαλακών υλικών, όπως το χαρτί και τα βιοαποδομήσιμα, χωρίς να κονιορτοποιούνται τα ίδια.	Ήπια δράση – τεμαχισμός. Μπορεί να υπάρξει πρόβλημα για απόβλητα υψηλής υγρασίας.
Σφαιρόμυλοι (Ball mill)	Περιστρεφόμενα τύμπανα φέρουν βαριές σφαίρες για να τεμαχίσουν ή να κονιορτοποιήσουν τα απόβλητα.	Καταπόνηση – φθορά των σφαιρών, κονιορτοποίηση γυαλιού / αδρανών.
Περιστρεφόμενα τύμπανα υγρής φάσης με κόπτες (wet rotating drum with knives)	Μετά από την προσθήκη νερού, τα απόβλητα δημιουργούν μεγάλα συσσωματώματα που θρύβονται από τους κόπτες κατά την περιστροφή του τυμπάνου.	Σχετικά μικρή μείωση μεγέθους. Πιθανότητα καταστροφής του κόπτη από μεγάλα σκληρά αντικείμενα.
Θραυστήρες πλαστικών σάκων (Bag splitter)	Μπορεί να είναι τύπου περιστροφικού κόπτη (με αυξημένες ανοχές μεταξύ των περιστρεφόμενων μαχαιριών κοπής, ώστε να σχίζεται μόνο ο σάκος και να μην τεμαχίζεται το περιεχόμενο), παλινδρομικής χτένας ή οδοντοφόρων αλυσίδων.	Δεν μειώνει το μέγεθος των αποβλήτων. Πιθανότητα καταστροφής από μεγάλα σκληρά αντικείμενα.

3.5.2 Τεχνολογίες διαχωρισμού των αποβλήτων

Εδώ περιλαμβάνονται τεχνολογίες που επιτυγχάνουν το διαχωρισμό της εισερχόμενης μάζας των αποβλήτων σε δύο ρεύματα, από τα οποία το ένα περιέχει το προς ανάκτηση υλικό σε υψηλή συγκέντρωση ενώ το άλλο είναι σε μεγάλο βαθμό απαλλαγμένο από την

παρουσία του. Οι κυριότερες τεχνολογίες διαχωρισμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8 [Archer et al. 2005c, Bardos 2004, DEFRA 2005b, EA 2002b].

Πίνακας 3.8 : Κυριότερες τεχνολογίες διαχωρισμού των αποβλήτων.

Τεχνολογία	Ιδιότητα διαχωρισμού	Στοχευόμενα υλικά	Προβλήματα-Περιορισμοί
Κόσκινα (trommels and screens)	Μέγεθος και πυκνότητα	Υπερμεγέθη: χαρτί, πλαστικό Μικρά: οργανικά, γυαλί, λεπτόκοκκα υλικά (fines)	Καθαρισμός
Χειρωνακτικός διαχωρισμός	Οπτική εξέταση	Πλαστικά, προσμίξεις, υπερμεγέθη, ξένα σώματα	Υγιεινή και ασφάλεια εργασίας, ηθικά θέματα
Μαγνητικοί διαχωριστές	Μαγνητικές ιδιότητες	Σιδηρούχα μέταλλα	
Διαχωριστές με επαγωγικά ρεύματα	Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Μη σιδηρούχα μέταλλα	
Διαχωριστές επίπλευσης αφρού	Διαφορές πυκνότητας	Επιπλέοντα: πλαστικά, οργανικά Βυθιζόμενα: πέτρες, γυαλί	Δημιουργεί υγρά ρεύματα αποβλήτων
Αεροδιαχωριστές	Βάρος	Ελαφρά: πλαστικά, χαρτί Βαρέα: πέτρες, γυαλί	Απαιτείται καθαρισμός του αέρα
Βαλλιστικοί διαχωριστές	Πυκνότητα και ελαστικότητα	Ελαφρά: πλαστικά, χαρτί Βαρέα: πέτρες, γυαλί	
Οπτικοί διαχωριστές	Οπτικές ιδιότητες	Καθορισμένα πλαστικά πολυμερή	Απόδοση

3.6. Γενικευμένα κριτήρια αξιολόγησης καταλληλότητας των μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας

Στον Πίνακα 3.9 παρουσιάζονται κάποια γενικευμένα κριτήρια αξιολόγησης των μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας.

Πίνακας 3.9 : Γενικευμένα κριτήρια αξιολόγησης καταλληλότητας των μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας [Τ.Ε.Ε., 2007].

	ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ				ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ			
	Απόβλητα κήπου – Ανοικτά συστήματα	Βιοαπόβλητα (ΔσΠ) – Βιοαντιδραστήρες	Σύμμεκτα ΑΣΑ (ΜΒΕ)	Βιοαπόβλητα (ΔσΠ)	Σύμμεκτα ΑΣΑ (ΜΒΕ)	Βιοαπόβλητα (ΔσΠ)	Σύμμεκτα ΑΣΑ (ΜΒΕ)	Κεντρικές μονάδες Συγχώνευσης
Οικονομικά	35-130	100-600	50-400 / (συνήθως 125-220)	100-300	85-300	35-190		
Κατασκευαστικό κόστος €/τρα)	15-35 (ανάλογα με το μέγεθος)	20-80 (ανάλογα με το μέγεθος)	20-120 (ανάλογα με το μέγεθος) / (συνήθως 40-100)	30-160 (ανάλογα με το μέγεθος)	25-55 (ανάλογα με το μέγεθος)	25-35 (ανάλογα με το μέγεθος)		
Λειτουργικό κόστος (€/t)								
Τεχνικά								
Επεξεργάσιμο κλάσμα των ΑΣΑ	8-10%*	Θεωρητικά 60% (απόβλητα κουζίνας, κήπου και χαρτί). Στην πράξη 30-35% (ανακύκλωση χαρτιού και όχι πλήρης συμμετοχή του κοινού)	Όλα τα ΑΣΑ. Ωστόσο μεγάλο ποσοστό απορρίπτεται σε διάφορα στάδια της διεργασίας. Συνήθως εκτροπή από ΧΥΤΑ (με αξιοποίηση RDF/SRF και κομπόστ) ~ 70%	Θεωρητικά 40-45% (απόβλητα κουζίνας & κήπου). Στην πράξη <30% (όχι πλήρης συμμετοχή του κοινού)	Όλα τα ΑΣΑ. Ωστόσο μεγάλο ποσοστό απορρίπτεται σε διάφορα στάδια της διεργασίας. Συνήθως εκτροπή από ΧΥΤΑ (με αξιοποίηση RDF/SRF και χωνεμένης λάσας) ~ 70%	Θεωρητικά 60% (απόβλητα κουζίνας, κήπου και χαρτί). Στην πράξη 30-35% (ανακύκλωση χαρτιού και όχι πλήρης συμμετοχή του κοινού). Το περισσότερο υπόστροφο είναι αγροτικά απόβλητα.		
Ελάχιστη / Τοπική δυναμικότητα	2 κτρα / 10-20 κτρα	2 κτρα / 50-100 κτρα	25 κτρα / 100-250 κτρα (σύμμεκτα ΑΣΑ)	5 κτρα / 50-100 κτρα	50 κτρα / 150-250 κτρα (σύμμεκτα ΑΣΑ)	10 κτρα / 50-150 κτρα		
Ενέργεια	Κατανάλωση ενέργειας ~15kWh/t-1	Κατανάλωση ενέργειας ~25 kWh t-1	Κατανάλωση ενέργειας ~50 kWh t-1	110 kWh/t-1	100 kWh/t-1	90 kWh/t-1		
Έκταση	2 m2 t-1	0,5 m2 t-1	0,4 m2 t-1	0,5 m2 t-1	0,4 m2 t-1	0,5 m2 t-1		
Λειτουργικά								
Ποιότητα προϊόντων	Γενικά υψηλή	Γενικά υψηλή, αλλά μπορεί να περιέχονται κάποιιο ρύποι - προσμίξεις	Σημαντική συγκέντρωση ρύπων – προσμίξεων αλλά μπορεί να δώσει κομπόστ κατάλληλο για ορισμένες χαμηλών απαιτήσεων χρήσεις	Γενικά υψηλή, αλλά μπορεί να περιέχονται κάποιιο ρύποι - προσμίξεις	Σημαντική συγκέντρωση ρύπων – προσμίξεων αλλά μπορεί να δώσει υλικό κατάλληλο για ορισμένες χαμηλών απαιτήσεων χρήσεις	Γενικά υψηλή		
Εγκαταστάσεις σε λειτουργία	>5000	>800	>200	>100	~20	~20		

		ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ		ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ	
Λειτουργική επιτυχία / βιωσιμότητα εγκατεστημένων μονάδων	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Κάποιες δυσκολίες στη διάθεση των προϊόντων στις αγορές, οι εγκαταστάσεις παραμένουν λειτουργικές	Καλή, εξαρτάται από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ	Καλή, εξαρτάται από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, τοπικούς παράγοντες και επιδοτήσεις
Απαιτήσεις χωροθέτησης / σχεδιασμού	Μικρές κλιμακας θέματα οσμών και βιοαερωλιμάτων	Οπτική όχληση, οσμές και βιοαερωλιματα	Παρεμφερή με άλλες μεγάλης κλιμακας εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων. Μειωμένες σε σχέση με την καύση.	Έλεγχος εκπομπών από την καύση του βιοαερίου, οσμές	Έλεγχος εκπομπών από την καύση του βιοαερίου, οσμές
Ενσωμάτωση σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης ΑΣΑ	Αφορά την επεξεργασία ενός συγκεκριμένου μικρού κλάσματος των ΑΣΑ	Αφορά περίπου το 50% των ΑΣΑ. Κάποια ευελιξία ως προς το χαρτί και άλλα οργανικά (π.χ. υλός).	Αφορά το σύνολο των ΑΣΑ και δέχεται απόβλητα ακατάλληλα για άλλες διεργασίες (rest waste – grey waste)	Αφορά περίπου το 35% των ΑΣΑ. Κάποια ευελιξία ως προς το χαρτί και άλλα οργανικά (π.χ. υλός).	Αφορά περίπου το 25% των ΑΣΑ, καθώς υφίστανται περισσότεροι περιορισμοί σε θέματα ποιότητας της χωνεμένης υλός
Διάθεση προϊόντων στην αγορά	Ικανοποιητική, αλλά υπάρχουν θέματα ποιότητας	Ικανοποιητική, αλλά τα θέματα ποιότητας του κομποστ απαιτούν συνεχείς ελέγχους	Η χαμηλή ποιότητα του παραγόμενου κομποστ περιορίζει τις διαθέσιμες αγορές. Ρευστή η κατάσταση ως προς το RDF.	Πολύ ικανοποιητική η αγορά ενέργειας. Η χαμηλή ποιότητα της παραγόμενης χωνεμένης υλός σε συνεργασία με αγροτικούς συνεταιρισμούς, αλλά η επεξεργασία βιοαποβλήτων απαιτεί αυστηρούς ποιοτικούς ελέγχους	Πολύ ικανοποιητική η αγορά ενέργειας. Καλή η διάθεση της χωνεμένης υλός σε συνεργασία με αγροτικούς συνεταιρισμούς, αλλά η επεξεργασία βιοαποβλήτων απαιτεί αυστηρούς ποιοτικούς ελέγχους
Ευαισθητοποίηση του κοινού	Απαιτείται, αλλά σχετικά εύκολη καθώς δεν αλλάζουν σημαντικά οι υπάρχουσες πρακτικές	Συστηματική και εντατική εκστρατεία ενημέρωσης απαιτείται για τη σωστή ΔσΠ των βιοαποβλήτων	Δεν απαιτείται	Συστηματική και εντατική εκστρατεία ενημέρωσης απαιτείται για τη σωστή ΔσΠ των βιοαποβλήτων	Συστηματική και εντατική εκστρατεία ενημέρωσης απαιτείται για τη σωστή ΔσΠ των βιοαποβλήτων
Εξάρτηση από τη συμμετοχή των πολιτών	Σημαντική	Σημαντική	Καμία	Καμία	Σημαντική

		ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ			ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ		
Αέρια θερμοκηπίου	10 kg.t-1 από την καταναλισκόμενη ενέργεια. Κατανάλωση ενέργειας και για χωριστή συλλογή – μεταφορά αποβλήτων	16 kg.t-1 από την καταναλισκόμενη ενέργεια. Κατανάλωση ενέργειας και για χωριστή συλλογή – μεταφορά βιοαποβλήτων	42 kg.t-1 από την καταναλισκόμενη ενέργεια. Περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας για συλλογή – μεταφορά.	Μείωση εκπομπών κατά 28-33 kg.t-1 λόγω παραγωγής ενέργειας	Μείωση εκπομπών κατά 24 kg.t-1 λόγω παραγωγής ενέργειας		
Αέρια ρύπανση	Λίγες οσμές και βιοαερολύματα	Οσμές και βιοαερολύματα, αλλά περιορίζονται λόγω κλειστών συστημάτων & επεξεργασίας	Οσμές και βιοαερολύματα αλλά περιορίζονται λόγω κλειστών συστημάτων & επεξεργασίας	Οσμές, αμμωνία και εκπομπές καύσης	Οσμές, αμμωνία και εκπομπές καύσης		
Ρύπανση υδάτων	Πιθανότητα διασταλαγμάτων λόγω έκθεσης στη βροχή	Έγκλειστο σύστημα, μικρή πιθανότητα διαφυγής διασταλαγμάτων	Έγκλειστο σύστημα, μικρή πιθανότητα διαφυγής διασταλαγμάτων	Μικρές ποσότητες υγρών αποβλήτων υψηλού οργανικού φορτίου προς επεξεργασία	Περιορισμένη παραγωγή υγρών αποβλήτων	Μικρές ποσότητες υγρών αποβλήτων τα οποία διατίθενται στη γεωργία μαζί με τις κοπριάς	
Ρύποι στο προϊόν / στερεά υπολείμματα	Χαμηλό ποσοστό ρύπων και προσμίξεων στο προϊόν, μικρή ποσότητα υπολειμμάτων.	Χαμηλό ποσοστό ρύπων και προσμίξεων στο προϊόν, μικρή ποσότητα υπολειμμάτων.	Υψηλό ποσοστό ρύπων και προσμίξεων στο προϊόν, κυρίως διάθεση σε ΧΥΤΑ.	Υψηλό ποσοστό ρύπων και προσμίξεων στο προϊόν, μικρή ποσότητα σε ΧΥΤΑ.	Χαμηλό ποσοστό ρύπων και προσμίξεων στο προϊόν, μικρή ποσότητα υπολειμμάτων.		
Θόρυβος	Ανοικτή διεργασία, πιθανότητα θορύβου	Έγκλειστο σύστημα, χαμηλή όχληση θορύβου	Έγκλειστο σύστημα, χαμηλή όχληση θορύβου	Έγκλειστο σύστημα, χαμηλή όχληση θορύβου	Έγκλειστο σύστημα, χαμηλή όχληση θορύβου		
Οσμές	Αν και χαμηλά επίπεδα οσμών, υπάρχει πιθανότητα όχλησης	Έγκλειστο σύστημα, χαμηλή όχληση οσμών, λόγω δυνατότητας επεξεργασίας τους	Έγκλειστο σύστημα, χαμηλή όχληση οσμών, λόγω δυνατότητας επεξεργασίας τους	Έγκλειστο σύστημα, χαμηλή όχληση οσμών, λόγω δυνατότητας επεξεργασίας τους	Έγκλειστο σύστημα, χαμηλή όχληση οσμών, λόγω δυνατότητας επεξεργασίας τους		
Μεταφορές	1% υπολείμματα προς ΧΥΤΑ, 50% ως προϊόν προς την αγορά	1% υπολείμματα προς ΧΥΤΑ, 50% ως προϊόν προς την αγορά	30% υπολείμματα προς ΧΥΤΑ, 50% ως προϊόν προς την αγορά (κομπόστ & RDF)	1% υπολείμματα προς ΧΥΤΑ, 50% ως προϊόν προς την αγορά	1% υπολείμματα προς ΧΥΤΑ, 50% ως προϊόν προς την αγορά		
Χρήση φυσικών πόρων	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Περιορισμένη	

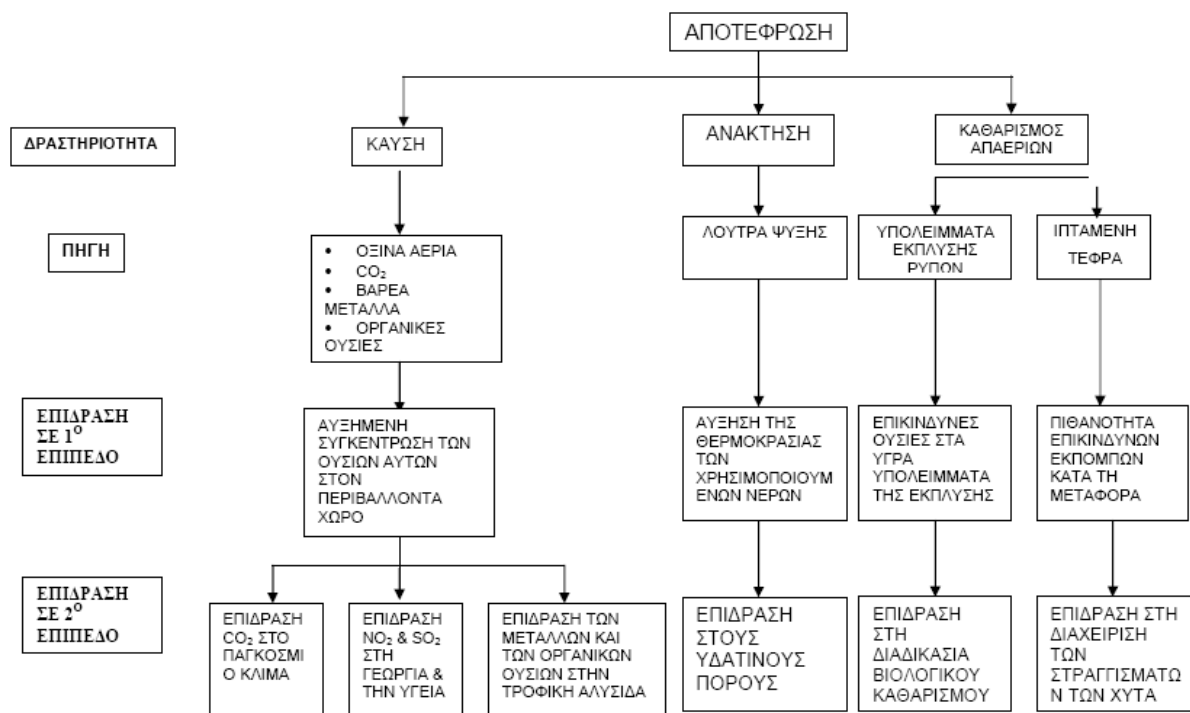
		ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ			ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ		
Πολιτική, ΕΕ - Εθνική							
Ανακύκλωση / ανάκτηση αποβλήτων	Όλα τα υλικά-στόχος ανακυκλώνονται	Όλα τα υλικά-στόχος ανακυκλώνονται	Όλα τα υλικά-στόχος ανακυκλώνονται	Κάποια υλικά ανακυκλώνονται	Όλα τα υλικά-στόχος ανακυκλώνονται. Ανάκτηση ενέργειας - ΑΠΕ	Κάποια υλικά ανακυκλώνονται. Ανάκτηση ενέργειας - ΑΠΕ	Όλα τα υλικά-στόχος ανακυκλώνονται. Ανάκτηση ενέργειας - ΑΠΕ
Μείωση βιοαποδομησιμότητας	Πρακτικά όλο το ρεύμα εκτρέπεται από το ΧΥΤΑ	Πολύ υψηλή εκτροπή των χωριστά συλλεγόμενων BAA από το ΧΥΤΑ	Πολύ υψηλή εκτροπή της βιοαποδοσιμότητας του κλάσματος που καταλήγει σε ΧΥΤΑ. Απαιτούνται κατάλληλα κριτήρια αποδοχής.	Σημαντική μείωση της βιοαποδοσιμότητας του κλάσματος που καταλήγει σε ΧΥΤΑ. Απαιτούνται κατάλληλα κριτήρια αποδοχής.	Πολύ υψηλή εκτροπή των χωριστά συλλεγόμενων BAA από το ΧΥΤΑ	Σημαντική μείωση της βιοαποδοσιμότητας του κλάσματος που καταλήγει σε ΧΥΤΑ. Απαιτούνται κατάλληλα κριτήρια αποδοχής.	Πολύ υψηλή εκτροπή των χωριστά συλλεγόμενων BAA από το ΧΥΤΑ
Άποψη κοινής γνώμης	Γενικά θετική	Γενικά θετική ως προς την επεξεργασία, ελάχιστη εξοικείωση με τη ΔσΠ των BAA	Γενικά θετική	Γενικά θετική	Νέα τεχνολογία. Συχνή υπερεκτίμηση δυνατοτήτων.	Νέα τεχνολογία. Συχνή υπερεκτίμηση δυνατοτήτων.	Νέα τεχνολογία. Συχνή υπερεκτίμηση δυνατοτήτων.
Απασχόληση	0,2 θέσεις ανά κτρα	0,33 θέσεις ανά κτρα	0,33 θέσεις ανά κτρα	0,33 θέσεις ανά κτρα	0,4 θέσεις ανά κτρα	0,33 θέσεις ανά κτρα	0,4 θέσεις ανά κτρα
Εμπλοκή του κοινού	Μικρή	Υψηλή απαίτηση καλής συμμετοχής	Καθόλου	Καθόλου	Υψηλή απαίτηση καλής συμμετοχής	Καθόλου	Υψηλή απαίτηση καλής συμμετοχής

Πηγή: Προσαρμογή από ΕΑ 2002b, McDougall et al. 2001 & Archer et al. 2005b.
*Λαζαρίδη και Χαριτοπούλου, 2001.

4. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

4.1 Αποτέφρωση

Στο Σχήμα 4.1 εμφανίζονται τις κυριότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αποτέφρωσης.



Σχήμα 4.1: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποτέφρωσης.

Τα κύρια προϊόντα και ρυπαντικά φορτία της διεργασίας της αποτέφρωσης περιλαμβάνουν είναι τα εξής: Αέρια, Υγρά, Στερεά.

4.1.1 Αέρια

Κατά την αποτέφρωση προκύπτουν περίπου $4-5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ απαερίων ανά τόνο απορριμμάτων. Τα απαέρια αυτά βρίσκονται σε θερμοκρασία περίπου 1000°C [Φάττα Δ., 2007].

Οι σχετικοί με την αποτέφρωση αέριοι ρύποι περιλαμβάνουν τα εξαερώσιμα λόγω της θερμότητας στερεά ή άλλες ενώσεις που δημιουργούνται μέσω των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της καύσης [Ανδρεαδάκης Α., 2001]. Κατά την καύση των απορριμμάτων λοιπόν εκλύονται στην ατμόσφαιρα τυπικά προϊόντα καύσης (CO , CO_2 , H_2O , NO_x , SO_2), άζωτο, οξυγόνο, σωματίδια σκόνης, ιπτάμενη τέφρα και άλλες ενώσεις των οποίων η παραγωγή εξαρτάται από τη σύσταση των απορριμμάτων, όπως HCl , πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες, διοξίνες και φουράνια, αιθάλη, VOC (Volatile Organic Compounds).

Οι κυριότεροι αέριοι ρύποι μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

Προϊόντα ατελούς καύσης (PICs): Τα προϊόντα αυτά περιλαμβάνουν ενώσεις όπως μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογονάνθρακες που δεν έχουν καεί, πτητικές οργανικές

ενώσεις και πολυκυκλικές οργανικές ενώσεις όπως οι διοξίνες και οι φουράνες. Η εκπομπή των ενώσεων αυτών είναι αποτέλεσμα της ατελούς καύσης του άνθρακα των προς καύση στερεών και της βοηθητικής καύσιμης ύλης λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας και/ή της ανεπάρκειας του αέρα κατά τη διάρκεια της καύσης.

Το μονοξειδίο του άνθρακα μπορεί να απορροφηθεί από το ανθρώπινο αίμα και εμποδίζει την πρόσληψη του οξυγόνου. Σημαντικά υψηλές ποσότητες μπορούν να προκαλέσουν ακόμα και το θάνατο. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι με εξαίρεση τις διοξίνες (PCDD) και τις φουράνες (PCDF), όρια ελέγχου για τις εκπομπές μεμονωμένων οργανικών ενώσεων δεν υπάρχουν. Αντ'αυτού έχουν θεσπιστεί όρια για τη συνολική συγκέντρωση της οργανικής ύλης στις εκπομπές, σε όρους ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) ή πτητικού οργανικού άνθρακα(VOC). Το κυριότερο συστατικό του ολικού οργανικού άνθρακα των αερίων (στις καπνοδόχους) είναι αλειφατικές ενώσεις, οι οποίες είναι απίθανο να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία όζοντος κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Ωστόσο, από τις συνολικές ανθρωπογενείς εκπομπές αυτού του είδους των ενώσεων μόνο ένα αμελητέο ποσοστό οφείλεται στην αποτέφρωση, περίπου το ένα δέκατο σε σχέση με τις χωματερές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ανησυχίες έχουν εκφραστεί λόγω του εντοπισμού αρκετών εκατοντάδων αρωματικών ενώσεων οι οποίες είναι δυνητικά τοξικές. Πάντως, διάφορες έρευνες καρκινογένειας έχουν δείξει ότι με εξαίρεση τις διοξίνες και τις φουράνες, οι υπόλοιπες οργανικές ενώσεις συμβάλλουν κατά πολύ λίγο στο σύνολο των δυνητικών κινδύνων μιας μονάδας καύσης [Ανδρεαδάκης Α., 2001].

Οι διοξίνες και τα φουράνια είναι γνωστά καρκινογόνα που έχουν την ικανότητα να βιοσυσσωρεύονται στους οργανισμούς. Η ύπαρξή τους στα αέρια οφείλεται [Γρηγοροπούλου Ε. και Κατσίρη Α., 2006]:

- ο είτε σε διοξίνες και φουράνια, που υπάρχουν ήδη στα απορρίμματα,
- ο είτε στην παραγωγή τους στην αέρια φάση στους 500-700°C, λόγω συμπύκνωσης (coalescence) οργανικών μορίων με δότες χλωρίου, όπως χλωριούχα άλατα, PVC και HCl,
- ο είτε στην παραγωγή τους μέσω αντιδράσεων στερεής φάσης κάτω από τους 500°C πάνω σε σωματίδια.

Εκτός από τις διοξίνες και τα φουράνια, το βενζόλιο, οι φαινόλες, οι PAHs, το βενζοπυρένιο και τα χλωριωμένα οργανικά είναι επίσης ιδιαίτερος τοξικές και καρκινογόνες ενώσεις.

Οξείδια του Αζώτου NO_x: Τα οξείδια του αζώτου μπορούν να βρεθούν σε πολλές μορφές, με το άτομο του αζώτου να αντιδρά με ένα, δύο ή και περισσότερα άτομα οξυγόνου. Οι εκπομπές NO_x είναι αποτέλεσμα δύο κυρίως αντιδράσεων καύσης. Κατά τη διάρκεια της καύσης υπό υψηλές θερμοκρασίες, το άζωτο της ιλύος ή των ΑΣΑ μπορεί να αντιδράσει με περίσσεια οξυγόνου και να δημιουργήσει NO_x. Επιπρόσθετα, οξείδια του αζώτου δημιουργούνται μέσω του ατμοσφαιρικού αζώτου το οποίο αντιδρά με περίσσεια οξυγόνου σε υψηλές θερμοκρασίες, γενικά υψηλότερες από 1100°C. Η πιο επιβλαβής συνέπεια των NO_x είναι η δημιουργία αερίων οξέων στην ατμόσφαιρα όταν τα αέρια αντιδρούν με την υγρασία. Επίσης, αποτελούν παράγοντα που συντελεί στη δημιουργία του νέφους.

Αέρια Οξέα: Το διοξείδιο του θείου (SO_2) δημιουργείται κατά την καύση μέσω οξείδωσης του υπολειμματικού θείου που βρίσκεται στα ΑΣΑ. Το διοξείδιο του θείου στη συνέχεια αντιδρά με την υγρασία και δίνει θειικό οξύ. Οι εκπομπές από τις μονάδες αποτέφρωσης αποτελούν ένα μικρό μόνο ποσοστό των συνολικών εκπομπών από διαδικασίες καύσης. Το υδροχλωρικό οξύ δημιουργείται κατά την καύση λόγω του χλωρίου των ΑΣΑ. Πρόσθετα όξινα αέρια δημιουργούνται σε μικρότερες ποσότητες συμπεριλαμβανομένων του υδροφθορικού και του υδροβρωμικού οξέος. Στην ανθρώπινη υγεία, μπορούν να προκαλέσουν ερεθισμό του αναπνευστικού συστήματος, ειδικά δε σε ευπαθείς ομάδες πληθυσμού, όπως είναι οι υποφέροντες από άσθμα [Ανδρεαδάκης Α., 2001].

Βαρέα Μέταλλα: Από τα βαρέα μέταλλα, που περιέχονται στις αέριες εκπομπές, τα Cd, Cr, Hg και Pb είναι ιδιαίτερος τοξικά. Άλλα μέταλλα, όπως τα Cu, Pt και Ni, είναι λιγότερο τοξικά, αλλά δρουν ως καταλύτες για πολύπλοκες αντιδράσεις στα αέρια, παράγοντας διοξίνες.

Οι εκπομπές μετάλλων αποτελούν ένα μέρος των συνολικών σωματιδιακών εκπομπών από τους αποτεφρωτές. Πηγή των μετάλλων είναι η τέφρα. Ανάλογα με το είδος του μετάλλου και την πίεση των ατμών του, τα μέταλλα μπορούν να διαφύγουν από τον αποτεφρωτή είτε σε αέρια είτε σε στερεά μορφή. Ο υδράργυρος και σε μικρότερο βαθμό το κάδμιο, απελευθερώνονται κυρίως στην αέρια φάση. Η διαδικασία της καύσης καθιστά ορισμένα μέταλλα βιολογικά περισσότερο ενεργά. Για παράδειγμα μετατρέπει ένα μέρος του καδμίου σε μορφή διαλυτών χλωριούχων (Cl^-) και θειικών αλάτων (SO_4^-) και το μεγαλύτερο μέρος του χρωμίου στην εξασθενή του μορφή (Cr -6), με την οποία είναι καρκινογόνο.

Η κύρια οδός για την έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού στα βαρέα μέταλλα που απελευθερώνονται μέσω της αποτέφρωσης είναι η τροφική αλυσίδα. Ο υδράργυρος εναποτίθεται στην επιφάνεια του νερού και του εδάφους. Η εκπομπή του καδμίου στον αέρα γίνεται σε σωματιδιακή μορφή. Μετά την απόθεσή του στο έδαφος μπορεί να διοχετευθεί στα λαχανικά και στους καρπούς. Οι αναφερθείσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, έχουν παρατηρηθεί σε περιπτώσεις που σχετίζονται είτε με υψηλή ή με χρόνια έκθεση σε σωματιδιακό μέταλλο. Πολύ λιγότερα γνωστό είναι εάν οι μικρότερες δόσεις μπορούν να έχουν κάποια συγκεκριμένα αποτελέσματα. Παρότι οι εκπομπές βαρέων μετάλλων από τις μονάδες αποτέφρωσης δεν είναι απόλυτα συνδεδεμένες με τις αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, αναλύσεις επικινδυνότητας έχουν δείξει ότι γενικώς ο κίνδυνος από τα μέταλλα των αποτεφρωτών είναι υψηλότερος από τον κίνδυνο λόγω των οργανικών ενώσεων [Ανδρεαδάκης, 2001].

Η ιπτάμενη τέφρα εκτός από βαρέα μέταλλα περιέχει ακόμα υψηλές συγκεντρώσεις διαλυτών αλάτων, οργανικών και την υψηλότερη περιεκτικότητα από όλα τα κατάλοιπα σε χλωριωμένες οργανικές ενώσεις. Το επίπεδο διοξινών και φουρανίων κυμαίνεται από ppb έως ppb.

Τέλος, ως προς τα αέρια του θερμοκηπίου και ιδιαίτερος το CO_2 όταν δεν έχουμε ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας, οι παραγόμενες εκπομπές είναι αρκετά σημαντικές, δεδομένου ότι στα απορρίμματα περιέχεται περίπου 25% κ.β. άνθρακα, ο οποίος κατά την καύση του δημιουργεί περίπου 1 τόνο CO_2 ανά τόνο απορριμμάτων [Γρηγοροπούλου Ε. και Κατσίρη Α., 2006].

4.1.1.1 Ποιότητα αέριων εκπομπών

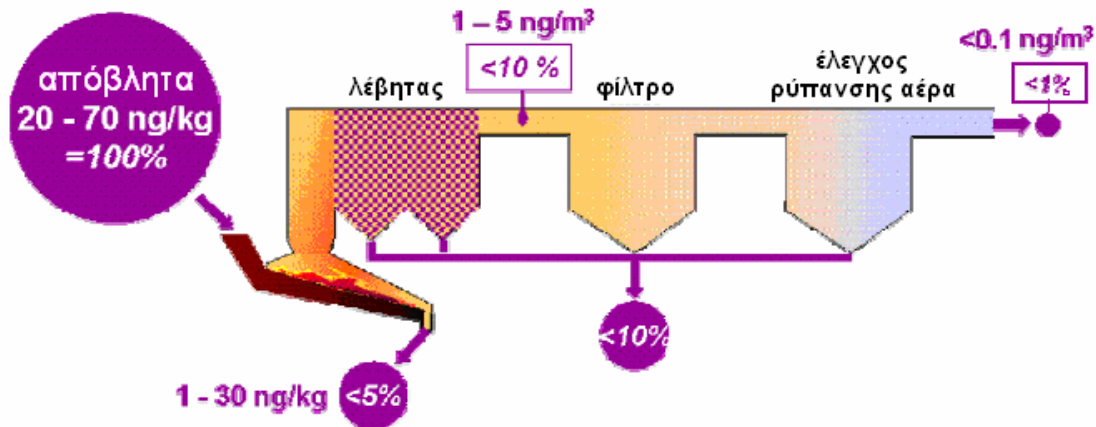
- Διοξίνες και φουράνια

Σχεδόν τρεις δεκαετίες έρευνας σχετικά με τον σχηματισμό των PCDD/Fs κατά την αποτέφρωση των αποβλήτων έχουν αποκαλύψει τους κύριους μηχανισμούς σχηματισμού τους και τους παράγοντες που τις επηρεάζουν.

Σήμερα γνωρίζουμε ότι :

- Τα PCDD/Fs σχηματίζονται κυρίως *via de novo synthesis* στο πίσω μέρος του καυστήρα.
- Η βελτιστοποίηση του ελέγχου ανάφλεξης και καύσης είναι κατάλληλα εργαλεία για την μείωση του επιπέδου των PCDD/Fs στο παραγόμενο αέριο και στα στερεά υπολείμματα
- Τα φίλτρα θα πρέπει να λειτουργούν σε θερμοκρασίες < 200 °C
- Αυξημένα επίπεδα αλογόνων δεν αυξάνουν τον σχηματισμό των PCDD/Fs αρκεί να επιτευχθεί καλή καύση
- Μόνιμα επίπεδα θείου εμποδίζουν τον σχηματισμό PCDD/Fs
- Τα PCDD/Fs μπορούν επίσης να σχηματιστούν μέσα στο θάλαμο καύσης αλλά αυτά μπορούν να καταστραφούν μετέπειτα.

Η κατάσταση όσο αναφορά τις διοξίνες και τα φουράνια σε μια σύγχρονη μονάδα αποτέφρωσης φαίνεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 : PCDD/Fs σε σύγχρονη μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ [Vehlow J., 2006].

