



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών:
Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΑΚΩΝ
ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ

Διαμάντη Παναγιώτα - Χριστίνα

Υπεύθυνος καθηγητής: Σιδηράς Δημήτριος

Επιβλέπων: Σιδηράς Δημήτριος

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί το τέλος των μεταπτυχιακών μου σπουδών και εκπονήθηκε στα πλαίσια του Δ.Π.Σ.Μ. ‘Τεχνο-οικονομικά Συστήματα’ της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς. Αντικείμενο της εργασίας αποτέλεσε η αξιολόγηση της δυνατότητας των Νοσοκομειακών Απόβλητων να αξιοποιηθούν, μέσω διαφόρων τεχνολογιών, για την παραγωγή βιοκαυσίμων.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δημήτρη Σιδηρά, Καθηγητή ΠΑ.ΠΕΙ., για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση του θέματος αυτού, τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις του. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Γεώργιο Γιακουμάκη, για τις πολύτιμες συμβουλές και την υποστήριξή του. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον κ. Αλέξανδρο Φλάμο, Καθηγητή ΠΑ.ΠΕΙ., και την Δωροθέα Πολίτη, Διδάκτωρ ΠΑ.ΠΕΙ., που αποτέλεσαν μέλη της Επιτροπής μου, για τη συνεργασία.

Θα ήθελα, ακόμα, να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους γονείς μου, Όλγα και Γιώργο και τα αδέρφια μου, Οδυσσέα, Φοίβο και Νεφέλη, για την υποστήριξη και το ενδιαφέρον τους καθ’ όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επιπροσθέτως, θέλω να ευχαριστήσω την φίλη μου Σοφία Φιλιπώνη, για την εμπύχωση και την υπομονή της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας. Τέλος, θα ήταν παράληψή μου να μην ευχαριστήσω την φίλη μου Μαρία Πολεμαρχάκη, η οποία με παρότρυνε να ξεκινήσω το μεταπτυχιακό πρόγραμμα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παραγωγή ιατρικών αποβλήτων (Medical waste, MW) από τη βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης αυξάνεται ραγδαία, γεγονός που αποτελεί μεγάλη απειλή για το περιβάλλον και τους ανθρώπους, λόγω της τοξικότητας και της μολυσματικής τους φύσης. Ως ιατρικά ορίζονται όλα τα απόβλητα που παράγονται από οποιονδήποτε τύπο εγκαταστάσεων υγείας, με κυρίαρχα τα νοσοκομεία. Τα απόβλητα αυτά, βάση νομοθεσίας, πρέπει να επεξεργάζονται με καθορισμένους τρόπους. Σε αυτά τα πλαίσια κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί η δυνατότητα εκμετάλλευσης των παραγόμενων αποβλήτων, μέσω της ασφαλούς διαχείρισής τους, για την παραγωγή προϊόντων αξίας. Αρχικά περιγράφονται οι κατηγορίες, τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά, οι κίνδυνοι που ανακύπτουν για τον άνθρωπο και το περιβάλλον και γίνεται μία σύντομη αναφορά στο Ελληνικό θεσμικό πλαίσιο για την ορθή διαχείριση των ιατρικών αποβλήτων. Έπειτα, παρουσιάζεται το σύνολο των σταδίων που πρέπει να διέπουν την σωστή διαχείρισή τους. Περιγράφονται αναλυτικά ο διαχωρισμός και η συλλογή, η μεταφορά και η αποθήκευση τους. Δίνεται έμφαση στις τεχνολογίες προεπεξεργασίας των επικίνδυνων μολυσματικών νοσοκομειακών αποβλήτων που εμπίπτουν σε πέντε κατηγορίες: θερμικές, χημικές, βιολογικές, μηχανικές και διεργασίες ακτινοβολίας. Περιγράφεται επίσης η τελική διάθεση των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής. Στην συνέχεια εξετάζονται οι μέθοδοι μετατροπής των απορριμμάτων βιομάζας των ιατρικών αποβλήτων, και ειδικότερα της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας τους, για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Ένα μεγάλο τμήμα της ροής αποβλήτων των νοσοκομείων φαίνεται ότι αποτελείται από οργανικά λιγνοκυτταρινούχα υλικά, ενώ παράλληλα τα υλικά αυτά μπορούν να αποτελέσουν μία πρώτη ύλη με σταθερή ροή, οικονομική και διαθέσιμη σε αφθονία. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι Βιοχημικές και Θερμοχημικές διεργασίες, για τις οποίες τα νοσοκομειακά απόβλητα θα μπορούσαν να απολέσουν πρώτες ύλες. Συγκεκριμένα, αναλύονται η Αναερόβια Χώνευση και η Ζύμωση, που ανήκουν στις Βιοχημικές Διεργασίες και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοαερίου και βιοαιθανόλης αντίστοιχα, και η Αεριοποίηση, η Πυρόλυση και η Υδροθερμική Υγροποίηση, που υπάγονται στις Θερμοχημικές μεθόδους και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αερίου σύνθεσης, βιοελαίου και εξανθρακώματος.

Λέξεις κλειδιά: Νοσοκομειακά απόβλητα, Λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα, Θερμοχημικές διεργασίες, Βιοχημικές διεργασίες, Βιοκαύσιμα

ABSTRACT

The production of Medical Waste (MW) by healthcare industry is increasing rapidly, which poses a major threat to the environment and humans, due to their toxicity and infectious nature. The term Medical waste is used to describe all waste generated by any type of healthcare facility, mainly hospitals. This waste, according to legislation, must be treated through well-defined ways. Based on the above, the possibility to exploit the generated waste, through their safe management process, for the production of added value products should be investigated. Initially, the categories, qualitative and quantitative characteristics, the risks that arise for human and environment are described and a brief reference to the Greek institutional framework, regarding the proper management of medical waste, is performed. Subsequently, the set of steps that should govern their proper management is presented. Medical waste separation and collection, transport and storage are described in detail. Emphasis is given on the pretreatment technologies of hazardous and infectious hospital waste that fall into five categories: thermal, chemical, biological, mechanical and irradiation treatment. The final disposal of medical waste in landfills is also described. Following, the methods of the conversion of biomass included in medical waste, in particular the lignocellulosic biomass, to biofuels are examined. A large part of the hospital waste stream seems to consist of organic lignocellulosic materials, while at the same time this type of biomass can be a raw material with a stable supply, economical and widely available. The methods presented in the current work are Biochemical and Thermochemical processes, for which hospital waste could be utilized as raw material. Specifically, Anaerobic Digestion and Fermentation are thoroughly presented, which belong to the Biochemical Processes and are used for the production of biogas and bioethanol, respectively. Moreover the Gasification, Pyrolysis and Hydrothermal Liquefaction, which fall under the Biochemical methods for the production of Syngas, Bio-oil and Bio-char are analyzed.

Key words: *Medical waste, Lignocellulosic biomass, Thermochemical process, Biochemical process, Bio-fuels*

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ABSTRACT.....	iv
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΑΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	4
1.1 Ορισμός και πηγές ιατρικών αποβλήτων – Νοσοκομειακά απόβλητα.....	4
1.2 Ταξινόμηση.....	6
1.2.1 Μη επικίνδυνα γενικά απόβλητα	8
1.2.2 Μολυσματικά απόβλητα	9
1.2.3 Παθολογικά απόβλητα.....	10
1.2.4 Φαρμακευτικά απόβλητα – γενotoξικά απόβλητα	10
1.2.5 Χημικά απόβλητα	11
1.2.6 Ραδιενεργά απόβλητα	13
1.2.7 Απόβλητα αιχμηρών εργαλείων.....	14
1.3 Σύσταση – Ποσοτικά χαρακτηριστικά.....	14
1.4 Κίνδυνοι για την υγεία και το περιβάλλον.....	19
1.5 Ελληνικό Νομοθετικό Πλαίσιο ορθής διαχείριση ιατρικών αποβλήτων.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΑΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	24
2.1 Διαχωρισμός και συλλογή	26
2.1.1 Δοχεία απορριμμάτων – σήμανση	27
2.1.2 Διαχωρισμός και συλλογή μη επικίνδυνων αποβλήτων	28
2.1.3 Διαχωρισμός και συλλογή επικίνδυνων αποβλήτων	29
2.2 Μεταφορά	32
2.2.1 Μεταφορά εντός της μονάδας υγείας	32
2.2.2 Τροχήλατα μέσα μεταφοράς.....	33
2.2.3 Μεταφορά εκτός χώρου νοσοκομείου	35
2.3 Αποθήκευση.....	36
2.3.1 Κεντρική αποθήκευση αποβλήτων	36
2.3.2 Αποθήκευση μολυσματικών αποβλήτων	37
2.3.3 Αποθήκευση παθολογικών αποβλήτων	37
2.3.4 Αποθήκευση φαρμακευτικών αποβλήτων	37
2.3.5 Αποθήκευση χημικών αποβλήτων	38

2.3.6 Αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων	39
2.4 Επεξεργασία και τελική διάθεση μολυσματικών αποβλήτων	40
2.4.1 Θερμικές διεργασίες	41
2.4.2 Χημικές διεργασίες	49
2.4.3 Τεχνολογίες ακτινοβολίας	50
2.4.4 Βιολογικές διεργασίες.....	50
2.4.5 Μηχανικές διεργασίες.....	51
2.4.6 Υγειονομική ταφή νοσοκομειακών αποβλήτων	51
2.4.7 Επίδραση της κάθε μεθόδου στα νοσοκομειακά απόβλητα	53
2.5 Διαχείριση μη-επικίνδυνων νοσοκομειακών αποβλήτων	55
2.5.1 Κομποστοποίηση	56
2.5.2 Παραγωγή ζωοτροφών.....	58
2.5.3 Ανακύκλωση.....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΠΟ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΑΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	60
3.1 Προεπεξεργασία λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας.....	64
3.2 Βιοχημικές διεργασίες	69
3.2.2 Αναερόβια χώνευση.....	69
3.2.3 Ζύμωση	77
3.3 Θερμοχημικές διεργασίες	84
3.3.1 Αεριοποίηση	84
3.3.2 Πυρόλυση	90
3.3.3 Υδροθερμική Υγροποίηση.....	97
3.4 Σύγκριση Μεθόδων Παραγωγής Βιοκαυσίμων	101
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	104
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	106

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Διάκριση αποβλήτων (Αραβώσης Κ., 2008).....	5
Σχήμα 2. Τυπική συνεισφορά διαφορετικών υπηρεσιών υγείας στην παραγωγή ιατρικών αποβλήτων (UNEP, 2012).	6
Σχήμα 3. Σύνθεση νοσοκομειακών αποβλήτων (WHO, 2014).	7
Σχήμα 4. Τυπική σύσταση νοσοκομειακών αποβλήτων (Αραβώσης Κ., 2008).....	15
Σχήμα 5. Σύσταση νοσοκομειακών αποβλήτων που αφορά μια περιοχή στη βόρειο Ελλάδα (Halazonitis P.P., 2016).	16
Σχήμα 6. Μέση σύσταση αποβλήτων αστικού χαρακτήρα σε νοσοκομείο (Halazonitis P.P., 2016).	16
Σχήμα 7. Διάγραμμα με τις διαθέσιμες τεχνολογίες επεξεργασίας νοσοκομειακών αποβλήτων (προσαρμογή από Patil A. D., 2001).	24
Σχήμα 8. Παραγόμενα απόβλητα: Γενικά, μολυσματικά και αιχμηρά απόβλητα (WHO, 2017).	27
Σχήμα 9 Αναγνωριστικά σήματα επικίνδυνων και ραδιενεργών (παλαιά και νέα) νοσοκομειακών αποβλήτων (WHO, 2014).....	28
Σχήμα 10. Πλαστικός σάκος για μολυσματικά απόβλητα, τροχήλατα hospital boxes και περιέκτης αιχμηρών αντικειμένων με την ειδική σήμανση (Καράμπαμπα Φ., 2013).....	30
Σχήμα 11. Τροχήλατα μέσα μεταφοράς νοσοκομειακών αποβλήτων (WHO, 2014).....	34
Σχήμα 12. Οχήματα εξω-νοσοκομειακής μεταφοράς αποβλήτων (Αραβώσης Κ., 2008).....	35
Σχήμα 13. Αριστερά: Προηγμένη αποθήκευση χημικών σε διαφορετικές θέσεις, Δεξιά: Αποθήκευση υγρών χημικών αποβλήτων σε ανθεκτικούς πλαστικούς περιέκτες (WHO, 2014).	39
Σχήμα 14. Κλίβανοι υγρής αποστείρωσης (Αραβώσης Κ., 2008).....	42
Σχήμα 15. Μονάδα αποστείρωσης αποβλήτων με τη μέθοδο των μικροκυμάτων (Αραβώσης Κ., 2008).	44
Σχήμα 16. Αριστερά: Απλός αποτεφρωτήρας μαζικής καύσης και Δεξιά: Περιστροφικός αποτεφρωτήρας (Αραβώσης Κ., 2008).....	47
Σχήμα 17. Περιστροφικός αποτεφρωτήρας (UNEP, 2012).	48
Σχήμα 18. Τρόποι διαχείρισης μη επικίνδυνων νοσοκομειακών αποβλήτων (ΕΡΤΑ, 2006)..	56
Σχήμα 19. Νοσοκομειακά απόβλητα αστικού τύπου (HCWH, 2005).....	59
Σχήμα 20. Δομή λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας (Philbrook A., 2013)	64
Σχήμα 21. Παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης (Celigis, n.d.)	71
Σχήμα 22. Σχηματική αναπαράσταση της παραγωγής αιθανόλης από υλικά πλούσια σε σάκχαρα, άμυλο και λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα (Vohra M., 2014).	79
Σχήμα 23. Σχηματική αναπαράσταση της παραγωγής αιθανόλης από λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα (Tran T.T.A., 2019)	79
Σχήμα 24. Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής των συστατικών της βιομάζας σε προϊόντα. (Zaman C.Z., 2017)	91
Σχήμα 25. Εφαρμογές βιο-ελαίου (Uddin M.N., 2018).....	95
Σχήμα 26. Οδός αντίδρασης της υδροθερμικής υγροποίησης. (Gollakota A.R.K., 2018).....	99

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Ταξινόμηση των νοσοκομειακών αποβλήτων σύμφωνα με την Ε.Ε και τον WHO (Αραβώσης Κ., 2008).	7
Πίνακας 2. Ετήσια παραγωγή αποβλήτων ανάλογα με την οικονομική κατάσταση της χώρας (Αραβώσης Κ., 2008).	17
Πίνακας 3. Ενέργειες για το διαχωρισμό και τη συλλογή αποβλήτων (UNEP, 2012; WHO, 2017).	32
Πίνακας 4. Επίδραση μεθόδων επεξεργασίας αποβλήτων σε βασικές περιβαλλοντικές παραμέτρους. (UNEP, 2012)	53
Πίνακας 5. Μέθοδοι παραγωγής βιοκαυσίμων (Lee S.Y., 2019; Garcia B.B., 2019, Plácido J., 2016).....	62
Πίνακας 6. Μέθοδοι προεπεξεργασίας της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας. (Salakkan A., 2019; Rajendran K., 2011; Xu N., 2019; Philbrook A., 2013; Nanda S., 2014; Ramos A., 2018; Liu Q., 2017).....	67
Πίνακας 7. Σύνθεση βιοαερίου. (Rajendran K., 2011)	70
Πίνακας 8. Αντιδράσεις κατά την αεριοποίηση (Molino A., 2018).	86
Πίνακας 9. Σύγκριση των διαφόρων τύπων πυρόλυσης. (Cai X., 2020).....	93
Πίνακας 10. Συγκριτική σύνοψη των διαφορετικών τεχνολογιών. (Garcia B.B., 2019; Nizami A.S., 2017, Cai X., 2020).....	102

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ιατρικά απόβλητα ορίζονται ως όλα τα απόβλητα που παράγονται από οποιονδήποτε τύπο εγκαταστάσεων υγείας, όπως νοσοκομεία, σχετικά εργαστήρια και ερευνητικά κέντρα, κτηνιατρικές κλινικές, γηροκομεία, τράπεζες αίματος και υπηρεσίες συλλογής αίματος. Μία τυπική κατηγοριοποίηση των αποβλήτων είναι σε μολυσματικά απόβλητα, χημικά/ραδιενεργά και γενικά –μη μολυσματικά– απόβλητα. (Sabir S., 2016; WHO, 2014)

Η ακατάλληλη διαχείριση ιατρικών αποβλήτων έχει αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στον αέρα, το νερό και το έδαφος και κατ' επέκταση στον ίδιο τον άνθρωπο. Περιβαλλοντικά προβλήματα μπορούν να προκύψουν από την απλή παραγωγή ιατρικών αποβλήτων, καθώς και από τη διαδικασία χειρισμού, επεξεργασίας και διάθεσης τους. Αερομεταφερόμενα παθογόνα ή σπόρια που υπάρχουν στα απόβλητα μπορούν να εισέλθουν, και παραμένουν στον αέρα μέσα στο νοσοκομείο για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ αν τα απόβλητα απορριφθούν ή μεταφερθούν χωρίς κατάλληλη προ-κατεργασία έξω από το νοσοκομείο, παθογόνα μπορούν να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα. (Manyele S.V., 2004). Ρύπανση των υδάτων μπορεί να προκληθεί από τα επικίνδυνα νοσοκομειακά απόβλητα εάν μεταφερθούν σε πεδινές περιοχές ή λίμνες, άμεσα ή έμμεσα. Εάν υγρά απόβλητα καταλήξουν σε οποιαδήποτε πηγή καθαρού νερού, προκαλείται μόλυνση του ύδατος, καθώς το νερό αποτελεί ευνοϊκό περιβάλλον για ανάπτυξη βακτηρίων. (Kabbashi F.M., 2018)

Τα ιατρικά απόβλητα δεν πρέπει να αναμειγνύονται με άλλα απόβλητα και θα πρέπει μάλιστα να διαχωρίζονται σε καλά επισημασμένα δοχεία ή σακούλες στο το σημείο παραγωγής πριν από την αποθήκευση, μεταφορά, επεξεργασία και απόρριψή τους. (Manyele S.V., 2004) Ο διαχωρισμός αναφέρεται στο βασικό διαχωρισμό των διαφόρων κατηγοριών αποβλήτων στην πηγή όπου παράγονται, με στόχο να μειώνονται οι κίνδυνοι καθώς και το κόστος χειρισμού και διάθεσης. Ο αποτελεσματικός διαχωρισμός είναι πολύ κρίσιμο βήμα καθώς οδηγεί σε πιο αποτελεσματική διαχείριση των βιοϊατρικών αποβλήτων. (Vikaspedia)

Δύο από τις κύριες μεθόδους απόρριψης των επικίνδυνων αποβλήτων είναι η υγειονομική ταφή και η καύση (αποτέφρωση), αλλά αυτές οι μέθοδοι έχουν πολλά μειονεκτήματα. Η τελική διάθεση όλων των τύπων ιατρικών αποβλήτων γίνεται στον χώρο υγειονομικής ταφής, τα βιοϊατρικά υγρά απόβλητα απορρίπτονται στον χώρο υγειονομικής ταφής, αφού υποβληθούν σε χημική επεξεργασία. Σε αυτήν την περίπτωση, η ρύπανση του εδάφους είναι αναπόφευκτη, αλλά μπορεί να μειωθεί με κατάλληλη επεξεργασία. Από την άλλη πλευρά, ο

τοξικός αέρας και η τοξική τέφρα, που εκπέμπονται κατά την αποτέφρωση ιατρικών αποβλήτων, είναι η κύρια πηγή περιβαλλοντικών διοξινών. Η τοξική τέφρα που μεταφέρεται στη γη μπορεί να οδηγήσει σε μόλυνση μεγάλων εκτάσεων, καθώς και της τροφής ορισμένων ζώων και των παραγώγων τους (π.χ. γάλα). Όταν στην συνέχεια αυτά καταναλώνονται από τον άνθρωπο παρατηρείται το φαινόμενο της βιο-μεγέθυνσης. Ο τοξικός αέρας που εκπέμπεται από την αποτέφρωση είναι εξαιρετικά επιβλαβής και μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικές νόσους και καρκίνο.

Μια έκθεση που δημοσιεύθηκε από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO) το 1996, εντοπίζει ότι πάνω από 50000 άνθρωποι πεθαίνουν καθημερινά λόγω μολυσματικών ασθενειών. Ένας από τους κύριους λόγους για την αύξηση των μολυσματικών ασθενειών είναι ο ακατάλληλος χειρισμός και διαχείριση των βιοϊατρικών αποβλήτων. (Kabbashi F.M., 2018)

Τα επικίνδυνα απόβλητα αποτελούν το 10-25% του συνόλου των νοσοκομειακών αποβλήτων και μπορούν να απορριφθούν μέσω υγειονομικής ταφής ή αποτέφρωσης, εάν ληφθούν κατάλληλα μέτρα. (Kabbashi F.M., 2018) Το υπόλοιπο 75-90% των νοσοκομειακών αποβλήτων, αποτελούν τα αστικού τύπου απόβλητα, τα οποία θεωρούνται μη επικίνδυνα. Προέρχονται από τις δραστηριότητες εστίασης, και περιλαμβάνουν μη επικίνδυνα υλικά όπως γυαλί, χαρτόνι και πλαστικό. (Σανίδα Γ., 2011)

Η χρήση αποβλήτων και υπολειμμάτων βιομάζας, που παράγονται σε διάφορους τομείς σε ολόκληρο τον κόσμο, θεωρείται ότι είναι η πιο οικονομική διαδικασία για την παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συνδυάζοντας παράλληλα οφέλη για το περιβάλλον. Η επεξεργασία της βιομάζας των αποβλήτων μέσω θερμοχημικών, χημικών και βιολογικών μεθόδων οδηγεί στην παραγωγή βιοκαυσίμων, όπως είναι το βιοντίζελ, η βιοαιθανόλη, το βιοαέριο και το βιοέλαιο. (Lee S.Y., 2019).

Η ενέργεια που περιέχεται στη βιομάζα αποβλήτων έχει λάβει αυξημένη προσοχή. Λαμβάνοντας υπόψη την αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, τους 1.2 δισεκατομμύρια ανθρώπους (17% του παγκόσμιου πληθυσμού) χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα και 2.7 δισεκατομμύρια άτομα (38% του παγκόσμιου πληθυσμού) τα οποία εξακολουθούν να βασίζονται στην ξυλεία για οικιακές ανάγκες, η ενέργεια που προέρχεται από βιολογικά απόβλητα παρουσιάζει εξαιρετικά μεγάλο ενδιαφέρον. Επιπλέον, η αυξανόμενη παγκόσμια κινητικότητα σε συνδυασμό με τα φθίνοντα αποθέματα πετρελαίου παγκοσμίως, αυξάνουν

το ενδιαφέρον προς την ανάπτυξη τεχνολογιών για την μετατροπή και αναβάθμιση προϊόντων που προέρχονται από βιολογικά απόβλητα σε καύσιμα μεταφοράς. (Lohri C.R., 2017)

Στον αναπτυσσόμενο κόσμο, λόγω της βελτιωμένης πρόσβασης σε ιατρικές υπηρεσίες σε όλο και μεγαλύτερο αριθμό ατόμων, καθώς και του ταχέως γηράσκοντος πληθυσμού, που είναι ο κύριος μοχλός της αύξησης της χρήσης του ιατρικού συστήματος, η παραγωγή ιατρικών αποβλήτων αυξάνεται. (Windfeld E.S, 2015) Ως εκ τούτου, τα νοσοκομειακά απόβλητα, καθώς περιλαμβάνουν σε ένα μεγάλο ποσοστό απόβλητα με οργανική προέλευση, θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια πολλά υποσχόμενη πρώτη ύλη για τη βιοενέργεια, εάν αναπτυχθούν αποτελεσματικές και οικονομικά βιώσιμες τεχνολογίες. (Lee S.Y, 2019).

Η επεξεργασία της βιομάζας των νοσοκομειακών αποβλήτων, καθώς και των ανακυκλώσιμων υλικών (χαρτί, πλαστικό), μπορεί να προσφέρει στη δημόσια υγεία περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη μετατρέποντας τα απόβλητα σε βιοκαύσιμο. Εκτός από την άμεση χρήση, με εφαρμογή στο έδαφος, σε ζωοτροφές ή άμεση καύση, μπορούν να εφαρμοστούν οι ακόλουθες διεργασίες για την παραγωγή βιοκαυσίμων:

- βιολογική επεξεργασία: με την αναερόβια χώνευση γίνεται παραγωγή βιοαερίου και μέσω της ζύμωσης λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας παράγεται βιοαιθανόλη,
- φυσικοχημική επεξεργασία: μέσω της μετεστεροποίησης υπολειμματικών ζωικών λιπών και ελαίων παράγεται βιοντίζελ
- θερμο -χημική επεξεργασία: μέσω της πυρόλυσης παράγεται βιοέλαιο. (Lohri C.R., 2017; Naik S.N., 2010)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΑΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Τα απόβλητα, που προέρχονται κυρίως από κέντρα υγείας, αποτελούν μία από τις κύριες πηγές αποβλήτων σε μία πόλη. Προτεραιότητα πρέπει να δίνεται στην διαχείρισή τους, λόγω των καταστροφικών επιπτώσεων που μπορούν να επιφέρουν στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Πριν την ανάπτυξη ενός σχεδίου διαχείρισης των στερεών νοσοκομειακών αποβλήτων, βασικό βήμα είναι η εις βάθος κατανόηση των χαρακτηριστικών, της σύστασης και της επικινδυνότητας τους. Στην συνέχεια πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή των διαφόρων τύπων των ιατρικών αποβλήτων, των κινδύνων που ενέχουν, αλλά και της νομοθεσίας που διέπει την διαχείρισή τους. (Wafula S.T., 2019; Yousefi Z., 2017; Diaz L.F., 2008)

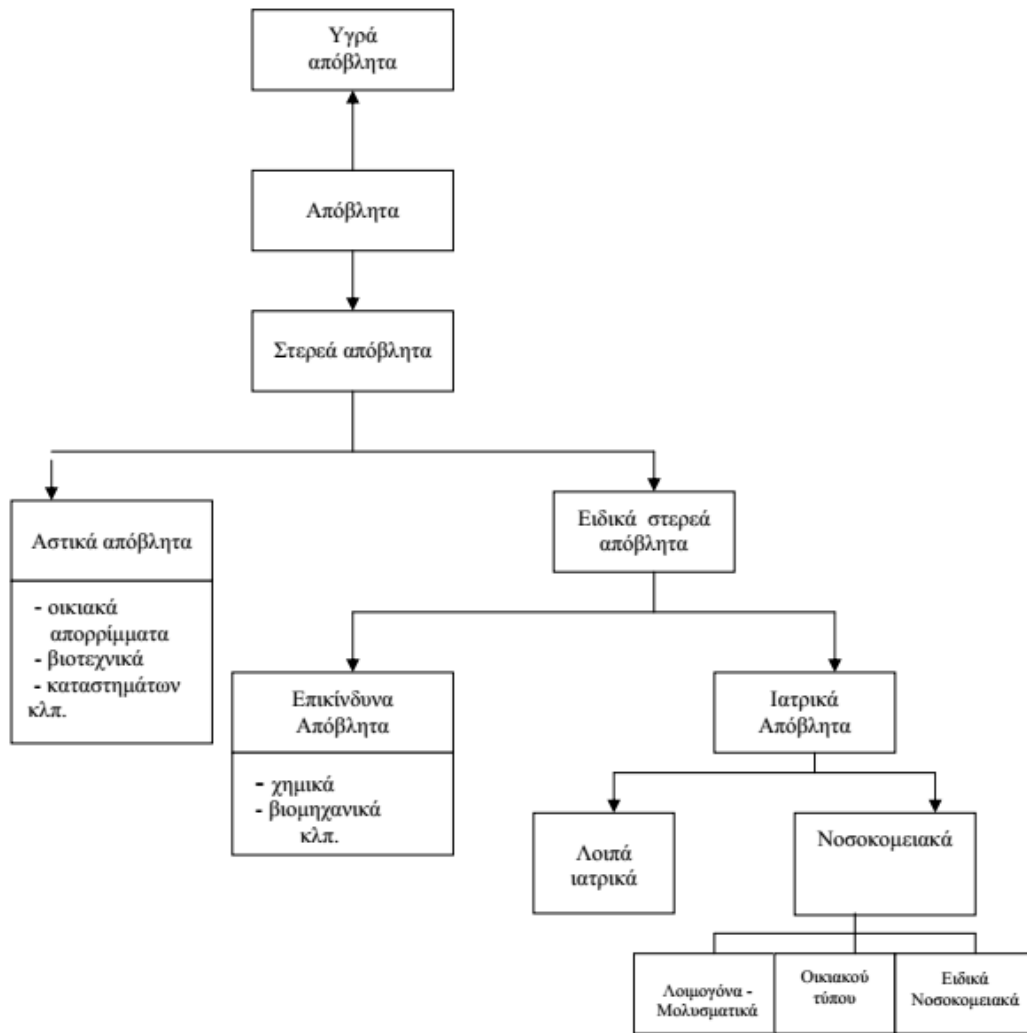
1.1 Ορισμός και πηγές ιατρικών αποβλήτων – Νοσοκομειακά απόβλητα

Αρχικά, ως απόβλητο ορίζεται κάθε αγαθό το οποίο δεν προορίζεται για κάποιο σκοπό, ούτε εξυπηρετεί κάποια ανάγκη και ως εκ τούτου απορρίπτεται στο περιβάλλον δεδομένου ότι δεν υπάρχει λόγος ύπαρξής του. (Αραβώσης Κ., 2008) Μία γενική διάκριση των αποβλήτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.

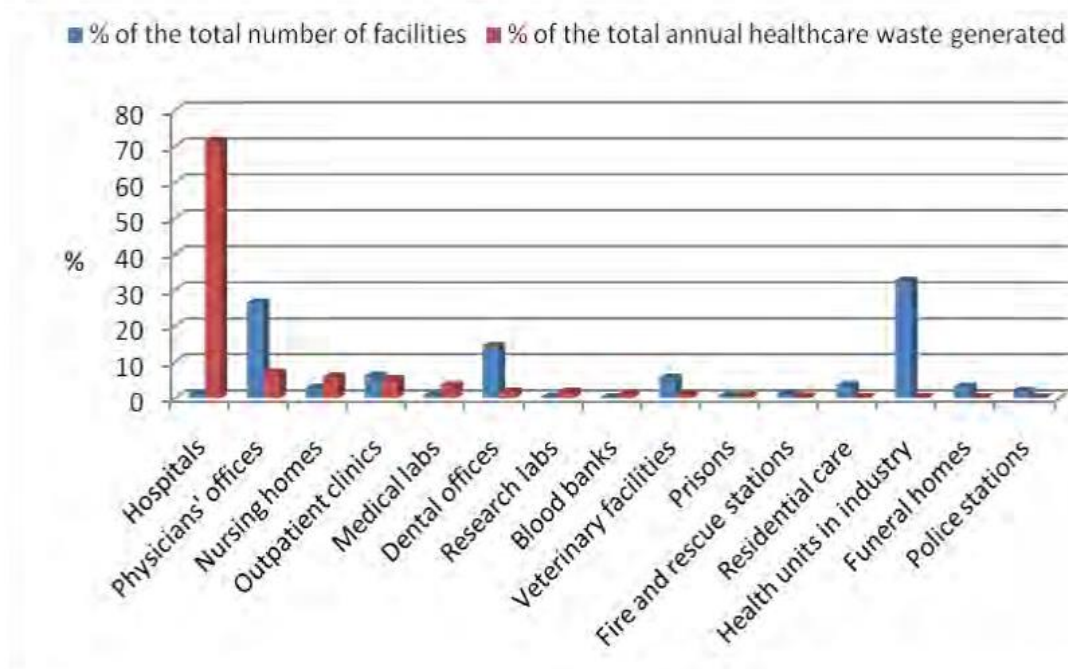
Τα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης μπορούν να οριστούν ως όλα τα απόβλητα που παράγονται από μονάδες παροχής υπηρεσιών υγείας, ιατρικά εργαστήρια και εγκαταστάσεις βιοϊατρικής έρευνας, καθώς και απόβλητα από δευτερεύουσες ή διάσπαρτες πηγές, όπως η υγειονομική περίθαλψη στο σπίτι.

Ένας άλλος κοινώς χρησιμοποιούμενος ορισμός των ιατρικών αποβλήτων είναι: τυχόν απόβλητα, επικίνδυνα ή όχι, που δημιουργούνται κατά τη διάγνωση, τη θεραπεία ή την ανοσοποίηση ανθρώπων ή ζώων, ή απόβλητα που παράγονται σε έρευνα που σχετίζεται με τις προαναφερθείσες δραστηριότητες, ή απόβλητα που παράγονται κατά την παραγωγή ή τον έλεγχο βιολογικών δειγμάτων (UNEP, 2012).

Ειδικότερα, πηγές ιατρικών αποβλήτων αποτελούν κυρίως τα νοσοκομεία, οι κλινικές και τα ιατρεία, τα κέντρα επειγόντων περιστατικών, τα ιατρικά εργαστήρια, οι τράπεζες αίματος και τα κτηνιατρεία (Σχήμα 2). (Αραβώσης Κ., 2008)



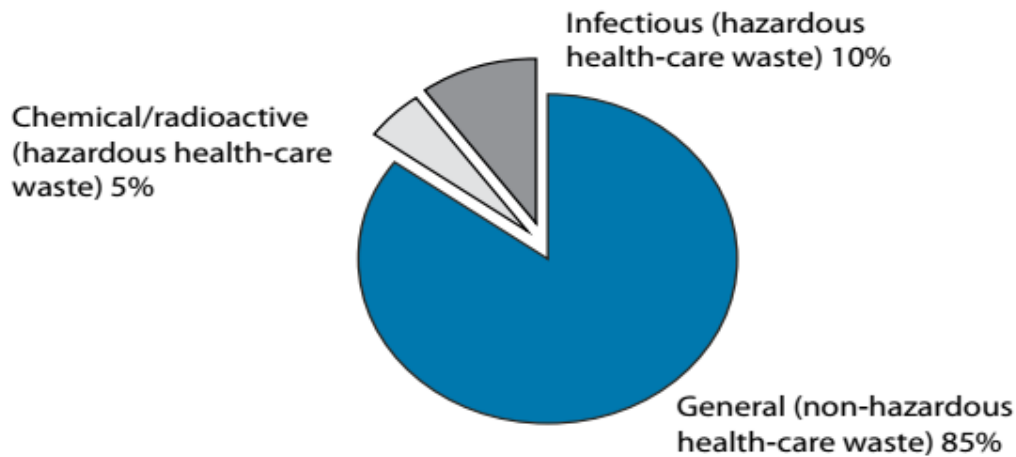
Σχήμα 1. Διάκριση αποβλήτων (Αραβώσης Κ., 2008).



Σχήμα 2. Τυπική συνεισφορά διαφορετικών υπηρεσιών υγείας στην παραγωγή ιατρικών αποβλήτων (UNEP, 2012).

1.2 Ταξινόμηση

Ένα ποσοστό της τάξης του 75% με 90% των αποβλήτων που παράγονται από μονάδες υγειονομικής περίθαλψης είναι συγκρίσιμο με τα οικιακά απόβλητα και συνήθως ονομάζεται «μη επικίνδυνα» ή «γενικά νοσοκομειακά απόβλητα». Προέρχονται κυρίως από τις δραστηριότητες εστίασης και καθαριότητας σε εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης και μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν απορρίμματα συσκευασίας και απόβλητα που παράγονται κατά τη συντήρηση κτιρίων υγειονομικής περίθαλψης (Σχήμα 3). Το υπόλοιπο 10–25% των αποβλήτων θεωρείται «επικίνδυνο» και μπορεί να ενέχει ποικίλους περιβαλλοντικούς και υγειονομικούς κινδύνους. (WHO, 2014)



Σχήμα 3. Σύνθεση νοσοκομειακών αποβλήτων (WHO, 2014).

Σύμφωνα με τον κατάλογο της Ευρωπαϊκής Ένωσης σε αντιστοιχία με τον κατάλογο του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO) η ταξινόμηση των νοσοκομειακών αποβλήτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 (Αραβώσης Κ., 2008):

Πίνακας 1. Ταξινόμηση των νοσοκομειακών αποβλήτων σύμφωνα με την Ε.Ε και τον WHO (Αραβώσης Κ., 2008).

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΤΗΣ ΕΕ	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΤΟΥ WHO
18 01 01 αιχμηρά (με εξαίρεση αυτά της 18 01 03)	Μη επικίνδυνα απόβλητα: Απόβλητα που δεν δημιουργούν συγκεκριμένο βιολογικό, χημικό, ραδιενεργό ή φυσικό κίνδυνο
18 01 02 ανθρώπινα μέλη, όργανα και υλικά που έχουν έρθει σε επαφή με αίμα (με εξαίρεση αυτά της κατηγορίας 18 01 03)	Μολυσματικά απόβλητα: Απόβλητα που πιθανώς περιέχουν παθογόνα, ενέχοντας τον κίνδυνο μετάδοσης ασθενειών
18 01 03 απόβλητα των οποίων η συλλογή και διάθεση ακολουθούν συγκεκριμένη διαδικασία ώστε να μη γίνει η διάδοση	Παθολογικά απόβλητα: Ανθρώπινοι ιστοί, όργανα ή υγρά, μέλη του σώματος, έμβρυα, αχρησιμοποίητα προϊόντα αίματος

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΤΗΣ ΕΕ	ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΤΟΥ WHO
<p>επικίνδυνων ασθενειών</p> <p>18 01 04 απόβλητα των οποίων η συλλογή και διάθεση δεν ακολουθούν συγκεκριμένη διαδικασία ώστε να μη γίνει η διάδοση επικίνδυνων ασθενειών</p> <p>18 01 06 χημικά σκευάσματα στα οποία περιέχονται επικίνδυνα συστατικά</p> <p>18 01 07 χημικά σκευάσματα που δεν ανήκουν στην προηγούμενη κατηγορία</p> <p>18 01 08 κυτταροτοξικές ουσίες</p> <p>18 01 09 ουσίες που δεν περιλαμβάνονται στην προηγούμενη κατηγορία</p> <p>18 01 10 απόβλητα αμαλγάματος από οδοντιατρικές εργασίες</p> <p>18 01 11 μεταλλικά αντικείμενα των οποίων το περίβλημα αποτελείται από στερεό πορώδες υλικό, όπως ο αμίαντος</p>	<p>Φαρμακευτικά απόβλητα – γενotoξικά απόβλητα: Φαρμακευτικά προϊόντα που έχουν λήξει ή δεν χρειάζονται πλέον, είδη που έχουν μολυνθεί από ή περιέχουν φαρμακευτικά προϊόντα, καθώς και απόβλητα που περιέχουν ουσίες με γενotoξικές ιδιότητες (π.χ. απόβλητα που περιέχουν κυτταροστατικά φάρμακα - χρησιμοποιούνται συχνά στη θεραπεία του καρκίνου)</p> <p>Χημικά απόβλητα: Απόβλητα που περιέχουν χημικές ουσίες (π.χ. εργαστηριακά αντιδραστήρια, απολυμαντικά που έχουν λήξει ή δεν χρειάζονται πλέον, διαλύτες, απόβλητα με υψηλή περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα)</p> <p>Ραδιενεργά απόβλητα: Απόβλητα που περιέχουν ραδιενεργές ουσίες (π.χ. αχρησιμοποίητα υγρά από ακτινοθεραπεία ή εργαστηριακή έρευνα, μολυσμένα γυάλινα σκεύη, συσκευασίες ή απορροφητικό χαρτί, ούρα και περιττώματα από ασθενείς που υποβλήθηκαν σε θεραπεία ή έλεγχο με αποσφραγισμένα ραδιονουκλίδια)</p> <p>Αιχμηρά απόβλητα: χρησιμοποιημένα ή μη αιχμηρά αντικείμενα</p>

Οι κατηγορίες των νοσοκομειακών αποβλήτων με βάση το WHO αναλύονται στην συνέχεια.

1.2.1 Μη επικίνδυνα γενικά απόβλητα

Μη επικίνδυνα ή γενικά απόβλητα είναι τα απόβλητα που δεν έχουν έλθει σε επαφή με μολυσματικούς παράγοντες, επικίνδυνες χημικές ουσίες ή ραδιενεργές ουσίες, ενώ παράλληλα δεν είναι αιχμηρά. Ένα σημαντικό ποσοστό (περίπου 85%) όλων των αποβλήτων από τις νοσοκομειακές μονάδες είναι μη επικίνδυνα απόβλητα και συνήθως είναι παρόμοιο σε χαρακτηριστικά με τα αστικά στερεά απόβλητα. Περισσότερο από το ήμισυ όλων των μη επικίνδυνων αποβλήτων από νοσοκομεία είναι χαρτί, χαρτόνι και πλαστικά, ενώ τα υπόλοιπα περιλαμβάνουν απορριπτόμενα τρόφιμα, μέταλλα, γυαλί, υφάσματα, πλαστικά και ξύλο.

Σε πολλά μέρη, κοινοτικές και κανονιστικές απαιτήσεις ενθαρρύνουν και προωθούν την ανακύκλωση υλικών. Στο παρελθόν, όλα ή τα περισσότερα μη επικίνδυνα και αστικά απόβλητα απορρίπτονταν σε χωματερές ή χώρους υγειονομικής ταφής ή αποτεφρώνονταν σε δημοτικούς αποτεφρωτήρες. Η αυξανόμενη ευαισθητοποίηση αναφορικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αποβλήτων και η αναγνώριση ότι τα περισσότερα από τα μη επικίνδυνα απόβλητα, από εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης, είναι δυνητικά ανακυκλώσιμα ή λιπασματοποιήσιμα, έχουν αλλάξει τις προσεγγίσεις στη διαχείριση των γενικών αποβλήτων. (WHO, 2014)

1.2.2 Μολυσματικά απόβλητα

Τα μολυσματικά απόβλητα ενοχοποιούνται για την ύπαρξη παθογόνων (βακτήρια, ιούς, παράσιτα ή μύκητες) σε επαρκή συγκέντρωση ή ποσότητα που προκαλεί ασθένεια σε ευαίσθητους ξενιστές. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει:

- απόβλητα μολυσμένα με αίμα ή άλλα υγρά του σώματος
- καλλιέργειες και αποθέματα μολυσματικών παραγόντων από εργαστηριακές εργασίες
- απόβλητα από μολυσμένους ασθενείς σε θαλάμους απομόνωσης

Τα απόβλητα που έχουν μολυνθεί με αίμα ή άλλα υγρά του σώματος περιλαμβάνουν ελεύθερο αίμα, συστατικά αίματος και άλλα υγρά του σώματος, επιδέσμους, μπατονέτες, γάντια, μάσκες και άλλο υλικό μολυσμένο με αίμα ή άλλα υγρά σώματος, καθώς και απόβλητα που έχουν έρθει σε επαφή με το αίμα των ασθενών που υποβάλλονται σε αιμοκάθαρση (π.χ. εξοπλισμός αιμοκάθαρσης, όπως σωλήνες και πετσέτες μίας χρήσης, ενδυμασίες, ποδιές, γάντια και στολές εργαστηρίου).

Οι εργαστηριακές καλλιέργειες είναι εξαιρετικά μολυσματικά απόβλητα. Απόβλητα από αυτοψίες, σώματα ζώων και άλλα απόβλητα που έχουν εμβολιαστεί, μολυνθεί ή έρθει σε επαφή με μολυσματικούς παράγοντες είναι εξαιρετικά μολυσματικά απόβλητα. Τα απορριφθέντα όργανα ή υλικά που έχουν έρθει σε επαφή με άτομα ή ζώα που έχουν μολυνθεί πρέπει επίσης να θεωρούνται μολυσματικά απόβλητα.

