

**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**“ΤΙΤΛΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ”**

**ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ**  
**ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ**



**Επιβλέπων Καθηγητής:**  
κ.Κων/νος Ψωμόπουλος  
**Σπουδαστής:**  
Βέλλιος Θεόδωρος

**ΑΜ:** 33864

**Αιγάλεω**  
**Ιούνιος - 2012**

Copyright © Α. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Α. Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την παρούσα πτυχιακή θα ήθελα να ευχαριστήσω το Α.Τ.Ε.Ι Πειραιά και ειδικότερα το τμήμα Ηλεκτρολογίας για το υψηλό επίπεδο σπουδών που μου προσέφερε, και πάνω από όλα τον εισηγητή της πτυχιακής κ. Ψωμόπουλο για την βοήθεια του όλους αυτούς τους μήνες.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	i
Περιεχόμενα.....	ii
Λίστα σχημάτων.....	iv
Λίστα πινάκων.....	v
Summary.....	vi
Πρόλογος.....	1
<b>1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Γενικά για τους Υδάτινους Πόρους”.....</b>	<b>2</b>
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	2
1.2 Προσέγγιση της σχέσης νερού ενέργειας.....	4
<b>2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Παραγωγή και διαχείριση λυμάτων”.....</b>	<b>7</b>
2.1 Τι είναι τα αστικά λύματα-Ορισμός.....	7
2.2 Υγρά Απόβλητα.....	7
2.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων.....	8
2.2.2 Επεξεργασία υγρών αποβλήτων.....	8
2.3 Αναγκαιότητα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....	10
<b>3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Λειτουργία εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων”.....</b>	<b>12</b>
3.1 Περιγραφή της μεθόδου επεξεργασίας.....	12
3.2 Τεχνική περιγραφή επιμέρους συγκροτημάτων.....	14
3.2.1 Συγκρότημα προεπεξεργασίας εισερχομένων αποβλήτων.....	14
3.3 Συγκρότημα βιολογικής επεξεργασίας(μέθοδος M.B.B.R).....	15
3.3.1 1 <sup>η</sup> ζώνη- απονιτροποίηση.....	16
3.3.1.1 2 <sup>η</sup> 3 <sup>η</sup> κ 4 <sup>η</sup> ζώνη βιολογικής επεξεργασίας.....	16
3.3.1.2 5 <sup>η</sup> ζώνη βιολογικής επεξεργασίας και τελική καθίζηση.....	16
3.4 Συγκρότημα επεξεργασίας Ιλύος(μηχανική πάχυνση-αφυδάτωση).....	17
3.5 Τριτοβάθμια επεξεργασία σε φίλτρο διύλυσης.....	18
3.6 Οικονομικά στοιχεία.....	19
<b>4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Παραδείγματα με δυναμικό ανάκτησης ενέργειας”.....</b>	<b>20</b>
4.1 Εισαγωγή.....	20
4.2 Αντικατάσταση της πρωτοβάθμιας καθίζησης με υφασμάτινα φίλτρα για την ανάκτηση σωματιδίων με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας.....	20
4.2.1 Αποκεντρωμένα συστήματα στις Μ.Ε.Α για την ανάκτηση ενέργειας.....	21
4.2.1.1 Αποκεντρωμένη ανάκτηση λίπων και ελαίων για την παραγωγή βιοντίζελ και ενέργειας... ..	22
4.2.1.2 Αποκεντρωμένη ανάκτηση καυσίμων συστατικών των λυμάτων για παραγ.ενέργ. ....	23
4.3 Ανάκτηση θερμικής ενέργειας από τα ανεπεξέργαστα λύματα.....	24
4.3. Επεξεργασμένα λύματα εκροής.....	25
4.3.1.1Υδροηλεκτρικό έργο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	25
4.3.1.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια χαμηλού ύψους.....	26
4.4 Ανάκτηση θερμότητας από τα επεξ.λύματα εκροής.....	27
4.4.1 Ιλύς.....	28
4.5 Αναερόβια χώνευση.....	29
4.5.1 Βελτιστοποίηση της αναερόβιας χώνευσης και αύξηση της παραγ.βιοαερίου.....	30
4.5.1.1 Βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας της διεργασίας αναερ.χώνευσης.....	30
4.5.1.2 Προεπεξεργασία της Ιλύος πριν την χώνευση.....	31
4.5.2 Θερμική υδρόλυση.....	31
4.6 Αεριοποίηση.....	33
4.7 Πυρόλυση.....	34
4.7.1 Συνδυασμός αεριοποίησης με πυρόλυση.....	35

4.8 Βιοαέριο.....	36
4.8.1 Εφαρμογές Βιοαερίου.....	37
4.8.2 Λέβητες(Boilers).....	38
4.8.3 Αποτεφρωτήρες Ιλύος.....	39
4.8.4 Μονάδες ξήρανσης.....	39
4.8.5 Μηχανοκίνητος εξοπλισμός.....	39
4.8.6 Ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες.....	40
4.8.7 Εμβολοφόρες μηχανές ή Αεριομηχανές(Gas Engines).....	41
4.8.8 Τουρμπίνες αερίου(Αεριοστρόβιλοι).....	43
4.8.9 Κυψέλες καυσίμου(fuel cells).....	44
4.9 Μικροστρόβιλοι αερίου(microturbines).....	46
4.9.1 Μηχανές Stirling.....	47
4.10 Συστήματα αξιοποίησης της ανακτημένης Θερμότητας.....	48
4.10.1 Ατμοστρόβιλος(Κύκλος βάσης Rankine).....	48
4.10.2 Ψύκτρες απορόφησης.....	49
4.10.3 Αποθήκευση Ψυκτικής ενέργειας με παγολεκάνες σε συνδ.με ψύκτη απορροφ.....	51
4.11 Μονάδα συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και θερμότητας (Σ.Η.Θ).....	53
4.11.1 Σ.Η.Θ με αεριοστρόβιλο.....	54
4.11.2 Σ.Η.Θ συνδυασμένου κύκλου.....	55
4.12 Σ.Η.Θ με παλινδρομικές Μ.Ε.Κ.....	56
4.12.1 Σ.Η.Θ με μικροστρόβιλους.....	57
4.12.2 Σ.Η.Θ με κυψέλες καυσίμου.....	57
4.12.3 Σ.Η.Θ με μηχανές stirling.....	57
<b>5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο “Παραδείγματα εγκαταστάσεων ανάκτησης ενέργειας με βιολογικούς καθαρισμούς” .....</b>	<b>59</b>
5.1 Ψυτάλεια.....	57
5.2 Δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας.....	58
5.2.1 Συν-χώνευση Ιλύος με λίπη.....	58
5.2.1.1 Βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας της αναερόβιας χώνευσης.....	59
5.3 Αξιοποίηση βιοαερίου στο Κ.Ε.Α.Ψ.....	59
5.3.1 Ανάκτηση θερμότητας για την κάλυψη των ανάγκων θέρμανσης και ψύξης.....	60
5.4 Υδροηλεκτρικό έργο.....	61
5.5 Μονάδα επεξεργασίας λυμάτων Seine Mont(M.E.Λ Seine Mont).....	62
5.5.1 Γενική περιγραφή της μονάδας.....	62
5.5.1.1 Περιγραφή των σταδίων της μονάδας.....	62
5.5.2 Συμπεράσματα.....	64
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>66</b>
<b>Διαδυσκτακοί Ιστότοποι.....</b>	<b>66</b>

## ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1	Υδάτινοι πόροι στη Μέση Ανατολή.....	4
Σχήμα 1.2	Μεγάλος σωλήνας εκβάλλει τα αστικά λύματα.....	6
Σχήμα 2.2.1	Απεικόνιση Χαρακτηριστικών αποβλήτων.....	8
Σχήμα 2.2.2	Βιολογικός Καθαρισμός.....	10
Σχήμα 3.1	Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο M.B.B.R.....	13
Σχήμα 3.2	Εγκατεστημένο συγκρότημα βιολογικής προεπεξεργασίας.....	15
Σχήμα 3.3	Εγκατεστημένο συγκρότημα βιολογικής επεξεργασίας M.B.B.R.....	16
Σχήμα 3.4	Κοχλιωτή διάταξη πάχυνσης-αφυδάτωσης.....	18
Σχήμα 3.5	Εγκατεστημένη Μονάδα εν λειτουργία, για εξυπηρέτηση 500 έως 1300 ι.κ.....	19
Σχήμα 3.6	Ανοιγμένο κατασκ. κόστος σε συναρτηση με τον εξυπηρετούμενο πληθ.....	19
Σχήμα 4.1	Απεικόνιση ενός αποκεντρωμένου συστήματος ανάκτησης λίπων και ελαίων.....	22
Σχήμα 4.2	Απεικόνιση των διαφόρων μορφών αποκεντρωμένων συστημάτων ανάκτησης.....	23
Σχήμα 4.3	Διάταξη ψύκτη μηχ.συμπύεσης.....	28
Σχήμα 4.4	Σύστημα λειτουργίας των μικροτουρμπίνων.....	46
Σχήμα 4.5	Αρχή λειτουργίας ψύκτη απορρόφησης.....	50
Σχήμα 4.6	Σύστημα αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας.....	52
Σχήμα 4.7	Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου.....	55
Σχήμα 4.8	Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο κλειστού κύκλου.....	55
Σχήμα 4.9	Σύστημα συμπαραγωγής συνδ. κύκλου με ατμοστρόβιλο αντιθλιψης.....	56
Σχήμα 5.1	Η Ψυτάλεια από ψηλά.....	60
Σχήμα 5.2	Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων της Seine Mont.....	65