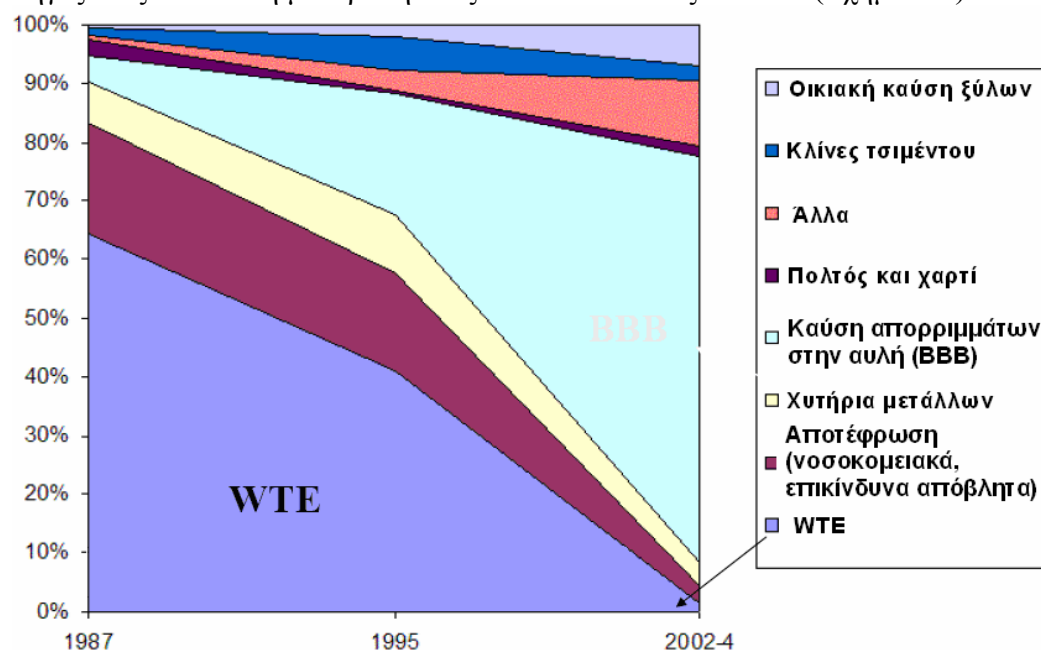
Το επίπεδο των PCDD/Fs στο αέριο κατόντι του λέβητα μπορεί να κρατηθεί με τους κατάλληλους ελέγχους της διαδικασίας, κάτω από τα 5 ng(TE)/m³ κάτι που επιτρέπει στη συνέχεια μια εύκολη εναρμόνιση με το σχεδόν παγκοσμίως καθιερωμένο όριο εκπομπής των 0,1 ng(TE)/m³ [Vehlow J., 2006].

Οι εκπομπές τοξικών ρύπων από εγκαταστάσεις αποτέφρωσης αποβλήτων έχουν μειωθεί δραστικά σε σχέση με το 1990. Οι ολικές εκπομπές διοξινών από τις 66 εγκαταστάσεις αποτέφρωσης αποβλήτων π.χ. στη Γερμανία, έχουν μειωθεί στο ένα χιλιοστό σαν συνέπεια της τοποθέτησης φίλτρων εξαιτίας της νομοθεσίας που θεσπίστηκε. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές μειώθηκαν από 400 gr σε λιγότερα από 0,5 gr. Συνέπεια αυτού είναι ότι ενώ το 1990 το ένα τρίτο όλων των εκπομπών διοξινών στη Γερμανία προερχόταν από τις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης, το ποσοστό αυτό το 2000 ήταν < 1% (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Πηγές διοξινών στη Γερμανία - ετήσιες εκπομπές [Federal Environmental Agency, 2005].

	Εκπομπές ανά έτος σε g TU (μονάδες τοξικότητας)		
	1990	1994	2000
Μεταλλευτικές δραστηριότητες	740	220	40
Αποτέφρωση αποβλήτων	400	32	0,5
Εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας	5	3	3
Βιομηχανικές εγκαταστάσεις αποτέφρωσης	20	15	<10
Οικιακά συστήματα θέρμανσης	20	15	<10
Αυτοκίνητα	10	4	<1
Κρεματόρια	4	2	<2
Συνολικές εκπομπές	1.200	330	<<10

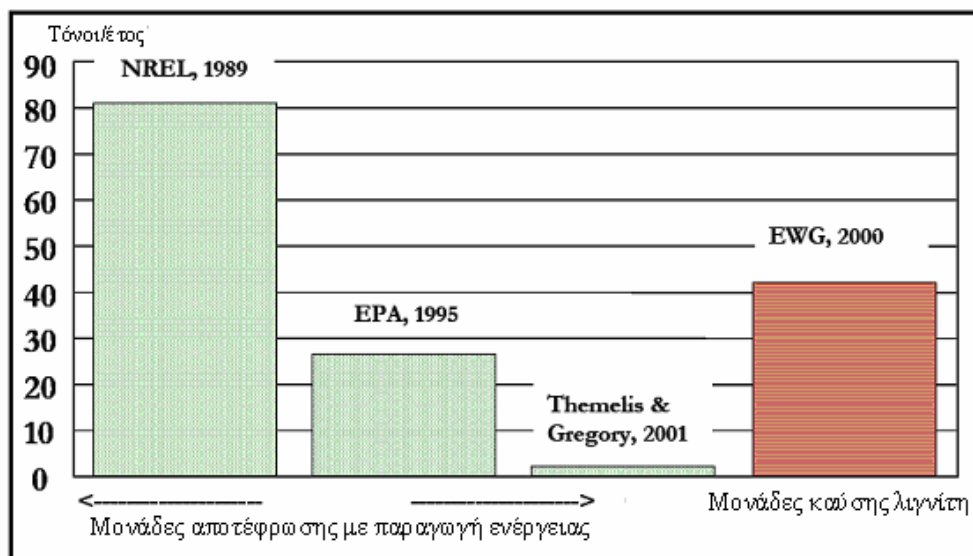
Αντίστοιχα νούμερα ισχύουν στη Μεγάλη Βρετανία και στις ΗΠΑ όπου και εκεί η πτώση ήταν της τάξης του 1000%. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι κυριότερες πηγές διοξινών και η μεταβολή τους από το 1987 έως το 2004 (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 : Πηγές διοξινών στις ΗΠΑ - ετήσιες εκπομπές [P. Deriziotis, MS Thesis, 2003].

- Βαρέα μέταλλα

Ο υδράργυρος είναι ένας καλός δείκτης της δραματικής μείωσης των εκπομπών από εγκαταστάσεις αποτέφρωσης στα τέλη του 20ού αιώνα. Μια μελέτη από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory) ανέφερε ότι το 1989, οι εκπομπές από όλες τις αμερικανικές εγκαταστάσεις αποτέφρωσης περιελάμβαναν 81,8 τόνους υδραργύρου. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90, οι συνολικές εκπομπές από τις εγκαταστάσεις αυτές στις Η.Π.Α. είχαν μειωθεί σε 26,9 τόνους υδραργύρου. Η μείωση στις εκπομπές υδραργύρου από τις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης στις Η.Π.Α. παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 : Εκπομπές υδραργύρου τα έτη 1989, 1995 και 2000 στις ΗΠΑ.

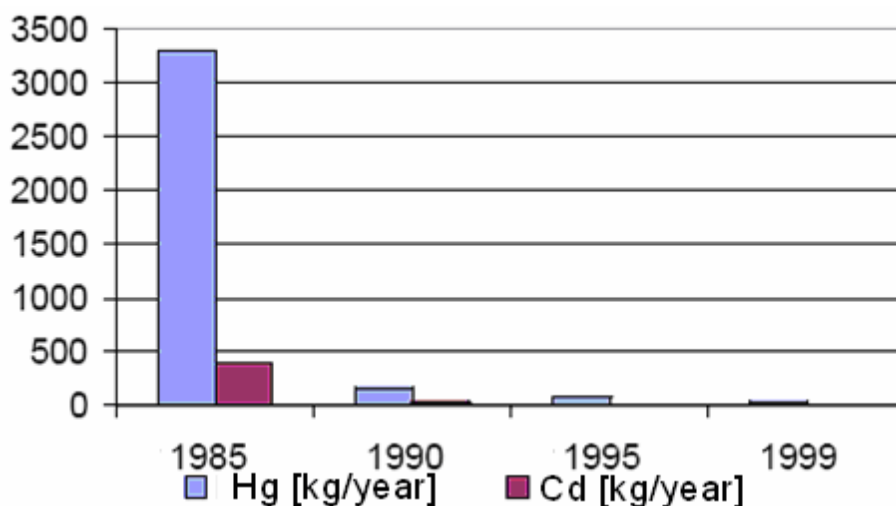
Παρόμοια εικόνα συναντάμε και στις εκπομπές βαρέων μετάλλων και συγκεκριμένα υδραργύρου αλλά και μολύβδου στις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης της Γερμανίας όπου υπήρξε μια εντυπωσιακή μείωση των εκπομπών τους λόγω της κατακράτησής τους από τις διατάξεις ελέγχου των απαερίων. Έτσι ενώ το 1990 οι εκπομπές από την αποτέφρωση ΑΣΑ έφταναν τα 57.900 kg σε μολύβδο και 347 kg σε υδράργυρο, τα αντίστοιχα ποσοστά έπεσαν σε 130,5 kg (ισοδύναμο με το 0,2% των αρχικών εκπομπών) και 4,5 kg (1,3% των αρχικών εκπομπών) το έτος 2001 (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2 : Ετήσιες εκπομπές στη Γερμανία [FBU, 2005].

	1990	2001
Μόλυβδος	57.900 kg	130.5 kg (= 0.2% των αρχικών εκπομπών)
Υδράργυρος	347 kg	4.5 kg (= 1.3% των αρχικών εκπομπών)
Τέφρα (λεπτά σωματίδια)	25.000 τόνοι (= μέγιστο 30 mg/m ³ απαερίων)	< 3000 τόνοι

Έτσι οι εκπομπές αυτών των στοιχείων δεν είναι πλέον σημαντικές για την πρόκληση κινδύνου στον άνθρωπο. Αν και δεν υπάρχουν τα τελευταία στοιχεία μέχρι το 2007, σύμφωνα με πληροφορίες από την Federal Environmental Agency τα μεγέθη των δύο αυτών βαρέων μετάλλων, λόγω των εκπομπών τους από άλλες ρυπογόνες πηγές – από τα επιβατικά αυτοκίνητα μέχρι τα εργοστάσια ενέργειας – ήταν 624.000 kg για το μολύβδο και 31.000 kg για τον υδράργυρο. Δηλαδή, αυτά τα μεγέθη είναι κατά χίλιες φορές μεγαλύτερα από αυτά των εκπομπών από τις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης με παραγωγή ενέργειας.

Τα ίδια μεγέθη ισχύουν και στη Σουηδία για τις εκπομπές καδμίου και υδραργύρου που κατά την περίοδο 1985 - 1999 μειώθηκαν κατά περίπου 99%. (Σχήμα 4.5) ενώ κατά την ίδια χρονική περίοδο και οι εκπομπές του ψευδάργυρου έπεσαν από 54.000 kg σε 90 kg ανά έτος, οι εκπομπές μολύβδου έφτασαν από τα 25.000 kg τα 35 kg ανά έτος και οι εκπομπές των PCDD/PCDFs μειώθηκαν από 90 g σε μόλις 3 g το χρόνο. [Swedish report “Förbränning av avfall – en kunskapssammanställning om dioxiner, 2005].



Σχήμα 4.5 : Ετήσιες εκπομπές υδραργύρου, καδμίου στη Σουηδία [RVF, 2005].

Επίσης, πριν το 1990 όλα τα εργοστάσια ΑΣΕ στη Γερμανία εξέπεμπαν 25.000 τόνους τέφρας (ή ένα μέγιστο 30 mg/m³ αέρα). Το 2001 αυτό το νούμερο έπεσε στους 3.000 τόνους. Σήμερα οι εγκαταστάσεις αποτέφρωσης αποβλήτων μπορούν να εκπέμπουν μια μέγιστη συγκέντρωση της τάξης του 10 mg/m³ τέφρας στα απαέρια. Στην πράξη όμως αυτό το νούμερο είναι περίπου 1 mg/m³ γιατί στον υπολογισμό πρέπει να συμπεριλάβουμε και το κέρδος από τις εκπομπές τέφρας από τα συμβατικά εργοστάσια ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση από μια σύγκριση με τις ετήσιες εκπομπές των 171.000 τόνων ιπτάμενης τέφρας της Γερμανίας προκύπτει ότι η εκπομπή από τα εργοστάσια ΑΣΕ είναι αμελητέα. [FBU., 2005].

- Διοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3 με βάση την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kg/MWh] οι εγκαταστάσεις αποτέφρωσης απορριμμάτων με παραγωγή ενέργειας (ΑΣΕ) εκπέμπουν σημαντικά χαμηλότερες ποσότητες CO₂ από κάθε άλλη μονάδα παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα. Επίσης, εκπέμπουν λιγότερο SO₂ από τις μονάδες που χρησιμοποιούν κάρβουνο ή πετρέλαιο αλλά περισσότερο από τις μονάδες που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο. Τέλος, σε σχέση με τα NO_x εκπέμπουν αντίστοιχες ποσότητες με τις μονάδες που χρησιμοποιούν ως καύσιμο κάρβουνο και πετρέλαιο αλλά αρκετά υψηλότερες σε σχέση με τις μονάδες που έχουν σαν καύσιμο το φυσικό αέριο.

Πίνακας 4.3 : Εκπομπές CO₂, SO₂, NO_x από διάφορες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας [EPAClean Energy, 2003].

Καύσιμο	CO ₂ [kg / MWh]	SO ₂ [kg / MWh]	NO _x [kg / MWh]
Α.Σ.Α	379,66	0,36	2,45
Κάρβουνο	1.020,14	5,90	2.72
Πετρέλαιο	758,41	5,44	1.81
Φυσικό αέριο	514,83	0,05	0,77

Η ΕΡΑ λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα αποτελέσματα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι εγκαταστάσεις ΑΣΕ “παράγουν ενέργεια με λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από σχεδόν κάθε άλλη πηγή ηλεκτρισμού”.

Η καύση ΑΣΑ παράγει NO_x και SO₂ καθώς και ποσότητες από άλλους ρύπους όπως ενώσεις του υδραργύρου και διοξίνες. Αν και οι εγκαταστάσεις ΑΣΕ εκπέμπουν CO₂ (το πρωτεύον αέριο του θερμοκηπίου), ένα ποσοστό αυτού θεωρείται ότι είναι τμήμα του φυσικού κύκλου του άνθρακα στη γη. Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής τους, τα δέντρα και τα φυτά από τα οποία παράγονται τελικά τα απόβλητα χαρτιού και τροφής δεσμεύουν CO₂ που υπάρχει ήδη στην ατμόσφαιρα, το οποίο κατά την αποτέφρωση τους επιστρέφει ξανά σ' αυτή. Έτσι ουσιαστικά δεν υπάρχει παραγωγή νέων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα. Σε αντίθεση μ' αυτό η καύση ορυκτών καυσίμων προκαλεί την αποδέσμευση CO₂ που δεν ήταν μέρος της ατμόσφαιρας της γης για πολύ μεγάλο διάστημα (στην ανθρώπινη χρονική κλίμακα) και κατά συνέπεια επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με νέες ποσότητες. [O'Brien, J., 2001].

Για να εκτιμήσουμε την περιβαλλοντική συμβατότητα της αποτέφρωσης αποβλήτων και για να δούμε τις μελλοντικές ανάγκες εξέλιξης θα ήταν χρήσιμο να εξετάσουμε τις εκπομπές μιας σύγχρονης εγκατάστασης ΑΣΕ. Αυτό έχει γίνει στον Πίνακα 4.4 για ένα πλήθος ενώσεων. Η δεύτερη στήλη δείχνει τις τυπικές τιμές εκπομπών μιας τέτοιας εγκατάστασης. Η τρίτη στήλη δείχνει τις μέσες συγκεντρώσεις υποβάθρου των ενώσεων αυτών στον αέρα και η τέταρτη στήλη δείχνει τις επιπρόσθετες συγκεντρώσεις στο σημείο όπου το πλούμιο φτάνει στο έδαφος. Αυτό είναι το σημείο στο οποίο ο περιβάλλον αέρας θα δεχτεί τη μέγιστη συγκέντρωση από τις εκπομπές της καμινάδας και κατά συνέπεια τα δεδομένα παρουσιάζουν τη δυσμενέστερη περίπτωση. Τα δεδομένα έχουν υπολογιστεί από τις τιμές των εκπομπών μέσω ενός μοντέλου διασποράς υποθέτοντας ένα όγκο ρεύματος 100.000m³/h και ύψος καμινάδας 65m.

Πίνακας 4.4 : Περιβαλλοντική συσχέτιση των εκπομπών καμινάδας από μια εγκατάσταση ΑΣΕ.

Ένωση	Εκπομπές καμινάδας	Συγκεντρώσεις υποβάθρου	Επιπρόσθετες εκπομπές	""Ρυπασμένος"" αέρας
HCl	5 mg/m ³	30 mg/m ³	0.15 mg/m ³	0.15 mg/m ³
SO ₂	20 mg/m ³	20 mg/m ³	0.6 mg/m ³	20.6 mg/m ³
dust	1 mg/m ³	40 mg/m ³	0.03 mg/m ³	40.03 mg/m ³
Cd	5 ng/m ³	3 ng/m ³	0.15 ng/m ³	3.15 ng/m ³
Hg	10 ng/m ³	5 ng/m ³	0.3 ng/m ³	5.3 ng/m ³
PCDD/Fs (TEQ)	0.05 ng/m ³	50 fg/m ³	1.5 fg/m ³	51.5 fg/m ³

Η τελευταία στήλη παρουσιάζει το άθροισμα της συγκέντρωσης του περιβάλλοντος αέρα και της επιπρόσθετης συγκέντρωσης της εκπομπής από την εγκατάσταση. Τα αποτελέσματα παρέχουν αποδείξεις ότι οι εκπομπές της καμινάδας μιας σύγχρονης μονάδας ΑΣΕ αυξάνει ποσοστιαία ελάχιστα το είδη χαμηλό επίπεδο των υπαρχόντων συγκεντρώσεων υποβάθρου. Αυτές οι εκπομπές δεν αποτελούν κανένα περιβαλλοντικό κίνδυνο. Κάτι που ισχύει ακόμα και για τις κρίσιμες ενώσεις των PCDD/Fs και του Hg [Vehlow, J., 2006].

- Μονοξείδιο του άνθρακα

Κατά τη διάρκεια της αποτέφρωσης των ΑΣΑ σχηματίζεται μονοξείδιο του άνθρακα σαν προϊόν ατελούς καύσης. Το CO μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης προειδοποίησης ατελούς καύσης και είναι ένα σημαντικό ποιοτικό κριτήριο για το επίπεδο της ανάφλεξης των αερίων. Σαν κανόνας το CO μετράται σε καθημερινή βάση στις εγκαταστάσεις και η μέση τιμή του κυμαίνεται κάτω από τα 50 mg / m³.

Στις σύγχρονες εγκαταστάσεις η μέση ημερήσια τιμή κυμαίνεται κάτω από τα 10 mg/m³.

-Οξειδία του αζώτου

Κατά την αποτέφρωση των ΑΣΑ στους αποτεφρωτές παράγονται οξειδία του αζώτου NO_x (NO, NO₂), τα οποία ουσιαστικά σχηματίζονται:

- από το άζωτο που περιέχεται στα απόβλητα,
- από την ίδια τη διαδικασία ανάφλεξης και
- από την αυθόρμητη αντίδραση.

Οι συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου στα απαέρια μετρούνται συνεχώς κατά κανόνα στις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης. Αν δεν ληφθεί καμία ενέργεια στους αποτεφρωτές των ΑΣΑ για την απομάκρυνση του αζώτου, τότε οι εκπομπές αναμένεται να κυμανθούν μεταξύ 350 και 400 mg/m³. Ένα επίπεδο της τάξης των 200 mg/m³ μπορεί να επιτευχθεί με ασφάλεια αν χρησιμοποιηθούν κατάλληλα μέτρα επεξεργασίας όπως η μη καταλυτική μείωση (Non Selective Catalytic Reduction) ή η επιλεκτική καταλυτική μείωση (Selective Catalytic Reduction). Στις σύγχρονες εγκαταστάσεις οι επιτυγχανόμενες συγκεντρώσεις κυμαίνονται από 100 έως 150 mg/m³ όταν χρησιμοποιείται η τεχνολογία SNCR και <70 mg/m³ όταν χρησιμοποιείται η τεχνολογία SCR.

-Νιτρικά οξείδια

Όπως τα οξείδια του αζώτου NO και NO₂ έτσι και το νιτρικό οξείδιο N₂O είναι σημαντικά από περιβαλλοντικής άποψης. Επίπεδα εκπομπών της τάξης του 1 έως 12 mg/m³ έχουν υπολογιστεί σε μετρήσεις εγκαταστάσεων αποτέφρωσης με το μέσο όρο να κυμαίνεται στο 1-2 mg/m³.

- Αμμωνία NH₃

Στην αποτέφρωση των ΑΣΑ οι εκπομπές αμμωνίας NH₃ οφείλονται κυρίως στην αμμωνία (και επίσης στο νερό αμμωνίας) που χρησιμοποιείται στα μέτρα επεξεργασίας των απαερίων για την απομάκρυνση του αζώτου (SNCR, SCR). Σαν κανόνας οι εκπομπές (όπως προσδιορίστηκαν από μετρήσεις) κυμαίνονται μεταξύ 1 - 10 mg/m³. Η μέση τιμή λαμβάνεται ίση με 4 mg/m³.

- Μη μεθανογενείς πτητικές οργανικές ενώσεις

Οι οργανικές ενώσεις (οργανικός άνθρακας) στα απαέρια της αποτέφρωσης των ΑΣΑ μετρούνται συνεχώς μέσω της παραμέτρου TOC. Αυτή η παράμετρος αποτελεί δείκτη του επιπέδου της καύσης που επιτυγχάνεται σε μια διαδικασία αποτέφρωσης. Οι εκπομπές μιας σύγχρονης εγκατάστασης είναι της τάξης του 1 mg/m³ το δε όριο είναι 10 mg/m³.

4.1.2 Υγρά

Τα υγρά απόβλητα, που παράγονται κατά την καύση των απορριμμάτων, προέρχονται από την επεξεργασία των απαερίων (π.χ. πλυντρίδες) και την απομάκρυνση των στερεών καταλοίπων.

Τα μεν πρώτα συνήθως περιέχουν βαρέα μέταλλα, όπως Pb, Cd, Cu, Hg, Zn, As, κ.α., ενώ τα δεύτερα περιέχουν κυρίως άλατα και άκαυστα οργανικά. Είναι έντονα αλκαλικά και περιέχουν και πολλά αιωρούμενα σωματίδια και βαρέα μέταλλα.

4.1.3 Στερεά

Περιέχουν γενικώς τους ίδιους ρύπους με τις αέριες εκπομπές, αλλά σε διαφορετικές αναλογίες και συγκεντρώσεις. Στο στερεό υπόλειμμα περιέχονται μέταλλα, ενώ μια τυπική σύσταση αυτών είναι 45-60% SiO₂, 5-10% ενώσεις Ca και Al₂O₃, 3-15% Fe₂O₃ και μικρότερα ποσοστά Mg, Na και K [Γρηγοροπούλου Ε., Κατσίρη Α., 2006].

Όσον αφορά στις οργανικές ενώσεις, που περιέχονται στα στερεά υπολείμματα της καύσης, οι διαθέσιμες πληροφορίες είναι λίγες, εκτός από την περίπτωση διοξινών και φουρανίων. Είναι πάντως γνωστό ότι δεν διαλυτοποιούνται σε νερό και δεν πρέπει να διατίθενται μαζί με οργανικούς διαλύτες.

4.1.3.1 Ποιότητα στερεών υπολειμμάτων

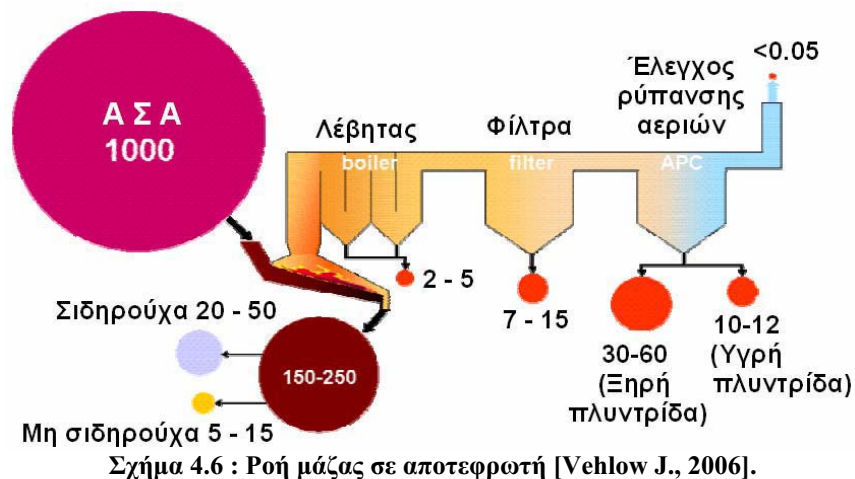
- Καθιζάνουσα τέφρα

Η βάση για όλες τις συζητήσεις σχετικά με τα στερεά υπολείμματα της αποτέφρωσης των απορριμμάτων, είναι η γνώση των διαφορετικών ρευμάτων ΑΣΑ που εισέρχονται στον αποτεφρωτή. Στο Σχήμα 4.6 διακρίνεται η ροή μάζας σε έναν αποτεφρωτή ΑΣΑ.

Σε ένα τυπικό σύγχρονο εργοστάσιο η τέφρα που καθιζάνει κυμαίνεται μεταξύ 15 – 25% κ.β. των απορριμμάτων. Η τέφρα αυτή περιέχει σημαντικές ποσότητες σιδηρούχων και μη σιδηρούχων scrap μετάλλων (π.χ. Fe, Al).

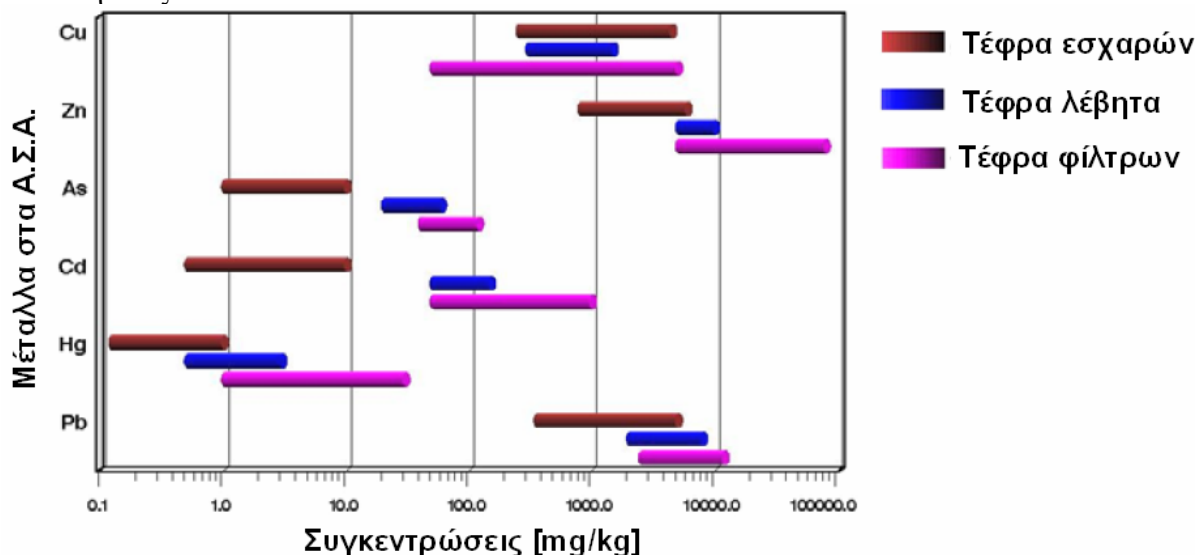
Η παραγωγή στάχτης από το βραστήρα εξαρτάται από τον τύπο του και από την ποσότητα της στάχτης που αρχικά απελευθερώθηκε από τις εσχάρες. Τυπικά μεγέθη τιμών σε σύγχρονες μονάδες είναι 2-5 kg / Mg αποβλήτων όπως εξάλλου φαίνεται και στο Σχήμα 35. Η στάχτη από το βραστήρα δε θα πρέπει να ενώνεται με την τέφρα των εσχάρων αλλά θα πρέπει να επεξεργάζεται μαζί με τη στάχτη από τα φίλτρα, κάτι το οποίο έχει ήδη νομοθετηθεί σε αρκετές χώρες.

Η ποσότητα των λεπτών σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας που απομακρύνονται από τα απαέρια μέσω των ηλεκτροστατικών κατακρημνιστών κυμαίνεται μεταξύ 7-15 kg / Mg. Η ποσότητα των υπολειμμάτων που κατακρατείται στα συστήματα ελέγχου των απαερίων κυμαίνεται, ανάλογα με το είδος του συστήματος από 10 - 60 kg / Mg αποβλήτων.



- Βαρέα μέταλλα

Η τέφρα των εσχарών ή αλλιώς η καθιζάνουσα στάχτη μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα μίγμα πυριτικών και οξειδικών φάσεων. Όμως, η μείωση της μάζας και του όγκου των αποβλήτων κατά την αποτέφρωση προκαλεί τον εμπλουτισμό της τέφρας αυτής με μια σημαντική ποσότητα βαρέων μετάλλων, σε σύγκριση με τις αρχικές τους συγκεντρώσεις στα απόβλητα. Στο Σχήμα 4.7 φαίνεται το εύρος των συγκεντρώσεων κάποιων μετάλλων των ΑΣΑ, στην τέφρα των εσχарών, στην τέφρα του βραστήρα και στην τέφρα που συλλέγεται από τα φίλτρα. Με εξαίρεση το As και τον Hg όλα τα βαρέα μέταλλα, ακόμα και αυτά με σημαντική πτητικότητα όπως το Cd συναντώνται σε υψηλές συγκεντρώσεις στην τέφρα των εσχарών σε σχέση με τις συγκεντρώσεις τους στη λιθόσφαιρα. Γι' αυτό και αυτά τα υλικά πρέπει να προσεχθούν ιδιαίτερα κατά την τελική τους διάθεση ή χρήση. Σύμφωνα π.χ. με την Ελβετική νομοθεσία αυτή η περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα αποτελεί ένα σημαντικό εμπόδιο για τη διάθεσή τους.



Σχήμα 4.7: Εύρος συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων στην τέφρα των εσχарών, του λέβητα και των φίλτρων [IAWG 1997].

Οι στάχτες του λέβητα καθιζάνουν σε θερμοκρασίες μεταξύ 800 και 200 °C, ενώ οι στάχτες στα φίλτρα σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 200 °C. Αυτό συμβαίνει γιατί τα βαρέα μέταλλα και άλλα είδη που αεριοποιούνται μέσα στο θάλαμο ανάφλεξης

συμπυκνώνονται σε κάποιο βαθμό στις επιφάνειες αυτές και οι συγκεντρώσεις στοιχείων όπως Cl, Zn, As ή Pb μπορούν να ξεπεράσουν σημαντικά αυτές της καθιζάνουσας τέφρας των εσχαρών, όπως φαίνεται εξ άλλου και στο σχήμα 4.6.

Ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας εκτός από τα βαρέα μέταλλα είναι και το περιεχόμενο της τέφρας αυτής σε άλατα. Για τη διάθεσή τους ο περιορισμός για την περιεκτικότητα σε άλατα έχει νομοθετηθεί στη Γερμανία μόνο για το διαλυτό κλάσμα και την ηλεκτρική αγωγιμότητα ενώ για τη χρήση δίνονται συγκεκριμένα όρια για τα χλωρίδια και τα σουλφίδια. Ένας επίσης σημαντικός παράγοντας τόσο για τη διάθεση όσο και για τη χρήση της στάχτης, είναι και ο TOC (Total Organic Carbon) ο οποίος χαρακτηρίζει και την ποιότητα της καύσης. Ο Γερμανικός TORW (Technical Ordinance Residential Waste) έχει ορίσει το όριο του TOC σε 1% κ.β. για διάθεση σε ΧΥΤΑ κατηγορίας I, δηλαδή για ΧΥΤΑ που μπορεί να δεχτεί όλων των ειδών μη επικίνδυνα στερεά απορρίμματα, αστικά, εμπορικά και βιομηχανικά απορρίμματα. Σε σύγχρονες μονάδες η τιμή του TOC της τέφρας είναι χαμηλότερη από αυτό το όριο. Σε ειδικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι μια αύξηση της θερμογόνου δύναμης των αποβλήτων, η οποία οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες καύσης, έχει σαν αποτέλεσμα καλύτερη ποιότητα τέφρας. [Vehlow J.,2006].

4.1.4 Έλεγχος εκπομπών

Για τον πλήρη έλεγχο των εκπομπών απαιτείται διενέργεια δειγματοληψιών και αναλύσεων για προσδιορισμό της σύστασης των:

- εισερχομένων στερεών αποβλήτων
- παραγόμενων στερεών (υπολείμματα - ιπτάμενη τέφρα)
- παραγόμενων αερίων
- υγρών αποβλήτων που παράγονται κατά την επεξεργασία των απαερίων

Οι δειγματοληψίες για τα εισερχόμενα στερεά απόβλητα πραγματοποιούνται στο σύστημα τροφοδοσίας της εγκατάστασης, με λήψη δείγματος το οποίο ομογενοποιείται και αναλύεται.

Οι δειγματοληψίες των υπολειμμάτων και της ιπτάμενης τέφρας πραγματοποιούνται στο σύστημα των εσχαρών, των θερμαντικών επιφανειών και στο σύστημα μεταφοράς των υπολειμμάτων.

Οι δειγματοληψίες των υγρών αποβλήτων και των αερίων πραγματοποιούνται στα σημεία απόρριψης και εκπομπής τους, αντίστοιχα.

Απαιτήσεις για τις μετρήσεις

Εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων

Στις μονάδες αποτέφρωσης εκτελούνται οι παρακάτω μετρήσεις ατμοσφαιρικών ρύπων:

- i. Συνεχείς μετρήσεις των: NO_x, CO, ολικός κονιορτός, TOC, HCl, HF, SO₂.
- ii. Τουλάχιστον δύο μετρήσεις ετησίως των βαρέων μετάλλων, των διοξινών και των φουρανίων. Κατά το πρώτο δωδεκάμηνο λειτουργίας, εκτελείται μία μέτρηση τουλάχιστον ανά τρίμηνο.
- iii. Επιτρέπεται αντί της συνεχούς, η περιοδική μέτρηση των HCl, HF και SO₂, εάν ο φορέας εκμετάλλευσης της μονάδας είναι σε θέση να αποδείξει ότι οι

εκπομπές των ρύπων αυτών σε καμία περίπτωση δεν πρόκειται να υπερβούν τις καθορισμένες οριακές τιμές.

- iv. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διενεργούνται για να εξακριβωθεί η τήρηση των οριακών τιμών εκπομπών ανάγονται στις ακόλουθες συνθήκες:
- Θερμοκρασία 273 K, πίεση 101,3 kPa, περιεκτικότητα σε οξυγόνο 11%, ξηρό αέριο.
 - Σε περίπτωση αποτέφρωσης ή συναποτέφρωσης των αποβλήτων σε ατμόσφαιρα εμπλουτισμένη σε οξυγόνο, τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορούν να ανάγονται σε περιεκτικότητα σε οξυγόνο, την οποία καθορίζει η αρμόδια αρχή ανάλογα με τις εκάστοτε ειδικές συνθήκες.
- v. Οι οριακές τιμές εκπομπών στον ατμοσφαιρικό αέρα θεωρείται ότι τηρούνται, εάν:
- καμία από τις ημερήσιες μέσες τιμές δεν υπερβαίνει τις οριακές τιμές εκπομπών που καθορίζονται στον Πίνακα 4.5
 - καμία από τις μέσες τιμές ανά ημίωρο δεν υπερβαίνει είτε τις οριακές τιμές εκπομπής που καθορίζονται στον Πίνακα 4.6 (στήλη Α), είτε εφόσον συντρέχει λόγος, το 97% των μέσων τιμών ανά ημίωρο κατά τη διάρκεια του έτους δεν υπερβαίνει καμία από τις οριακές τιμές εκπομπής που καθορίζονται στον Πίνακα 4.6 (στήλη Β)
 - καμία από τις μέσες τιμές της περιόδου δειγματοληψίας που καθορίζει για τα βαρέα μέταλλα, τις διοξίνες και τα φουράνια δεν υπερβαίνει τις οριακές τιμές εκπομπών που καθορίζονται στον Πίνακα 4.7
 - πληρούνται τα προβλεπόμενα στον Πίνακα 4.8
- vi. Οι μέσες τιμές ημώρου και οι μέσες τιμές δεκαλέπτου προσδιορίζονται εντός του πραγματικού χρόνου λειτουργίας (εξαιρουμένων των φάσεων εκκίνησης και διακοπής, εάν δεν αποτεφρώνονται απόβλητα) από τις τιμές που έχουν προκύψει από τις μετρήσεις, αφού αφαιρεθεί η τιμή του διαστήματος εμπιστοσύνης. Οι ημερήσιες μέσες τιμές προσδιορίζονται από τις ανωτέρω επικυρωμένες μέσες τιμές.