Τα απόβλητα από μολυσμένους ασθενείς σε θαλάμους απομόνωσης περιλαμβάνουν περιττώματα, επιδέσμους από μολυσμένες ή χειρουργικές πληγές και ρούχα λερωμένα με ανθρώπινο αίμα ή άλλα υγρά σώματος. Τα απόβλητα από μη μολυσμένους ασθενείς, τα

οποία δεν έχουν μολυνθεί με αίμα ή υγρά σώματος μπορεί να θεωρηθούν μη μολυσματικά. Κατάλληλη ομάδα ελέγχου, σε περιπτώσεις λοίμωξης, ή το ιατρικό προσωπικό πρέπει να καθορίσουν εάν τα απόβλητα από ασθενείς σε απομόνωση θα πρέπει να ταξινομηθούν ως μολυσματικά απόβλητα. Για την αξιολόγηση του κινδύνου μετάδοσης ασθενειών από τοπικές πρακτικές που χρησιμοποιούνται στη συλλογή, διαχείριση, μεταφορά, επεξεργασία και διάθεση αποβλήτων, πρέπει να εφαρμόζονται ειδικές αρχές - Αρχές της αλυσίδας λοίμωξης. (WHO, 2014)

1.2.3 Παθολογικά απόβλητα

Τα παθολογικά απόβλητα θα μπορούσαν να θεωρηθούν υποκατηγορία των μολυσματικών αποβλήτων, αλλά ταξινομούνται χωριστά - ειδικά όταν χρησιμοποιούνται ειδικές μέθοδοι χειρισμού, επεξεργασίας και διάθεσης. Τα παθολογικά απόβλητα αποτελούνται από ιστούς, όργανα, μέρη του σώματος, αίμα, υγρά σώματος και άλλα απόβλητα από χειρουργικές επεμβάσεις ή αυτοψία σε ασθενείς με μολυσματικές ασθένειες. Περιλαμβάνουν επίσης ανθρώπινα έμβρυα και μολυσμένα νεκρά ζώα. Τα αναγνωρίσιμα μέρη του ανθρώπου σώματος ή των ζώων ονομάζονται μερικές φορές ανατομικά απόβλητα. Τα παθολογικά απόβλητα μπορεί ακόμα να περιλαμβάνουν υγιή μέρη του σώματος, που έχουν αφαιρεθεί κατά τη διάρκεια μιας ιατρικής διαδικασίας ή παράγονται κατά τη διάρκεια ιατρικής έρευνας. (WHO, 2014)

1.2.4 Φαρμακευτικά απόβλητα – γενοτοξικά απόβλητα

Τα φαρμακευτικά απόβλητα περιλαμβάνουν ληγμένα, αχρησιμοποίητα, χρησιμοποιημένα και μολυσμένα φαρμακευτικά προϊόντα, συνταγογραφούμενα και πρωτότυπα φάρμακα, εμβόλια και ορούς που δεν απαιτούνται πλέον και, λόγω της χημικής ή βιολογικής τους φύσης, πρέπει να απορρίπτονται προσεκτικά. Η κατηγορία περιλαμβάνει επίσης απορριφθέντα αντικείμενα που έχουν μολυνθεί σε μεγάλο βαθμό κατά το χειρισμό φαρμακευτικών προϊόντων, όπως φιάλες, φιαλίδια και κουτιά που περιέχουν φαρμακευτικά υπολείμματα, γάντια, μάσκες και σωλήνες σύνδεσης.

Τα γενotoξικά απόβλητα είναι εξαιρετικά επικίνδυνα και μπορεί να έχουν μεταλλαξιογόνα (ικανά να προκαλέσουν γενετική μετάλλαξη), τερατογόνα (ικανά να προκαλέσουν μεταλλάξεις σε έμβρυα) ή καρκινογόνες ιδιότητες (που προκαλούν καρκίνο). Η απόρριψη γενotoξικών αποβλήτων εγείρει σοβαρά προβλήματα ασφάλειας, τόσο εντός των νοσοκομείων, όσο και μετά την απόρριψη, και πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Τα γενotoξικά απόβλητα μπορεί να περιλαμβάνουν ορισμένα κυτταροστατικά φάρμακα, εμετό, ούρα ή περιττώματα από ασθενείς που υποβάλλονται σε θεραπεία με κυτταροστατικά φάρμακα, χημικά και ραδιενεργά υλικά.

Τεχνικά, το γενotoξικό σημαίνει τοξικό για το δεσοξυριβονουκλεϊκό οξύ (DNA), κυτταροτοξικό σημαίνει τοξικό για το κύτταρο, κυτταροστατικό σημαίνει ότι καταστέλλει την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό του κυττάρου, αντινεοπλασματικό σημαίνει ανασταλτικό της ανάπτυξης μη φυσιολογικών ιστών και χημειοθεραπευτικό σημαίνει τη χρήση χημικών για θεραπεία, συμπεριλαμβανομένης της θεραπείας για καρκίνο.

Τα κυτταροτοξικά απόβλητα παράγονται από διάφορες πηγές και μπορούν να περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- μολυσμένα υλικά από την παρασκευή και τη χορήγηση φαρμάκων, όπως σύριγγες, βελόνες, γάζες, φιαλίδια, συσκευασίες.
- ληγμένα φάρμακα, περίσσεια διαλυμάτων, φάρμακα που επιστρέφονται από τους θαλάμους.
- ούρα, περιττώματα και έμετο από ασθενείς, τα οποία μπορεί να περιέχουν δυνητικά επικίνδυνες ποσότητες των χορηγούμενων κυτταροστατικών φαρμάκων ή των μεταβολιτών τους, και τα οποία πρέπει να θεωρηθούν γενotoξικά για τουλάχιστον 48 ώρες και μερικές φορές έως και 1 εβδομάδα μετά τη χορήγηση του φαρμάκου.

Σε εξειδικευμένα ογκολογικά νοσοκομεία, τα γενotoξικά απόβλητα (που περιέχουν κυτταροστατικές ή ραδιενεργές ουσίες) μπορεί να αποτελούν το 1% των συνολικών αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης. (WHO, 2014)

1.2.5 Χημικά απόβλητα

Τα χημικά απόβλητα αποτελούνται από απορριπτόμενα στερεά, υγρά και αέρια χημικά, παραδείγματος χάριν από διαγνωστικές και πειραματικές εργασίες και από διαδικασίες

καθαρισμού και απολύμανσης. Τα χημικά απόβλητα από την υγειονομική περίθαλψη θεωρούνται επικίνδυνα εάν έχουν τουλάχιστον μία από τις ακόλουθες ιδιότητες:

- τοξικό (επιβλαβές)
- διαβρωτικό (π.χ. οξέα pH <2 και βάσεις pH > 12)
- εύφλεκτο
- αντιδραστικό (εκρηκτικό, αντιδραστικό στο νερό, ευαίσθητο σε κραδασμούς)
- οξειδωτικό

Τα μη επικίνδυνα χημικά απόβλητα αποτελούνται από χημικά χωρίς καμία από τις παραπάνω ιδιότητες. Για παράδειγμα, σάκχαρα, αμινοξέα και ορισμένα οργανικά και ανόργανα άλατα, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε υγρά μετάγγισης.

Η φορμαλδεΰδη είναι μια σημαντική πηγή χημικών αποβλήτων στα νοσοκομεία. Χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό και την απολύμανση του εξοπλισμού (π.χ. αιμοκάθαρση ή χειρουργικός εξοπλισμός), για τη διατήρηση δειγμάτων, για την απολύμανση υγρών μολυσματικών αποβλήτων, στην παθολογία, την αυτοψία, την αιμοκάθαρση και σαν διαλύτης,

Φωτογραφικά στερεωτικά χρησιμοποιούνται σε τμήματα ακτίνων X, όπου το φωτογραφικό film συνεχίζει να χρησιμοποιείται. Το στερεωτικό περιέχει συνήθως 5-10% υδροκινόνη, 15% υδροξείδιο του καλίου και λιγότερο από 1% άργυρο.

Απόβλητα που περιέχουν διαλύτες παράγονται σε διάφορα τμήματα ενός νοσοκομείου, συμπεριλαμβανομένων εργαστηρίων παθολογίας και ιστολογίας και των τμημάτων μηχανικής. Οι διαλύτες περιλαμβάνουν αλογονωμένες και μη αλογονωμένες ενώσεις. Τα απόβλητα οργανικών χημικών που παράγονται σε νοσοκομεία περιλαμβάνουν λύματα απολύμανσης και καθαρισμού, λάδια αντλιών κενού και μηχανημάτων, εντομοκτόνα και τρωκτικοκτόνα. Τα ανόργανα χημικά απόβλητα αποτελούνται κυρίως από οξέα και αλκάλια, οξειδωτικούς και αναγωγικούς παράγοντες.

Τα απόβλητα από υλικά με υψηλή περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα αντιπροσωπεύουν μια υποκατηγορία επικίνδυνων χημικών αποβλήτων και είναι συνήθως εξαιρετικά τοξικά, όπως ο υδράργυρος, το κάδμιο και ο μόλυβδος. Ο υδράργυρος είναι ένα παράδειγμα μιας εξαιρετικά τοξικής, αλλά κοινής ουσίας στις εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης. Τα απόβλητα υδραργύρου δημιουργούνται συνήθως με διαρροή από σπασμένο κλινικό εξοπλισμό, αλλά ο όγκος τους μειώνεται σε πολλές χώρες με την αντικατάσταση των οργάνων αυτών με άλλα

χωρίς υδράργυρο (π.χ. ψηφιακά θερμομέτρα, πιεσόμετρα). Όποτε είναι δυνατόν, πρέπει να ανακτώνται σταγόνες υδραργύρου. Οδοντιατρικά υπολείμματα έχουν επίσης υψηλή περιεκτικότητα σε υδράργυρο. Τα απόβλητα καδμίου προέρχονται κυρίως από απορριφθείσες μπαταρίες. Τέλος, ενισχυμένα ξύλινα πάνελ, που περιέχουν μόλυβδο, χρησιμοποιούνται για προστασία από την ακτινοβολία σε ακτινογραφικά και διαγνωστικά τμήματα. (WHO, 2014).

1.2.6 Ραδιενεργά απόβλητα

Τα ραδιενεργά απόβλητα είναι υλικά μολυσμένα με ραδιονουκλίδια. Παράγονται ως αποτέλεσμα διαδικασιών όπως *in vitro* ανάλυση ιστών και υγρών του σώματος, *in vivo* απεικόνιση οργάνων και εντοπισμός όγκων, και διάφορες ερευνητικές και θεραπευτικές πρακτικές.

Τα ραδιενεργά απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης περιέχουν ραδιονουκλίδια με σύντομο χρόνο ημιζωής. Κατά συνέπεια, τα απόβλητα χάνουν τη ραδιενέργειά τους σχετικά γρήγορα. Ωστόσο, ορισμένες εξειδικευμένες θεραπευτικές διαδικασίες χρησιμοποιούν ραδιονουκλίδια με μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής. Τα απόβλητα με τη μορφή σφραγισμένων πηγών μπορεί να έχουν σχετικά υψηλή ραδιενέργεια, αλλά παράγονται μόνο σε χαμηλούς όγκους από μεγαλύτερα ιατρικά και ερευνητικά εργαστήρια. Οι σφραγισμένες πηγές επιστρέφονται κατά κανόνα στον προμηθευτή και δεν πρέπει να εισέρχονται στη ροή αποβλήτων.

Τα απόβλητα που παράγονται από δραστηριότητες υγειονομικής περίθαλψης και έρευνας που περιλαμβάνουν ραδιονουκλίδια και συναφή εξοπλισμό συντήρησης και αποθήκευσης μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- σφραγισμένες πηγές
- χρησιμοποιημένες πηγές ραδιονουκλιδίων
- στερεά απόβλητα (π.χ. απορροφητικό χαρτί, μπατονέτες, γυάλινα σκεύη, σύριγγες, φιαλίδια),
- κατάλοιπα από αποστολές ραδιενεργού υλικού και ανεπιθύμητα διαλύματα ραδιονουκλιδίων, που προορίζονται για διαγνωστική ή θεραπευτική χρήση ·
- υγρό μη αναμίξιμο με νερό, όπως η μέτρηση υγρού σπινθηρισμού.

- υπολείμματα που χρησιμοποιούνται σε ραδιοανοσοπροσδιορισμό και μολυσμένο λάδι αντλίας.
- απόβλητα από διαρροές και από την απολύμανση ραδιενεργών διαρροών.
- εκκρίματα από ασθενείς που έλαβαν θεραπεία ή ελέγχθηκαν με μη σφραγισμένα ραδιονουκλίδια.
- υγρά απόβλητα χαμηλού επιπέδου (π.χ. από συσκευές πλύσης)
- αέρια από αναθυμιάσεις (WHO, 2014).

1.2.7 Απόβλητα αιχμηρών εργαλείων

Τα αιχμηρά εργαλεία είναι αντικείμενα που θα μπορούσαν να προκαλέσουν εκδορές ή τραυματισμούς, όπως βελόνες, υποδερμικές βελόνες, νυστέρια και άλλες λεπίδες, μαχαίρια, σει έγχυσης, σπασμένα γυαλιά και πιπέτες. Ανεξάρτητα από το εάν έχουν μολυνθεί ή όχι, τέτοια είδη συνήθως θεωρούνται εξαιρετικά επικίνδυνα απόβλητα και πρέπει να αντιμετωπίζονται σαν δυνητικά μολυσμένα. (WHO, 2014)

1.3 Σύσταση – Ποσοτικά χαρακτηριστικά

Η επίσημη έκθεση για την παραγωγή επικίνδυνων αποβλήτων στην Ελλάδα για το έτος 2008 (έκθεση του Υπουργείου Περιβάλλοντος), για τον τομέα της υγείας είναι 133.000 τόνοι νοσοκομειακών αποβλήτων που μπορούν να αναλυθούν ως εξής (Halazonitis P.P., 2016):

- 115.000 τόνοι μη επικίνδυνων ή γενικών αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης
- 14.000 τόνοι μολυσματικών αποβλήτων
- 3.500 τόνοι μικτών (τοξικών συν μολυσματικών αποβλήτων)

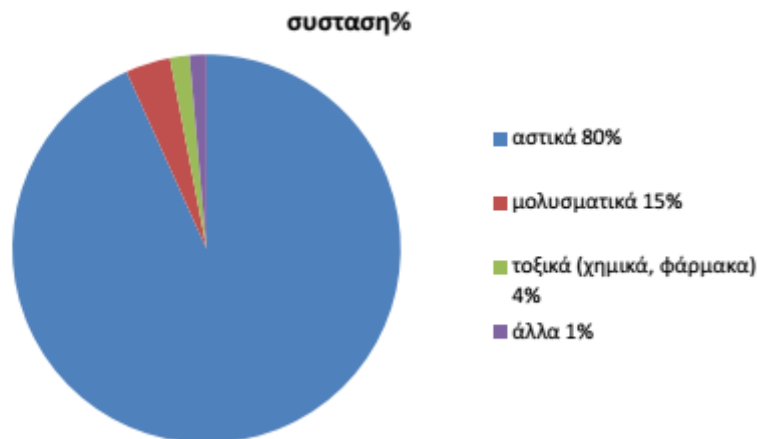
Τα νοσοκομειακά απόβλητα τα χαρακτηρίζει μία μεγάλη ανομοιογένεια όσον αφορά τη σύστασή τους. Σε αυτά περιέχεται υψηλό ποσοστό υγρασίας, υψηλό ποσοστό μη συμπιεστών υλικών και πλαστικό σε ποσοστό που φτάνει το 15%. Μία τυπική σύσταση των νοσοκομειακών αποβλήτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. (Αραβώσης Κ., 2008).



Σχήμα 4. Τυπική σύσταση νοσοκομειακών αποβλήτων (Αραβώσης Κ., 2008).

Με βάση την ανωτέρω σύσταση των νοσοκομειακών αποβλήτων, δύναται να πραγματοποιηθεί ένας τυπικός ποσοτικός προσδιορισμός του ποσοστού των οργανικών αποβλήτων, που μετά από κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να αποτελέσουν πρώτες ύλες πλούσιες σε λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα. Πιο συγκεκριμένα, αθροίζοντας τα ποσοστά του Βαμβακιού/γάζων, του Χαρτιού, των Ρούχων και των Κλινοσκεπασμάτων φαίνεται ότι ένα ποσοστό ύψους 61% των νοσοκομειακών αποβλήτων μπορεί να αξιοποιηθεί στην παραγωγή βιοκαυσίμων.

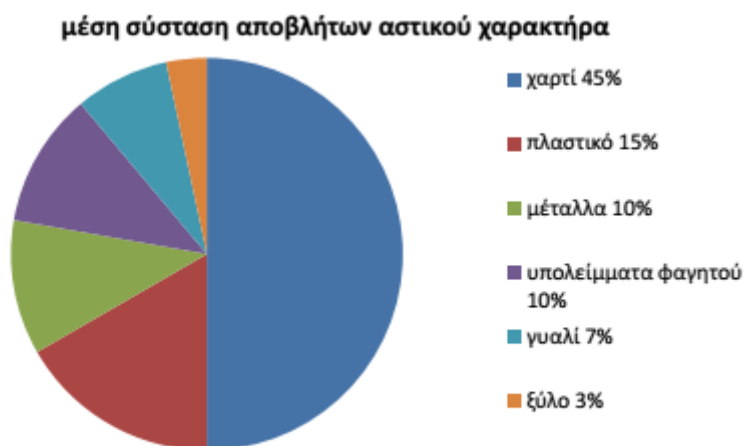
Στο διάγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 5), απεικονίζεται η σύνθεση των νοσοκομειακών αποβλήτων με βάση μία μελέτη του Τεχνικού Επιμελητηρίου Βόρειας Ελλάδας για το τμήμα κεντρικής Μακεδονίας:



Σχήμα 5. Σύσταση νοσοκομειακών αποβλήτων που αφορά μια περιοχή στη βόρειο Ελλάδα (Halazonitis P.P., 2016).

Τα παραπάνω ποσοστά σε σχέση με την σύσταση των ιατρικών αποβλήτων βρίσκονται επίσης σε συμφωνία με τον Παγκόσμιο οργανισμό υγείας, όπως έχουν ήδη παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 1.2. (WHO, 2014)

Στην ίδια περίπτωση, η σύσταση των γενικών/αστικών αποβλήτων που παράγονται από τις δραστηριότητες των μονάδων υγείας προκύπτουν όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 6. (Halazonitis P.P., 2016).



Σχήμα 6. Μέση σύσταση αποβλήτων αστικού χαρακτήρα σε νοσοκομείο (Halazonitis P.P., 2016).

Η παραγόμενη ποσότητα των νοσοκομειακών αποβλήτων διαφοροποιείται σημαντικά από χώρα σε χώρα, αλλά μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις και σε διαφορετικές περιοχές της ίδιας χώρας. Οι παράγοντες που ευθύνονται για αυτές τις διαφοροποιήσεις είναι το είδος και η ειδικότητα της νοσοκομειακής μονάδας, η δυναμικότητα, η αναλογία νοσηλευτικού και ιατρικού προσωπικού σε σχέση με τον αριθμό των κλινών, ο βαθμός εφαρμογής υλικών μιας χρήσης, η ύπαρξη και το μέγεθος βοηθητικών τμημάτων του ιδρύματος κ.α. (Αραβώσης Κ., 2008; ΠΑΚΟΕ, 2017) Ένας επιπλέον σημαντικός παράγοντας είναι ο φορέας στον οποίο υπάγεται το νοσοκομείο. Τα δημόσια νοσοκομεία, καθώς εξυπηρετούν σαφώς μεγαλύτερο αριθμό ασθενών παράγουν υψηλότερες ποσότητες αποβλήτων σε σχέση με τα ιδιωτικά (Bdour A., 2007). Ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι είναι το οικονομικό υπόβαθρο της κάθε χώρας. Αναλυτικότερα, οι αναπτυσσόμενες χώρες παρουσιάζουν μικρότερη παραγωγή νοσοκομειακών αποβλήτων σε σχέση με εκείνη των ανεπτυγμένων χωρών. Το γεγονός αυτό σχετίζεται άμεσα με τον τρόπο ζωής των ανθρώπων στις αναπτυσσόμενες χώρες, καθώς το υψηλότερο επίπεδο διαβίωσης οδηγεί σε υψηλότερη κατανάλωση αγαθών και υπηρεσιών υγείας και συνεπώς σε μεγαλύτερο όγκο αποβλήτων. (Αραβώσης Κ., 2008; Marinkovic N., 2008) Στον αντίποδα όμως, ενώ στις αναπτυσσόμενες χώρες η παραγόμενη ποσότητα νοσοκομειακών αποβλήτων είναι μικρότερη, το ποσοστό των μολυσματικών ως προς τον ολικό όγκο των αποβλήτων είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις αναπτυσσόμενες χώρες, καθώς έχουν σε ισχύ αυστηρή νομοθεσία και οργανωμένα σχέδια συλλογής, διαχωρισμού και διαχείρισης των επικίνδυνων αποβλήτων. (Τσακνή Γ., 2018) Η ετήσια παραγωγή αποβλήτων ανάλογα με την οικονομική κατάσταση της χώρας παρουσιάζεται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2. Ετήσια παραγωγή αποβλήτων ανάλογα με την οικονομική κατάσταση της χώρας (Αραβώσης Κ., 2008).

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΧΩΡΑΣ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ/ΕΤΟΣ (kg / κάτοικο)
Ανεπτυγμένες χώρες:	
Ολικός όγκος νοσοκομειακών αποβλήτων	1.1 – 12.0
Επικίνδυνα απόβλητα	0.4 – 5.5

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΧΩΡΑΣ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ/ΕΤΟΣ (kg / κάτοικο)
Χώρες με μέση οικονομική κατάσταση: Ολικός όγκος νοσοκομειακών αποβλήτων Επικίνδυνα απόβλητα	0.8 – 6.0 0.3 – 0.4
Αναπτυσσόμενες χώρες: Ολικός όγκος νοσοκομειακών αποβλήτων	0.5 – 3.0

Η υπάρχουσα στρατηγική για την διαχείριση νοσοκομειακών αποβλήτων στην Ελλάδα, για μονάδες υγείας με χωρητικότητα 400-600 κλινών έχει εξεταστεί από τους Tsakona et al (2007). Έχοντας εκτιμήσει ότι το ύψος των παραγόμενων νοσοκομειακών αποβλήτων ανέρχεται σε 880kg/ημέρα -μέσω ζύγισης των αποτεφρωμένων αποβλήτων- το βασικό εξαγόμενο συμπέρασμα ήταν ότι οι ακατάλληλες πρακτικές διαχωρισμού αποτελούν κυρίαρχο πρόβλημα. Λόγω του ανεπαρκούς διαχωρισμού οδηγούμαστε σε αυξημένες ποσότητες παραγόμενων μολυσματικών αποβλήτων και ως εκ τούτου αυξάνεται το κόστος για τη διάθεσή τους.

Οι Askarian M. et al (2004) πραγματοποίησαν έρευνα σε 15 νοσοκομεία στο Ιράν. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο ρυθμός παραγωγής αποβλήτων είναι 4.45 kg / κλίνη / ημέρα, που περιλαμβάνει 1830kg (71.44%) οικιακών απορριμμάτων, 712kg (27.8%) μολυσματικών αποβλήτων και 19.6kg (0.76%) αιχμηρών αντικειμένων. Παρατηρήθηκε ότι ο διαχωρισμός διαφορετικών τύπων αποβλήτων δεν πραγματοποιούταν με επιτυχία. Το 13.3% των νοσοκομείων υπό μελέτη χρησιμοποιούν δοχεία για τη μεταφορά αποβλήτων, τα οποία δεν ήταν κατάλληλα καλυμμένα. Το 60% από τα νοσοκομεία ήταν εξοπλισμένο με αποτεφρωτή, όμως το 40% από αυτά είχαν λειτουργικά προβλήματα με τους αποτεφρωτές. Εξήχθη επίσης το συμπέρασμα ότι τα υπό μελέτη νοσοκομεία παρέχουν, είτε αναποτελεσματικά, είτε ακατάλληλα εκπαιδευτικά μαθήματα σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων των νοσοκομείων και τους κινδύνους που σχετίζονται με αυτά.

Η Jayanthi et. al (2002) ανέλυσαν την ποσότητα και την ποιότητα των απορριμμάτων που προέρχονται από διαφορετικούς θαλάμους και μονάδες ενός ινδικού κρατικού νοσοκομείου χωρητικότητας 360 κλινών. Η ποσότητα των απορριμμάτων που παράγονταν από το

νοσοκομείο ήταν περίπου 285kg / ημέρα. Το 59% των συνολικών αποβλήτων ήταν γενικά απόβλητα και το υπόλοιπο 41% βιοϊατρικά απόβλητα. Το συμπέρασμα που εξήχθη ήταν ότι δεν εφαρμόζεται κατάλληλος διαχωρισμός στην πηγή, οδηγώντας στην ανάμειξη γενικών και μικτών αποβλήτων στα σημεία συλλογής, αυξάνοντας έτσι και την ροή επικίνδυνων ιατρικών αποβλήτων.

Με βάση τα ανωτέρω φαίνεται η σημασία του σωστού διαχωρισμού των νοσοκομειακών αποβλήτων, ώστε να μην επιβαρύνονται οι ροές επικίνδυνων και μολυσματικών αποβλήτων που στη συνέχεια απαιτούν ειδική επεξεργασία.

1.4 Κίνδυνοι για την υγεία και το περιβάλλον

Τα νοσοκομειακά απόβλητα, λόγω της μολυσματικής φύσης τους που χαρακτηρίζεται από την παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών, ενέχουν πολλαπλούς κινδύνους για την υγεία και το περιβάλλον. Η μετάδοση ασθενειών μέσω μολυσματικών αποβλήτων είναι η μεγαλύτερη και άμεση απειλή από τα νοσοκομειακά απόβλητα. Εάν τα απόβλητα δεν υποβάλλονται σε επεξεργασία με τρόπο που να καταστρέφει τους παθογόνους οργανισμούς, μπορεί να υπάρχουν επικίνδυνες ποσότητες παραγόντων που προκαλούν ασθένειες - ιοί, βακτήρια, παράσιτα ή μύκητες. Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να εισέλθουν στο σώμα μέσω αμυχών του δέρματος, μέσω των βλεννογόνων, εισπνεόμενοι στους πνεύμονες, μέσω κατάποσης ή μετάδοσης από κάποιον φορέα της ασθένειας. (USAID, 2015; Καράμπαμπα Φ., 2013)

Για τα άτομα που έρχονται σε άμεση επαφή με τα απόβλητα το ρίσκο είναι θεωρητικά υψηλότερο. Το προσωπικό που εργάζεται στις υγειονομικές μονάδες ή βρίσκεται εκτός αυτών των μονάδων και είναι υπεύθυνο για τη διαχείρισή τους, διατρέχει άμεσο κίνδυνο. Ωστόσο, είναι πιθανό κάποιος να εκτίθεται ακούσια σε κίνδυνο, εξαιτίας της κακής διαχείρισης από τις δύο προηγούμενες ομάδες. Πιο συγκεκριμένα, οι ομάδες που διατρέχουν κίνδυνο είναι οι ακόλουθες (Padmanabhan K.K., 2019):

- προσωπικό καθαριότητας των μονάδων
- προσωπικό του χώρου επεξεργασίας και διάθεσης αποβλήτων, καθώς και συλλέκτες απορριμμάτων, συλλέκτες αποβλήτων, τοξικομανείς και άτομα που ανακυκλώνουν μολυσμένες σύριγγες

- εργαζόμενοι στον τομέα της υγείας (ιατροί, νοσηλευτές, παραϊατρικό προσωπικό, τεχνικό προσωπικό),
- νοσηλευόμενοι ασθενείς,
- επισκέπτες,
- το ευρύ κοινό (USAID, 2015; Καράμπαμπα Φ., 2013)

Αν και τα αιχμηρά εργαλεία ενέχουν εγγενή φυσικό κίνδυνο τραυματισμού, η πολύ μεγαλύτερη απειλή προέρχεται από σύριγγες ή βελόνες που χρησιμοποιούνται σε μολυσμένους ασθενείς, οι οποίες μπορούν να μολύνουν άλλα άτομα με HIV / AIDS και ιούς της ηπατίτιδας Β και C, είτε λόγω τυχαίας έκθεσης σε αυτά είτε μέσω επαναχρησιμοποίησης συριγγών / βελόνων. Αυτές οι λοιμώξεις μπορεί να είναι θανατηφόρες. (USAID, 2015)

Η μόλυνση του νερού από μη επεξεργασμένα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης μπορεί επίσης να έχει καταστροφικές συνέπειες. Τα περισσότερα λύματα δεν υποβάλλονται σε επεξεργασία στις αναπτυσσόμενες χώρες και εφόσον διοχετευθούν στο σύστημα αποχέτευσης ακατέργαστα, μπορούν να δημιουργήσουν ή να επεκτείνουν επιδημίες. Η απουσία κατάλληλων διαδικασιών αποστείρωσης θεωρείται πιθανό να έχει αυξήσει τη σοβαρότητα και το μέγεθος των επιδημιών της χολέρας κατά την τελευταία δεκαετία. (USAID, 2015)

Η επιβίωση των παθογόνων μικροοργανισμών στο περιβάλλον δεν ευνοείται γενικά. Η δυνατότητα επιβίωσης για κάθε μικροοργανισμό είναι συγκεκριμένη και εξαρτάται από την ανθεκτικότητά του σε κάθε περιβαλλοντικό παράγοντα, όπως είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η υπεριώδης ακτινοβολία, ο τύπος του υποστρώματος ανάπτυξης κ.α. Παραδείγματος χάριν, ο ιός της ηπατίτιδας Β παρουσιάζει ισχυρή ανθεκτικότητα στον ξηρό αέρα και δυνατότητα επιβίωσης για αρκετές εβδομάδες με προσκόλληση σε κάποια επιφάνεια. Είναι επίσης ανθεκτικός στη σύντομη έκθεση σε ατμό και σε κάποια αντισηπτικά, ενώ επιβιώνει για διάστημα 10 ωρών σε θερμοκρασία 60⁰C. Τέλος, σε περίπτωση που βρεθεί ο ιός σε αίμα στο εσωτερικό μιας βελόνας, υποστηρίζεται ότι μπορεί να επιβιώσει μέχρι και μία εβδομάδα. Σε αντίθεση με τον ιό της ηπατίτιδας, ο ιός HIV/AIDS δεν είναι τόσο ανθεκτικός. Μπορεί να επιβιώσει ως και 25 λεπτά σε διάλυμα 70% αιθανόλης και για διάστημα από 3 έως και 7 μέρες σε συνθήκες περιβάλλοντος, ενώ εξουδετέρωσή του επιτυγχάνεται στους 56 ⁰C. Τα βακτήρια παρουσιάζουν μικρότερη ανθεκτικότητα σε σχέση με τους ιούς.

Για την αξιολόγηση της δυνατότητας επιβίωσης ή μετάδοσης των παθογόνων μικροοργανισμών είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως τα τρωκτικά και τα έντομα, τα οποία, έπειτα από τη λήψη τροφής από οργανικά απόβλητα, καθίστανται παθητικοί φορείς μικροβιακών παθογόνων. (Καράμπαμπα Φ., 2013)

Τα χημικά και φαρμακευτικά απόβλητα, ιδιαίτερα οι μεγάλες ποσότητες, μπορούν να αποτελέσουν απειλή για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Επειδή τα επικίνδυνα χημικά απόβλητα μπορεί να είναι τοξικά, διαβρωτικά, εύφλεκτα, αντιδραστικά ή / και εκρηκτικά, μπορούν να βλάψουν άτομα που αγγίζουν, εισπνέουν ή βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτά. Στην περίπτωση της καύσης ενδέχεται να εκραγούν ή να παράγουν τοξικούς καπνούς. Ορισμένα φαρμακευτικά προϊόντα είναι επίσης τοξικά. Όταν τα χημικά και φαρμακευτικά απόβλητα απορρίπτονται σε χωματερές και χώρους υγειονομικής ταφής, μέσω έκπλυσης μπορεί να μολύνουν υπόγεια και επιφανειακά ύδατα. Αυτή η μόλυνση μπορεί να βλάψει τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν το νερό ως πόσιμο, είτε για μπάνιο και μαγείρεμα, καθώς επίσης μπορεί να προκαλέσει ζημιά σε τοπικά φυτά και ζώα. (USAID, 2015)

Η απλή μεταφορά μικτών νοσοκομειακών αποβλήτων σε χώρους απόρριψης αποβλήτων προκαλεί ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων, και κατά συνέπεια κινδύνους για την υγεία. Ως εκ τούτου, η συλλογή και διάθεση των αποβλήτων με τον κατάλληλο τρόπο είναι μείζονος σημασίας, καθώς μπορεί να μειώσει άμεσα και έμμεσα τους κινδύνους για την υγεία των ανθρώπων, καθώς και τις βλάβες στη χλωρίδα, την πανίδα και το περιβάλλον. (Padmanabhan K.K., 2019)

1.5 Ελληνικό Νομοθετικό Πλαίσιο ορθής διαχείριση ιατρικών αποβλήτων

Στη Ελλάδα υφίσταται Νομοθετικό Πλαίσιο σκοπός του οποίου είναι η θέσπιση των μέτρων για την ορθή διαχείριση των ιατρικών αποβλήτων, με στόχο την προάσπιση της δημόσιας υγείας και την προστασία του περιβάλλοντος.

Το θεσμικό πλαίσιο που διέπει τη διαχείριση των ιατρικών αποβλήτων περιλαμβάνει την ακόλουθη νομοθεσία (ΤΕΕ, 2012):

- ΚΥΑ 37591/2031/03 «Μέτρα και όροι για τη διαχείριση ιατρικών αποβλήτων από υγειονομικές μονάδες»

- ΚΥΑ 50910/2727/2003 «Μέτρα και όροι για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης »`
- Κ.Υ.Α. 13588/725/2006 «Μέτρα όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 91/689/ΕΟΚ «για τα επικίνδυνα απόβλητα» του Συμβουλίου της 12ης Δεκεμβρίου 1991».
- Κ.Υ.Α. 24944/1159/2006 Έγκριση Γενικών Τεχνικών Προδιαγραφών για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων σύμφωνα με το άρθρο 5 (παρ. Β) της υπ αριθμ. 13588/725 κοινή υπουργική απόφαση «Μέτρα όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων κ.λπ»
- Κ.Υ.Α. 8668/2007 (ΦΕΚ 287 Β/2.3.2007) «Έγκριση Εθνικού Σχεδιασμού Επικίνδυνων Αποβλήτων (ΕΣΔΕΑ), σύμφωνα με το άρθρο 5 (παρ. Α) της υπ αριθμ. 13588/725 κοινή υπουργική απόφαση «Μέτρα, όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων κ.λπ.»
- Κ.Υ.Α. 22912/1117 ΦΕΚ 759Β/6.6.2005 «Μέτρα και όροι για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος από την αποτέφρωση των αποβλήτων»
- Προεδρικά διατάγματα εναλλακτικής διαχείρισης αποβλήτων που διέπουν τη διαχείριση ειδικών ρευμάτων αποβλήτων, όπως κυρίως απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΠΔ 117 ΦΕΚ 82Α/2004, ΠΔ 15 ΦΕΚ 12Α/2006), συσσωρευτές (ΠΔ 115 ΦΕΚ 80Α/2004), και απόβλητα λιπαντικά έλαια (ΠΔ 82 ΦΕΚ 80Α/2004).

Σύμφωνα με τις διατάξεις του πλαισίου αυτού, ο κάτοχος των ιατρικών αποβλήτων υποχρεούται:

- να εξασφαλίζει ο ίδιος τη συλλογή, μεταφορά, αποθήκευση, αξιοποίηση, επεξεργασία ή διάθεσή των αποβλήτων ή
- να παραδίδει τα απόβλητα σε φυσικό ή νομικό πρόσωπο στο οποίο έχει χορηγηθεί η σχετική άδεια (συλλογή, μεταφορά, αποθήκευση, αξιοποίηση, επεξεργασία ή διάθεση) σύμφωνα με τις διατάξεις της παρούσας απόφασης (ΤΕΕ, 2012)

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2008/2009 «Environmental Crime» μεταφέρθηκε στον Ελληνικό Νόμο με την εισαγωγή του Νόμου Ν4042 / 2012 με τον τίτλο «Πλαίσιο αποβλήτων παραγωγής και διαχείρισης», με σκοπό να επισυνάψει στις υπάρχουσες απαγορεύσεις ορισμένες ποινικές κυρώσεις. (Halazonitis P.P., 2015) Υπήρξε λοιπόν τροποποίηση στον υφιστάμενο κανονισμό για τα νοσοκομειακά απόβλητα με την έκδοση του νέου Υπουργικού Διατάγματος ΚΥΑ

146163/2012 (ΦΕΚ 1537 / Β / 2012) με τον τίτλο «Η διαχείριση των νοσοκομειακών αποβλήτων». Έτσι, η διαχείριση των αποβλήτων απαιτεί την κατάταξη των ενεργειών με την ακόλουθη ιεραρχική σειρά (Halazonitis P.P., 2015):

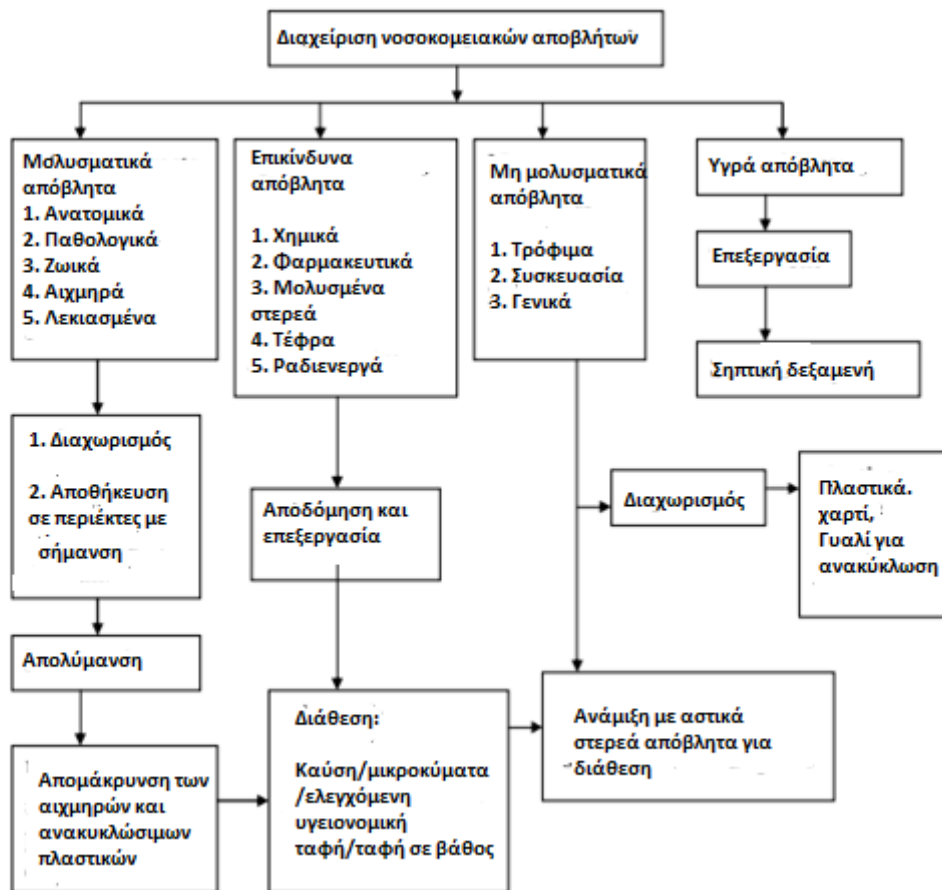
1. Πρόληψη της δημιουργίας
2. Προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση
3. Ανακύκλωση
4. Ανάκτηση πρώτων υλών ή ενέργειας
5. Διάθεση

Απαγορεύεται η εγκατάλειψη ή η απόρριψη των αποβλήτων με τρόπο χωρίς επίβλεψη.

Στη Νομοθεσία περιλαμβάνεται το Παράρτημα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (EWC) που είναι μια περιγραφική λίστα ιεράρχησης των αποβλήτων που θεσπίστηκε με την απόφαση 2000/532 / ΕΚ της Επιτροπής. Ο κατάλογος χωρίζεται σε 20 κύρια κεφάλαια, καθένα από τα οποία έχει διψήφιο κωδικό μεταξύ 01 και 20, τα περισσότερα από τα κεφάλαια σχετίζονται με τη βιομηχανία, αλλά μερικά βασίζονται σε υλικά και διαδικασίες. (Halazonitis P.P., 2015).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΑΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Ο διαχωρισμός, η συλλογή, η αποθήκευση, η μεταφορά, η επεξεργασία και η τελική διάθεση είναι ζωτικά βήματα για την ασφαλή διαχείριση των νοσοκομειακών αποβλήτων. (Sarojini E., 2011) Το κλειδί για την ελαχιστοποίηση και την αποτελεσματική διαχείριση τους είναι ο κατάλληλος διαχωρισμός τους. Ο καταλληλότερος τρόπος κατηγοριοποίησης των αποβλήτων είναι η ταξινόμηση τους σε πλαστικές σακούλες ή δοχεία με χρωματική κωδικοποίηση. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι πρακτικές διαχείρισης των νοσοκομειακών αποβλήτων που θα περιγραφούν στη συνέχεια. (Patil A. D., 2001)



Σχήμα 7. Διάγραμμα με τις διαθέσιμες τεχνολογίες επεξεργασίας νοσοκομειακών αποβλήτων (προσαρμογή από Patil A. D., 2001).

Οι νοσοκομειακές μονάδες παράγουν τεράστιες ποσότητες αποβλήτων, με ποικίλα χαρακτηριστικά και ένα ευρύ φάσμα συνθέσεων, τα οποία δύναται να προκαλέσουν μόλυνση ή τραυματισμό, σε πολύ υψηλότερο βαθμό, συγκριτικά με οποιοδήποτε άλλο είδος αποβλήτων. Οι τρέχουσες πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων σε πολλά νοσοκομεία είναι ανεπαρκείς. Πιο συγκεκριμένα, όλα τα απόβλητα, δυνητικά μολυσματικά, τρόφιμα, υπολείμματα κάθε τύπου και επικίνδυνα χημικά υλικά, είτε δεν διαχωρίζονται επαρκώς, είτε αναμιγνύονται κατά τη μεταφορά και τελικά απορρίπτονται. Ως αποτέλεσμα της αδυναμίας δημιουργίας και τήρησης κατάλληλων υποδομών και πρωτοκόλλων διαχωρισμού, τα απόβλητα που παράγονται στα νοσοκομεία, στο σύνολό τους είναι δυνητικά μολυσματικά και δυνητικά επικίνδυνα. Όπως προαναφέρθηκε, μεγαλύτερο κίνδυνο διατρέχουν οι εργαζόμενοι που χειρίζονται τα απόβλητα, ενώ ο κίνδυνος για το ευρύ κοινό είναι δευτερεύον και εμφανίζεται με τρεις τρόπους: α) τυχαία έκθεση από επαφή με απόβλητα σε κοινούς κάδους διάθεσης β) έκθεση σε χημικούς ή βιολογικούς ρύπους στο νερό γ) έκθεση σε χημικούς ρύπους (π.χ. υδράργυρος, διοξίνη) από την αποτέφρωση των αποβλήτων.

Ανεξάρτητα από την στρατηγική που θα επιλεγεί τελικά για την επεξεργασία και την απόρριψη των αποβλήτων, είναι κρίσιμο τα απόβλητα να διαχωρίζονται, κατά προτίμηση στο σημείο παραγωγής, πριν από την επεξεργασία και διάθεση τους, συντελώντας έτσι και στη διαφύλαξη της υγείας των επαγγελματιών του τομέα υγείας. Τα νοσοκομειακά απόβλητα περιέχουν υδράργυρο, καθώς και άλλα βαρέα μέταλλα, χημικούς διαλύτες και συντηρητικά (π.χ. φορμαλδεΰδη) τα οποία θεωρούνται καρκινογόνα. Κατά την καύση των ανωτέρω καθώς και των πλαστικών απορριμμάτων, όπως το PVC, παράγονται διοξίνες και λοιποί ρύποι που θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία, όχι μόνο των εργαζομένων στον κλάδο υγείας, αλλά και του συνόλου της κοινωνίας.