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1	Κατηγοριοποίηση υδροστροβίλων .....	25
Πίνακας 4.2	Χαρακτηριστικά τουρμπινών .....	26

## SUMMARY

This thesis entitled "Potential energy recovery in municipal sewage treatment plants" presents in detail the waste water production and management focusing on energy recovery from the by products or the processes. Different methods for waste water treatment are described. For each treatment process or byproduct from the treatment the methods and equipment required for energy recovery are presented. A significant example from Greece is described : The wastewater treatment plant in Psytalia Attica where the sludge produced during the treatment is used to produce biogas which is used to produce electricity and heat for the needs of the facility.

**Keywords:**

wastewater treatment, anaerobic digestion, sewage, cogeneration, microturbines, gasification, thermal energy, pyrolysis, biodiesel, biogas, biological treatment



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σε αυτή την πτυχιακή με θέμα «Δυναμικό ανάκτησης ενέργειας σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων» παρουσιάζονται αναλυτικά οι τρόποι με τους οποίους τα αστικά λύματα παράγονται-μεταφέρονται-επεξεργάζονται σε ειδικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας.Γίνεται μια σύντομη επισκόπηση από αρχαιοτάτων χρόνων,πως διαχειρίζονταν οι άνθρωποι τα λύματα.Περιγράφεται η μέθοδος επεξεργασίας των αστικών λυμάτων με διάφορες μεθόδους.Επιπλέον από θέμα ενεργειακής ζήτησης περιγράφονται οι μέθοδοι με τους οποίους ανακτάται ενεργεια μέσω δυναμικής λυματοπτώσης,αξιοποίηση-θερμικής-ενέργειας,αναερόβιας χώνευσης, πυρόλυσης, συμπαραγωγής κ.τ.λ.

Γίνεται αναφορά στις εγκαταστάσεις που διαθέτει η Ελλάδα για την αξιοποίηση των αστικών λυμάτων όπως το Κ.Ε.Λ.Ψ όπως και στην Γαλλία στο Seine Amont. Ακόμα αναφέρεται στην τεράστια σημασία του νερού και πως μπορούμε να εκμεταλευτούμε τις ποσοτητες του ώστε να μην πάνε χαμένες.Είναι φανερό ότι η αλόγιστη χρήση οδηγεί στην λειψυδρία και στην παρακμή των βιοτόπων.

### **Λέξεις κλειδιά:**

επεξεργασία λυμάτων, Αναερόβια χώνευση, Λυματολάσπη, Συμπαραγωγή, Μικροτουρμπίνες, Αεριοποίηση, Θερμική ενεργεια, Πυρόλυση, Βιοντίζελ, Βιοαέριο, Βιολογικός καθαρισμός

# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ

### 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Από πολύ παλιά ο άνθρωπος χρησιμοποιούσε το νερό για ζωτικές, ως προς την επιβίωσή του, παραδοσιακές χρήσεις. Όταν ο άνθρωπος ζούσε από το κυνήγι, κατοικούσε σε περιοχές κοντά στο νερό, στις οποίες πήγαιναν τα θηράματα του για να ξεδιψάσουν. Αργότερα με την καλλιέργεια του εδάφους, συνειδητοποίησε ότι το νερό είναι απόλυτα αναγκαίο για τις σοδειές του, γεγονός που μαρτυρείται από τα ερείπια παλαιών αρδευτικών δικτύων, που αξιοποιούσαν με κάθε δυνατό μέσο τη μέγιστη δυνατή χρήση του διαθέσιμου νερού. Με τη συγκρότηση των κοινωνικών ομάδων και την εγκαθίδρυση των μόνιμων οικισμών, δημιουργήθηκε ένας ανταγωνισμός για την κατοχή του επιθυμητού ζωτικού χώρου που χαρακτηριζόταν από την αφθονία του γλυκού νερού και επομένως από την επάρκεια της τροφής. Εξάλλου, το νερό ως μέσο μεταφοράς, καλύπτοντας την ανάγκη της ανταλλαγής των προϊόντων και του εμπορίου, μετέτρεψε την ανθρώπινη αυτή δραστηριότητα σε συντελεστή οικονομικής και πολιτιστικής προόδου. Όπως γνωρίζουμε, στην κοιλάδα του Νείλου, βάρκες και σχεδίες συνέδεαν τους ανθρώπινους καταβλυσμούς για πολλούς αιώνες, ενώ η σημασία του νερού για τις μεταφορές φαίνεται και από τα αφιερώματα που βρίσκονται στους βασιλικούς τάφους της αρχαίας Αιγύπτου.

Οι αρχαιότεροι πολιτισμοί δημιουργήθηκαν στις πεδινές περιοχές της Β.Αφρικής και νοτιοδυτικής Ασίας, στις οποίες το νερό είναι πολύτιμο. Στις περιοχές αυτές, οι άνθρωποι αναγνωρίζοντας τη σημασία των υδατικών πόρων, αξιοποίησαν μεθοδολογικά τις χρήσιμες ιδιότητες τους και εφάρμοσαν τη γνώση και τη τεχνολογία της εποχής εκείνης στο περιβάλλον της περιοχής τους και ειδικότερα στις πρακτικές άρδευσης και αποστράγγισης των καλλιεργειών τους.

Προυπόθεση αλλά και αποτέλεσμα της εμφάνισης μεγάλων πολιτισμών στην Αίγυπτο, στη Μεσοποταμία και στην Κίνα ήταν η ύπαρξη του νερού. Οι πρώτες ανθρώπινες κοινωνίες, από την 4η χιλιετία, δημιούργησαν σημαντικά τεχνικά έργα για τη χρήση και την αξιοποίηση του νερού. Επίσης, έργα ύδρευσης αναφέρονται τη δεύτερη χιλιετία στην Αίγυπτο, στην Κίνα, στην Περσία, στην Κρήτη, κ.ά. Γνωστά από τη μυθολογία είναι τα αρδευτικά έργα στην περιοχή της Κωπαΐδας, στον Αχελώο και στον Αλφειό, κατά την προϊστορική περίοδο στην Ελλάδα. Από το 1250 μέχρι το 800 π.χ., ακολούθησε μιά αβέβαιη περίοδος κατά την οποία εμφανίζονται τα πρώτα συστηματικά έργα αξιοποίησης των υδατικών πόρων στην Αθήνα την περίοδο του Πεισίστρατου. Από το Σόλωνα το νομοθέτη, συντάσσονται σχετικοί Νόμοι για τη διαχείριση των νερών όπου απαγορευόταν η διάνοιξη πηγαδιού στην ίδια περιοχή όταν σε ορισμένη απόσταση προυπήρχε άλλο πηγάδι.

Οι Ρωμαίοι, ως άριστοι μηχανικοί κατασκεύασαν σε ολόκληρη την αυτοκρατορία τους έργα μεγάλης κλίμακας και έτσι εξασφάλισαν υποδειγματικές για την εποχή τους συνθήκες υγιεινής και καθαριότητας. Αργότερα, ο Μεσαίωνας χαρακτηρίζεται από μεγάλη οπισθοδρόμηση με συνέπεια τις μεγάλες επιδημίες και την κατάρρευση του αναπτυξιακού

και πολιτιστικού επιπέδου της εποχής. Τότε, χρησιμοποιούνταν τα ρυάκια στις πόλεις, ως αγωγοί για τα λύματα. Συνήθιζαν να ρίχνουν στο δρόμο τα σκουπίδια και τα ακάθαρτα νερά και να περιμένουν τις βροχές για να τα παρασύρουν μακρύτερα. Χολέρα, δυσεντερία και τύφος υπήρξαν οι συνέπειες, ενώ μόλις στα μέσα του προηγούμενου αιώνα άρχισαν να κατασκευάζονται αποχετευτικοί αγωγοί.