Πίνακας 4.5 : Οριακές ημερήσιες μέσες τιμές ατμοσφαιρικών ρύπων [Κοινοτική Οδηγία 2000/76/ΕΚ].

Ολικός κοριορτός	10 mg/m ³
Οργανικές ουσίες υπό μορφή αερίων και ατμών, υπολογιζόμενες ως ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	10 mg/m ³
Υδροχλώριο (HCl)	10 mg/m ³
Υδροφθόριο (HF)	1 mg/m ³
Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	50 mg/m ³
Υποξείδιο του αζώτου (NO) και οξείδιο του αζώτου (NO ₂), υπολογιζόμενα ως οξείδιο του αζώτου, για υφιστάμενες μονάδες αποτέφρωσης ονομαστικής ωριαίας δυναμικότητας άνω των τριών τόνων ή νέες μονάδες αποτέφρωσης	200 mg/m ³
Υποξείδιο του αζώτου (NO) και οξείδιο του αζώτου (NO ₂), υπολογιζόμενα ως οξείδιο του αζώτου, για υφιστάμενες μονάδες αποτέφρωσης ονομαστικής ωριαίας δυναμικότητας τριών τόνων ή μικρότερης	400 mg/m ³

Πίνακας 4.6: Οριακές μέσες τιμές ημώρου για ατμοσφαιρικούς ρύπους [Οδηγία 2000/76/ΕΚ].

	(100 %) A	(97 %) B
Ολικός κονιορτός	30 mg/m ³	10 mg/m ³
Οργανικές ουσίες υπό μορφή αερίων και ατμών, υπολογιζόμενες ως ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	20 mg/m ³	10 mg/m ³
Υδροχλώριο (HCl)	60 mg/m ³	10 mg/m ³
Υδροφθόριο (HF)	4 mg/m ³	2 mg/m ³
Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	200 mg/m ³	50 mg/m ³
Υποξείδιο του αζώτου (NO) και οξείδιο του αζώτου (NO ₂), υπολογιζόμενα ως οξείδιο του αζώτου, για υφιστάμενες μονάδες αποτέφρωσης ονομαστικής ωριαίας δυναμικότητας άνω των τριών τόνων ή νέες μονάδες αποτέφρωσης	400 mg/m ³	200 mg/m ³

Πίνακας 4.7 : Μέσες τιμές περιόδου δειγματοληψίας ατμοσφαιρικών ρύπων ελάχιστης διάρκειας 30 λεπτών και μέγιστης διάρκειας 8 ωρών [Οδηγία 2000/76/ΕΚ].

Κάδμιο και ενώσεις του, ως κάδμιο (Cd)	σύνολο 0,05 mg/m ³
Θάλλιο και ενώσεις του, ως θάλλιο (Tl)	
Υδράργυρος και ενώσεις του, ως υδράργυρος (Hg)	0,05 mg/m³
Αντιμόνιο και ενώσεις του, ως αντιμόνιο (Sb)	σύνολο 0,5 mg/m³
Αρσενικό και ενώσεις του, ως αρσενικό (As)	
Μόλυβδος και ενώσεις του, ως μόλυβδος (Pb)	
Χρώμιο και ενώσεις του, ως χρώμιο (Cr)	
Κοβάλτιο και ενώσεις του, ως κοβάλτιο (Co)	
Χαλκός και ενώσεις του, ως χαλκός (Cu)	
Μαγγάνιο και ενώσεις του, ως μαγγάνιο (Mn)	
Νικέλιο και ενώσεις του, ως νικέλιο (Ni)	
Βανάδιο και ενώσεις του, ως βανάδιο (V)	0,1 ng/m³
Διοξίνες και φουράνια *	

*Οι μέσες τιμές μετρούνται σε περίοδο δειγματοληψίας ελάχιστης διάρκειας 6 ωρών και μέγιστης διάρκειας 8 ωρών.

Πίνακας 4.8 : Οριακές τιμές εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα [Οδηγία 2000/76/ΕΚ].

Μέση ημερήσια τιμή	50 mg/m³ καυσαερίων
Τουλάχιστον στο 95% όλων των μετρήσεων, ως μέσες τιμές δεκαλέπτου	150 mg/m ³ καυσαερίων
Στο σύνολο των μετρήσεων, ως μέσες τιμές ημώρου, λαμβανόμενες κατά τη διάρκεια όλου του 24ώρου	100 mg/m ³ καυσαερίων

Για να ληφθεί έγκυρη ημερήσια μέση τιμή, δεν απορρίπτονται περισσότερες από πέντε μέσες τιμές ημώρου στη διάρκεια μίας ημέρας για λόγους ελαττωματικής λειτουργίας ή συντήρησης του συστήματος συνεχών μετρήσεων. Στη διάρκεια ενός έτους δεν απορρίπτονται περισσότερες από δέκα ημερήσιες μέσες τιμές για λόγους ελαττωματικής λειτουργίας ή συντήρησης του συστήματος συνεχών μετρήσεων. Αναφορικά με τις τεχνικές μετρήσεων επισημαίνονται τα εξής:

- Οι μετρήσεις για τον καθορισμό των συγκεντρώσεων ρυπαντικών ουσιών του αέρα και των υδάτων πρέπει να εκτελούνται κατά αντιπροσωπευτικό τρόπο.
- Η δειγματοληψία και η ανάλυση όλων των ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των διοξινών και των φουρανίων, καθώς και οι μετρήσεις με μεθόδους αναφοράς για τη βαθμονόμηση των αυτόματων συστημάτων μετρήσεων, διεξάγονται όπως ορίζουν τα πρότυπα CEN. Εάν δεν υπάρχουν τα πρότυπα CEN, ισχύουν τα πρότυπα ISO, εθνικά ή άλλα διεθνή πρότυπα που εξασφαλίζουν την παροχή δεδομένων ισοδύναμης επιστημονικής ποιότητας.
- Οι τιμές των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% ενός μεμονωμένου αποτελέσματος μέτρησης, που προσδιορίζονται επί της ημερήσιας οριακής τιμής εκπομπών, δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα ακόλουθα ποσοστά επί τοις εκατό των οριακών τιμών εκπομπών:
 - Μονοξειδίο του άνθρακα: 10%
 - Διοξειδίο του θείου: 20%
 - Οξειδίο του αζώτου: 20%
 - Ολικός κονιορτός: 30%
 - Ολικός οργανικός άνθρακας: 30%
 - Υδροχλώριο: 40%
 - Υδροφθόριο: 40%.

Υγρά απόβλητα από την επεξεργασία των απαερίων

- i. Εκτελούνται οι παρακάτω μετρήσεις στο σημείο απόρριψης των αποβλήτων:
 - συνεχείς μετρήσεις των παραμέτρων: pH, θερμοκρασία, παροχή
 - μεμονωμένες ημερήσιες μετρήσεις των ολικών αιωρούμενων στερεών
 - τουλάχιστον μηνιαίες μετρήσεις, με αντιπροσωπευτικά και ανάλογα με τη ροή δείγματα της απόρριψης εικοσιτετραώρου, των ρυπαντικών ουσιών που αναφέρονται στον Πίνακα 4.9.
 - τουλάχιστον μετρήσεις ανά εξάμηνο των διοξινών και των φουρανίων. Κατά το πρώτο όμως δωδεκάμηνο λειτουργίας, εκτελείται μία μέτρηση τουλάχιστον ανά τρίμηνο.
- ii. Οι οριακές τιμές για τις εκπομπές στα ύδατα θεωρείται ότι τηρούνται, εάν:
 - για το σύνολο των αιωρούμενων στερεών, το 95% και το 100% των μετρουμένων τιμών δεν υπερβαίνει τις αντίστοιχες οριακές τιμές εκπομπών που καθορίζονται στον Πίνακα 4.9.
 - για τα βαρέα μέταλλα, μία και μόνη μέτρηση ανά έτος υπερβαίνει τις οριακές τιμές εκπομπών που καθορίζονται στον Πίνακα 4.9 ή εάν οι αρμόδιες αρχές προβλέπουν τη λήψη και ανάλυση περισσότερων από 20 δειγμάτων ανά έτος, το ποσοστό των δειγμάτων αυτών να μην υπερβαίνει το 5%, για τις οριακές τιμές που ορίζονται στον Πίνακα 4.9.
 - για τις διοξίνες και τα φουράνια, τα αποτελέσματα των δύο μετρήσεων δεν υπερβαίνουν την οριακή τιμή εκπομπής που καθορίζεται στον Πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9 : Οριακές τιμές εκπομπών για τις απορρίψεις υγρών αποβλήτων προερχόμενων από τον καθαρισμό των απασερίων [Οδηγία 2000/76/ΕΚ].

Ρυπαντικές ουσίες	Οριακές τιμές εκπομπών εκφρασμένες ως συγκεντρώσεις κατά μάζα για αδιήθητα δείγματα	
Ολικά αιωρούμενα στερεά, όπως ορίζονται στην οδηγία 91/271/ΕΟΚ	95% / 30mg/l	100% / 45 mg/l
Υδράργυρος και ενώσεις του, ως υδράργυρος (Hg)	0,03 mg/l	
Κάδμιο και ενώσεις του, ως κάδμιο (Cd)	0,05 mg/l	
Θάλλιο και ενώσεις του, ως θάλλιο (Tl)	0,05 mg/l	
Αρσενικό και ενώσεις του, ως αρσενικό (As)	0,15 mg/l	
Μόλυβδος και ενώσεις του, ως μόλυβδος (Pb)	0,2 mg/l	
Χρώμιο και ενώσεις του, ως χρώμιο (Cr)	0,5 mg/l	
Χαλκός και ενώσεις του, ως χαλκός (Cu)	0,5 mg/l	
Νικέλιο και ενώσεις του, ως νικέλιο (Ni)	0,5 mg/l	
Ψευδάργυρος και οι ενώσεις του, ως ψευδάργυρος (Zn)	1,5 mg/l	
Διοξίνες και φουράνια	0,3 ng/l	

Στερεά απόβλητα

Πριν καθορισθεί η τεχνική για την επεξεργασία των στερεών υπολειμμάτων της λειτουργίας των μονάδων αποτέφρωσης, διεξάγονται κατάλληλες μετρήσεις για τον προσδιορισμό των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων, καθώς και του ρυπογόνου δυναμικού των υπολειμμάτων αυτών. Οι μετρήσεις καλύπτουν το συνολικό υδατοδιαλυτό κλάσμα και το υδατοδιαλυτό κλάσμα βαρέων μετάλλων.

- Οριακές τιμές ατμοσφαιρικών εκπομπών

Οι αρμόδιες αρχές μπορούν να επιτρέψουν εξαιρέσεις όσον αφορά τα NO_x για υφιστάμενες μονάδες αποτέφρωσης:

- ονομαστικής ωριαίας δυναμικότητας μικρότερης ή ίσης των 6 τόνων, εφόσον η άδεια προβλέπει ημερήσιες μέσες τιμές το πολύ 500 mg/m³ και μέχρι την 1η Ιανουαρίου 2008.
- ονομαστικής ωριαίας δυναμικότητας μεγαλύτερης των 6 τόνων, αλλά μικρότερης ή ίσης των 16 τόνων, εφόσον η άδεια προβλέπει ημερήσιες μέσες τιμές το πολύ 400 mg/m³ και μέχρι την 1η Ιανουαρίου 2010.
- ονομαστικής ωριαίας δυναμικότητας μεγαλύτερης των 16 τόνων, αλλά κατώτερης των 25 τόνων η οποία δεν παράγει απορρίψεις στα ύδατα, εφόσον η άδεια προβλέπει ημερήσιες μέσες τιμές το πολύ 300 mg/m³ και μέχρι την 1η Ιανουαρίου 2008.

Μέχρι την 1η Ιανουαρίου 2008, οι αρμόδιες αρχές μπορούν να επιτρέψουν εξαιρέσεις για τον κονιορτό για υφιστάμενες εγκαταστάσεις αποτέφρωσης, ονομαστικής ωριαίας δυναμικότητας μικρότερης των 16 τόνων, εφόσον η άδεια προβλέπει ημερήσιες μέσες τιμές το πολύ 20 mg/m³.

Μέχρι την 1η Ιανουαρίου 2010, οι αρμόδιες αρχές δύνανται να επιτρέψουν εξαιρέσεις όσον αφορά τα NO_x, για υφιστάμενες μονάδες αποτέφρωσης ονομαστικής ωριαίας

δυναμικότητας μεταξύ 6 και 16 τόνων, εφόσον η μέση τιμή ημιώρου δεν υπερβαίνει τα 600 mg/m³ για τη στήλη Α ή τα 400 mg/m³ για τη στήλη Β.

Η συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στα απαέρια (εξαιρουμένων των φάσεων έναρξης και διακοπής) δεν υπερβαίνει τις ανωτέρω οριακές τιμές εκπομπών. Η αρμόδια αρχή μπορεί να εγκρίνει εξαιρέσεις για μονάδες στις οποίες χρησιμοποιείται τεχνολογία ρευστοστερεάς κλίνης, με την προϋπόθεση ότι στη σχετική άδεια προβλέπεται οριακή τιμή εκπομπών για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) 100 mg/m³ κατ' ανώτατο όριο, ως ωριαία μέση τιμή.

- Οριακές τιμές από την επεξεργασία των στερεών αποβλήτων

Αναφορικά με τα στερεά υπολείμματα, λόγω του ρυπαντικού τους φορτίου απαιτείται αποτελεσματική επεξεργασία τους και όπου είναι δυνατόν η ανακύκλωσή τους. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο επεξεργασίας, πρέπει να επιτυγχάνονται τα εξής:

- Περιεκτικότητα σε άκαυστο υλικό μέχρι 2% (επί ξηρής βάσης).
- Περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά συστατικά μέχρι 1% (επί ξηρής βάσης).
- Η περιεκτικότητα σε νερό να είναι η μικρότερη δυνατή.
- Η περιεκτικότητα σε σίδηρο να είναι πολύ μειωμένη.
- Πλήρης καταστροφή των διοξινών – φουρανίων.

Στον πίνακα 4.10 δίδονται οι οριακές τιμές που πρέπει να πληρούνται μετά την επεξεργασία των στερεών υπολειμμάτων για τους κυριότερους ρύπους που περιέχονται σε αυτά.

Πίνακας 4.10 : Οριακές τιμές ρυπαντικών παραμέτρων στα στερεά απόβλητα μετά την επεξεργασία τους [ΚΥΑ 114218/1997].

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	Τιμή (mg/l)
Χλωριόντα	250
Θειικά	600
Φθόριο	3
Μόλυβδος	0,1
Κάδμιο	0,004
Χρώμιο	0,04
Χαλκός	0,5
Νικέλιο	0,04
Ψευδάργυρος	0,5
Υδράργυρος	0,001

Μέτρα για μείωση των εκπομπών

Βασικός στόχος πριν από την εφαρμογή κατάλληλων αντιρρυπαντικών τεχνολογιών είναι η ελαχιστοποίηση των ρύπων που περιέχονται στα παραγόμενα αέρια. Η μείωση των εκπομπών των αερίων μπορεί να επιτευχθεί με τις εξής ενέργειες:

- βελτίωση της κατανομής του πρωτογενούς αέρα κατά μήκος των εσχαρών στο θάλαμο καύσης
- προσαρμογή των συνθηκών θερμοκρασίας κατά μήκος των εσχαρών σε σχέση με τη σύνθεση των απορριμμάτων
- βελτίωση των συνθηκών μετάκαυσης των αερίων (καλύτερη ανάμιξη των αερίων)

- αυτόματη αναπροσαρμογή της θερμοκρασίας στην περιοχή μετάκαυσης για πλήρη καύση των αερίων
- βελτίωση του συστήματος απομάκρυνσης τέφρας
- διακριτός διαχωρισμός της διαδικασίας καύσης (σε πρώτο στάδιο επιτυγχάνεται η ξήρανση - διάσπαση των οργανικών ή ακόμη και η απαέρωση, ενώ στο δεύτερο η πλήρης καύση των αερίων της απαέρωσης).

Επίσης, στις εστίες καύσης ενδείκνυνται οι εξής ενέργειες:

- αύξηση του πρωτογενούς αέρα στο 70% του συνολικά απαιτούμενου αέρα,
- αύξηση της προθέρμανσης του πρωτογενούς αέρα καύσης τουλάχιστον στους 120°C για απόβλητα μέσης και υψηλής θερμογόνου δύναμης, δηλαδή 10.000 kJ/kg – 16.000 kJ/kg και στους 150-180°C για απόβλητα χαμηλής μέχρι μέσης θερμογόνου δύναμης, δηλαδή 4.000 kJ/kg – 10.000 kJ/kg [Φάττα Δ., 2006].

4.2 Πυρόλυση – Αεριοποίηση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα κύρια προϊόντα των διεργασιών της πυρόλυσης και της αεριοποίησης είναι:

- Αέρια: πλούσια σε υδρογόνο, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, υδρογονάνθρακες, κα. (ανάλογα με την αρχική σύσταση των απορριμμάτων), τα οποία χρησιμοποιούνται περαιτέρω ως καύσιμο,
- Υγρά: μεγάλου ιξώδους και ελαιώδους σύστασης, που περιέχουν κετόνες, υδρογονάνθρακες και άλλες οργανικές ενώσεις, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω ως καύσιμα,
- Στερεά: υπολείμματα με κύριο συστατικό τον άνθρακα και ορισμένα ανόργανα υλικά, όπως μέταλλα, γυαλί, κα., τα οποία μπορούν και αυτά να διαχωριστούν και να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω ως καύσιμα.

Γενικά, όλα τα προϊόντα (υγρά, στερεά και αέρια) των διεργασιών της πυρόλυσης και της αεριοποίησης μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω για την παραγωγή ενέργειας και ως εκ τούτου την αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των απορριμμάτων.

Οι μέθοδοι της πυρόλυσης και της αεριοποίησης, λόγω της χρήσης μηδενικών ή έστω ελάχιστων ποσοτήτων οξυγόνου - αέρα, παράγουν μικρότερες ποσότητες απαερίων [www.foe.co.uk]. Ακόμη, σημαντικό είναι το γεγονός ότι στις διεργασίες αυτές ένας μεγάλος αριθμός ρύπων (π.χ. θείο, βαρέα μέταλλα, κα.) παραμένει στην παραγόμενη τέφρα, χωρίς να μεταφέρεται στην αέρια φάση και να επιβαρύνει την ποιότητα της ατμόσφαιρας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι το παραγόμενο αέριο χρησιμοποιείται περαιτέρω ως καύσιμο, πολλές φορές περιορίζει τον αριθμό και το είδος των αναγκαίων τεχνολογιών αντιρρύπανσης [www.wasteresearch.co.uk].

Ανεξάρτητα από τις εκλυόμενες ποσότητες, πολλά από τα αέρια συστατικά των απαερίων, που προκύπτουν από τις διάφορες μεθόδους θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ, είναι κοινά. Σύμφωνα με στοιχεία που παρουσιάζονται σε έκθεση της Greenpeace, οι διεργασίες της αποτέφρωσης και της αεριοποίησης ΑΣΑ παράγουν ορισμένους κοινούς ρύπους σε διαφορετική μεν ποσότητα (Πίνακας 4.11), χωρίς όμως κάποια από αυτές να υπερτερεί σημαντικά στο σύνολό της στην προστασία της ατμοσφαιρικής ποιότητας.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η παραγόμενη τέφρα, από όλες τις μεθόδους θερμικής διεργασίας, θεωρείται επικίνδυνο απόβλητο (λόγω της περιεκτικότητάς της σε βαρέα μέταλλα, διοξίνες και άλλους τοξικούς ρύπους), το οποίο χρήζει κατάλληλης επεξεργασίας πριν την τελική του διάθεση.

Πίνακας 4.11 : Αέριες εκπομπές από την καύση και την αεριοποίηση απορριμμάτων (σε κιλιά ρύπων ετησίως) [Ψωμάς Σ., 2005].

Ρύπος	Καύση	Αεριοποίηση	% διαφορά αεριοποίησης σε σχέση με καύση
Διοξίνες / φουράνια	0,027	0,050	+85%
Υδράργυρος	92,6	92,6	0%
Μόλυβδος	50	46,8	-6,4%
Διοξείδιο του θείου	57.335	53.524	-6,7%
Οξείδια αζώτου	40.930	52.364	+28%
Μονοξείδιο του άνθρακα	7.673	4.955	-35,4%

4.3 Κομποστοποίηση

Τα κυριότερα περιβαλλοντικά θέματα που σχετίζονται με την κομποστοποίηση αφορούν στις αέριες εκπομπές, συμπεριλαμβανομένων των οσμών, κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης, την πιθανή ρύπανση των υδάτων από τα στραγγίσματα της διεργασίας, τη ρύπανση του εδάφους κατά τη χρήση του κομποστ, το θόρυβο, τη διάδοση παθογόνων μικροοργανισμών και την κατανάλωση ενέργειας [ΕΑ, 2002a,b, Lasaridi et al., 2006, Imppola et al., 2004, McDougall et al., 2001].

Αέρας

Οι αέριες εκπομπές της κομποστοποίησης δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από το είδος του υποστρώματος (π.χ. πράσινα απόβλητα, διαλεγμένα στην πηγή βιοαπόβλητα ή εμπλουτισμένο οργανικό κλάσμα μετά από μηχανική διαλογή). Αντίθετα, επηρεάζονται σημαντικά από τον τύπο της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται, με τα ανοικτά συστήματα να παρουσιάζουν περισσότερες εκπομπές, που δεν είναι εύκολο να ελεγχθούν. Τα κυριότερα προβλήματα εστιάζονται στις εκπομπές βιο-αερολυμάτων (bioaerosols), πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), οσμών και σκόνης.

Τα βιο-αερολύματα είναι αιωρούμενα στον αέρα σωματίδια, βιολογικής προέλευσης και αποτελούνται από ζωντανούς ή νεκρούς μικρο-οργανισμούς, ή τμήματά τους ή σπόρια που αυτοί παράγουν. Βιο-αερολύματα παράγονται από όλες τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων και μπορούν να προκαλέσουν αλλεργίες ή και ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος, κυρίως στους εργαζόμενους. Οι εκπομπές βιο-αερολυμάτων είναι πιο έντονες κατά τη φάση αναστροφής των σειραδίων σε ανοικτά ή στεγαζόμενα συστήματα και είναι σημαντικά χαμηλότερες όταν χρησιμοποιούνται συστήματα βιοαντιδραστήρων.

Οι οσμές είναι το πρόβλημα που προκαλεί τις περισσότερες διαμαρτυρίες για τις εγκαταστάσεις κομποστοποίησης, ενώ δεν είναι λίγες οι μονάδες που αναγκάστηκαν σε προσωρινή ή και μόνιμη παύση λειτουργίας λόγω των οσμών, ειδικά όταν είναι εγκατεστημένες κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Οι οσμές μπορούν να περιοριστούν με πρακτικές καλού χειρισμού της διεργασίας, έτσι ώστε να μην αναπτύσσονται έντονες αναερόβιες συνθήκες στη μάζα του υλικού (η αναερόβια αποδόμηση

δημιουργεί πολύ εντονότερες οσμές από την αερόβια). Ωστόσο, ακόμη και στην καλύτερα διαχειριζόμενη διεργασία κομποστοποίησης κατά διαστήματα παράγονται έντονες οσμές, οι οποίες, σε κάποιες τεχνολογίες δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν ικανοποιητικά (π.χ. κατά την αναστροφή ανοικτών σειραδιών). Αντίθετα, τα κλειστά συστήματα, όπως και οι στατικοί αεριζόμενοι σωροί με απορρόφηση αέρα, επιτρέπουν τη χρήση συστημάτων για την επεξεργασία των οσμών από τα απαέρια της διεργασίας με χρήση βιόφιλτρων ή φυσικοχημικών επεξεργασιών.

Νερά

Η απορροή του νερού της βροχής σε ανοικτά συστήματα καθώς και τα στραγγίσματα που πιθανόν να δημιουργηθούν κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης μπορούν να ρυπάνουν επιφανειακά και υπόγεια νερά, αν διαφύγουν στο περιβάλλον χωρίς επεξεργασία. Ωστόσο, το πρόβλημα δεν είναι σημαντικό και μπορεί να αντιμετωπιστεί με απλά μέτρα κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία της εγκατάστασης. Πιο συγκεκριμένα, τα στραγγίσματα που παράγονται – συνήθως σε περιορισμένες ποσότητες – μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαβροχή των αποβλήτων στα διάφορα στάδια της διεργασίας όπου απαιτείται προσθήκη νερού, για την αποφυγή της πρόωμης ξήρανσης του υλικού και τη συνεπαγόμενη παρεμπόδιση των βιολογικών διεργασιών. Όλες οι εγκαταστάσεις κομποστοποίησης (με εξαίρεση πολύ μικρές μονάδες επεξεργασίας πράσινων αποβλήτων) θα πρέπει να διαθέτουν μια αδιαπέρατη επιφάνεια, από σκυρόδεμα ή άσφαλτο, πάνω στην οποία εκτελείται η κομποστοποίηση. Η επιφάνεια αυτή θα πρέπει να διαθέτει κατάλληλη κλίση και συστήματα για τη συλλογή των στραγγισμάτων και της απορροής, τα οποία θα πρέπει κατόπιν να υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία (συμπεριλαμβανομένης της επαναχρησιμοποίησής τους για διαβροχή των αποβλήτων).

Έδαφος

Η πιθανή ρύπανση του εδάφους από ρυπαντές και προσμίξεις που μπορεί να υπάρχουν στο κομπόστ αποτελεί σημαντικό θέμα, για το οποίο υπάρχουν προβλέψεις στην εθνική νομοθεσία όλων των κρατών-μελών της ΕΕ καθώς επίσης και στη θεματική Στρατηγική για το Έδαφος [ΕΕ, 2006]. Οι προβλέψεις αυτές έχουν τη μορφή προδιαγραφών που θεσπίζουν ανώτατα επιτρεπόμενα όρια για ανεπιθύμητες ουσίες όπως τα βαρέα μέταλλα, κάποιες οργανικές ενώσεις και ξένες προσμίξεις όπως το γυαλί και το πλαστικό, καθώς και κατώτατα όρια για κάποια επιθυμητά χαρακτηριστικά, όπως η οργανική ουσία. Οι προδιαγραφές ποιότητας του κομπόστ διαφέρουν σημαντικά από χώρα σε χώρα, ανάλογα με το βαθμό υιοθέτησης της «αρχής της προφύλαξης» και τις περιβαλλοντικές προτεραιότητες της χώρας. Για παράδειγμα τείνουν να είναι πιο ανεκτικές στις ΗΠΑ, όπου ακολουθείται η προσέγγιση της εκτίμησης του κινδύνου με βάση την υπάρχουσα επιστημονική γνώση σε σχέση με τις χώρες της ΕΕ, όπου κυριαρχεί η προσέγγιση της προφύλαξης ενός πολυτίμου πόρου όπως το έδαφος. Ανάμεσα στις χώρες μέλη της ΕΕ, ακολουθείται μια πιο αυστηρή προσέγγιση στη βόρεια και κεντρική Ευρώπη, όπου τα εδάφη είναι πλούσια σε οργανική ουσία, ενώ στη νότια Ευρώπη τείνει να αξιολογείται ως σχετικά σημαντικότερη η συνεισφορά του κομπόστ στην καταπολέμηση της ερημοποίησης με αποτέλεσμα να ισχύουν πιο χαλαρά όρια για τα βαρέα μέταλλα [Brinton, 2000; Hogg et al., 2002; Lasaridi et al., 2006; Λαζαρίδη κ.ά., 2002]. Ωστόσο, η απουσία ενιαίων προδιαγραφών σε Ευρωπαϊκό επίπεδο είναι πιθανό να μη διατηρηθεί για πολύ ακόμη, καθώς συζητείται στην ΕΕ μια νέα πρόταση Οδηγίας για την ποιότητα του κομπόστ. Η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων και προσμίξεων στο κομπόστ εξαρτάται άμεσα από το αρχικό υλικό που χρησιμοποιείται

ενώ δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τη διαδικασία. Έτσι, το κομπόστ που προέρχεται από πράσινα απόβλητα έχει συνήθως πολύ χαμηλές προσμείξεις και ρύπους, ενώ χαμηλές είναι και οι συγκεντρώσεις στο κομπόστ που παράγεται με διαλογή στην πηγή του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των ΑΣΑ. Αντίθετα, το «κομπόστ» που παράγεται από το εμπλουτισμένο οργανικό κλάσμα που λαμβάνεται μετά από ΜΒΕ είναι περισσότερο επιβαρυνμένο και σε αρκετές χώρες η χρήση του περιορίζεται σε αποκατάσταση χώρων και ως υλικό επικάλυψης σε ΧΥΤΑ. Είναι γενικά πλέον παραδεκτό ότι υψηλής ποιότητας κομπόστ από ΑΣΑ, που να ικανοποιεί τις όλο και αυστηρότερες προδιαγραφές για αγρονομικές χρήσεις μπορεί να παραχθεί μόνο μέσα από συστήματα χωριστής διαλογής του οργανικού κλάσματος στην πηγή. Χαρακτηριστικά παρουσιάζεται η περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα για κομπόστ από ΑΣΑ και κομπόστ από «καθαρό» οργανικό (μετά από διαλογή στην πηγή), στον Πίνακα 4.12 [Brinton, 2000].

Πίνακας 4.12 : Τυπική συγκέντρωση βαρέων μετάλλων σε κομπόστ από ανάμικτα ΑΣΑ και κομπόστ από βιοαπορρίμματα (με διαλογή στην πηγή) (Μ.Ο. 4 περιοχών) [Brinton, 2000].

Στοιχείο	Ανάμικτα ΑΣΑ (mg/kg)	Βιοαπορρίμματα (mg/kg)
Pb	420	83
Cu	222	41
Zn	919	224
Cr	107	61
Ni	84	26
Cd	2,8	0,4
Hg	1,9	<0,2

Οι ποιοτικές προδιαγραφές της πρότασης Οδηγίας της ΕΕ [EC, 2001] για τις διαφορετικές προβλεπόμενες κατηγορίες κομπόστ σε σύγκριση με τις Ελληνικές (ΚΥΑ 114218, ΦΕΚ 1016/Β/17-11-1997) παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.13. Αν και αυτή η πρόταση Οδηγίας έχει αποσυρθεί, η νέα αναμενόμενη πρόταση δεν θα διαφέρει σημαντικά ως προς τις οριακές τιμές των ρύπων. Πρέπει να σημειωθεί ότι για το κομπόστ κατηγορίας 1 δεν τίθενται περιορισμοί χρήσης, πέρα από αυτούς που επιβάλλει η καλή αγρονομική πρακτική ενώ κομπόστ κατηγορίας 2 μπορεί να εφαρμόζεται στο έδαφος σε ποσότητα που δεν υπερβαίνει τους 3 τόνους ξηρής ουσίας ανά στρέμμα κατά μέσο όρο τριετίας. Η Ελληνικές προδιαγραφές είναι παρόμοιες και συχνά χαλαρότερες από αυτές για τα σταθεροποιημένα απορρίμματα, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς έχουν θεσπιστεί με άξονα αναφοράς τα συστήματα ΜΒΕ.

Μία ενδεικτική σύγκριση των επιτρεπόμενων ορίων των βαρέων μετάλλων μεταξύ Ευρώπης, ΗΠΑ και Καναδά [Brinton, 2000], παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.14. Επιπλέον, θα πρέπει να τονιστεί ότι εφόσον λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα προφύλαξης, κυρίως ως προς την καθαρότητα των αποβλήτων και τηρούνται οι ποιοτικές προδιαγραφές, η εδαφική εφαρμογή του κομπόστ προσφέρει καθαρά περιβαλλοντικά οφέλη, τα οποία όμως είναι σχετικά δύσκολο να αποτιμηθούν ποσοτικά. Πιο συγκεκριμένα, είναι καλά τεκμηριωμένο ότι η οργανική ουσία από το κομπόστ βελτιώνει την υδατο-ικανότητα και τη δομή του εδάφους, αυξάνει τη μικροβιακή του δραστηριότητα, ενισχύει τη δράση των χημικών λιπασμάτων καθώς μειώνει την έκπλυσή τους, καταστέλλει τα φυτοπαθογόνα και αυξάνει την παραγωγικότητα του εδάφους, ενώ συνολικά συνεισφέρει στην καταπολέμηση της ερημοποίησης. Οι ιδιότητες αυτές έχουν μεγαλύτερη σημασία για τις Μεσογειακές

χώρες σε σχέση με την κεντρική και βόρεια Ευρώπη, καθώς τα Μεσογειακά εδάφη είναι πολύ φτωχότερα σε οργανική ουσία και ευάλωτα στην ερημοποίηση. Ωστόσο, απαιτείται πού περισσότερη έρευνα προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν τα παραπάνω οφέλη, έτσι ώστε να μπορούν να συνυπολογιστούν σε απλά εργαλεία λήψης αποφάσεων.

Θόρυβος

Υπάρχουν δύο βασικές πηγές θορύβου στις εγκαταστάσεις κομποστοποίησης: οι θρυμματιστές και το προειδοποιητικό σήμα οπισθοκίνησης των φορτωτών. Ο θόρυβος από τους θρυμματιστές μπορεί να φτάσει τα 90 dB, επίπεδο που μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σε ανοικτά συστήματα, μπορεί όμως να αντιμετωπιστεί με κατάλληλη χωροθέτηση του θρυμματιστή στην εγκατάσταση και χρήση των σειραδιών ως ηχοπετασμάτων. Το προειδοποιητικό σήμα οπισθοκίνησης για τους φορτωτές συνδέεται άμεσα με την υγιεινή και ασφάλεια της εργασίας στο χώρο και δεν πρέπει να αδρανοποιείται, μπορούν όμως να επιλεγθούν λιγότερο ενοχλητικοί ήχοι.

Πίνακας 4.13: Ποιοτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων βιολογικής επεξεργασίας του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των ΑΣΑ στην πρόταση Οδηγίας της ΕΕ και στην Ελλάδα [Τ.Ε.Ε., 2007].

Παράμετρος	Πρόταση Οδηγίας			ΚΥΑ 114218
	Κομπόστ / Digestate		Σταθεροποιημένα Βιοαπορρίμματα	Κομπόστ
	Κατηγορία 1	Κατηγορία 2		
Cd (mg/kg dm)	0,7	1,5	5	10
Cr (mg/kg dm)	100	150	600	510
Cu (mg/kg dm)	100	150	600	500
Hg (mg/kg dm)	0,5	1	5	5
Ni (mg/kg dm)	50	75	150	200
Pb (mg/kg dm)	100	150	500	500
Zn (mg/kg dm)	200	400	1500	2000
As (mg/kg dm)	-	-	-	15
PCBs (mg/kg dm)	-*	-*	0,4	-
PAHs (mg/kg dm)	-*	-*	3	-
Προσμείξεις >2mm	<0,5%	<0,5%	<3%	<0.8**
Πέτρες >5mm	<5%	<5%	-	-

* Σε συμφωνία με την αναθεώρηση της Οδηγίας για την ιλύ βιολογικών καθαρισμών

** Πλαστικό και γυαλί

Πίνακας 4.14 : Σύγκριση ορίων για τα βαρέα μέταλλα μεταξύ ΕΕ, ΗΠΑ και Καναδά [Brinton, 2000].