Εάν τηρηθούν κατάλληλες πρακτικές διαχωρισμού εντός των νοσοκομείων, τα επικίνδυνα βιολογικά και χημικά απόβλητα, τα οποία αποτελούν περίπου το 10% - 25% του συνόλου, θα μπορούσαν να απομονωθούν με επιτυχία από τα αστικού τύπου απόβλητα. Στη συνέχεια, η διαχείριση της καθαρής ροής στερεών αποβλήτων, δηλαδή του υπόλοιπου 75% - 90%, μπορεί να επιτευχθεί πιο εύκολα, με ασφάλεια και πιο οικονομικά μέσω της ανακύκλωσης, της κομποστοποίησης (λιπασματοποίησης), της υγειονομικής ταφής των απορριμμάτων και της παραγωγής ενέργειας. Επιπρόσθετα, ένα μεγάλο τμήμα των μολυσματικών αποβλήτων, μετά από ειδική διαχείριση και επεξεργασία, μπορεί να αξιοποιηθεί και αυτό περαιτέρω, καθώς μετά την αφαίρεση του μολυσματικού παράγοντα, δύναται να αξιοποιηθεί όπως και τα

αστικού τύπου απόβλητα. Άρα, η τελικώς προκύπτουσα ροή νοσοκομειακών αποβλήτων θα έχει μεγάλο ποσοστό οργανικών -τροφίμων, ρούχων, χαρτιού- και ανακυκλώσιμων αποβλήτων -πλαστικών, μετάλλων- και πολύ μικρό ποσοστό αποβλήτων που δεν μπορούν να αξιοποιηθούν.

Αρκετά νοσοκομεία έχουν ήδη δημιουργήσει κατάλληλα προγράμματα και πρακτικές διαχωρισμού. Η εκπαίδευση του προσωπικού σε σαφή πρότυπα και η ύπαρξη κατάλληλων δοχείων, ετικετών σήμανσης και προστατευτικών εργαλείων για τους εργαζόμενους είναι απαραίτητα στοιχεία της διαδικασίας, για να διασφαλιστεί ότι ο διαχωρισμός θα πραγματοποιείται σωστά και απρόσκοπτα. (Sarojini E., 2011) Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι η μείωση του όγκου των αποβλήτων, που επιτυγχάνεται μέσω του κατάλληλου διαχωρισμού, συνεπάγεται μείωση του κόστους διαχείρισης. (Αραβώσης Κ., 2008) Απαιτούνται δηλαδή λιγότεροι πόροι για την σωστή διαχείριση του σαφώς μικρότερου τμήματος των αποβλήτων, που πραγματικά χρειάζεται ειδική επεξεργασία, όπως αποτέφρωση, αποστείρωση, επεξεργασία με μικροκύματα, υγειονομική διάθεση κλπ., χωρίς την ποσοτική επιβάρυνση που προκύπτει στην περίπτωση της ανεπαρκούς διαλογής. (Sarojini E., 2011)

2.1 Διαχωρισμός και συλλογή

Ο διαχωρισμός συνίσταται να πραγματοποιείται όσο το δυνατόν πιο κοντά στον χώρο όπου παράγονται τα απόβλητα, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να γίνεται στους χώρους του νοσοκομείου, στις χειρουργικές μονάδες ή τα εργαστήρια από νοσηλευτές, γιατρούς και τεχνικούς. Εάν ένα απόβλητο δεν δύναται να ταξινομηθεί με βεβαιότητα, προληπτικά πρέπει να αντιμετωπιστεί ως επικίνδυνο νοσοκομειακό απόβλητο.

Το απλούστερο σύστημα διαχωρισμού είναι η ξεχωριστή απόρριψη όλων των επικίνδυνων αποβλήτων, από τα μη επικίνδυνα γενικά απόβλητα. Ωστόσο, για να παρέχεται ένα ελάχιστο επίπεδο ασφάλειας στους ασθενείς, το τμήμα επικίνδυνων αποβλήτων διαχωρίζεται συνήθως σε δύο κατηγορίες: χρησιμοποιημένα αιχμηρά αντικείμενα και δυνητικά μολυσματικά είδη. Το τελευταίο, περιλαμβάνει συνήθως σωλήνες, επιδέσμους, ιατρικά είδη μίας χρήσης, επιχρίσματα και ιστούς. Ο διαχωρισμός γενικών - μη επικίνδυνων αποβλήτων, δυνητικά μολυσματικών αποβλήτων και χρησιμοποιημένων αιχμηρών αντικειμένων σε χωριστά δοχεία αναφέρεται συχνά ως «σύστημα τριών κάδων». Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και επιπλέον

τύποι δοχείων για άλλες κατηγορίες αποβλήτων, όπως για τα χημικά και φαρμακευτικά απόβλητα ή για τα παθολογικά απόβλητα, τα οποία πρέπει να απορρίπτονται με διαφορετικούς τρόπους από τα άλλα τμήματα της ροής αποβλήτων (Σχήμα 8). (WHO, 2014)



Σχήμα 8. Παραγόμενα απόβλητα: Γενικά, μολυσματικά και αιχμηρά απόβλητα (WHO, 2017).

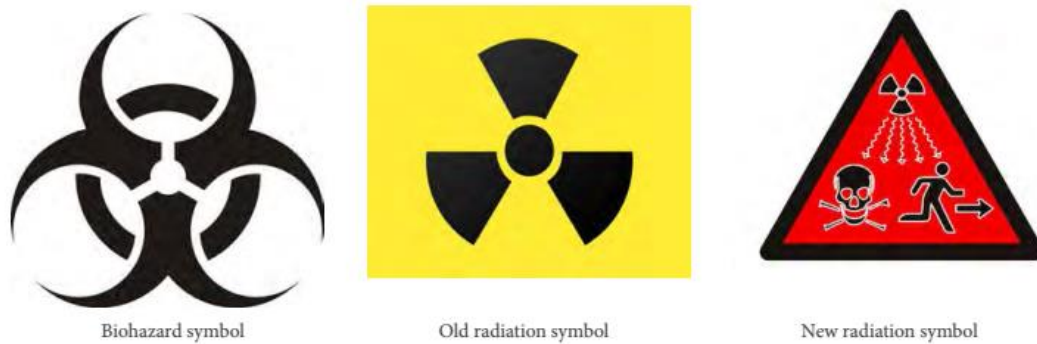
2.1.1 Δοχεία απορριμμάτων – σήμανση

Ιδανικά το ίδιο σύστημα διαχωρισμού θα πρέπει να ισχύει σε όλες της μονάδες υγείας μίας χώρας. Για το λόγο αυτό πολλές χώρες έχουν εθνική νομοθεσία, που ορίζει τις διάφορες κατηγορίες στις οποίες θα πρέπει να διαχωρίζονται τα απόβλητα, καθώς και ένα σύστημα χρωματικής κωδικοποίησης για τα δοχεία αποβλήτων.

Η έγχρωμη κωδικοποίηση διευκολύνει τους ιατρούς και τους εργαζόμενους στο νοσοκομείο να τοποθετούν απορρίμματα στο σωστό δοχείο και να διατηρήσουν τον διαχωρισμό των αποβλήτων κατά τη μεταφορά, αποθήκευση, επεξεργασία και απόρριψη. Η έγχρωμη κωδικοποίηση παρέχει επίσης μια οπτική ένδειξη του πιθανού κινδύνου από τα απόβλητα σε αυτό το δοχείο. (WHO, 2014)

Η σήμανση των δοχείων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της πηγής, την καταγραφή του τύπου και των ποσοτήτων των αποβλήτων που παράγονται σε κάθε χώρο, έτσι ώστε σε περίπτωση ανίχνευσης προβλήματος στον διαχωρισμό να μπορεί να εντοπιστεί το ακριβές σημείο παραγωγής των αποβλήτων εντός της νοσοκομειακής εγκατάστασης. Μια απλή προσέγγιση είναι να τοποθετηθεί μια ετικέτα σε κάθε περιέκτη με τις λεπτομέρειες του ιατρικού χώρου, την ημερομηνία και την ώρα σφράγισής του και το όνομα του ατόμου που

επικόλλησε την ετικέτα. Συνιστάται επίσης να χρησιμοποιείται ένα διεθνές σύμβολο κινδύνου σε κάθε δοχείο απορριμμάτων (Σχήμα 9).



Σχήμα 9 Αναγνωριστικά σήματα επικίνδυνων και ραδιενεργών (παλαιά και νέα) νοσοκομειακών αποβλήτων (WHO, 2014).

Οι κάδοι απόρριψης μη επικίνδυνων και μολυσματικών αποβλήτων πρέπει να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σημείο όπου παράγονται τα απόβλητα, (π.χ. σταθμοί νοσηλείας, αίθουσες διαδικασιών, σημεία φροντίδας) αλλά και μεταξύ τους όταν αυτό είναι δυνατό, και πρέπει να είναι παρόμοιου μεγέθους. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η επιλογή του σωστού κάδου για κάθε τύπο αποβλήτου από το προσωπικό και παρακάμπτεται η συχνά παρατηρούμενη τάση να γίνεται απόρριψη στον μεγαλύτερο διαθέσιμο κάδο. Οι κάδοι απόρριψης μολυσματικών αποβλήτων δεν πρέπει να τοποθετούνται σε δημόσιους χώρους, επειδή οι ασθενείς και οι επισκέπτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα δοχεία και να έρθουν σε επαφή με δυνητικά μολυσματικά απόβλητα. (WHO; 2017)

2.1.2 Διαχωρισμός και συλλογή μη επικίνδυνων αποβλήτων

Σε κάθε κύρια κατηγορία - μη επικίνδυνα, δυνητικά μολυσματικά, χρησιμοποιημένα αιχμηρά αντικείμενα - ο περαιτέρω διαχωρισμός μπορεί να είναι επωφελής. Για παράδειγμα, τα γενικά μη επικίνδυνα απόβλητα μπορούν να χωριστούν σε ανακυκλώσιμα, βιοαποικοδομήσιμα και σε μη ανακυκλώσιμα απόβλητα. Εάν αυτά αναμειχθούν στο σημείο παραγωγής, ενδέχεται να αποτραπεί η ανάκτηση των ανακυκλώσιμων υλικών.

Τα απόβλητα τροφών μπορούν να συλλεχθούν από τους χώρους του νοσοκομείου και να επιστραφούν απευθείας στα μαγειρεία. Τα απόβλητα εστίασης μπορούν να λιπασματοποιηθούν ή, αν το επιτρέπουν οι κανονισμοί, να αποστειρωθούν και να χρησιμοποιηθούν για ζωοτροφές. Τα μη επικίνδυνα βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα, όπως τα λουλούδια, μπορούν να απορριφθούν μαζί με απορρίμματα εστίασης (WHO, 2017).

2.1.3 Διαχωρισμός και συλλογή επικίνδυνων αποβλήτων

Μολυσματικά απόβλητα, όπως διαγνωστικά εργαστηριακά δείγματα και απόβλητα μολυσματικών ασθενών, θα πρέπει να συλλέγονται χωριστά και να τοποθετούνται σε κατάλληλους περιέκτες. Αυτή η κατηγορία αποβλήτων συνίσταται να υποβάλλεται σε περαιτέρω επεξεργασία πριν την απομάκρυνση από τη μονάδα υγείας, εάν είναι εφικτό, ή πριν την τελική διάθεση. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι στα πλαίσια της αξιοποίησης των οργανικών αποβλήτων θα μπορούσε να πραγματοποιείται περαιτέρω διαχωρισμός των επικίνδυνων αποβλήτων. Πιο συγκεκριμένα, μολυσματικά απόβλητα όπως βαμβάκι, γάζες, χαρτί, ρούχα ή κλινοσκεπάσματα, τα οποία μέσω κατάλληλης επεξεργασίας μπορούν να αξιοποιηθούν στην παραγωγή βιοκαυσίμων θα μπορούσαν να απορρίπτονται σε χωριστούς κάδους σε σχέση με τα γάντια, τους σωλήνες ή τα εργαστηριακά δείγματα.

Τα παθολογικά απόβλητα, ιστοί, όργανα, μέρη του σώματος κ.α. πρέπει να αντιμετωπίζονται σύμφωνα με τις επικρατούσες θρησκευτικές και πολιτιστικές πρακτικές. Συνήθως επιλέγεται είτε η ταφή, με στόχο την αποδόμηση, είτε η αποτέφρωση. (WHO, 2014)

Τα αιχμηρά απόβλητα, όπως βελόνες και σύριγγες, γυαλιά και νυστέρια, πρέπει να τοποθετούνται απευθείας σε δοχεία αιχμηρών αντικειμένων, σε ειδικά σχεδιασμένους, αδιάτρητους, μεγάλης σκληρότητας και ανθεκτικότητας πλαστικούς περιέκτες (με εξαίρεση τους περιέκτες από PVC) που σφραγίζουν αυτόματα και με ασφάλεια. (Αραβώσης Κ., 2008; Καράμπαμπα Φ., 2013) Σε ορισμένα μέρη, επιτρέπεται να αφαιρεθούν ή να καταστραφούν οι βελόνες από τις σύριγγες πριν τοποθετηθούν σε κάδους για μολυσματικά απορρίμματα. Τυχόν αφαιρούμενες βελόνες τοποθετούνται σε αδιάτρητα δοχεία και επεξεργάζονται ανάλογα (Σχήμα10). Αυτή η προσέγγιση δεν είναι παγκοσμίως αποδεκτή ως βέλτιστη πρακτική. (WHO, 2017)



Σχήμα 10. Πλαστικός σάκος για μολυσματικά απόβλητα, τροχήλατα hospital boxes και περιέκτης αιχμηρών αντικειμένων με την ειδική σήμανση (Καράμπαμπα Φ., 2013).

Διάφορα χημικά και φαρμακευτικά απόβλητα θα πρέπει να διαχωρίζονται και να συλλέγονται ξεχωριστά: στις κατηγορίες αυτές εντάσσονται απόβλητα με υδράργυρο, μπαταρίες, απόβλητα που περιέχουν κάδμιο, φωτοχημικά, εργαστηριακά αντιδραστήρια, κυτταροτοξικά φάρμακα και άλλα φαρμακευτικά προϊόντα. Όλα πρέπει να φέρουν σαφή σήμανση με τον τύπο των αποβλήτων και το όνομα των κύριων χημικών, με όλες τις απαραίτητες ετικέτες επικινδυνότητας που υποδεικνύουν διαβρωτικά, εύφλεκτα, εκρηκτικά ή τοξικά χημικά. Τα υγρά χημικά απόβλητα δεν πρέπει ποτέ να αναμιγνύονται ή να απορρίπτονται σε αγωγούς, αλλά πρέπει να αποθηκεύονται σε ισχυρά στεγανά δοχεία. (WHO, 2014) Η διαχείριση των φαρμάκων και ιδιαίτερα των κυτταροτοξικών, εμπίπτει στο πλαίσιο εφαρμογής της κοινής υπουργικής απόφασης 13588/725/2006 «Μέτρα όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 91/689/ΕΚ» (ΦΕΚ Β΄ 383), καθώς και του Νόμου 3204/2003 «Τροποποίηση και συμπλήρωση της νομοθεσίας για το Εθνικό Σύστημα Υγείας και ρυθμίσεις άλλων θεμάτων αρμοδιότητας του Υπουργείου Υγείας και Πρόνοιας». (ΦΕΚ Α΄ 296)

Η ανάκτηση αργύρου από φωτοχημικές ουσίες με κάποιο όφελος και η επιστροφή χημικών ουσιών στους προμηθευτές θα πρέπει να πραγματοποιείται, όπου είναι δυνατόν. Ο άργυρος χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε ιατρικά προϊόντα, αλλά σπάνια διαχωρίζεται λόγω έλλειψης ειδικών εγκαταστάσεων διάθεσης ή ανάκτησης μετάλλων. Οι λαμπτήρες χαμηλής ενέργειας (φθορισμού) περιέχουν μικρές ποσότητες υδραργύρου. Τόσο αυτές όσο και οι μπαταρίες πρέπει να διαχωρίζονται και να υποβάλλονται σε επεξεργασία με διαδικασίες ανακύκλωσης, όπου υπάρχουν κατάλληλες εγκαταστάσεις. (WHO, 2014)

Τα χρησιμοποιημένα έλαια μηχανών καθώς και τα έλαια που προέρχονται από αντλίες κενού, συλλέγονται σε ξεχωριστά, στεγανά δοχεία, όπως ισχύει στο ΠΔ 82/2004 (ΦΕΚ Α'64).

Οι χρησιμοποιημένες ή εξαντλημένες μπαταρίες συλλέγονται σε ειδικό περιέκτη συλλογής και παραδίδονται σε εγκεκριμένη μονάδα ανακύκλωσης ή διάθεσης, όπως ισχύει στο ΠΔ 115/2004. (ΦΕΚ 80/Α/2004)

Η διαχείριση των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού γίνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Π.Δ. 117/2004 (ΦΕΚ Α' 82) όπως εκάστοτε ισχύει.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται συνοπτικά οι ενέργειες που απαιτούνται για τη σήμανση, χρωματική κωδικοποίηση και συλλογή των κατηγοριών νοσοκομειακών αποβλήτων. (UNEP, 2012; WHO, 2017)

Τα δοχεία απορριμμάτων διατίθενται σε πολλά σχήματα και μεγέθη και κατασκευάζονται από διαφορετικά υλικά. Σε κάθε περίπτωση, εκτός από τα δοχεία αιχμηρών αντικειμένων, πρέπει να είναι ανθεκτικά και στεγανά και επενδυμένα με κατάλληλη πλαστική σακούλα. Το συνιστώμενο πάχος των σάκων για μολυσματικά απόβλητα είναι 70 μm (ISO 7765 2004). Τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται είτε για δοχεία είτε για σάκους δεν πρέπει να περιέχουν χλώριο. Τα αιχμηρά αντικείμενα πρέπει να συλλέγονται σε αδιάβροχα και αδιαπέραστα δοχεία, τα οποία να ανοίγουν δύσκολα αφού σφραγιστούν. Οι κάδοι των απορριμμάτων πρέπει να διαθέτουν καλά καλύμματα, είτε αφαιρούμενα με το χέρι είτε, κατά προτίμηση, με πεντάλ ποδιών. Το δοχείο και η σακούλα πρέπει να έχουν το σωστό χρώμα για τα απόβλητα που προορίζονται και η επισήμανση τους πρέπει να είναι σαφής. Η ανάμιξη χρωμάτων - όπως η τοποθέτηση κίτρινων σάκων σε μαύρους κάδους - συνίσταται να αποφεύγεται, καθώς αυξάνει τις πιθανότητες ανάμιξης των αποβλήτων. (WHO, 2014)

Πίνακας 3. Ενέργειες για το διαχωρισμό και τη συλλογή αποβλήτων (UNEP, 2012; WHO, 2017).

Κατηγορίες αποβλήτων	Χρώμα και σήμανση περιέκτη	Τύπος περιέκτη	Συχνότητα συλλογής
Μολυσματικά απόβλητα	Κίτρινο, με σήμανση βιολογικού κινδύνου και ετικέτα «επικίνδυνα ιατρικά απόβλητα»	Ανθεκτική σε διαρροή πλαστική σακούλα τοποθετημένη σε δοχείο (οι σακούλες για εξαιρετικά μολυσματικά απόβλητα πρέπει να είναι ανθεκτικές σε αποστείρωση)	Μετά την πλήρωση των $\frac{3}{4}$ του περιέκτη ή κάθε μία ημέρα
Αιχμηρά αντικείμενα	Κίτρινο, με σήμανση βιολογικού κινδύνου και ετικέτα «αιχμηρά»	Αδιάτρητος περιέκτης	Όταν πληρωθούν τα $\frac{3}{4}$ του περιέκτη
Παθολογικά απόβλητα	Κίτρινο, με σήμανση βιολογικού κινδύνου	Ανθεκτικός σε διαρροές πλαστικός σάκος τοποθετημένος στον περιέκτη	Μετά την πλήρωση των $\frac{3}{4}$ του περιέκτη ή κάθε μία ημέρα
Χημικά και φαρμακευτικά απόβλητα	Καφέ, με σήμανση του κατάλληλου συμβόλου κινδύνου	Πλαστικός σάκος ή συμπαγής περιέκτης	Ανάλογα με την απαίτηση
Ραδιενεργά απόβλητα	Σήμανση με το σύμβολο της ραδιενέργειας	Δοχείο από μόλυβδο	Ανάλογα με την απαίτηση
Γενικά απόβλητα	Μαύρο	Πλαστικός σάκος εντός του περιέκτη ή περιέκτης ο οποίος έχει προηγουμένως απολυμανθεί	Όταν πληρωθεί ο περιέκτης

2.2 Μεταφορά

2.2.1 Μεταφορά εντός της μονάδας υγείας

Κατά την μεταφορά των αποβλήτων εντός της μονάδας υγειονομικής περίθαλψης συνίσταται να χρησιμοποιούνται καθορισμένες διαδρομές, με στόχο την ελαχιστοποίηση της διέλευσης από χώρους φροντίδας ασθενών, αλλά και καθαρών περιοχών. Επίσης θα πρέπει να επιλέγονται ώρες με μειωμένη κίνηση, για τον περιορισμό της έκθεσης του προσωπικού και των ασθενών σε αυτά. Ανάλογα με το σχεδιασμό της μονάδας, η εσωτερική μεταφορά

αποβλήτων θα πρέπει να χρησιμοποιεί κατά το δυνατόν ξεχωριστούς ορόφους, σκάλες ή ανελκυστήρες. Οι συνήθεις διαδρομές και οι χρόνοι μεταφοράς θα πρέπει να είναι σταθεροί και αξιόπιστοι. Οι μεταφορείς πρέπει να φορούν κατάλληλο ατομικό προστατευτικό εξοπλισμό, γάντια, ανθεκτικά και κλειστά παπούτσια, ολόσωμες φόρμες και μάσκες.

Τα επικίνδυνα και μη επικίνδυνα απόβλητα πρέπει πάντα να μεταφέρονται ξεχωριστά. Γενικά, υπάρχουν τρία διαφορετικά συστήματα μεταφοράς:

- Τα καρότσια μεταφοράς αποβλήτων για γενικά απόβλητα πρέπει να είναι βαμμένα σε μαύρο χρώμα, να χρησιμοποιούνται μόνο για μη επικίνδυνα απόβλητα και να φέρουν την ένδειξη "Γενικά απόβλητα" ή "Μη επικίνδυνα απόβλητα".
- Τα μολυσματικά απόβλητα μπορούν να μεταφερθούν μαζί με χρησιμοποιημένα απορρίμματα. Τα μολυσματικά απόβλητα δεν πρέπει να μεταφέρονται μαζί με άλλα επικίνδυνα απόβλητα, για να αποφευχθεί η πιθανή εξάπλωση μολυσματικών παραγόντων. Τα καροτσάκια μεταφοράς πρέπει να είναι χρωματισμένα με τον κατάλληλο κωδικό χρώματος για μολυσματικά απόβλητα (κίτρινο) και πρέπει να φέρουν την ένδειξη "Μολυσματικά απόβλητα".
- Άλλα επικίνδυνα απόβλητα, όπως χημικά και φαρμακευτικά απόβλητα, πρέπει να μεταφέρονται χωριστά σε δοχεία προς τους κεντρικούς χώρους αποθήκευσης.

Δεν συνιστάται η χρήση αγωγών απορριμμάτων σε εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης, επειδή μπορούν να αυξήσουν τον κίνδυνο μετάδοσης αερομεταφερόμενων λοιμώξεων. (WHO, 2014)

2.2.2 Τροχήλατα μέσα μεταφοράς

Τα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης μπορεί να είναι ογκώδη και βαριά και πρέπει να μεταφέρονται με τροχήλατα μέσα ή καροτσάκια που δεν χρησιμοποιούνται για οποιονδήποτε άλλο σκοπό (Σχήμα 11). Για να αποφευχθούν τυχόν τραυματισμοί, καθώς και η πιθανή μετάδοση λοιμώξεων, τα καροτσάκια πρέπει (WHO, 2014; Καράμπαμπα Φ., 2013):

- να επιτρέπουν την εύκολη φόρτωση και εκφόρτωση
- να μην έχουν αιχμηρές άκρες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ζημιά σε σάκους ή δοχεία απορριμμάτων κατά τη φόρτωση και εκφόρτωση
- να καθαρίζονται εύκολα και, εάν απαιτείται, να διαθέτουν οπή αποστράγγισης

- να επισημαίνονται και να έχουν αυστηρά καθορισμένη χρήση για συγκεκριμένο τύπο αποβλήτων
- να επιτρέπουν εύκολο χειρισμό
- να μην έχουν μεγάλο ύψος (ώστε να μην περιορίζουν την ορατότητα του προσωπικού που κάνει την μεταφορά)
- να μπορούν να ασφαλιστούν με κλειδαριά (για επικίνδυνα απόβλητα)
- να έχουν το κατάλληλο μέγεθος για τον όγκο των αποβλήτων που παράγονται στο χώρο υγειονομικής περίθαλψης

Είναι σημαντικό να υπάρχουν επιπλέον διαθέσιμα τροχήλατα μέσα μεταφοράς, για περιπτώσεις βλαβών και συντηρήσεων. Τα οχήματα πρέπει να καθαρίζονται και να απολυμαίνονται καθημερινά και όλες οι ετικέτες πρέπει να είναι στη θέση τους και άθικτες στο τέλος κάθε μεταφοράς. Όλα τα απόβλητα, αλλά ιδίως τα επικίνδυνα, δεν πρέπει ποτέ να μεταφέρονται χωρίς τα κατάλληλα μέσα, λόγω του κινδύνου ατυχήματος ή τραυματισμού από μολυσματικό υλικό ή από απορρίμματα που ενδέχεται να προεξέχουν από ένα δοχείο. (Καράμπαμπα Φ., 2013)



Σχήμα 11. Τροχήλατα μέσα μεταφοράς νοσοκομειακών αποβλήτων (WHO, 2014).

2.2.3 Μεταφορά εκτός χώρου νοσοκομείου

Η διαχείριση εκτός νοσοκομειακού χώρου αφορά τη μεταφορά των νοσοκομειακών αποβλήτων και τη διάθεσή τους. Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά ενός οχήματος μεταφοράς των νοσοκομειακών αποβλήτων εκτός του χώρου είναι τα ακόλουθα:

- να είναι ερμητικά κλειστό και μονωμένο
- να έχει κατάλληλο σύστημα για την ασφάλιση του φορτίου κατά τη μεταφορά
- να καθαρίζεται εύκολα τόσο στο εσωτερικό του όσο και στο εξωτερικό του
- να χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο για τη μεταφορά των νοσοκομειακών αποβλήτων
- να είναι εφοδιασμένο με υλικά για την προστασία του οδηγού αλλά και του περιβάλλοντος από μολύνσεις σε περίπτωση ατυχήματος και διασποράς του μεταφερόμενου φορτίου.
- να έχει διεθνές σήμα κινδύνου, καθώς και αριθμό τηλεφώνου για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

Τα μολυσματικά και τα άλλα επικίνδυνα νοσοκομειακά απόβλητα, τα οποία δεν έχουν καταστεί ακίνδυνα με κάποιο είδους προεπεξεργασία πρέπει να μεταφέρονται ξεχωριστά από τα οικιακού τύπου απόβλητα εκτός του νοσοκομειακού χώρου, διότι ο τρόπος διάθεσής τους είναι διαφορετικός. Στην Ελλάδα, η πλειοψηφία των νοσηλευτικών ιδρυμάτων χρησιμοποιεί τη δημοτική υπηρεσία καθαριότητας για την αποκομιδή και την τελική διάθεση των απορριμμάτων οικιακού τύπου που παράγουν (Σχήμα 12). (Αραβώσης Κ., 2008; WHO, 2014)



Σχήμα 12. Οχήματα εξω-νοσοκομειακής μεταφοράς αποβλήτων (Αραβώσης Κ., 2008).

2.3 Αποθήκευση

2.3.1 Κεντρική αποθήκευση αποβλήτων

Οι κεντρικοί χώροι αποθήκευσης νοσοκομειακών αποβλήτων είναι χώροι εντός μιας νοσοκομειακής μονάδας, όπου οι διάφοροι τύποι αποβλήτων πρέπει να μεταφέρονται και να διατηρούνται με ασφάλεια, έως ότου υποβληθούν σε επεξεργασία ή έως ότου συλλεχθούν για μεταφορά εκτός του χώρου. Οι γενικές απαιτήσεις αφορούν τους περισσότερους τύπους εγκαταστάσεων υγειονομικής περίθαλψης, όπου παράγονται επαρκή απόβλητα και πρέπει να αποθηκεύονται κεντρικά. Ορισμένοι τύποι αποθήκευσης αποβλήτων για συγκεκριμένα είδη (π.χ. αίμα, ραδιενεργές ουσίες, χημικές ουσίες) είναι πιθανό να απαιτούνται μόνο σε μεγάλα και εξειδικευμένα ιατρικά κέντρα. (WHO, 2014)

Ο χώρος αποθήκευσης απαιτείται (WHO, 2014; Καράμπαμπα Φ., 2013):

- να διαθέτει αδιαπέραστο, ανθεκτικό δάπεδο με καλή αποστράγγιση -χωρίς να επηρεάζει τον υδροφόρο ορίζοντα- το οποίο πρέπει να καθαρίζεται και να απολυμαίνεται εύκολα
- να εξασφαλίζει τη δυνατότητα διαχωρισμού των γενικών αποβλήτων από μολυσματικά και άλλα επικίνδυνα απόβλητα
- να διαθέτει παροχή νερού για καθαρισμό
- να έχει εύκολη πρόσβαση για τον υπεύθυνο διαχείρισης των αποβλήτων
- να μπορεί να ασφαλίσει για την αποτροπή της πρόσβασης από μη εξουσιοδοτημένα άτομα
- να είναι εύκολα προσβάσιμος για οχήματα συλλογής απορριμμάτων
- να διαθέτει προστασία από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες
- να μην είναι προσβάσιμος σε ζώα, έντομα και πουλιά
- να διαθέτει ικανοποιητικό φωτισμό και τουλάχιστον παθητικό αερισμό
- να μην βρίσκεται κοντά σε καταστήματα φρέσκων τροφίμων και χώρους παρασκευής τροφίμων
- να διαθέτει προμήθεια εξοπλισμού για καθαρισμό, προστατευτικά ενδύματα και σάκου ή δοχείων απορριμμάτων σε κοντινή απόσταση
- να διαθέτει νιπτήρα με νερό πόλης και σαπούνι, άμεσα διαθέσιμα για το προσωπικό
- να απολυμαίνεται τακτικά (τουλάχιστον μία φορά την εβδομάδα)
- να διαθέτει εξοπλισμό συγκράτησης διαρροών
- να είναι κατάλληλος για τον όγκο των αποβλήτων που παράγονται από κάθε εγκατάσταση υγειονομικής περίθαλψης. (The Global Fund, 2020; WHO, 2014; Καράμπαμπα Φ., 2013)

2.3.2 Αποθήκευση μολυσματικών αποβλήτων

Ο χώρος αποθήκευσης μολυσματικών αποβλήτων, εκτός όλων των προαναφερθέντων απαιτήσεων, πρέπει να αναγνωρίζεται χρησιμοποιώντας το κατάλληλο σήμα βιολογικού κινδύνου. Τα δάπεδα και οι τοίχοι πρέπει να είναι καλά μονωμένα και να επιτρέπουν εύκολη απολύμανση. Τα αιχμηρά αντικείμενα δεν έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις αποθήκευσης, ωστόσο άλλα μολυσματικά απόβλητα θα πρέπει να διατηρούνται σε θερμοκρασίες μεταξύ 3°C έως 8°C, εάν φυλάσσονται για περισσότερο από μία εβδομάδα. Σημειώνεται επίσης, πως δεν επιτρέπεται να πραγματοποιείται συμπίεση μολυσμένων απορριμμάτων ή απορριμμάτων με υψηλή περιεκτικότητα σε αίμα ή άλλα υγρά σώματος που προορίζονται για απόρριψη εκτός του χώρου. (WHO, 2014)

2.3.3 Αποθήκευση παθολογικών αποβλήτων

Τα παθολογικά απόβλητα, λόγω της ανάπτυξης παθογόνων που μπορεί να προκληθεί, θεωρούνται βιολογικά ενεργά απόβλητα και θα πρέπει να αναμένεται σχηματισμός αερίων κατά την αποθήκευση. Για την ελαχιστοποίηση αυτών, οι χώροι αποθήκευσης πρέπει να εξασφαλίζουν τις ίδιες συνθήκες με εκείνες για μολυσματικά απόβλητα. (WHO, 2014)

2.3.4 Αποθήκευση φαρμακευτικών αποβλήτων

Τα φαρμακευτικά απόβλητα πρέπει να διαχωρίζονται από άλλα απόβλητα και η τελική τους απόρριψη θα πρέπει να γίνεται με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς. Σε γενικές γραμμές, τα φαρμακευτικά απόβλητα μπορεί να είναι επικίνδυνα ή μη επικίνδυνα, σε υγρή ή στερεά κατάσταση, και η κάθε κατηγορία πρέπει να αντιμετωπίζεται διαφορετικά. Η ταξινόμηση πρέπει να πραγματοποιείται από φαρμακοποιό ή άλλο εμπειρογνώμονα φαρμακευτικών προϊόντων. (WHO, 2014)

Οι ροές φαρμακευτικών αποβλήτων που παρατίθενται παρακάτω μπορούν να διακριθούν σε:

- Φαρμακευτικά απόβλητα με μη επικίνδυνα χαρακτηριστικά που μπορούν να αποθηκευτούν σε χώρο αποθήκευσης μη επικίνδυνων αποβλήτων

- αμπούλες με μη επικίνδυνο περιεχόμενο (π.χ. βιταμίνες).
- υγρά με μη επικίνδυνα περιεχόμενα, όπως βιταμίνες, άλατα (χλωριούχο νάτριο)
- στερεά ή ημι-στερεά, όπως δισκία, κάψουλες, μίγματα, κρέμες, λοσιόν, γέλες και υπόθετα.
- δοχεία με εισπνεόμενα.
- Επικίνδυνα απόβλητα που πρέπει να αποθηκεύονται σύμφωνα με τα χημικά χαρακτηριστικά τους (π.χ. γενotoξικά φάρμακα) ή που έχουν ειδικές απαιτήσεις απόρριψης (π.χ. αντιβιοτικά)
 - συνταγογραφούμενα φάρμακα (πρέπει να αποθηκεύονται υπό κυβερνητική εποπτεία) απολυμαντικά και αντισηπτικά
 - αντι-μολυσματικά φάρμακα (π.χ. αντιβιοτικά)
 - γενotoξικά φάρμακα (γενotoξικά απόβλητα)
 - αμπούλες με αντιβιοτικά.

Τα γενotoξικά απόβλητα είναι πολύ τοξικά και πρέπει να ταυτοποιούνται και να αποθηκεύονται προσεκτικά μακριά από άλλα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης σε καθορισμένη ασφαλή τοποθεσία. Μπορεί να αποθηκευτούν με τον ίδιο τρόπο όπως τα τοξικά χημικά απόβλητα, αν και ορισμένα κυτταροτοξικά απόβλητα ενδέχεται να ενέχουν και κίνδυνο μόλυνσης. (WHO, 1999)

2.3.5 Αποθήκευση χημικών αποβλήτων

Κατά τον σχεδιασμό χώρων αποθήκευσης επικίνδυνων χημικών αποβλήτων, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών χημικών που θα αποθηκεύονται σε αυτούς -εύφλεκτα, διαβρωτικά, εκρηκτικά. Ο χώρος αποθήκευσης πρέπει να είναι κλειστός και να διαχωρίζεται από άλλους χώρους αποθήκευσης αποβλήτων (Σχήμα 13). Κατά την αποθήκευση υγρών χημικών ουσιών, σε περίπτωση που ο χώρος δεν διαθέτει δεξαμενή ανθεκτική σε χημικά για την συγκέντρωση τυχόν διαρροών, θα πρέπει να τοποθετούνται ειδικοί περιέκτες-παγίδες κάτω από τα δοχεία αποθήκευσης. Ο χώρος αποθήκευσης πρέπει να διαθέτει επαρκή φωτισμό και καλό εξαερισμό για να αποτρέψει τη συσσώρευση τοξικών αναθυμιάσεων. (WHO, 2014)



Σχήμα 13. Αριστερά: Προηγμένη αποθήκευση χημικών σε διαφορετικές θέσεις, Δεξιά: Αποθήκευση υγρών χημικών αποβλήτων σε ανθεκτικούς πλαστικούς περιέκτες (WHO, 2014).

Για να διασφαλιστεί η ασφαλής αποθήκευση χημικών αποβλήτων και η αποφυγή επικίνδυνων χημικών αντιδράσεων, θα πρέπει να τοποθετούνται σε ξεχωριστές ζώνες επισημασμένες σύμφωνα με την κατηγορία κινδύνου ως εξής (WHO, 2014):

- εκρηκτικά απόβλητα
- διαβρωτικά οξέα
- διαβρωτικά απόβλητα αλκαλίων (βάσεις)
- τοξικά απόβλητα
- εύφλεκτα απόβλητα
- οξειδωτικά απόβλητα
- αλογονωμένοι διαλύτες, που περιέχουν χλώριο, βρώμιο, ιώδιο ή φθόριο
- μη αλογονωμένοι διαλύτες

2.3.6 Αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων

Τα ραδιενεργά απόβλητα πρέπει να αποθηκεύονται σε περιέκτες από μόλυβδο που εμποδίζουν τη μετάδοση της ακτινοβολίας. Τα απόβλητα που πρόκειται να αποθηκευτούν κατά τη διάρκεια της ραδιενεργού διάσπασης πρέπει να φέρουν σήμανση με τον τύπο ραδιονουκλιδίου, την ημερομηνία, χρονική περίοδο πριν ολοκληρωθεί η πλήρης διάσπαση και λεπτομέρειες για τις απαιτούμενες συνθήκες αποθήκευσης.

Ο χρόνος αποθήκευσης για ραδιενεργά απόβλητα διαφέρει, καθώς ο κύριος στόχος σε αυτή την περίπτωση είναι η αποθήκευση των αποβλήτων έως ότου η ραδιενέργεια μειωθεί σημαντικά, ώστε τα απόβλητα να μπορούν να απορριφθούν με ασφάλεια, ως κανονικά απόβλητα. Ένας ελάχιστος χρόνος αποθήκευσης 10 ημιζώνων, για ραδιοϊσότοπα σε απόβλητα

με χρόνο ημιζωής κάτω των 90 ημερών, είναι μια συνήθης πρακτική. Στην συνέχεια, κατάλληλες πρακτικές θα πρέπει να ακολουθούνται ανάλογα με την υποκατηγορία στην οποία ανήκουν τα ραδιενεργά απόβλητα, ώστε να διασφαλιστεί η σωστή διαχείριση τους. Τα μολυσματικά ραδιενεργά απόβλητα πρέπει να απολυμαίνονται πριν από τη διάθεση τους, ενώ τα αιχμηρά αντικείμενα, όπως οι βελόνες και οι πιπέτες, πρέπει να τοποθετούνται σε κατάλληλα δοχεία αιχμηρών αντικειμένων. (WHO, 2014)

2.4 Επεξεργασία και τελική διάθεση μολυσματικών αποβλήτων

Η επιλογή των τεχνικών επεξεργασίας και διάθεσης εξαρτάται από έναν αριθμό παραμέτρων: την ποσότητα και τον τύπο των παραγόμενων αποβλήτων, ανεξάρτητα από το εάν υπάρχει ή όχι χώρος επεξεργασίας αποβλήτων κοντά στο νοσοκομείο, την διαθεσιμότητα αξιόπιστων μέσων μεταφοράς, τη διαθεσιμότητα οικονομικών, υλικών και ανθρώπινων πόρων, τη διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας, ανεξάρτητα από το εάν υπάρχει ή όχι εθνική νομοθεσία επί του θέματος, το κλίμα και τη στάθμη των υπόγειων υδάτων. Κατά την επιλογή της μεθόδου βασικό κριτήριο θα πρέπει να είναι η ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων στην υγεία και το περιβάλλον. Σίγουρα δεν υπάρχει καθολική λύση για την επεξεργασία αποβλήτων. (WHO, 2017)

Όταν δεν υπάρχει κατάλληλη υποδομή για την επεξεργασία των αποβλήτων σε μία περιοχή, είναι ευθύνη του νοσοκομείου να επεξεργάζεται ή να προ-επεξεργάζεται τα απόβλητά του. Αυτή η πρακτική παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι αποφεύγονται πιθανές επιπλοκές που συνεπάγεται η μεταφορά επικίνδυνων ουσιών, όταν δεν έχουν υποστεί προ-επεξεργασία. (ICRC, 2011)

Τα μολυσματικά απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης, πριν την περαιτέρω επεξεργασία τους πρέπει να απολυμαίνονται ή να αποστειρώνονται. Ως απολύμανση ορίζεται η μείωση ή απομάκρυνση παθογόνων για την ελαχιστοποίηση της μετάδοσης ασθενειών. Ως αποστείρωση ορίζεται η καταστροφή ή θανάτωση των μικροβίων. Αναλυτικότερα, λόγω της αδυναμίας πλήρους θανάτωσης των μικροοργανισμών η αποστείρωση εκφράζεται ως μείωση κατά 6 λογαριθμικές μονάδες, δηλαδή μείωση 99.9999% ή μεγαλύτερη, ενός συγκεκριμένου ανθεκτικού μικροοργανισμού. (WHO, 2014) Κατά αντιστοιχία μία μείωση κατά 4 λογαριθμικές μονάδες αντιστοιχεί σε μείωση της τάξης του 99,9999%. (UNEP, 2012)

Ακολούθως αναλύονται βασικές διαδικασίες για την προ-επεξεργασία και την τελική διάθεση όλων των τύπων μολυσματικών αποβλήτων.

2.4.1 Θερμικές διεργασίες

Αυτές οι διεργασίες βασίζονται στη θερμότητα -θερμική ενέργεια- για την καταστροφή των παθογόνων στα απόβλητα, και χρησιμοποιούνται από τις κυριότερες εγκαταστάσεις επεξεργασίας σε όλο τον κόσμο. Η κατηγορία αυτή μπορεί να υποδιαιρεθεί περαιτέρω σε διεργασίες χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας. Αυτή η κατάταξη είναι χρήσιμη λόγω των σημαντικών διαφορών στις θερμοχημικές αντιδράσεις και των φυσικών αλλαγών που συμβαίνουν στα απόβλητα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας τους σε διαφορετικούς τύπους εξοπλισμού, που τελικά οδηγούν σε πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά ατμοσφαιρικών εκπομπών. Οι διαδικασίες ξηρής αποστείρωσης χρησιμοποιούν υψηλότερες θερμοκρασίες και μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης από διεργασίες με ατμό και συνήθως δεν χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, αλλά για μικρούς όγκους.

Ως θερμικές διεργασίες χαμηλής θερμότητας ορίζονται εκείνες που χρησιμοποιούν θερμική ενέργεια σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες ώστε να καταστρέψουν μικροοργανισμούς, χωρίς ωστόσο να προκαλούν καύση ή πυρόλυση των αποβλήτων. (WHO, 2014; Emmanuel J., 2001) Γενικά, οι θερμικές τεχνολογίες χαμηλής θερμότητας λειτουργούν μεταξύ 100 °C και 180 °C και λαμβάνουν χώρα σε υγρό ή ξηρό περιβάλλον. Η υγρή θερμική επεξεργασία πραγματοποιείται με χρήση ατμού για την απολύμανση των αποβλήτων και συνήθως πραγματοποιείται σε κλίβανο ή σύστημα επεξεργασίας με ατμό. Η επεξεργασία με μικροκύματα ανήκει στην ίδια κατηγορία, καθώς η απολύμανση συμβαίνει μέσω της θέρμανσης της περιεχόμενης υγρασίας του εκάστοτε υλικού. Οι διαδικασίες ξηρής θερμότητας χρησιμοποιούν ζεστό αέρα, χωρίς την προσθήκη νερού ή ατμού, οπότε τα απόβλητα θερμαίνονται με αγωγή, συναγωγή και / ή θερμική ακτινοβολία. (WHO, 2014; UNEP, 2012; Emmanuel J., 2001)

2.4.1.1 Κλίβανος υγρής αποστείρωσης (Αυτόκαυστο)

Οι κλίβανοι υγρής αποστείρωσης έχουν χρησιμοποιηθεί για πάνω από έναν αιώνα για την αποστείρωση ιατρικών οργάνων και τις τελευταίες δεκαετίες έχουν προσαρμοστεί για την επεξεργασία νοσοκομειακών αποβλήτων. Ένας κλίβανος αποτελείται από ένα μεταλλικό θάλαμο σχεδιασμένο να αντέχει σε υψηλές πιέσεις, μια καλά μονωμένη πόρτα, η οποία σφραγίζει με ασφάλεια, και μια διάταξη σωλήνων και βαλβίδων, μέσω των οποίων εισάγεται και αφαιρείται ατμός από το θάλαμο. Ορισμένοι κλίβανοι έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε ο ατμός να εισέρχεται τόσο εντός του θαλάμου, όσο και να τον περιβάλλει. Η θέρμανση του εξωτερικού περιβλήματος μειώνει τη συμπύκνωση στο εσωτερικό του θαλάμου και επιτρέπει τη χρήση ατμού σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Σχήμα 14). (WHO, 2014; UNEP, 2012; Emmanuel J., 2001)



Σχήμα 14. Κλίβανοι υγρής αποστείρωσης (Αραβώσης Κ., 2008).