Με το πέρασμα πολλών αιώνων και φτάνοντας στη βιομηχανική επανάσταση, διαφοροποιούνται οι χρήσεις των υδατικών πόρων, εντατικοποιούνται οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες που σχετίζονται με αυτούς και αρχίζουν να εμφανίζονται κίνδυνοι που απειλούν και την ποιότητα και την επάρκειά του. Σ' αυτό συνέβαλε σημαντικά και η αυξημένη χρήση των επιφανειακών νερών, ιδιαίτερα των λιμνών και ποταμών, για ύδρευση, άρδευση, ενέργεια, υδατοκαλλιέργεια, αναψυχή, τουρισμό και για περιβαλλοντική χρήση.

Παλαιότερα, η φυσική-δυναμική λειτουργία του βιο-γεω-φυσικού χώρου κατόρθωνε να αντισταθμίζει και να εξισορροπεί τις ανθρώπινες επεμβάσεις και συμπεριφορές πάνω στο νερό και τους πόρους του. Η οργάνωση όμως του σύγχρονου παραγωγικού συστήματος, σε συνδυασμό με τις αυξημένες απαιτήσεις για καταναλωτικά αγαθά και νέες ανάγκες, οδήγησαν στην έντατικοποίηση των διαφόρων δραστηριοτήτων οι οποίες διατάραξαν την ισορροπία της φυσικής λειτουργίας των υδάτινων πόρων. Κάπως έτσι δημιουργήθηκαν τα προβλήματα της ρύπανσης των νερών. Σήμερα, στις σοβαρότερες μορφές ρύπανσης των νερών συγκαταλέγονται η χημική ρύπανση, ρύπανση από βιομηχανικά απόβλητα, αστικά λύματα και γεωργοκτηνοτροφικές απορροές, η ραδιενεργός ρύπανση, η ρύπανση από πετρελαιοειδή, καθώς και η θερμική ρύπανση.

Πριν από λίγες δεκαετίες, οι απαιτήσεις ενός περισσότερο ευαίσθητοποιημένου κοινού για καλύτερες συνθήκες ζωής και για αναβαθμισμένη ποιότητα νερού, καθώς και η ανάγκη κάλυψης πολλαπλών χρήσεων που προσφέρουν οι υδατικοί πόροι, ιδίως σε περιοχές με ανεπάρκεια νερού, δημιούργησαν την ανάγκη προστασίας του. Στις μέρες μας, προβάλλει επιτακτική η ανάγκη για συνετή διαχείριση των υδατικών πόρων, ώστε να εξασφαλίζεται η μόνιμη και καλή ποιότητα τους. Σημασία όμως έχει και η επαρκής ποσότητα σε επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους, γιατί είναι πλέον γνωστό ότι, το νερό είναι πολύτιμος φυσικός πόρος σε ανεπάρκεια.

Το νερό γενικά είναι βασικό στοιχείο όχι μόνο για τη διατήρησης και ανάπτυξης της ζωής στον πλανήτη μας, αλλά και πολιτικό όπλο. Δυστυχώς όμως, ενώ αυξάνονται σταθερά οι ανάγκες εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων, μειώνονται όλο και περισσότερο τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματά τους. Παράλληλα, απειλείται η ποιότητά τους και δημιουργούνται προβλήματα λόγω και της εντατικής εκμετάλλευσης του εδάφους με τις γεωργικές καλλιέργειες. Έτσι, τα υπόγεια νερά, αποτελούν αποθεματικό φυσικό πόρο στρατηγικής σημασίας που πολύ δύσκολα ανανεώνονται.

Στο παρελθόν, σε πολλές περιοχές στην Ελλάδα το υπόγειο νερό ήταν ιδιαίτερα κατάλληλο για πόση. Σήμερα, οι πιθανότητες ρύπανσης των υπόγειων νερών είναι πολλαπλές και συνδέονται με τις ανεξέλεγκτες απορρίψεις των απορριμάτων, την υπερ-χρήση των γεωργικών λιπασμάτων και φαρμάκων, τις απορρίψεις βιομηχανικών αποβλήτων, την απουσία αποχέτευσης, την αποθήκευση και μεταφορά επικίνδυνων χημικών ουσιών, τις εξορυκτικές δραστηριότητες, την υπερ-άντληση για αρδευτικούς κυρίως σκοπούς, την υπερβόσκηση, την ανεξέλεγκτη υλοτομία κ.ά. Επίσης, για τη χώρα μας είναι αρκετά επίκαιρο τα τελευταία έτη, η επείγουσα λήψη πρακτικών μέτρων, για το πρόβλημα που έχει αρχίσει να εμφανίζεται από την εισχώρηση-εισβολή του θαλασσινού νερού (υφαλμύρυνση) προς τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, ιδιαίτερα στις παράκτιες πεδιάδες και στα νησιά. Εξάλλου, και οι εκτεταμένες πυρκαγιές διαφοροποιούν πλέον, περισσότερο ή λιγότερο το κλιματικό και υδατικό καθεστώς των περιοχών με συνέπεια να αναμένεται η εμφάνιση ακραίων φαινομένων, όπως πλημμύρες, ξηρασία, ερημοποίηση κλπ.



Εικόνα 1.1 Υδάτινοι πόροι στη Μέση Ανατολή

### 1.2 Προσέγγιση της σχέσης νερού ενέργειας

Έχουμε αναρωτηθεί πόση ενέργεια ξοδεύεται για την άντληση και μεταφορά του νερού, τη διύλιση, τη διανομή, για να φτάσει στους τελικούς χρήστες και στη συνέχεια τη μεταφορά των αποβλήτων και τον καθαρισμό τους για την απόδοση του νερού (της όποιας ποιότητας) στους τελικούς αποδέκτες;

Αυτός ο «μικρός κύκλος» του νερού έχει ένα ενεργειακό κόστος το οποίο πολλές φορές είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Αναφέρεται ότι σε παγκόσμιο επίπεδο το κόστος αυτό καλύπτει το 7% της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης.

Οι αμερικανικές υπηρεσίες ύδρευσης αποχέτευσης υπολογίζεται ότι καταναλώνουν περίπου 56 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες (KWh) ανά έτος (το 3% της εθνικής κατανάλωσης ενέργειας). Η ενέργεια αυτή είναι ικανή να τροφοδοτήσει με ηλεκτρικό ρεύμα πάνω από 5 εκατομμύρια σπίτια για ένα ολόκληρο έτος, ισοδυναμεί δε με την προσθήκη περίπου 45 εκατομμυρίων τόνων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα.

Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι, αφήνοντας μια βρύση να τρέξει για πέντε λεπτά χρησιμοποιείται περίπου τόση ενέργεια όση αν αφήσουμε έναν λαμπτήρα 60-watt αναμμένο για 14 ώρες.

Η ενέργεια είναι συνήθως μία από τις πρώτες δαπάνες σε δήμους που έχουν υπηρεσίες ύδρευσης αποχέτευσης, συχνά δε ισοδυναμεί με το 1/3 του προϋπολογισμού τους, και αυτό εξαιτίας της λειτουργίας των προαναφερόμενων εγκαταστάσεων. Φαίνεται μάλιστα ότι είναι η δεύτερη δαπάνη μετά τη μισθοδοσία. Το μεγαλύτερο βάρος της ενεργειακής δαπάνης ανήκει βέβαια στον εξοπλισμό, του οποίου η Ενεργειακή Απόδοση είναι ιδιαίτερα σημαντική. Το Αμερικανικό Υπουργείο Ενέργειας υπολογίζει ότι περισσότερες αποδοτικές αντλίες θα μπορούσαν να επιφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι και 20%.

Ειδικότερα για τις αντλίες υπολογίζεται όχι στη διάρκεια ζωής τους τα συνολικά έξοδα κατανέμονται ως εξής: 3% για την αγορά τους και 74% για την ενέργεια που καταναλώνουν

Αυτό είναι ένα ουσιαστικό στοιχείο το οποίο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις σχετικές συμβάσεις προμήθειας (Πράσινες συμβάσεις).

Αναφέρεται στο διαδίκτυο ότι η κατανάλωση ενέργειας στα περισσότερα υδατικά συστήματα σε όλο τον κόσμο θα μπορούσε να μειωθεί τουλάχιστον κατά 25% μέσω οικονομικά αποδοτικών δράσεων. Το ποσοστό αυτό όσο υψηλό και αν θεωρηθεί καταδεικνύει τα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας που υπάρχουν.