Στοιχείο	Ε.Ε (διακύμανση) mg/kg	ΗΠΑ, κομπόστ από ιλύ (mg/kg)	Καναδάς (mg/kg)	
			Τύποι AA & A	Τύπος B
Κάδμιο	0,7-10	39	3	20
Χρώμιο	70-200	1200	210	1060
Χαλκός	70-600	1500	100	757
Υδράργυρος	0,7-10	17	0,8	5
Νικέλιο	20-200	420	62	180
Μόλυβδος	70-1000	300	150	500
Ψευδάργυρος	210-4000	2800	500	1850

Παθογόνοι μικροοργανισμοί

Η παρουσία παθογόνων είναι ένα σημαντικό θέμα δημόσιας υγείας που ρυθμίζει τις δυνατότητες χρήσης του κομπόστ και γι' αυτό όλες οι χώρες έχουν συμπεριλάβει υγειονομικά κριτήρια ποιότητας του κομπόστ, τόσο για παθογόνους μικροοργανισμούς για τον άνθρωπο, όσο και για τα ζώα και τα φυτά. Βέβαια, η κομποστοποίηση ως θερμοφιλή διαδικασία οδηγεί στη θερμική καταστροφή των περισσότερων παθογόνων, ενώ ταυτόχρονα φαίνεται πως λειτουργούν και άλλοι μηχανισμοί καταστροφής (σχέσεις ανταγωνισμού, παραγωγή αντιβιοτικών από τη μικροχλωρίδα του κομπόστ, σταθεροποίηση του οργανικού κλάσματος κλπ).

Όσον αφορά τις θεσμοθετημένες προδιαγραφές, τα κριτήρια ποιότητας αναφέρονται στο προϊόν, στη διεργασία ή και στα δύο.

Τα κριτήρια που αναφέρονται στο προϊόν απαιτούν απουσία σαλμονέλας, και απουσία ή πολύ χαμηλές τιμές εντεροβακτηρίων και περιττωματικών στρεπτόκοκκων, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις απαιτείται απουσία νηματοειδών, κυστοειδών και άλλων φυτοπαθογόνων. Επίσης τίθενται όρια στον αριθμό των ικανών προς βλάστηση σπορών παρασιτικών φυτών και κριτήρια φυτοτοξικότητας για το κομπόστ. Σε άλλες περιπτώσεις η υγειονομοποίηση του κομπόστ εξασφαλίζεται μέσα από την εφαρμοζόμενη διεργασία, με την απαίτηση να έχει παραμείνει το υλικό πάνω από κάποια συγκεκριμένη θερμοκρασία για ένα ελάχιστο χρονικό διάστημα, το οποίο συνήθως κυμαίνεται από απαίτηση για παραμονή σε θερμοκρασία άνω των 55°C για τρεις ημέρες, έως παραμονή σε θερμοκρασία άνω των 60°C για πέντε ημέρες (Hogg et al., 2002; Lasaridi et al., 2006). Οι απαιτήσεις αυτές αναφέρονται συνήθως σε συστήματα αναστρεφόμενων σειραδίων, όπου η έκθεση του υλικού στις υψηλές θερμοκρασίες δεν είναι ομοιόμορφη, καθυστερώντας έτσι την υγειονομοποίηση.

Τα αστικά απόβλητα κομποστοποιούνται συνήθως σε κλειστούς βιοαντιδραστήρες, που παρέχουν καλύτερο έλεγχο και ομοιογένεια της θερμοκρασίας, επιτυγχάνοντας καλύτερη και ταχύτερη καταστροφή των παθογόνων. Βέβαια το εύρος των πιθανών παθογόνων στα ΑΣΑ είναι μεγάλο [Deportes et al., 1995; 1998] και θα πρέπει να τηρούνται σχολαστικά οι απαραίτητες προφυλάξεις.

4.4 Αναερόβια χώνευση

Όπως και στην περίπτωση της κομποστοποίησης, έτσι και στην αναερόβια χώνευση τα κυριότερα περιβαλλοντικά θέματα αφορούν στις αέριες εκπομπές, συμπεριλαμβανομένων των οσμών, την πιθανή ρύπανση των υδάτων από τα στραγγίσματα της διεργασίας, τη ρύπανση του εδάφους κατά τη χρήση της χωνεμένης ύλης, το θόρυβο και τη διάδοση παθογόνων μικροοργανισμών [EA 2002a,b, McDougall et al. 2001].

Αέρας

Καθώς η αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα σε κλειστούς βιοαντιδραστήρες και το παραγόμενο αέριο συλλέγεται προς επεξεργασία και αξιοποίηση, δεν υπάρχουν αξιολογες εκπομπές αέριων ρύπων κατά τη διεργασία. Οι αέριες εκπομπές της αναερόβιας χώνευσης σχετίζονται με την καύση του βιοαερίου και συνίστανται κυρίως σε οξείδια του αζώτου και του θείου και δευτερευόντως σε άλλα προϊόντα της καύσης. Οι εκπομπές αυτές είναι παρόμοιες με τις εκπομπές από την καύση φυσικού αερίου, με ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα SO_x λόγω του υδρόθειου που περιέχει το βιοαέριο. Ο έλεγχος των αέριων εκπομπών από την καύση του βιοαερίου στις

περισσότερες χώρες είναι σχετικά περιορισμένος λόγω της χαμηλής επικινδυνότητάς τους, με την προϋπόθεση της απομάκρυνσης του υδρόθειου πριν από την καύση.

Στην περίπτωση της αναερόβιας χώνευσης σύμμεικτων αποβλήτων, ενδέχεται να υπάρχουν και ουσίες υψηλότερης τοξικότητας στο βιοαέριο λόγω της πιθανής παρουσίας διαλυτών και άλλων επικίνδυνων ουσιών στο υπόστρωμα. Ο έλεγχος των αποβλήτων που εισέρχονται στη μονάδα θεωρείται επαρκής για την αντιμετώπιση αυτού του κινδύνου.

Οι αέριες εκπομπές από την καύση του βιοαερίου αντισταθμίζονται, τουλάχιστον εν μέρει, από την υποκατάσταση άλλων καυσίμων λόγω της παραγωγής ενέργειας. Οι εκπομπές ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο είναι συνήθως υψηλότερες από αυτές των μονάδων φυσικού αερίου αλλά χαμηλότερες από αυτές που χρησιμοποιούν άνθρακα.

Κατά την αναερόβια χώνευση οσμές παράγονται μόνο κατά την προετοιμασία του ρεύματος τροφοδοσίας και την επεξεργασία της χωνεμένης ιλύος, οι οποίες λαμβάνουν χώρα εκτός του βιοαντιδραστήρα. Ωστόσο, και αυτές οι διεργασίες πραγματοποιούνται εντός κτιρίων και ο αέρας υφίσταται επεξεργασία με βιόφιλτρα ή χημική έκπλυση, με αποτέλεσμα οι οσμές που απελευθερώνονται στο περιβάλλον να είναι πολύ χαμηλές. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε πολλές περιπτώσεις, μονάδες αναερόβιας χώνευσης είναι χωροθετημένες σε βιομηχανικές περιοχές, σε απόσταση μικρότερη από 10 μέτρα από άλλα κτίρια χωρίς να γίνονται παράπονα για όχληση.

Νερά

Κατά την αναερόβια χώνευση υπάρχει περίσσεια νερού, το οποίο μπορεί να ανακυκλωθεί εντός της διεργασίας. Αν δεν πραγματοποιείται ανακύκλωση παράγονται περίπου 100-300 m³ υγρών αποβλήτων ανά τόνο εισερχόμενων αποβλήτων, τα οποία απαιτούν επεξεργασία είτε στην ίδια την εγκατάσταση είτε στο βιολογικό καθαρισμό της πόλης, εφόσον γίνονται δεκτά.

Οι μονάδες που επεξεργάζονται οργανικά απόβλητα μετά από διαλογή στην πηγή τείνουν να παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες υγρών αποβλήτων, καθώς η υγρασία του ρεύματος τροφοδοσίας τους είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα σύμμεικτα ΑΣΑ. Κάποιες μονάδες επεξεργασίας σύμμεικτων ΑΣΑ δεν έχουν καθόλου υγρά απόβλητα (Amiens, Vargon), ενώ άλλες έχουν σημαντικές ποσότητες.

Έδαφος

Οι κίνδυνοι για πιθανή ρύπανση του εδάφους από την εφαρμογή της χωνεμένης ιλύος είναι ίδιοι με την περίπτωση της κομποστοποίησης. Εξ' άλλου τις περισσότερες φορές η χωνεμένη ιλύς υφίσταται περεταίρω αερόβια επεξεργασία (δηλ. κομποστοποίηση) πριν εφαρμοστεί στο έδαφος. Κατά συνέπεια ο προβληματισμός και οι προδιαγραφές ποιότητας που αναφέρθηκαν στην κομποστοποίηση ισχύουν και στην περίπτωση της αναερόβιας χώνευσης, ενώ αντίστοιχα είναι και τα περιβαλλοντικά οφέλη από την εδαφική εφαρμογή χωνεμένης ιλύος μετά από περεταίρω σταθεροποίηση.

Θόρυβος

Καθώς η αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα σε κλειστά κτίρια μειώνονται και οι εκπομπές θορύβου από τον τεμαχισμό και την επεξεργασία των αποβλήτων και της

χωνεμένης ιλύος. Ωστόσο, αρκετές εγκαταστάσεις δέχονται παράπονα για θόρυβο, κυρίως από τη λειτουργία των ανεμιστήρων και των αντλιών κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επίσης, σε περίπτωση παραγωγής ηλεκτρισμού από το βιοαέριο στην ίδια την εγκατάσταση όχληση προκαλούν και οι γεννήτριες, οι οποίες συχνά προκαλούν θόρυβο που υπερβαίνει τα 100 bB στο 1 μέτρο, απαιτώντας κατάλληλη ηχητική προστασία.

Παθογόνοι μικροοργανισμοί

Λόγω της ύψιστης σημασίας που έχει η προστασία της δημόσιας υγείας από τον κίνδυνο διάδοσης μολυσματικών ασθενειών, όλες οι χώρες έχουν θεσπίσει κριτήρια για την υγιεινοποίηση των αποβλήτων. Τα κριτήρια αυτά είναι τα ίδια για όλα τα προϊόντα βιολογικής επεξεργασίας, είτε προέρχονται από αερόβιες είτε από αναερόβιες διεργασίες, και αφορούν τη διεργασία (δηλ. απαιτούν έκθεση του υλικού σε υψηλή θερμοκρασία για ορισμένο χρονικό διάστημα) ή το προϊόν (θέσπιση ανώτατων επιτρεπόμενων ορίων για δείκτες παθογόνων ή και παθογόνους μικροοργανισμούς) ή συνδυασμό τους.

Η θερμόφιλη αναερόβια χώνευση είναι πιο αποτελεσματική από τη μεσόφιλη στην καταστροφή των παθογόνων. Ωστόσο, η περαιτέρω αερόβια επεξεργασία της χωνεμένης ιλύος εξασφαλίζει και στις δύο περιπτώσεις καλή υγιεινοποίηση και σταθεροποίηση του υποστρώματος. Ένα άλλο σημαντικό θέμα, όπως σε όλες τις μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων, είναι η ασφάλεια των εργαζομένων από την έκθεσή τους σε παθογόνα και άλλους κινδύνους, όπως τραυματισμός από αιχμηρά αντικείμενα. Η αναερόβια χώνευση έχει το πρόσθετο ρίσκο της πρόκλησης ασφυξίας ή έκρηξης από το βιοαέριο που μπορεί να συσσωρευτεί σε κλειστούς χώρους. Για το λόγο αυτό η εγκατάσταση πρέπει να αερίζεται καλά, ειδικά στους χώρους που γίνεται ο χειρισμός του στερεού υποστρώματος μετά τη χώνευση και να χρησιμοποιούνται επιτοίχιοι ή προσωπικοί ανιχνευτές αερίων.

4.5. Μηχανική επεξεργασία

Όπως όλες οι διεργασίες και εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων, η MBE δημιουργεί μια σειρά περιβαλλοντικών επιπτώσεων, στον αέρα, τα νερά, το έδαφος και τον άνθρωπο. Το είδος και το μέγεθος αυτών των επιπτώσεων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το σχεδιασμό, τους στόχους της μονάδας και τα διαχωριζόμενα προϊόντα. Για παράδειγμα, διαφορετικά θέματα προκύπτουν για μια μονάδα που έχει στόχο την παραγωγή ενός προϊόντος τύπου κομπόστ και τη διάθεσή του στο έδαφος και διαφορετικά για μια εγκατάσταση που αποσκοπεί κυρίως στην παραγωγή RDF και την παραγωγή ενέργειας από αυτό. Στην πρώτη περίπτωση οι κυριότερες επιπτώσεις σχετίζονται με τη βιολογική επεξεργασία (π.χ. οσμές) και την εδαφική εφαρμογή του προϊόντος (ξένες προσμίξεις, βαρέα μέταλλα και εμμένοντες οργανικοί ρύποι, παθογόνα κλπ), ενώ στη δεύτερη με την καύση του RDF (αέριες εκπομπές, NOx, διοξίνες κλπ).

Στην παράγραφο αυτή αναλύονται τα περιβαλλοντικά θέματα που σχετίζονται με τις διεργασίες προετοιμασίας και διαχωρισμού των αποβλήτων, δηλαδή το τμήμα της μηχανικής επεξεργασίας μιας μονάδας MBE [EA 2002b, McDougall et al. 2001].

Αέρας

Οι κυριότερες αέριες εκπομπές από τις διεργασίες μηχανικής επεξεργασίας των αποβλήτων σε μια μονάδα ΜΒΕ είναι οι οσμές και η σκόνη.

Η μηχανική επεξεργασία και διαχωρισμός σύμμεικτων ΑΣΑ ή του κλάσματος των υπολειμματικών αποβλήτων μπορεί να έχει σημαντική έκλυση οσμών στο περιβάλλον, η οποία αντιμετωπίζεται με κατάλληλη χωροθέτηση της μονάδας και χρήση κατάλληλων τεχνολογιών ελέγχου των οσμών. Η σκόνη μπορεί να ελεγχθεί με την παροχή αποτελεσματικού αερισμού, για την προστασία των εργαζομένων και του γενικού πληθυσμού. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παραγωγή σκόνης βιολογικής προέλευσης (βιοαερολύματα), η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει αρνητικά την υγεία των εργαζομένων αλλά και των κατοίκων γειτονικών περιοχών. Συνήθως, ο αέρας στα κτίρια της εγκατάστασης διατηρείται σε υποπίεση και συλλέγεται προς επεξεργασία σε βιόφιλτρα ή συστήματα θερμικής και χημικής οξείδωσης απαερίων.

Νερά

Κατά τη μηχανική επεξεργασία και διαχωρισμό σύμμεικτων αποβλήτων με υψηλή περιεκτικότητα βιοαποδομήσιμων, μπορούν να παραχθούν ποσότητες στραγγισμάτων. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για τη συλλογή και επεξεργασία τους. Κάποιες τεχνολογίες ΜΒΕ πραγματοποιούν διαχωρισμό των αποβλήτων στην υγρή φάση, μετά από προσθήκη νερού. Αυτές παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες στραγγισμάτων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον αντιδραστήρα αναερόβιας χώνευσης που συνήθως υπάρχει σε αυτόν τον τύπο ΜΒΕ.

Έδαφος

Κατά το μηχανικό διαχωρισμό των αποβλήτων ένα ποσοστό 10-15% κ.β. του εισερχόμενου ρεύματος απορρίπτεται ως ακατάλληλο προς ανάκτηση / αξιοποίηση. Ανάλογα με το σχεδιασμό και το βασικό στόχο επεξεργασίας της μονάδας, καθώς και τις διαθέσιμες αγορές, ένα πολύ μεγαλύτερο ποσοστό μπορεί να χρειαστεί εδαφική διάθεση. Έτσι, σε μια ΜΒΕ που στοχεύει στην παραγωγή βιοσταθεροποιημένων αποβλήτων για διάθεση σε ΧΥΤΑ, περίπου το 20-50% κ.β. των εισερχόμενων αποβλήτων θα χρειαστεί εδαφική διάθεση. Αν στόχος είναι η παραγωγή «κομπόστ», περίπου το 50% κ.β. του εισερχόμενου ρεύματος αποβλήτων θα πρέπει να διατεθεί σε ΧΥΤΑ στην (πιθανή) περίπτωση που δεν εξασφαλιστεί μακροπρόθεσμη πρόσβαση σε κάποια αγορά. Τέλος, οι ΜΒΕ που αποσκοπούν κυρίως στην παραγωγή RDF έχουν υπολειμματικό ρεύμα για εδαφική διάθεση που ανέρχεται σε περίπου 20% κ.β. των εισερχόμενων ΑΣΑ. Το ποσοστό αυτό αυξάνει στο 70% στην περίπτωση που δεν εξασφαλιστούν αγορές για το RDF, οπότε αναγκαστικά και αυτό διατίθεται εδαφικά. Αν η ΜΒΕ συνοδεύεται από δική της μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης του RDF, τότε παράγονται τέφρες που και αυτές με τη σειρά τους απαιτούν εξειδικευμένη εδαφική διάθεση.

Θόρυβος

Καθώς η επεξεργασία των αποβλήτων λαμβάνει χώρα σε κλειστά κτίρια και οι σύγχρονες τεχνολογίες έχουν σχετικά χαμηλά επίπεδα θορύβου, δεν αναμένονται σημαντικά προβλήματα θορύβου. Επιπλέον, οι ΜΒΕ κατασκευάζονται συνήθως στο ΧΥΤΑ ή σε βιομηχανικές περιοχές όπου υπάρχουν και άλλες οχλούσες εγκαταστάσεις, και όχι κοντά σε κατοικίες. Ίσως η μεγαλύτερη πηγή όχλησης και

θορύβου να προέρχεται από την κυκλοφορία των απορριμματοφόρων οχημάτων που προσεγγίζουν τη ΜΒΕ.

Παθογόνοι μικροοργανισμοί

Από το μηχανικό μέρος της επεξεργασίας δεν παράγονται προϊόντα για άμεση χρήση ή εφαρμογή στο έδαφος. Συνεπώς, ο κίνδυνος επαφής με παθογόνα αφορά τους εργαζομένους στη μονάδα, για τους οποίους θα πρέπει να λαμβάνονται όλα τα ενδεικνυόμενα μέτρα προστασίας (π.χ. προστασία από αιχμηρά αντικείμενα, χρήση μάσκας κλπ), όπως και για όλους τους εργαζομένους στη συλλογή, επεξεργασία και διάθεση αποβλήτων.

Ένα θέμα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και αφορά και τον γενικό πληθυσμό στη γειτνίαση με τη μονάδα είναι η πιθανή εκπομπή βιοαερολυμάτων, δηλ. βιολογικά ενεργών συστατικών που αιωρούνται στον αέρα με τη μορφή σκόνης και μπορεί να περιλαμβάνουν μύκητες και τα σπόριά τους, βακτήρια, ακτινομύκητες, ενδοτοξίνες και μυκοτοξίνες. Τα βιοαερολύματα συνδέονται με αλλεργικές παθήσεις (αλλεργική ρινίτιδα, άσθμα, βρογχίτιδα, χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια) και άλλες βλάβες του αναπνευστικού συστήματος, ενώ θα μπορούσαν να αποβούν θανατηφόρα για ανοσοκατεσταλμένα άτομα. Οι περισσότερες μελέτες για τα βιοαερολύματα αφορούν μονάδες κομποστοποίησης και έχουν εστιάσει στη μέτρηση της συγκέντρωσης και διασποράς τους. Ωστόσο, δεν έχει βρεθεί μέχρι σήμερα επιδημιολογική σύνδεση με την κατάσταση υγείας των εργαζομένων (ούτε βέβαια του γειτονικού γενικού πληθυσμού) ενώ δεν υπάρχουν σχετικά στοιχεία και έρευνες για μονάδες ΜΒΕ.

5. ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα εξετάζονται τα ισοζύγια μάζας, ρύπων και ενέργειας των διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας απορριμμάτων.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει διάφορες μελέτες σχετικά με τις μεθόδους διάθεσης των ΑΣΑ όπως οι μέθοδοι θερμικής ή βιολογικής επεξεργασίας. Παρόλα αυτά λίγες από αυτές παρέχουν στοιχεία που επιτρέπουν την απευθείας σύγκριση των μεθόδων αυτών με γνώμονα την περιβαλλοντική βελτιστοποίηση. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι γι' αυτό όπως ότι:

- Οι διάφορες έρευνες χρησιμοποιούν απορρίμματα με διαφορετικές συνθέσεις.
- Οι περισσότερες διεργασίες πυρόλυσης και αεριοποίησης λειτουργούν μόνο σε πιλοτικό στάδιο.
- Χρησιμοποιούνται διαφορετικά συστήματα καθαρισμού των αερίων.
- Οι διαχειριστές είναι επιφυλακτικοί στην δημοσιοποίηση των διαφόρων παραμέτρων των εγκαταστάσεών τους.

5.1 ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ

5.1.1 Αποτέφρωση

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται το ισοζύγιο των υλικών κατά την αποτέφρωση.



Σχήμα 5.1 : Κατανομή μάζας κατά την αποτέφρωση [Reimann, 2006].

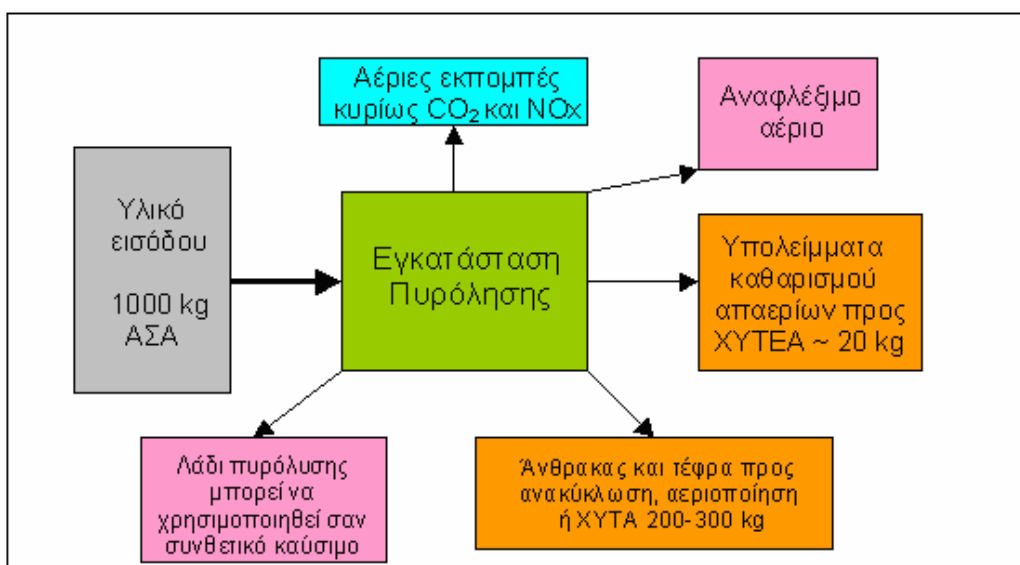
Αρχικά θεωρούμε ότι η σύνθεση των αποβλήτων είναι περίπου 25% νερό, 20% ανόργανο κλάσμα και 55% οργανικό κλάσμα. Μετά την αποτέφρωση έχουμε στον αποτεφρωτή την στάχτη η οποία ανέρχεται στο 15-28 % της αρχικής μάζας με μια μέση τιμή περίπου στο 20%, τα καθαρά αέρια που απελευθερώνονται μετά τον καθαρισμό τους και τα υπολείμματα τα οποία κατακρατούνται από τα συστήματα ελέγχου των αερίων και τα οποία φτάνουν σε ποσοστό το 3 – 8 %. Η στάχτη πρέπει να μεταφερθεί και να διατεθεί με ασφάλεια σε ειδικούς χώρους υγειονομικής ταφής ενώ εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οικοδομικό υλικό σε δρόμους και κτίρια [Reimann, 2006].

5.1.2 Πυρόλυση

Η πυρολυτική μετατροπή των απορριμμάτων έχει σαν αποτέλεσμα μια ποικιλία προϊόντων η σύνθεση των οποίων καθορίζεται από τη σύνθεση του αρχικού μίγματος, τις παραμέτρους της θερμότητας, την πυρολυτική θερμοκρασία και το χρόνο αντίδρασης και παραμονής.

Τα τρία βασικά κλάσματα που παράγονται από την διαδικασία της πυρόλυσης είναι:

1. Ένα ρεύμα αερίων, που περιέχει βασικά υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, και διάφορα άλλα αέρια ανάλογα με τα οργανικά χαρακτηριστικά των ΑΣΑ.
2. Ένα υγρό κλάσμα, που αποτελείται από ένα ρεύμα πίσσας ή λαδιού που περιέχει ακετικό οξύ, ακετόνη, μεθανόλη και σύμπλεγμα οξυγονωμένων υδατανθράκων. Με περαιτέρω επεξεργασία, το υγρό κλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν συνθετικό καύσιμο.
3. Ένα υπόλειμμα, το οποίο αποτελείται από σχεδόν καθαρό άνθρακα και όποιο αδρανές υλικό υπήρχε αρχικά στα στερεά απορρίμματα (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2 : Κατανομή μάζας κατά την πυρόλυση.

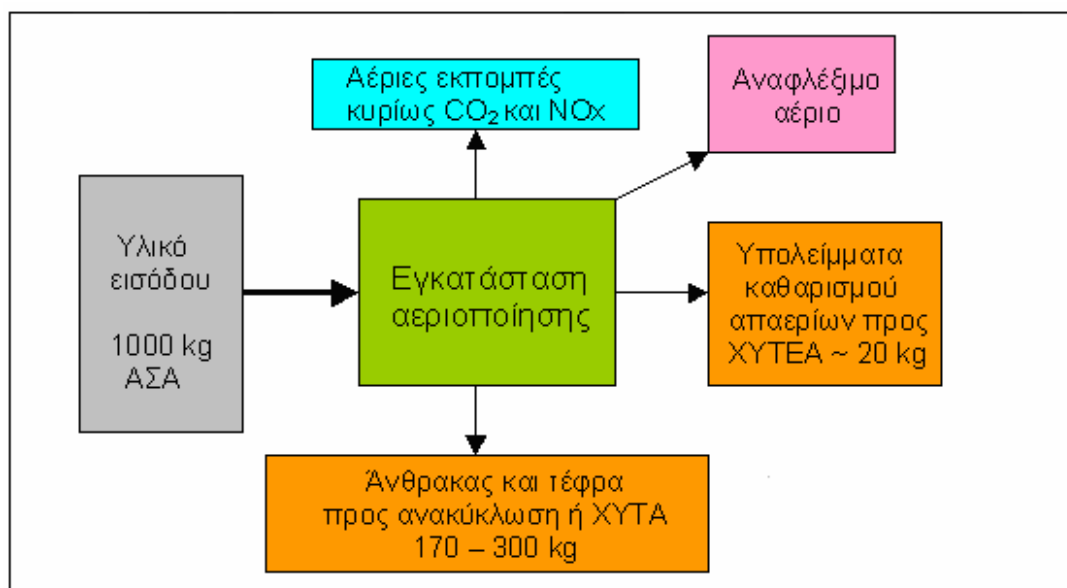
Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται τα ποσοστά των διαφόρων κλασμάτων ανάλογα με τη θερμοκρασία της διαδικασίας [Ανδρεαδάκης Α., 2001].

Πίνακας 5.1 : Ποσοστά κλασμάτων πυρόλησης

Θερμοκρασία [°C]	Απορρίμματα [kg]	Αέρια [kg]	Οξέα και Πίτσες [kg]	Υπόλειμμα [kg]	Τελική μάζα [kg]
480	1000	120.33	610.08	240.71	980.12
650	1000	180.64	590.18	210.80	990.62
800	1000	230.69	590.67	170.24	1000.59
900	1000	240.36	580.70	170.67	1000.73

5.1.3 Αεριοποίηση

Με βάση τα στοιχεία από τις εγκαταστάσεις αεριοποίησης το στερεό υπόλειμμα που παραμένει στον κλίβανο με μορφή άνθρακα και καθιζάνουσας τέφρας κυμαίνεται από 17 -30%, τα υπολείμματα από τα συστήματα καθαρισμού των αερίων ανέρχονται στο 2% ενώ έχουμε και την παραγωγή αερίου καθώς και απελευθέρωση αερίων εκπομπών κυρίως CO₂ και NO_x (Σχήμα 5.3).

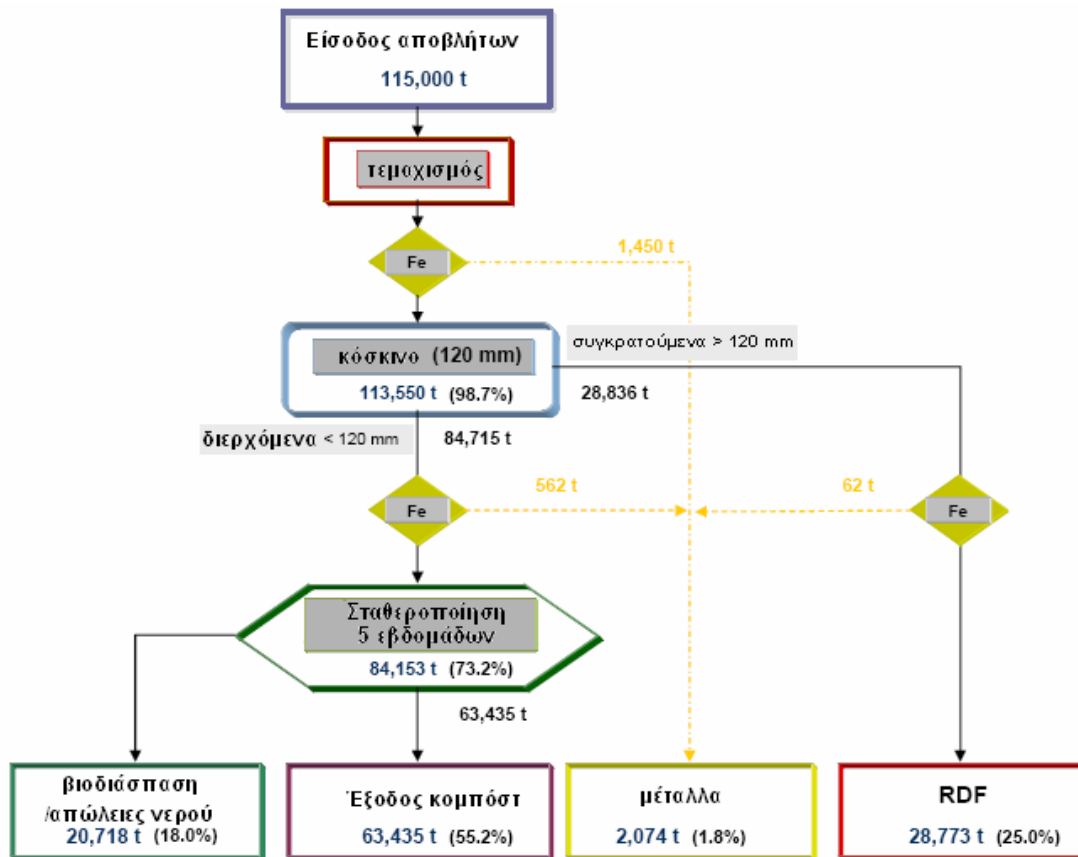


Σχήμα 5.3 : Κατανομή μάζας κατά την αεριοποίηση.

5.1.4 Μηχανική – βιολογική επεξεργασία

Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται το ισοζύγιο μάζας των απορριμμάτων κατά τη μηχανική και βιολογική επεξεργασία τους όπου λαμβάνει χώρα διαδοχικά ο τεμαχισμός των υλικών, το κοσκίνισμά τους και η βιοσταθεροποίησή τους για 5 εβδομάδες. Παρατηρούμε λοιπόν ότι μετά τη διαλογή έχουμε ανάκτηση υλικών (μετάλλων, RDF) που μπορούν να

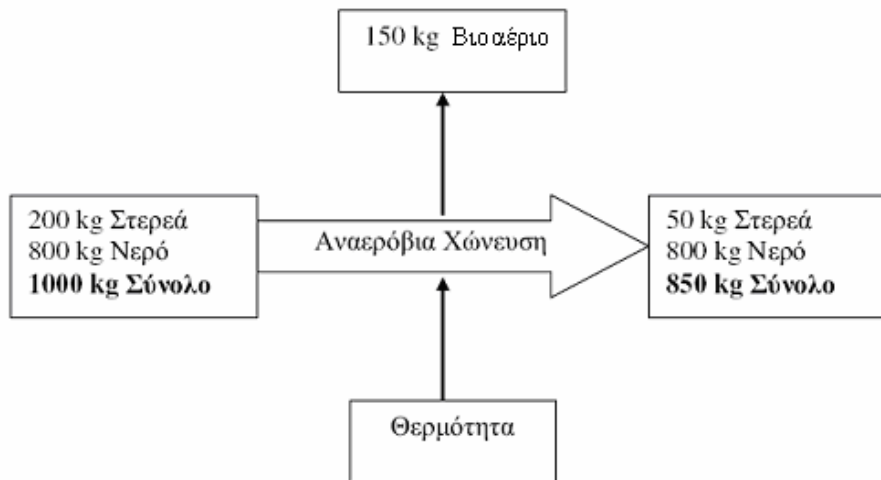
χρησιμοποιηθούν για άλλες χρήσεις σε ποσοστό 26,8% ενώ έπειτα από τη σταθεροποίηση των αποβλήτων το 55,2% της αρχικής μάζας έχει μετατραπεί σε κομπόστ, ενώ επιτυγχάνεται και μείωση του όγκου των απορριμμάτων κατά 18%.



Σχήμα 5.4 : Κατανομή μάζας κατά τη μηχανική- βιολογική επεξεργασία [Organic Resource Agency, 2005].

5.1.5. Αναερόβια χώνευση

Κατά την αναερόβια χώνευση ένα τυπικό ισοζύγιο μάζας φαίνεται στο Σχήμα 5.5 που ακολουθεί όπου μετά την διαδικασία το υπόλειμμα ανέρχεται σε ποσοστό 25% ενώ το 75 % των στερεών μετατρέπεται σε βιοαέριο.

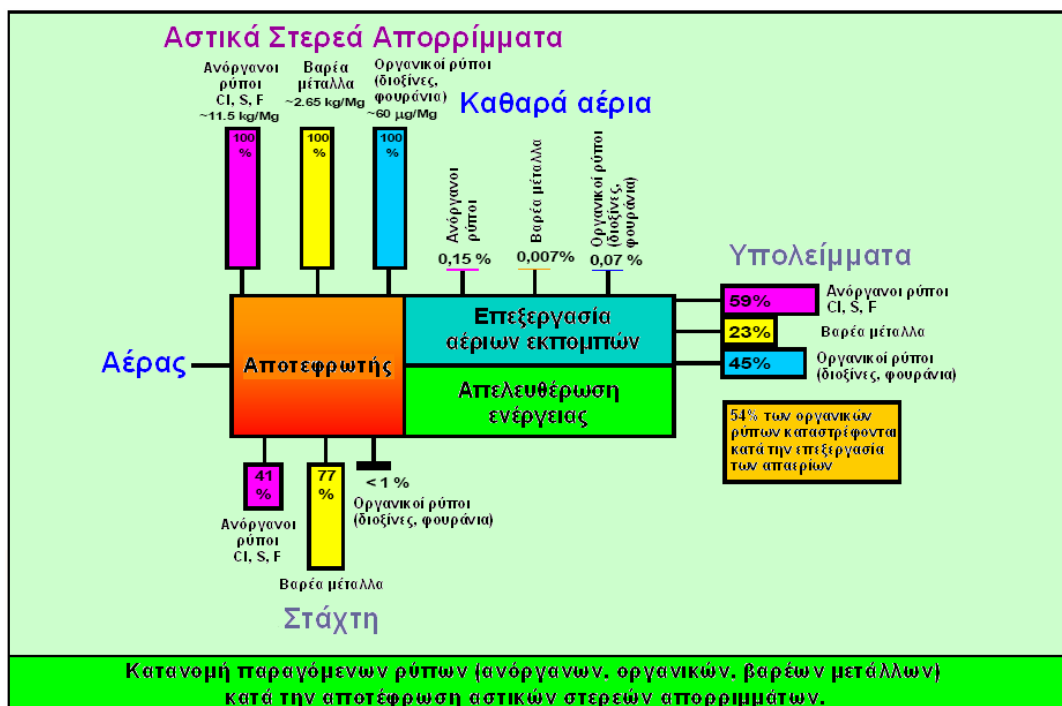


Σχήμα 5.5 : Κατανομή μάζας κατά την αναερόβια χώνευση.