Οι κλίβανοι μπορούν να επεξεργαστούν ένα ευρύ φάσμα νοσοκομειακών αποβλήτων, όπως καλλιέργειες, αιχμηρά αντικείμενα, υλικά μολυσμένα με αίμα και σωματικά υγρά, χειρουργικά απόβλητα, εργαστηριακά απορρίμματα (εκτός χημικών αποβλήτων), γάζες, επιδέσμους, ρουχισμό και κλινοσκεπάσματα από τη φροντίδα των ασθενών. Ανάλογα με το χρόνο και τη θερμοκρασία της αποστείρωσης, είναι τεχνικά δυνατό να επεξεργαστούν μικρές ποσότητες ανθρώπινου ιστού, αλλά όχι και μεγάλα ανατομικά απόβλητα. (UNEP, 2012)

Οι πτητικές και ημι-πτητικές οργανικές ενώσεις, τα απόβλητα από χημειοθεραπείες, ο υδράργυρος, άλλα επικίνδυνα χημικά απόβλητα και τα ακτινολογικά απόβλητα δεν πρέπει να υποβάλλονται σε υγρή αποστείρωση. Κατά την αποστείρωση το φορτίο δεν θα πρέπει να είναι ογκώδες και θα πρέπει να είναι τοποθετημένο σε διάτρητο ή διαπερατό από ατμό περιέκτη, ώστε να μην παρεμποδίζεται η μεταφορά θερμότητας μέσω του ατμού. Η λειτουργία των κλιβάνων απαιτεί τον κατάλληλο συνδυασμό θερμοκρασίας/πίεσης και χρόνου έκθεσης για την επίτευξη καταστροφής των παθογόνων, μία συνήθης συνθήκη είναι οι 121 ° C για 30 λεπτά. (UNEP, 2012; Emmanuel J., 2001)

Εκτός από τους απλούς κλιβάνους υγρής αποστείρωσης έχουν αναπτυχθεί και υβριδικά συστήματα υγρής αποστείρωσης – 2^{ης} γενιάς - εξ ολοκλήρου αυτοματοποιημένα με συνεχή καταγραφή κι παρακολούθηση όλων των παραμέτρων. Αυτά τα υβριδικά συστήματα είναι ικανά να επιτύχουν υψηλά επίπεδα απολύμανσης σε μικρότερους χρόνους, λόγω των βελτιωμένων ποσοστών μεταφοράς θερμότητας και της επίτευξης πιο ομοιόμορφης θέρμανσης.

Τα υβριδικά αυτά συστήματα είναι σε θέση να επεξεργάζονται τους ίδιους τύπους νοσοκομειακών αποβλήτων με τους απλούς κλιβάνους και επιπλέον μεγάλα και ογκώδη κλινοσκεπάσματα και σφραγισμένα ανθεκτικά στη θερμότητα δοχεία. Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να επεξεργαστούν και να απενεργοποιήσουν με μεγάλη ευκολία παθογόνους μικροοργανισμούς. Επιπλέον, μερικά από αυτά, όπως το περιστρεφόμενο σύστημα αποστείρωσης, έχουν δοκιμαστεί επιτυχώς σε ζωικά και παθολογικά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων ανατομικών μερών.

Οι θερμικές διεργασίες χαμηλής θερμότητας, στις οποίες εντάσσονται οι κλίβανοι υγρής αποστείρωσης, παράγουν σημαντικά λιγότερη ατμοσφαιρική ρύπανση από τις θερμικές διεργασίες υψηλής θερμότητας, κάτι που τα καθιστά πιο ασφαλή για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Ωστόσο προϋπόθεση για την διατήρηση των χαμηλών εκπομπών είναι ο σωστός διαχωρισμός των αποβλήτων, καθώς η τοποθέτηση επικίνδυνων χημικών στον θάλαμο επεξεργασίας απελευθερώνει τοξικές μολυσματικές ουσίες στον αέρα, ή στα επεξεργασμένα απόβλητα. (UNEP, 2012)

2.4.1.2 Θερμική αδρανοποίηση

Η θερμική αδρανοποίηση (thermal inactivation) αποτελεί μία διεργασία κατά την οποία τα απόβλητα υπόκεινται σε θέρμανση στην κατάλληλη θερμοκρασία, ώστε να εξαλειφθεί ο μολυσματικός παράγοντας που τα χαρακτηρίζει. Γίνεται τοποθέτηση των αποβλήτων σε ένα θάλαμο που έχει προθερμανθεί και η παραμονή τους εντός αυτού διαρκεί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Απαιτείται ανάμιξη των αποβλήτων πριν την επεξεργασία τους, με στόχο τη μέγιστη δυνατή ομοιογένεια κατά τη διάρκεια παραμονής στη μονάδα επεξεργασίας. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως μόνο για την επεξεργασία μεγάλου όγκου υγρών αποβλήτων. (Αραβώσης Κ., 2008)

2.4.1.3 Επεξεργασία με μικροκύματα

Τα μικροκύματα είναι ουσιαστικά μια διεργασία επεξεργασίας με βάση τον ατμό, καθώς η επεξεργασία πραγματοποιείται μέσω της υγρασίας και του ατμού που παράγεται από την ενέργεια των μικροκυμάτων. Το περιεχόμενο νερό στα απόβλητα θερμαίνεται γρήγορα με μικροκύματα σε συχνότητα περίπου 2450 MHz και μήκος κύματος 12.24 cm. Γενικά, τα συστήματα επεξεργασίας με μικροκύματα αποτελούνται από μια περιοχή ή έναν θάλαμο στον οποίο η ενέργεια που παράγεται από μια γεννήτρια μικροκυμάτων κατευθύνεται προς τα υπό επεξεργασία απόβλητα (Σχήμα 15). (UNEP, 2012; Πούλιος Κ., 2010)



Σχήμα 15. Μονάδα αποστείρωσης αποβλήτων με τη μέθοδο των μικροκυμάτων
(Αραβώσης Κ., 2008).

Ένα τυπικό σύστημα μικροκυμάτων διαλείπουσας λειτουργίας μπορεί να επεξεργάζεται 30 έως 100 λίτρα αποβλήτων ανά κύκλο, ενώ ένας κύκλος μπορεί να κυμαίνεται από 30 λεπτά έως μία ώρα. Ένα μεγάλης κλίμακας ημι-συνεχές σύστημα μικροκυμάτων, μπορεί να έχει πολύ μεγαλύτερη δυναμικότητα της τάξης των 250 kg/ώρα, είναι όμως αρκετά πιο σύνθετο και περιλαμβάνει, εκτός από την γεννήτρια μικροκυμάτων, τεμαχιστή, μεταφορέα, γεννήτρια ατμού και κατάλληλα φίλτρα αέρα (High-efficiency particulate air, HEPA). (WHO, 2014; UNEP, 2012)

Οι τύποι αποβλήτων που συνήθως υποβάλλονται σε επεξεργασία σε συστήματα μικροκυμάτων είναι πανομοιότυποι με αυτούς που υποβάλλονται σε επεξεργασία σε κλιβάνους υγρής αποστείρωσης. Δεν συνίσταται η επεξεργασία σφραγισμένων γυάλινων μπουκαλιών που περιέχουν ρευστό, καθώς η πίεση στο εσωτερικό μπορεί να προκαλέσει ρήξη ή και έκρηξη των φιαλών. Και με αυτή τη τεχνολογία δεν πρέπει να επεξεργάζονται πτητικές και ημι-πτητικές οργανικές ενώσεις, χημειοθεραπευτικά απόβλητα, υδράργυρος, άλλα επικίνδυνα χημικά απόβλητα και ακτινολογικά απόβλητα. (UNEP, 2012)

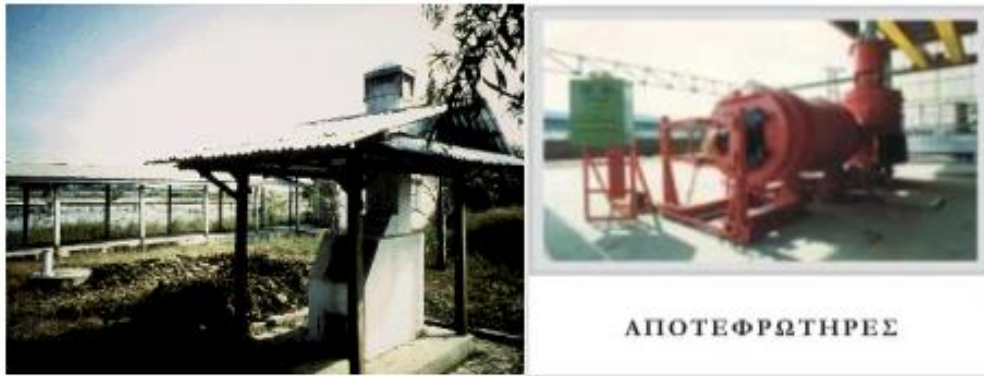
2.4.1.4 Κλίβανος ξηρής αποστείρωσης

Η ξηρή θερμική επεξεργασία μπορεί να εφαρμοστεί στην επεξεργασία μολυσματικών αποβλήτων. Σε αυτή τη περίπτωση η θερμότητα εφαρμόζεται χωρίς προσθήκη ατμού ή νερού. Τα απόβλητα θερμαίνονται με αγωγή, φυσική ή αναγκαστική συναγωγή ή θερμική ακτινοβολία. Στην αναγκαστική μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, ο αέρας, που θερμαίνεται μέσω αντιστάσεων, είναι σε συνεχή ανακυκλοφορία γύρω από τα απόβλητα στο θάλαμο. Κατά γενικό κανόνα, οι διαδικασίες ξηρής αποστείρωσης απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες και μεγαλύτερους χρόνους έκθεσης σε σχέση με τις διεργασίες με ατμό και συνήθως χρησιμοποιούνται για τη επεξεργασία μικρών όγκων αποβλήτων. Αυτή η τεχνολογία είναι κατάλληλη για την επεξεργασία απορριμμάτων αιχμηρών αντικειμένων, καθώς και μικρών ποσοτήτων μολυσματικών αποβλήτων. Κατά την ξηρή αποστείρωση δεν παράγονται προϊόντα καύσης και υπάρχει η δυνατότητα οι εκπομπές από τον θάλαμο να περνούν μέσα από σύστημα φίλτρων ενεργού άνθρακα και φίλτρο σωματιδίων υψηλής απόδοσης (HEPA) για την απομάκρυνση των οσμών και των βακτηρίων. (UNEP, 2012)

2.4.1.4 Αποτέφρωση

Η αποτέφρωση είναι μια διαδικασία ξηρής οξειδωσης σε υψηλή θερμοκρασία που μετατρέπει τα οργανικά και εύφλεκτα απόβλητα σε ανόργανα, άκαυστα υλικά και οδηγεί σε σημαντική μείωση του όγκου και του βάρους τους. Οι θερμικές διεργασίες υψηλής θερμότητας λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασίες που ξεκινάνε από 200 °C και μπορούν να ξεπεράσουν τους 1000 °C. Περιλαμβάνουν τη χημική και φυσική διάσπαση της οργανικής ύλης μέσω των διαδικασιών καύσης, πυρόλυσης ή αεριοποίησης. Ένα μειονέκτημα αυτών των τεχνολογιών είναι η δημιουργία υποπροϊόντων καύσης που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα και η δημιουργία τέφρας. Η καύση νοσοκομειακών απορριμμάτων παράγει αέριες εκπομπές, όπως ατμό, διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου και μια σειρά πτητικών ουσιών (π.χ. μέταλλα, αλογονωμένα οξέα, προϊόντα ατελούς καύσης) και σωματιδιακή ύλη, καθώς και στερεά υπολείμματα με τη μορφή τέφρας. (UNEP, 2012; Πούλιος Κ., 2010)

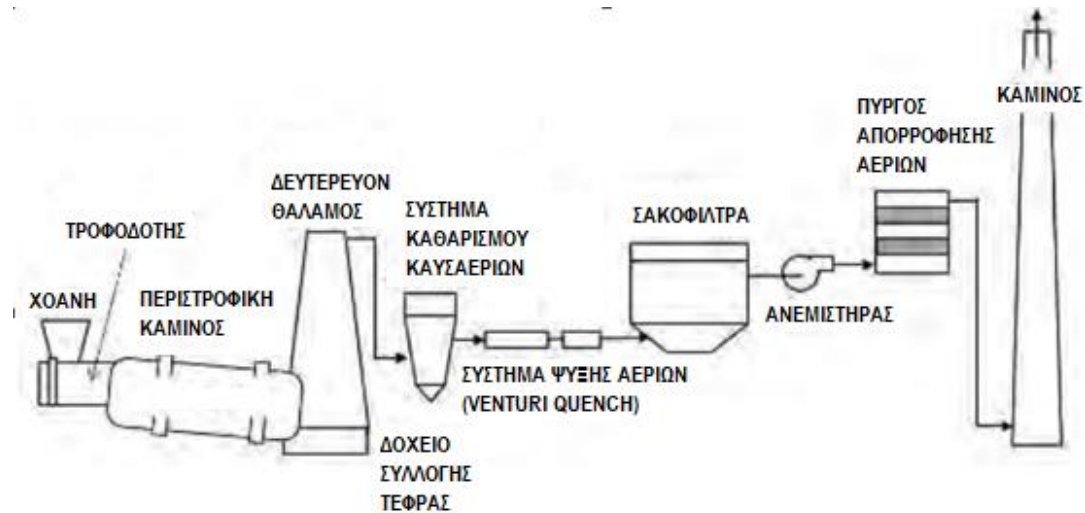
Ένας αποτεφρωτήρας πρέπει να διαθέτει έναν πρωτεύοντα θάλαμο καύσης (ή κάμινο), έναν δευτερεύοντα θάλαμο (ή θάλαμο μετά την καύση), συσκευές ελέγχου της μόλυνσης του αέρα (ή σύστημα καθαρισμού καυσαερίων ή ελέγχου εκπομπών), ώστε να πληροί τα εθνικά και διεθνή πρότυπα για τις εκπομπές ρύπων, ένα σύστημα επεξεργασίας λυμάτων, εάν το σύστημα που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των καυσαερίων χρησιμοποιεί υγρά, και μια καμινάδα που είναι 2.5 φορές υψηλότερη από την πιο ψηλή γειτονική δομή (Σχήμα 16). Επιπρόσθετα είναι επιθυμητό το σύστημα τροφοδοσίας αποβλήτων (ή σύστημα φόρτωσης) να αποτρέπει πτώσεις θερμοκρασίας στον πρωτογενή θάλαμο κατά την τροφοδοσία απορριμμάτων, καθώς επίσης να υπάρχει διαθέσιμο σύστημα συλλογής τέφρας για την αποφυγή της διασποράς της. (UNEP, 2012)



Σχήμα 16. Αριστερά: Απλός αποτεφρωτήρας μαζικής καύσης και Δεξιά: Περιτροφικός αποτεφρωτήρας (Αραβώσης Κ., 2008).

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αποτεφρωτήρες είναι οι περιστροφικοί (Σχήμα 17). Μπορούν να λειτουργούν συνεχώς και να προσαρμόζονται σε ένα ευρύ φάσμα συσκευών φόρτωσης, όπως τροφοδότες με έμβολο και μεταφορικοί κοχλίες. Όπως συμβαίνει με όλες τις διεργασίες μεγάλης κλίμακας, αυτοί οι αποτεφρωτήρες πρέπει να βρίσκονται σε βιομηχανικές περιοχές μακριά από κατοικίες, σχολεία, αγροκτήματα, εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης και άλλες πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Οι αποτεφρωτές μπορούν να επεξεργαστούν ένα ευρύ φάσμα αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης, όπως καλλιέργειες, αιχμηρά αντικείμενα, υλικά μολυσμένα με αίμα και σωματικά υγρά, χειρουργικά απόβλητα, εργαστηριακά απορρίμματα και απόβλητα, όπως γάζες, επιδέσμους, ρουχισμό και κλινοσκεπάσματα. Υπάρχουν επίσης και ειδικά σχεδιασμένοι αποτεφρωτήρες για παθολογικά απόβλητα και μεγάλα ανατομικά υπολείμματα, καθώς και αποτεφρωτήρες υψηλής θερμοκρασίας (> 1200°C) ειδικά σχεδιασμένοι για επικίνδυνα χημικά απόβλητα - φαρμακευτικά και γενετοξικά- και πλαστικά. Χρησιμοποιούνται επίσης, για την επεξεργασία τοξικών αποβλήτων, από ειδικευμένους οργανισμούς και υπό την παρακολούθηση ρυθμιστικών αρχών. Τα ακόλουθα υλικά δεν πρέπει να αποτεφρώνονται: δοχεία πεπιεσμένου αερίου, μεγάλες ποσότητες δραστικών χημικών απόβλητων, άλατα αργύρου, ακτινογραφικά απόβλητα, απόβλητα που περιέχουν υδράργυρο, κάδμιο και άλλα βαρέα μέταλλα, σφραγισμένες αμπούλες ή φιαλίδια που μπορεί να 'σκάσουν' και ραδιενεργά υλικά. (UNEP, 2012; WHO,2014)



Σχήμα 17. Περιστροφικός αποτεφρωτήρας (UNEP, 2012).

2.4.1.4.1 Αεριοποίηση

Οι διεργασίες αεριοποίησης και πυρόλυσης λειτουργούν με υπο-στοιχειομετρικά επίπεδα αέρα. Η αεριοποίηση είναι η μετατροπή μιας στερεάς ή υγρής ουσίας σε αέριο μείγμα μέσω μερικής οξείδωσης με εφαρμογή θερμότητας. Η μερική οξείδωση επιτυγχάνεται συνήθως περιορίζοντας τα επίπεδα του οξυγόνου (ή του αέρα) στο θάλαμο καύσης (πυρόλυση) και η διεργασία βελτιστοποιείται ώστε να παράγει τη μέγιστη ποσότητα αέριων προϊόντων διάσπασης, συνήθως μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του άνθρακα, υδρογόνου, νερού, αζώτου, μεθανίου και μικρών ποσοτήτων μεγαλύτερων υδρογονανθράκων. Ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται οξυγόνο ή αέρας, η θερμογόνος δύναμη του παραγόμενου μίγματος αερίων είναι είτε μικρότερη από 25%, είτε μεταξύ 25-40% σε σχέση με του φυσικού αερίου. Η αεριοποίηση εξακολουθεί να παράγει στερεά και υγρά υποπροϊόντα, τα οποία μπορεί να περιέχουν υψηλά επίπεδα τοξικών ρύπων. (UNEP, 2012)

2.4.1.4.2 Πυρόλυση

Η πυρόλυση είναι η θερμική αποικοδόμηση μιας ουσίας απουσία ή με περιορισμένη παροχή οξυγόνου. Πρόκειται για μια ειδική περίπτωση θερμόλυσης και χρησιμοποιείται συνήθως για οργανικά υλικά, εμφανίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες και δεν περιλαμβάνει αντιδράσεις με οξυγόνο. Ωστόσο, με τα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης είναι αδύνατη η πλήρης

απουσία οξυγόνου. Ως αποτέλεσμα, κάποια οξείδωση θα συμβεί κατά την πυρόλυση, παράγοντας διοξίνες, φουράνια και άλλα προϊόντα ατελούς καύσης. (WHO 2014; UNEP, 2012)

Στην περίπτωση της επεξεργασίας νοσοκομειακών αποβλήτων, αναφέρεται η πυρόλυση πλάσματος με τη χρήση ενός πλήρως ιονισμένου αερίου (πλάσμα) για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα σε θερμοκρασίες περίπου 1650 °C και υψηλότερες. Δεδομένου ότι το πλάσμα παράγει ηλεκτρική εκφόρτιση υψηλής ενέργειας, απαιτούνται σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας για να λειτουργήσει. (UNEP, 2012; Αραβώσης Κ., 2008)

2.4.2 Χημικές διεργασίες

Η επεξεργασία αυτού του τύπου έχει συνήθως ως αποτέλεσμα την απολύμανση και όχι την αποστείρωση. Η χημική απολύμανση είναι πιο κατάλληλη για την επεξεργασία υγρών απόβλητων όπως αίμα, ούρα, περιττώματα ή λύματα νοσοκομείων, αλλά μπορεί να αξιοποιηθεί και σε μικροβιολογικές καλλιέργειες και αιχμηρά αντικείμενα. Οι χημικές μέθοδοι επεξεργασίας χρησιμοποιούν απολυμαντικά, όπως διαλυμένο διοξείδιο του χλωρίου, υποχλωριώδες νάτριο, υπεροξικό οξύ, διάλυμα ασβέστη, αέριο όζον ή ξηρές ανόργανες χημικές ουσίες (π.χ. σκόνη οξειδίου του ασβεστίου). Συχνά περιλαμβάνουν τεμαχισμό, λείανση ή ανάμιξη, παραδείγματος χάριν με τη χρήση λειοτεμαχιστή. Μέσω αυτής της διεργασίας επιτυγχάνεται αύξηση της έκθεσης των αποβλήτων στον χημικό παράγοντα, καθώς με τον τεμαχισμό είναι εφικτή η διείσδυση του χημικού απολυμαντικού σε όλη τη μάζα των αποβλήτων. (UNEP, 2012; WHO, 2014, Αραβώσης Κ., 2008)

Στα συστήματα επεξεργασίας υγρών τα απόβλητα μπορούν να περάσουν από ένα τμήμα αφυδάτωσης, για να διαχωριστεί και να ανακυκλωθεί το απολυμαντικό. Εκτός από τα χημικά απολυμαντικά, υπάρχουν επίσης ενώσεις ενθυλάκωσης που μπορούν να στερεοποιήσουν αιχμηρά αντικείμενα, αίμα ή άλλα υγρά σώματος πριν από την απόρριψη. Ένα άλλο παράδειγμα χημικής διαδικασίας είναι η αλκαλική υδρόλυση. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα σύστημα θερμαινόμενων ανοξειδωτών δεξαμενών που χρησιμοποιεί αλκάλια για τη χώνευση ιστών, παθολογικών αποβλήτων, ανατομικών μερών ανθρώπων και ζώων.

Τα περισσότερα νοσοκομειακά απόβλητα μπορούν να υποστούν χημική απολύμανση, συμπεριλαμβανομένων των ραδιενεργών, των επικίνδυνων και των κυτταροτοξικών απόβλητων. Ωστόσο, η χημική επεξεργασία δεν χρησιμοποιείται ευρέως στη διαχείριση των μολυσματικών αποβλήτων, διότι δεν φέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα, όπως η αποτέφρωση και η αποστείρωση με ατμό, ενώ επιπρόσθετα οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται θέτουν σε κίνδυνο τόσο τους εργαζόμενους των μονάδων υγείας όσο και το περιβάλλον. (Αραβώσης Κ., 2008)

2.4.3 Τεχνολογίες ακτινοβολίας

Η εφαρμογή ακτινοβολίας αναγνωρίζεται πλέον ως πιο φιλική προς το περιβάλλον σε σύγκριση με τις χημικές διεργασίες, ενώ έχει πολύ μεγαλύτερο βαθμό διεϊσδυσης στα υλικά. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας βρίσκει ήδη εφαρμογή στην αποστείρωση ιατρικών συσκευών, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για την αποκατάσταση βιολογικών περιβαλλοντικών κινδύνων ή την καταστροφή επικίνδυνων χημικών. (Hossain, 2018) Η επεξεργασία με ακτινοβολία περιλαμβάνει διεργασίες που χρησιμοποιούν ακτινοβολία από δέσμες ηλεκτρονίων, κοβάλτιο-60 ή υπεριώδεις πηγές. Αυτές οι τεχνολογίες απαιτούν ειδική θωράκιση για την αποφυγή έκθεσης του προσωπικού σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η αποτελεσματικότητα της καταστροφής των παθογόνων σε αυτή την περίπτωση εξαρτάται από την απορροφούμενη δόση ακτινοβολίας από τη μάζα των αποβλήτων. Οι δέσμες ηλεκτρονίων είναι αρκετά ισχυρές ώστε να διαπερνούν σάκους και δοχεία απορριμμάτων, ενώ η μικροβιοκτόνος υπεριώδης ακτινοβολία δύναται να χρησιμοποιηθεί για την καταστροφή των αερομεταφερόμενων μικροοργανισμών, ως συμπληρωματική τεχνική άλλων τεχνολογιών επεξεργασίας, αλλά δεν μπορεί να διεϊσδύσει σε κλειστούς σάκους αποβλήτων. (UNEP, 2012; WHO, 2014)

2.4.4 Βιολογικές διεργασίες

Αυτές οι διεργασίες συναντώνται σε φυσικούς ζωντανούς οργανισμούς, αλλά αναφέρονται συγκεκριμένα στην υποβάθμιση της οργανικής ύλης όταν εφαρμόζονται για την επεξεργασία νοσοκομειακών αποβλήτων. Ορισμένα συστήματα βιολογικής επεξεργασίας χρησιμοποιούν ένζυμα για να επιταχύνουν την καταστροφή οργανικών αποβλήτων που περιέχουν παθογόνα.

Η λιπασματοποίηση και η κομποστοποίηση, ή αλλιώς χώνευση οργανικών αποβλήτων με γαιοσκώληκες, είναι βιολογικές διεργασίες και έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την αποσύνθεση απορριμμάτων των μαγειρείων του νοσοκομείου, καθώς και άλλων οργανικών απορριμμάτων. (UNEP, 2012) Η φυσική αποσύνθεση των παθολογικών αποβλήτων μέσω της ταφής είναι ένα άλλο παράδειγμα βιολογικής διαδικασίας. (Mathur U.B., 2006)

2.4.5 Μηχανικές διεργασίες

Οι διαδικασίες μηχανικής επεξεργασίας περιλαμβάνουν διάφορες τεχνολογίες τεμαχισμού, λείανσης, ανάμιξης και συμπύκνωσης, που μειώνουν τον όγκο των αποβλήτων, χωρίς να καταστρέφουν τα παθογόνα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μηχανικές διεργασίες συνδυάζονται με άλλες μεθόδους επεξεργασίας. Η μηχανική καταστροφή μπορεί να καταστήσει τα απόβλητα πιο ακίνδυνα στην περίπτωση των αιχμηρών εργαλείων. Στην περίπτωση διεργασιών θερμικής ή χημικής επεξεργασίας, μηχανικές συσκευές, όπως τεμαχιστές και αναμικτήρες, μπορούν επίσης να βελτιώσουν το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας ή να αυξήσουν την ελεύθερη επιφάνεια των αποβλήτων. (WHO, 2014)

2.4.6 Υγειονομική ταφή νοσοκομειακών αποβλήτων

Εφόσον πραγματοποιηθεί επεξεργασία ή ελαχιστοποίηση των νοσοκομειακών αποβλήτων, η χρήση χώρου υγειονομικής ταφής για μεγάλο μέρος των υλικών που παράγονται κατά την επεξεργασία είναι απαραίτητη. Ακόμα και στην περίπτωση που δεν έχει πραγματοποιηθεί επεξεργασία των αποβλήτων – σε λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες – τα απόβλητα πρέπει να οδηγηθούν σε χώρους υγειονομικής ταφής, καθώς η συσσώρευση απορριμμάτων σε ιατρικές εγκαταστάσεις ενέχει πολύ μεγαλύτερο κίνδυνο μόλυνσης. (WHO, 2017) Η απόρριψη νοσοκομειακών αποβλήτων σε χώρους μη ελεγχόμενης απόρριψης δεν συνιστάται και πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο ως έσχατη λύση.

Όταν γίνεται απόρριψη σε χώρους υγειονομικής ταφής, πρέπει να λαμβάνονται ορισμένες προφυλάξεις, ενώ είναι σημαντικό τα απορρίμματα να καλύπτονται γρήγορα. Μία τεχνική κάλυψης περιλαμβάνει την διάνοιξη μίας τάφρου, μέχρι το σημείο όπου βρίσκονται θαμμένα παλαιότερα αστικά απορρίμματα -άνω των τριών μηνών- και την άμεση ταφή των

αποβλήτων κάτω από ένα στρώμα 2 μέτρων. (ICRC, 2011) Η περιοχή πρέπει τουλάχιστον να ασφαρίζεται έναντι μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης με κατάλληλη περιφράξη, ενώ γενικά συστήνεται ο σχεδιασμός μιας ασφαλούς και πιο φιλικής προς το περιβάλλον εγκατάστασης. (WHO, 2017)

Στις περιπτώσεις που υπάρχει η δυνατότητα σχεδιασμού κατάλληλου χώρου υγειονομικής ταφής, τα ακόλουθα είναι οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- η πρόσβαση πρέπει να περιορίζεται και να ελέγχεται
- πρέπει να υπάρχει διαθέσιμος αρμόδιος φορέας
- οι περιοχές απόρριψης πρέπει να είναι συγκεκριμένες-βάση σχεδιασμού
- το κάτω μέρος του χώρου υγειονομικής ταφής πρέπει να είναι στεγανοποιημένο
- ο υδροφόρος ορίζοντας πρέπει να απέχει πάνω από 2 μέτρα από το χαμηλότερο σημείο του χώρου υγειονομικής ταφής
- δεν πρέπει να υπάρχουν πηγές πόσιμου νερού κοντά στον χώρο απόρριψης
- τα χημικά δεν πρέπει να απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής ταφής
- τα απόβλητα πρέπει να καλύπτονται καθημερινά
- ο χώρος υγειονομικής ταφής πρέπει να είναι εφοδιασμένος με κάλυμμα για να αποτρέπεται η διείσδυση όμβριων υδάτων
- τυχόν εκπλύματα πρέπει να συλλέγονται και να υποβάλλονται σε επεξεργασία

Κάθε φορά που χρησιμοποιείται δημοτικός χώρος υγειονομικής ταφής, ο αρμόδιος μηχανικός πρέπει να επιθεωρεί τον χώρο, προτού απορριφθούν επικίνδυνα ιατρικά απόβλητα. Θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιούνται ειδικά σχεδιασμένοι χώροι ταφής, κοντά στο χώρο του νοσοκομείου. Ιδανικά θα πρέπει να δημιουργείται μία τάφος επενδεδυμένη με υλικό χαμηλής διαπερατότητας, όπως ο πηλός, για να αποφευχθεί η ρύπανση των ρηχών υπόγειων υδάτων και η οποία θα πρέπει να περιφράσσεται έτσι ώστε να αποτρέπεται η ελεύθερη πρόσβαση. Τα νοσοκομειακά απόβλητα πρέπει να θάβονται αμέσως κάτω από ένα στρώμα εδάφους, μετά από κάθε εργασία εκφόρτωσης. Επίσης, η διασπορά ασβέστη στα απόβλητα παρέχει πρόσθετη προστασία, σε περίπτωση επιδημίας για παράδειγμα, και βοηθά στην εξάλειψη της οσμής. Όταν επέλθει πλήρωση της τάφρου θα πρέπει να σφραγίζεται. (ICRC, 2011)

2.4.7 Επίδραση της κάθε μεθόδου στα νοσοκομειακά απόβλητα

Όταν επιλέγεται μία μέθοδος διαχείρισης μολυσματικών νοσοκομειακών αποβλήτων θα πρέπει εκτός από την καταλληλότητα της μεθόδου για το υπό επεξεργασία απόβλητο, να εξετάζεται και μία πληθώρα τεχνολογικών, περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραμέτρων, όπως η απαιτούμενη δυναμικότητα, το επίπεδο αυτοματισμού, η αποτελεσματικότητα μικροβιακής αδρανοποίησης, το ρίσκο για τους εργαζόμενους, η κατανάλωση ενέργειας, τα λειτουργικά κόστη, η αποδοχή από την κοινωνία κ.α.

Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση της αναμενόμενης επίδρασης της κάθε μεθόδου στα νοσοκομειακά απόβλητα, αναφορικά με ορισμένες βασικές περιβαλλοντικές παραμέτρους. (UNEP, 2012)

Πίνακας 4. Επίδραση μεθόδων επεξεργασίας αποβλήτων σε βασικές περιβαλλοντικές παραμέτρους. (UNEP, 2012)

Μέθοδος	Αποτελεσματικότητα μείωσης μικροβιακού φορτίου	Μείωση όγκου	Μείωση μάζας	Βιβλιογραφία
Υγρή αποστείρωση	5-6 Log ₁₀ 99.999-99.9999%	Ελάχιστη	Όχι	UNEP, 2012
Υγρή αποστείρωση (με υβριδικά συστήματα)	6-8 Log ₁₀ 99.9999-99.999999%	60-80%	Ελάχιστη (έως 30%)	UNEP, 2012
Θερμική αδρανοποίηση	Ναι <i>Δεν αναφέρεται τιμή</i>	-	-	Αραβώσης Κ., 2008
Επεξεργασία με μικροκύματα	4-5 Log ₁₀ 99.99-99.999%	Ελάχιστη	Όχι	UNEP, 2012
Επεξεργασία με μικροκύματα (Συνεχής διεργασία με ενσωματωμένο τεμαχιστή)	3-7 Log ₁₀ 99.99-99.999%	60-80%	Όχι	UNEP, 2012
Ξηρή αποστείρωση	6-8 Log ₁₀ 99.9999-99.999999%	-	Ελάχιστη	UNEP, 2012
Αποτέφρωση	6 Log ₁₀ 99.9999%	80-90%	75%	Efaq et. al, 2015 UNEP, 2012

Μέθοδος	Αποτελεσματικότητα μείωσης μικροβιακού φορτίου	Μείωση όγκου	Μείωση μάζας	Βιβλιογραφία
Αεριοποίηση	Ναι Δεν αναφέρεται τιμή	Έως 95% (MSW)	-	Cai X. 2020, Zhovtyansky V. 2018, CTCN
Πυρόλυση	6 Log ₁₀ 99.9999%	Έως 90%	-	Kimbell L.K. et. al, 2018 Garcia B.B., 2019
Χημική επεξεργασία	4 Log ₁₀ 99.99%	Όχι *μόνο αν συνδυαστεί με μηχανικές διεργασίες	Όχι	UNEP, 2012
Τεχνολογίες ακτινοβολίας	2-5 Log ₁₀ 99-99.999%	-	-	IAEA, 2001
Βιολογικές διεργασίες (κομποστοποίηση, αναερόβια χώνευση)	27% - 5 Log ₁₀	Ναι Δεν αναφέρεται τιμή	Ναι Δεν αναφέρεται τιμή	Elving J., 2009 Zhao Q. Et al, 2019 Cekmecelioglu D. Et. Al, 2005
Μηχανικές διεργασίες - Τεμαχισμός	Όχι	60-80%	Όχι	UNEP, 2012
Μηχανικές διεργασίες - Συμπύκνωση	Όχι	Έως 75%	Όχι	UNEP, 2012
Υγειονομική ταφή	-	Έως 90%	Έως 70	Beyene H.D., 2018

Οι μηχανικές διεργασίες συνεισφέρουν μόνο στην μείωση του όγκου των αποβλήτων και πολύ συχνά συνδυάζονται με άλλες μεθόδους επεξεργασίας, είτε επειδή αυξάνουν την αποδοτικότητα τους στην μείωση του μικροβιακού φορτίου, είτε επειδή συνεισφέρουν στην μείωση του τελικού τους όγκου. Αν συνδυαστούν με μεθόδους μετατροπής σε βιοκαύσιμα μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση τους.

Οι θερμικές μέθοδοι είναι οι πιο αποτελεσματικές στην εξάλειψη του μικροβιακού φορτίου των αποβλήτων. Ωστόσο, για την παράλληλη μείωση του όγκου ή και της μάζας τους απαιτείται, είτε η εφαρμογή μεθόδων υψηλής θερμοκρασίας (Αποτέφρωση, Αεριοποίηση,

Πυρόλυση), είτε για μεθόδους χαμηλής θερμοκρασίας, ο συνδυασμός με μηχανικές μεθόδους ή η χρήση νέων υβριδικών συστημάτων.

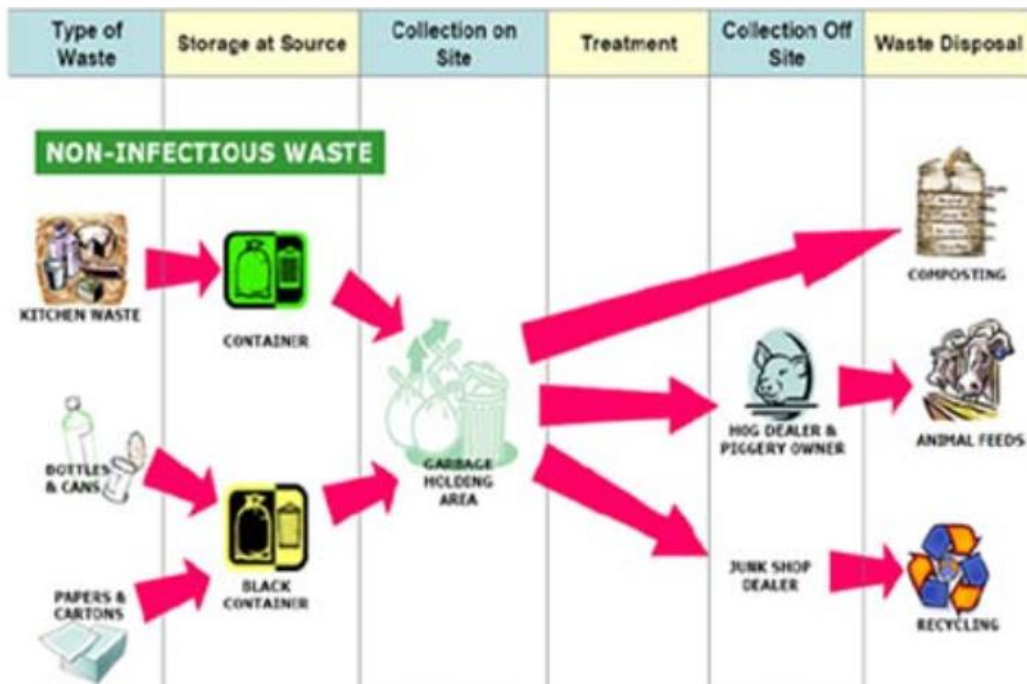
Η χημική επεξεργασία, η ακτινοβολία και οι βιολογικές διεργασίες, ενώ επιφέρουν μείωση στο μικροβιακό φορτίο, δεν επιτυγχάνουν την αποστείρωσή του, που αντιστοιχεί σε μείωση του πληθυσμού ανθεκτικών παθογόνων κατά 6 λογαριθμικές μονάδες - τουλάχιστον 99.9999%. Η χημική επεξεργασία δεν επιφέρει μείωση του όγκου των αποβλήτων, παρά μόνο αν συνδυαστεί με κάποια μηχανική μέθοδο, ενώ ορισμένες βιολογικές διεργασίες αναφέρεται ότι συνεισφέρουν στην μείωση του όγκου και της μάζας των αποβλήτων.

2.5 Διαχείριση μη-επικίνδυνων νοσοκομειακών αποβλήτων

Το κλάσμα των μη επικίνδυνων νοσοκομειακών αποβλήτων περιλαμβάνει εκτός των άλλων:

- Απόβλητα που προέρχονται από χώρους προετοιμασίας τροφίμων (κουζίνες κ.λπ.)
- Απόβλητα τροφίμων (εξαιρουμένων των απορριμμάτων από ασθενείς με μολυσματικές ασθένειες)
- Χαρτί, πλαστικό, μέταλλα, υλικά συσκευασίας
- Απόβλητα από δραστηριότητες καθαρισμού
- Απορρίμματα ενδυμασίας
- Απόβλητα από δραστηριότητες κηπουρικής
- Επιθέματα, πάνες, κ.λπ. που δεν μπορούν να ταξινομηθούν ως μολυσματικά απόβλητα

Στο Σχήμα 18 παρουσιάζονται οι τρόποι διαχείρισης των μη μολυσματικών νοσοκομειακών αποβλήτων, που περιλαμβάνουν την κομποστοποίηση, την άμεση χρήση των υπολειμμάτων βιομάζας από τα τρόφιμα, ως τροφή για τα ζώα, και την ανακύκλωση (ΕΡΤΑ, 2006)



Σχήμα 18. Τρόποι διαχείρισης μη επικίνδυνων νοσοκομειακών αποβλήτων (ΕΡΤΑ, 2006).

2.5.1 Κομποστοποίηση

Πολλοί διαφορετικοί τύποι οργανικών στερεών αποβλήτων είναι κατάλληλοι για κομποστοποίηση. Τα κατάλληλα υποστρώματα περιλαμβάνουν απορρίμματα εξωτερικών χώρων πρασίνου (κλαδιά, φύλλα, γρασίδι), απορρίμματα τροφίμων, γεωργικά απόβλητα, κοπριά, ακόμη και ανθρώπινα περιττώματα. (Lohri C.R., 2017) Τα μικτά αστικά απόβλητα μπορούν επίσης να γίνουν κομπόστ, ωστόσο, αυτό δεν συνιστάται καθώς η προκύπτουσα ποιότητα λιπασματοποίησης δεν είναι ικανοποιητική. Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε υγρασία της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται στην κομποστοποίηση και το κλίμα, η προσθήκη νερού μπορεί να είναι απαραίτητη στην αρχή ή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας για την εξασφάλιση επαρκούς υγρασίας για τη μικροβιακή δραστηριότητα. (Polprasert C., 2007)

Η κομποστοποίηση της οργανικής ύλης καθοδηγείται από έναν πληθυσμό μικροοργανισμών και ασπόνδυλων, των οποίων η δυναμική ποικίλλει σημαντικά, τόσο χρονικά, όσο και χωρικά. (Insam H., 2007) Οι μικροοργανισμοί διαλύουν την οργανική ύλη και παράγουν διοξείδιο του άνθρακα, νερό και θερμότητα. Ο έλεγχος της διαδικασίας έχει σαν στόχο την

ρύθμιση των κυρίαρχων παραμέτρων, όπως η σύνθεση οργανικού υλικού (αναλογία άνθρακα-αζώτου), το μέγεθος των σωματιδίων, ο ελεύθερος χώρος αέρα, ο αερισμός, η θερμοκρασία, η υγρασία ή το pH, έτσι ώστε να επιτευχθεί γρήγορη αποικοδόμηση και καλή ποιότητα λιπασματοποίησης. Όταν οι συνθήκες δεν είναι βέλτιστες, η διαδικασία μπορεί να καθυστερήσει ή και να μην πραγματοποιηθεί. Υπό βέλτιστες συνθήκες λιπασματοποίησης, η αποικοδόμηση με κομποστοποίηση προχωρά σε τρεις φάσεις: α) τη μεσόφιλη φάση που μπορεί να διαρκέσει έως και 2 ημέρες, β) τη θερμόφιλη, η οποία μπορεί να διαρκέσει από μερικές εβδομάδες έως αρκετούς μήνες, και τέλος, (3) μια φάση ψύξης και ωρίμανσης που μπορεί να διαρκέσει αρκετούς μήνες. (Lohri C.R., 2017) Κατά τη διάρκεια της θερμόφιλης φάσης η θερμοκρασία μπορεί να αυξηθεί στους 55-70°C, λόγω του μεταβολισμού των μικροοργανισμών, ο οποίος συμβάλλει στην ποιότητα του υλικού. Το τέλος της διαδικασίας κομποστοποίησης επιτυγχάνεται όταν η εσωτερική θερμοκρασία του όγκου είναι παρόμοια με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και η συγκέντρωση οξυγόνου στις κοιλότητες αέρα εντός του σωρού παραμένει σταθερή για αρκετές ημέρες. (Cooperband L., 2002)

Το κύριο προϊόν εξόδου από την κομποστοποίηση είναι το κομπόστ, ένα σταθερό σκούρο καφέ υλικό σαν το χώμα με μια θρυμματισμένη υφή, σκούρο χρώμα και γήινη μυρωδιά. Εκτός από το κομπόστ, άλλα προϊόντα εξόδου που εκπέμπονται κατά τη διαδικασία κομποστοποίησης είναι τα εκπλύματα, οι υδρατμοί και το διοξείδιο του άνθρακα. (Polprasert C., 2007) Υπό ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, το κομπόστ μπορεί να παραχθεί εντός 3 μηνών.