Από τα παραπάνω φαίνεται πόσο σημαντικό είναι να περάσει στο κόσμο η έννοια της οικονομίας στο νερό, ανεξάρτητα από το αν διανύουμε περιόδους λειψυδρίας. Όμως εξίσου σημαντικό είναι το μεγάλο πρόβλημα των διαρροών στα δίκτυα, το οποίο είναι αρμοδιότητας των υπηρεσιών ύδρευσης. Το ποσοστό των διαρροών σε αναπτυσσόμενες περιοχές μπορεί να φτάσει το 50% ενώ πολλές πόλεις στον ανεπτυγμένο κόσμο έχουν διαρροές της τάξης του 20%.

Τα επόμενα χρόνια το πρόβλημα θα ενταθεί. Δεδομένου ότι όλο και περισσότερα άτομα μετακινούνται στις πόλεις, (έως το 2020 περισσότερα από 50 τοις εκατό του πληθυσμού των αναπτυσσόμενων χωρών θα ζουν σε αστικά κέντρα), το βάρος του κόστους για την παροχή νερού στους αστικούς πληθυσμούς θα γίνει ακόμη πιο κρίσιμο για τη βιωσιμότητα και την ευημερία των δήμων.

Να σημειωθεί δε ότι μόνο περίπου το μισό των κατοίκων των αστικών κέντρων, στις χώρες αυτές, διαθέτουν σήμερα συνδέσεις νερού στα σπίτια τους, και περισσότερο από το ένα τέταρτο δεν έχουν πρόσβαση σε ασφαλές πόσιμο νερό.

Ακόμα όμως και στις ανεπτυγμένες χώρες που διαθέτουν πολύ καλό δίκτυο ύδρευσης και αποχέτευσης, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για το νερό και την επεξεργασία λυμάτων αυξάνεται, λόγω των όλο και πιο αυστηρών κανονισμών σχετικά με την ποιότητα των υδάτων.



**Εικόνα 1.2** Μεγάλος σωλήνας εκβάλλει τα αστικά λύματα

Από τα προαναφερόμενα είναι σαφές ότι οι πόλεις, τόσο στις αναπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες, χάνουν ενέργεια, νερό και οικονομικούς πόρους, λόγω αναποτελεσματικότητας των αντίστοιχων υπηρεσιών κοινής ωφέλειας.

Ακόμα και οι πιο αποτελεσματικές έχουν τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της απόδοσης των συστημάτων τους, αν έχουν υπόψη τους ότι κάθε λίτρο νερού που διακινούν έχει ένα σημαντικό ενεργειακό κόστος.

Μία ιδιαίτερη διαδικασία προμήθειας νερού είναι η αφαλάτωση. Όπως διαβάζουμε στην ελληνική έκδοση του τεύχους Απριλίου 2010 του National Geographic, σήμερα 300 εκατ. άνθρωποι προμηθεύονται το νερό τους από τη θάλασσα ή από υφάλμυρα υπόγεια ύδατα, ακατάλληλα για πόση. Η αφαλάτωση ξεκίνησε στη Μέση Ανατολή τη δεκαετία του 1970 και από τότε εξαπλώθηκε σε 150 χώρες. Από την πρώτη μέθοδο με εξαέρωση και συμπύκνωση ατμών μέχρι τη κυρίαρχη σήμερα αντίστροφη ώσμωση έχει μειωθεί αρκετά το ενεργειακό κόστος, που εξακολουθεί να παραμένει υψηλό.

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΛΥΜΑΤΩΝ

#### 2.1 Τι είναι τα αστικά λύματα-Ορισμός

Τα αστικά λύματα εμπίπτουν στη γενικότερη κατηγορία των υγρών αποβλήτων. Ως υγρό απόβλητο χαρακτηρίζεται ένα νερό, το οποίο εξαιτίας της χρήσης του μέσω του ανθρώπου και των δραστηριοτήτων του υπέστη μια αλλαγή των φυσικών, χημικών και βιολογικών ιδιοτήτων του και συνεπώς είτε είναι αδύνατο πλέον να χρησιμοποιηθεί όπως είναι για τον ίδιο σκοπό, είτε η χρήση του περιέχει κινδύνους. Συνεπώς το νερό των υγρών αποβλήτων έχει χάσει την ικανότητα της προηγούμενης αξιοποίησής του και είναι πλέον ένα υποβαθμισμένο υλικό.

Έτσι μπορούμε να ορίσουμε για τα αστικά λύματα ότι είναι τα υγρά απόβλητα, που δημιουργούνται κατά τις διαδικασίες καθαριότητας (χώροι υγιεινής, μαγειρεία, πλυντήρια κ.α.) σε μια κατοικημένη περιοχή (κατοικίες, γραφεία, ιδρύματα, βιομηχανίες κλπ.). Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι το νερό, με ορισμένες ξένες προσμίξεις, που το καθιστούν ακατάλληλο για διάφορες χρήσεις και επηρεάζουν δυσμενώς τους τελικούς αποδέκτες.

Σκοπός της επεξεργασίας καθαρισμού των υγρών αποβλήτων είναι η επαναφορά του χρησιμοποιούμενου νερού στη φύση ή στο κύκλωμα παραγωγής με αποδεκτά ποιοτικά χαρακτηριστικά, που θα είναι συμβατά με τις επιθυμητές χρήσεις, ώστε να προστατευθεί η δημόσια υγεία και τα φυσικά οικοσυστήματα, να διατηρηθεί το περιβάλλον και να μην υποβαθμισθούν οι υδατικοί πόροι του πλανήτη, που παρά τη φαινομενική τους αφθονία, δεν είναι ανεξάντλητοι μπροστά στο συνεχώς αυξανόμενο ανθρώπινο πληθυσμό και τις πολλαπλάσιες ανάγκες του.

Η κατανόηση της φύσης των αποβλήτων είναι βασικής σημασίας στη διαστασιολόγηση, διαμόρφωση και λειτουργία συστημάτων περιβαλλοντικής μηχανικής για συλλογή επεξεργασία και διάθεση αυτών.

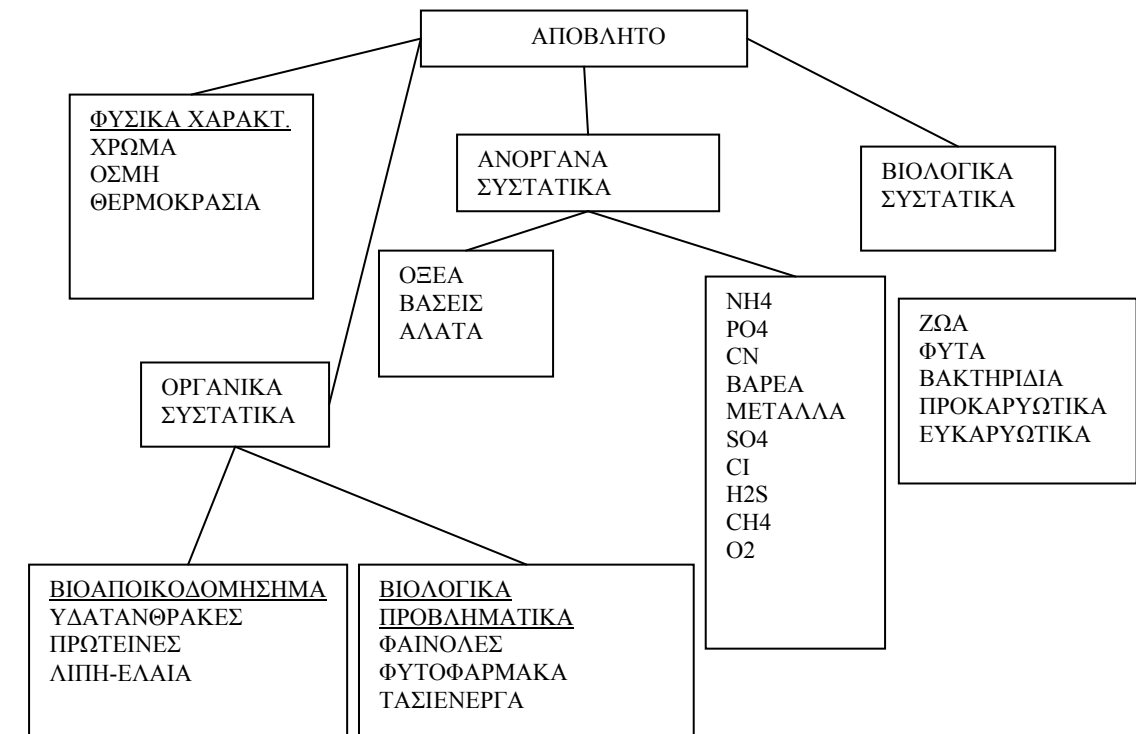
#### 2.2 Υγρά απόβλητα

Με τον ορό υγρά απόβλητα αναφερόμαστε είτε στα απόβλητα από τις κατοικίες (αστικά υγρά απόβλητα), είτε σε αυτά από τις συνήθεις αγροτικές – βιομηχανικές – αξιοποίησης βιομάζας. Γενικότερα τα υγρά απόβλητα (χαμηλής οργανικής ισχύος) και τα αστικά υγρά απόβλητα παρουσιάζουν συνήθως μικρές μόνο διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά τους και αντιμετωπίζονται ως μια κοινή κατηγορία υγρών αποβλήτων όσον αφορά την επεξεργασία τους.