5.2 ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΡΥΠΩΝ

5.2.1 Αποτέφρωση

Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων των διαφόρων ρύπων κατά τη διαδικασία της καύσης. Έτσι αρχικά σε 1 Mg ΑΣΑ υπάρχουν ανάλογα με τη σύνθεσή τους περίπου 11,5 kg ανόργανων ρύπων όπως Cl, S, F, κ.α, 65 μg οργανικών ρύπων όπως διοξίνες και φουράνια καθώς και 2,65 kg βαρέων μετάλλων.



Σχήμα 5.6 : Κατανομή ρύπων κατά την αποτέφρωση [Reimann, 2006].

Μετά την αποτέφρωση στην υπολειμματική τέφρα απαντάται το 41% των ανόργανων ρύπων, δηλαδή περίπου 4,72 kg. Οι οργανικοί ρύποι στην τέφρα αντιπροσωπεύουν υπό κανονικές συνθήκες λιγότερο από το 1% της μάζας της, με τα PCDD's και PCDF's συχνά σε μη ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις.

Όσα βαρέα μέταλλα δεν φεύγουν μαζί με τα αέρια, παραμένουν στην τέφρα και το ποσοστό τους φτάνει το 77%, δηλαδή περίπου 2,04 kg [Reimann, 2006].

Η συγκράτηση του υδραργύρου από την τέφρα είναι πολύ χαμηλή (0.5%) καθώς παραμένει στους ατμούς. Για τα περισσότερα από τα υπόλοιπα βαρέα μέταλλα (Zn, Cu, Pb, Cr, Ni, Cd) έχει βρεθεί ότι τα ποσοστά τα οποία συγκρατούνται στην τέφρα είναι υψηλά, μεταξύ 60-100%, με την προϋπόθεση ότι λειτουργεί ένα αποτελεσματικό σύστημα επεξεργασίας των αερίων. Δεδομένου ότι επιτυγχάνεται μία σημαντική μείωση των στερεών κατά την καύση, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στην τέφρα είναι συνήθως υψηλότερες από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα ΑΣΑ.

Παρά το γεγονός ότι η τέφρα έχει αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, έχει βρεθεί ότι η διάθεση σε χωματερές είναι μία αποδεκτή μέθοδος διάθεσης, η οποία δεν δημιουργεί σημαντικά προβλήματα ρύπανσης λόγω διηθημάτων, ή εν πάση περιπτώσει προβλήματα ανάλογα με αυτά που δημιουργούνται από την διάθεση στερεών αποβλήτων και ιλύων σε χωματερές. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η καύση μετατρέπει τα κινητικά βαρέα μέταλλα σε πιο σταθερές μορφές, αποτρέποντας έτσι, όπως έχει αποδειχθεί από αρκετές δοκιμές, την εκτεταμένη διαφυγή της με τα στραγγίσματα. Το αρσενικό, το κάδμιο, ο χαλκός, ο υδράργυρος, το νικέλιο, ο μόλυβδος και ο ψευδάργυρος βρέθηκαν να ξεπλένονται σε ποσότητες που αντιστοιχούν σε λιγότερο από το 1% της ολικής περιεκτικότητας στην τέφρα, ενώ μεγαλύτερες τιμές παρατηρήθηκαν για το ασβέστιο και το μολυβδένιο. Δύο είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που οδηγούν στο ξέπλυμα των βαρέων μετάλλων :

- Ο πρώτος αφορά την τέφρα από καύση ιλύος και συνδέεται με τη χρήση χημικών (Fe ή Al) κατά την επεξεργασία των λυμάτων. Έχει παρατηρηθεί ότι η προσθήκη αλάτων αυξάνει σημαντικά τη διαλυτότητα των Cd, Cr, Ni και Pb και πιθανά και άλλων μετάλλων.
- Ο δεύτερος παράγοντας συνδέεται με την υιοθετούμενη μέθοδο διάθεσης σε χωματερή. Η συνδιάθεση της τέφρας με αστικά απορρίμματα μπορεί να ενισχύσει την διήθηση των βαρέων μετάλλων λόγω δημιουργίας οργανικών οξέων προερχομένων από την αναερόβια αποσύνθεση των αστικών απορριμμάτων (αν και η παραγωγή υδροθείου και η συνεπαγόμενη δημιουργία αδιάλυτων θειούχων ενώσεων των μετάλλων εν μέρει εξισορροπεί τις επιπτώσεις από τα οργανικά οξέα).

Γι' αυτό το λόγο το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο προτείνει την αναθεώρηση της Οδηγίας για τη διάθεση σε χωματερές με στόχο την αποτροπή της συνδιάθεσης και για να περιορίσει την επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα της τέφρας που διατίθεται σε χωματερές. Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα, προτείνεται η συνδιάθεση να αποφευχθεί και η τέφρα από την εγκατάσταση καύσης να διατίθεται σε χωριστή χωματερή. Στο μέλλον είναι δυνατό να εξετασθούν και κάποιες εναλλακτικές δυνατότητες. Η ανάκτηση των μετάλλων από την τέφρα με χημική επεξεργασία φαίνεται

ότι είναι αντιοικονομική, αλλά η σύντηξη της τέφρας χρησιμοποιώντας θερμότητα και τσιμέντο μπορεί να αποδειχθεί μία ελκυστική μακροπρόθεσμη λύση για τον έλεγχο των περιεχομένων βαρέων μετάλλων [Ανδρεαδάκης Α., 2001].

Στα απαέρια, μετά την επεξεργασία τους, τα ποσοστά των ανόργανων και των οργανικών ρύπων καθώς και των μετάλλων ανέρχονται σε 0,15, 0,07 και 0,007%, αντίστοιχα. Στα υπολείμματα του καθαρισμού των απαερίων απαντάται το 59% των ανόργανων ρύπων, το 45% των οργανικών ρύπων και το 23% των βαρέων μετάλλων. Όπως παρατηρούμε, κατά την επεξεργασία των απαερίων καταστρέφεται το 54% των οργανικών ρύπων που αρχικά υπήρχαν στα απορρίμματα [Reimann, 2006].

5.2.2 Αεριοποίηση -Πυρόλυση

Κατά την αεριοποίηση και την πυρόλυση το παραγόμενο αέριο περιέχει ελάχιστες επικίνδυνες ενώσεις όπως $SO_2 = 20 \text{ mg/Nm}^3$, $HCl = 23 \text{ mg/Nm}^3$ και $HF = 1.3 \text{ mg/Nm}^3$. Επίσης, εκτός του αναφλέξιμου αερίου και σε εξάρτηση από τη θερμοκρασία λειτουργίας παράγονται και υπολείμματα τέφρας ή σκωρίας. Τα στερεά υπολείμματα από τη διαδικασία της αεριοποίησης είναι παρόμοια με αυτά της αποτέφρωσης και παρουσιάζουν ομοίως υψηλό ποσοστό σε τέφρα και χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα [Bilitewski, 2006b].

Είναι βασικό ότι στις διεργασίες αυτές ένας μεγάλος αριθμός ρύπων (π.χ. θείο, βαρέα μέταλλα, κα.) παραμένει στην παραγόμενη τέφρα, χωρίς να μεταφέρεται στην αέρια φάση και να επιβαρύνει την ποιότητα της ατμόσφαιρας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι το παραγόμενο αέριο χρησιμοποιείται περαιτέρω ως καύσιμο, πολλές φορές περιορίζει τον αριθμό και το είδος των αναγκαίων τεχνολογιών αντιρρύπανσης.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι η παραγόμενη τέφρα, από όλες τις μεθόδους θερμικής διεργασίας, θεωρείται επικίνδυνο απόβλητο (λόγω της περιεκτικότητάς της σε βαρέα μέταλλα, διοξίνες και άλλους τοξικούς ρύπους), το οποίο χρήζει κατάλληλης επεξεργασίας πριν την τελική του διάθεση.

Στον Πίνακα 5.2 δίνονται οι αέριες εκπομπές από την καύση και την αεριοποίηση απορριμμάτων (σε κιλά ρύπων ετησίως) και γίνεται μια σύγκριση μεταξύ τους [Ψωμάς Σ., 2005].

Πίνακας 5.2 : Αέριες εκπομπές από την καύση και την αεριοποίηση απορριμμάτων (σε κιλά ρύπων ετησίως).

Ρύπος	Καύση	Αεριοποίηση	% διαφορά αεριοποίησης σε σχέση με καύση
Διοξίνες / φουράνια	0,027	0,050	+85%
Υδράργυρος	92,6	92,6	0%
Μόλυβδος	50	46,8	-6,4%
Διοξείδιο του θείου	57.335	53.524	-6,7%
Οξείδια αζώτου	40.930	52.364	+28%
Μονοξείδιο του άνθρακα	7.673	4.955	-35,4%

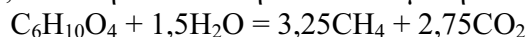
5.2.3 Εκπομπές Μηχανικής -Βιολογικής επεξεργασίας

Σε μια εγκατάσταση μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας με παραγωγή RDF (MBT/RDF) ένας τόνος απορριμμάτων παράγει περίπου 130 m³ διοξειδίου του άνθρακα μέσω της διαδικασίας λιπασματοποίησης. Επίσης παράγεται και κάποια ποσότητα κατά την καύση του RDF αλλά αυτή η ποσότητα έχει ουδέτερο αποτέλεσμα στην ατμόσφαιρα γιατί παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία διαφορετικά θα παραγόταν με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, τα οποία επίσης θα δημιουργούσαν διοξείδιο. Συνολικά, μια εγκατάσταση MBT/RDF παράγει περίπου 130 m³ διοξειδίου του άνθρακα/τόνο απορριμμάτων. Στην περίπτωση που αυτός ο τόνος απορριμμάτων καταλήξει σε ένα ΧΥΤΑ η εικόνα είναι πολύ διαφορετική. Εκεί, θα διασπαστεί από τους αναερόβιους μικροοργανισμούς και θα παραχθούν 120 m³ μεθανίου και 80 m³ διοξειδίου του άνθρακα. Σε έναν σύμφωνα με όλες τις νόμιμες προδιαγραφές ΧΥΤΑ μπορεί να γίνει συλλογή της μισής ποσότητας μεθανίου και να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, οι συνολικές εκπομπές από το ΧΥΤΑ ανέρχονται σε 60 m³ μεθανίου και 80 m³ διοξειδίου του άνθρακα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μεθάνιο είναι 21 φορές πιο επιβλαβές από το CO₂, οι συνολικές εκπομπές από το ΧΥΤΑ ανέρχονται σε 1300 m³ ισοδύναμου CO₂ που είναι δεκαπλάσιο των εκπομπών μιας εγκατάστασης MBT/RDF.

5.2.4 Εκπομπές ΧΥΤΑ

Οι κυριότερες αέριες εκπομπές από ένα χώρο υγειονομικής ταφής είναι το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς και οι μη μεθανογενείς οργανικές ενώσεις NMOC (Non-Methane Organic Compounds) που περιέχουν σε ποσοστό 39% πτητικές οργανικές ενώσεις VOC και οι οποίες είναι υπεύθυνες για το νέφος και τη δημιουργία όζοντος.

Η αναερόβια αποσύνθεση των ΑΣΑ στους ΧΥΤΑ οδηγεί στην παραγωγή μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, κατά την ακόλουθη απλουστευμένη αντίδραση:



Στους ΧΥΤΑ με σύστημα συλλογής του βιοαερίου υπολογίζεται ότι μπορεί να συλλεχθεί το 60% του παραγόμενου βιοαερίου. Το βιοαέριο των ΧΥΤΑ περιέχει γενικά περίπου 54% μεθάνιο και 46% διοξείδιο του άνθρακα. Υποθέτοντας ότι το 25% των ΑΣΑ που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ είναι βιοδιασπάσιμα (τροφές, φύλλα, απορρίμματα, ΔΞΥΛ) το μέγιστο ποσό του φυσικού αερίου που μπορεί να παραχθεί από τη βιοδιάσπαση έχει υπολογιστεί στα 130 Nm³ / μετρικό τόνο. Η μέγιστη ικανότητα των ΑΣΑ σε ένα ΧΥΤΑ να παράγουν μεθάνιο αναφέρεται ότι είναι 62 m³ μεθανίου ανά τόνο [Franklin]. Λόγω του ότι το μεθάνιο είναι 21 φορές πιο δραστικό από το CO₂ έχει υπολογιστεί ότι οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ από το χώρο ενός ΧΥΤΑ είναι κατά 1.3 τόνους ανά τόνο ΑΣΑ υψηλότερες από τις εκπομπές από μια εγκατάσταση αποτέφρωσης με ανάκτηση ενέργειας.

Στον Πίνακα 5.3 φαίνεται η τυπική σύνθεση του βιοαερίου που παράγεται από την ταφή ΑΣΑ και στον οποίο υπάρχουν και οι NMOC, πολλές από τις οποίες είναι καρκινογόνες όπως το βενζένιο, το βινυλοχλωρίδιο, το τετραχλωροεθυλένιο κ.α.

Αυτά μπορεί να δημιουργηθούν είτε από την παράνομη απόρριψη επικίνδυνων αποβλήτων, είτε από την αναερόβια αποδόμηση άλλων χημικών που υπάρχουν στο ΧΥΤΑ όπως γίνεται στο σχηματισμό του βινυλοχλωριδίου από χλωριωμένα οργανικά απόβλητα

Πίνακας 5.3 : Τυπική σύνθεση βιοαερίου από ΧΥΤΑ.

Χημικό	% Ξηρού όγκου	NMOC	ppmv
Μεθάνιο	45 - 60	Τολουένιο	35
Διοξείδιο του άνθρακα	40 - 55	Διχλωρομεθάνιο	25
Άζωτο	2 - 5	Εθυλβενζένιο	7
Αμμωνία	0,1 – 1,0	Ακετόνη	7
Θείο	0,01 – 1,0	Βινυλακετάτη	6
Οξυγόνο	0,1 – 1,0	Τετραχλωροεθυλένιο	5
Μονοξείδιο του άνθρακα	0 – 0,2	Βινυλοχλωρίδιο	4
Υδρογόνο	0 – 0,2	Μεθυλεθυλική κετόνη	3,1
NMOC	0,01 – 1,0	Ξυλένιο	2,6
		Διχλωροεθυλένιο	2,8
		Τριχλωροεθυλένιο	2,1
		Βενζένιο	2,1

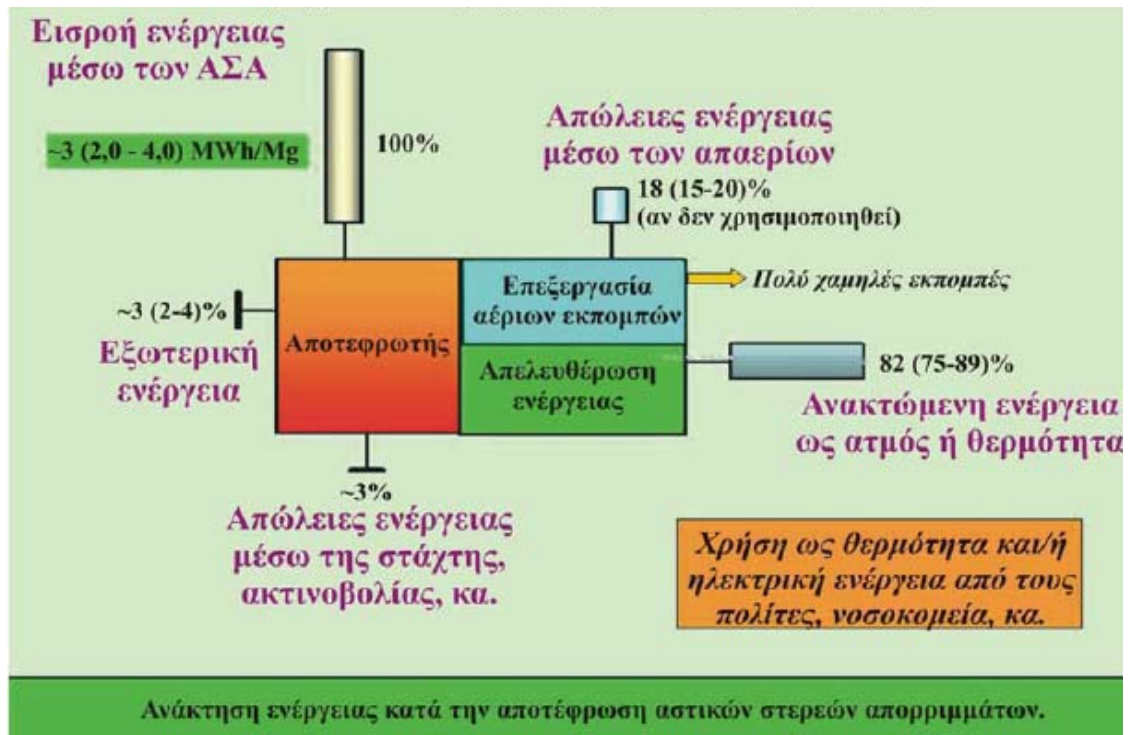
Όταν το βιοαέριο καίγεται ή ακόμα και όταν χρησιμοποιείται για ανάκτηση ενέργειας είναι πιθανό να σχηματιστούν διοξίνες και φουράνια. Είναι γνωστό ότι η ύπαρξη σιδήρου στη φλόγα μπορεί να δράσει καταλυτικά στο σχηματισμό των διοξινών.

Επίσης, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και την επιβάρυνση που δημιουργείται από τα οχήματα μεταφοράς των απορριμμάτων από και προς τους ΧΥΤΑ. Σύμφωνα με υπολογισμούς αυτή φτάνει σε σωματιδιακές εκπομπές τα 0,37 gr/km ενώ καθόλου ευκαταφρόνητη δεν μπορεί να θεωρηθεί και η δημιουργία διοξινών από την καύση του πετρελαίου των οχημάτων. Οι εκπομπές αυτών των διοξινών μπορεί να φτάσουν, σύμφωνα με μια Νορβηγική έρευνα τα 4,9 ng TEQ/ km [Lauber, Morris, Ulloa, Hasselriis, 2006].

5.3 ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.3.1 Αποτέφρωση

Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η ανάκτηση της ενέργειας είτε ως ατμός είτε ως θερμότητα. Θεωρούμε ότι η αρχική ενέργεια των απορριμμάτων είναι περίπου 3 MWh/Mg ή αλλιώς 10,8 GJ/Mg ενώ απαιτείται και ένα πρόσθετο ποσό εξωτερικής ενέργειας της τάξης του 3%. Η συνολική ανακτώμενη ενέργεια είναι 82%, ενώ το υπόλοιπο 18 % που συγκεντρώνεται στα απαέρια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω παραγωγή ενέργειας.



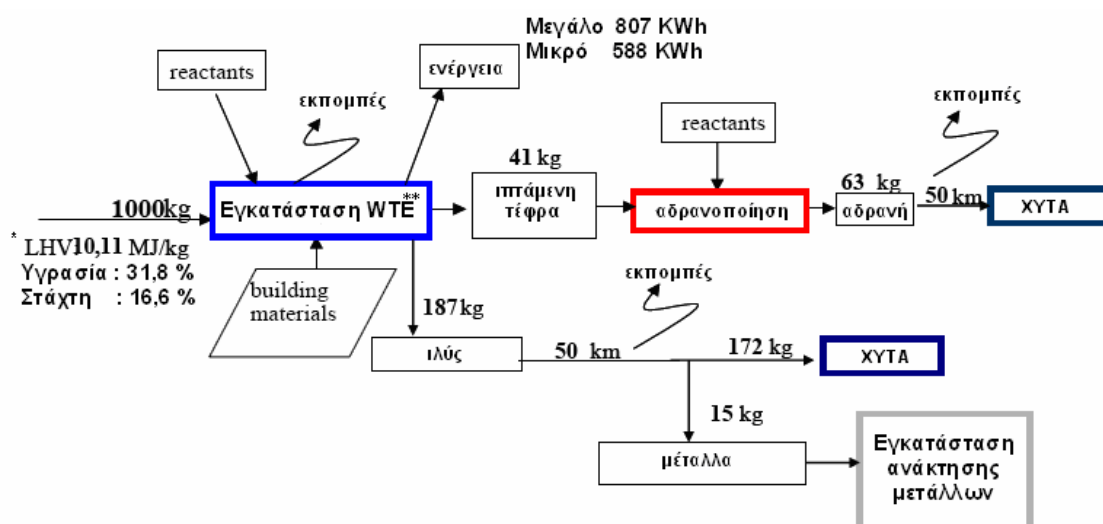
Σχήμα 5.7 :Κατανομή ενέργειας κατά την αποτέφρωση [Reimann, 2006].

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η μέση κατανομή της ενέργειας με συγκεκριμένα δεδομένα και ποσοστά της συνολικής εισερχόμενης ενέργειας, με χρήση της εξίσωσης υπολογισμού της θερμικής αξίας. Η συνολική είσοδος της ενέργειας είναι 2,852 MWh abs / Mg, η θερμική αξία των απορριμμάτων 2,774 MWh abs / Mg, και η συνολική εισαγόμενη ενέργεια 0,078 MWh abs / Mg. Η θερμότητα από την καύση των απορριμμάτων αποτελεί το 30.8% της συνολικής, η ηλεκτρική ενέργεια που εξάγεται ανέρχεται στο 10,6 % ενώ η περίσσεια ενέργειας είναι της τάξης του 30% [Reimann, 2006].



Σχήμα 5.8 : Μέση κατανομή της ενέργειας κατά την αποτέφρωση [Reimann, 2006].

Η κατανομή της ενέργειας και της μάζας γίνεται βάση του ακόλουθου σχήματος 5.9. Έτσι ισχύει ότι από μια μεγάλη εγκατάσταση (600.000t/yr) μπορεί να παραχθεί ενέργεια που φτάνει τα 807 KWh /Mg ή 28,7 % ενώ από μια μικρότερη εγκατάσταση (100.000t/yr) μπορεί να παραχθεί ενέργεια ίση με 588 KWh /Mg ή 20,9%.



Σχήμα 5.9 : Κατανομή ενέργειας [Consonni, Giugliano, Grosso και Rigamonti, 2006].

*LHV : Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (Low Heating Value)

**WTE : Απορρίμματα σε ενέργεια (Waste To Energy)

Γενικά, σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από ΑΣΑ μπορεί να φτάσει σε σύγχρονες εγκαταστάσεις αποτέφρωσης το 30%.

5.3.2 Πυρόλυση

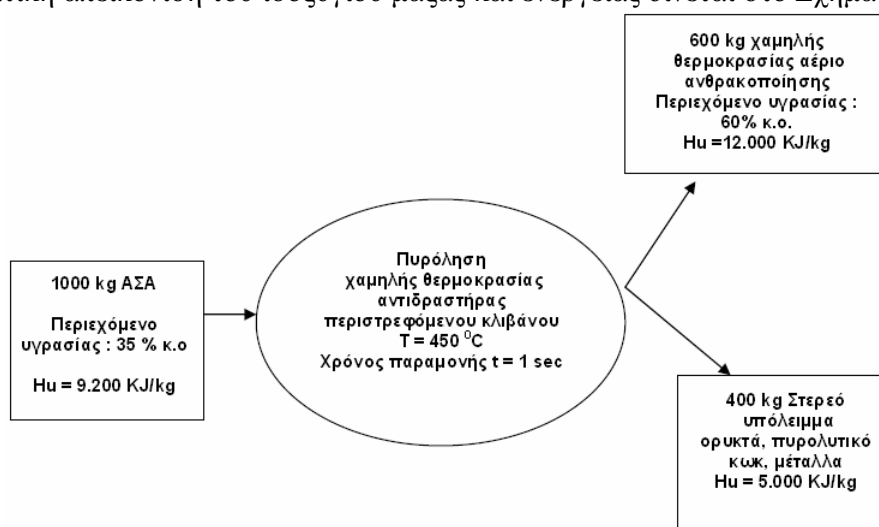
Όπως έχουμε ήδη αναφέρει κατά την πυρόλυση η αναλογία των κλασμάτων εξαρτάται σημαντικά από τη σύσταση των εισερχομένων αποβλήτων, τη θερμοκρασία στην οποία διεξάγεται η πυρόλυση και την πίεση στον αντιδραστήρα. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει αισθητά το στερεό υπόλειμμα, ελαττώνει το υγρό κλάσμα και αυξάνει τα αέρια προϊόντα. Το ενεργειακό περιεχόμενο του υγρού κλάσματος εκτιμάται γύρω στα 20,3 MJ/ kg, ενώ του αερίου – σε συνθήκες μέγιστης παραγωγής – στα 25,7 MJ / Nm³ [Φάττα Δ. 2006].

Στον Πίνακα 5.4 που ακολουθεί φαίνεται η % κατά όγκο σύνθεση των αερίων της πυρόλυσης σε σχέση με την θερμοκρασία [Ανδρεαδάκης Α., 2001].

Πίνακας 5.4 : % κατά όγκο σύνθεση των αερίων της πυρόλυσης σε σχέση με την θερμοκρασία.

Αέρια	500°C	650°C	800°C	900°C
H	5.56	16.58	28.55	32.48
CH ₄	12.43	15.91	13.73	10.45
CO	33.50	30.49	34.12	35.25
CO ₂	44.77	31.78	20.59	18.31
C ₂ H ₄	0.45	2.18	2.24	2.43
C ₂ H ₆	3.03	3.06	0.77	1.07
Σύνολο	99.74	100.0	100.00	99.99

Η σχηματική απεικόνιση του ισοζυγίου μάζας και ενέργειας δίνεται στο Σχήμα 5.10.



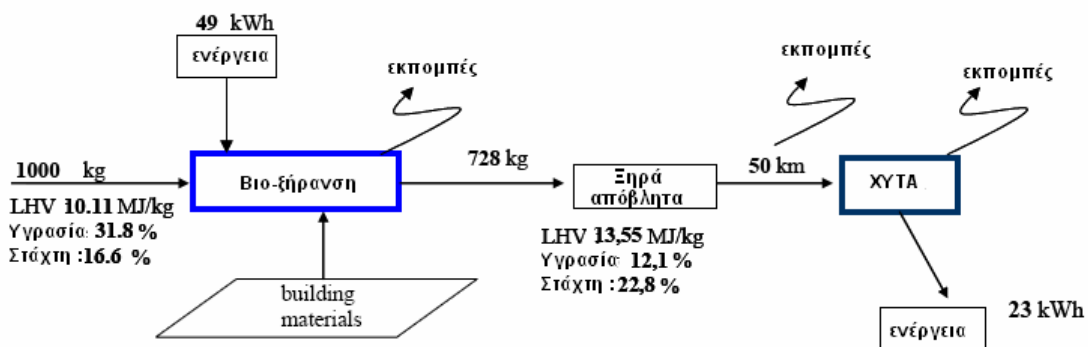
Σχήμα 5.10 : Κατανομή ενέργειας κατά την πυρόλυση [Bilitewski 2006b].

5.3.3 Αεριοποίηση

Οι εγκαταστάσεις αεριοποίησης μπορούν να λειτουργήσουν είτε με τροφοδοσία αέρα είτε με τροφοδοσία καθαρού οξυγόνου. Στην περίπτωση που υπάρχει τροφοδοσία με αέρα, λόγω της παρουσίας του ατμοσφαιρικού αζώτου, η θερμογόνος δύναμη του αέριου προϊόντος είναι χαμηλή και κυμαίνεται γύρω στα 4-6 MJ / Nm³. Η δε τυπική σύστασή του είναι: 10% CO₂, 20% CO, 15% H₂, 2% CH₄ και 53% N₂. Στην περίπτωση που η τροφοδοσία είναι καθαρό οξυγόνο, το ενεργειακό περιεχόμενο του αέριου προϊόντος ανέρχεται στα 9 - 10 MJ / Nm³. Η δε τυπική σύστασή του είναι: 14% CO₂, 50% CO, 30% H₂, 4% CH₄, 1% C_xH_y και 1% N₂ [Φάττα Δ., 2006].

5.3.4 ΧΥΤΑ

Στο Σχήμα 5.11 δίνεται το ισοζύγιο μάζας για την διάθεση των απορριμμάτων σε ΧΥΤΑ μετά την ξήρανσή τους και παρατηρούμε ότι στον ΧΥΤΑ καταλήγει το 78,2% της αρχικής μάζας των απορριμμάτων ενώ η ενέργεια που παράγεται είναι μόλις 23 KWh /Mg αποβλήτων.

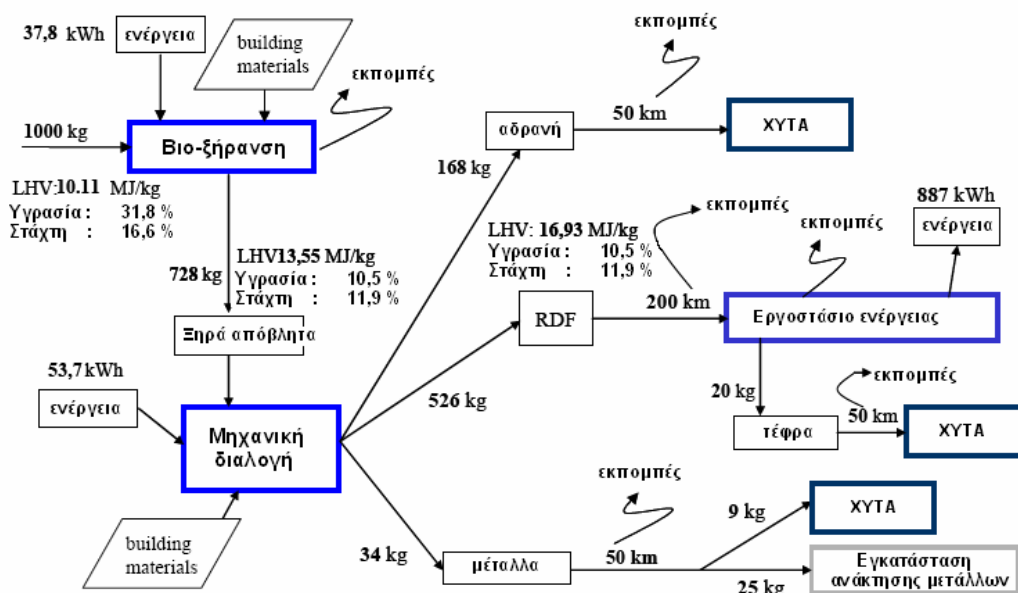


Σχήμα 5.11 : Κατανομή ενέργειας κατά την απόθεση σε ΧΥΤΑ [Consonni, Giugliano, Grosso και Rigamonti, 2006].

Σε ένα ΧΥΤΑ με βάση την εμπειρία και τα βιβλιογραφικά δεδομένα, η παραγωγή βιοαερίου κυμαίνεται μεταξύ 160-240 m³/ton απορριμμάτων, σε μια χρονική περίοδο 10-15 ετών. Κατά τη σταθεροποίηση του χώρου ταφής, το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (σε ποσοστό από 55-60 %) και διοξείδιο του άνθρακα (σε ποσοστό από 40-45%). Τα ποσοστά και η παρουσία άλλων συστατικών εξαρτάται άμεσα από το είδος των προς διάθεση αποβλήτων και τις συνθήκες ταφής. Η δε θερμογόνος δύναμη του παραγόμενου βιοαερίου κυμαίνεται από 5.000Kcal/m³ (κατώτερη) έως 9.300Kcal/m³ (ανώτερη). Ο ρυθμός παραγωγής και η σύσταση του βιοαερίου εκτιμάται ότι σταθεροποιούνται με την πάροδο 2-3 ετών από την έναρξη λειτουργίας του χώρου.

5.3.5 Μηχανική – βιολογική επεξεργασία

Στο Σχήμα 5.12 φαίνεται το ισοζύγιο μάζας και ενέργειας κατά την επεξεργασία των απορριμμάτων σε RDF και την χρήση τους για σύγκαυση σε εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας.



Σχήμα 5.12 : Κατανομή ενέργειας –μάζας κατά τη μηχανική βιολογική επεξεργασία [Consonni, Giugliano, Grosso και Rigamonti, 2006].

Όπως παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα, με τη βιοξήρανση, επιτυγχάνεται μείωση της υγρασίας και του όγκου των απορριμμάτων κατά περίπου 30%. Μετά τη μηχανική διαλογή παίρνουμε RDF που αντιστοιχεί περίπου στο 52% της αρχικής μάζας και το οποίο περιέχει το 88% της αρχικής ενέργειας των απορριμμάτων.

5.3.6 Αναερόβια χώνευση

Κατά την αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα τη μετατροπή διαφόρων βιοδιασπώμενων οργανικών υλικών σε βιοαέριο, σε ένα μίγμα μεθανίου (50-60%) και σε διοξείδιο του άνθρακα. Η οργανική ύλη μεταβολίζεται από βακτήρια σε ένα αναερόβιο περιβάλλον και παράγεται ένα αέριο με ενεργειακό περιεχόμενο περίπου 20-40% χαμηλότερο από το αρχικό θερμικό δυναμικό. Το βιοαέριο αυτό χαρακτηρίζεται από ένα υψηλό θερμιδικό δυναμικό 16-20 MJ / Nm³ και μπορεί να μετατραπεί εύκολα σε οποιαδήποτε μορφή ενέργειας [Alibarti, Cossu, 2006].

5.4 Σύνοψη

Στον Πίνακα 5.5 που ακολουθεί γίνεται μια σύνοψη όλων των ισοζυγίων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Παρατηρούμε ότι για τις βιολογικές μεθόδους υπάρχει τεχνολογία που έχει δοκιμαστεί και μπορεί να λειτουργήσει. Από τις θερμικές διεργασίες μόνο η αποτέφρωση έχει πλήρως αποδεδειγμένη τεχνολογία ενώ η πυρόλυση και η αεριοποίηση χρήζουν περαιτέρω δοκιμών γιατί δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σε ευρεία κλίμακα. Το κόστος των βιολογικών μεθόδων είναι γενικά μικρότερο από αυτό των θερμικών διεργασιών με την αεριοποίηση να παρουσιάζεται ως η πιο ακριβή μέθοδος. Όσον αφορά την επεξεργασία των απορριμμάτων όλες οι μέθοδοι, πλην της αποτέφρωσης που μπορεί να δεχτεί όλα τα ΑΣΑ, απαιτούν τη διαλογή στην πηγή ενώ όλες είναι δυνατό να δεχτούν και υγρά ΑΣΑ. Επίσης με τη χρήση θερμικών διεργασιών

και αναερόβιας χώνευσης μπορεί να γίνει ανάκτηση ενέργειας κάτι που δεν είναι εφικτό με την κομποστοποίηση. Ακόμα με τη χρήση βιολογικών διεργασιών μπορούμε να ανακτήσουμε θρεπτικά συστατικά (P, N, K) που περιέχονται στα απορρίμματα ενώ αυτό δεν είναι δυνατό με τις θερμικές διεργασίες. Τα υπολείμματα της αποτέφρωσης και της πυρόλησης αποτελούνται κυρίως από τέφρα και μέταλλα σε ποσοστό περίπου 20-30% και διαφέρουν από αυτά της αεριοποίησης που είναι κυρίως υαλοποιημένο υπόλειμμα λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Από την κομποστοποίηση προκύπτει κομπόστ, RDF και μέταλλα ενώ από την αναερόβια χώνευση προκύπτουν 25% στερεών.

Πίνακας 5.5 : Σύνοψη τεχνολογιών για τη διαχείριση ΑΣΑ [European Environment Agency, 2002].