Η ποιότητα του υλικού εισαγωγής και οι βασικές βιολογικές και φυσικές παράμετροι λειτουργίας της διεργασίας επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα του τελικού λιπάσματος. (Rothenberger S., 2006) Οι ακαθαρσίες στα λιπασματοποιημένα απόβλητα μπορούν να απομακρυνθούν με κοσκίνισμα. Το κομπόστ περιέχει σημαντικά φυτικά θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο, κάλιο και φώσφορο, αν και συνήθως όχι τόσο, όσο η κοπριά των ζώων ή τα χημικά λιπάσματα. (Polprasert C., 2007) Περιέχει επίσης μια σειρά ευεργετικών ορυκτών και είναι πλούσιο σε χούμους και μικροοργανισμούς ευεργετικούς για την ανάπτυξη των φυτών. (Brinton W.F., 2001) Το κομπόστ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση των εδαφών, αναφέρεται ακόμα και η χρήση για συστήματα κάλυψης υγειονομικής ταφής και αποκατάστασης εδάφους. Για παράδειγμα, η εφαρμογή λιπασματοποίησης σε μολυσμένα με όξινα βαρέα μέταλλα σημεία μειώνει τη ρύπανση του εδάφους. (Farrell M., 2009)

2.5.2 Παραγωγή ζωοτροφών

Τα υπολείμματα φρούτων και λαχανικών μπορούν να αποτελέσουν κατάλληλη τροφή για ζώα. Γενικά, οι ζωοτροφές πρέπει να περιέχουν επαρκή ποσότητα υδατανθράκων, αμινοξέων, ανόργανων συστατικών, βιταμινών, βασικών θρεπτικών ουσιών, ινών και λιπών και να ελαχιστοποιούν τους ρύπους που θέτουν σε κίνδυνο το ζώο και τελικά την ποιότητα του κρέατος. Ο μεγαλύτερος κίνδυνος έγκειται στις ουσίες που περιέχονται στα απόβλητα. Για να μετριαστούν οι πιθανοί κίνδυνοι ή να ενισχυθεί η θρεπτική του αξία, τα βιολογικά απόβλητα επεξεργάζονται συχνά πριν από τη σίτιση ζώων. Το όφελος των αποβλήτων ως τροφή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πεπτικό σύστημα των ζώων. Τα μηρυκαστικά με σύνθετα πεπτικά συστήματα μπορούν να αφομοιώσουν υλικά που περιέχουν κυρίως κυτταρίνη (π.χ. άχυρο, γρασίδι), ενώ το πεπτικό σύστημα των χοίρων δεν μπορεί να αφομοιώσει άχυρο ή ζωοτροφές χαμηλής ποιότητας .

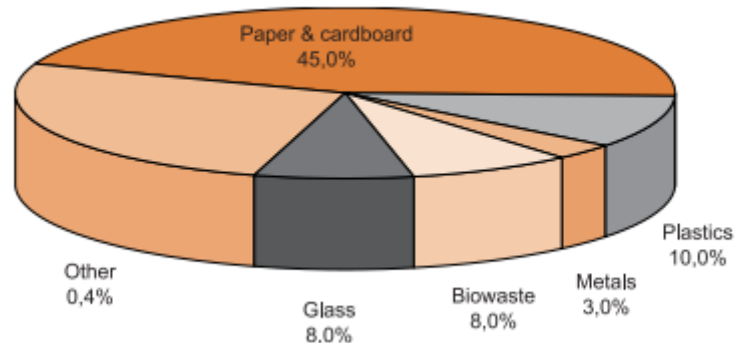
Όταν τα βιολογικά απόβλητα περιέχουν κρέας ή έχουν έρθει σε επαφή με το κρέας, ενδέχεται να υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης των ζώων, ο οποίος στη συνέχεια μπορεί να μεταδώσει ασθένειες στον άνθρωπο (π.χ. σαλμονέλλωση) ή σε άλλα ζώα (π.χ. πανώλη των χοίρων ή σπογγώδη εγκεφαλοπάθεια των βοοειδών). Μετά τις πρώτες αναφορές για περιπτώσεις ασθενειών, εφαρμόστηκε πολύ αυστηρή νομοθεσία σχετικά με τη χρήση ζωικών υποπροϊόντων ως ζωοτροφών. (Lardinois I., 1993) Άλλες ανησυχητικές ενώσεις είναι τα βαρέα μέταλλα, οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH) και τα οργανοχλωρικά φυτοφάρμακα. (Cheng Z., 2014)

Τα απόβλητα μπορούν να υποστούν επεξεργασία, όπως λείανση ή ξήρανση, και στη συνέχεια μπορούν να τροφοδοτηθούν σε καθαρή μορφή σε ζώα ή σε μικτή μορφή με άλλες ζωοτροφές. Η μεγαλύτερη πρόκληση, όπως τονίζεται παραπάνω, είναι να διασφαλιστεί η καλή ποιότητα των αποβλήτων που χρησιμοποιούνται. (Lardinois I., 1993)

2.5.3 Ανακύκλωση

Περισσότερα από τα μισά απόβλητα που παράγονται σε νοσοκομειακές μονάδες είναι διάφορα είδη συσκευασίας, χαρτιά πλαστικά, γυαλιά και μέταλλα (Σχήμα 19). Τα περισσότερα από αυτά δεν έχουν άμεση επαφή με μολυσματικούς παράγοντες ή επικίνδυνες

ουσίες. Έτσι, εφόσον δεν αναμιγνύονται με μολυσματικά ή επικίνδυνα απόβλητα, μπορούν να υποβληθούν εύκολα σε ανάκτηση και ανακύκλωση.



Σχήμα 19. Νοσοκομειακά απόβλητα αστικού τύπου (HCWH, 2005).

Η κενή συσκευασία, μετά τη χρήση ενός προϊόντος, μπορεί να αξιοποιηθεί στη συλλογή άλλων αποβλήτων, μειώνοντας τόσο το κόστος που συνεπάγεται η αγορά δοχείων αποβλήτων, όσο και τη ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων. Μπορεί δηλαδή να γίνει συλλογή των αιχμηρών αντικειμένων -βελόνες και σύριγγες- σε δοχεία κατασκευασμένο από σκληρά πλαστικά, όπως δοχεία απολυμαντικών. (HCWH, 2005)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΠΟ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΑΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Η παραγωγή ιατρικών αποβλήτων (Medical waste, MW) από τη βιομηχανία υγειονομικής περίθαλψης αυξάνεται ραγδαία, και ταχύτερα από τις υποδομές για την επεξεργασία τους, γεγονός που εντείνει την παγκόσμια ανησυχία γύρω από την διάθεσή τους. Οι χώρες υψηλού εισοδήματος παράγουν κατά μέσο όρο έως 0.5kg επικίνδυνων αποβλήτων ανά νοσοκομειακό κρεβάτι ανά ημέρα, ενώ οι χώρες χαμηλού εισοδήματος παράγουν κατά μέσο όρο 0.2kg. Επιπρόσθετη επιβάρυνση μπορεί να παρουσιαστεί σε περιόδους επιδημιών, όπου η ταχεία αύξηση των ιατρικών αποβλήτων φέρνει μεγάλες προκλήσεις στην επεξεργασία και τη διάθεσή τους. Εάν η διαχείριση των ιατρικών αποβλήτων δεν είναι σωστή, μπορεί να αποτελέσει μεγάλη απειλή για το περιβάλλον και τους ανθρώπους, λόγω της τοξικότητας και της μολυσματικής τους φύσης.

Η σύνθεση των ιατρικών αποβλήτων ποικίλλει ευρέως και μπορεί να αλλάξει με την ανάπτυξη της βιομηχανίας υγειονομικής περίθαλψης. Μπορεί να περιέχει μόνο ανόργανα υλικά ή μπορεί να αποτελείται από υγρά και οργανικά υλικά.(Cai X., 2020) Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί το οργανικό κλάσμα, και πιο συγκεκριμένα η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα αποτελεί ένα ποσοστό της τάξης του 60% των μολυσματικών νοσοκομειακών αποβλήτων. Επιπρόσθετα, το μεγαλύτερο τμήμα των ιατρικών αποβλήτων κατατάσσεται στα μη επικίνδυνα νοσοκομειακά απόβλητα που μοιάζουν σαν σύσταση με τα αστικά στερεά απόβλητα (Municipal solid waste, MSW). (WHO, 2014;Αραβώσης Κ., 2008).

Η χρήση υπολειμμάτων και αποβλήτων βιομάζας ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοκαυσίμων είναι μια πολλά υποσχόμενη πρόταση για τη μείωση των περιβαλλοντικών ζητημάτων που προκύπτουν από τη διάθεση των αποβλήτων, μολυσματικών και μη. Με αυτόν τον τρόπο τα απόβλητα που απλά θα είχαν αποσυρθεί, μετατρέπονται σε χρήσιμα βιοκαύσιμα. Η βιομάζα είναι ένας ανανεώσιμος πόρος και ως εκ τούτου θεωρείται μια καλή εναλλακτική πρώτη ύλη για την παραγωγή βιώσιμης ενέργειας. Ιστορικά η πρώτη καταγεγραμμένη αξιοποίηση της βιομάζας για την παροχή ενέργειας στους ανθρώπους είναι η χρήση των καυσόξυλων, μέσω της άμεσης καύσης. Οι υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η ατμοσφαιρική ρύπανση, οι ασταθείς τιμές ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα και η σταθερή αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης καυσίμων, έχουν οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα στη μελέτη για την ανάπτυξη της βιοενέργειας.

Στις βιομηχανικές χώρες, ένα ευρύ φάσμα πρώτων υλών διατίθεται σε αφθονία για παραγωγή βιοκαυσίμων, συμπεριλαμβανομένων των γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων, των οικοδομικών και βιομηχανικών αποβλήτων και των αστικών στερεών αποβλήτων. Τα βιοκαύσιμα που παράγονται από αυτές τις πρώτες ύλες κατηγοριοποιούνται ως βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς. Σε αντίθεση με τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς, που προέρχονται από βρώσιμες καλλιέργειες τροφίμων (π.χ. ζαχαροκάλαμο, σιτάρι, κριθάρι, καλαμπόκι, πατάτα, σόγια, ηλίανθος και καρύδα), τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς παράγονται από λιγνοκυτταρινούχα υλικά (δηλ. γρασίδι, ξύλο και άχυρο) και υπολείμματα βιομάζας. Μια άλλη βιομάζα, που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για βιοκαύσιμα τρίτης γενιάς, είναι τα φύκια.

Η υπολειμματική βιομάζα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή. Τα υπολείμματα της πρώτης κατηγορίας παράγονται συνήθως κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας συγκεκριμένων φυτειών και δασικών προϊόντων (μίσχοι, φύλλα, άχυρο). Τα δευτερογενή παράγονται όταν οι καλλιέργειες τροφίμων μεταποιούνται σε τελικά προϊόντα. Τα chips από ξύλο, ο φλοιός καφέ, ο φλοιός ρυζιού, είναι κάποια από τα παραδείγματα γεωργικών και τροφίμων αποβλήτων από επεξεργασία. Τα τριτογενή υπολείμματα προκύπτουν από την κατανάλωση / χρήση ενός προϊόντος από ανθρώπους ή / και ζώα. Αυτά τα υπολείμματα είναι που λαμβάνονται υπό τη μορφή αστικών στερεών αποβλήτων, αλλά και νοσοκομειακών αποβλήτων. Μεταξύ των υπολειμμάτων βιομάζας, τα απόβλητα λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας, τα χρησιμοποιημένα λάδια μαγειρέματος, και τα απόβλητα από πλαστικές ύλες έχουν αποδείξει τις πολλά υποσχόμενες δυνατότητές τους. (Lee S.Y., 2019)

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφοροι μέθοδοι παραγωγής βιοκαυσίμων, η κατηγορία στην οποία ανήκουν, οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούν και τα συνήθη παραγόμενα βιοκαύσιμα.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι μέθοδοι που μπορούν να αξιοποιήσουν το οργανικό, με έμφαση στο λιγνοκυτταρινούχο κλάσμα, της βιομάζας για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Με βάση τις πρώτες ύλες που αποτελούν συνήθως την τροφοδοσία της κάθε μεθόδου παραγωγής, οι μέθοδοι που παρουσιάζονται αναλυτικά είναι η Αναερόβια χώνευση και η Ζύμωση από τις Βιοχημικές διεργασίες, και η Αεριοποίηση, η Πυρόλυση και η Υδροθερμική Υγροποίηση από τις Θερμοχημικές.

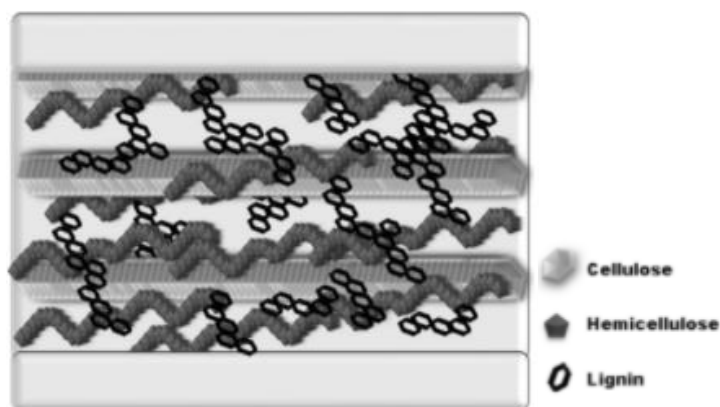
Πίνακας 5. Μέθοδοι παραγωγής βιοκαυσίμων (Lee S.Y., 2019; Garcia B.B., 2019, Plácido J., 2016).

Μέθοδος Παραγωγής	Πρώτες ύλες	Παραγόμενα βιοκαύσιμα	Παραπροϊόντα	Εφαρμογές
Θερμοχημικές διεργασίες				
Αεριοποίηση	Δασικά και γεωργικά απορρίμματα, απόβλητα τροφίμων και χαρτιού, MSW, MW	Αέριο σύνθεσης (Syngas) πλούσιο σε H ₂ και CO	Βιοεξανθράκωμα για την αποκατάσταση του εδάφους	Θέρμανση, ηλεκτρική ενέργεια, μεταφορές, καύσιμα και χημικά υψηλής αξίας
Υδροθερμική Υγροποίηση	Γεωργικά απόβλητα, απόβλητα τροφίμων, χαρτιού και πλαστικά, MSW	Βιοέλαιο (Bio-oil)	Χημικά ενδιάμεσης αξίας	Πρόσθετα, χημικά υψηλής αξίας, μεταφορές, θέρμανση και ηλεκτρικό ρεύμα
Πυρόλυση	Απόβλητα ξύλου και κήπου, τροφίμων, χαρτιού, κλωστοϋφαντουργικά, καουτσούκ, πλαστικά, MW και άλλα επικίνδυνα απόβλητα	Βιοέλαιο (Bio-oil/Py-oil) Αέριο σύνθεσης (Syngas) Βιοεξανθράκωμα (Biochar)	-	Πρόσθετα, χημικά υψηλής αξίας, μεταφορές, θέρμανση και ηλεκτρικό ρεύμα
Καύση	Γενική ροή αποβλήτων (χαμηλό περιεχόμενο υγρασίας <10%) Πλαστικά, MSW	Ηλεκτρική ενέργεια	Πιθανή ανάκτηση μετάλλων από την τέφρα (slag)	Θέρμανση, ηλεκτρική ενέργεια

Μέθοδος Παραγωγής	Πρώτες ύλες	Παραγόμενα βιοκαύσιμα	Παραπροϊόντα	Εφαρμογές
Βιοχημικές διεργασίες				
Αναερόβια χώνευση	Καλλιέργειες και υπολείμματα/απόβλητα καλλιεργείων, δασικά απορρίμματα θαλάσσια απόβλητα, εκκρίσεις ζώων και ανθρώπων, απόβλητα τροφίμων, οργανικό κλάσμα MWS	Βιοαέριο / Μεθάνιο	Κομπόστ, οργανικό λίπασμα χαμηλού κόστους ως υποπροϊόν	Θέρμανση, ηλεκτρική ενέργεια, μεταφορές, καύσιμα και χημικά υψηλής αξίας
Ζύμωση	Καλλιέργειες και υπολείμματα/απόβλητα καλλιεργείων σακχάρων και αμύλου, λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα	Βιοαιθανόλη	Διοξείδιο του άνθρακα	Μεταφορές, θέρμανση και ηλεκτρικό ρεύμα, χημικά υψηλής αξίας
Φωτοβιολογική παραγωγή υδρογόνου	Βιομάζα μικροφυκών	Βιο-υδρογόνο	Διοξείδιο του άνθρακα, οργανικά οξέα	Ηλεκτρική ενέργεια
Φυσικοχημικές διεργασίες				
Μετεστεροποίηση	Φυτικά λάδια, Ανακυκλωμένα/ αναγεννημένα μαγειρικά λάδια	Βιοντίζελ (FAME)	Γλυκερόλη, απόβλητα πλύσης βιοντίζελ, μεθανόλη και στερεά υπολείμματα	Μεταφορές, ηλεκτρική ενέργεια
Φωτοσυνθετικές μικροβιακές κυσέλες	Υδατικά λύματα, Ζυμώσιμα οικιακά απορρίμματα, MSW	Βιο-υδρογόνο	-	Ηλεκτρική ενέργεια

3.1 Προεπεξεργασία λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας

Η λιγνοκυτταρίνη αποτελείται από κυτταρίνη (25-55%) , ημικυτταρίνη (25-50%) και λιγνίνη (10-35%), ενώ περιέχει και άλλα ιχνοστοιχεία. Η περιεκτικότητα της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας σε κάθε συστατικό εξαρτάται από την προέλευσή της. Η δομή της κυτταρίνης εντός του πολυμερούς δεν είναι ομοιογενής, παρουσιάζει τόσο κρυσταλλικές/συμπαγείς δομές, όσο και άμορφες περιοχές. Η ημικυτταρίνη είναι κατά βάση άμορφη, ενώ η λιγνίνη είναι ένα πολύπλοκο πολυμερές μονάδων φαινυλοπροπανίου, που σχηματίζουν ένα τρισδιάστατο δίκτυο μέσα στην δομή της λιγνοκυτταρίνης, κάνοντας την πιο σταθερή και ανθεκτική. Η προεπεξεργασία γίνεται για την απομάκρυνση της λιγνίνης και για τη μείωση της κρυσταλλικής δομής της κυτταρίνης, έτσι ώστε να διευκολύνεται η υδρόλυση, που είναι βασικό στάδιο κατά την παραγωγή βιοκαυσίμων μέσω των βιοχημικών διεργασιών. (Rajendran K.; 2011, Xu N., 2019; Tran T.T.A., 2019) Μόνο το 20% της θεωρητικής απόδοσης της λιγνοκυτταρίνης σε σάκχαρα μπορεί να ληφθεί χωρίς προεπεξεργασία. (Philbrook A., 2013)



Σχήμα 20. Δομή λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας (Philbrook A., 2013)

Οι μέθοδοι προεπεξεργασίας θα μπορούσαν βασικά να χωριστούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες φυσικές, φυσικοχημικές, βιολογικές και χημικές. (Bušić A. 2018)

Η φυσική –μηχανική προεπεξεργασία αναφέρεται στις διεργασίες προεπεξεργασίας χωρίς χημικό παράγοντα ή μικροοργανισμούς, οι οποίες περιλαμβάνουν κονιοποίηση (π.χ. άλεση, λείανση, τεμαχισμός, κοσκίνισμα), ακτινοβολήση (π.χ. υπερήχους, ακτίνες γάμμα και μικροκύματα). (Xu N., 2019) Η φυσική προεπεξεργασία συνεπάγεται μείωση του μεγέθους

των σωματιδίων και της κρυσταλλικότητας της λιγνοκυτταρινικής βιομάζας, αύξηση της ειδικής επιφάνειας και μείωση του βαθμού πολυμερισμού, αύξηση της προσβάσιμης επιφάνειας των λιγνοκυτταρινικών υλικών στα ένζυμα με διάσπαση του μεγέθους των σωματιδίων ή με διατάραξη των κρυσταλλικών δομών τους. Ωστόσο, το μέγεθος των σωματιδίων πρέπει να βελτιστοποιηθεί, καθώς πολύ μικρά σωματίδια δεν είναι επιθυμητά λόγω της υψηλής κατανάλωσης των διεργασιών αυτών σε ενέργεια. (Bušić A., 2018)

Η φυσικοχημική προεπεξεργασία είναι ένας συνδυασμός φυσικής και χημικής προκατεργασίας, που στοχεύει στην ενίσχυση της απομάκρυνσης της λιγνίνης και στην αύξηση της αποτελεσματικότητας της υδρόλυσης. Υπάρχουν αρκετές επιτυχημένες φυσικοχημικές προκατεργασίες, όπως έκρηξη ατμού, η προεπεξεργασία με ζεστό υγρό νερό, η υγρή οξειδωση, η προεπεξεργασία με βάση την αμμωνία (AFEX) ή με το θείο (SPORL). (Salakkam A., 2019)

Η βιολογική προεπεξεργασία μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις κατηγορίες, την προεπεξεργασία με μύκητες, με μικρόβια ή με ένζυμα. Στην προεπεξεργασία με μύκητες αποικοδομείται η λιγνίνη και η ημικυτταρίνη. Η κυτταρίνη, αν και είναι πιο ανθεκτική στην μυκητιακή προσβολή από τα άλλα συστατικά, λόγω της αποδόμησής τους καθίσταται πιο προσβάσιμη σε επόμενα στάδια. Η προεπεξεργασία με μικρόβια παρουσιάζει συνήθως υψηλό βαθμό αποδόμησης της κυτταρίνης και της ημικυτταρίνης. Η ενζυμική προκατεργασία χρησιμοποιεί συνήθως καθαρά ένζυμα για να επιταχύνει την αποδόμηση της λιγνοκυτταρίνης, πριν ή κατά την διάρκεια των βιοχημικών διεργασιών για την παραγωγή βιοκαυσίμων. (Xu N., 2019)

Η χημική προεπεξεργασία αναφέρεται στη χρήση χημικών (π.χ. οξέα, βάσεις, οξειδωτικοί παράγοντες, οργανικοί διαλύτες) για την αλλαγή φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών της λιγνοκυτταρίνης. Έχει προσελκύσει το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω της πιο αποτελεσματικής και προσιτής τεχνολογίας που χρησιμοποιεί και της μεγαλύτερης απόδοσης που έχει για την επιτυχημένη βιο-μετατροπή της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας. (Xu N., 2019; Tran T.T.A., 2019) Σε αυτές τις μεθόδους προσοχή πρέπει να δοθεί για τον περιορισμό της παραγωγής ανασταλτικών παραγόντων. (Salakkam A., 2019; Bušić A., 2018)

Οι κύριες χημικές προκατεργασίες είναι η υδρόλυση με οξύ, με αλκάλιο και η υδρόλυση από το N-οξείδιο της N-μεθυλομορφολίνης (NMMO). Στην υδρόλυση με οξέα η επεξεργασία κυτταρινούχων υλικών με πυκνό θειικό οξύ και φωσφορικό οξύ μειώνει την κρυσταλλική

δομή της κυτταρίνης. Η προεπεξεργασία βαμβακιού με πυκνό φωσφορικό οξύ ακολουθούμενη από ακετόνη οδηγεί στην παραγωγή άμορφης κυτταρίνης. Ωστόσο, τα οξέα είναι επικίνδυνοι διαλύτες και δεν υπάρχει αποτελεσματική τεχνική ανακύκλωσης τους σε μεγάλη κλίμακα. Η υδρόλυση με αλκάλια χρησιμοποιείται στη βιομηχανία κλωστοϋφαντουργίας. Το υδροξείδιο του νατρίου χρησιμοποιείται ως διογκωτικός παράγοντας κατά την επεξεργασία βαμβακιού, καθώς και στη διεργασία παραγωγής βισκόζης. Η υδρόλυση με NMMO χρησιμοποιείται κυρίως για την αποικοδόμηση της κυτταρίνης μεταξύ των θερμοκρασιών 70-130°C. Το NMMO είναι μη τοξικό και πλήρως βιοαποικοδομήσιμο, μπορεί να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί. Υδατικά διαλύματα περιεκτικότητας 83 με 87% σε NMMO είναι κατάλληλα για την πέψη των κυτταρινούχων υλών. (Rajendran K., 2011) Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται όλες οι μέθοδοι προεπεξεργασίας της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας μαζί με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Υπό το πρίσμα των Θερμοχημικών μεθόδων μετατροπής, η προεπεξεργασία συντελεί στην μεγιστοποίηση της απόδοσης μετατροπής σε βιοκαύσιμα, χωρίς η αναλογία κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και λιγνίνης να έχουν σημαντικό ρόλο. Η αναλογία αυτή επιδρά στην αναλογία των τελικώς παραγόμενων προϊόντων (αέρια, υγρά, στερεά καύσιμα). (Ramos A., 2018; Molino A., 2018) Η προεπεξεργασία σε αυτές τις περιπτώσεις έχει σαν στόχο τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων της πρώτης ύλης, για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη μεταφορά θερμότητας που οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης σε καύσιμα, ομογενοποίηση των αποβλήτων, η οποία με την σειρά της βελτιώνει την ποιότητα του τελικού προϊόντος, και απομάκρυνση των ανόργανων ρύπων. (Ramos A., 2018; Liu Q., 2017; Zadeh Z.E., 2020) Το ανόργανο περιεχόμενο της βιομάζας (τέφρα) έχει αρνητικά αποτελέσματα στη διαδικασία θερμοχημικής μετατροπής. Αναλυτικότερα:

- Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πυρόλυσης, το ανόργανο περιεχόμενο μπορεί να έχει σημαντικές καταλυτικές επιδράσεις και να αλλάξει το ρυθμό θερμικής αποικοδόμησης, τις χημικές αντιδράσεις και τελικά την απόδοση βιο-ελαίου. (Liu Q., 2017) Οι περισσότερες μελέτες έχουν αναφέρει ότι η παρουσία μετάλλου ενισχύει την παραγωγή τέφρας και τη διάβρωση του αντιδραστήρα πυρόλυσης. (Zadeh Z.E., 2020)
- Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αεριοποίησης, το ανόργανο περιεχόμενο δημιουργεί διαφόρους κινδύνους, όπως διάβρωση και φραγή σωλήνων, καθώς και αστοχίες, όπως ταχεία και μόνιμη απενεργοποίηση των καταλυτών. (Liu Q., 2017)

Επιπλέον, στις Θερμοχημικές μεθόδους, η ξήρανση είναι μία επεξεργασία που φαίνεται να απαιτείται συχνά, καθώς τα υπολείμματα βιομάζας παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, γεγονός που μπορεί να είναι ανεπιθύμητο ανάλογα με την διεργασία που θα ακολουθηθεί. (Ramos A., 2018)

Πίνακας 6. Μέθοδοι προεπεξεργασίας της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας. (Salakkan A., 2019; Rajendran K., 2011; Xu N., 2019; Philbrook A., 2013; Nanda S., 2014; Ramos A., 2018; Liu Q., 2017)

Μέθοδος Προεπεξεργασίας	Δράση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Δυνατότητα Επίδρασης στον μολυσματικό παράγοντα
Φυσική –μηχανική προεπεξεργασία				
Τεμαχισμός/άλεση /λείανση	Μείωση μεγέθους σωματιδίων και κρυσταλλικότητας, Ομογενοποίηση, Απομάκρυνση ανόργανων ρύπων	Έλεγχος τελικού μεγέθους σωματιδίων, Εύκολος χειρισμός, Λιγότερη κατανάλωση νερού	Υψηλή κατανάλωση ενέργειας, Απαιτηση διαλογής κλάσματος μεγέθους σωματιδίων με την βέλτιστη συγκέντρωση σε ανόργανες προσμίξεις	Καμία
Ακτινοβολήση με μικροκύματα	Διάσπαση λιγνοκυτταρινούχου υλικού	Γρήγορη μεταφορά θερμότητας, Σύντομος χρόνος αντίδρασης, Εξοικονόμηση ενέργειας	Χαμηλή διείσδυση της ακτινοβολίας, Κακή κατανομή των μικροκυμάτων λόγω μη ομοιογενούς υλικού	Ναι (Κεφάλαιο 2.4.1.3)
Φυσικοχημική προεπεξεργασία				
Έκρηξη ατμού	Μείωση μεγέθους σωματιδίων, Μερική υδρόλυση ημικυτταρίνης, Απομάκρυνση λιγνίνης Απομάκρυνση ανόργανων ρύπων	Λιγότερη κατανάλωση νερού, Χωρίς χημικά, Χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις	Υψηλό κόστος εξοπλισμού, Δημιουργία ανασταλτικών ενώσεων για μικροοργανισμούς	Ναι (Zhao Z.M., 2015)

Μέθοδος Προεπεξεργασίας	Δράση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Δυνατότητα Επίδρασης στον μολυσματικό παράγοντα
Προεπεξεργασία με ζεστό υγρό νερό	Μερική υδρόλυση ημικυτταρίνης, Απομάκρυνση λιγνίνης, Απομάκρυνση ανόργανων ρύπων	Δεν απαιτεί βήματα πλύσης, χημικής ανάκτησης ή απομάκρυνση τοξικών	Υψηλή κατανάλωση νερού και ενέργειας	Πιθανή επίδραση λόγω συνθηκών διεργασίας (Nanda S., 2014)
AFEX	Μείωση κρυσταλλικότητας, Απομάκρυνση λιγνίνης	Χαμηλός σχηματισμός παραπροϊόντων	Ακατάλληλο για βιομάζα με υψηλή περιεκτικότητα σε λιγνίνη	-
SPORL	Απομάκρυνση λιγνίνης, Αποικοδόμηση ημικυτταρίνης	Χαμηλός σχηματισμός αναστολέων, Ενεργειακά αποδοτική	Υψηλό κόστος χημικής ανάκτησης	-
Χημική προεπεξεργασία				
Επεξεργασία με οξύ	Αποικοδόμηση κυτταρίνης, λιγνίνης και ημικυτταρίνης, Απομάκρυνση ανόργανων ρύπων	Το οξύ μπορεί να υδrolύσει απευθείας τη βιομάζα σε ζυμώσιμα σάκχαρα	Διαβρωτική και τοξική, Σχηματισμός αναστολέων ως παραπροϊόντα	Ναι (UNEP, 2012) (Devi S., 2016)
Επεξεργασία με αλκάλιο	Απομάκρυνση λιγνίνης και ημικυτταρίνης, Απομάκρυνση ανόργανων ρύπων	Αποτελεσματική απομάκρυνση λιγνίνης, χαμηλό κόστος	Δημιουργεί αναστολείς, Μεγάλος χρόνος παραμονής	Ναι (UNEP, 2012) (Devi S., 2016) (Kucharska K., 2018)
Επεξεργασία με NMMO	Αποικοδόμηση της κυτταρίνης	Μη τοξικό, Πλήρως βιοαποικοδομήσιμο, Ανακυκλώσιμο	Μερική διάλυση της κυτταρίνης	-

Μέθοδος Προεπεξεργασίας	Δράση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Δυνατότητα Επίδρασης στον μολυσματικό παράγοντα
Βιολογική προεπεξεργασία				
Μικροοργανισμοί (μύκητες, μικρόβια)	Αποικοδόμηση κυτταρίνης, λιγνίνης και ημικυτταρίνης	Επιλεκτική αποικοδόμηση λιγνίνης, ημικυτταρίνης και κυτταρίνης, Φιλική προς το περιβάλλον	Μεγάλος χρόνος προκατεργασίας, ο ρυθμός υδρόλυσης είναι χαμηλός, Απαίτηση σε υδρογονάνθρακες κατά την προεπεξεργασία	-
Ένζυμα	Αποικοδόμηση κυτταρίνης, λιγνίνης και ημικυτταρίνης	Ενεργειακά αποδοτική, Φιλική προς το περιβάλλον	Υψηλό κόστος ενζύμων, Χαμηλός ρυθμός υδρόλυσης	-

3.2 Βιοχημικές διεργασίες

Η βιοχημική μετατροπή περιλαμβάνει τη χρήση μικροοργανισμών ή ενζύμων για τη μετατροπή της βιομάζας ή των αποβλήτων σε χρήσιμη ενέργεια. Οι πιο συνηθισμένες διεργασίες αυτής της κατηγορίας είναι η αναερόβια χώνευση και η αλκοολική ζύμωση που οδηγούν σε παραγωγή διαφορετικών βιοκαυσίμων. (Lee S.Y, 2019)

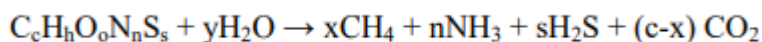
3.2.2 Αναερόβια χώνευση

Γενικά

Η αναερόβια χώνευση (Anaerobic Digestion, AD), που αναφέρεται επίσης ως βιομεθανοποίηση, είναι μια συνήθης διαδικασία για τη βιοχημική αποσύνθεση τόσο της υγρής, όσο και της στερεάς οργανικής ύλης από διάφορα αναερόβια βακτήρια απουσία οξυγόνου. Η διαδικασία AD εμφανίζεται φυσικά σε πολλά ανοξικά περιβάλλοντα, όπως υδατορεύματα και χώρους υγειονομικής ταφής. (Vögelé Y., 2014) Το κύριο προϊόν της αναερόβιας χώνευσης είναι το βιοαέριο. Το βιοαέριο σχηματίζεται μέσω της μετατροπής του περιεχόμενου οργανικού άνθρακα των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών σε μεθάνιο (CH₄)

και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), ενώ περιέχει και αρκετές άλλες αέριες προσμίξεις, όπως υδροθείο, άζωτο, οξυγόνο και υδρογόνο. (Cecchi F., 2003) Η γενική αντίδραση σχηματισμού βιοαερίου καθώς και η συνήθης σύστασή του παρουσιάζονται παρακάτω:

Γενική αντίδραση σχηματισμού βιοαερίου (Rajendran K., 2011):



Πίνακας 7. Σύνθεση βιοαερίου. (Rajendran K., 2011)

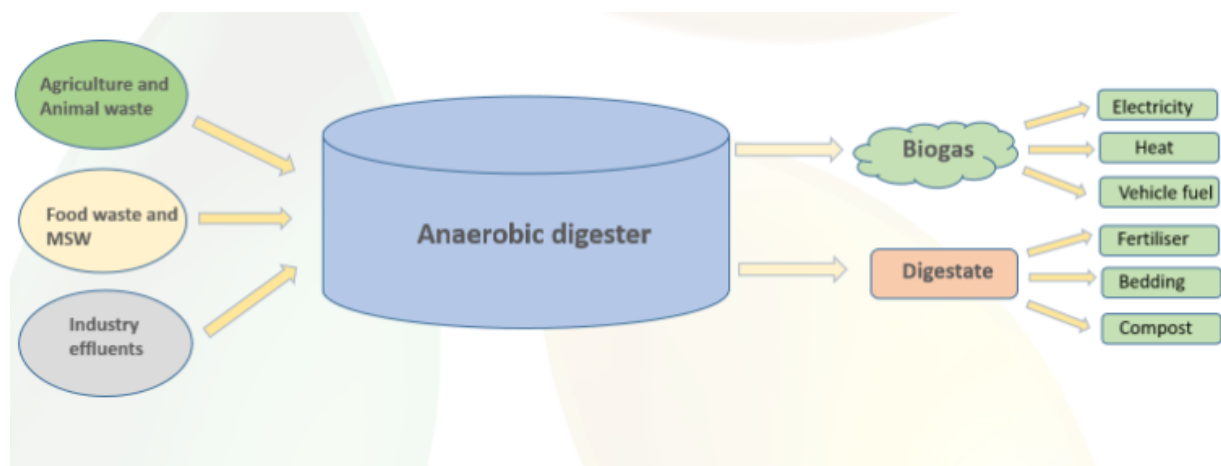
Συστατικά	Ποσοστό(%)
Μεθάνιο, CH ₄	50-75
Διοξείδιο του άνθρακα, CO ₂	25-50
Άζωτο, N ₂	0-10
Υδρογόνο, H ₂	0-1
Υδροθείο, H ₂ S	0-3
Οξυγόνο, O ₂	0-2

Πρώτες ύλες

Ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών τύπων βιομάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα για την παραγωγή βιοαερίου: γεωργικές καλλιέργειες και υπολείμματα/απόβλητα των καλλιεργειών, δασικά απορρίμματα, θαλάσσια απόβλητα, όπως φύκια, εκκρίσεις ζώων και ανθρώπων. Ανάμεσα στους διάφορους τύπους, που μπορούν να αποτελέσουν πρώτες ύλες, βρίσκονται επίσης τα απόβλητα τροφίμων και το οργανικό κλάσμα των αστικών στερεών αποβλήτων, που είναι πλούσιο σε λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα και περιλαμβάνει χαρτί, βαμβάκι και υφάσματα (Σχήμα 21). Καθώς η AD εμφανίζεται συνήθως σε υδατικό περιβάλλον, η πρώτη ύλη με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία -ακόμη και περισσότερο από 60%- μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία χωρίς προεπεξεργασία. (Appels L., 2011; Rajendran K., 2011) Μελέτες σχετικά με την πρώτη ύλη της AD περιλαμβάνουν, τη χρήση απορριμμάτων τροφίμων (Zhang G.Y., 2014), απορριμμάτων φρούτων και λαχανικών (Bouallagui H., 2005; Gunaseelan V.N., 2004) και λιγνοκυτταρινούχων υλικών, τα οποία έχουν υποστεί κατάλληλη προεπεξεργασία, ώστε να μπορούν να αποδομηθούν από αναερόβιους μικροοργανισμούς, για να επιτευχθεί αύξηση της απόδοσης παραγωγής βιοκαυσίμου. (Xu N., 2019)

Η απόδοση των επιμέρους υποστρωμάτων σε βιοαέριο ποικίλλει σημαντικά, ανάλογα με την προέλευση της πρώτης ύλης, την περιεκτικότητα σε οργανική ύλη και τη σύνθεση του υποστρώματος. Τα λίπη παρέχουν την υψηλότερη απόδοση βιοαερίου, αλλά απαιτούν μεγάλο χρόνο παραμονής, λόγω της δυσκολίας αποδόμησης από τους μικροοργανισμούς. Οι υδατάνθρακες και οι πρωτεΐνες παρουσιάζουν πολύ ταχύτερους ρυθμούς μετατροπής, αλλά χαμηλότερες αποδόσεις αερίου. (Weiland P., 2010) Η μέση απόδοση μεθανίου των στερεών οργανικών αποβλήτων κυμαίνεται μεταξύ 360 και 530 mL/g πτητικών στερεών. (Bouallagui H., 2005) Κατά κανόνα καλλιέργειες σακχάρων και αμύλου έχουν υψηλότερες αποδόσεις μεθανίου – μέση απόδοση 450 mL CH₄/g πτητικών στερεών - από τη λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα – η οποία μπορεί να αποδώσει έως και 330 mL CH₄/g πτητικών στερεών. (Xu N., 2019)

Θεωρητικά, η μέση απόδοση σε μεθάνιο, σε τυπική θερμοκρασία και πίεση, από κυτταρίνη και ημικυτταρίνη είναι 415 και 424 mL-CH₄ / g με 50% περιεκτικότητα σε μεθάνιο στο βιοαέριο. Δεδομένου ότι η σύνθεση λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας διαφέρει, η απόδοση του μεθανίου ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται. (Salakkam A., 2019)



Σχήμα 21. Παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης (Celignis, n.d.).

Διεργασία - Αντιδραστήρες – Κρίσιμες παράμετροι

Η αναερόβια βιοαποικοδόμηση της σύνθετης οργανικής ύλης σε CH₄ και CO₂ πραγματοποιείται μέσω μιας σειράς διεργασιών: υδρόλυση, οξεογένεση, ακετογένεση και μεθανογένεση. Η υδρόλυση είναι το κύριο βήμα για τη δημιουργία βιοαερίου. Σε αυτήν τη διαδικασία, πολύπλοκα οργανικά υλικά, μακράς αλυσίδας, όπως υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λιπίδια, διασπώνται σε απλούστερες, μικρής αλυσίδας ενώσεις, όπως σάκχαρα, αμινοξέα και λιπαρά οξέα, χρησιμοποιώντας υδρολυτικά βακτήρια. Η υδρόλυση, γνωστή και ως υγροποίηση, είναι το πλέον περιοριστικό βήμα της αναερόβιας διαδικασίας, καθώς η βιοαποικοδομησιμότητα της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας είναι πιο δύσκολη σε σχέση άλλους πολυσακχαρίτες, όπως το άμυλο. Για την διευκόλυνση αυτού του σταδίου συστήνεται η προεπεξεργασία της. Κατά την οξεογένεση, που είναι το δεύτερο στάδιο, όλα τα μονομερή μετατρέπονται σε πτητικά λιπαρά οξέα (VFA), που περιλαμβάνουν συνήθως το βαλερικό οξύ, το βουτυρικό οξύ, το προπριονικό οξύ κ.α. Πολλές ομάδες βακτηρίων είναι υπεύθυνες για τη διαδικασία υδρόλυσης και οξεογένεσης και ανήκουν κυρίως στην οικογένεια Streptococcaceae και Enterobacteriaceae και στα γένη Bacteroides, Clostridium, Butyrivibrio, Eubacterium και Bifidobacterium. Στη διαδικασία της ακετογένεσης τα VFAs, η αιθανόλη και οι αρωματικές ενώσεις, όπως το βενζοϊκό οξύ, μετατρέπονται σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα, χρησιμοποιώντας ακετογόνα βακτήρια. Τέλος, κατά την μεθανογένεση, τα μεθανογενή βακτήρια χρησιμοποιούν το οξικό οξύ, το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα ως υπόστρωμα για την παραγωγή του μεθανίου. Με βάση τη χημική ζήτηση σε οξυγόνο (COD), το 72% του μεθανίου παράγεται με την αποκαρβοξυλίωση του οξικού οξέως, χρησιμοποιώντας ακετοτροφικά μεθανογόνα βακτήρια, και το υπόλοιπο από το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιώντας υδρογονοτροφικά μεθανογόνα βακτήρια. (Bouallagui H., 2009; Rajendran K., 2011)

Οι διεργασίες της AD μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη θερμοκρασία του αντιδραστήρα (μεσόφιλη/θερμόφιλη), την περιεκτικότητα σε στερεά (χαμηλή/ψηλή), τον τρόπο τροφοδοσίας (ασυνεχής /συνεχής /ημι-συνεχής) ή τον αριθμό των σταδίων της διαδικασίας (ενός / πολλαπλών σταδίων). (Vögeli Y., 2014)

Ο Αντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάμιξης (CSTR) είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος για την παραγωγή του βιοαερίου με αναερόβια χώνευση. Πρόκειται για ένα κυλινδρικό δοχείο με αναδευτήρα, το οποίο παρέχει πλήρη ανάμιξη και αποτρέπει την καθίζηση του υποστρώματος και τον σχηματισμό αφρού στο ανώτερο στρώμα.

Χρησιμοποιείται κυρίως για την αποσύνθεση του στερεού υποστρώματος κατά την παραγωγή βιοαερίου.