Το αποχετευτικό δίκτυο οδηγεί τα υγρά απόβλητα στην εγκατάσταση επεξεργασίας τους. Η επεξεργασία που είναι απαραίτητη εξαρτάται τόσο από την παροχή των λυμάτων όσο και από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που πρέπει να διασφαλίζονται για τον αποδέκτη διάθεσης τους. Όταν η παροχή των διατιθέμενων λυμάτων είναι μικρή, είναι δυνατόν να επαρκεί το δυναμικό φυσικού αυτοκαθαρισμού του αποδέκτη και να μην απαιτείται επεξεργασία προκειμένου να μην παρατηρείται υποβάθμιση της ποιότητας του αποδέκτη.

### 2.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα χαρακτηρίζονται από τη φυσική, χημική και βιολογική τους σύσταση. Στην παρακάτω διάταξη βλέπουμε μια ταξινόμηση των υγρών αποβλήτων με βάση τα φυσικά τους χαρακτηριστικά και την σύστασή τους.



Σχήμα 2.1 Απεικόνιση Χαρακτηριστικών αποβλήτων

### 2.2.2 Επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα για να διοχετευτούν σε ένα υδάτινο αποδέκτη όπως γίνεται συνήθως, θα πρέπει να δεχτούν κατάλληλη επεξεργασία για την αποφυγή σοβαρών προβλημάτων. Τα ογκώδη στερεά, η άμμος και τα αιωρούμενα στερεά προκαλούν περισσότερο αισθητική δυσαρέσκεια παρά ουσιαστική ρύπανση του υδάτινου φορέα. Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί όμως στα υγρά απόβλητα είναι υπεύθυνοι για την μετάδοση ασθενειών στον άνθρωπο και σε άλλους οργανισμούς. Σοβαρό πρόβλημα δημιουργούν και τα οργανικά συστατικά, το άζωτο και ο φώσφορος, που είναι υπεύθυνα για τις δυσάρεστες καταστάσεις ρύπανσης σε υδάτινους φορείς. Αυτό οφείλεται στη κατανάλωση των οργανικών συστατικών όπου χρησιμοποιούν μικροοργανισμοί για την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό τους παράλληλα με την κατανάλωση οξυγόνου που βρίσκεται διαλυμένο στο νερό (Στάμου, 1995).

Με τον όρο διαχείριση υγρών αποβλήτων, χαρακτηρίζουμε κάθε σκόπιμη ανθρώπινη επέμβαση που έχει σαν στόχο τη μείωση της αρνητικής επίδρασης των λυμάτων στο περιβάλλον. Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων έχουν σκοπό τον διαχωρισμό τους από τα βλαβερά συστατικά που περιέχουν ώστε να διατεθούν ακίνδυνα στο περιβάλλον και στις καλλιέργειες (Στάμου, 1995). Με σκοπό τη προστασία του περιβάλλοντος από τις



αρνητικές επιπτώσεις της απόρριψης των λυμάτων, εκδόθηκε η οδηγία 91/271/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21/5/91 για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων, η οποία αφορά τη συλλογή, την επεξεργασία και την διάθεσή τους.

Η επεξεργασία καθαρισμού των υγρών αποβλήτων αποβλέπει στην απομάκρυνση, εξουδετέρωση ή κατάλληλη τροποποίηση των επιβλαβών χαρακτηριστικών τους, ώστε να εξαλείφουν ή να ελαττωθούν σε αποδεκτό επίπεδο οι δυσμενείς για τον τελικό αποδέκτη (έδαφος, επιφανειακά νερά, κλπ) συνέπειες. Οι κύριοι στόχοι της επεξεργασίας των λυμάτων είναι η μείωση του BOD<sub>5</sub> (Βιοχημική Απαίτηση Οξυγόνου) (Μαυρίδου και Παπαπετροπούλου, 1995) και του αριθμού των μικροοργανισμών. Η απομάκρυνση του ρυπαντικού φορτίου των αστικών λυμάτων γίνεται με συνδυασμό φυσικών, χημικών, φυσικοχημικών και βιολογικών διεργασιών (Fresenius and Schneider, 1994). Οι διεργασίες αυτές σκοπεύουν να δεσμεύσουν και να αφαιρέσουν τους ρύπους από τη μάζα του νερού. Το σύνολο των διεργασιών αυτών είναι η διαδικασία επεξεργασίας και η εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, στην οποία διαχωρίζονται με βιοτεχνικές διεργασίες οι ρύποι από το νερό, έχει επικρατήσει να ονομάζεται βιολογικός καθαρισμός (Αραβώσης κ.α., 2003). Η βασική αρχή, στην οποία στηρίζεται η λειτουργία των βιολογικών καθαρισμών, είναι ο μετασχηματισμός των διαλυμένων οργανικών και ανόργανων ενώσεων, που αποτελούν τους ρύπους του νερού, με μεταβολικές διαδικασίες σε κύτταρα και εξωκυτταρικές ουσίες, που έχουν τη τάση να συσσωματώνονται. Για τη πρακτική εφαρμογή των διαφόρων διαδικασιών και μεθόδων καθαρισμού έχουν αναπτυχθεί ειδικές εγκαταστάσεις με κατάλληλη διαμόρφωση και εξοπλισμό, ώστε να εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη δυνατή απόδοση με ελεγχόμενες και ρυθμιζόμενες συνθήκες. Έτσι έχουν διαμορφωθεί τέσσερα κυρίως βασικά στάδια καθαρισμού, που εκφράζουν φραστικά το βαθμό της καθαρότητας της τελικής απορροής:

#### Πρωτοβάθμια επεξεργασία (Μηχανικός καθαρισμός)

Στο στάδιο αυτό απομακρύνονται τα αιωρούμενα στερεά με καθίζηση (κατά 50-70%) και παράλληλα μειώνεται το οργανικό φορτίο μέχρι 35%. Σε αρκετές περιπτώσεις η πρωτοβάθμια επεξεργασία δεν εφαρμόζεται και τα υγρά απόβλητα καταλήγουν μετά τη προεπεξεργασία απευθείας στη δευτεροβάθμια επεξεργασία.

#### Δευτεροβάθμια επεξεργασία (Βιολογικός καθαρισμός)

Στη δευτεροβάθμια επεξεργασία πραγματοποιείται βιολογική απομάκρυνση της οργανικής ύλης των λυμάτων από μικροοργανισμούς και ακολούθως διαχωρισμός των βιολογικών στερεών από τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Ο βαθμός απομάκρυνσης της οργανικής ύλης και των στερεών είναι υψηλός και μπορεί να φτάσει μέχρι ποσοστό 95%. Στο στάδιο αυτό επιτελείται σχεδόν πλήρης απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών και του BOD, κατά περίπτωση μάλιστα, μπορεί να γίνει και απομάκρυνση του αζώτου και φωσφόρου (Ανδρεαδάκης κ.α., 2001). Υπό ειδικές συνθήκες και εάν η εγκατάσταση επεξεργασίας λειτουργεί σωστά, με συνδυασμό της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασίας, επιτυγχάνεται ελάττωση του ρυπαντικού φορτίου των λυμάτων τέτοια ώστε τα επεξεργασμένα λύματα να μπορούν να διατεθούν στους φυσικούς αποδέκτες ή να χρησιμοποιηθούν για άρδευση.