Σύνοψη των τεχνολογιών για τη διαχείριση των ΑΣΑ	Βιολογικές μέθοδοι		Θερμικές μέθοδοι		
	Κομποστοποίηση	Αναερόβια χώνευση	Αποτέφρωση	Πυρόληση	Αεριοποίηση
Αποδεδειγμένη τεχνολογία	Ναι	Ναι	Ναι	Μερικώς	Μερικώς
Κόστος διαχείρισης	Χαμηλό έως υψηλό	Μέσο έως υψηλό	Μέσο έως υψηλό	Μέσο έως υψηλό	Υψηλό έως πολύ υψηλό
Καταλληλότητα	Καλή	Καλή	Καλή	Μέση	Εξαρτώμενη από την τεχνολογία
Είδη ΑΣΑ	Διαχωρισμένα στην πηγή απόβλητα	Διαχωρισμένα στην πηγή απόβλητα	Όλα τα απορρίμματα	Διαχωρισμένα ξηρά απόβλητα	Διαχωρισμένα στην πηγή
Αποδοχή υγρών ΑΣΑ	Ναι	Ναι	Ναι	Πιθανό αλλά συνήθως όχι	Πιθανό αλλά συνήθως όχι
Ανάκτηση ενέργειας	Όχι	Ναι - 3.200MJ/Mg	Ναι - 2.700 MJ/Mg	Ναι - περίπου 70% της καύσης + ενέργεια που περιέχεται στα παραπροϊόντα	Ναι – όπως η καύση
Ανάκτηση θρεπτικών (kg θρεπτικών / Mg ΑΣΑ)	Ναι – 2.5 -10 kg N 0.5-1 kg P 1-2 kg K	Ναι – 4 – 4.5 kg N 0.5-1 kg P 2.5-3 kg K	Όχι	Όχι	Όχι
Υπολείμματα	50- 60% κομπόστ 25-30% RDF- μέταλλα	25% στερεά	15-28% τέφρα 3-8 % συστήματα καθαρισμού	20-30% τέφρα, σκωρία, γυαλί, μέταλλα 2% συστήματα καθαρισμού	17-30% υαλοποιημένο υπόλειμμα, μέταλλα 2% συστήματα καθαρισμού

6. ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΣΑ

6.1 Η κατάσταση στην Κρήτη

Τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα παρατηρείται μία μεγάλη ανάπτυξη των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με τη διαχείριση των στερεών απορριμμάτων. Παρόλα αυτά, δε υπάρχουν ουσιαστικές εξελίξεις σε ότι αφορά την ολοκληρωμένη διαχείριση των απορριμμάτων, δηλαδή την εισαγωγή στο σύστημα διαχείρισης, μεθόδων επεξεργασίας πριν από την ταφή για την ανάκτηση χρήσιμων υλικών και ενέργειας.

Η γνώση της ποσοτικής και ποιοτικής σύστασης των παραγόμενων ΑΣΑ είναι ιδιαίτερης σημασίας για την εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης απορριμμάτων, στο σύνολό τους. Οι ενδεχόμενες μεταβολές στην πορεία του χρόνου, περιγράφουν στην πράξη τη μεταστροφή των καταναλωτικών συνηθειών και διαμορφώνουν τις μελλοντικές τάσεις παραγωγής ΑΣΑ. Τα στοιχεία αυτά είναι ιδιαίτερης σημασίας για τη χάραξη στρατηγικής διαχείρισης αποβλήτων σε τοπικό, περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο.

Σε ότι αφορά την παραγωγή αστικών στερεών απορριμμάτων στην Κρήτη, διαθέτουμε τα πλέον επικαιροποιημένα και πρόσφατα στοιχεία βάσει δύο μελετών, που αφορούν την Περιφέρεια της Κρήτης [Γιδαράκος Ε, Ντζαμίλης Π, Χάβας Γ., 2004] και το Νομό Χανίων [Γιδαράκος Ε., Μύρκου Κ., 2006]. Αυτά τα στοιχεία αποτελούν ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στα χέρια μας, ώστε να μπορέσουμε να εξετάσουμε διάφορα σενάρια διαχείρισης και να καταλήξουμε σε αυτό που αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή για την Περιφέρεια Κρήτης.

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζεται η ετήσια παραγωγή ΑΣΑ σε όλη την περιφέρεια της Κρήτης. Από αυτόν προκύπτει ότι η συνολική ποσότητα των παραγόμενων απορριμμάτων που πρέπει να διαχειριστούμε είναι περίπου 280.000 τόνοι /έτος.

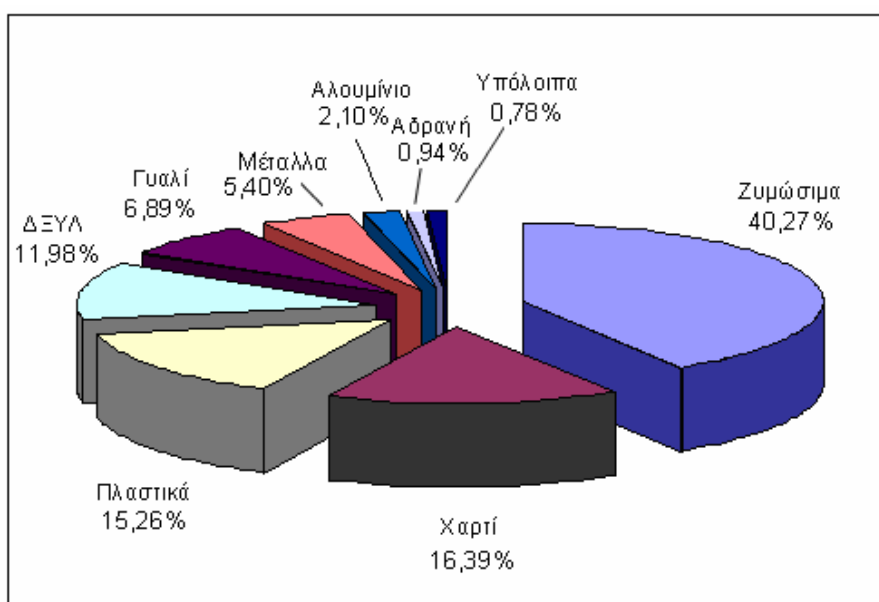
Πίνακας 6.1 Ετήσια παραγωγή απορριμμάτων Περιφέρειας Κρήτης [Γιδαράκος Ε., Ντζαμίλης Π., Χάβας Γ., 2004], [Γιδαράκος Ε., Μύρκου Κ., 2006].

Νομός	Πληθυσμός	Ημερήσια παραγωγή απορ. [kg/ημέρα]	Ετήσια παραγωγή απορ. [tn/έτος]	Μέση ημερήσια παραγωγή απορ. λόγω τουρισμού [kg/ημέρα]	Μέση ετήσια παραγωγή απορ. λόγω τουρισμού [tn/έτος]	Συνολική ημερήσια παραγωγή απορ. [kg/ημέρα]	Συνολική ετήσια παραγωγή απορ. [tn/έτος]
Ρεθύμνης	81.976	71.378	26.053	24.113	5.064	10.504	34.228
Ηρακλείου	292.489	289.522	105.676	52.936	11.117	376.704	128.471
Λασιθίου	76.319	66.301	24.200	16.670	3.501	75.499	30.471
Χανίων	150.387						85.590
ΣΥΝΟΛΟ	601.171	427.201	155.929	93.719	19.682	557.243	278.760

Η σύσταση των απορριμμάτων εμφανίζεται στον Πίνακα 6.2 ενώ σχηματικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1. Από τον πίνακα της ποσοτικής ανάλυσης διαπιστώνουμε ότι η σύσταση των απορριμμάτων του Ν. Χανίων δεν απέχει πολύ απ' αυτήν της υπόλοιπης Κρήτης πλην ελαχίστων περιπτώσεων.

Πίνακας 6.2 : Ποσοτική ανάλυση απορριμμάτων Κρήτης [Γιδαράκος Ε., Ντζαμίλης Π., Χάβας Γ., 2004, Γιδαράκος Ε., Μύρκου Κ., 2006].

Ποσοτική (%) Ανάλυση Απορριμμάτων		
	Περιφέρεια Κρήτης (Μελέτη 2004-2005)	Νομός Χανίων (Μελέτη 2006)
Αδρανή	2,67	0,94
Μέταλλα	3,51	5,40
Αλουμίνιο	1,44	2,10
Γυαλί	5,33	6,89
ΔΞΥΛ	5,24	11,98
Χαρτί	19,94	16,39
Ζυμώσιμα	39,15	40,27
Πλαστικά	16,85	15,26
Υπόλοιπα	5,87	0,78



Σχήμα 6.1 Ποσοτική ανάλυση απορριμμάτων Χανίων [Γιδαράκος Ε., Ντζαμίλης Π., Χάβας Γ., 2004, Γιδαράκος Ε., Μύρκου Κ., 2006].

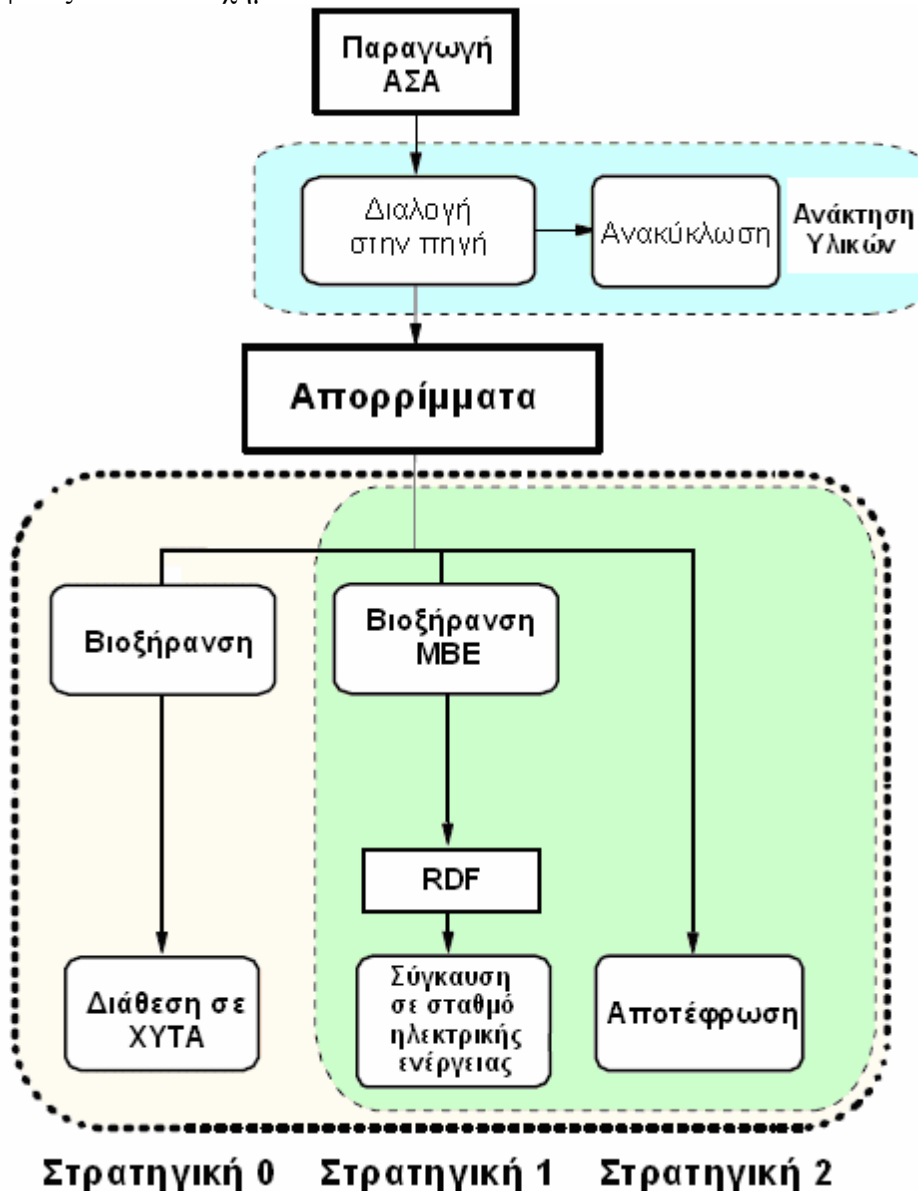
Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων είναι επίσης πολύ σημαντικά και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3. Σ' αυτόν παρατηρούμε ότι τα υψηλά ποσοστά στα κλάσματα του χαρτιού και των πλαστικών οδηγούν σε μια αρκετά υψηλή κατώτερη θερμογόνο δύναμη (ΚΘΔ), ενώ η υγρασία του συνόλου των απορριμμάτων είναι μικρότερη από 40%. Επίσης, παρατηρούμε ότι η ΚΘΔ του παραγόμενου RDF (Refuse Derived Fuel) έχει πολύ υψηλή τιμή.

Πίνακας 6.3: Ποιοτικά χαρακτηριστικά απορριμμάτων [Γιδαράκος Ε., Μύρκου Κ., 2006].

	Υγρασία %	Τέφρα %	Πτητική ύλη	Μη πτητικός άνθρακας	ΚΘΔ kJ/kg
Χαρτί	12,11	20,71	80,29	-15,23	12.096
ΔΞΥΛ	8,57	8,41	88,87	-0,43	17.849
Πλαστικά	1,19	3,05	96,17	-0,24	34.118
Ζυμώσιμα	68,86%	17,24	79,48	-48,93	2.403
Μέση τιμή	36,86	14,08	84,01	-26,57	12.271
RDF	7,32	11,16	88,20	-5,92	21.378

6.2. Στρατηγικές και σενάρια

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται τρεις στρατηγικές διαχείρισης των ΑΣΑ της Κρήτης όπως εμφανίζονται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Στρατηγικές διαχείρισης ΑΣΑ.

Η στρατηγική 0 που είναι η διάθεση του συνόλου των απορριμμάτων σε ΧΥΤΑ μετά τη βιο-ξήρανσή τους συμπεριλήφθηκε ως στρατηγική αναφοράς, καθώς δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ως λύση που συνάδει με τις Οδηγίες της Ε.Ε.

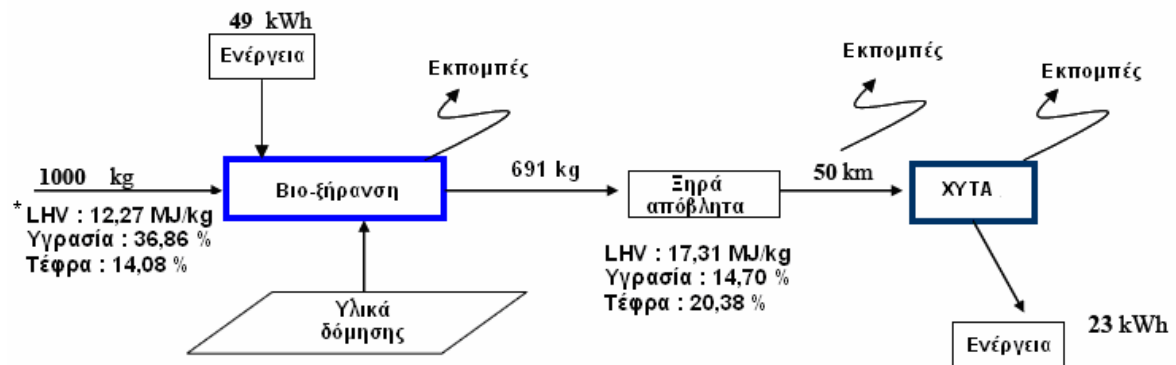
Η στρατηγική 1 αναφέρεται στη μηχανική-βιολογική επεξεργασία των ΑΣΑ και την παραγωγή από αυτά RDF, το οποίο στη συνέχεια οδηγείται για σύγκαυση σε εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η στρατηγική 2 βασίζεται στην απευθείας αποτέφρωση χωρίς καμιά προεπεξεργασία του συνόλου των ΑΣΑ, με αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.

6.2.1 Ενεργειακή αξιοποίηση

6.2.1.1 Στρατηγική 0

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται το ισοζύγιο της στρατηγικής 0. Από τα δεδομένα των απορριμμάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω παρατηρούμε ότι η υγρασία τους είναι της τάξης του 36,86%. Μετά τη βιο-ξήρανση, για την οποία απαιτείται και η χρήση κάποιας ενέργειας, επέρχεται μείωση της υγρασίας σε 14,7% και κατά συνέπεια του βάρους των απορριμμάτων κατά περίπου 30%. Στη συνέχεια, τα απορρίμματα οδηγούνται για διάθεση σε ΧΥΤΑ.

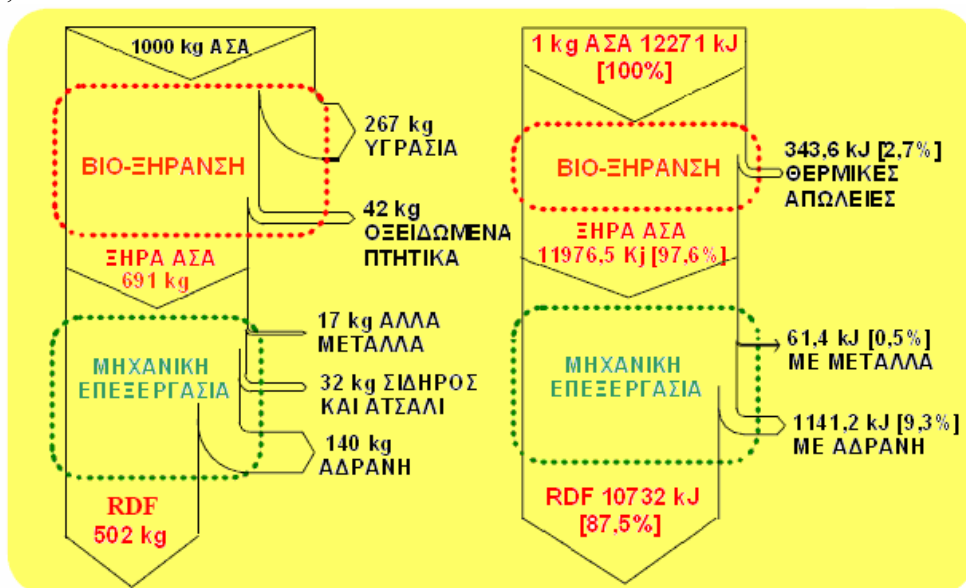


Σχήμα 6.3 : Στρατηγική 0 (διάθεση σε ΧΥΤΑ).

*LHV (Low Heating Value) : Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη

6.2.1.2 Στρατηγική 1

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας κατά την παραγωγή RDF με μηχανική-βιολογική επεξεργασία. Μετά τη βιο-ξήρανση αφαιρείται περίπου 72,4% της υγρασίας, δηλαδή 267 κιλά/τόνο ΑΣΑ καθώς και 42 κιλά/τόνο οξειδωμένων πτητικών συστατικών. Το προϊόν λοιπόν πριν τη μηχανική επεξεργασία έχει περίπου το 69,1% του αρχικού του βάρους. Από τα δεδομένα μας διαπιστώνεται ότι η περιεκτικότητα των απορριμμάτων σε μέταλλα και αλουμίνιο είναι της τάξης του 7,5%.

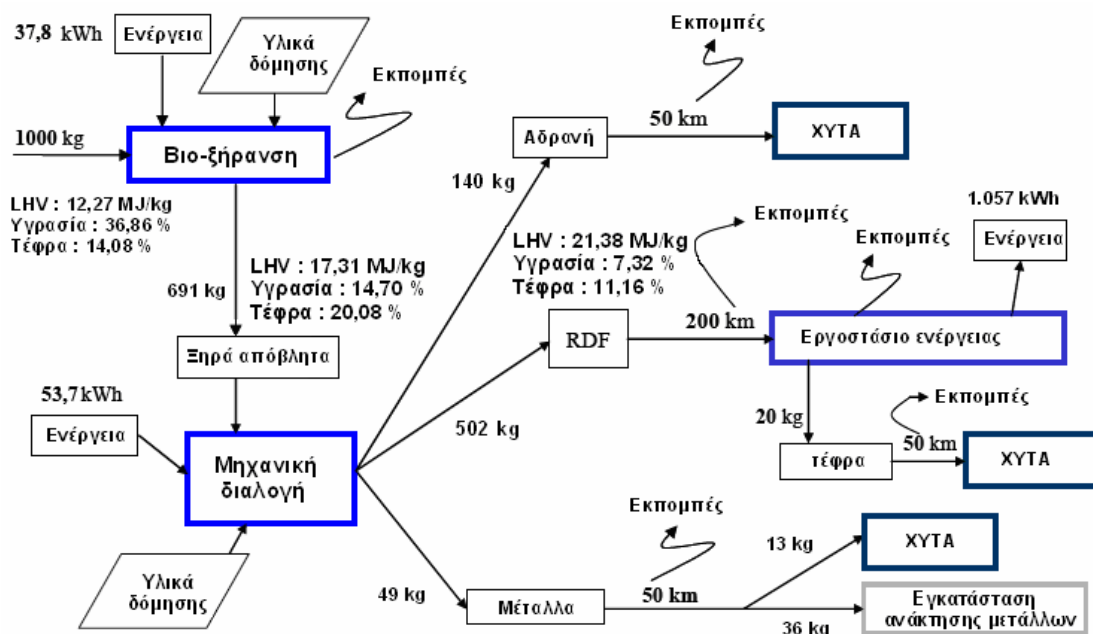


Σχήμα 6.4: Ισοζύγια μάζας και ενέργειας κατά την παραγωγή RDF [Consonni, Giugliano, 2006].

Από τη μηχανική διαλογή ανακτάται περίπου 65% των μετάλλων και περίπου 140 kg/τόνο ΑΣΑ αδρανών υλικών. Το RDF που προκύπτει έχει βάρος περίπου 50% του αρχικού.

Όσον αφορά το ισοζύγιο της ενέργειας διαπιστώνεται ότι οι θερμικές απώλειες από τη βιο-ξήρανση ανέρχονται στο 2,7% ενώ κατά τη διάρκεια της μηχανικής επεξεργασίας υφίστανται περαιτέρω απώλειες συνολικού ύψους 9,8%. Το τελικό RDF έχει πολύ υψηλό θερμικό περιεχόμενο που φτάνει τα 21,38 MJ/kg και μπορεί να οδηγηθεί για καύση και παραγωγή ενέργειας, η οποία ανέρχεται στις 1.057 kWh/τόνο ΑΣΑ. Αν αφαιρέσουμε την ενέργεια που απαιτείται για την ξήρανση και τη μηχανική διαλογή τότε, η καθαρή παραγωγή ενέργειας που προκύπτει είναι της τάξης των **965,5 kWh/τόνο ΑΣΑ**.

Στο Σχήμα 6.5 δίνεται σχηματικά η διαδρομή της στρατηγικής 1.



Σχήμα 6.5 : Στρατηγική 1 (ΜΒΕ και παραγωγή RDF).

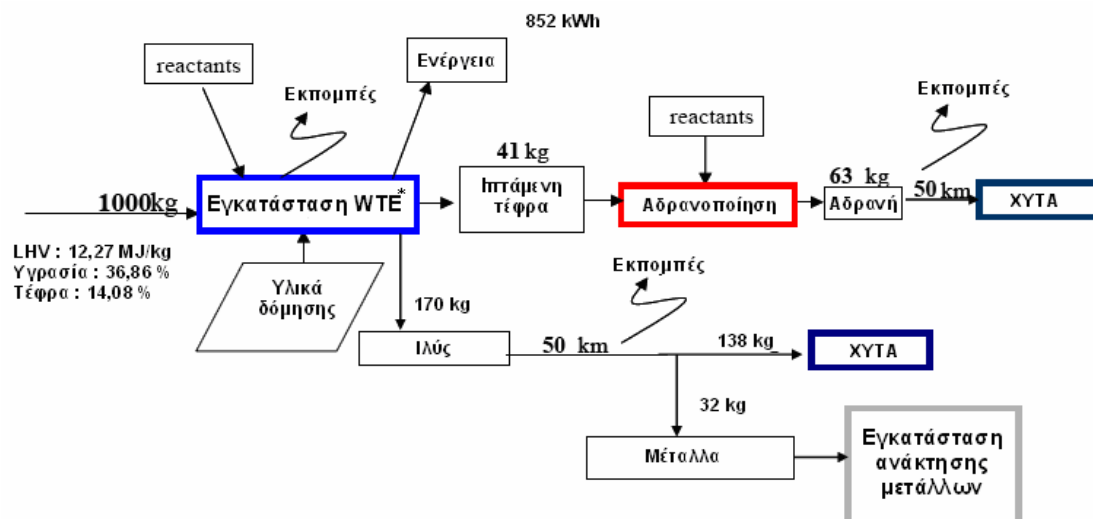
6.2.1.3 Στρατηγική 2

Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται το ισοζύγιο της στρατηγικής 2. Όπως διαπιστώνεται σ' αυτό τα απορρίμματα χωρίς επεξεργασία οδηγούνται σε μια εγκατάσταση αποτέφρωσης με παραγωγή ενέργειας.

Μετά την καύση έχουμε στον κλίβανο υπολείμματα τέφρας, η οποία είναι της τάξης του 17%. Η τέφρα περιέχει σημαντικές ποσότητες μετάλλων (περίπου 18-20%) τα οποία μπορούν να ανακτηθούν. Μετά την ανάκτηση των μετάλλων το υπόλειμμα οδηγείται προς διάθεση σε ΧΥΤΑ.

Έχουμε ακόμη τη δημιουργία ιπτάμενης τέφρας, η οποία ανέρχεται στο 4% και η οποία μετά την αδρανοποίησή της, οδηγείται επίσης σε ΧΥΤΑ.

Από την καύση παράγεται ενέργεια, η οποία λόγω του αρκετά υψηλού θερμικού δυναμικού των απορριμμάτων, που όπως είδαμε είναι 12,27 MJ/kg και με ένα ποσοστό αξιοποίησής του της τάξης του 25%, φτάνει τις **852 kWh/τόνο ΑΣΑ**.



Σχήμα 6.6 : Στρατηγική 2 (αποτέφρωση ΑΣΑ χωρίς επεξεργασία).

*WTE : Απορρίμματα σε ενέργεια (Waste To Energy)

Συνοψίζοντας αυτά που αναφέραμε παραπάνω προκύπτει ο Πίνακας 6.4. Παρατηρούμε λοιπόν ότι κατά τη μηχανική – βιολογική επεξεργασία με παραγωγή RDF παράγεται περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια, της τάξης των 90 kWh/τόνο περίπου, από ότι από την αποτέφρωση. Θα πρέπει πάντως σε κάθε περίπτωση να επισημάνουμε ότι το ποσοστό της ενεργειακής αξιοποίησης εξαρτάται άμεσα από τις τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται και από τις μεταβολές στη σύσταση των απορριμμάτων.

Πίνακας 6.4 : Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις διάφορες στρατηγικές.

	Στρατηγική 1	Στρατηγική 2
	[kWh/τόνο]	[kWh/τόνο]
Ηλεκτρική ενέργεια	965,5	852

6.2.2 Περιβαλλοντικές εκτιμήσεις

6.2.2.1 Στρατηγική 0

Σε ένα ΧΥΤΑ από ένα τόνο απορριμμάτων παράγονται κατά μέσο όρο 130 m^3 βιοαερίου το χρόνο. Από αυτά το 60% περίπου, δηλαδή 78 m^3 , είναι CH_4 . Γνωρίζοντας, ότι το ειδικό βάρος του μεθανίου ισούται με $0,7167 \text{ kg/m}^3$ υπολογίζουμε ότι από ένα ΧΥΤΑ εκπέμπονται $55,9 \text{ kg CH}_4/ \text{τόνο απορριμμάτων}$. Άρα στην περίπτωση μη συλλογής του βιοαερίου προκύπτει ότι:

$$\text{Συνολικές εκπομπές CH}_4 = 270.000 \text{ Mg απορριμμάτων} * 55,9 \text{ kg CH}_4/ \text{ Mg} \\ = 15.093 \text{ Mg/ έτος.}$$

Επειδή όπως είδαμε οι εκπομπές 1 Mg CH_4 είναι ισοδύναμες με 21 Mg CO_2 τότε προκύπτει :

$$\text{Συνολικές εκπομπές CO}_2 \text{ ισοδύναμες CH}_4 = 15.093 \text{ Mg CH}_4 / \text{έτος} * 21 \text{ Mg CO}_2/ \\ \text{Mg CH}_4 = 316.953 \text{ Mg CO}_2/ \text{έτος.}$$

Στην περίπτωση συλλογής του μεθανίου κατά 50%, που αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερες ποσοστά που μπορούν να επιτευχθούν για τη συλλογή, οι εκπομπές του CH₄/στην ατμόσφαιρα θα είναι 55,9 / 2 = 27,95 kg CH₄/ τόνο απορριμμάτων.

Άρα στην περίπτωση συλλογής του βιοαερίου προκύπτει ότι:

$$\text{Συνολικές εκπομπές CH}_4 = 270.000 \text{ Mg απορριμμάτων} * 27,95 \text{ kg CH}_4/ \text{ Mg} = 7.546,5 \text{ Mg/ έτος.}$$

Και επειδή οι εκπομπές 1 Mg CH₄ είναι ισοδύναμες με 21 Mg CO₂ προκύπτει :

$$\text{Συνολικές εκπομπές CO}_2 \text{ ισοδύναμες CH}_4 = 7.546,5 \text{ Mg CH}_4 / \text{έτος} * 21 \text{ Mg CO}_2/ \text{ Mg CH}_4 = 158.476,5 \text{ Mg CO}_2/ \text{έτος.}$$

6.2.2.2 Στρατηγική 1

Εκπομπές CH₄

Οι εκπομπές μεθανίου κατά τη βιολογική επεξεργασία των ΑΣΑ υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση [Riitta Ripatti,2006] :

$$\text{Συνολικές εκπομπές CH}_4 = (M_I \cdot EF_I \cdot 10^{-3}) - R$$

Όπου : M_I : μάζα οργανικών απορριμμάτων που επεξεργάζονται

EF_I : συντελεστής εκπομπών ανάλογα με το είδος της επεξεργασίας (Πίνακας 6.5)

R : συνολικό ποσό του μεθανίου που συλλέγεται για ενεργειακή αξιοποίηση

Πίνακας 6.5 : Συντελεστές εκπομπών CH₄ και N₂O από εγκατάσταση βιολογικής επεξεργασίας απορριμμάτων [Beck-Friis, 2001].

Τύπος βιολογικής επεξεργασίας	Συντελεστής Εκπομπών CH ₄ (g CH ₄ /kg απορριμμάτων)		Συντελεστής Εκπομπών N ₂ O (g N ₂ O /kg απορριμμάτων)	
	Σε ξηρά απόβλητα	Σε υγρά απόβλητα	Σε ξηρά απόβλητα	Σε υγρά απόβλητα
Κομποστοποίηση	10 (0,08-20)	4 (0,03-8)	0.6 (0.2 - 1.6)	0.3 (0.06 - 0.6)
Αναερόβια χώνευση	2 (0 - 20)	1 (0 - 8)	Θεωρείται αμελητέος	Θεωρείται αμελητέος

Επομένως, προκύπτει ότι, οι εκπομπές μεθανίου κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης υγρών απορριμμάτων, χωρίς την συλλογή του παραγόμενου βιοαερίου, ανέρχονται σε:

$$\text{Συνολικές εκπομπές CH}_4 = 270.000 \text{ Mg απορριμμάτων} * 4 * 10^{-3} = 1.080 \text{ Mg CH}_4/ \text{έτος}$$

Επειδή, όπως είδαμε οι εκπομπές 1 Mg CH₄ είναι ισοδύναμες με 21 Mg CO₂, τότε προκύπτει :

$$\text{Συνολικές εκπομπές CO}_2 \text{ ισοδύναμες CH}_4 = 1.080 \text{ Mg CH}_4 / \text{έτος} * 21 \text{ Mg CO}_2/ \text{ Mg CH}_4 = 22.680 \text{ Mg CO}_2/ \text{έτος}$$

Το διοξείδιο του άνθρακα που θα παραχθεί από την καύση του RDF έχει ουδέτερες επιπτώσεις γιατί παράγεται ενέργεια, για την παραγωγή της οποίας θα χρησιμοποιούσαμε ορυκτά καύσιμα τα οποία θα παρήγαν επίσης CO₂.

Εκπομπές N₂O

Οι εκπομπές μεθανίου κατά τη βιολογική επεξεργασία των ΑΣΑ υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση [Riitta Piratti,2006]:

$$\text{Συνολικές εκπομπές N}_2\text{O} = (M_I \cdot EF_I \cdot 10^{-3})$$

Όπου : M_I : μάζα οργανικών απορριμμάτων που επεξεργάζονται

EF_I : συντελεστής εκπομπών ανάλογα με το είδος της επεξεργασίας (Πίνακας 6.5)

Επομένως, οι εκπομπές N₂O κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης υγρών απορριμμάτων χωρίς την συλλογή του παραγόμενου βιοαερίου ανέρχονται σε :

$$\text{Συνολικές εκπομπές N}_2\text{O} = 270.000 \text{ Mg απορριμμάτων} \cdot 0.3 \cdot 10^{-3} = 81 \text{ Mg N}_2\text{O/έτος}$$

Επειδή όπως είδαμε οι εκπομπές 1 Mg N₂O είναι ισοδύναμες με 310 Mg CO₂ τότε προκύπτει :

$$\text{Συνολικές εκπομπές CO}_2 \text{ ισοδύναμες N}_2\text{O} = 81 \text{ Mg N}_2\text{O /έτος} \cdot 310 \text{ Mg CO}_2 / \text{Mg N}_2\text{O} = 25.110 \text{ Mg CO}_2 / \text{έτος}$$

Οι εκπομπές κατά τη διάρκεια της μηχανικής επεξεργασίας μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

Στον ακόλουθο Πίνακα 6.6 φαίνονται συνοπτικά τα παραπάνω αποτελέσματα.

Πίνακας 6.6: Ισοδύναμες εκπομπές CO₂ κατά τη βιολογική επεξεργασία.

Ρύποι	Καθαρές εκπομπές [Mg CO ₂ /έτος]
CH ₄	22.680
N ₂ O	25.110
Σύνολο	47.790

6.2.2.3 Στρατηγική 2

Θεωρούμε ότι σχεδόν το σύνολο της μάζας των απορριμμάτων της Κρήτης, δηλαδή περίπου **270.000 Mg / έτος** οδηγείται σε αποτέφρωση. Αυτά τα απορρίμματα έχουν μια ΚΘΔ ίση με **12,27 * 10⁶ kJ/Mg**.

Άρα, η συνολική θερμική δύναμη των απορριμμάτων είναι ίση με :
270.000 Mg / year * 12,27 * 10⁶ kJ/Mg = 3,31 * 10⁹ MJ/έτος.

Γνωρίζουμε επίσης ότι **1 MJ = 2,7778 * 10⁻⁴ MWh**

Άρα θεωρητικά τα απορρίμματα μπορούν να παράγουν ετησίως ενέργεια ίση με :
3,31 * 10⁹ MJ * 2,77 * 10⁻⁴ = 920.285,14 MWh.

Από την παραπάνω παραγόμενη ενέργεια, σύμφωνα με τις θερμικές μεθόδους που αναπτύξαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, μπορεί να αξιοποιηθεί το 25% και κατά συνέπεια το καθαρό ενεργειακό δυναμικό των απορριμμάτων ανέρχεται σε :

$$920.285,14 \text{ MWh} \cdot 0,25 = 230.071,29 \text{ MWh/έτος (τυπική ενεργειακή ανάγκη).}$$

Εκπομπές CO₂

Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουμε την παραγωγή 0,415 Mg CO₂ /Mg απορριμμάτων.