Στον αντιδραστήρα ανοδικής ροής (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB) το τροφοδοτούμενο διάλυμα διέρχεται από τους κόκκους της βιομάζας και το βιοαέριο παράγεται στην επιφάνεια των κόκκων. Λόγω των προσκολλημένων φυσαλίδων αερίου, οι κόκκοι ανεβαίνουν στην υγρή φάση και απελευθερώνουν το αέριο που συλλέγεται με τη βοήθεια κατάλληλων συσκευών (gasholder). Μετά από αυτή τη διαδικασία, οι κόκκοι κατακάθονται ξανά στην ‘κουβέρτα λάσπης’ που βρίσκεται στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα. Η αποτελεσματικότητα αυτής της διαδικασίας κυμαίνεται περίπου στο 97%.

Οι διεργασίες δύο σταδίων είναι ο συνδυασμός δύο διεργασιών ενός σταδίου. Αυτό αυξάνει το ρυθμό παραγωγής βιοαερίου και μειώνει τον χρόνο παραμονής του. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει το διαχωρισμό του στερεού συστατικού στο πρώτο στάδιο και την τροφοδοσία του υγρού κλάσματος VFA στο δεύτερο στάδιο. Συνήθως μια διαδικασία δύο σταδίων χρησιμοποιεί CSTR στο 1^ο στάδιο και UASB στο 2^ο. (Rajendran K., 2011)

Οι βασικές λειτουργικές παράμετροι της AD, δηλαδή η θερμοκρασία, το pH, το περιεχόμενο νερό, το υπόστρωμα, η αναλογία Άνθρακα/Αζώτου (C/N), ο ρυθμός παροχής οργανικής ύλης σε συνεχή διεργασία, ο χρόνος παραμονής και η ανάδευση επιδρούν στη σταθερότητα της διαδικασίας και μπορούν να βελτιώσουν ή να μειώσουν την απόδοση και την ποιότητα του βιοαερίου. (Bouallagui H., 2009) Γενικά η αναερόβια χώνευση για την παραγωγή βιοαερίου συνίσταται να πραγματοποιείται:

- μεταξύ 15 και 65°C –όπου ενεργοποιούνται τα μεσόφιλα και τα θερμοφιλα βακτήρια
- σε pH μεταξύ 6.8-7.4, όπου ευνοείται η δράση και των ακετογόνων και των μεθανογόνων βακτηρίων
- με αναλογία C/N μεταξύ 16:1 και 25:1
- με αναλογία οργανικής ύλης προς νερό 1:1
- με ανάδευση, συνήθως μηχανική, αλλά και με περιστροφική αντλία ή πεπιεσμένο αέριο
- παρουσία θρεπτικών συστατικών, όπως άζωτο, φώσφορο, κάλιο, μαγνήσιο, ασβέστιο και ορισμένων ιχνοστοιχείων, όπως σίδηρο, μαγγάνιο, μολυβδαίνιο, ψευδάργυρο, κοβάλτιο, σελήνιο και νικέλιο. (Rajendran K., 2011)

Μία πρόκληση κατά την αναερόβια χώνευση είναι να αποφευχθεί η οξίνιση και η αναστολή των μεθανογενών βακτηρίων. Υψηλό κλάσμα βιοαποικοδομήσιμης οργανικής ύλης μπορεί, για παράδειγμα, να οδηγήσει σε μείωση του pH στον αντιδραστήρα και σε μεγαλύτερη παραγωγή πτητικών λιπαρών οξέων, το οποίο αναστέλλει τη δράση των μεθανογενών βακτηρίων. (Bouallagui H., 2009) Συνήθως, αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να αποφευχθεί με αναερόβια συν-χώνευση, πράγμα που συνεπάγεται την προσθήκη ενός ρυθμιστικού συν-υποστρώματος. (Cecchi F. 2003) Η συν-χώνευση εφαρμόζεται όλο και περισσότερο για ταυτόχρονη επεξεργασία αρκετών στερεών και υγρών οργανικών αποβλήτων, καθώς ένα ομοιογενές μείγμα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σταθερότητας και της απόδοσης της διαδικασίας. (Esposito G., 2012)

Τρόποι αξιοποίησης

Το βιοαέριο παρέχει ένα εναλλακτικό καύσιμο για οχήματα. Ωστόσο, η ποιότητα του βιοαερίου πρέπει να βελτιωθεί και να καταστεί ισοδύναμη με εκείνη του φυσικού αερίου. Μετά τον καθαρισμό -αφαίρεση σωματιδίων, διοξειδίου του άνθρακα, υδρόθειου και υγρασίας - μπορεί να αναμιχθεί με φυσικό αέριο και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για οχήματα. Το βιοαέριο μπορεί να αποτελέσει μια πηγή ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί σε γεννήτριες κινητήρων καύσης και σε στροβίλους καύσης, για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού για τη λειτουργία μιας εγκατάστασης. Επίσης, το βιοαέριο χρησιμοποιείται για μαγείρεμα και φωτισμό σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες. (Rajendran K., 2011)

Αποτελέσματα μελετών

Τα αποτελέσματα διαφόρων μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί για την παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα τροφίμων και λιγνοκυτταρινούχα αστικά στερεά απόβλητα, όπως χαρτί, βαμβάκι και υφάσματα, παρουσιάζονται στην συνέχεια.

Στη μελέτη των Bouallagui et al. (2005) εξετάστηκε η δυνατότητα αξιοποίησης της αναερόβιας χώνευσης για την ανάκτηση υλικών και την παραγωγή ενέργειας από απόβλητα φρούτων και λαχανικών (FVW). Το οργανικό κλάσμα αυτών των αποβλήτων περιλαμβάνει

περίπου 75% εύκολα βιοαποικοδομήσιμη ύλη (σάκχαρα και ημικυτταρίνη), 9% κυτταρίνη και 5% λιγνίνη, και η αναερόβια χώνευσή επιτρέπει τη μετατροπή του 70-95% της οργανικής τους ύλης σε μεθάνιο. Αρχικά πραγματοποιήθηκε τεμαχισμός και ομογενοποίηση των αποβλήτων βιομάζας και τελικά η μέση απόδοση παραγωγής μεθανίου ανήλθε σε περίπου 420 mL/g VS. Ένας σημαντικός περιορισμός της αναερόβιας χώνευσης των FVW είναι η ταχεία οξίνιση αυτών των αποβλήτων, που μειώνει το pH στον αντιδραστήρα, και η υψηλή παραγωγή πτητικών λιπαρών οξέων (VFA), η οποία περιορίζει και αναστέλλει τη δραστηριότητα των μεθανογενών βακτηρίων. Ένα συνεχές σύστημα δύο φάσεων, που περιλαμβάνει έναν θερμοφιλό αντιδραστήρα υγροποίησης και ένα μεσόφιλο αναερόβιο φίλτρο, παρουσίασε μεγαλύτερη αποδοτικότητα κατά την αναερόβια χώνευση των FVW. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους έγκειται στην δυνατότητα προσαρμογής του ρυθμού φόρτωσης του πρώτου σταδίου σε έναν αντιδραστήρα ασυνεχούς ανάμιξης - STR, επιτρέποντας έναν πιο σταθερό ρυθμό τροφοδοσίας κατά το μεθανογόνο δεύτερο στάδιο σε έναν αντιδραστήρα UASB.

Οι Raj et al. (2009) μελέτησαν την παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα βαμβακιού. Η πειραματική εγκατάσταση περιλάμβανε χωνευτή διαλείποντος έργου και τα πειράματα διεξήχθησαν με διαφορετική περιεκτικότητα σε υγρασία, καθώς και με την προσθήκη ή μη κοπριάς αγελάδας ή χοίρου, ως ρυθμιστικό συν-υπόστρωμα. Διαπιστώθηκε ότι απόβλητα βαμβακιού με 5-7.5% περιεκτικότητα σε κοπριά και σε θερμοκρασίες 30-35 °C παρήγαγαν βιοαέριο συνεχώς, με αρκετά υψηλή απόδοση από τη δέκατη ημέρα και μετά. Διαπιστώθηκε ότι πέντε κιλά απορριμμάτων βαμβακιού μπορούν να παράγουν περίπου 200 L βιοαερίου σε 50 ημέρες. Το αέριο προϊόν ήταν πλούσιο σε μεθάνιο με περιεκτικότητα περίπου 77% .

Οι Jeihanipour et al. (2010) ανέπτυξαν μια νέα διαδικασία διαχωρισμού της κυτταρίνης, δηλαδή βαμβάκι και βισκόζη, από απορρίμματα υφασμάτων που περιείχαν πολυεστέρα σε ένα ποσοστό. Σε αυτήν τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε σαν διαλύτης N-οξείδιο της N-μεθυλμορφολίνης (NMMO) για τον διαχωρισμό και την προεπεξεργασία της κυτταρίνης. Στη συνέχεια η κυτταρίνη αφομοιώθηκε σε βιοαέριο με απόδοση της τάξης του 30% της θεωρητικής.

Οι Jeihanipour et al. (2013), διερεύνησαν την αποτελεσματικότητα ενός αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης δύο σταδίων (CSTR), τροποποιημένου ως ασυνεχούς αντιδραστήρα ανάμιξης (STR) και ενός αντιδραστήρα ανοδικής ροής (UASB), για την παραγωγή βιοαερίου από υπολείμματα υφασμάτων. Η πρώτη ύλη υφασμάτων προετοιμάστηκε με μηχανική προ-

επεξεργασία (τεμαχισμός - 2.5x2.5cm) και τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι η συνολική παραγωγή αερίου από μίγμα βισκόζης / πολυεστέρα στην διεργασία δύο σταδίων ήταν συγκρίσιμη με την διεργασία ενός σταδίου και σε λιγότερο από δύο εβδομάδες ανακτήθηκε περισσότερο από το 80% της θεωρητικής απόδοσης σε μεθάνιο (420 CH₄/g VS). Ωστόσο, για το μίγμα βαμβακιού / πολυεστέρα, η διαδικασία των δύο σταδίων ήταν σημαντικά ανώτερη, αυξάνοντας το ρυθμό παραγωγής μεθανίου και μειώνοντας τη φάση υστέρησης του υλικού στον αντιδραστήρα από 15 ημέρες σε 4 ημέρες. Στην διεργασία του ενός σταδίου η απόδοση σε μεθάνιο ανήλθε σε 71 ml CH₄/g VS σε 25 ημέρες, ενώ στην διεργασία δύο σταδίων σε 166 ml CH₄/g VS σε 10 ημέρες. Στην διαδικασία των δύο σταδίων, μελετήθηκε επίσης η επίδραση της προεπεξεργασίας με NMMO. Η προεπεξεργασία είχε ως αποτέλεσμα τον διπλασιασμό του ρυθμού παραγωγής μεθανίου: 200 mL/g VS/ημέρα για μη επεξεργασμένα υφάσματα και 400 mL/g VS/ημέρα για τα επεξεργασμένα.

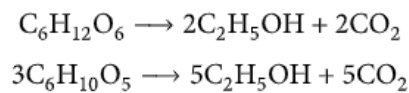
Οι Jansson et al. (2019), μελέτησαν τη δυνατότητα παραγωγής μεθανίου από απόβλητα τροφίμων και χαρτιού. Ξηρή αναερόβια χώνευση πραγματοποιήθηκε σε διάφορες συγκεντρώσεις ολικών στερεών στον αντιδραστήρα, από 14% έως και 20%. Οι υψηλότερες αποδόσεις μεθανίου ανήλθαν σε 402 ml CH₄ / g VS και 229 ml CH₄ / g VS από τα απόβλητα τροφίμων και χαρτιού αντίστοιχα, στην συγκέντρωση ολικών στερεών 14% .

Οι Li W. et al (2020) πραγματοποίησαν μία συγκριτική μελέτη της απόδοσης βιο-μεθανίου για διαφορετικούς τύπους χαρτιού. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν δείγματα από χαρτόκουτο (CB), χαρτί γραφείου (OP), χαρτομάντιλα (TP) και περιοδικά (MP). Τα δείγματα προετοιμάστηκαν με μηχανική προ-επεξεργασία (άλεση – μήκος <0.5cm). Από τις πρώτες ύλες το TP είχε την υψηλότερη περιεκτικότητα σε κυτταρίνη (90.9%), ενώ τα άλλα τρία απόβλητα χαρτιού είχαν περιεκτικότητα σε κυτταρίνη από 51.8 έως 57.0%. Η περιεκτικότητα λιγνίνης στο CB ήταν σχετικά υψηλή (20.7%), σε σύγκριση τα υπόλοιπα δείγματα OP (3.4%), TP (1.1%) και MP (0.0%). Η αποδόσεις σε βιο-μεθάνιο βρέθηκαν να είναι 358.8 mL / g-VS στο TP, 284.5 mL / g-VS στο OP, 316.4 mL / g-VS στο MP και 243.9 mL / g-VS στο CB. Παρατηρήθηκε ότι το TP, με την υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη και τη χαμηλότερη σε λιγνίνη, έχει υψηλότερες αποδόσεις μεθανίου. Στο CB η υψηλή περιεκτικότητα λιγνίνης πιθανότατα περιόρισε την παραγωγικότητά, επειδή η λιγνίνη προκαλεί άμεση φυσική παρεμπόδιση στην αποικοδόμηση της κυτταρίνης και αναστέλλει τη δραστηριότητα των ενζύμων που υδρολύουν την κυτταρίνη και την ξυλάνη. Ο χρόνος παραμονής για όλους τους τύπους χαρτιού ανήλθε σε περίπου 50 με 55 ημέρες.

3.2.3 Ζύμωση

Γενικά

Η ζύμωση (Fermentation) είναι το βασικό βήμα της διαδικασίας παραγωγής βιοαιθανόλης (αιθυλική αλκοόλη, CH₃-CH₂OH ή EtOH), που αποτελεί το πιο διαδεδομένο βιοκαύσιμο στην παγκόσμια αγορά. (Mussatto S.I., 2010) Η ζύμωση είναι η βιολογική διαδικασία για τη μετατροπή των εξόζων και των πεντοζών σε αιθανόλη μέσω ποικίλων μικροοργανισμών, όπως βακτήρια, ζυμομύκητες ή μύκητες. Οι αντιδράσεις μετατροπής για εξόζες (C6) και πεντόζες (C5) είναι οι εξής:



Η θεωρητική μέγιστη απόδοση καλλιέργειας εξόζων και πεντοζών είναι 0.511 kg αιθανόλης και 0.489 kg CO₂ ανά kg σακχάρων. Η συνολική θεωρητική απόδοση αιθανόλης (στους 20°C) συνεπώς γίνεται 0.719 λίτρα ανά kg γλυκάνης (ή άλλων δομών C6) και 0.736 ανά kg ξυλάνης (ή άλλων δόμων C5). (Kang Q., 2014)

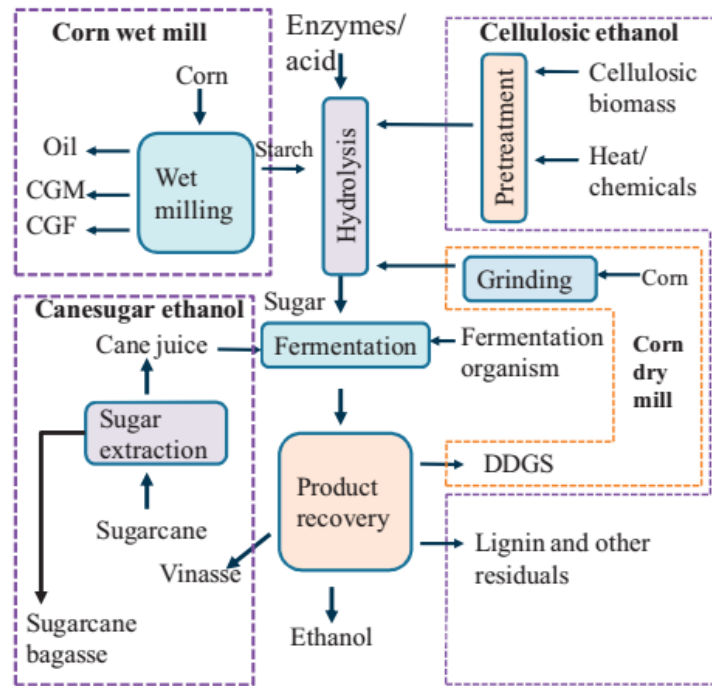
Πρώτες ύλες

Οι πηγές υδατανθράκων για παραγωγή βιοαιθανόλης μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες ομάδες: (1) σάκχαρα: ζαχαροκάλαμο, ζαχαρότευτλα, γλυκό σόργο, μελάσα και φρούτα, (2) αμυλούχα υλικά: δημητριακά, π.χ. καλαμπόκι, σιτάρι κριθάρι, ρύζι καλλιέργειες ρίζας, π.χ. πατάτα, και (3) λιγνοκυτταρινούχο βιομάζα: υπολείμματα καλλιεργειών (ζαχαροκάλαμο, καλαμπόκι, άχυρο, φλοιό ρυζιού, κουκούτσια και πολτό ελιάς), σκληρό ξύλο (aspen, λεύκη), μαλακό ξύλο (πέυκο, έλατο), απόβλητα κυτταρίνης (απορρίμματα χαρτιού και ανακυκλωμένος πολτός χαρτιού), ποώδη βιομάζα (σανός, γρασίδι, χόρτα) και αστικά στερεά απόβλητα. (Balat M., 2009; Bušić A., 2018; Mussatto S.I., 2010) Επί του παρόντος, περίπου το 40% της παγκόσμιας παραγωγής βιοαιθανόλης προέρχεται από καλλιέργειες σακχάρων και σχεδόν το 60% από καλλιέργειες αμύλου. (Vohra M., 2014) Ωστόσο, η ανταγωνιστική τους χρήση ως τρόφιμα ή ζωοτροφές, επηρεάζει την προσφορά τους. (Bušić A., 2018) Για την λιγνοκυτταρινούχο πρώτη ύλη, οι σχετικές τεχνολογίες είναι πιο περίπλοκες και το κόστος παραγωγής βιοαιθανόλης είναι υψηλότερο σε σύγκριση με την πρώτη ύλη ζαχαροκάλαμου, τεύτλων ή καλαμποκιού. (Vohra M., 2014) Ωστόσο, πρόκειται για μια πιο οικονομική, διαθέσιμη και μη ανταγωνιστική με την βιομηχανία τροφίμων πρώτη ύλη,

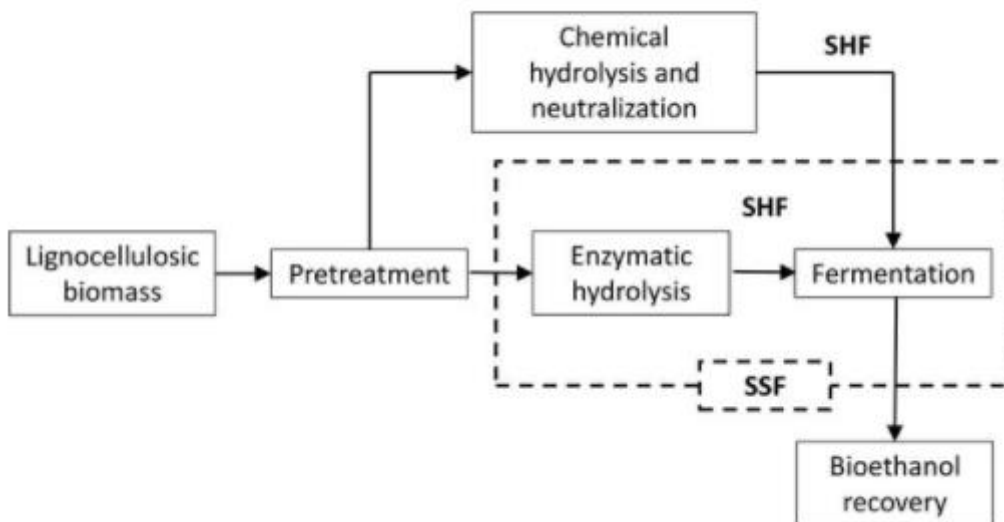
ενισχύοντας έτσι τη βιωσιμότητα της. Η λιγνοκυτταρίνη, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρειάζεται μια αποτελεσματική προεπεξεργασία, ώστε στη συνέχεια να γίνει υδρόλυση με κατάλληλα ενζυμα και να πραγματοποιηθεί ζύμωση. Οι διάφοροι διαθέσιμοι τύποι λιγνοκυτταρινικής βιομάζας, θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως πρώτες ύλες για την παραγωγή βιοαιθανόλης, ενέργειας, θερμότητας και χημικών προστιθέμενης αξίας. (Buđić A., 2018) Ακόμη και αστικά στερεά βιολογικά απόβλητα, που διαχωρίζονται κατάλληλα, συμπεριλαμβανομένων αποβλήτων μαγειρείων, απορριμμάτων τροφίμων, κήπου και απορριμμάτων φρούτων, θεωρούνται κατάλληλα υποστρώματα για την παραγωγή αιθανόλης. (Gupta A., 2015)

Διεργασία - Αντιδραστήρες – Κρίσιμες παράμετροι

Η παραγωγή βιοαιθανόλης πραγματοποιείται συνήθως σε τρία στάδια, με ένα επιπλέον στάδιο προεπεξεργασίας εάν χρησιμοποιείται λιγνοκυτταρινικό υλικό τροφοδοσίας: α) προεπεξεργασία της λιγνοκυτταρίνης για να γίνει πιο προσιτή στα επόμενα στάδια β) όξινη ή ενζυμική υδρόλυση (σακχαροποίηση) για να διασπαστούν οι πολυσακχαρίτες σε απλά σάκχαρα, γ) ζύμωση των απλών σακχάρων (εξόζες και πεντόζες) σε αιθανόλη με χρήση μικροοργανισμών, κυρίως ζύμης, δ) διαχωρισμός και συγκέντρωση αιθανόλης που παράγεται από απόσταξη-αφυδάτωση. Σημειώνεται ότι, η θερμότητα, τα οξέα και τα ένζυμα υδρολύουν την ημικυτταρίνη και την κυτταρίνη, για να απελευθερώσουν σάκχαρα που μπορούν να ζυμωθούν σε αιθανόλη. Η λιγνίνη και τα υπόλοιπα κλάσματα μπορούν να καούν για να παρέχουν θερμότητα και ηλεκτρισμό, που αξιοποιείται στο στάδιο μετατροπής. Στο Σχήμα 22 παρουσιάζονται όλοι οι εναλλακτικοί τρόποι παραγωγής βιοαιθανόλης από διάφορες πρώτες ύλες, ενώ στο Σχήμα 23 παρουσιάζονται τα βήματα παραγωγής από λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα, υπό το πρίσμα των εναλλακτικών τύπων υδρόλυσης και το πλήθος των σταδίων. (Vohra M., 2014; Philbrook A., 2013)



Σχήμα 22. Σχηματική αναπαράσταση της παραγωγής αιθανόλης από υλικά πλούσια σε σάκχαρα, άμυλο και λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα (Vohra M., 2014).



Σχήμα 23. Σχηματική αναπαράσταση της παραγωγής αιθανόλης από λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα (Tran T.T.A., 2019)

Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για το μεταβολισμό των απελευθερωμένων σακχάρων της ενζυμικής υδρόλυσης από μικροοργανισμούς και τη μετατροπή τους σε βιοαιθανόλη:

- Ξεχωριστή υδρόλυση και ζύμωση (SHF): η υδρόλυση πραγματοποιείται μέχρι το τέλος, και στη συνέχεια προστίθενται μικροοργανισμοί στο μείγμα για τη ζύμωση των σακχάρων. Τα δύο στάδια πραγματοποιούνται σε ξεχωριστούς αντιδραστήρες. Αυτή η μέθοδος έχει κάποια εγγενή αδύνατα σημεία, όπως πιθανή επιμόλυνση, σχηματισμό αναστολέων και απαίτηση επιπρόσθετου χρόνου και εξοπλισμού.
- Ταυτόχρονη σακχαροποίηση και ζύμωση (SSF): η ενζυμική υδρόλυση και η ζύμωση μικροοργανισμών πραγματοποιούνται ταυτόχρονα στον ίδιο αντιδραστήρα, τα ένζυμα και οι μικροοργανισμοί προστίθενται στο μείγμα. Αυτή η μέθοδος έχει αποδειχθεί πολύ καλύτερη από την SHF, καθώς απαιτείται μικρότερος χρόνος, λιγότερος εξοπλισμός και ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος μόλυνσης. (Tran T.T.A., 2019)

Η μετατροπή μπορεί να πραγματοποιηθεί με ασυνεχή (batch) ή συνεχή διαδικασία, ωστόσο, η πρώτη χρησιμοποιείται ευρύτερα. Η ζύμωση λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες 25-30°C και διαρκεί μεταξύ 6 και 72 ωρών, ανάλογα με τη σύνθεση του υδρολύματος, την πυκνότητα των κυττάρων, τη φυσιολογική δραστηριότητα και τα είδη ζύμης. Το διάλυμα περιέχει συνήθως 8-14% αιθανόλη σε όγκο. Πάνω από αυτήν τη συγκέντρωση, μπορεί να συμβεί αναστολή της δραστηριότητας των ζυμομυκήτων. (Vohra M., 2014)

Προκειμένου να ληφθεί καθαρή αιθανόλη (95.63% κατά μάζα) από το δυαδικό αζεοτροπικό μίγμα αιθανόλης-νερού απαιτούνται δύο βήματα διαχωρισμού, με μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Το πρώτο βήμα είναι μια τυπική απόσταξη που αποδίδει αιθανόλη 92.4-94.0% κατά μάζα. Εναλλακτικά, μπορεί να πραγματοποιηθεί κυκλική απόσταξη, για τον καθαρισμό της αιθανόλης, που είναι μια ενεργειακά αποδοτικότερη εναλλακτική λύση. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει αφυδάτωση της αιθανόλης για να ληφθεί τελικά άνυδρη αιθανόλη, που περιέχει έως και 99.6% αλκοόλη και 0.4% νερό. (Bušić A., 2018; Vohra M., 2014) Αρκετές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν για αυτό το στάδιο, όπως απόσταξη ταλάντευσης πίεσης, εκχυλιστική απόσταξη, αζεοτροπική απόσταξη ή συνδυασμός αυτών των μεθόδων. Το υπόλειμμα απόσταξης ονομάζεται βινάσσα, και υπολογίζεται ότι 15 λίτρα βινάσσας παράγονται για κάθε 1 λίτρο αιθανόλης. (Bušić A., 2018) Συνήθως χρησιμοποιείται ως λίπασμα, ωστόσο συστήνεται η επεξεργασία/ανακύκλωση πριν την διάθεσή της. (Reis C.E.R., 2017) Η υπολειμματική βινάσσα μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης ως καύσιμο για να

παρέχει μεγάλο μέρος της ενέργειας για τις εργασίες εξαγωγής, παραγωγής και ανάκτησης αιθανόλης. (Vohra M., 2014)

Τρόποι αξιοποίησης

Η βιοαιθανόλη χρησιμοποιείται κυρίως στον τομέα των μεταφορών ως συστατικό της βενζίνης - σε ποσοστά της τάξης του 5-10%. (Bušić A., 2018) Τα μίγματα καυσίμου -έως και 10% - μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους κινητήρες εσωτερικής καύσης σύγχρονων αυτοκινήτων και ελαφρών οχημάτων χωρίς τροποποιήσεις στον κινητήρα ή στο σύστημα καυσίμου. Καθώς το ποσοστό αιθανόλης στο μείγμα αυξάνεται, απαιτούνται ορισμένες τροποποιήσεις, π.χ. στο σύστημα ψεκασμού καυσίμου και στο σύστημα εξάτμισης. (Sarris D., 2016) Η αιθανόλη, η οποία έχει υψηλότερο επίπεδο οκτανίων και χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο σε σύγκριση με τη βενζίνη, βελτιώνει την καύση και συνεπώς την απόδοση του οχήματος και αποδίδει μειωμένες εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα, άκαυστων υδρογονανθράκων και οξειδίου του θείου, ένα καρκινογόνο συστατικό της όξινης βρογχίτιδας. Κατά μέσο όρο, ένα λίτρο αιθανόλης περιέχει 66% της ενέργειας σε σχέση με ένα λίτρο βενζίνης. (Nigam P.S., 2011) Η βιο-αιθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βελτιωτικό του αριθμού οκτανίων. Ο τριτοταγής αιθυλοβουτυλαιθέρας - ETBE αποτελείται από 45% κατ' όγκο βιοαιθανόλη και 55% κατ' όγκο ισοβουτυλένιο, και χρησιμοποιείται συχνά αντί του μεθυλο τριτοταγούς βουτυλαιθέρα -MTBE. (Bušić A., 2018)

Αποτελέσματα μελετών

Τα αποτελέσματα διαφόρων μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί για την παραγωγή βιοαιθανόλης από απόβλητα τροφίμων και λιγνοκυτταρινούχα αστικά στερεά απόβλητα, όπως χαρτί και υφάσματα, παρουσιάζονται στην συνέχεια.

Απόβλητα λαχανικών και φρούτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοαιθανόλης. Μελέτες έδειξαν ότι η βέλτιστη απόδοση βιοαιθανόλης παράγεται σε pH 4, θερμοκρασία 32°C και χρησιμοποιώντας 3g/L ζυμομύκητα. Απορρίμματα ανανά, πορτοκαλιών και ντομάτας είναι αυτά που οδήγησαν σε υψηλή απόδοση βιοαιθανόλης, λόγω της παρουσίας μεγάλης ποσότητας σακχάρων σε αυτά. (Khandaker M.M., 2020)

Ο Pham et al. (2015) συνοψίζουν πλήθος μελετών παραγωγής βιοαιθανόλης από ποικίλα απόβλητα τροφίμων, όπως μπανανόφλουδες, πολτό ζαχαρότευλων, ανανά, σταφύλι, φλούδα πατάτας, λεμόνια, απόβλητα τροφίμων από καφετέρια ή οικιακά. Η ενζυμική υδρόλυση είναι η πιο κοινή μέθοδος προεπεξεργασίας στην παραγωγή αιθανόλης από απορρίμματα τροφίμων, αποδίδοντας 29.1 – 32.2 g/L αιθανόλη. Αναφέρεται επίσης απόδοση 0.43 g αιθανόλης/ g TS και 0.31 g αιθανόλης / g TS για διεργασίες SHF και SSF, αντίστοιχα. Έτσι εκτιμάται μια μέση ενεργειακή περιεκτικότητα 8.3–11.6 kJ/g TS για την αιθανόλη που παράγεται από απόβλητα τροφίμων, με βάση ότι η αιθανόλη περιέχει ενέργεια 26.9 MJ/kg.

Στη μελέτη των Datta et al. (2018) απόβλητα αρτοσκευασμάτων έχουν χρησιμοποιηθεί ως η μόνη πηγή θρεπτικών ουσιών για την παραγωγή γλυκόζης και στη συνέχεια αιθανόλης με ζύμωση παρουσία *Saccharomyces cerevisiae*. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ενζυμική υδρόλυση των απορριμμάτων ψωμιού για περίπου 24 ώρες, όπου το παραγόμενο διάλυμα περιείχε γλυκόζη περίπου 145g/l, που αντιστοιχεί σε 0.59 g γλυκόζης ανά g ψωμιού. Στη συνέχεια, μέσω ζύμωσης, παράχθηκε αιθανόλη με συγκέντρωση 54 ± 2 g/l, με χρόνο παραμονής μία ημέρα. Το αποτέλεσμα απεικονίζει απόδοση αιθανόλης από γλυκόζη ίση με 0.37 g αιθανόλης / g γλυκόζης και με τη θεωρητική απόδοση να ανέρχεται σε 0.511, η απόδοση μετατροπής ανήλθε σε 72%.

Η δυνατότητα παραγωγής αιθανόλης μελετήθηκε σε εργαστηριακή κλίμακα χρησιμοποιώντας απορρίμματα τροφίμων από τους Thapa B. et. al (2017). Τα απόβλητα τροφίμων συλλέχθηκαν, ξηράθηκαν και θρυμματίστηκαν, και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν σε σειρά όξινη υδρόλυση για μία ώρα και ζύμωση για πέντε μέρες για την παραγωγή αιθανόλης. Διάφορες συγκεντρώσεις οξέος, καθώς και η θερμοκρασίες εξετάστηκαν με στόχο την βελτιστοποίηση της υδρόλυσης. Η μέγιστη απόδοση σακχάρων ήταν 32.63g/100 g ξηρών αποβλήτων τροφίμων με συγκέντρωση οξέος 7.5% στους 135°C, και η απόδοση σε αιθανόλη ήταν 13.78g/100g ξηρών αποβλήτων τροφίμων, αποδεικνύοντας ότι η αιθανόλη μπορεί να παραχθεί αποτελεσματικά από αστικά απορρίμματα τροφίμων.

Μεταξύ των διαφόρων τύπων βιομάζας, τα απόβλητα χαρτόμαζας (γραφική ύλη) διακρίνονται για την αυξημένη περιεκτικότητα σε κυτταρίνη και την αμελητέα περιεκτικότητα σε λιγνίνη. Ως εκ τούτου, μπορούν να αποτελέσουν μια κατάλληλη πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαιθανόλης. Στη μελέτη του Ioelovich et al. (2019), έχει προταθεί μια προηγμένη τεχνολογία για την πλήρη χρήση των απορριμμάτων χαρτιού με βιομετατροπή. Η τεχνολογία αποτελείται από τα ακόλουθα κύρια βήματα: (1)

επαναδιασπορά των αποβλήτων χαρτιού και έπειτα διαλογή του χαρτοπολτού για τον διαχωρισμό ινών από ορυκτά διογκωτικά μέσα, (2) οξίνιση και έκπλυση των ινών για την απομάκρυνση του υπολειμματικού ανθρακικού ασβεστίου, (3) ενζυμική υδρόλυση υψηλής περιεκτικότητας σε στερεά του απόμεταλλωμένου χαρτιού για να ληφθεί ζυμώσιμο σάκχαρο - γλυκόζη και (4) ζύμωση της γλυκόζης σε βιοκαύσιμα. Τα αρχικά δείγματα περιείχαν 38 έως 81% κυτταρίνη, 5 έως 15% ημικυτταρίνες, 1 έως 21% λιγνίνη και 7 έως 30% ανόργανα πληρωτικά. Η ενζυμική υδρόλυση κράτησε τέσσερις ημέρες και η ζύμωση τρεις. Τα δείγματα χαρτιού με το μεγαλύτερο ποσοστό σε λιγνίνη ήταν απορρίμματα χαρτονιού και εφημερίδων. Τα απορρίμματα από χαρτοπετσέτες, εφημερίδες, χαρτί συσκευασίας και χαρτί γραφείου περιείχαν μεγάλη ποσότητα (20-30%) πληρωτικών μέσων. Ως αποτέλεσμα, από 1 τόνο απορριμμάτων χαρτιού (γραφείου) μπορούν να παραχθούν περίπου 280 λίτρα βιοαιθανόλης που έχουν θερμοχωρητικότητα 1680kWh. Εκτός αυτού, παραμένουν ως παραπροϊόντα της επεξεργασίας, περίπου 260kg υπολειμματικών ινών και 270kg ανόργανων πληρωτικών υλικών που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στη χαρτοποιία. Έτσι, τα απορρίμματα χαρτιού μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλήρως για την παραγωγή πολύτιμου βιοκαυσίμου και ανακυκλωμένου χαρτιού.

Η επίδραση διάφορων προεπεξεργασιών στην αποτελεσματική υδρόλυση των απορριμμάτων χαρτιού και εφημερίδων σε ζυμώσιμα σάκχαρα, και η χρήση τους για την παραγωγή βιοαιθανόλης μέσω ζύμωσης μελετήθηκε από τους Annamalai N. et. al (2018). Η προεπεξεργασία με H₂O₂ (0.5% o/o) στους 121°C για 30 λεπτά θεωρήθηκε ως η πιο αποτελεσματική μέθοδος για αυτό το είδος μαλακής βιομάζας, λόγω της σημαντικής αύξησης της διαθέσιμης κυτταρίνης, της παραγωγής σακχάρου και της επιπλέον αποτελεσματικής απομάκρυνσης της λιγνίνης. Η ενζυμική υδρόλυση των προεπεξεργασμένων απορριμμάτων χαρτιών γραφείου (OP) και εφημερίδων (NP), για πέντε ημέρες, είχε ως αποτέλεσμα την απόδοση σακχάρου 24.5 και 13.26 g/L με απόδοση υδρόλυσης 91.8 και 79.6%, αντίστοιχα. Η περαιτέρω παραγωγή αιθανόλης με ζύμωση (*Saccharomyces cerevisiae*), για δύο ημέρες, ήταν περίπου 11.15 και 6.65 g/L και 0.51 and 0.58 g Αιθανόλης /g σακχάρου με παραγωγικότητα 0.32 και 0.28 (g αιθανόλης/L/h), αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι 0.479 και 0.277 g αιθανόλης θα μπορούσαν να παραχθούν από 1 g αποβλήτων OP και NP, αντίστοιχα.

Η παραγωγή αιθανόλης από βαμβακερά υφάσματα και απορρίμματα υφασμάτων τζιν διερευνήθηκε από τους Jeihanipour et. al (2008). Η καλύτερη απόδοση - σχεδόν πλήρης

μετατροπή των πρώτων υλών σε γλυκόζη - παρουσιάστηκε στην περίπτωση προκατεργασίας με αλκάλια, ακολουθούμενη από ενζυμική υδρόλυση και ζύμωση - με *Saccharomyces cerevisiae*. Η αλκαλική προκατεργασία με NaOH 12% στους 0°C και για 3 ώρες, ακολουθούμενη από ενζυμική υδρόλυση και ζύμωση για τέσσερις ημέρες (SSF) των υλικών με περιεκτικότητα σε στερεό 3%, απέδωσε 85.1% της θεωρητικής απόδοσης μετά τις πρώτες 24 ώρες και 99.1% στο τέλος των τεσσάρων ημερών. Η απόδοση μετατροπής των βαμβακερών υφασμάτων σε αιθανόλη ήταν 0.48g αιθανόλης/ 1g υφάσματος. Η προκατεργασία με πυκνό φωσφορικό οξύ πριν από την υδρόλυση οδήγησε σε παραγωγή αιθανόλης αγγίζοντας έως και το 66% της θεωρητικής απόδοσης. Τέλος, χωρίς την προκατεργασία, η υδρόλυση διάρκειας 24 ωρών, ακολουθούμενη από ταυτόχρονη σακχαροποίηση και ζύμωση (SSF) 4 ημερών, απέδωσαν 0.140-0.145 g αιθανόλης / g υφάσματος, της τάξης του 25-26% της αντίστοιχης θεωρητικής απόδοσης.

3.3 Θερμοχημικές διεργασίες

Οι θερμοχημικές μέθοδοι μετατρέπουν την βιομάζα μέσω ελεγχόμενης θέρμανσης ή / και οξείδωσης σε ενδιάμεσους φορείς ενέργειας ή θερμότητας. Στην περίπτωση των ιατρικών αποβλήτων θεωρούνται ως οι πιο ριζικές και καθολικές. Η θερμογόνο αξία των ιατρικών αποβλήτων μπορεί να κυμαίνεται από 2 έως 40 MJ / kg ανάλογα με τη σύνθεσή τους. (Cai X., 2020) Μεταξύ των θερμοχημικών διεργασιών μετατροπής βιομάζας, η πυρόλυση και η αεριοποίηση είναι οι δύο διαδικασίες που μελετώνται συνήθως. Η διαφορά μεταξύ αεριοποίησης και πυρόλυσης είναι ότι η αεριοποίηση παράγει αέριο που μπορεί να καεί για παραγωγή θερμότητας, ενώ η διαδικασία της πυρόλυσης παράγει υγρό καύσιμο, γνωστό ως έλαιο πυρόλυσης (py-oil / bio-oil). (Dhyani V., 2018).

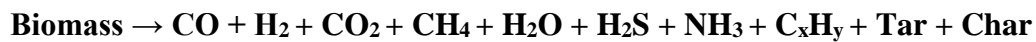
3.3.1 Αεριοποίηση

Γενικά

Η τεχνική αεριοποίησης (Gasification) περιλαμβάνει χημική αντίδραση σε περιβάλλον με έλλειψη οξυγόνου. Σε αυτή τη διαδικασία γίνεται θέρμανση της βιομάζας σε ακραίες θερμοκρασίες (500-1400°C), υπό ατμοσφαιρική πίεση έως και 33 bar και με χαμηλή

περιεκτικότητα / ή απουσία οξυγόνου, για την παραγωγή μιγμάτων καύσιμου αερίου. Επιπλέον, μετά την μετατροπή της βιομάζας παραμένει ένα στερεό υπόλειμμα άνθρακα (Char), το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί ως καύσιμο. Η διαδικασία αεριοποίησης μετατρέπει τα ανθρακούχα συστατικά σε αέριο σύνθεσης (Syngas), που περιλαμβάνει υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, ανώτερους υδρογονάνθρακες, άζωτο και πίσσα (tar), με την παρουσία ενός παράγοντα αεριοποίησης και καταλύτη. Σε αντίθεση με τις πρόσθετες τεχνικές θερμοχημικής μετατροπής, η τεχνική αεριοποίησης θεωρείται ανεξάρτητη αυτόθερμη διεργασία με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο (Lee S.Y., 2019; Molino A., 2018).

Η γενική αντίδραση αεριοποίησης από βιομάζα είναι η εξής (Molino A., 2018):



Η ενεργειακή περιεκτικότητα, δηλαδή το υδρογόνο (πρώτη προτίμηση) και το μονοξείδιο του άνθρακα (δεύτερη προτίμηση), καθώς και η αναλογία H_2 προς CO θεωρούνται ως μέτρα ποιότητας του αερίου σύνθεσης. (Madadian E., 2018)

Πρώτες ύλες

Η βιομάζα χρησιμοποιείται ευρέως σαν πρώτη ύλη για την αεριοποίηση για την παραγωγή αερίου σύνθεσης. (Madadian E., 2018) Οι διάφοροι τύποι λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας, όπως οι καλλιέργειες, τα δασικά απορρίμματα, τα απόβλητα τροφίμων, τα αστικά απόβλητα και το χαρτί, είναι ένα πολλά υποσχόμενο τμήμα βιομάζας. (Krishna B.B., 2019; Madadian E., 2018) Η χρήση επικίνδυνων νοσοκομειακών αποβλήτων ως πρώτη ύλη για την διεργασία της αεριοποίησης αναφέρεται σε πολλές πηγές. Συγκεκριμένα, οι τεχνολογίες αεριοποίησης με πλάσμα φαίνεται ότι μπορούν να εξουδετερώσουν επικίνδυνες ουσίες που περιέχονται στα νοσοκομειακά απόβλητα, ενώ παράλληλα εξασφαλίζουν χαμηλότερες εκπομπές ρύπων. (Cai X., 2020; Zhovtyansky V., 2018) Λαμβάνοντας υπόψη την μεγάλη περιεκτικότητα των νοσοκομειακών αποβλήτων σε λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα, η Αεριοποίηση φαίνεται μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος για τη αξιοποίηση τους.

Διεργασία - Αντιδραστήρες – Κρίσιμες παράμετροι

Συνήθως, η αεριοποίηση χωρίζεται σε τέσσερα στάδια: την ξήρανση (ενδόθερμο στάδιο), την πυρόλυση (ενδόθερμο στάδιο), την οξείδωση (εξώθερμο στάδιο) και την αναγωγή (ενδόθερμο στάδιο). Η αναμόρφωση της πίσσας μπορεί επίσης να προστεθεί ως ένα βήμα για την παραγωγή ελαφρών υδρογονανθράκων από μεγάλα μόρια υδρογονανθράκων. Η θερμότητα που απαιτείται για τη διαδικασία αεριοποίησης μπορεί να παρέχεται μέσω των αντιδράσεων εξώθερμης καύσης ή από εξωτερικές πηγές. (Molino A., 2018) Παρακάτω αναφέρονται οι κύριες αντιδράσεις που πραγματοποιούνται:

Πίνακας 8. Αντιδράσεις κατά την αεριοποίηση (Molino A., 2018).