#### Τριτοβάθμια επεξεργασία (Χημικός καθαρισμός)

Το στάδιο της τριτοβάθμιας επεξεργασίας αποτελεί σύνθεση επιμέρους μονάδων, η οποία ποικίλει ανάλογα με τους ρύπους που πρόκειται να υποστούν επεξεργασία (Ανδρεαδάκης κ.α., 2001). Όταν το υγρό κλάσμα που παραλαμβάνεται μετά το τέλος της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας προορίζεται για επαναχρησιμοποίηση ή υπάρχει ιδιαίτερο πρόβλημα ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα, τότε ακολουθεί τριτοβάθμια επεξεργασία για την απομάκρυνση

ορισμένων ρυπαντικών ουσιών που δεν επιτυγχάνονται με τα προηγούμενα στάδια επεξεργασίας. Η επεξεργασία αυτή είναι πολυδάπανη και περιλαμβάνει πολλά επί μέρους στάδια, όπως απολύμανση και ραφινάρισμα, απομάκρυνση θρεπτικών κλπ



Εικόνα 2.2 Βιολογικός Καθαρισμός

### 2.3 Αναγκαιότητα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα πρέπει να υποβάλλονται πριν από τη διάθεσή τους σε κατάλληλη επεξεργασία ώστε να αμβλύνονται οι επιπτώσεις στους αποδέκτες. Ο καθαρισμός των υγρών αποβλήτων έχει κυρίως ως στόχο την προστασία των υδάτινων πόρων. Για την επιτυχή διαχείριση των υγρών αποβλήτων είναι απαραίτητη η γνώση της προέλευσής τους και των χαρακτηριστικών τους ώστε να υποβληθούν σε κατάλληλη επεξεργασία που είναι αποδεκτή από τους ρυθμούς αυτοκαθαρισμού του αποδέκτη διάθεσής τους. Οι υδάτινοι αποδέκτες επιτυγχάνουν αποδόμηση των οργανικών συστατικών με τα οποία φορτίζονται (από τη διάθεση υγρών αποβλήτων) εφόσον η φόρτιση που δέχονται διατηρείται κάτω από το επίπεδο που αντιστοιχεί στην ικανότητα αυτοκαθαρισμού τους. Εάν ένας υδάτινος αποδέκτης έχει φορτίσει πέραν των επιπέδων που αντιστοιχούν στην ικανότητα αυτοκαθαρισμού του αρχίζει η εμφάνιση προβλημάτων και παύει να είναι υγιής. Όταν λοιπόν ο υδάτινος αυτός αποδέκτης χρησιμοποιείται ταυτόχρονα και ως υδάτινος πόρος, απ' όπου γίνεται υδροληψία που προορίζεται για πόσιμο, απαιτούνται πολυδάπανες διεργασίες για την κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές που ισχύουν για την ποιότητα του πόσιμου νερού.

Η αποχέτευση των οικιακών λυμάτων είναι μια γνωστή πρακτική από την αρχαιότητα. Η επεξεργασία (καθαρισμός) όμως των οικιακών λυμάτων όπως εφαρμόζεται σήμερα αποτελεί σχετικά πρόσφατη εξέλιξη. Διάφορες ασθένειες που ταλαιπώρησαν την ανθρωπότητα κατά το παρελθόν αφού εκδηλώθηκαν υπό μορφή επιδημιών είναι δυνατόν να μεταδοθούν μέσω του πόσιμου νερού. Μόλις όμως πριν από 100 χρόνια κατάλαβαν οι άνθρωποι αυτό το γεγονός και συνειδητοποίησαν ότι το πόσιμο νερό πρέπει να είναι απαλλαγμένο από κάθε είδους ρύπανση. Το πόσιμο νερό όμως δε λαμβάνεται μόνο από σχετικά καλά προστατευμένους υπόγειους υδατικούς πόρους αλλά και από επιφανειακά νερά τα οποία είναι συνήθως οι πιο πρόσφοροι αποδέκτες για τα υγρά απόβλητα.

Η λύση θα ήταν να κρατηθούν τα υγρά απόβλητα μακριά από τα επιφανειακά νερά αλλά κάτι τέτοιο σε έναν αριθμό περιπτώσεων δεν ήταν δυνατόν και έτσι προέκυψε η ανάγκη για

την επεξεργασία (καθαρισμό) των υγρών αποβλήτων. Το πρόβλημα των υγρών αποβλήτων γινόταν όλο και πιο έντονο από τις αρχές του 20ου αιώνα και ιδιαίτερα μετά από τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο οπότε παρατηρήθηκε έντονη συγκέντρωση πληθυσμών στα αστικά κέντρα και ραγδαία βιομηχανική ανάπτυξη.

## 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο

### ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ

#### 3.1. Περιγραφή της μεθόδου επεξεργασίας

Η «καρδιά» της εγκατάστασης επεξεργασίας είναι η βιολογική βαθμίδα, αφού εκεί πραγματοποιείται η κύρια απομάκρυνση των ρυπαντικών ουσιών. Η μέθοδος επεξεργασίας που χρησιμοποιείται στη βιολογική βαθμίδα του συστήματος είναι η εξελιγμένη μέθοδος “MMBR” (Moving Bed Bio-Reactor) που συνδυάζει τα οφέλη του παρατεταμένου αερισμού “extended aeration” με αυτά του “bio-film attached growth”. Η τεχνολογία MBBR (Moving Bed Bio-Reactor) που χρησιμοποιείται είναι μια δόκιμη και αποτελεσματική μέθοδος επεξεργασίας με πολλές εφαρμογές και εγκαταστάσεις σε 45 χώρες σε όλο τον κόσμο. Συχνά, σε επιστημονικά άρθρα αναφέρεται ως ο εξελιγμένος συνδυασμός των προτερημάτων της ενεργού αιωρούμενης ιλύος και της προσκολλημένης βιομάζας. Έτσι, σε αντίθεση με τους περισσότερους βιοαντιδραστήρες προσκολλημένης βιομάζας (biofilm bioreactors) η μέθοδος MBBR χρησιμοποιεί το σύνολο του όγκου της δεξαμενής – βιοαντιδραστήρα, όπως ακριβώς στα συστήματα ενεργού ιλύος. Σε αντίθεση όμως με τα τελευταία, δεν απαιτεί ανακυκλοφορία ιλύος, όπως ακριβώς και όλα τα συστήματα προσκολλημένης βιομάζας.

Για την επίτευξη αυτών των χαρακτηριστικών, οι δεξαμενές βιολογικών διεργασιών γεμίζονται με ειδικό πληρωτικό υλικό που παίζει τον ρόλο του φορέα ανάπτυξης της βιομάζας. Στις αερόβιες διεργασίες, το υλικό αυτό (φορέας βιολογικού στρώματος) κινείται εντός της δεξαμενής μέσω της ανατάραξης που προκαλεί ο εμφυσούμενος αέρας ενώ στις αναερόβιες και ανοξικές ζώνες, μέσω συστήματος ανάδευσης (συνήθως υποβρύχιος αναδευτήρας). Το υλικό παραμένει εντός του αντιδραστήρα και δεν διαφεύγει με την εκροή με τη βοήθεια κατάλληλης διάταξης κοσκίνισης της εκροής. Το ειδικό πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιείται έχει μεγάλη ενεργή επιφάνεια επαφής της τάξης των  $700 - 800 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , για τυπική τιμή πλήρωσης ίση με 65%. Ωστόσο, το ποσοστό πλήρωσης εν γένει μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες, γεγονός που αποτελεί και ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της μεθόδου αφού προσφέρει μεγάλη ευελιξία στα συστήματα επεξεργασίας.

Επιπλέον, η ευελιξία αυτή κατατάσσει τη μέθοδο στις πλέον κατάλληλες για επέκταση σε υφιστάμενες μονάδες αφού με αύξηση του ποσοστού πλήρωσης αυξάνει και η δυναμικότητα της μονάδας. Σε κάθε περίπτωση, το ποσοστό αυτό δεν πρέπει να ξεπερνά το 70% για να επιτρέπεται η ανεμπόδιστη κίνηση του φορέα εντός της δεξαμενής. Όπως σε κάθε διεργασία προσκολλημένης βιομάζας, έτσι κι εδώ το βασικότερο ρόλο στη διεργασία παίζει η διάχυση των συστατικών του οργανικού υποστρώματος από και προς το βιολογικό στρώμα (βιολογικό «φίλμ»). Λόγω της ικανότητας διείσδυσης του υποστρώματος (οργανικά συστατικά) μέχρι βάθους το πολύ 100μm, το ιδανικό βιολογικό «φίλμ» είναι ένα λεπτό και κατά το δυνατόν ομοιόμορφα κατανομημένο στην επιφάνεια του φορέα. Για την επίτευξη αυτού, απαιτείται η διατήρηση έντονων συνθηκών τυρβώδους ροής εντός της δεξαμενής ώστε αφενός να ενισχύεται η μεταφορά των συστατικών στο βιολογικό «φίλμ», αφετέρου να διατηρείται ένα λεπτό στρώμα βιολογικού στρώματος στον φορέα μέσω των δυνάμεων συνάφειας.