Άρα, στην Κρήτη η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα από την καύση του συνόλου των απορριμμάτων θα είναι ίση με :

$$0,415 \text{ Mg CO}_2 /\text{Mg} * 270.000 \text{ Mg απορριμμάτων/έτος} = 112.050 \text{ Mg CO}_2/\text{έτος}.$$

Οι μέσες εκπομπές CO₂ σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας ανέρχονται σε 690.000 mg CO₂ /kWh. Άρα, οι συνολικές εκπομπές CO₂ στην περίπτωση της αποτέφρωσης των απορριμμάτων με ενεργειακή αξιοποίηση, είναι :

$$\begin{aligned} \text{Συνολικές εκπομπές CO}_2 &= 112.050 \text{ Mg CO}_2/\text{έτος} - 230.071,29 * 10^3 \text{ kWh/έτος} * \\ 690.000 \text{ mg CO}_2 /\text{kWh} &= 112.050 \text{ Mg CO}_2/\text{έτος} - 158.749,19 \text{ Mg CO}_2 / \text{έτος} \\ &= \mathbf{-46.699,19 \text{ Mg CO}_2/\text{έτος}}. \end{aligned}$$

Εκπομπές NO_x

Θεωρώντας ότι λαμβάνει χώρα απελευθέρωση 200 mg οξειδίων του αζώτου ανά m³ απαερίων και ότι η συνολική παραγωγή ανέρχεται σε 5.500 m³ απαερίων / Mg απορριμμάτων, τότε η συνολική αποδέσμευση NO_x στην ατμόσφαιρα από την καύση του συνόλου των απορριμμάτων είναι :

$$\text{Συνολικές εκπομπές NO}_x = 200 \text{ mg/m}^3 * 5.500 \text{ m}^3/\text{Mg} * 270.000 \text{ Mg απορριμμάτων/έτος} = \mathbf{297 \text{ Mg/έτος}}.$$

Οι μέσες εκπομπές NO_x σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας ανέρχονται σε 660 mg NO_x/kWh. Άρα, οι συνολικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου στην περίπτωση της καύσης των απορριμμάτων με ενεργειακή αξιοποίηση είναι :

$$\begin{aligned} \text{Συνολικές εκπομπές NO}_x &= 297 \text{ Mg/έτος} - 230.071,29 * 10^3 \text{ kWh/έτος} * \\ /\text{kWh} &= 297 \text{ Mg/έτος} - 151,85 \text{ Mg/έτος} = 145,15 \text{ Mg/έτος}. \end{aligned}$$

Όμως, ο παγκόσμιος θερμοδυναμικός δείκτης GWP για τα NO_x είναι 8 που σημαίνει ότι οι εκπομπές 1 Mg NO_x είναι ισοδύναμες με 8 Mg CO₂. Άρα :

$$\begin{aligned} \text{Συνολικές εκπομπές CO}_2 \text{ ισοδύναμες NO}_x &= 145,15 \text{ Mg NO}_x /\text{έτος} * 8 \text{ Mg CO}_2/ \\ \text{Mg NO}_x &= \mathbf{1161,2 \text{ Mg CO}_2/\text{έτος}}. \end{aligned}$$

Εκπομπές N₂O

Οι μέσες εκπομπές σε μια εγκατάσταση αποτέφρωσης με αξιοποίηση ενέργειας κυμαίνονται στα 2 mg N₂O/ m³ απαερίων. Έτσι, όμοια με προηγουμένως έχουμε:

$$\text{Συνολικές εκπομπές N}_2\text{O} = 2 \text{ mg/m}^3 * 5.500 \text{ m}^3/\text{Mg} * 270.000 \text{ Mg απορριμμάτων/έτος} = \mathbf{2,97 \text{ Mg/έτος}}.$$

Οι μέσες εκπομπές N₂O σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας ανέρχονται σε 32 mg N₂O /kWh. Άρα, οι συνολικές εκπομπές N₂O στην περίπτωση της καύσης των απορριμμάτων με ενεργειακή αξιοποίηση είναι :

$$\begin{aligned} \text{Συνολικές εκπομπές N}_2\text{O} &= 2,97 \text{ Mg/έτος} - 230.071,29 * 10^3 \text{ kWh/έτος} * \\ /\text{kWh} &= 2,97 \text{ Mg/έτος} - 7,36 \text{ Mg/έτος} = \mathbf{-4,39 \text{ Mg/έτος}}. \end{aligned}$$

Όμως, ο παγκόσμιος θερμοδυναμικός δείκτης GWP για το N₂O είναι 310 που σημαίνει ότι οι εκπομπές 1 Mg N₂O είναι ισοδύναμες με 310 Mg CO₂. Άρα :

$$\begin{aligned} \text{Συνολικές εκπομπές CO}_2 \text{ ισοδύναμες NO}_x &= -4,39 \text{ Mg N}_2\text{O} /\text{έτος} * 310 \text{ Mg CO}_2/ \\ \text{Mg N}_2\text{O} &= \mathbf{-1.360,9 \text{ Mg CO}_2/\text{έτος}}. \end{aligned}$$

Εκπομπές CO

Λαμβάνουμε τη μέση τιμή εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα σε μια εγκατάσταση αποτέφρωσης με αξιοποίηση ενέργειας ίση με 50 mg/m³ απαερίων. Έτσι έχουμε:

Συνολικές εκπομπές CO = 50 mg/m³ * 5.500 m³/Mg * 270.000 Mg απορριμμάτων /έτος = **74,25 Mg/έτος**.

Οι μέσες εκπομπές CO σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας ανέρχονται σε 235 mg CO /kWh. Άρα, οι συνολικές εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα στην περίπτωση της καύσης των απορριμμάτων με ενεργειακή αξιοποίηση είναι :

Συνολικές εκπομπές CO = 74,25 Mg/έτος - 230.071,29 * 10³ kWh/έτος * 235 mg CO /kWh = 74,25 Mg/έτος - 54,07 Mg/έτος = 20,18 Mg/έτος.

Όμως, ο παγκόσμιος θερμοδυναμικός δείκτης GWP για το CO είναι 3 που σημαίνει ότι οι εκπομπές 1 Mg CO είναι ισοδύναμες με 3 Mg CO₂. Άρα :

Συνολικές εκπομπές CO₂ ισοδύναμες CO = 20,18 Mg CO /έτος * 3 Mg CO₂/ Mg CO = **60,54 Mg CO₂/έτος**.

Εκπομπές NH₃

Λαμβάνουμε τη μέση τιμή εκπομπών αμμωνίας σε μια εγκατάσταση αποτέφρωσης με αξιοποίηση ενέργειας ίση με 4 mg/m³ απαερίων. Έτσι έχουμε:

Συνολικές εκπομπές NH₃ = 4 mg/m³ * 5.500 m³/Mg * 270.000 Mg απορριμμάτων /έτος = **5,94 Mg/έτος**.

Οι μέσες εκπομπές NH₃ σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας είναι 7 mg NH₃ /kWh. Άρα, οι συνολικές εκπομπές αμμωνίας στην περίπτωση της αποτέφρωσης των απορριμμάτων με ενεργειακή αξιοποίηση είναι :

Συνολικές εκπομπές NH₃ = 5,94 Mg/έτος - 230.071,29 * 10³ kWh/έτος * 7 mg CO /kWh = 5,94 Mg/έτος - 1,61 Mg/έτος = **4,33 Mg/έτος**.

Όσον αφορά τον παγκόσμιο θερμοδυναμικό δείκτη GWP, αυτός δεν έχει οριστεί για την αμμωνία και κατά συνέπεια δεν μπορούμε να υπολογίσουμε την ανάλογη ποσότητα των εκπομπών σε CO₂.

Εκπομπές CH₄

Κατά την αποτέφρωση των απορριμμάτων δεν υφίστανται εκπομπές μεθανίου.

Οι μέσες εκπομπές CH₄ από μια μονάδα παραγωγής ενέργειας ανέρχονται σε 13 mg CH₄ /kWh. Άρα, οι συνολικές εκπομπές μεθανίου στην περίπτωση της αποτέφρωσης των απορριμμάτων με ενεργειακή αξιοποίηση είναι :

Συνολικές εκπομπές CH₄ = 0 Mg/έτος - 230.071,29 * 10³ kWh/έτος * 13 mg CO /kWh = 0 Mg/έτος - 2,99 Mg/έτος = **-2,99 Mg/έτος**.

Όμως, ο παγκόσμιος θερμοδυναμικός δείκτης GWP για το CH₄ είναι 21. Αυτό σημαίνει ότι οι εκπομπές 1 Mg CH₄ είναι ισοδύναμες με 21 Mg CO₂. Άρα :

Συνολικές εκπομπές CO₂ ισοδύναμες CH₄ = -2,99 Mg CH₄ /έτος * 21 Mg CO₂/ Mg CH₄ = **-62,79 Mg CO₂/έτος**.

Εκπομπές ολικού οργανικού άνθρακα (TOC)

Η μέση τιμή εκπομπών TOC σε μια εγκατάσταση αποτέφρωσης με αξιοποίηση ενέργειας είναι ισοδύναμη με 5 mg/m³ απαερίων. Έτσι έχουμε:

Συνολικές εκπομπές TOC = 5 mg/m³ * 5.500 m³/Mg * 270.000 Mg αποβλήτων/έτος = **7,43 Mg/έτος**.

Οι μέσες εκπομπές TOC σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας είναι 13 mg TOC /kWh. Άρα, οι συνολικές εκπομπές TOC στην περίπτωση της καύσης των απορριμμάτων με ενεργειακή αξιοποίηση είναι :

Συνολικές εκπομπές TOC = 7,43 Mg/έτος - 230.071,29 * 10³ kWh/έτος * 13 mg CO /kWh = 7,43 Mg/έτος - 2,99 Mg/έτος = 4,44 Mg/έτος.

Όμως, ο παγκόσμιος θερμοδυναμικός δείκτης GWP για το TOC είναι 11 που σημαίνει ότι οι εκπομπές 1 Mg TOC είναι ισοδύναμες με 11 Mg CO₂. Άρα :

Συνολικές εκπομπές CO₂ ισοδύναμες TOC = 4,44 Mg TOC /έτος * 11 Mg CO₂/ Mg TOC = **48,84 Mg CO₂/έτος**.

Στον ακόλουθο Πίνακα 6.7 φαίνονται συνοπτικά τα παραπάνω αποτελέσματα.

Πίνακας 6.7: Ισοδύναμες εκπομπές CO₂ κατά την αποτέφρωση με παραγωγή ενέργειας.

Ρύποι	Καθαρές εκπομπές (με ενεργειακή αξιοποίηση) [Mg CO ₂ /έτος]
CO ₂	-46.699,19*
NO _x	1161,2
N ₂ O	-1.360,9*
CO	60,54
NH ₃	Μ.Π.**
CH ₄	-62,79*
TOC	48,84
Σύνολο	-46.852,3*

* Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι για την παραγωγή μιας συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας μέσω της αποτέφρωσης, υπάρχει ελάττωση των εκπομπών αυτών, σε σχέση με τις εκπομπές που θα προέκυπταν αν η ίδια ποσότητα ενέργειας παραγόταν από καύση ορυκτών καυσίμων

**Μ.Π : Μη προσδιορισμένο

Θεωρώντας ότι από την καύση 1 Mg κάρβουνου εκλύονται 1.919 Mg CO₂ τότε από την καύση των απορριμμάτων προκύπτει εξοικονόμηση της τάξης των 24.415 Mg κάρβουνου.

Συγκεντρωτικά λοιπόν στον Πίνακα 6.8 φαίνονται οι εκπομπές από τις τρεις στρατηγικές όπως αναπτύχθηκαν προηγούμενα. Από τον πίνακα προκύπτει ότι από πλευράς εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η διάθεση σε ΧΥΤΑ είναι πάρα πολύ επιβλαβερή για το περιβάλλον, είτε γίνεται συλλογή βιοαερίου είτε όχι. Επίσης και η μηχανική – βιολογική επεξεργασία επιβαρύνει την ατμόσφαιρα σε αντίθεση με την αποτέφρωση με αξιοποίηση της ενέργειας, από την οποία προκύπτει μείωση της απελευθέρωσης αερίων, σε σχέση πάντα με αυτά που θα απελευθερωνόταν για την παραγωγή του ίδιου ποσού ενέργειας αν χρησιμοποιούσαμε ορυκτά καύσιμα. Έτσι, γίνεται σαφές ότι η αποτέφρωση και η αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των απορριμμάτων, είναι μια διεργασία με την οποία μπορούμε να εξοικονομήσουμε

φυσικούς πόρους και ταυτόχρονα να ελαττώσουμε τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Πίνακας 6.8 Ισοδύναμες εκπομπές CO₂ κατά τις διάφορες στρατηγικές.

Ρύποι	Στρατηγική 0		Στρατηγική 1	Στρατηγική 2
	Χωρίς συλλογή βιοαερίου [Mg CO ₂ /έτος]	Με συλλογή βιοαερίου [Mg CO ₂ /έτος]	[Mg CO ₂ /έτος]	[Mg CO ₂ /έτος]
CO ₂				-46.699,19
NO _x				1161,2
N ₂ O			25.110	-1.360,9
CO				60,54
NH ₃				Μ.Π.*
CH ₄	316.953	158.476,5	22.680	-62,79
TOC				48,84
Σύνολο	316.953	158.476,5	47.790	-46.852,3

*Μ.Π : Μη προσδιορισμένο

Μονάδα κομποστοποίησης Νομού Χανίων

Λαμβάνοντας ως περιοχή μελέτης μόνο τον Νομό Χανίων θα υπολογίσουμε τις εκπομπές που προκύπτουν, αν όλο το οργανικό κλάσμα της παραγόμενης ποσότητας των απορριμμάτων του Νομού καταλήγει στη μονάδα κομποστοποίησης. Η ποσότητα αυτή ανέρχεται σε 35.000 Mg και σύμφωνα με τα προηγούμενα έχουμε :

Εκπομπές CH₄

Οι εκπομπές μεθανίου κατά τη βιολογική επεξεργασία των ΑΣΑ υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση [Riitta Ripatti,2006] :

$$\text{Συνολικές εκπομπές CH}_4 = (M_I \cdot EF_I \cdot 10^{-3}) - R$$

Όπου : M_I : μάζα οργανικών απορριμμάτων που επεξεργάζονται

EF_I : συντελεστής εκπομπών ανάλογα με το είδος της επεξεργασίας (Πίνακας 6.5)

R : συνολικό ποσό του μεθανίου που συλλέγεται για ενεργειακή αξιοποίηση

Επομένως, προκύπτει ότι, οι εκπομπές μεθανίου κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης υγρών απορριμμάτων, χωρίς την συλλογή του παραγόμενου βιοαερίου, ανέρχονται σε:

$$\text{Συνολικές εκπομπές CH}_4 = 35.000 \text{ Mg απορριμμάτων} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \\ = 140 \text{ Mg CH}_4/\text{έτος}.$$

Επειδή όπως είδαμε οι εκπομπές 1 Mg CH₄ είναι ισοδύναμες με 21 Mg CO₂ τότε προκύπτει :

$$\text{Συνολικές εκπομπές CO}_2 \text{ ισοδύναμες CH}_4 = 140 \text{ Mg CH}_4/\text{έτος} \cdot 21 \text{ Mg CO}_2/\text{Mg CH}_4 \\ = 2.940 \text{ Mg CO}_2/\text{έτος}.$$

Το διοξείδιο του άνθρακα που θα παραχθεί από την καύση του RDF έχει ουδέτερες επιπτώσεις γιατί παράγεται ενέργεια, για την παραγωγή της οποίας θα χρησιμοποιούσαμε ορυκτά καύσιμα τα οποία θα παρήγαν επίσης CO₂.

Εκπομπές N₂O

Οι εκπομπές μεθανίου κατά τη βιολογική επεξεργασία των ΑΣΑ υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση [Riitta Piratti,2006]:

$$\text{Συνολικές εκπομπές N}_2\text{O} = (M_I \cdot EF_I \cdot 10^{-3})$$

Επομένως, οι εκπομπές N₂O κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης υγρών απορριμμάτων χωρίς την συλλογή του παραγόμενου βιοαερίου ανέρχονται σε :
Συνολικές εκπομπές N₂O = 35.000 Mg απορριμμάτων * 0,3 * 10⁻³ = **10,5 Mg N₂O /έτος**

Επειδή όπως είδαμε οι εκπομπές 1 Mg N₂O είναι ισοδύναμες με 310 Mg CO₂ τότε προκύπτει :

Συνολικές εκπομπές CO₂ ισοδύναμες N₂O = 10,5 Mg N₂O /έτος * 310 Mg CO₂/ Mg N₂O = **3.255 Mg CO₂/έτος**.

Οι εκπομπές κατά τη διάρκεια της μηχανικής επεξεργασίας μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

Οι συνολικές εκπομπές λοιπόν από τη μονάδα είναι **2.940 Mg CO₂/έτος + 3.255 Mg CO₂/έτος = 6.195 Mg CO₂/έτος**.

6.2.3 Κόστη διαφόρων στρατηγικών

-Ταφή απορριμμάτων

Ο υπολογισμός του πραγματικού κόστους ταφής είναι απαραίτητος προκειμένου να αποτιμηθεί η οικονομική επιβάρυνση που προκύπτει από την Οδηγία 99/31 στους ΧΥΤΑ, αλλά και η σύγκριση του κόστους ταφής με το κόστος επεξεργασίας. Αυτό που συνήθως θεωρείται ως κόστος ταφής στην Ελλάδα δεν λαμβάνει υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την ταφή, την μείωση της αξίας της γης που ο ΧΥΤΑ συνεπάγεται, αλλά ούτε καν τις απαιτήσεις πλήρους κοστολόγησης των παρεχόμενων υπηρεσιών. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι σε κανέναν ΧΥΤΑ στην Ελλάδα δεν κοστολογείται:

- ο Το κόστος των έργων αποκατάστασης και μεταφροντίδας.
- ο Το κόστος κατασκευής του νέου ΧΥΤΑ, που θα αντικαταστήσει τον υπάρχοντα μετά το τέλος της χρήσιμης ζωής του.
- ο Το κόστος της ασφάλισης του έργου ή ισοδύναμης χρηματο-οικονομικής εγγύησης που πρέπει να πληρώνεται σε ετήσια βάση από το φορέα διαχείρισης.

Έχει υπολογιστεί [ΕΠΕΜ, 2004], ότι το πραγματικό οικονομικό κόστος της ταφής είναι τουλάχιστον 3 φορές μεγαλύτερο από αυτό που υπολογίζουν οι φορείς διαχείρισης. Επομένως, από την άποψη της υλοποίησης της Οδηγίας 99/31, ο σημερινός μη αντιπροσωπευτικός (αλλά και μη νόμιμος) προσδιορισμός του κόστους ταφής οδηγεί σε αδικαιολόγητα χαμηλά τέλη ταφής, με αποτέλεσμα να αποτελεί σημαντικό φραγμό στις προσπάθειες προώθησης σχεδίων επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων, εφόσον η πλασματική σύγκριση του τέλους επεξεργασίας με τα τέλη ταφής που σήμερα χρεώνονται προκαλεί συχνά δέος. Αυτό σημαίνει ότι οι διαφορές κοστολογίου μεταξύ ταφής και επεξεργασίας είναι μικρότερες από τις αρχικά εκτιμώμενες, παραμένοντας βέβαια σημαντικές. Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.9, το κόστος ταφής στην Ελλάδα είναι από τα χαμηλότερα στην Ευρώπη.

Πίνακας 6.9 : Εκτιμώμενο κόστος ταφής για μη-επικίνδυνα απόβλητα σε διάφορες χώρες της ΕΕ.

Χώρα	Κόστος (€/τόνο)
Αυστρία	50-150
Βέλγιο (Φλαμανδία)	116
Δανία	110
Φινλανδία	30-121
Γερμανία	123
Ελλάδα	8-35
Ιρλανδία	120-240
Ιταλία	90-110
Λουξεμβούργο	50
Ολλανδία	58
Πορτογαλία	26
Ισπανία	12
Σουηδία	70-90
Ηνωμένο Βασίλειο	21

Πρέπει να αναφέρουμε επίσης ότι στην Ελλάδα, η δαπάνη κατασκευής κάποιων εν λειτουργία χώρων υγειονομικής ταφής ξεπέρασε τα 54 εκατ. €, ενώ οι υπό κατασκευή ή υπό δημοπράτηση ΧΥΤ έχουν προϋπολογισμό που ξεπερνάει τα 29 εκατ. €. Το λειτουργικό κόστος των χώρων υγειονομικής ταφής κυμαίνεται από 5–20 €/tn και είναι αντιστρόφως ανάλογο προς τη δυναμικότητά τους [Μαυρόπουλος κ.α, 2002].

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η στρατηγική 0 δεν καλύπτει τις Κοινοτικές προδιαγραφές με αποτέλεσμα στο κόστος του να πρέπει να ενταχθεί και το αναμενόμενο κόστος των προστίμων. Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης τα πρόστιμα έχουν υπολογιστεί με βάση τις σημερινές τιμές και την εμπειρία του «Κουρουπητού» (~ 100 €/t διαχειριζόμενων απορριμμάτων), χωρίς να ληφθούν υπόψη οι προβλέψεις για το νέο ύψος των σχετικών προστίμων μετά από την πρόταση Οδηγίας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

- Μηχανική – Βιολογική επεξεργασία

Το κόστος κατασκευής και λειτουργίας μιας μονάδας κομποστοποίησης εξαρτάται άμεσα από τον τύπο της εγκατάστασης (κλειστά ή ανοικτά συστήματα), το είδος των αποβλήτων που επεξεργάζεται (πράσινα απόβλητα, βιοαποδομήσιμο κλάσμα μετά από διαλογή στην πηγή ή εμπλουτισμένο οργανικό κλάσμα μετά από μηχανική διαλογή) και τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση από μονάδα σε μονάδα. Γενικά, σχετικά με το κόστος μπορούν να διατυπωθούν δύο γενικές παρατηρήσεις:

Α) όσο πιο «καθαρό» είναι το ρεύμα των επεξεργαζόμενων αποβλήτων (π.χ. πράσινα απόβλητα), τόσο απλούστερα και φθηνότερα είναι τα απαιτούμενα συστήματα κομποστοποίησης, και

Β) όσο υψηλότερη είναι η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία (π.χ. βιοαντιδραστήρες), τόσο υψηλότερο είναι το κόστος κατασκευής, ενώ συνήθως αντιστρόφως ανάλογα κυμαίνεται το εργατικό κόστος.

Πιο συγκεκριμένα, η κομποστοποίηση πράσινων αποβλήτων σε ανοικτά σειράδια είναι μια από τις οικονομικότερες μορφές επεξεργασίας αποβλήτων, με αναφερόμενο συνολικό κόστος (ετησιοποιημένο κόστος κεφαλαίου + λειτουργικό κόστος) 20-35€ [EA, 2002b, Eunomia, 2002]. Εδώ το κόστος κεφαλαίου περιλαμβάνει το κόστος αγοράς της γης, τη διαμόρφωση και επίστρωση του γηπέδου με μπετόν ή ασφαλτικά υλικά και την προμήθεια εξοπλισμού (θρυμματιστή, αναστροφέα, κόσκινων και φορτωτή). Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι η πώληση του κομπόστ από πράσινα απόβλητα επιτυγχάνει θετικές, και σε ορισμένες περιπτώσεις υψηλές, τιμές. Έτσι, ένα μέρος του υλικού που θα πουληθεί ενσασκισμένο στην αγορά προϊόντων κήπου, μπορεί να πετύχει τιμές της τάξεως των 100-120 €/ τόνο. Ωστόσο, η μεγαλύτερη ποσότητα θα πουληθεί χύμα, σε τιμές της τάξεως των 10-15 €/ τόνο. Πρέπει να σημειωθεί ότι καθώς δεν υπάρχουν αντίστοιχες εγκαταστάσεις στην Ελλάδα, τα κόστη και ειδικά οι τιμές πώλησης του κομπόστ μπορεί να διαφέρουν σημαντικά.

Η κομποστοποίηση σε ανοικτά σειράδια δεν θεωρείται στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες ως αποδεκτή μέθοδος για την επεξεργασία οργανικών αποβλήτων που περιέχουν τροφικά υπολείμματα. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται κλειστά συστήματα με κόστος που μπορεί να παρουσιάζει σημαντική διακύμανση. Η προσομοίωση ενός συστήματος «βέλτιστης διαθέσιμης τεχνολογίας» για την επεξεργασία του βιοαποδομήσιμου κλάσματος μετά από καλή διαλογή στην πηγή, υποδεικνύει ένα συνολικό κόστος 35-60€/τόνο για μια μονάδα δυναμικότητας 20.000 τόνων (χωρίς να υπολογιστούν πιθανά έσοδα από την πώληση προϊόντων), ανάλογα με το κόστος εργασίας, ενέργειας κλπ. στις διάφορες χώρες της ΕΕ [Eunomia, 2002]. Σε αυτή την περίπτωση το κόστος κατασκευής υπολογίζεται σε 150€ ανά τόνο εγκατεστημένης δυναμικότητας.

Μια αντίστοιχη μονάδα, δυναμικότητας 17.200 τόνων στο Ipswich της Αγγλίας είχε κόστος κατασκευής 1,85 εκατ. € (δηλ. 108 € ανά τόνο εγκατεστημένης δυναμικότητας) και τέλη εισόδου (που εκφράζουν το λειτουργικό της κόστος) 25€/τόνο [EA, 2002b]. Ωστόσο, αρκετά υψηλότερες τιμές αναφέρονται σε διάφορες μελέτες, για άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Γενικά πάντως ισχύει ότι τόσο το κόστος κατασκευής όσο και το λειτουργικό κόστος μειώνεται καθώς αυξάνεται η δυναμικότητά της.

Στην περίπτωση της ΜΒΕ ακόμη και ο ίδιος γενικός τύπος για την ίδια δυναμικότητα, από τον ίδιο κατασκευαστή και στην ίδια χώρα μπορεί να παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στο κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος, ανάλογα με τους στόχους της επεξεργασίας που θέτει ο φορέας ανάθεσης του έργου. Η πολυπλοκότητα και κατά συνέπεια το κόστος του μηχανικού μέρους της επεξεργασίας θα εξαρτηθεί από τον επιθυμητό βαθμό ανακύκλωσης των ξηρών ανακυκλώσιμων, ενώ για το βιολογικό από τον απαιτούμενο βαθμό εξευγενισμού του παραγόμενου «κομπόστ» (απομάκρυνση προσμίξεων, βαθμός ωρίμανσης).

Τα στοιχεία κόστους από μονάδες αναφοράς που λειτουργούν σε διαφορετικές χώρες, επεξεργάζονται απόβλητα διαφορετικής σύστασης για την παραγωγή προϊόντων διαφόρων ποιοτήτων και στόχων, κάτω από διαφορετικές οικονομικές συνθήκες δεν μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για τη λήψη αποφάσεων από τους φορείς διαχείρισης των ΑΣΑ, καθώς η πιθανότητα εξαγωγής λανθασμένων συμπερασμάτων είναι πολύ μεγάλη. Ακόμη και όταν οι εταιρείες παρουσιάζουν στοιχεία κόστους προσαρμοσμένα στις ελληνικές συνθήκες, χρειάζεται μεγάλη προσοχή στη σύγκριση

ανάμεσα σε διαφορετικές λύσεις γιατί δεν είναι συνήθως γνωστές οι υποθέσεις πάνω στις οποίες βασίζεται η εξαγωγή του κόστους.

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς, μπορούν να εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα για το κόστος της MBE. Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι το **κατασκευαστικό κόστος** της MBE παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, ωστόσο παραμένει πολύ χαμηλότερο από αυτό της καύσης. Το **λειτουργικό κόστος** της MBE είναι συνήθως υψηλότερο σε σχέση με την καύση (ανά τόνο εισερχόμενων αποβλήτων), αλλά αυτό δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, τα οικονομικά της MBE εξαρτώνται άμεσα από τις δυνατότητες και το κόστος διάθεσης των προϊόντων της: το άμεσο λειτουργικό και κατασκευαστικό κόστος έχει μικρότερη σημασία στον προσδιορισμό της βιωσιμότητας μιας εγκατάστασης MBE σε σχέση με το σχεδιασμό και την εξασφάλιση διόδων απορρόφησης των εκροών της διεργασίας σε λογικό κόστος. Δεν πρέπει να αναμένονται έσοδα από την πώληση προϊόντων της MBE, με εξαίρεση την πώληση ενέργειας.

Ενδεικτικά να αναφέρουμε κάποιες τιμές για το κόστος κατασκευής και λειτουργίας ορισμένων εμπορικών μονάδων MBE, με βάση στοιχεία που παρέχουν οι κατασκευαστές τους. Έτσι λοιπόν το κόστος κατασκευής κυμαίνεται από 158 – 396 € /τόνο επεξεργασμένων απορριμμάτων ενώ το κόστος επεξεργασίας είναι της τάξης των 46-78€ /τόνο. Πρέπει να σημειωθεί ότι πολλοί κατασκευαστές αρνούνται να δώσουν τιμές καθώς αυτές εξαρτώνται άμεσα από το συγκεκριμένο έργο και τις τοπικές του συνθήκες, όπως αναλύθηκε και προηγουμένως. Σε κάθε περίπτωση τονίζεται ότι οι τιμές αυτές θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με ιδιαίτερη προσοχή και με τις επιφυλάξεις που προαναφέρθηκαν, συνεπώς δεν προσφέρονται για άμεσες συγκρίσεις μεταξύ τεχνολογιών [Archer et al., 2005β].

- Θερμική επεξεργασία

Οι μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ αδιαμφισβήτητα παρουσιάζουν αρκετά υψηλό **κόστος εφαρμογής**, το οποίο αναλύεται τόσο στο κόστος κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης της αντίστοιχης μονάδας, όσο και στο κόστος λειτουργίας δευτερευόντων μονάδων, όπως για παράδειγμα συστημάτων επεξεργασίας των παραγόμενων αέριων εκπομπών και στερεών υπολειμμάτων.

Το ύψος του τελικού κόστους εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- το είδος της μεθόδου που εφαρμόζεται (π.χ. η πυρόλυση εμφανίζεται να είναι αρκετά πιο ακριβή από ότι η αποτέφρωση),
- τη δυναμικότητα της αναγκαίας μονάδας θερμικής επεξεργασίας,
- το βαθμό απόδοσης της μονάδας,
- τη σύσταση και την αναγκαία επεξεργασία των παραγόμενων αποβλήτων,
- τις γενικότερες οικονομικές παραμέτρους κάθε χώρας (κόστος γης, εργατικό κόστος, κόστος πρώτων υλών, κτλ),
- το κόστος πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας,
- τη δυνατότητα ανάκτησης και πώλησης υλικών,
- τους περιορισμούς και στόχους, που θέτει η εκάστοτε ισχύουσα νομοθεσία.

Πρόσφατα στοιχεία για την απαιτούμενη αρχική επένδυση δείχνουν ότι ένας τυπικός αποτεφρωτής κοστίζει εκατοντάδες εκατομμύρια €. Στην Ολλανδία, για παράδειγμα, η κατασκευή ενός αποτεφρωτή δυναμικότητας 2.000ton ημερησίως κόστισε (στα μέσα της δεκαετίας του '90) περίπου 500 εκατ. δολάρια. Πιο πρόσφατα στοιχεία από την Ιαπωνία ανεβάζουν σημαντικά αυτό το κόστος. Δύο αποτεφρωτές που

ολοκληρώθηκαν το 1999 κόστισαν 658 εκατ. δολάρια (για δυναμικότητα 200 τόνων απορριμμάτων ημερησίως) και 808 εκατ. δολάρια, αντίστοιχα (για δυναμικότητα 400 τόνων απορριμμάτων ημερησίως) [Ψωμάς, 2005].

Το λειτουργικό κόστος είναι εξίσου υψηλό. Το κόστος προ φόρων σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, κυμαίνεται από 21 έως 332 € ανά τόνο (ανάλογα με τον όγκο των προς καύση απορριμμάτων), ενώ στο κόστος αυτό θα πρέπει να προσθέσει κανείς και το κόστος για την επιπλέον διάθεση των τοξικών στερεών αποβλήτων της καύσης, το οποίο με τη σειρά του κυμαίνεται από 8 έως 363€ ανά τόνο [Ψωμάς, 2005]. Ο Πίνακας 6.10 συνοψίζει τα αποτελέσματα πρόσφατης μελέτης για το κόστος της καύσης σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες.

Πίνακας 6.10 : Συγκριτικό κόστος για την καύση απορριμμάτων σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες [Ψωμάς, 2005].

Χώρα	Κόστος καύσης (προ φόρων) σε €/tn	Κόστος διαχείρισης τεφρών
Αυστρία	97-332	Τέφρα βάσης 63 €/τόνο, Υπολείμματα συστημάτων αντιρρύπανσης 363 €/τόνο
Βέλγιο	62-83	-
Βρετανία	65-86	Ιπτάμενη τέφρα 100 €/τόνο
Γαλλία	67-129	13-18 €/τόνο
Γερμανία	65-250	Τέφρα βάσης 28,1 €/τόνο, Ιπτάμενη τέφρα και υπολείμματα συστημάτων αντιρρύπανσης 255,6 €/τόνο
Δανία	43	Τέφρα βάσης και υπολείμματα συστημάτων αντιρρύπανσης 34 €/τόνο
Ελβετία	21-53	-
Ιρλανδία	46	-
Ισπανία	34-56	-
Ιταλία	41,3-93	Τέφρα βάσης 75 €/τόνο, Ιπτάμενη τέφρα και υπολείμματα συστημάτων αντιρρύπανσης 129 €/τόνο
Λουξεμβούργο	97	Τέφρα βάσης 16 €/τόνο, Υπολείμματα συστημάτων αντιρρύπανσης 8 €/τόνο
Ολλανδία	71-110	-

Επίσης, στους Πίνακες 6.11 και 6.12 παρουσιάζονται στοιχεία δυναμικότητας, κόστους κατασκευής και επιμερισμού αυτού για διάφορες εγκαταστάσεις θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ της Ευρώπης.

Πίνακας 6.11 : Στοιχεία δυναμικότητας και κόστους επιλεγμένων εγκαταστάσεων θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ στην Ευρώπη [Ecorprog & Fraunhofer UMISICHT, 2006].

Περιοχή	Έτος λειτουργίας	Δυναμικότητα (τόνοι/ έτος)	Κόστος επένδυσης (σε εκατ. €)
Kempten, Γερμανία	1996	78.000	82
Pirmasens, Γερμανία	1998	155.500	189
Hamburg R. Damm, Γερμανία	1999	225.000	140
Niklasdorf, Αυστρία	2003	100.000	55
Freiburg, Γερμανία	2005	150.000	77
Zorbau, Γερμανία	2005	300.000	100
Antwerpen, Βέλγιο	2005	400.000	180
Ringaskiddy, Ιρλανδία	2007	100.000	75
Garranstown, Ιρλανδία	2007	150.000	85
Halle, Γερμανία	2007	80.000	47
Amsterdam, Ολλανδία	2006	500.000	340
Posieux, Ελβετία	2006	45.000	20
Roosendaal, Ολλανδία	2007	180.000	90
Urvier, Ελβετία	2007	60.000	30

Πίνακας 6.12 : Μέσος επιμερισμός κόστους επένδυσης εγκαταστάσεων θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ στην Ευρώπη [Ecorprog & Fraunhofer UMISICHT, 2006].

Παράμετρος κόστους	Ανεξάρτητη της δυναμικότητας της μονάδας	Εξαρτημένη από τη δυναμικότητα της μονάδας
Αξία γης και προετοιμασία	περίπου 3%	
Έργα ΠΜ (κτίρια, θέρμανση, αερισμός, υγιεινή, πυρασφάλεια)	περίπου 19%	
Έργα διεργασιών (αποτεφρωτής και παραγωγή ατμού)		περίπου 38%
Καθαρισμός απαερίων και συγκέντρωση υγρών αποβλήτων		περίπου 18%
Εξοπλισμός ελέγχου και παρακολούθησης της λειτουργίας		περίπου 13%
Εξοπλισμός ενέργειας (τουρμπίνες, εναλλάκτες)		περίπου 3%
Επεξεργασία υπολειμμάτων		περίπου 1%
Παρακολούθηση έργου (project management) συμπεριλαμβανομένων πιστοποιητικών συμμόρφωσης, επιθεωρήσεων, τεχνικών ελέγχων και αποδοχής	περίπου 3,5%	
Αρχική λειτουργία και εκπαίδευση προσωπικού	περίπου 0,5%	
Άλλα	περίπου 3%	
Σύνολο	περίπου 27%	περίπου 73%

Στον Πίνακα 6.13 παρουσιάζεται συνοπτικά το κόστος για κάθε στρατηγική.

Πίνακας 6.13: Συγκεντρωτικός πίνακας κόστους για κάθε στρατηγική.