Βήματα της διεργασίας Αεριοποίησης	Αντίδραση
Πυρόλυση	$\text{Biomass} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{Tar} + \text{Char}$
Οξείδωση	$\text{Char} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ (Οξείδωση του Char) $\text{C} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$ (Μερική Οξείδωση) $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ (Οξείδωση του Υδρογόνου)
Αναγωγή	$\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$ (Αντίδραση Boudouard) $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ (Αναμόρφωση του Char) $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ (Αντίδραση Water Gas Shift (WGS)) $\text{C} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4$ (Αντίδραση μεθανοποίησης) $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ (Αναμόρφωση μεθανίου με ατμό) $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$ (Ξηρή αναμόρφωση μεθανίου)
Αναμόρφωση της πίσσας	$\text{Tar} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{C}_x\text{H}_y$ (Αναμόρφωση του Tar με ατμό)

Οι αεριοποιητές μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορα είδη ανάλογα με τον παράγοντα αεριοποίησης (με αέρα, με ατμό, με οξυγόνο), την κινητικότητα του ρευστού (σταθερής κλίνης, ρευστοστερεάς κλίνης), την θερμοκρασία, την πίεση και την πηγή θέρμανσης (άμεση ή έμμεση). Η επιλογή του αεριοποιητή εξαρτάται από την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται, τα χαρακτηριστικά της και τις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος. Οι αντιδραστήρες σταθερής κλίνης (ανοδικής, καθοδικής ή διασταυρούμενης ροής) είναι ο απλούστερος τύπος, απαιτούν υψηλούς χρόνους παραμονής και γενικά είναι κατάλληλοι για θερμική απόδοση μικρής έως μεσαίας κλίμακας. Οι αντιδραστήρες ρευστοστερεάς κλίνης (φυσαλίδων ή περιστροφικοί)

έχουν υψηλές αποδόσεις μετατροπής, ευελιξία φορτίου και καυσίμου, υψηλή μεταφορά θερμότητας, ομοιομορφία θερμοκρασίας και γενικά είναι κατάλληλοι για θερμική απόδοση μεγάλης κλίμακας. Επίσης, σε αυτούς τους αντιδραστήρες δύναται να προστεθεί και καταλύτης.

Πρέπει να τονιστεί επίσης ότι το αέριο σύνθεσης, που παράγεται μέσω της αεριοποίησης, απαιτεί ένα επιπλέον βήμα καθαρισμού της πίσσας, πριν την περαιτέρω αξιοποίησή του. Παρόλο που το βήμα καθαρισμού δεν μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως, το φορτίο της πίσσας μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας καταλύτες στη διαδικασία αεριοποίησης. Η καταλυτική αεριοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με ανάμιξη των καταλυτών με την τροφοδοσία, "in situ" ή "ex situ", κατά τη φόρτωση του αντιδραστήρα. Οι καταλύτες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της ποιότητας των λαμβανόμενων προϊόντων. (Krishna B.B., 2019)

Η Αεριοποίηση επηρεάζεται τόσο από τους τύπους και τα χαρακτηριστικά της τροφοδοτούμενης βιομάζας, όσο και από διάφορες λειτουργικές παραμέτρους. Αναλυτικότερα:

- Τύπος βιομάζας: Η απόδοση σε αέριο σύνθεσης σχετίζεται με την αναλογία μεταξύ κυτταρίνης και ημικυτταρίνης, ενώ η απόδοση σε υπόλειμμα καθορίζεται από τη λιγνίνη.
- Περιεκτικότητα σε υγρασία: Μειώνοντας την περιεκτικότητα σε υγρασία, αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση, βελτιώνεται η ποιότητα του αερίου σύνθεσης και μειώνονται οι εκπομπές.
- Μέγεθος σωματιδίων: με τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων της πρώτης ύλης η μετατροπή καυσίμου και η αποτελεσματικότητα της αεριοποίησης αυξάνεται, με αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής απόδοσης του αερίου σύνθεσης, της συγκέντρωσης του H_2 και την μείωση της απόδοσης πίσσας και άνθρακα.
- Περιεχόμενη τέφρα: βιομάζα με περιεκτικότητα σε τέφρα μεγαλύτερη από 20% κ.β. είναι πιο δύσκολο να επεξεργαστεί.
- Υλικό υποστρώματος: το πυρίτιο, ο δολομίτης, η ολιβίνη και ο ασβεστόλιθος είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιημένα. Μπορούν να δράσουν ως καταλύτες, βελτιώνοντας την ποιότητα του αερίου, παγιδεύοντας το CO_2 και προωθώντας την αντίδραση της αναμόρφωσης υπέρ της πυρόλυσης πίσσας.

- Ρυθμός θέρμανσης: αύξηση της παραγωγής αερίου και μείωση της παραγωγής πίσσας μπορούν να επιτευχθούν με την αύξηση του.
- Θερμοκρασία: σε υψηλές θερμοκρασίες επιτυγχάνεται υψηλή μετατροπή σε Βιοεξανθράκωμα, υψηλή περιεκτικότητα CO και H₂ και χαμηλή περιεκτικότητα σε πίσσα. Θερμοκρασία υψηλότερη από 1000°C παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα: την τήξη της τέφρας και αυστηρές προδιαγραφές για τον αντιδραστήρα.
- Πίεση: Η αεριοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ατμοσφαιρική πίεση ή σε υψηλότερες πιέσεις.
- Αέριο: Η αεριοποίηση παρουσία αέρα οδηγεί σε αέριο με θερμική απόδοση 4-7 MJ/Nm³. Η αεριοποίηση παρουσία O₂ (πιο ακριβή) οδηγεί σε αέριο με θερμική απόδοση έως 28 MJ/Nm³. Ο ατμός οδηγεί σε αέριο με θερμική απόδοση 10-18 MJ/Nm³.
- Λόγος ισοδυναμίας (ER) αέρα/καυσίμου: βέλτιστη αναλογία κυμαίνεται στο εύρος 0.2-0.3. Για τιμές κάτω του 0.2 η αεριοποίηση δεν είναι πλήρης, ενώ για τιμές πάνω από 0.4 η αεριοποίηση προσεγγίζει την καύση.
- Αναλογία ατμού προς βιομάζα (SB): η βέλτιστη τιμή για την αεριοποίηση της βιομάζας κυμαίνεται στο εύρος 0.3-1.0. (Molino A., 2018)

Μία εναλλακτική τεχνική αεριοποίησης είναι η αεριοποίηση πλάσματος. Το πλάσμα, είναι ένα πολύ υψηλής θερμοκρασίας, πολύ ιονισμένο - ηλεκτρικά φορτισμένο -αέριο ικανό να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα. Η αεριοποίηση πλάσματος αναφέρεται στη χρήση πυρσών πλάσματος ως πηγής θερμότητας, σε αντίθεση με τους συμβατικούς φούρνους. Οι πυρσοί πλάσματος έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι μία από τις πιο έντονες διαθέσιμες πηγές θερμότητας, ενώ είναι σχετικά απλοί στη χρήση. Η επεξεργασία με πλάσμα προσφέρει καλύτερο έλεγχο της θερμοκρασίας της διεργασίας, καλύτερους ρυθμούς αντίδρασης, μικρότερο όγκο αντιδραστήρα και βελτιωμένη σύνθεση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. (Hrabovsky M., 2011) Ωστόσο, σε αυτή την τεχνική η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλότερη. (Cai X., 2020) Η συγκεκριμένη τεχνική βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στην διαχείριση ιατρικών αποβλήτων. Επίσης παρέχει αξιόπιστη καταστροφή εξαιρετικά τοξικών διοξινών, βενζο (a) πυρενίου και φουρανίων. (Messerle V.E., 2018).

Τρόποι αξιοποίησης

Η "από κοινού καύση" είναι η απλούστερη από όλες τις εφαρμογές για το αέριο σύνθεσης, που παράγεται μέσω αεριοποίησης. Ο βαθμός στον οποίο το αέριο σύνθεσης μπορεί να αναμιχθεί με κανονικό καύσιμο εξαρτάται από την ποιότητά του. (Krishna B.B., 2019) Το αέριο σύνθεσης που προέρχεται από βιομάζα χρησιμοποιείται επίσης ως πρώτη ύλη σε διάφορες θερμοχημικές διεργασίες για την παραγωγή βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς, τόσο υγρών, όπως μεθανόλη, αιθανόλη, διμεθυλαιθέρα και Fischer-Tropsch diesel, όσο και αερίων, όπως το υδρογόνο, το βιομεθάνιο και το συνθετικό φυσικό αέριο και για παραγωγή θερμότητας, ρεύματος και χημικών. Αναφέρεται ότι η διαδικασία αεριοποίησης είναι η πιο αποτελεσματική τεχνική στην παραγωγή αερίου υδρογόνου από βιομάζα. Επίσης, η παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων, ως φορέα ενέργειας, μπορεί να είναι πολύ οικονομική επιλογή, καθώς απαιτείται η ίδια υποδομή, σύστημα αποθήκευσης και μεταφοράς που χρησιμοποιείται για τα υγροποιημένα παράγωγα του πετρελαίου. (Molino A., 2018)

Αποτελέσματα μελετών

Τα αποτελέσματα διαφόρων μελετών, που έχουν πραγματοποιηθεί για την παραγωγή αερίου σύνθεσης, από λιγνοκυτταρινούχα στερεά απόβλητα, (τρόφιμα, χαρτί, ξύλο), στερεά αστικά απόβλητα και πλαστικά απόβλητα παρουσιάζονται στην συνέχεια.

Αέριο σύνθεσης που παράγεται από διάφορα λιγνοκυτταρινούχα απόβλητα, κυρίως τρόφιμα, μέσω αεριοποίησης και κάτω από διαφοράς συνθήκες λειτουργίας και αντιδραστήρες έχει αναφερθεί ότι μπορεί να αποδώσει από 1.6 έως 15.5 MJ/Nm³ από τους Molino et al (2018).

Ο Madadian E. (2018) χρησιμοποίησε διάφορους τύπους πρώτων υλών βιομάζας για να μελετήσει την δυνατότητα παραγωγής αερίου σύνθεσης, μέσω της αεριοποίησης με ένα σύστημα αεριοποίησης καθοδικής ροής. Η θερμική απόδοση για σκληρό ξύλο, χαρτόνι, μαλακό ξύλο και ίνες ήταν αντίστοιχα 15.7, 14.45, 14.19 και 13.94 MJ/kg. Στην συνέχεια διερευνήθηκε η αεριοποίηση αποβλήτων ινών χαρτιού και πλαστικού, καθώς και ο συνδυασμός τους σε αναλογία χαρτιού –πλαστικού 9:1. Οι ίνες χαρτιού αποτελούνταν από εφημερίδα, χαρτόνι, χαρτί γραφείου, φυλλάδια και τα πλαστικά από ένα μείγμα μικτών πολυμερών, όπως HDPE, LDPE, PET και ίχνη PVC. Οι υψηλότερη θερμική απόδοση των

πλαστικών απορριμμάτων, των απορριμμάτων χαρτιού και της σύνθετης βιομάζας υπολογίστηκαν αντίστοιχα στα 40.01, 17.09 και 19.38 MJ /kg.

Ο Mazzoni et. al (2017) διερεύνησαν τη συν-αεριοποίηση πλάσματος αστικών στερεών (MSW) και πλαστικών αποβλήτων (PSW) για να αξιολογήσουν την ανάκτηση ενέργειας από αυτά. Από την μελέτη φαίνεται ότι η αεριοποίηση πλάσματος με καθαρό αέρα, για ροή αστικών αποβλήτων, είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερη συνολική απόδοση. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η αναλογία οξυγόνου στο αέριο πλάσμα, παρατηρείται σταθερή βελτίωση για όλα τα μείγματα αποβλήτων. Σε αυτή τη περίπτωση η βέλτιστη απόδοση μίας μονάδας παραγωγής ενέργειας ανέρχεται σε 38%, που λαμβάνεται με καθαρό οξυγόνο ως αέριο πλάσμα και πρώτη ύλη αποτελούμενη από 70% MSW και 30% PSW. Μια διαφορετική τάση παρατηρείται με αύξηση του λόγου του ατμού στο αέριο πλάσμα. Η μέγιστη απόδοση της εγκατάστασης, στην περίπτωση αυτή, είναι 21.7% με αναλογία ατμού στο αέριο πλάσμα 34% και αναλογία αστικών/πλαστικών αποβλήτων 1:1.

Στη μελέτη των Messerle et al. (2018), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμοδυναμικής ανάλυσης σχετικά με την αεριοποίηση των αποβλήτων διαφόρων προελεύσεων, συμπεριλαμβανομένων αστικών και βιοϊατρικών, σε αντιδραστήρα πλάσματος. Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι η μέγιστη απόδοση αερίου σύνθεσης (Syngas) στην αεριοποίηση πλάσματος αποβλήτων, με χρήση αέρα ή ατμού σαν μέσο, επιτεύχθηκε σε θερμοκρασία όχι μεγαλύτερη από 1227⁰C. Αποδεικνύεται ότι, κατά τη διαδικασία αεριοποίησης πλάσματος με αέρα και πλάσματος με ατμό σε οστά, είναι δυνατόν να ληφθεί αέριο σύνθεσης με συγκεντρώσεις 53.4 και 84.9% και με θερμότητα καύσης 3.510 και 5.664 MJ/kg, αντίστοιχα. Στην αεριοποίηση πλάσματος, με αέρα και με ατμό, των οικιακών απορριμμάτων μπορεί να ληφθεί αέριο σύνθεσης υψηλής θερμογόνου δύναμης με συγκεντρώσεις 82.4 και 94.5%, αντίστοιχα. Η θερμότητα καύσης σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται σε 13.620 και 18.497 MJ/kg αντίστοιχα.

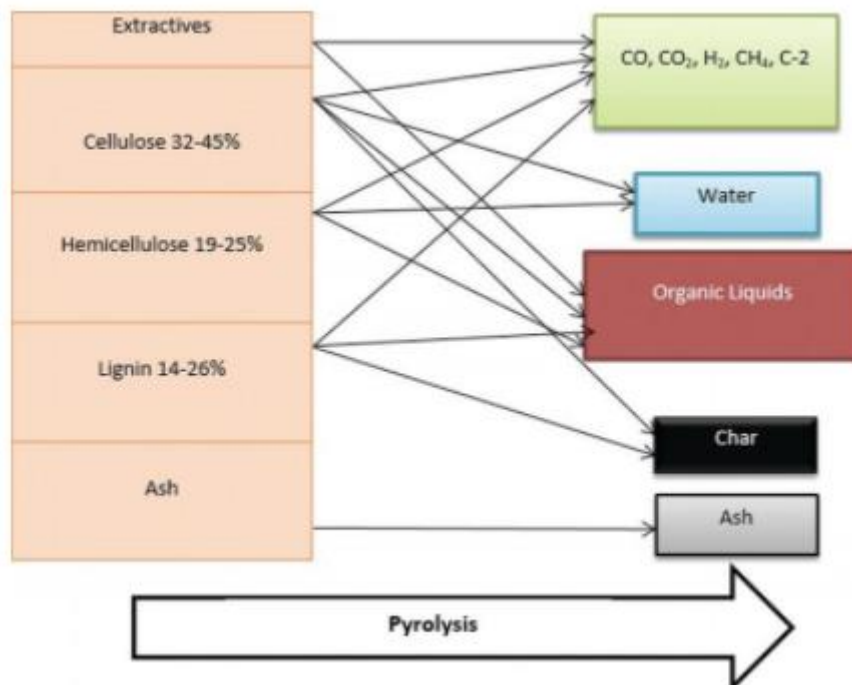
3.3.2 Πυρόλυση

Γενικά

Η πυρόλυση είναι η θερμική αποσύνθεση της βιομάζας η οποία λαμβάνει χώρα απουσία οξυγόνου με θερμοκρασία λειτουργίας από 350 έως 550 °C, που θα μπορούσε να φτάσει έως

τους 700 °C. Η διεργασία πυρόλυσης αποσυνθέτει οργανικά υλικά σε στερεό, υγρό και αέριο μείγμα. Η διαδικασία πυρόλυσης παράγει υγρό καύσιμο γνωστό ως έλαιο πυρόλυσης -py-oil / bio-oil- που μπορεί να είναι μια εναλλακτική λύση για το μαζούτ στην θέρμανση ή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το πλεονέκτημα του υγρού καυσίμου που παράγεται με πυρόλυση, έναντι του αερίου καυσίμου της διαδικασίας αεριοποίησης είναι ότι το παραγόμενο βιο-έλαιο μπορεί να αποθηκευτεί άμεσα και να μεταφερθεί εύκολα. (Dhyani V., 2018)

Η βιομάζα αποτελείται συνήθως από τρία κύρια φυσικά βιομόρια: Κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη. Κατά την πυρόλυση, η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη αποδίδουν συμπυκνώσιμους ατμούς ή υγρά και αέρια. Η λιγνίνη αποσυντίθεται για να δώσει υγρό, αέριο και στερεό καύσιμο. Τα εκχυλίσματα παράγουν επίσης υγρό και αέριο καύσιμο, λόγω πτητικότητας ή αποσύνθεσης. Το κλάσμα τέφρας εντός της μήτρας του στερεού άνθρακα περιέχει ορυκτά. Αυτή η κατανομή των συστατικών της βιομάζας σε προϊόντα κατά ην πυρόλυση φαίνεται σχηματικά παρακάτω. (Zaman C.Z., 2017)



Σχήμα 24. Σχηματική αναπαράσταση της κατανομής των συστατικών της βιομάζας σε προϊόντα. (Zaman C.Z., 2017)

Πρώτες ύλες

Απόβλητα ξύλου και κήπου, τροφίμων, χαρτιού, κλωστοϋφαντουργικά απόβλητα, καουτσούκ και πλαστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πυρόλυση. Θεωρητικά, σχεδόν οποιαδήποτε μορφή βιομάζας μπορεί δυνητικά να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας που αντικαθιστά τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. (Czajczyńska D., 2017)

Οι κοινές χαρακτηριστικές απαιτήσεις πρώτων υλών, τόσο για αργές όσο και για γρήγορες διεργασίες πυρόλυσης, είναι: ξηρό, μη αναμεμιγμένο, ομοιογενές, μη μολυσματικό υπόστρωμα, κατά προτίμηση με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και χαμηλή τέφρα, διαθέσιμο χωρίς ή με χαμηλό κόστος. (Lohri C.R., 2017) Βιοϊατρικά και άλλα επικίνδυνα απόβλητα μπορούν να επεξεργαστούν με πυρόλυση πλάσματος με ασφαλή και αξιόπιστο τρόπο, λόγω της έντονης θερμότητας που παράγεται από το πλάσμα. (Nema S. K., 2002) Η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία οδηγεί σε απώλεια ενέργειας, καθώς κάθε κιλό περιεχόμενου νερού στη βιομάζα απαιτεί 2.26 MJ για να εξατμιστεί. Επιπλέον, η πρώτη ύλη βιομάζας απαιτεί συχνά κάποια μορφή προεπεξεργασίας για την ομοιόμορφη καταστροφή της λιγνοκυτταρινικής δομής και την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της πυρόλυσης. (Lohri C.R., 2017)

Διεργασία - Αντιδραστήρες – Κρίσιμες παράμετροι

Υπάρχουν διάφοροι τύποι πυρόλυσης (όπως φαίνεται στον Πίνακα 9) με διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες επηρεάζουν την σύνθεση των παραγόμενων προϊόντων. Η αργή πυρόλυση είναι μία διαδικασία αποσύνθεσης που παράγει άνθρακα σε χαμηλή θερμοκρασία, ρυθμό θέρμανσης και μεγάλο χρόνο παραμονής ατμών. Η ποιότητα των προϊόντων βιο-ελαίου σε αυτή τη διαδικασία είναι πολύ χαμηλή. Η ταχεία πυρόλυση έχει βραχύ χρόνο παραμονής ατμών και υψηλό ρυθμό θέρμανσης. Το βασικό προϊόν σε αυτή τη περίπτωση είναι το βιο-έλαιο που εμφανίζεται σε ελεγχόμενη θερμοκρασία -περίπου 500 °C- σε ποσοστό 60-75%. Στην πυρόλυση flash ο χρόνος αντίδρασης είναι εξαιρετικά μικρός και ο ρυθμός θέρμανσης είναι υψηλότερος από την γρήγορη πυρόλυση. Μπορεί να αποδώσει στερεά, υγρά και αέρια προϊόντα και η παραγωγή βιο-ελαίου μπορεί να φτάσει έως και 75%. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία έχει κακή θερμική σταθερότητα. Λόγω της καταλυτικής επίδρασης του άνθρακα, το έλαιο γίνεται ιξώδες και μερικές φορές περιέχει και ορισμένα στερεά υπολείμματα. (Lee S.Y.,2019; Zaman C.Z., 2017) Η καταλυτική πυρόλυση

χρησιμοποιείται κυρίως σε πλαστικά απορρίμματα, για την αντιμετώπιση των προβλημάτων της χαμηλής ποιότητας του υγρού λαδιού, των προσμίξεων στο καύσιμο αέριο και της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας. Η εισαγωγή καταλυτών (κυρίως FCC, ζεόλιθοι) έχει υποστηριχτεί ότι αυξάνει τον χρόνο παραμονής και τη θερμοκρασία, ενισχύει την αποσύνθεση των υδρογονανθράκων, βελτιώνει την απόδοση του αερίου και αναβαθμίζει την ποιότητα του υγρού λαδιού. Τέλος, η πυρόλυση πλάσματος έχει μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα στον τύπο πρώτης ύλης και υψηλότερη θερμοκρασία αντίδρασης, οδηγώντας έτσι σε πολύ λεπτομερή οργανική αποσύνθεση. Σε αυτή δεν παράγονται υγρά προϊόντα, λόγω της σχετικά υψηλής θερμοκρασίας. (Cai X., 2020)

Επί του παρόντος, δίνεται μεγαλύτερη προσοχή στην παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων από τη γρήγορη πυρόλυση. Αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματα της υψηλής απόδοσης του έως 75% κ.β. και της τεχνολογίας που είναι οικονομικά αποδοτική, υψηλής απόδοσης σε ενέργεια και φιλική προς το περιβάλλον. (Lee S.Y., 2019) Επιπλέον, η πυρόλυση πλάσματος αποκτά όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον λόγω της γρήγορης θέρμανσης και της αποτελεσματικής λειτουργίας της με σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. (Czajczyńska D., 2017)

Πίνακας 9. Σύγκριση των διαφόρων τύπων πυρόλυσης. (Cai X., 2020)

Τύπος πυρόλυσης	Ρυθμός θέρμανσης (° C / s)	Χρόνος παραμονής	Μέθοδος αναβάθμισης	Τυπική θερμοκρασία (° C)	Προσαρμογή πρώτης ύλης	Προϊόντα
Αργή πυρόλυση	0.1–2	Έως και μερικές ημέρες	-	< 500	Μικρή	Καύσιμο αέριο, Βιοέλαιο, Άνθρακας
Ταχεία πυρόλυση	> 10–200	0.5–10	Αύξηση του ρυθμού θέρμανσης	400 – 600	Μικρή	Καύσιμο αέριο, Βιοέλαιο, Άνθρακας
Πυρόλυση flash	2500	0.1–0.5	Αύξηση του ρυθμού θέρμανσης, μείωση του χρόνου αντίδρασης	400 – 600	Μικρή	Καύσιμο αέριο, Βιοέλαιο, Άνθρακας
Καταλυτική πυρόλυση	-	-	Χρήση καταλύτη	450 – 550	Μικρή	Καύσιμο αέριο, Βιοέλαιο, Άνθρακας

Τύπος πυρόλυσης	Ρυθμός θέρμανσης (° C / s)	Χρόνος παραμονής	Μέθοδος αναβάθμισης	Τυπική θερμοκρασία (° C)	Προσαρμογή πρώτης ύλης	Προϊόντα
Πυρόλυση πλάσματος	-	-	Χρήση πυρσού πλάσμα σαν πηγή θέρμανσης	1800 – 10000	Μεγάλη	Καύσιμο αέριο, Άνθρακας, Υπολείμματα

Η σημασία του κατάλληλου αντιδραστήρα, σε οποιαδήποτε διαδικασία που περιλαμβάνει πυρόλυση, δεν μπορεί να υποτιμηθεί. Οι αντιδραστήρες έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν συγκεκριμένες συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η θερμοκρασία θέρμανσης, ο χρόνος παραμονής ατμών και η απαιτούμενη πίεση, για υψηλή απόδοση βιο-ελαίου. Εφαρμογή στην πυρόλυση βρίσκουν αντιδραστήρες σταθερής κλίνη, ρευστοστερεάς κλίνης (φυσαλίδων ή περιστροφικοί), αφαιρετικοί αντιδραστήρες (Ablative reactors), αντιδραστήρες κενού, περιστρεφόμενοι κωνικοί αντιδραστήρες, αντιδραστήρες πλάσματος και μικροκυμάτων. Αν και σπάνια οι μελέτες διερευνούν άμεσα την επίδραση της χρήσης τεχνολογίας πλάσματος στην καταστροφή παθογόνων, η υψηλή θερμοκρασία και το είδος του πλάσματος συμβάλλουν σε αυτό χωρίς αμφιβολία. (Cai X.,2020)

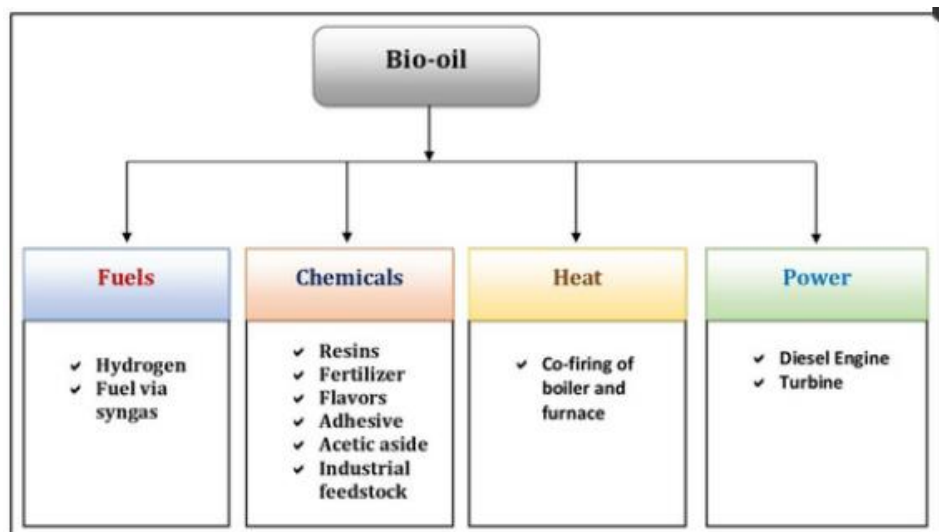
Τρόποι αξιοποίησης

Συνήθως η πυρόλυση των αποβλήτων στοχεύει στην ανάκτηση ενέργειας, επειδή τα παραγόμενα προϊόντα έχουν συχνά καλές ιδιότητες ως καύσιμα. Η πυρόλυση της βιομάζας παράγει τρία κύρια προϊόντα, τον άνθρακα, τα αέρια και τους ατμούς που συμπυκνώνονται σε βιο-έλαιο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ο Άνθρακας (Biochar) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως στερεό καύσιμο σε λέβητες. Μετά από κατάλληλη προεπεξεργασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενεργού άνθρακα, νανοσωλήνων άνθρακα, αέριων κλασμάτων καυσίμων και για τον εμπλουτισμό του εδάφους.

Τα καύσιμα αέρια δύναται να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτική ανανεώσιμη πηγή καυσίμου για διαδικασίες βιομηχανικής καύσης, καθώς και για κινητήρες εσωτερικής καύσης. (Cai X., 2020; Zaman C.Z., 2017; Uddin M.N., 2018)

Το βιο-έλαιο είναι το κύριο προϊόν της πυρόλυσης και χαρακτηρίζεται από σκούρο καφέ χρώμα και υψηλό ιξώδες. Το έλαιο που εκχylίζεται μετά την πυρόλυση είναι ένα μείγμα περίπου 300-400 ενώσεων, που περιλαμβάνουν οξέα, αλκοόλες, αλδεϋδες, φαινόλες και ολιγομερή που προέρχονται από λιγνίνη. (Lee S.Y., 2019; Zaman C.Z., 2017; Uddin M.N., 2018) Ως εκ τούτου, έχουν αναφερθεί αρκετές μέθοδοι επεξεργασίας για ακατέργαστο βιο-έλαιο, όπως η απόσταξη, η γαλακτωματοποίηση, η προσρόφηση και η εκχύλιση με διαλύτη. Από τις διαδικασίες διαχωρισμού, η εκχύλιση με διαλύτη έχει αποδειχθεί ότι είναι μια αποτελεσματική μέθοδος διαχωρισμού χημικών οργανικών οικογενειών από το ακατέργαστο βιο-έλαιο. (Zadeh, Z.E., 2020) Το βιο-έλαιο έχει πολλές εφαρμογές (Σχήμα 25): μπορεί να βελτιωθεί για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο μεταφοράς ή να χρησιμοποιηθεί ως χημικό, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε στροβίλους και κινητήρες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή σε λέβητες για την παραγωγή θερμότητας. Τα τελευταία χρόνια, οι βελτιώσεις των ιδιοτήτων του βιο-ελαίου γίνονται μείζον μέλημα. Απαιτείται η ενίσχυση του, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του αργού πετρελαίου. (Lee S.Y., 2019; Uddin M.N., 2018)



Σχήμα 25. Εφαρμογές βιο-ελαίου (Uddin M.N., 2018)

Αποτελέσματα μελετών

Τα αποτελέσματα διαφόρων μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί για την παραγωγή καύσιμου αερίου, βιο-ελαίου και άνθρακα, από λιγνοκυτταρινούχα στερεά απόβλητα (χαρτί,

υφάσματα), στερεά αστικά απόβλητα, γεωργικά υπολείμματα καθώς και απευθείας από νοσοκομειακά απόβλητα παρουσιάζονται στην συνέχεια.

Οι Li et al. (2006) διερεύνησαν την πυρόλυση απορριμμάτων χαρτιού σε διαφορετικές θερμοκρασίες και ρυθμούς θέρμανσης για να ελέγξουν την διασπορά του προϊόντος, τις αποδόσεις των προϊόντων και την σύνθεση του βιο-ελαίου. Πριν από την πυρόλυση, τα απορρίμματα χαρτιού ξηράθηκαν στους 90°C για 12 ώρες για να μειωθεί η περιεκτικότητα σε υγρασία. Η μέγιστη απόδοση βιο-ελαίου 49.13% επιτεύχθηκε σε θερμοκρασία περίπου 420°C με ρυθμό θέρμανσης 30°C/min. Η απόδοση σε αέριο αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας πυρόλυσης. Η υψηλότερη απόδοση αερίου (18.23%) και η χαμηλότερη απόδοση στερεού άνθρακα (33.43%) ελήφθησαν με ρυθμό θέρμανσης 30°C/min σε θερμοκρασία πυρόλυσης 450°C.

Οι Chowdhury R. et al (2012) ανέπτυξαν την επεξεργασία απορριμμάτων υφασμάτων που αποτελούνται κυρίως από βαμβάκι. Χρησιμοποίησαν έναν αντιδραστήρα σταθερής κλίνης σε εύρος θερμοκρασίας 300°C έως 900°C. Η υψηλότερη απόδοση ελαίου βρέθηκε στους 500°C ίση με 60% κ.β. και η υψηλότερη θερμική απόδοση ήταν 20 MJ/kg. Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρθηκαν από τους Bin Yang et al. (2007) κατά τη διάρκεια των ερευνών τους σχετικά με την πυρόλυση των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων. Αντίθετα με την απόδοση λαδιού πυρόλυσης, η απόδοση σε στερεό (char) μειωνόταν με την αύξηση της θερμοκρασίας, από 75% κ.β. στους 300°C σε 17% κ.β. στους 900°C, με θερμική απόδοση από 20 έως 32 MJ/kg. Η μέγιστη απόδοση αερίου ήταν περίπου 40% κ.β. στους 800°C.

Οι Wu D. et al (2017) διερεύνησαν την πυρόλυση απουσία οξυγόνου με αστικά απόβλητα σαν πρώτη ύλη, σε θερμοκρασίες από 650 έως 850°C, και σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής του αντιδραστήρα, για τον προσδιορισμό των συνθηκών που οδηγούν στην βέλτιστη απόδοση καθαρού αερίου με υψηλή θερμογόνο δύναμη. Τα αστικά απόβλητα ήταν ένα μίγμα απορριμμάτων κουζίνας 38.7%, γυαλιού 17.2%, χαρτιού 13.9%, πλαστικών 12.6%, πέτρας 15.4%, ινών 1.9% και μετάλλων 0.3%. Τα παραγόμενα προϊόντα ήταν στερεά (47-51%), υγρά (2-6%) και αέρια (46-49%), ενώ η ελάχιστη θερμική απόδοση του αερίου κυμάνθηκε από 20.33 έως 22.75 MJ/m³.

Οι Jency et. al (2019) στη μελέτη τους, μετέτρεψαν μέσω της πυρόλυσης πλαστικά απόβλητα σε βιοκαύσιμο (βιοέλαιο). Εισήγαγαν 1.5 Kg πλαστικών αποβλήτων σε αντιδραστήρα όπου με τη βοήθεια 6g καταλύτη σε χρονικό διάστημα 140min παράχθηκαν 500ml βιοελαίου. Με

αυτή τη μέθοδο, οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι τα πλαστικά απόβλητα μετατρέπονται αποτελεσματικά σε βιοκαύσιμα, καθιστώντας τη διαδικασία βιώσιμη οικονομικά και περιβαλλοντικά. Παράλληλα, οι Guddeti et al. ανέφεραν ότι το στερεό υπόλειμμα από την πυρόλυση πολυπροπυλενίου περιείχε σχεδόν 100% άνθρακα. Παρατήρησαν μερικές καινοτόμες δομές άνθρακα, υποδεικνύοντας τη δυνατότητα χρήσης του σε εφαρμογές υψηλής αξίας, όπως παραγωγή καταλυτών, προσροφητικού από άνθρακα ή σε ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Οι Huang H. et. al (2007) αξιολόγησαν τις τεχνολογίες θερμικής πυρόλυσης πλάσματος για την επεξεργασία οργανικών αποβλήτων, που κυμαίνονται από πλαστικά και χρησιμοποιημένα ελαστικά, έως γεωργικά υπολείμματα και ιατρικά απόβλητα. Αναφέρουν ότι οι αποδόσεις αερίου κυμαίνονται μεταξύ 50 και 98% κ.β. με θερμική απόδοση που κυμαίνεται από 4 έως 9 MJ /Nm³. Έτσι, το αέριο σύνθεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ως καύσιμο σε διάφορες ενεργειακές εφαρμογές, όπως η άμεση πυροδότηση σε λέβητες, στροβίλους ή κινητήρες.

Οι Nema K.S. et. al (2002) μελέτησαν την αποτελεσματικότητα της πυρόλυσης πλάσματος φτιάχνοντας μίγμα νοσοκομειακών απόβλητων με αναλογία βαμβακιού/πλαστικού 2:1. Τα τυπικά αέρια προϊόντα που σχηματίστηκαν ήταν πλούσια σε υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα, με μερικούς κατώτερους υδρογονάνθρακες, πιο συγκεκριμένα η συνολική ποσότητα H₂ και CO στο αέριο μείγμα ήταν μεγαλύτερη από 49% κατ 'όγκο. Καθώς η καύση 2.2-2.8 Nm³ μείγματος αερίων (που περιέχει ~50% εύφλεκτα αέρια) παράγει ενέργεια 1 kWh – θερμική απόδοση αερίου 1.286-1.636 MJ/m³-, υπολογίστηκε ότι μία μονάδα που επεξεργάζεται περίπου 600 κιλά απορριμμάτων ανά ημέρα για ένα τυπικό σύστημα 50kW, είναι οικονομικά βιώσιμη. Επιπρόσθετα επιβεβαιώθηκε ότι τα βακτήρια *B. subtilis* και *B. stearo-thermophilus*, που αποτελούν πλέον ανθεκτικά σπόρια, καταστρέφονται πλήρως όταν εκτίθενται στο περιβάλλον του πλάσματος.

3.3.3 Υδροθερμική Υγροποίηση

Γενικά

Η διαδικασία υδροθερμικής υγροποίησης περιλαμβάνει την παραγωγή βιο-ελαίου σε χαμηλή θερμοκρασία και αυξημένη πίεση, με ή χωρίς καταλύτη, παρουσία υδρογόνου. Η

υδροθερμική υγροποίηση (Hydrothermal liquefaction, HTL) ή ένυδρη πυρόλυση είναι ένας καθιερωμένος τύπος υγροποίησης, που χρησιμοποιεί υποκρίσιμο νερό (SCW) σε μέσες θερμοκρασίες από 250 έως 374°C και πίεση λειτουργίας από 40 έως 220 bar για τη μετατροπή της βιομάζας κυρίως σε βιο-έλαιο. Η μεγάλη πίεση στη διεργασία HTL βοηθά στη διατήρηση του νερού σε υγρή κατάσταση, ενώ η ανάμιξη σε αυξημένη πίεση και θερμοκρασία οδηγεί στη μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς και της πυκνότητας, που ως παράγοντες επιτρέπουν στους υδρογονάνθρακες να είναι υδατοδιαλυτοί.

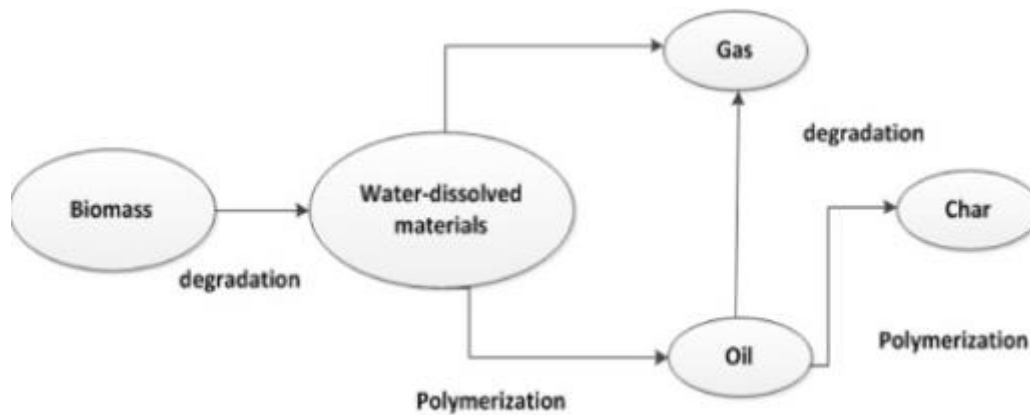
Πρώτες ύλες

Διάφοροι τύποι υπολειμματικής βιομάζας και αποβλήτων έχουν χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την HTL, συμπεριλαμβανομένων των αστικού τύπου αποβλήτων, των γεωργικών και των απόβλητων από την επεξεργασία τροφίμων, όπως σιτάρι, κριθάρι, βρώμη, ρύζι, σόγια και φρούτα, την ξυλώδη βιομάζα και τη βιομάζα φυκιών. Γενικά, η μέθοδος HTL χρησιμοποιεί βιομάζα που περιέχει υψηλή υγρασία ελαχιστοποιώντας το κόστος της φάσης ξήρανσης ή αφυδάτωσης. Έτσι, οι πρώτες ύλες που περιέχουν υψηλό ή με διακυμάνσεις περιεχόμενο υγρασίας είναι κατάλληλες σε αυτή τη διεργασία. Καθώς λοιπόν υπάρχει μια πολύ σημαντική ποσότητα διαθέσιμων υπολειμμάτων βιομάζας, η HTL φαίνεται να είναι μια πολύ ελκυστική τεχνολογία για την αποτελεσματική μετατροπή τους σε υγρά καύσιμα. (Dimitriadis A., 2017)

Διεργασία - Αντιδραστήρες – Κρίσιμες παράμετροι - Τρόποι αξιοποίησης

Η Υδροθερμική επεξεργασία μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη με βάση τα θερμοκρασιακά εύρη στα οποία πραγματοποιείται: υδροθερμική ανθρακοποίηση (HTC), υδροθερμική υγροποίηση (HTL) και υδροθερμική αεριοποίηση (HTG). Αν και η σύνθεση της βιομάζας μπορεί να παρουσιάζει υψηλή ανομοιογένεια, οι αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της υδροθερμικής επεξεργασίας είναι κοινές και συνοψίζονται ακολούθως:

1. Αποπολυμερισμός μακρομορίων βιομάζας, όπως υδατάνθρακες, λιπίδια και πρωτεΐνες
2. Περαιτέρω ανάλυση με διάσπαση, αφυδάτωση, αποκαρβοξυλίωση και αποαμίνωση
3. Ανασυνδυασμός αυτών των συστατικών μέσω συμπύκνωσης, κυκλοποίησης και πολυμερισμού σε νέες ενώσεις.



Σχήμα 26. Οδός αντίδρασης της υδροθερμικής υγροποίησης. (Gollakota A.R.K., 2018)

Η HTC εμφανίζεται μεταξύ θερμοκρασιών 180°C και 250°C με πιέσεις που κυμαίνονται από 12-40 bar, όπου το κύριο προϊόν είναι στερεό (biochar) με υδατική φάση, που περιέχει διαλυτές οργανικές ενώσεις, και αέρια φάση, που περιέχει κυρίως CO₂. Το στερεό προϊόν έχει ιδιότητες παρόμοιες με γαιάνθρακα χαμηλού βαθμού και ανάλογα με την ένταση της θερμοκρασίας, η υδατική φάση μπορεί να περιέχει σάκχαρα ή προϊόντα αποικοδόμησης σακχάρων. Στην HTG ή υπερκρίσιμη αεριοποίηση νερού (SCWG) οι θερμοκρασίες πάνω από το κρίσιμο σημείο του νερού τείνουν να ευνοούν τις αντιδράσεις αεριοποίησης. Το κύριο προϊόν που παράγεται είναι το αέριο σύνθεσης (syngas), με υψηλό περιεχόμενο υδρογόνου και μεθανίου και λίγο διοξείδιο του άνθρακα.

Η διεργασία που διεξάγεται μεταξύ της ενδιάμεσης θερμοκρασιακής περιοχής 250°C και 375°C είναι γνωστή ως HTL, στην οποία το κύριο προϊόν είναι το υγρό καύσιμο που ονομάζεται βιο-έλαιο. Αυτό έχει συνήθως την υψηλότερη θερμογόνο αξία στα παραγόμενα προϊόντα. Ο άνθρακας (biochar) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας, καθώς έχει σημαντικά υψηλότερη θερμογόνο δύναμη σε σχέση με την αρχική πρώτη ύλη. Η υδατική φάση περιέχει ανόργανα υλικά, όπως νιτρικά και φωσφορικά άλατα σε ιονισμένη μορφή και είναι κατάλληλη για χρήση ως λίπασμα. (Singh S. P., 2019)

Ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα στην υδροθερμική επεξεργασία μπορεί να είναι είτε τύπου παρτίδας, είτε συνεχής. Οι αντιδραστήρες παρτίδας χρησιμοποιούνται κυρίως εργαστηριακά, λόγω της απλότητας και της ευελιξίας στο χειρισμό της πρώτης ύλης. Στην περίπτωση συνεχούς συστήματος, η πρώτη ύλη υποβάλλεται απευθείας στην επιθυμητή θερμοκρασία

για τον απαιτούμενο χρόνο και ο χρόνος παραμονής ελέγχεται από το μήκος του αντιδραστήρα και το ρυθμό τροφοδοσίας. Σε αυτά τα συστήματα υπάρχει περιορισμός στην τροφοδοσία πρώτης ύλης, καθώς όταν υπερβαίνει ένα ορισμένο ποσοστό γίνεται δύσκολη η άντληση του πολτού στο σύστημα. Στην περίπτωση της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας η πρώτη ύλη απαιτεί προεπεξεργασία, με στόχο την μείωση του μεγέθους των σωματιδίων και την απομάκρυνση των ρύπων, καθώς και αλκαλική επεξεργασία για να ληφθεί ένας πολτός για εύκολη άντληση. (Gollakota A.R.K., 2018; Singh S. P., 2019)

Αποτελέσματα μελετών

Λόγω του ότι η HTL είναι κατάλληλη για πρώτες ύλες που περιέχουν υψηλό ποσοστό υγρασίας, η πλειοψηφία των μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί για την παραγωγή στερεών, υγρών και αέριων κλασμάτων, αφορά απόβλητα τροφίμων.