Η τυπική συγκέντρωση στερεών στο ανάμικτο υγρό κυμαίνεται, σύμφωνα με επιστημονικές μελέτες (Rusten et al., 1994), κυμαίνεται μεταξύ  $2-5 \text{ kg/m}^3$ , τιμές ανάλογες του συμβατικού συστήματος ενεργού ιλύος. Ωστόσο, λόγω του πολλαπλάσιου ογκομετρικού ρυθμού απομάκρυνσης στα συστήματα M.B.B.R. (Rusten et al., 1994), η βιομάζα στις διεργασίες αυτές είναι πολύ πιο «ενεργή» (ζώσα) απ' ό,τι στα συστήματα ενεργού ιλύος. Λόγω της μικρής απαίτησης ωφέλιμου όγκου από τα συστήματα αυτά, ο χρόνος παραμονής κυμαίνεται σε συγκριτικά χαμηλά επίπεδα της τάξης των 15-90 λεπτών της ώρας, εξαρτώμενος πάντα από το οργανικό και λοιπό ρυπαντικό φορτίο των εισερχομένων υγρών αποβλήτων. Τέλος, οι τιμές της οργανικής φόρτισης για το σχεδιασμό του συστήματος θα κυμαίνονται μεταξύ  $7 - 10 \text{ gBOD}_5/\text{m}^2 \cdot \text{d}$  για θερμοκρασία  $100^\circ\text{C}$ .



**Εικόνα 3.1** Επεξεργασία λυμάτων με τη μέθοδο M.B.B.R

### 3.2 Τεχνική περιγραφή επιμέρους συγκροτημάτων

#### 3.2.1 Συγκρότημα προεπεξεργασίας εισερχόμενων αποβλήτων

Η προεπεξεργασία των εισερχόμενων λυμάτων επιτυγχάνεται σε αυτόνομο, κλειστό συγκρότημα, τύπου “Compact”, το οποίο εκτελεί ολοκληρωμένη λειτουργία προ-επεξεργασίας σε αστικά λύματα και βοθρολύματα. Το συγκρότημα αυτό συνδυάζει τις παρακάτω λειτουργίες:

- Εσχάρωση
- Συμπύεση – Εσχαρισμάτων
- Διαχωρισμό-πλύση και αφυδάτωση της άμμου
- Εξαγωγή και απόρριψη της άμμου σε κάδο
- Απολίπανση
- Εξαγωγή και απόρριψη των λιπών

Η εισαγωγή των λυμάτων γίνεται απευθείας (in-line) διαμέσου κεντρικού αγωγού. Το συγκρότημα δεν απαιτεί ειδικές δομικές κατασκευές και εκτεταμένη εγκατάσταση, ενώ είναι έτοιμο για λειτουργία σε πολύ σύντομο χρόνο από την παράδοση. Τα λύματα εισερχόμενα στην μονάδα εσχαρίζονται στα 6mm και συμπιέζονται διαμέσου αυτοκαθαριζόμενου κοχλιωτού κόσκινου. Ο καθαρισμός της επιφάνειας εσχαρισμού από τα εσχαρίσματα γίνεται μέσω οδοντωτής διάταξης, η οποία εισέρχεται στις ραβδώσεις. Ένας κεκλιμένος κοχλίας χωρίς άξονα (τύπου “shaftless”) ανυψώνει τα εσχαρίσματα, τα οποία συγχρόνως συμπιέζονται πριν απορριφθούν σε κάδο. Τα λύματα, απαλλαγμένα από τα φερτά στερεά (εσχαρίσματα), περνούν στο θάλαμο εξάμμωσης και απολίπανσης, όπου εκτελείται ο διαχωρισμός της άμμου (σωματίδια >200μm) και των λιπών.

Η άμμος συλλέγεται στον πυθμένα της δεξαμενής, όπου ένας οριζόντιος κοχλίας χωρίς άξονα που ολισθαίνει σε ανοξείδωτες ράβδους προωθεί την άμμο σε άλλο, κεκλιμένο κοχλία. Ο κεκλιμένος κοχλίας αυτός αφαιρεί την άμμο από την δεξαμενή και συγχρόνως την αφυδατώνει.

Για την υποβοήθηση του διαχωρισμού των οργανικών υλικών και της άμμου, καθώς και για την υποβοήθηση της επίπλευσης των ελαίων και λιπών, διενεργείται διάχυση αέρα στον κύριο θάλαμο διαχωρισμού. Για την διάχυση θα χρησιμοποιούνται διαχύτες χονδρής φυσαλίδας για την αποφυγή εμφράξεων.

Το τμήμα εξάμμωσης-απολίπανσης περιλαμβάνει δύο διαφορετικούς θαλάμους, στον πρώτο από τους οποίους γίνεται η καθίζηση της άμμου ενώ στον δεύτερο η επίπλευση των ελαίων και λιπών. Λόγω του της ροής του αέρα, δημιουργείται μία σπειροειδής κίνηση στα λύματα, η οποία οδηγεί τα λίπη και τα έλαια στο κανάλι επίπλευσης.

Το μηχάνημα είναι εξοπλισμένο με επιφανειακό ξέστρο, το οποίο παίρνει κίνηση από ηλεκτρομειωτήρα στροφών. Το ξέστρο οδηγεί τα λίπη και έλαια στον ενσωματωμένο θάλαμο συλλογής επιπλεόντων, από όπου οδηγούνται με βαρύτητα σε εξωτερικό κάδο συγκέντρωσης.

Για τον έλεγχο και συντήρηση της διάταξης, προβλέπονται κατάλληλα ανοιγόμενα καπάκια σε όλες τις απαιτούμενες θέσεις της διάταξης. Τέλος, η διάταξη φέρει ενσωματωμένο τοπικό πίνακα ισχύος και αυτοματισμού, από τον οποίο ελέγχεται η λειτουργία της ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες επιμέρους μονάδες επεξεργασίας.



**Εικόνα 3.2** Εγκατεστημένο συγκρότημα βιολογικής προεπεξεργασίας

### 3.3 Συγκροτήμα βιολογικής επεξεργασίας (μέθοδος M.B.B.R).

Το συγκρότημα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα με αντιδιαβρωτική προστασία σε μορφή συμπαγούς κοντέινερ. Η μονάδα είναι κατάλληλη για υπέργεια εγκατάσταση και αποτελείται από μία κλειστή, ενιαία κατασκευή αυτοφερόμενη και ανεξάρτητη η οποία φέρει όλες τις ανάγκες βαθμίδες επεξεργασίας. Για την πρόσβαση στο εσωτερικό της μονάδας με τα επιμέρους τμήματα μηχανολογικού εξοπλισμού, έχουν προβλεφθεί κατάλληλα ανοιγόμενα καλύμματα. Ο χειρισμός της μονάδας είναι απλός και οι απαιτήσεις συντήρησης περιορισμένες. Η μονάδα λειτουργεί αυτόματα και η λειτουργία της παρακολουθείται από κατάλληλο ηλεκτρολογικό πίνακα αυτοματισμού. Το συγκρότημα περιλαμβάνει πέντε (5) ζώνες επεξεργασίας. Μία ανοξική ζώνη για την απονιτροποίηση, τρεις ζώνες αερισμού για την αποδόμηση του οργανικού φορτίου και τη νιτροποίηση και μία τελική καθίζηση με ειδική διάταξη τύπου lamella plate separator.

Ο κυρίως μηχανολογικός εξοπλισμός αποτελείται από:

- χαλύβδινη δεξαμενή επεξεργασίας 5 διαμερισμάτων
- αντλία τροφοδοσίας,
- αντλία ανακυκλοφορίας και απόρριψης λάσπης
- αντλία ανακυκλοφορίας ανάμεικτου υγρού
- φυσητήρας αερισμού
- όργανο μέτρησης διαλυμένου οξυγόνου (D.O) – (optional)
- βαλβίδες και υδραυλικά εξαρτήματα
- ηλεκτρολογικός πίνακας αυτοματισμού

Οι μεταλλικές κατασκευές συνίστανται κυρίως από:

- δεξαμενές, και πλαίσιο από χάλυβα St37-2 με επιφανειακή προστασία με εποξειδική βαφή
- Εναλλακτική αντιδιαβρωτική προστασία εσωτερικών επιφανειών δεξαμενής με πλαστικοποίηση (FRP)
- Σωληνώσεις από γαλβανισμένο χάλυβα και PVC.

#### 3.3.1 1η Ζώνη – Απονιτροποίηση

Ανοξική ζώνη με μηχανική ανάδευση και ανακυκλοφορία του ανάμεικτου υγρού για την απονιτροποίηση των νιτρικών που δημιουργούνται στην αερόβια επεξεργασία. Ο θάλαμος της ανοξικής αυτής ζώνης θα περιέχει ειδικό πληρωτικό υλικό (moving bed media) για την αύξηση της επιφάνειας επαφής και επομένως της απόδοσης της απονιτροποίησης.