	Στρατηγική 0	Στρατηγική 1	Στρατηγική 2
Κόστος επένδυσης (χωρίς την αγορά γης)	50 €/τόνο - έτος για ΧΥΤΑ μεγάλης δυναμικότητας (>800.000 t ετησίως), 158 €/ t για ΧΥΤΑ μικρής δυναμικότητας (της τάξης των 130-180.000 t ετησίως)	220 €/ t - έτος για μονάδα μεγάλης δυναμικότητας (της τάξης των 400.000 t ετησίως)	500 - 700 €/ t - έτος για μονάδα μεγάλης δυναμικότητας (της τάξης των 450 - 600.000 t ετησίως)
Κόστος επεξεργασίας	13 €/ t ταφόμενων στερεών αποβλήτων	54 €/ t	8.8% του κόστους επένδυσης
Τιμή πώλησης ηλεκτρισμού	-		0,50 €/ kWh
Τιμή πώλησης RDF	-	20 €/ t	-

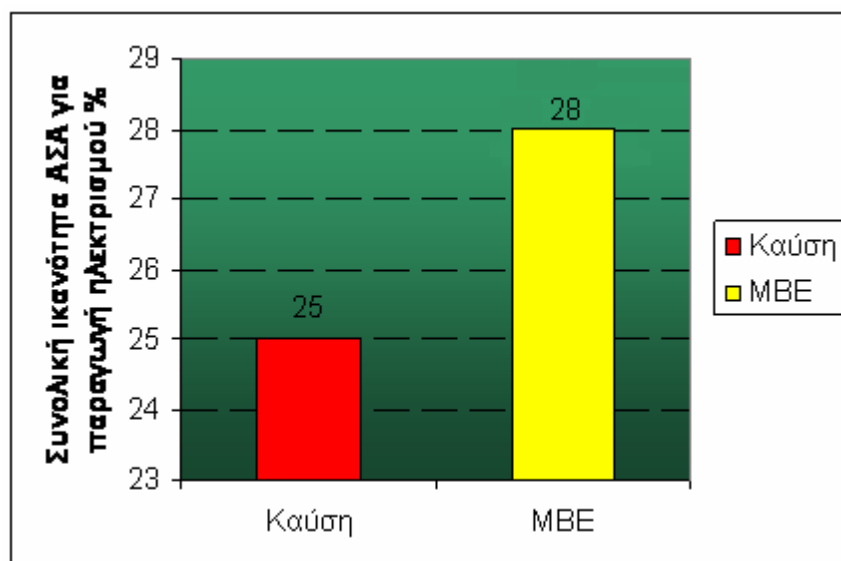
Σύμφωνα με τα παραπάνω στην περίπτωση της Κρήτης όπου καλούμαστε να διαχειριστούμε 270.000 τόνους/έτος, η κατασκευή μιας μονάδας μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας που θα επεξεργάζεται το σύνολο των απορριμμάτων αναμένεται να κοστίσει κατά μέσο όρο 67 εκατομμύρια €. Το κόστος επεξεργασίας αναμένεται να είναι περίπου 15 εκατομμύρια €. Τα έσοδα από την πώληση του RDF θα είναι της τάξης των 2.7 εκ €.

Στην περίπτωση της θερμικής επεξεργασίας το κόστος κατασκευής θα είναι μεταξύ 135-190 εκ € ενώ το λειτουργικό κόστος θα είναι της τάξης των 12-16 εκ €. Τα έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να ανέλθουν σε αρκετά εκατομμύρια €.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι παρά το πολύ υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, αυτό αντισταθμίζεται από το ανάλογο υψηλό κέρδος που προκύπτει από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας. Προκύπτει δηλαδή ότι μια τέτοια μονάδα επεξεργασίας είναι βιώσιμη και είναι σε θέση να καλύψει τα λειτουργικά της έξοδα.

6.3 Αποτελέσματα και αξιολόγηση

Όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας συνοψίζοντας τα παραπάνω, το ποσοστό αξιοποίησης του ενεργειακού περιεχομένου των ΑΣΑ φτάνει το 25% κατά την αποτέφρωση ενώ κατά τη μηχανική-βιολογική επεξεργασία και συνυπολογίζοντας τις απώλειες τις θερμότητας από την παραγωγή του RDF, φτάνει περίπου το 28% (Σχήμα 6.6).



Σχήμα 6.6. Συνολική ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για καύση και ΜΒΕ.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία οι παλαιότερες μονάδες αποτέφρωσης ξεκίνησαν ανακτώντας περίπου το 17% της ενέργειας των απορριμμάτων. Με συνεχείς βελτιώσεις των μεθόδων το ποσοστό αυτό έφτασε το 22-25% ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι σήμερα πλέον, στις σύγχρονες μονάδες αποτέφρωσης ΑΣΑ με παραγωγή ενέργειας, που σχεδιάζονται με τις καλύτερες διαθέσιμες τεχνικές (ΒΑΤ), το ποσοστό ενεργειακής αξιοποίησης μπορεί να ξεπεράσει και το 30%.

Στον παρακάτω Πίνακα 6.14 δίνονται ενδεικτικά τιμές για το ποσοστό μετατροπής του ενεργειακού περιεχομένου των απορριμμάτων σε ηλεκτρική ενέργεια σε διάφορες μονάδες αποτέφρωσης που λειτουργούν στην Ευρώπη.

Πίνακας 6.14: Χαρακτηριστικά μονάδων αποτέφρωσης στην Ευρώπη.

Μονάδα	Afval Energie Bedrijf Άμστερνταμ	Planta Energètica de Sant Adrià del Besòs Μπαρτσελόνα	Vestforbranding Unit 5 Χόμπρο (Δανία)	Reno-Nord Unit 4 Άαλμποργκ (Δανία)
Έναρξη λειτουργίας	1993	1975	1998	2005
Δυναμικότητα [τόνοι ΑΣΑ/έτος]	850.000	330.000	228.000	175.000
Απόδοση σε ηλεκτρική ενέργεια	23-24%	20%	19,6%	26,9%

Σχετικά με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα διαπιστώθηκε ότι η ΜΒΕ παράγει εκπομπές υψηλότερες από αυτές της αποτέφρωσης. Στην πραγματικότητα η αποτέφρωση οδηγεί στην μείωσή τους σε σχέση με τις εκπομπές που θα εκλύονταν κατά την παραγωγή ίσης ποσότητας ενέργειας, από την καύση ορυκτών πόρων.

Σε ότι αφορά το κόστος της κάθε διεργασίας μια μονάδα μηχανικής – βιολογικής επεξεργασίας έχει χαμηλότερο κόστος κατασκευής και λειτουργίας από μια μονάδα αποτέφρωσης η οποία όμως επιφέρει σημαντικότερα κέρδη που αποσβένουν το λειτουργικό κόστος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η στρατηγική 2 θα μπορούσε να εφαρμοστεί με επιτυχία καθώς υπάρχουν όλες οι απαραίτητες προϋποθέσεις που την καθιστούν εφαρμόσιμη και υλοποιήσιμη.

Όσον αφορά τη μηχανική-βιολογική επεξεργασία τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων είναι τέτοια ώστε να μην αποτελούν τη βέλτιστη επιλογή. Το ποσοστό υγρασίας που είναι της τάξης του 36,86 είναι μικρότερο από τις βέλτιστες τιμές που δίνει η βιβλιογραφία 40-60%. Επίσης και ο λόγος C/N που είναι 30,85 είναι οριακά έξω από τις βέλτιστες τιμές (20-30). Έτσι, για την Περιφέρεια Κρήτης προτείνεται η κατασκευή μιας μονάδας αποτέφρωσης με παραγωγή ενέργειας.

Η σύγχρονη μονάδα αποτέφρωσης που θα κατασκευαστεί θα συγκεντρώνει και θα επεξεργάζεται το σύνολο των παραγόμενων ΑΣΑ, δηλαδή 270.000 τόνους/έτος ή αλλιώς 740 τόνους/ημέρα. Η δυναμικότητα της μονάδας αυτής είναι πολύ ικανοποιητική ώστε να λειτουργεί συνεχώς και κάτω από τις βέλτιστες συνθήκες, καθώς μια μονάδα με δυναμικότητα <200 τόνων/ημέρα υπολειτουργεί και παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα τροφοδοσίας.

Η χωροθέτηση της μονάδας θα πρέπει να γίνει σε μια περιοχή όπου οι μετακινήσεις για την συγκέντρωση των απορριμμάτων θα είναι οι μικρότερες δυνατές. Έτσι, η περιοχή αυτή θα πρέπει να είναι πλησιέστερα στην πόλη με τη μεγαλύτερη παραγωγή ΣΑ και να βρίσκεται σχεδόν στο μέσο του νησιού. Επίσης, θα πρέπει να είναι μια περιοχή στην οποία δε θα δημιουργείται οπτική όχληση καθώς η Κρήτη είναι ένα νησί με πολύ τουρισμό και θα πρέπει η μονάδα να μη δημιουργεί αρνητικές επιπτώσεις σ' αυτόν. Εδώ θα πρέπει να επισημάνουμε ότι οι σύγχρονες μονάδες αποτέφρωσης που σχεδιάζονται και κατασκευάζονται σε όλο τον κόσμο αποτελούν μοναδικές αρχιτεκτονικές εμπνεύσεις που σε τίποτα δε θυμίζουν τις κατασκευές του παρελθόντος (Εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1 : Όψη μονάδων θερμικής επεξεργασίας [Μπρέσια 2006, Βόρειο Μπρόγουρντ 2006].

Επίσης, η παραγόμενη ενέργεια θα μπορεί να διατεθεί στους κατοίκους αυτής της μεγάλης πόλης χωρίς την απαίτηση επιπλέον κόστους για την ένταξη της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

Η μονάδα θα πρέπει να έχει τα πλέον σύγχρονα συστήματα ελέγχου των απαερίων ώστε να καλύπτονται όλα τα όρια προστασίας της ποιότητας της ατμόσφαιρας και κατά συνέπεια να μην υπάρχει η παραμικρή επιβάρυνση στη ζωή των κατοίκων και των τουριστών.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η ορθολογική διαχείριση των στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα παρόλη την πρόοδο τα τελευταία χρόνια δεν έχει ακόμη προχωρήσει σε ικανοποιητικό βαθμό ενώ συγχρόνως η πιθανότητα επίτευξης των νομικά δεσμευτικών σχετικών στόχων εντός των προθεσμιών που ορίζονται στις σχετικές Οδηγίες εξακολουθεί να παραμένει μικρή. Έτσι, διάφορες βασικές επιλογές βάσει των οποίων διαμορφώθηκαν στρατηγικές και επιλέχθηκαν δράσεις θα πρέπει να εξετασθούν εκ νέου στο πλαίσιο νέων δεδομένων τεχνολογικών, οικονομικών, νομικών και πολιτικών.

Πρωταρχικό στοιχείο του σχεδιασμού αποτελεί η παύση της λειτουργίας ανεξέλεγκτων ή ακατάλληλων χώρων διάθεσης απορριμμάτων που έχουν ρυπανθεί από την ανεξέλεγκτη διάθεση αστικών αποβλήτων και δεν επιλέγονται για τη μετεξέλιξή τους σε οργανωμένους ΧΥΤ. Απαραίτητη είναι και η περιβαλλοντική αποκατάσταση των χώρων με τη λήψη μέτρων για τον ουσιαστικό περιορισμό έως εξάλειψη της προκαλούμενης ρύπανσης.

Βασικός στόχος αυτής της μελέτης ήταν η παροχή των αναγκαίων πληροφοριών και η ανάπτυξη ενός πλαισίου αξιολόγησης των επιλογών που είναι σήμερα διαθέσιμες για την αντιμετώπιση του προβλήματος της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων, μέσω:

- (1) περιγραφής τεχνολογιών,
- (2) εκτίμησης μεγεθών και
- (3) συγκέντρωσης τεχνικών και οικονομικών στοιχείων.

Όλες οι εκτιμήσεις, τόσο από προηγούμενες μελέτες όσο και από αυτές στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, καταδεικνύουν την συνεχιζόμενη τάση αύξησης της ποσότητας των αποβλήτων και μάλιστα με σχετικά μεγάλα ποσοστά, της τάξης του 2.2-3% ετησίως για τα επόμενα 20 χρόνια, σε αντίθεση με μειωτικές τάσεις σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Αποτέλεσμα της τάσης αυτής είναι μέχρι το 2020 να έχουμε, σε σχέση με σήμερα, μια αύξηση της ετήσιας παραγόμενης ποσότητας κατά περισσότερο από 45%. Αυτό βέβαια υπογραμμίζει την ανάγκη άμεσης επιλογής και εφαρμογής μεθόδων για την βέλτιστη διαχείριση και κατά το δυνατόν αξιοποίηση των αστικών αποβλήτων.

Αναμφισβήτητα, όλες οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, και μάλιστα πολλές φορές, σημαντικά. Είναι δεδομένο λοιπόν ότι η οποιαδήποτε στρατηγική αντιμετώπισης του προβλήματος δεν μπορεί παρά να περιλαμβάνει αναγκαστικά μέτρα μείωσης της παραγωγής στην πηγή. Η σχεδίαση συγκεκριμένων δράσεων και η εφαρμογή μέτρων μείωσης δεν αποτέλεσε αντικείμενο της παρούσας μελέτης. Εν τούτοις εκτιμάται ότι υπάρχουν σημαντικά περιθώρια μείωσης της παραγόμενης ποσότητας στην Ελλάδα αφού μέχρι στιγμής δεν έχει θεσμοθετηθεί κανένα μέτρο προς την κατεύθυνση αυτή. Έτσι, η προσπάθεια μείωσης θεωρείται μεν δεδομένη, αλλά ακόμη και στην περίπτωση επιτυχούς υλοποίησης σχετικών προγραμμάτων, οι εκτιμήσεις, οι πληροφορίες και τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης δεν επηρεάζονται σημαντικά.

Η μελέτη θεώρησε επίσης δεδομένη την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη προσπάθεια ανακύκλωσης υλικών στην πηγή, ειδικά αυτών που έχουν ήδη ανεπτυγμένο, έστω και

σε στοιχειώδη βαθμό, δίκτυο συλλογής και ωφέλιμο οικονομικό αντικείμενο όπως χαρτί, αλουμίνιο και σιδηρούχα μέταλλα.

Τέλος, η μελέτη δεν περιλαμβάνει στοιχεία για το μεγάλο θέμα της επίτευξης γενικής αποδοχής της χωροθέτησης των εγκαταστάσεων σε δήμους ή περιοχές άλλων χώρων. Οι αναγκαίες δράσεις της λεγόμενης κοινωνικής μηχανικής (social engineering) για την ενημέρωση, ανταλλαγή απόψεων και στοιχείων, και ζύμωση με συναινετικές διαδικασίες ώστε να προχωρήσει ανεμπόδιστα η υλοποίηση των έργων, πρέπει να αποτελέσουν και αυτά μέρος της σχεδίασης, αφού άλλωστε η διαβούλευση είναι πλέον υποχρεωτική σύμφωνα με την Ελληνική και Κοινοτική νομοθεσία.

Ένα πρώτο συμπέρασμα της μελέτης που προκύπτει αμέσως από την επισκόπηση των στοιχείων για την διαχείριση αποβλήτων από όλες τις χώρες της ΕΕ αλλά και τρίτες χώρες όπως ΗΠΑ και Ιαπωνία είναι **η μεγάλη διακύμανση των στοιχείων κόστους και τιμολόγησης των υπηρεσιών, των τελών και των προϊόντων**. Αυτό είναι αποτέλεσμα των τοπικών προτεραιοτήτων, των οικονομικών και των τοπικών τεχνικών υποδομών και δυσκολιών. Υπάρχουν ακόμη διαφορές τιμών και στον τεχνικό εξοπλισμό αφού δεν πρόκειται για τυποποιημένες μονάδες αλλά για εγκαταστάσεις που σχεδιάζονται και διαστασιοποιούνται για την διαχείριση στερεών αποβλήτων συγκεκριμένης ποσότητας και σύνθεσης, και για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων. Σε μερικές περιπτώσεις αυτό εντείνεται και από τις διαφορές στην αξία γης ειδικά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Έτσι, είναι αναπόφευκτη η ανάλυση κάθε περίπτωσης ξεχωριστά ώστε να ληφθούν υπόψη σωστά οι τοπικές και ειδικές συνθήκες.

Δεύτερο συμπέρασμα που συνδέεται με το προηγούμενο είναι **η σημασία των όρων χρηματοδότησης** της επένδυσης για τις όποιες εγκαταστάσεις κριθούν αναγκαίες για την λειτουργία του συστήματος διαχείρισης. Το κόστος επένδυσης είναι γενικά υψηλό. Ειδικά, για την κατασκευή μονάδων ΜΒΕ ή καύσης, το κόστος είναι πιθανόν διπλάσιο αυτού ενός ΧΥΤΑ. Επιπλέον, παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις, με αποτέλεσμα την πιθανή ανατροπή της ιεράρχησης επιλογών ανάλογα με την τελική τιμή κατασκευής που προσφέρεται. Επιβάλλεται, ως εκ τούτου, η διερεύνηση όλων των πηγών χρηματοδότησης, κρατικών, κοινοτικών και μεικτών με συμμετοχή του ιδιωτικού τομέα ή της ΤΑ καθώς επίσης και η αξιοποίηση νέων χρηματοπιστωτικών εργαλείων. Άμεσα συναφές θέμα είναι η τιμολόγηση των υπηρεσιών αποκομιδής και διάθεσης που θα πρέπει να επανεξετασθεί ώστε να ενσωματώσει διαφοροποιήσεις βασισμένες στην ποσότητα και τοπικές ιδιομορφίες με βάση την γενικά αποδεκτή αρχή του «ο ρυπαίνων πληρώνει». Σήμερα π.χ. το κόστος ταφής δεν τιμολογείται ορθολογικά και σε μερικές περιπτώσεις δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη. Το θέμα εντούτοις χρειάζεται πολύ μεγαλύτερη ανάλυση εξ αιτίας της σημασίας των τελών στους προϋπολογισμούς των ΟΤΑ αλλά και την επιμέρους ανάλυση των σχετικών δαπανών.

Τρίτο συμπέρασμα είναι **η διαπίστωση της διεθνούς αποδοχής της καύσης με ενεργειακή αξιοποίηση σαν ισότιμη μέθοδο διαχείρισης των στερεών αποβλήτων και μείωσης της ποσότητας προς ταφή**. Σήμερα, όλες οι χώρες των ΕΕ-15 πλην Ιρλανδίας και Ελλάδας λειτουργούν μονάδες παραγωγής θερμικής ενέργειας από αστικά στερεά απόβλητα, πολλές εκ των οποίων πολύ κοντά ή και μέσα στο κέντρο αστικών περιοχών. Υπάρχουν πλέον και εφαρμόζονται μέθοδοι/τεχνικές που διασφαλίζουν πλήρως την περιβαλλοντική ασφάλεια και την τήρηση των ορίων των

αερίων εκπομπών το κόστος των οποίων συμπεριλαμβάνεται στην οικονομική εκτίμηση του κόστους των εγκαταστάσεων καύσης. Χώρες με αυστηρή περιβαλλοντική νομοθεσία και με αποτελεσματικούς μηχανισμούς ελέγχου επιτρέπουν την λειτουργία εγκαταστάσεων θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων, ακόμη και στα κέντρα μητροπολιτικών περιοχών και δήμων ενώ οι τελευταίες κοινοτικές οδηγίες επιβάλλουν αυστηρότερα κριτήρια.

Τέταρτο συμπέρασμα είναι η **ανάγκη εξασφάλισης διάθεσης των προϊόντων της μηχανικής - βιολογικής επεξεργασίας και δευτερογενών καυσίμων** (εδαφοβελτιωτικά, ανακυκλώσιμα, RDF) πέραν της ταφής. Αυτό απαιτεί μεγαλύτερη επεξεργασία και διαδικασίες τυποποίησης των προϊόντων και κατάλληλο σχεδιασμό ανάπτυξης αγορών ώστε να επιτευχθεί η αποδοχή τους τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής πλευράς ώστε να ακολουθήσει η αξιοποίησή τους πάντα στο πνεύμα της πλήρους διαφύλαξης της υγείας των πολιτών.

Ένα πέμπτο συμπέρασμα προκύπτει από το σύνολο των νομοθετικών ρυθμίσεων τόσο αυτών που ήδη αποτελούν νόμο του κράτους και της ΕΕ όσο και αυτών που βρίσκονται σε διάφορα στάδια επεξεργασίας/κύρωσης ειδικά στην ΕΕ, και είναι η **εξάντληση πλέον όλων των περιθωρίων για την εφαρμογή των διατάξεων, κυρίως αυτών που απαγορεύουν την συνέχιση της λειτουργίας ΧΑΔΑ αλλά και ΧΥΤΑ πλέον, γεγονός που θα επισύρει πρόστιμο αρκετά μεγάλο ώστε να κάνει άμεσα αναγκαία την αναζήτηση δράσεων και την λήψη αποφάσεων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.** Αυτό θα ενταθεί στο μέλλον αφού είναι δεδομένη η προσπάθεια για ενίσχυση της προστασίας του περιβάλλοντος και των πολιτών που άλλωστε επισημοποιήθηκε πρόσφατα (Φεβρουάριος 2007) με την κατάθεση Σχεδίου Οδηγίας από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για ελάχιστες κυρώσεις, οικονομικές αλλά και ποινικές, για παραβάσεις περιβαλλοντικής νομοθεσίας. Μία κωδικοποίηση της νομοθεσίας και νομολογίας αλλά και τα μέσα διάχυσής της θα βοηθούσαν σημαντικά προς την κατεύθυνση αυτή.

Έκτο συμπέρασμα είναι ότι **υπάρχουν ώριμες και αποδεδειγμένες τεχνολογίες για την ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων προς παραγωγή ενέργειας** και καθώς υπάρχει η ανάληψη υποχρεωτικού στόχου παραγωγής 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας από ΑΠΕ, η συνεισφορά από την ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων ή παραγώγων τους, θα είναι τριπλή :

- άμεση παραγωγή ηλεκτρισμού από καύση,
- βοήθεια στην επίτευξη του στόχου των ΑΠΕ αφού αυξάνεται η σημασία και αξιοποίηση βιομάζας και
- μείωση εκπομπών μεθανίου που είναι 21 φορές περισσότερο επιβαρυντικό από το CO₂.

Στο πλαίσιο αυτό μάλιστα ίσως θα πρέπει να επανεξετασθεί η αποσαφήνιση του νομικού πλαισίου ως προς την ένταξη των απορριμμάτων που οδηγούνται προς ενεργειακή αξιοποίηση στην κατηγορία των ΑΠΕ, ειδικότερα δε όσον αφορά τα RDF.

Θα πρέπει εδώ να επισημανθεί ότι η ευρωπαϊκή στρατηγική για τα απόβλητα, όπως πλέον αποτυπώνεται και στο Σχέδιο Οδηγίας που αναμένεται να υιοθετηθεί μέχρι το τέλος του 2007, απαιτεί η επιλογή των σχεδίων διαχείρισης σε εθνικό και τοπικό επίπεδο να γίνεται με βάση την ανάλυση κύκλου ζωής, εργαλείο του οποίου αποτελεί ο προσδιορισμός του περιβαλλοντικού κόστους [T.E.E., 2007].

Η περίπτωση της Περιφέρειας Κρήτης

Βασικός στόχος της μελέτης ήταν η ιεράρχηση επιλογών για την αντιμετώπιση του προβλήματος της διαχείρισης των αστικών απορριμμάτων στην Κρήτη,

Στην αξιολόγηση των εναλλακτικών στρατηγικών, μεγάλη σημασία δόθηκε στον τρόπο διάθεσης των προϊόντων της επεξεργασίας των ΑΣΑ (RDF και προϊόντα ανακύκλωσης), στο είδος της θερμικής επεξεργασίας και αξιοποίησης της ενέργειας, στο κόστος επένδυσης και το συνολικό περιβαλλοντικό κόστος (ή και όφελος).

Η ανάλυση των διαφόρων στρατηγικών ανέδειξε τη σημασία της **αποτέφρωσης** με παραγωγή ενέργειας η οποία αποδεικνύεται **η πλέον συμφέρουσα βάσει οικονομικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων**. Σήμερα, σε όλο τον κόσμο σχεδιάζονται και κατασκευάζονται σύγχρονες μονάδες αποτέφρωσης οι οποίες πληρούν τα αυστηρότερα περιβαλλοντικά όρια και δεν αποτελούν κίνδυνο για την υγεία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος. Από τη μελέτη διαπιστώθηκε ότι η αποτέφρωση αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή για τα αστικά απορρίμματα με τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της Κρήτης. Διαπιστώσαμε ότι με την αποτέφρωση μπορεί να γίνει μεγάλη αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των απορριμμάτων η οποία μπορεί να φτάσει ακόμα και το 30%. Επίσης, παρατηρήθηκε περιβαλλοντικό όφελος από πλευράς εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και φυσικά μείωση της μάζας των ΑΣΑ κατά πολύ μεγάλο ποσοστό. Από οικονομικής άποψης διαπιστώθηκε ότι μια τέτοια μονάδα μπορεί να είναι βιώσιμη καθώς από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να προκύψουν πολύ σημαντικά κέρδη.

Θα πρέπει λοιπόν σιγά σιγά στην Ελλάδα να αντιληφθούμε ότι τα πράγματα έχουν αλλάξει, να ξεπεράσουμε τις φοβίες που υπάρχουν σχετικά με την αποτέφρωση και να αγκαλιάσουμε τις νέες τεχνολογίες που μας δίνουν τη δυνατότητα να έχουμε ένα καλύτερο αύριο.

Εν κατακλείδι, συνεκτιμώντας όλα τα ανωτέρω αλλά και τα επιμέρους συμπεράσματα και στοιχεία της μελέτης, θα μπορούσε κανείς να διατυπώσει μία γενική πρόταση για την προσέγγιση του μεγάλου προβλήματος της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων στην Περιφέρεια Κρήτης. Η προτεινόμενη προσέγγιση θα πρέπει να περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, τα εξής καίρια σημεία πέραν των τυπικών που αφορούν στις διαδικασίες δημοπράτησης, επίβλεψης και λειτουργίας των εγκαταστάσεων:

- Ορισμός περιοχής εφαρμογής του σχεδίου, που πιθανόν να απαιτεί επαναλαμβανόμενες επανεκτιμήσεις σε συνδυασμό με αρχικά αποτελέσματα των επομένων φάσεων.
- Συμφωνία για την σύσταση ενός φορέα διαχείρισης με την συμμετοχή όλων των ΟΤΑ της περιοχής ο οποίος θα έχει την πολιτική κάλυψη, την θεσμική αρμοδιότητα με σωστά θεμελιωμένες εξουσιοδοτήσεις, την απαιτούμενη ευελιξία, την στελέχωση, την τεχνική υποδομή και τις οικονομικές υπηρεσίες.
- Συλλογή και αξιολόγηση στοιχείων παραγωγής από όλες τις πηγές
- Εξέταση, τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής πλευράς, όλων των σύγχρονων τεχνολογιών χωρίς εκ των προτέρων αποκλεισμούς
- Ανάπτυξη σχεδίου μείωσης παραγωγής και διαλογής στην πηγή
- Επεξεργασία αποτελεσματικού σχεδίου αποκομιδής, που περιλαμβάνει πραγματικές εκτιμήσεις κόστους αλλά και περιβαλλοντικής επιβάρυνσης
- Διατύπωση εναλλακτικών λύσεων προς εξέταση

- Εκτίμηση του γενικευμένου κόστους των εναλλακτικών λύσεων που περιλαμβάνει και το περιβαλλοντικό (και μέχρι σήμερα εξωτερικό) κόστος
- Επιλογή μεθόδου αξιολόγησης που να συνεκτιμά στοιχεία οικονομικά, τεχνικά, κοινωνικά κ.α. και να περιλαμβάνει σε κατά το δυνατόν σαφείς ποσοτικούς δείκτες
- Διερεύνηση πηγών χρηματοδότησης των αναγκαίων επενδύσεων και εκτίμηση του κόστους του χρήματος
- Διαμόρφωση πολιτικής τιμολόγησης
- Επεξεργασία δράσεων πληροφόρησης του κοινού, διαβούλευσης και επίτευξης ευρείας, κατά το δυνατόν, αποδοχής της/των προτεινομένων λύσεων.

Πολλά από τα παραπάνω σημεία, όπως π.χ. η αποκομιδή, η επιλογή τιμολογιακής πολιτικής και τελών, τα κριτήρια και ο αλγόριθμος επιλογής, και οι πηγές χρηματοδότησης, χρειάζονται περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία που δεν ήταν δυνατή στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, επειδή εξαρτώνται από τοπικούς παράγοντες, χρονικές συγκυρίες και συνθήκες.

Από τα προηγούμενα αναδεικνύεται η ανάγκη ολοκληρωμένης θεώρησης του προβλήματος διαχείρισης απορριμμάτων θέτοντας εθνικούς στόχους και λαμβάνοντας υπόψη τους υφιστάμενους σχεδιασμούς (που μπορεί να ξεπερνούν τα όρια νομών ακόμη και περιφερειών) και τα έργα που έχουν ήδη δρομολογηθεί. Ταυτόχρονα όμως θα πρέπει να συνεκτιμώνται όλες οι οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές συνιστώσες των προτεινόμενων λύσεων έτσι ώστε τελικά να επιλέγονται οι λύσεις που μεγιστοποιούν το κοινωνικό όφελος.

Η υλοποίηση ενός αποτελεσματικού προγράμματος διαχείρισης ΑΣΑ που είναι επιτακτική ανάγκη για την Περιφέρεια Κρήτης αλλά και για άλλες περιοχές της χώρας χρειάζεται την συνδρομή όλων των κοινωνικών εταίρων. Απώτερος στόχος της μελέτης είναι η συνεισφορά στην έγκυρη και τεκμηριωμένη πληροφόρηση των αιρετών και στελεχών των ΟΤΑ όλων των βαθμίδων, της κεντρικής πολιτικής ηγεσίας, των μέσων μαζικής ενημέρωσης, των μη-κυβερνητικών οργανισμών που ενδιαφέρονται για την ποιότητα της ζωής και του φυσικού περιβάλλοντος και τέλος των πολιτών η συνεισφορά των οποίων είναι αυτή που τελικά θα δώσει την λύση.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι μέσα από τη μελέτη αυτή αποδεικνύεται, ότι τα απορρίμματα μπορούν, με την κατάλληλη διαχείριση, να αποτελέσουν σημαντική πηγή ενέργειας και έτσι πρέπει να αντιμετωπίζονται. Στη σύγχρονη κοινωνία όπου ο ρυθμός εξάντλησης των φυσικών πόρων αυξάνεται συνεχώς, τα απορρίμματα μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας. Με τη βοήθεια της τεχνολογίας μπορούμε πλέον να κερδίσουμε ενέργεια από κάτι που μέχρι πρότινος θεωρούσαμε άχρηστο.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ανδρεαδάκης Α. (2001) «Θερμική Επεξεργασία Αστικών Στερεών Απορριμμάτων (Α.Σ.Α.) και Ιλύων», Σημειώσεις Μαθήματος “Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων και Ιλύος”.
- Γιδαράκος Ε. (2006) «Διαχείριση και Επεξεργασία Στερεών Αποβλήτων», Σημειώσεις Μαθήματος “Ειδικά θέματα περιβάλλοντος και Υγείας”, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ. (2007) «Μέθοδοι Θερμικής Επεξεργασίας Αστικών Στερεών Απορριμμάτων».
- Γρηγοροπούλου Ε. και Κατσίρη Α. (2006) «Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων», Σημειώσεις Διατμηματικού Μαθήματος “Περιβάλλον και Ανάπτυξη”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- ΕΠΕΜ (2004), «Μελέτες Προετοιμασίας Μονάδας Επεξεργασίας Απορριμμάτων Ν. Αχαΐας», Τεχνική Έκθεση.
- Λαζαρίδης Κ., Κουλουμπής Π., Σκουλάξινου Σ., Κανακόπουλος Δ., Λώλος Γ. (2002) Προδιαγραφές ποιότητας και διάθεση κομπόστ: η ελληνική και διεθνής εμπειρία. 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο «Βιώσιμη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων», ΕΕΔΣΑ.
- Μουσιόπουλος Ν., Καραγιαννίδης Α., (2002) «Διαχείριση Απορριμμάτων» Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ.
- Μύρκου Κ. (2006) «Εξέλιξη των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών των στερεών απορριμμάτων του Νομού Χανίων», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Ντζαμίλης Π., Χάβας Γ., (2004) « Ποιοτική και Ποσοτική Ανάλυση Αστικών Απορριμμάτων Περιφέρειας Κρήτης», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Λάλας Δ., Γεωργοπούλου Ε., Γιδαράκος Ε., Γκέκας Ρ., Λαζαρίδη Α., Μαυρόπουλος Α., Μοιρασγεντής Σ., Σελλάς Ν., για το Ινστιτούτο Τοπικής Αυτοδιοίκησης (2007) «Εκτίμηση των Γενικευμένων Επιπτώσεων και Κόστους Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων».
- Τ.Ε.Ε. (2006) «Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων στην Ελλάδα / Η περίπτωση της Αττικής».
- Φάττα Δ. (2006) «Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων», Σημειώσεις Μαθήματος “Διαχείριση Στερεών και Επικίνδυνων Αποβλήτων”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου.
- Alibardi L. and Cossu R. (2006) «Energy from Wastes and Biomasses: Opportunities and State of the Art», Proceedings Venice 2006: Biomass and Waste to Energy Symposium, Organized by International Waste Working Group (IWWG) and Environmental Sanitary Engineering Center (ESEC).
- Archer E., Baddeley A., Klein A., Schwager J., Whiting K. (2005b). Mechanical-Biological Treatment: a guide for decision makers – processes policies and markets. Annex A: Process Fundamentals. Technical report by Juniper Consultancy Services Ltd. funded by SITA Environmental Trust and ASSURRE.
- Bardos P. (2004). Composting of mechanically segregated fractions of Municipal Solid Waste: a Review. Technical report by r3 Environmental Technology Ltd funded by SITA Environmental Trust.
- Beck-Friis, B.G. (2001). Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane during composting of organic household waste. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences. 331 p. (Doctoral Thesis).

- Bilitewski B., Hardtle G., Marek K., Weissbach A. (1997) «Boeddicker: Waste Management», Springer Verlag, Heidelberg.
- Bilitewski B. (2006^b) «Pyrolysis, Gasification and Plasma Technologies», Proceedings Venice 2006: Biomass and Waste to Energy Symposium, Organized by (IWWG) and Environmental Sanitary Engineering Center (ESEC).
- Brinton, W. (2000). Compost Quality Standards and Guidelines. Final Report by Woods End Research Laboratories for the New York State Association of Recyclers.
- DEFRA (2005a). Advanced Biological Treatment of Municipal Solid Waste. Prepared by Enviros Consulting Ltd as part of the New Technologies Supporter Programme, DEFRA, UK,
- EA (2002b). Waste pre-treatment: a review. R&D Technical Report P1-344/TR, AEA Technology Environment, Environment Agency, Bristol, ISBN: 1 857 05842 9.
- Ecoprog & Fraunhofer UMISICHT (2006). The European Market for Waste Incineration Plants: Market Volume – Manufacturers – Strategies – Trends.
- EUNOMIA (2002), Economic analysis of option for managing biodegradable municipal waste, Final Report and Appendices prepared for European Commission.
- Evaluation of Conversion Technology Processes and Products. University of California. 2004.
- Federal Ministry For The Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (2005) «Waste Incineration — A Potential Danger? Bidding Farewell to Dioxin Spouting».
- Freeman M. Harry (1997) «Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal», McGraw-Hill, Second Edition.
- Haug, R.T. (1993). The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers, USA.
- International Ash Working Group (IAWG): A.J. Chandler, T.T. Eighmy, J. Hartlén, O. Hjelm, D.S. Kosson, S.E. Sawell, H.A. van der Sloot, J. Vehlow (1997), Municipal Solid Waste Incineration Residues, Elsevier, Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Tokyo.
- LaGrega, M.D., Buckingham P.L., Evans D.C. (2001) «Hazardous Waste Management», McGraw-Hill.
- Lasaridi K.E. (1998). Compost stability: a comparative evaluation of respirometric techniques. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Leeds, UK.
- Last S. (2006). Joining forces: combining composting and anaerobic digestion into a single plant, CIWM, August 2006 issue, 46-47.
- Malkow, T., Waste Management, Vol. 24, 2004, pp. 53–79.
- O'Brien J. (2001) «Comparison of Air Emissions from Waste-to-Energy Facilities to Fossil Fuel Power Plants».
- RVF - The Swedish Association of Waste Management (2005) «Förbränning av avfall – en kunskapssammanställning om dioxiner» (Waste-to-energy, an inventory and review about dioxins).
- Themelis N. (2003) «An Overview of the Global Waste-to-Energy Industry», Waste Management World, 2003-2004 Review Issue, p. 40-47.
- Themelis N. (2006) «The Role of Waste-to-Energy in the U.S.A.» 3rd Congress of the Confederation of European WTE Plants (CEWEP), Vienna, May 2006.
- Vehlow J. (2006) «State of the Art of incineration Technologies», Proceedings Venice 2006: Biomass and Waste to Energy Symposium, Organized by International (IWWG) and Environmental Sanitary Engineering Center (ESEC).