Οι Haarlemmer et. al (2017) εξέτασαν την παραγωγή βιοκαυσίμων από απορρίμματα της βιομηχανίας τροφίμων – υπολείμματα διαφόρων ειδών σταφυλιού. Αρχικά συντέθηκε ακατέργαστο ρευστό προϊόν μέσω υδροθερμικής υγροποίησης σε ποσοστό 35-52% με θερμογόνο ενέργεια 30-32 MJ/kg, ανάλογα με το αρχικό υλικό. Στην συνέχεια το ακατέργαστο προϊόν, μέσω εκχύλισης με διαλύτη, διαχωρίστηκε σε στερεό άνθρακα (biochar) και σε βιο-έλαιο σε ποσοστά 22-27% και 13-25% αντίστοιχα.

Οι Zastrow et. al (2013) μελέτησαν τη βιωσιμότητα της μετατροπής απορριμμάτων τροφίμων υψηλής υγρασίας σε υγρό καύσιμο μέσω της HTL. Η απόδοση και η ποιότητα του παραγόμενου βιο-ελαίου μετρήθηκαν σε διάφορες συνθήκες της διεργασίας. Παρατηρήθηκαν αποδόσεις έως και 45% σε θερμοκρασία αντιδραστήρα 315°C, ενώ η μέγιστη θερμική απόδοση ανήλθε σε 35.1 MJ/kg.

Οι Marx et. al (2019) εξέτασαν την παραγωγή υγρών, στερεών και αέριων καυσίμων, μέσω υδροθερμικής υγροποίησης σε διάφορες θερμοκρασίες, από δείγματα που προσομοίαζαν απόβλητα τροφίμων, χαρτιού και κήπου. Τα απόβλητα τροφίμων οδήγησαν στην υψηλότερη παραγωγή βιο-ελαίου (Bio crude oil) με απόδοση από 75 έως 80%. Τα κηπευτικά απόβλητα απέδωσαν την υψηλότερη απόδοση σε στερεό άνθρακα (Biochar) 35-45% και βιοαέριο 15-30%. Τα απόβλητα χαρτιού παρουσίασαν διαφοροποιημένες αποδόσεις ανάλογα με την θερμοκρασία κάτω από την οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Στους 280°C το κύριο

προϊόν ήταν το βιο-έλαιο (Bio crude oil) με απόδοση έως 75%. Στις θερμοκρασίες των 300 και 320°C υπερίσχυσαν η παραγωγή στερεού (35-40%), λόγω της συμπύκνωσης και του επαναπολυμερισμού των ενδιάμεσων οργανικών ευδιάλυτων προϊόντων, και αερίου προϊόντος (20-35%), λόγω της αποδόμησης του βιο-ελαίου.

Επιπλέον, απόβλητα χαρτοπολτού / χαρτιού έχουν μελετηθεί ως πρώτη ύλη για την HTL, προσφέροντας 20-45% κ.β. υδατοδιαλυτά έλαια και 15–25% κ.β. βαρέα λιπαντικά, με θερμικές αποδόσεις 10–15 και 435 MJ/kg αντίστοιχα.

Πλαστικά απόβλητα έχουν επίσης δοκιμαστεί επιτυχώς ως πρώτη ύλη για παραγωγή βιοκαυσίμων μέσω HTL με απόδοση 2 έως 95% κ.β. ανάλογα με τον τύπο του πλαστικού (πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο, πολυβινυλοχλωρίδιο και τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο), ενώ η σύνθεση του αερίου προϊόντος περιλαμβάνει μεθάνιο, αιθάνιο, προπένιο, προπάνιο, βουτένιο και βουτάνιο. (Dimitriadis A, 2017)

3.4 Σύγκριση Μεθόδων Παραγωγής Βιοκαυσίμων

Οι βιοχημικές και οι θερμοχημικές διεργασίες φαίνεται να είναι πολλά υποσχόμενες για την παραγωγή βιοενέργειας και βιοκαυσίμων. Πολλές μελέτες αποδεικνύουν την δυνατότητα μετατροπής της βιομάζας σε βιο-καύσιμα με υψηλές αποδόσεις μετατροπής. Κατά κανόνα η βιοχημική μετατροπή απαιτεί πολύ μεγαλύτερους χρόνους παραμονής σε σχέση με τη θερμοχημική, ωστόσο είναι πιο φιλική για το περιβάλλον. (Beyene H.D., 2018)

Υπό το πρίσμα της μείωσης των παθογόνων, που μπορεί να περιέχονται στη βιομάζα νοσοκομειακών απόβλητων, οι θερμοχημικές μέθοδοι είναι κατάλληλες για τον περιορισμό τους. Συγκεκριμένα, στην πυρόλυση αναφέρεται θανάτωση των παθογόνων κατά 6 λογαριθμικές μονάδες. (UNEP, 2012) Ακόμα την περίπτωση της Αεριοποίησης και της Πυρόλυσης αναφέρεται η δυνατότητα απευθείας επεξεργασίας νοσοκομειακών αποβλήτων. (Nema S. K., 2002; Messerle V.E., 2018) Στις βιοχημικές μεθόδους είναι απαραίτητη η προεπεξεργασία για την εξάλειψη των παθογόνων από τη βιομάζα. Η ακτινοβολία με μικροκύματα, η έκρηξη ατμού και η επεξεργασία με οξύ ή με αλκάλιο μπορούν να συνεισφέρουν σε αυτή την κατεύθυνση. (Zhao Z.M., 2015; UNEP, 2012; Devi S., 2016; Kucharska K., 2018) Στα πλαίσια της παραγωγής βιοαιθανόλης μέσω ζύμωσης, έχουν

πραγματοποιηθεί μελέτες που εφαρμόζουν όξινη υδρόλυση στις πρώτες ύλες σαν προεπεξεργασία. (Thara B., 2017; Annamalai N., 2018)

Επιπρόσθετα, εάν σαν μέθοδος προεπεξεργασίας της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας επιλεγθεί κάποια που διαχωρίζει την λιγνίνη από την κυτταρίνη και την ημι-κυτταρίνη, όπως η έκρηξη ατμού, η προεπεξεργασία με ζεστό νερό ή η επεξεργασία με αλκάλιο, είναι δυνατό η λιγνίνη να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη των θερμοχημικών μεθόδων, όπου θα αυξήσει την απόδοση του στερεού βιο-καυσίμου, ενώ η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτη ύλη για κάποια βιοχημική μέθοδο. (Nanda S., 2014)

Η περιεκτικότητα της πρώτης ύλης σε υγρασία μπορεί να καθιστά κάποιες μεθόδους καταλληλότερες σε σχέση με άλλες. Η αναερόβια χώνευση εμφανίζεται συνήθως σε υδατικό περιβάλλον, συνεπώς πρώτη ύλη με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία -ακόμη και περισσότερο από 60%- μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία χωρίς να απαιτείται ξήρανση. Η υδροθερμική υγροποίηση είναι επίσης κατάλληλη για την επεξεργασία πρώτων υλών με υψηλό περιεχόμενο υγρασίας. (Appels L., 2011; Dimitriadis A., 2017) Στην πυρόλυση και την αεριοποίηση η υγρασία δεν είναι επιθυμητή, καθώς έχει αρνητικές επίπτωσης στην απόδοση των βιο-καυσίμων. Ειδικά στην πυρόλυση αναφέρεται ότι η υγρασία μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του νερού στο τελικό καύσιμο, κάνοντάς το ακατάλληλο για απευθείας χρήση σε κινητήρες. (Zadeh, Z.E., 2020)

Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών των μεθόδων παραγωγής βιοκαυσίμων που έχουν παρουσιαστεί.

Πίνακας 10. Συγκριτική σύνοψη των διαφορετικών τεχνολογιών. (Garcia B.B., 2019; Nizami A.S., 2017, Cai X., 2020)

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Βιοχημικές διεργασίες		
Αναερόβια χώνευση	Μείωση στερεών αποβλήτων, Δυνατότητα χρήσης πρώτης ύλης με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, Βιοαέριο πλούσιο σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, Πιο οικονομική τεχνολογία	Προσμίξεις / Ανάγκη επεξεργασίας και καθαρισμού του βιοαερίου, Ασταθές σύστημα, Απαίτηση μεγάλων μη ελκυστικών εγκαταστάσεων, Μεγάλη χρονική διάρκεια μετατροπής

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Βιοχημικές διεργασίες		
Ζύμωση	Δεν συμβάλλει στην αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου	Περιορίζεται σε ζάχαρα, άμυλο ή πρώτες ύλες πλούσιες σε κυτταρίνη Απαιτείται καθαρισμός της αιθανόλης
Θερμοχημικές διεργασίες		
Αεριοποίηση	Μεγάλο εύρος εφαρμογών και πρώτων υλών, Υψηλή απόδοση μετατροπής	Ρύποι, όπως NO _x , SO ₂ , πίσσα, τέφρα, Υψηλό κόστος κεφαλαίου, Διαδικασίες με μεγάλη ευαισθησία, χαμηλή ευελιξία, Κίνδυνος μηχανικής βλάβης
Πυρόλυση	Υψηλή απόδοση, Μειωμένη απαίτηση επεξεργασίας syngas, Αέριο και υγρό προϊόν που διαχωρίζονται εύκολα, Μείωση όγκου αποβλήτων (50-90%)	Υψηλού ιξώδους βιο-έλαιο, Απαιτείται καθαρισμός του βιο-ελαίου, Ρύποι, όπως NO _x , SO ₂ , πίσσα, τέφρα, Υψηλό κόστος κεφαλαίου, συντήρησης και λειτουργίας, Διάβρωση εξοπλισμό με την πάροδο του χρόνου
Υδροθερμική υγροποίηση	Βιο-έλαιο με ψηλότερη χαμηλή θερμογόνο δύναμη (LHV), χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία	Χαμηλή απόδοση μετατροπής (20-60%), Εξοπλισμός υψηλότερης πίεσης, Υψηλότερο κόστος κεφαλαίου

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το 75% με 90% των αποβλήτων που παράγονται από τα νοσοκομεία είναι μη επικίνδυνα γενικά απόβλητα, συγκρίσιμα με τα οικιακά απόβλητα.

Με βάση την τυπική σύσταση των νοσοκομειακών αποβλήτων προκύπτει ότι ένα πολύ υψηλό ποσοστό -της τάξης του 60%- αποτελείται από λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα- και άρα μπορεί να αξιοποιηθεί στην παραγωγή βιοκαυσίμων.

Το κλειδί για την ελαχιστοποίηση, την αποτελεσματική και οικονομική διαχείριση των νοσοκομειακών αποβλήτων είναι ο κατάλληλος διαχωρισμός τους,

Κατά την επιλογή μίας μεθόδου διαχείρισης/προεπεξεργασίας μολυσματικών αποβλήτων πρέπει να εξετάζεται η καταλληλότητα της μεθόδου για το υπό επεξεργασία απόβλητο και η συνεισφορά της σε βασικές περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η μείωση των παθογόνων και η μείωση του όγκου τους.

Η απόδοση μετατροπής της βιομάζας σε βιοκαύσιμο, μέσω Θερμοχημικών και Βιοχημικών διεργασιών, ενισχύεται με την κατάλληλη προεπεξεργασία – Μηχανική, Φυσικοχημική, Χημική, Βιολογική ή με κάποιο συνδυασμό των μεθόδων αυτών.

Ο τύπος της βιομάζας που θα αποτελέσει το υπόστρωμα για βιοχημική ή θερμοχημική μετατροπή πρέπει να αξιολογείται πριν την επιλογή μεθόδου. Στις βιοχημικές μεθόδους η υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη και ημικυτταρίνη είναι επιθυμητή, καθώς η λιγνίνη φαίνεται ότι λειτουργεί ανασταλτικά στην απόδοσή τους. Στις θερμοχημικές μεθόδους ο τύπος της βιομάζας που χρησιμοποιείται επηρεάζει την αναλογία των τελικώς παραγόμενων καυσίμων. Συγκεκριμένα, η αύξηση της λιγνίνης φαίνεται ότι αυξάνει την παραγωγή στερεού άνθρακα. Επίσης, η περιεκτικότητα της πρώτης ύλης σε υγρασία μπορεί να καθιστά κάποιες μεθόδους καταλληλότερες σε σχέση με άλλες.

Εάν η λιγνίνη διαχωριστεί από την κυτταρίνη και την ημι-κυτταρίνη με κάποια μέθοδο προεπεξεργασίας, είναι δυνατό η λιγνίνη να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη των θερμοχημικών μεθόδων, όπου θα αυξήσει την απόδοση του στερεού βιο-καυσίμου, ενώ η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη να χρησιμοποιηθούν σαν πρώτη ύλη για κάποια βιοχημική μέθοδο.

Στην περίπτωση των νοσοκομειακών μολυσματικών αποβλήτων, κατά την εφαρμογή Βιοχημικών διεργασιών για την παραγωγή βιοκαυσίμου, θα πρέπει να επιλέγεται μία μέθοδος προεπεξεργασίας που να μπορεί παράλληλα να εξαλείψει το μολυσματικό παράγοντα. Κατά τις Θερμοχημικές διεργασίες, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται, επιτυγχάνεται η επιθυμητή αποστείρωση των αποβλήτων, χωρίς απαίτηση προεπεξεργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Annamalai N., Battashi H.A., Anu S.N., Azkawi A.A., Bahr S. A., Sivakumar N. (2018). Enhanced Bioethanol Production from Waste Paper Through Separate Hydrolysis and Fermentation. *Waste and Biomass valor.*,11,121–131. doi.org/10.1007/s12649-018-0400-0

Appels L., Lauwers J., Degreve J., Helsen L., Lievens B., Willems K., Van Impe J., Dewil R. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges. *Renew Sustain Energy Rev*, 15(9), 4295–4301. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.121>

Balat M., Balat H. (2009). Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Appl Energy*, 86(11), 2273–2282. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.015>

Bouallagui H., Touhami Y., Ben Cheikh R, Hamdi M. (2005). Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes *Process Biochem.*, 40, (3–4), 989-995. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.03.007>

Askarian M., Vakili M., Kabir G. (2004). Results of a hospital waste survey in private hospitals in Fars province, Iran. *Waste Management*, 24(4), 347-352. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2003.09.008>

Bdour A., Altrabsheh B., Hadadin N., Al-Shareif M. (2007). Assessment of medical wastes management practice: a case study of the Northern Part of Jordan. *Waste management*, 27(6):746-59., doi: 10.1016/j.wasman.2006.03.004

Beyene H. D., Werkneh A. A., Ambaye T. G. (2018). Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. *Renewable Energy Focus*, 24, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2017.11.001>

Bin Yang Y., Phan A.N., Ryu C., Sharifi V., Swithenbank J. (2007). Mathematical modelling of slow pyrolysis of segregated solid wastes in a packed-bed pyrolyser. *Fuel*, 86(1-2), 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.012>

Bouallagui H., Lahdheb H., Ben Romdan E., Rachdi B., Hamdi M. (2009). Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with

co-substrates addition. J Environ Manag, 90(5), 1844–1849.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.002>

Bouallagui H. , Touhami Y. , Ben Cheikh R., Hamdi M. (2005). Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. Process Biochem, 40(3–4), 989–995. DOI: 10.1016/j.procbio.2004.03.007

Brinton W.F., Evans E. (2001). How compost maturity affects container grown plants. Biocycle, 42(1), 56–60. <https://woodsend.com/wp-content/uploads/2016/06/Brinton-Evans-2001-Container-Media-Compost-Maturity.pdf>

Bušić A., Marđetko N., Kundas S., Morzak G., Belskaya H., Šantek M. I., Komes D., Novak S., Šantek B. (2018). Bioethanol Production from Renewable Raw Materials and Its Separation and Purification: A Review. Food Technol Biotechnol., 56(3), 289–311. doi: 10.17113/ftb.56.03.18.5546

Cai X., Du C. (2020). Thermal Plasma Treatment of Medical Waste. Plasma Chem Plasma Process Nature Public Health Emergency Collection, 1–46. doi: 10.1007/s11090-020-10119-6

Cecchi F., Traverso P., Pavan P., Bolzonella D., Innocenti L. (2003). Characteristics of the OFMSW and behaviour of the anaerobic digestion process. In: Mata-Alvarez J (ed) Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA Publishing, Cornwall, 141–178. https://www.researchgate.net/publication/284398704_Characteristics_of_the_OFMSW_and_behaviour_of_the_anaerobic_digestion_process

Cekmecelioglu D., Demirci A., Graves R. E. (2005). Feedstock optimization of in-vessel food waste composting systems for inactivation of pathogenic microorganisms. Journal of Food Protection, 68 (3), 589–596. DOI: 10.4315/0362-028X-68.3.589

Celignis Analytical. (n.d.). Analysis To Maximise The Efficiency Of Anaerobic Digestion, celignis.com, Retrieved February 11, 2021, from <https://www.celignis.com/anaerobic-digestion.php>

Cheng Z., Mo W. Y., Man Y. B., Nie X. P., Li K. B., Wong M. H. (2014). Replacing fish meal by food waste in feed pellets to culture lower trophic level fish containing acceptable levels of organochlorine pesticides: health risk assessments. Environ Int, 73, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.07.001>

Chowdhury R., Sarkar A. (2012). Reaction kinetics and product distribution of slow pyrolysis of Indian textile wastes, *Int. J. Chem. React. Eng.*, 10, DOI: 10.1515/1542-6580.2662.

CTCN, Gasification of waste, <https://www.ctc-n.org/technologies/gasification-waste>

Cooperband L. (2002). The art and science of composting – a resource for farmers and compost producers. Center for Integrated Agricultural Systems, University of Wisconsin, Madison. <https://cias.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/194/2008/07/artofcompost1.pdf>

Couth R., Trois C. (2012). Cost effective waste management through composting in Africa. *Waste Manag*, 32(12), 2518–2525. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.042>

Czajczyńska D., Anguilano L., Ghazal H., Krzyżyńska R., Reynolds A.J., Spencer N., Jouhara H. (2017). Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. *Thermal Science and Engineering Progress*, 3, 171-197. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.06.003>

Datta P., Tiwari S., Pandey L.M. (2018). Bioethanol Production from Waste Breads Using *Saccharomyces cerevisiae*. S.K. Ghosh (ed.). *Utilization and Management of Bioresources*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. DOI 10.1007/978-981-10-5349-8_12

Devi S., Dhaka A., Singh J. (2016). Acid and alkaline hydrolysis technologies for bioethanol production: an overview. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 4(6), 94-106. https://www.ijates.com/images/short_pdf/1465292054_196ijates.pdf

Dhyani V., Bhaskar T. (2018). A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renew Energy*, 129, 695–716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>.

Diaz L.F., Eggerth LL., Enkhtsetseg Sh., Savage G.M. (2008). Characteristics of healthcare wastes. *Waste Management*, 28(7), 1219-26. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.04.010

Dimitriadis A., Bezergianni S. (2017). Hydrothermal liquefaction of various biomass and waste feedstocks for biocrude production: a state of the art review. *Renew Sust Energ Rev.* 68 (1), 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.120>

Efaq A. N., Ab. Rahman N. N. N., Nagao H., Al-Gheethi A. A., Shahadat Md, Ab. Kadir M. O. (2015)., *Supercritical Carbon Dioxide as Non-Thermal Alternative Technology*

for Safe Handling of Clinical Wastes. *Environmental Processes*, 2, 797–822.
<https://doi.org/10.1007/s40710-015-0116-0>

Elving J. (2009). Pathogen Inactivation and Regrowth in Organic Waste during Biological Treatment. (Licentiate Thesis, Department of Biomedical Sciences and Veterinary Public Health, University of Agricultural Sciences, Sweden).
<https://core.ac.uk/download/pdf/11695445.pdf>

Emmanuel, J., Puccia, C. J. & Spurgin, R. A. (2001). Non-Incineration Medical Waste Treatment Technologies. Washington: Heath Care Without Harm. https://noharm-uscanada.org/sites/default/files/documents-files/2062/Non-Incineration_Technologies.pdf

EPTA, (2006) Guide for sustainable waste management in the health-care sector, Life – Environment ‘EMAS and information technology in hospitals’ LIFE04 ENV/GR/000114. <https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/files/book/LIFE04ENVGR114-WM.pdf>

Esposito G., Frunzo L., Giordano A., Liotta F., Panico A., Pirozzi F. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 11(4), 325–341. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.07.006>

Farrell M., Jones D.L. (2009). Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets. *Bioresour Technol*, 100(19), 4301–4310. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.029>

Garcia B. B., Lourinho G., Brito P., Romano P. (2019). Review of Biofuel Technologies in WtL and WtE. <https://www.intechopen.com/>, DOI: 10.5772/intechopen.84833

Gollakota A.R.K., Kishore N., (2018) A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 1378-1392, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.178>

Guddeti R.R., Knight R., Grossmann E.D., (2000). Depolymerization of polypropylene in an induction-coupled plasma (ICP) reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39, 1171-1176. <https://doi.org/10.1021/ie9906868>

Gunaseelan V.N. (2004). Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass Bioenergy*, 26(4), 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.006>

Gupta A., Verma J.P. (2015). Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: a review. *Renew Sustain Energy Rev*, 41, 550–567. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.032>

Halazonitis P. P. (2015). Health care-waste in Greece. Management issues Halazonitis.pdf (ntua.gr).

Halazonitis P. P. (2016). Hospital waste in Greece : Management and inspection issues, 4th International Conference on Solid Waste Management, Limassol, Cyprus. http://uest.ntua.gr/cyprus2016/proceedings/presentation/Hospital_waste_in_Greece_Cyprus.pdf

Haarlemmer G., Roubaud A., Déniel M. (2017). Hydrothermal Liquefaction of Wet Waste Streams. *Univ. Grenoble Alpes*. http://uest.ntua.gr/athens2017/proceedings/pdfs/Athens2017_Haarlemmer_Roubaud_Roussely_Deniel.pdf

HCWH (2005). Waste reduction in health-care services, Health Care Without Harm629x297_skladackaAJ_new6.qxd (saudesemdano.org)

Hossain, K., Maruthi, A., Lakshmana Das N., Rawat K., Sarma K. S. (2018). Irradiation of wastewater with electron beam is a key to sustainable smart/green cities: a review. *Applied Water Science*, 8 (6). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0645-6>

Hrabovsky M. (2011). Thermal Plasma Gasification of Biomass. <https://www.intechopen.com/>. DOI: 10.5772/18234

Huang H., Tang L. (2007). Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology. *Energy Convers Manag*, 48, 1331-1337. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.08.013

IAEA (2001). Use of irradiation for chemical and microbial decontamination of water, wastewater and sludge, IAEA-TECDOC-1225. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1225_prn.pdf

ICRC (2011). Medical waste management Medical waste management (icrc.org)

Insam H., de Bertoldi M. (2007). Chapter 3 Microbiology of the composting process. In: Diaz LF, De Bertoldi M, Stentiford E (eds) Waste management series. Elsevier, Amsterdam, 25–48

Ioelovich M. (2014). Waste Paper as Promising Feedstock for Production of Biofuel. Journal of Scientific Research & Reports, 3(7), 905-916. https://www.researchgate.net/publication/279181143_Waste_Paper_-_Promising_Feedstock_for_Bioethanol_Production

Jansson A. T., Patinvoh R. J., Horváth I. S., Taherzadeh M. J. (2019). Dry Anaerobic Digestion of Food and Paper Industry Wastes at Different Solid Contents. Fermentation, 5(2), 40. <https://doi.org/10.3390/fermentation5020040>

Jayanthi, S., Padmasri, M. and Arunkumar, S. (2002). Bio-medical waste management practices in a hospital and strategies for safe disposal as per bio-medical waste (Management and handling) Rules 1998, Proceedings of ENVIRONICS 2002, National Conference on Pollution Control and Industrial Ecology, Thiagaraja Engineering College, Madurai

Jeihanipour, A., Aslanzadeh, S., Rajendran, K., Balasubramanian, G., Taherzadeh, M.J. (2013). High-rate biogas production from waste textiles using a two-stage process. Renew. Energy, 52, 128-135. DOI: 10.1016/j.renene.2012.10.042

Jeihanipour, A., Karimi K., Niklasson C., Taherzadeh M.J. (2010). A novel process for ethanol or biogas production from cellulose in blended-fibers waste textiles, Waste Management, 30 (12), 2504-2509. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.06.026

Jeihanipour, A., Taherzadeh, M.J. (2008). Ethanol production from cotton-based waste textiles. Bioresource Technology, 100(2):1007-1010. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.07.020

Jency Joseph J., Josh .F.T. (2019). Production of bio-fuel from plastic waste. J. Phys.: Conf. Ser. 1362 012103. doi:10.1088/1742-6596/1362/1/012103

Kabbashi F. M., Abdalla M. Abdalla, Hussam K. Hamad, Hassan E. S. (2018). Methane Production from Biomedical Waste (Blood). International Journal of Energy and Environmental Engineering, 12(11), 657-664. doi.org/10.5281/zenodo.2021597

Kang Q., Appels L., Tan T., Dewi R., (2014) Bioethanol from Lignocellulosic Biomass: Current Findings Determine Research Priorities, *The Scientific World Journal*, 2014, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2014/298153>

Khandaker M. M., Umar A.A., Mahmoud D. A., Noor A. B., Khamsah S.M. (2020). Bio-Ethanol Production from Fruit and Vegetable Waste by Using *Saccharomyces cerevisiae*, *IntechOpen*. DOI: 10.5772/intechopen.94358

Kimbell L.K., Kappell A.D., McNamara P.J. (2018). Effect of pyrolysis on the removal of antibiotic resistance genes and class I integrons from municipal wastewater biosolids. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 2018,4, 1807-1818. <https://doi.org/10.1039/C8EW00141C>

Krishna B. B., Biswas B., Bhaskar T. (2019). Gasification of Lignocellulosic Biomass. *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*, Elsevier Inc. DOI: 10.1016/B978-0-12-816856-1.00012-9

Lardinois I., van De Klundert A. (1993). Organic waste—options for small-scale resource recovery. *TOOL*, Amsterdam and *WASTE Consultants*, Gouda Microsoft Word - Organic Waste.rtf (ircwash.org)

Lee S.Y., Sankaran, R., Chew, K.W. (2019). Waste to bioenergy: a review on the recent conversion technologies. *BMC Ener*, 1, 4 <https://doi.org/10.1186/s42500-019-0004-7>

Li L., Zhang H., Zhuang X. (2006). Pyrolysis of waste paper: characterization and composition of pyrolysis oil. *Energy Sources, Part A Recover Util. Environ. Eff.*, 27, 867-873. <https://doi.org/10.1080/00908310490450872>

Li W., Khalid H., Raza Amin F., Zhang H., Dai Z., Chen C., Liu G. (2020). Biomethane production characteristics, kinetic analysis, and energy potential of different paper wastes in anaerobic digestion. *Renewable Energy*, 157, 1081-1088. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.035>

Liu Q., (2017), Pretreatment and Posttreatment Approaches for Reducing Biomass Inorganic Impurities during Gasification. (Master thesis, University of Tennessee, Knoxville, state of Tennessee, U.S.). https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/5020/

Lohri C.R., Diener, S., Zabaleta, I. (2017). Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products: a review with focus on low- and middle-income settings. *Rev Environ Sci Biotechnol* 16, 81–130. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9422-5>

Madadian E. (2018). Experimental Observation on Downdraft Gasification for Different Biomass Feedstocks. <https://www.intechopen.com/>. DOI: 10.5772/intechopen.77119

Manyele S. V. (2004). Effects of improper hospital-waste management on occupational health and safety. *Afr News lett on Occup Health and Safety*, 14, 30–33. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.6161&rep=rep1&type=pdf>

Marinković N., Vitale K., Janev Holcer N., Dzakul, A., Pavić T. (2008). Management of hazardous medical waste in Croatia. *Waste management (New York, N.Y.)*, 28(6), 1049–1056. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.021>

Marx S., Vender R.J., Stols C., Bartlett D. (2019). Predictive model for fuels from hydrothermal liquefaction of municipal solid waste. 27th EU biomass conference and exhibition, Lisbon, Portugal. <https://doi.org/10.5071/27thEUBCE2019-1AV.2.7>

Mathur U.B., Verma L.K., Srivastava J.N. (2006). Effects of vermicomposting on microbiological flora of infected biomedical waste. *J of In Soc of Hos Was Man*, 5(1):21–27. https://noharm.org/sites/default/files/lib/downloads/waste/Effects_of_Vermicomposting.pdf

Mazzoni L., Janajreh I. (2017). Plasma gasification of municipal solid waste with variable content of plastic solid waste for enhanced energy recovery. 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech, 907–912. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7984049>

Messerle V.E., Mosse A.L., Ustimenko A.B. (2018). Processing of biomedical waste in plasma gasifier. *Waste Manag.*, 79, 791–9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.048>

Molino A., Chianese S., Musmarra D. (2016). Biomass gasification technology: the state of the art overview. *J Energy Chem*, 25(1), 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>

Mussatto S.I., Dragone G., Guimaraes P.M.R., Silva J.P.A., Carneiro L.M., Roberto I.C., Vicente A., Domingues L., Teixeira J.A. (2010), Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. *Biotechnol Adv* 28(6), 817–830. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.07.001>

Naik S.N., Goud V.V., Rout P.K., Dalai A.K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 578–597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>

Nanda S., Mohammad J., Reddy S.N. (2014). Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels. *Biomass Conv. Bioref.*, 4, 157–191. <https://doi.org/10.1007/s13399-013-0097-z>

Nema, S., & Ganeshprasad, K. (2002). Plasma pyrolysis of medical waste. *Current Science*, 83(3), 271-278. <http://www.jstor.org/stable/24106885>

Nigam P.S., Singh A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Prog Energy Combust Sci*, 37(1), 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.01.003>

Nizami A.S., Rehan M., Waqas M., Naqvi M., Ouda O.K.M., Shahzad K., Miandad R., Khan M.Z, Syamsiro M., Ismail I.M.I., Pant D. (2017). Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries. *Bioresource Technology*, 241, 1101-1117. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.097>

Padmanabhan K. K., Barik D. (2019). Health Hazards of Medical Waste and its Disposal. *Energy from Toxic Organic Waste for Heat and Power Generation*, 99–118. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102528-4.00008-0>

Patil A. D., Shekdar A. V. (2001). Health-care waste management in India. *Journal of Environmental Management*, 63(2), 211-220. <https://doi.org/10.1006/jema.2001.0453>

Plácido J., Capareda S. (2016). Conversion of residues and by-products from the biodiesel industry into value-added products. *Bioresour. Bioprocess.* 3(23) <https://doi.org/10.1186/s40643-016-0100-1>

Pham T.P.T., Kaushik R., Parshetti G.K., Mahmood R., Balasubramanian R. (2015). Food waste-to-energy conversion technologies: current status and future directions. *Waste*

Manag, 38, 399–408. https://www.researchgate.net/publication/270397314_Food_waste-to-energy_conversion_technologies_Current_status_and_future_directions

Philbrook A., Alissandratos A., Easton C. J. (2013). Biochemical Processes for Generating Fuels and Commodity Chemicals from Lignocellulosic Biomass. <https://www.intechopen.com>. DOI: 10.5772/intechopen.86437

Raj C.S., Arul S., Sendilvelan S., Saravanan C.G. (2009). Bio gas from textile cotton waste - an alternate fuel for diesel engines. *Open Waste Manag. J.*, 2, 1-5. DOI: 10.2174/1876400200902010001

Rajendran K., Balasubramanian G. (2011), High rate biogas production from waste textiles (Master thesis, School of engineering, University of Boras, Sweden). https://www.researchgate.net/publication/232285480_High_rate_biogas_production_from_waste_textiles

Ramos A., Monteiro E., Silva V., Rouboa A. (2018). Co-gasification and recent developments on waste-to-energy conversion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), 380-398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.025>

Reis C.E.R., Hu B. (2017). Vinasse from Sugarcane Ethanol Production: Better Treatment or Better Utilization?. *Front. Energy Res.*, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2017.00007>

Rothenberger S., Zurbru C., Enayetullah I., Sinha A.H.M.M. (2006). Decentralized composting for cities of low- and middle-income countries—a user’s manual. Waste Concern, Dhaka, Bangladesh & Eawag, Duebendorf, Switzerland. https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/Decentralized_Composting/Rothenberger_2006_en.pdf

Ruiz J.A., Juarez M.C., Morales M.P., Muñoz P., Mendivil M.A. (2013). Biomass gasification for electricity generation: review of current technology barriers. *Renew Sustain Energy Rev*, 18, 174–183. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.021>

Sabir, S., Iqbal, Md., Malik, A., Pradhan, Dr D. (2016). Biomedical Waste Management: A Step Towards A Healthy Future. *Chronicles of Dental Research*, 1-8. https://www.researchgate.net/publication/308548779_Biomedical_Waste_Management_A_Step_Towards_A_Healthy_Future

Salakkam A., Plangklang P. , Sittijunda S., Kongkeitkajorn M.B., Lunprom S., Reungsang a., (2019) Bio-hydrogen and Methane Production from Lignocellulosic Materials, www.intechopen.com/, DOI: 10.5772/intechopen.85138

Sarojini E. (2011). Anaerobic digestion of infectious biomedical waste with effective pretreatment techniques. Faculty of Civil Engineering, Anna University, Tamil Nadu, India. <http://hdl.handle.net/10603/9628>

Sarris D., Papanikolaou S. (2016). Biotechnological production of ethanol: biochemistry, processes and technologies. *Eng Life Sci*, 16(4), 307–329. <https://doi.org/10.1002/elsc.201400199>

Singh S. P. (2019). Hydrothermal Liquefaction: Biomass and waste to biofuels. (Master thesis, Tel Aviv University, Israel). <https://www.tau.ac.il/~agolberg/pdf/SiddaqPreetSingh.pdf>

Thapa B., Patidar S.L., Khatiwada N.R., Ajay K.C., (2017). Production of Ethanol from municipal solid waste of India and Nepal. Conference: 7th International Conference on Solid Waste Management, Hyderabad, Telengana, India, https://www.researchgate.net/publication/322831689_Production_of_Ethanol_from_municipal_solid_waste_of_India_and_Nepal

The Global Fund (2020). Technical Brief: Sustainable Health Care Waste Management [core_healthcarewastemanagement_technicalbrief_en.pdf](https://www.theglobalfund.org/publications/core_healthcarewastemanagement_technicalbrief_en.pdf) (theglobalfund.org)

Tran T.T.A., Le T.K.P., Mai T.P., Nguyen D.Q. (2019). Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass. <https://www.intechopen.com/books/alcohol-fuels-current-technologies-and-future-prospect/bioethanol-production-from-lignocellulosic-biomass>

Tsakona, M., Anagnostopoulou, E. and Gidaracos, E. (2007). Hospital waste management and toxicity evaluation: A case study. *Waste Management*, 27, 912-920. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.04.019

Uddin M.N., Techato K., Taweekun J., Rahman Md M., Rasul M. G., Mahlia T. M. I. Ashrafur S. M. (2018). An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technologies, *Energies* 2018, 11(11), 3115. <https://doi.org/10.3390/en11113115>

U.S. Department of Energy (2017). Biofuels and Bioproducts from Wet and Gaseous Waste Streams: Challenges and Opportunities. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy

UNEP (2012). Compendium of Technologies for Treatment/Destruction of Healthcare Waste. (Ed.) Emmanuel J. United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre, Osaka, Japan

USAID (2015). Healthcare waste guideline GEMS: Sector Environmental Guidelines: Healthcare Waste. (usaidgems.org)

Vikaspedia, (n.d.). Bio-medical waste and its segregation, <https://vikaspedia.in/energy/environment/waste-management/bio-medical-waste-management/biomedical-waste-and-its-segregation>

Vögeli Y., Lohri C.R., Gallardo A., Diener S., Zurbrügg C. (2014). Anaerobic digestion of biowaste in developing countries— practical information and case studies. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Dübendorf

Vohra M., Manwar J., Manmode R., Padgilwar S., Patil S. (2014). Bioethanol production: feedstock and current technologies. *J Environ Chem Eng*, 2(1), 573–584. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.013>

Wafula, S.T., Musiime, J. & Oporia, F. (2019). Health care waste management among health workers and associated factors in primary health care facilities in Kampala City, Uganda: a cross-sectional study. *BMC Public Health* 19, 203. <https://doi.org/10.1186/s12889-019-6528-4>

Weiland P. (2010). Biogas production: current state and perspectives, *Appl Microbiol Biotechnol* 85(4):849–860. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>

WHO (1999), Guidelines for safe disposal of unwanted pharmaceuticals in and after emergencies, (World Health Organization) Geneva, World Health Organization.

WHO (2014), Safe management of wastes from health-care activities Second edition (Eds) Chartier Yves, Jorge Emmanuel, Ute Pieper, Annette Prüss, Philip Rushbrook

WHO (2017) Safe management of wastes from health-care activities: a summary. World Health Organization Geneva: (WHO/FWC/WSH/17.05)

Windfeld E.S., M.Su-Ling B. (2015). Medical waste management – A review. Journal of Environmental Management, 163, 98-108, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.013>

Wu D., Zhang A., L.Xiao, Ba Y., Ren H., Liu L.(2017). Pyrolysis Characteristics of Municipal Solid Waste in Oxygen-free Circumstance , Energy Procedia, 105, 1255-1262. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.442>

Xu N., Liu S., Xin F., Zhou J., Jia H., Xu J., Jiang M., Dong W. (2019). Biomethane Production From Lignocellulose: Biomass Recalcitrance and Its Impacts on Anaerobic Digestion, Front. Bioeng. Biotechnol. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00191>

Yousefi Z., RostamiM.A. (2017). Quantitative and qualitative characteristics of hospital waste in the city of Behshahr-2016. Envir. Health Eng. and Manag. 4(1), 59-64. DOI: 10.15171/EHEM.2017.09

Zadeh, Z.E., Abdulkhani, A., Aboelazayem, O., Saha, B. (2020). Recent Insights into Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: A Critical Review on Pretreatment, Characterization, and Products Upgrading. Processes, 8(7), 799. <https://doi.org/10.3390/pr8070799>

Zaman C.Z., Pal K., Yehye W. A., Sagadevan S., Shah S.T., Adebisi G. A., Marliana E., Rafique R. F., Johan R.B. (2017). Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. DOI: 10.5772/intechopen.69036

Zastrow D.J., Jennings P.A. (2013). Hydrothermal liquefaction of food waste and model food waste compounds. American Institute of Chemical Engineers (AIChE) 2013 Annual Meeting, Paper No. 336978, <http://www3.aiche.org/Proceedings/content/Annual-2013/extended-abstracts/P336978.pdf>

Zhang G. Y., Xu G. W., Ma D., Li C. X. (2014)., Energy recovery from antibiotic residue via hydrothermal pretreatment coupled with air staging combustion at a pilot scale, in Proc. the 2014 International Conference on Frontier of Energy and Environment Engineering, 355

Zhao Q., Liu Y. (2019). Is anaerobic digestion a reliable barrier for deactivation of pathogens in biosludge?. *Science of the Total Environment*, 668, 893–902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.063>

Zhao Z.M., Wang L., Chen H.Z. (2015). A novel steam explosion sterilization improving solid-state fermentation performance. *Bioresource Technology*, 192, 547-555. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.099>

Zhovtyansky V., Valinčius V. (2018). Efficiency of Plasma Gasification Technologies for Hazardous Waste Treatment. <https://www.intechopen.com/>, DOI: 10.5772/intechopen.74485

Αραβώσης Κ., Κούγκολος Α., Μπακοπούλου Σ. (2008). Διαχείριση νοσοκομειακών αποβλήτων. Αθήνα: Κοινωνικό Πολυκέντρο ΑΔΕΔΥ.

Ε.Ε Ο ρόλος της παραγωγής ενέργειας από απόβλητα στην κυκλική οικονομία Ανακοίνωση της επιτροπής προς το ευρωπαϊκό κοινοβούλιο, το συμβούλιο, την ευρωπαϊκή οικονομική και κοινωνική επιτροπή και την επιτροπή των περιφερειών, Βρυξέλλες, 26.1.2017 COM(2017)34/F1 - EL (europa.eu)

Κ.Υ.Α. 36259/1757/Ε103/2010 - ΦΕΚ 1312/Β/24-8-2010 Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ). Κοινή Υπουργική Απόφαση 36259/1757/Ε103/2010 - ΦΕΚ 1312/Β/24-8-2010 - Απόβλητα (e-nomothesia.gr)

Καράμπαμπα Φ. (2013). Περιβαλλοντική Διαχείριση αποβλήτων Υγειονομικών Μονάδων. docplayer.gr. <https://docplayer.gr/1692992-Perivallontiki-diaheirisi-apovliton-ygeionomikon-monadon.html>

ΚΥΑ 13588/725/2006 «Μέτρα, όροι και περιορισμοί για την διαχείριση επικινδύνων αποβλήτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 91/689/ΕΟΚ «για τα επικίνδυνα απόβλητα» του Συμβουλίου της 12ης Δεκεμβρίου 1991», όπως έχει τροποποιηθεί με το Ν. 4042/2012

Νόμος 3204/2003 - ΦΕΚ Α/296/24-12-2003 «Τροποποίηση και συμπλήρωση της νομοθεσίας για το Εθνικό Σύστημα Υγείας και ρυθμίσεις άλλων θεμάτων αρμοδιότητας του Υπουργείου Υγείας και Πρόνοιας»

ΠΑΚΟΕ Ειδικό ένθετο (2017), Εφιάλτης τα Επικίνδυνα Ιατρικά Απόβλητα, περιοδικό Οικονομία, Αθήνα.

Πούλιος Κ., Χασιώτης Α., Χλιοπάνου Έ. (2010). Διαχείριση ιατρικών αποβλήτων στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη: ΤΕΕ/ΤΚΜ.

Προεδρικό Διάταγμα 115/2004 - ΦΕΚ 80/Α/5-3-2004: Αντικατάσταση της 73537/1438/1995 κοινής υπουργικής απόφασης «Διαχείριση των ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών που περιέχουν ορισμένες επικίνδυνες ουσίες» (Β' 781) και 19817/2000 κοινής υπουργικής απόφασης «Τροποποίηση της 73537/1995 κοινής υπουργικής απόφασης κ.λ.π.» (Β' 963).«Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των χρησιμοποιημένων Ηλεκτρικών Στηλών και Συσσωρευτών». Προεδρικό Διάταγμα 115/2004 - ΦΕΚ 80/Α/5-3-2004 - Απόβλητα (e-nomothesia.gr)

Προεδρικό Διάταγμα 117/2004 - ΦΕΚ 82/Α/5-3-2004 Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις των Οδηγιών 2002/95 "σχετικά με τον περιορισμό της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών σε είδη ηλεκτρικού εξοπλισμού" και 2002/96 "σχετικά με τα απόβλητα ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού" του Συμβουλίου της 27ης Ιανουαρίου 2003". Προεδρικό Διάταγμα 117/2004 - ΦΕΚ 82/Α/5-3-2004 - Απόβλητα (e-nomothesia.gr)

Προεδρικό Διάταγμα 82/2004 - ΦΕΚ 64/Α/2-3-2004 Αντικατάσταση της 98012/2001/1996 ΚΥΑ «Καθορισμός μέτρων και όρων για τη διαχείριση των χρησιμοποιημένων ορυκτελαίων» (Β'40).» Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των Αποβλήτων Λιπαντικών Ελαίων». Προεδρικό Διάταγμα 82/2004 - ΦΕΚ 64/Α/2-3-2004 - Απόβλητα (e-nomothesia.gr)

Σανίδα Γ. (2011). «Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την επιλογή βέλτιστων τεχνικών και πρακτικών κατά τη διαχείριση νοσοκομειακών αποβλήτων». Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

ΤΕΕ (2012). «Διαχείριση Ιατρικών Αποβλήτων στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας» Πόρισμα Ομάδας του ΤΕΕ/ ΤΚΜ, όπως εγκρίθηκε με την υπ' αριθμόν Α68/Σ6/2010 απόφαση της Διοικούσας Επιτροπής. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας Πούλιος Κ. , Χασιώτης Α. , Χλιοπάνου Ε., Θεσσαλονίκη.

Τσακνή Γ., Νάκο Μ., Ντούκα Χ. (2018). Διαχείριση Ιατρικών Αποβλήτων, επιπτώσεις στο περιβάλλον και συγκριτική ανάλυση Ελλάδας και άλλων χωρών. e-Περιοδικό Επιστήμης και Τεχνολογίας, 13, 47-60.