#### 3.3.1.1 2η 3η και 4η ζώνη βιολογικής επεξεργασίας

Στην δεύτερη και τρίτη ζώνη επεξεργασίας της βιολογικής βαθμίδας, διενεργούνται κατά κύριο λόγο διεργασίες μείωσης του οργανικού φορτίου, ενώ στην τέταρτη ζώνη πραγματοποιείται κυρίως η νιτροποίηση του εμπεριεχομένου αζώτου (όσο απέμεινε από την κατανάλωση για την κυτταρική σύνθεση της βιομάζας) σε νιτρικά. Στους τρεις αυτούς τελευταίους θαλάμους, οι διεργασίες πραγματοποιούνται με τη βοήθεια οξυγόνου που παρέχεται διαμέσου της διάχυσης αέρα και της βιομάζας που αναπτύσσεται στο ειδικό πλαστικό πληρωτικό υλικό (moving bed media). Το υλικό αυτό βρίσκεται σε συνεχή αιώρηση και ανάμειξη με τη βοήθεια του εμφυσούμενου αέρα. Το χρησιμοποιούμενο πληρωτικό υλικό έχει πολύ μεγάλη επιφάνεια επαφής και επάνω σε αυτό αναπτύσσεται η απαιτούμενη βιομάζα

για την διενέργεια της βιολογικής επεξεργασίας και της μείωσης του οργανικού φορτίου. Ο αέρας που διοχετεύεται στη βαθμίδα αυτή είναι ελαφρά πεπιεσμένος αέρας και παρέχεται από κατάλληλα διαστασιολογημένο φυσητήρα. Ο φυσητήρας ενσωματώνει όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα όπως φίλτρα, σιγαστήρα και βάνια ελέγχου-απομόνωσης.

### 3.3.1.2 5η ζώνη βιολογικής επεξεργασίας και τελική καθίζηση

Μετά την αερόβια επεξεργασία το υγρό κατευθύνεται προς τον τελευταίο θάλαμο, όπου διενεργείται η τελική καθίζηση και η διαύγαση του υγρού. Στο θάλαμο αυτό το υγρό διαχωρίζεται από τα ενεργά στερεά σε ανοξικές συνθήκες με την χρήση “tube settler” για την αύξηση της αποδοτικότητας. Η ιλύς που συσσωρεύεται στον πυθμένα της τελικής καθίζησης απομακρύνεται με κατάλληλη αντλία προς περαιτέρω επεξεργασία της και τελική διάθεση.



**Εικόνα 3.3** Εγκατεστημένο συγκρότημα βιολογικής επεξεργασίας M.B.B.R.

### 3.4 Συγκρότημα επεξεργασίας ιλύος (μηχανική πάχυνση- αφυδάτωση)

Η περίσσεια ιλύος από τον πυθμένα της ζώνης καθίζησης απομακρύνεται περιστασιακά και οδηγείται στη μονάδα μηχανικής πάχυνσης – αφυδάτωσής της. Προκειμένου ο εξοπλισμός πάχυνσης-αφυδάτωσης ιλύος να αποτελεί μία συμπαγή και μεταφερόμενη μονάδα, εγκαθίσταται εντός κοντέινερ κατάλληλων διαστάσεων. Στον ίδιο χώρο θα εγκατασταθεί και η μονάδα παρασκευής διαλύματος πολυηλεκτρολύτη καθώς και ο ηλεκτρολογικός πίνακας της μονάδας. Ο εξοπλισμός είναι προ-συναρμολογημένος εντός του container και έτοιμος προς λειτουργία. Συγκεκριμένα εντός του container πάχυνσης-αφυδάτωσης εγκαθίσταται ο παρακάτω εξοπλισμός:

- Αναδευόμενο δοχείο κροκίδωσης ιλύος
- Μονάδα προετοιμασίας διαλύματος πολυηλεκτρολύτη
- Αντλία δοσομέτρησης διαλύματος πολυηλεκτρολύτη, δυναμικότητας τουλάχιστον 20 lt/h
- Κοχλιωτή διάταξη πάχυνσης-αφυδάτωσης ιλύος
- Κεκλιμένος κοχλίας μεταφοράς αφυδατωμένης ιλύος
- Γενικός πίνακας ισχύος και αυτοματισμού του συγκροτήματος.



Το Container φέρει ανοιγόμενες θύρες και επιτοίχιο ανεμιστήρα για τον ικανοποιητικό εξαερισμό του χώρου.

Η αφυδατωμένη ιλύς μέσω της κοχλιωτής διάταξης μεταφοράς οδηγείται σε δύο μεταλλικούς κάδους απορριμμάτων.

Η λειτουργία της μονάδας πάχυνσης αφυδάτωσης γίνεται με εκκίνηση από τον χειριστή της μονάδας και για όσο χρόνο αυτός επιθυμεί. Η κοχλιωτή αντλία που βρίσκεται εγκατεστημένη στο μηχανοστάσιο του συγκροτήματος βιολογικής επεξεργασίας (αντλία ανακυκλοφορίας και απόρριψης ιλύος, M.B.B.R.), αναρροφά την ιλύ από τη δεξαμενή καθίζησης ιλύος και τροφοδοτεί το δοχείο κροκίδωσης. Το δοχείο κροκίδωσης είναι κατακόρυφο κυλινδρικό δοχείο κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα, το οποίο φέρει κατακόρυφο αργόστροφο αναδευτήρα. Σκοπός της διάταξης είναι η ανάμιξη της ιλύος με το διάλυμα του πολυηλεκτρολύτη και η παραμονή της μέσα το δοχείο για επαρκή χρόνο ώστε να κροκιδωθεί πριν οδηγηθεί στην μονάδα πάχυνσης αφυδάτωσης.

Από το δοχείο κροκίδωσης, η κροκιδωμένη ιλύς τροφοδοτείται, μέσω αγωγού PVC στην είσοδο της κοχλιωτής διάταξης πάχυνσης-αφυδάτωσης.

Η κοχλιωτή διάταξη πάχυνσης-αφυδάτωσης ιλύος αποτελεί μία κλειστή διαμήκη διάταξη, η οποία εγκαθίσταται σε υπερυψωμένη βάση κατασκευασμένη από γαλβανισμένο εν θερμώ χάλυβα. Η ιλύς τροφοδοτείται στο ένα άκρο της και εξέρχεται αφυδατωμένη από το άλλο άκρο της.

Η αφυδατωμένη ιλύς από την έξοδο της διάταξης πάχυνσης αφυδάτωσης, τροφοδοτείται σε κεκλιμένο μεταφορικό κοχλία ιλύος, ο οποίος είναι εγκατεστημένος εγκάρσια σε σχέση με την διάταξη πάχυνσης-αφυδάτωσης και την απορρίπτει σε κάδους απόρριψης αφυδατωμένης ιλύος, εξωτερικά του Container. Ο κεκλιμένος μεταφορικός κοχλίας, διέρχεται διαμέσου οπής στο πλευρικό τοίχωμα του Container.

Η κοχλιωτή διάταξη πάχυνσης-αφυδάτωσης φέρει στο κάτω μέρος λεκάνη συγκέντρωσης στραγγιδίων και φλάντζα για την σύνδεση του υδραυλικού δικτύου απομάκρυνσης των στραγγιδίων. Τα συλλεγόμενα στραγγίδια οδηγούνται διαμέσου δικτύου κατασκευασμένου από γαλβανισμένο εν θερμώ χάλυβα, στην είσοδο της εγκατάστασης, οπότε εισέρχονται εκ νέου στον κύκλο επεξεργασίας της εγκατάστασης.



Εικόνα 3.4 Κοχλιωτή διάταξη πάχυνσης αφυδάτωσης

Η διάταξη προετοιμασίας διαλύματος πολυηλεκτρολύτη περιλαμβάνει δύο κατακόρυφα κυλινδρικά δοχεία, κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα, τα οποία είναι τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο. Το άνω δοχείο είναι εξοπλισμένο με κατακόρυφο αναδευτήρα και αποτελεί το δοχείο προετοιμασίας-ωρίμανσης του διαλύματος. Η ωρίμανση του υγρού πολυηλεκτρολύτη πραγματοποιείται για τουλάχιστον 60 min. Το κάτω δοχείο χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και δοσομέτρηση του έτοιμου διαλύματος.

Η αντλία δοσομέτρησης διαλύματος πολυηλεκτρολύτη είναι τοποθετημένη σε βάση, παραπλεύρως της διάταξης προετοιμασίας και αναρροφά το διάλυμα από την κάτω δεξαμενή δοσομέτρησης διαλύματος.

### 3.5 Τριτοβάθμια επεξεργασία σε φίλτρο διύλισης

Σε περίπτωση που απαιτείται υψηλή ποιότητα εκροής (κυρίως σε περιπτώσεις επαναχρησιμοποίησης της εκροής π.χ. προς άρδευση) προστίθεται στην εγκατάσταση μονάδα τριτοβάθμιας επεξεργασίας με φίλτρα σε πιεστικό διστρωματικό φίλτρο διύλισης άμμου (ανθρακίτης και άμμος). Στο φίλτρο αυτό, κατακρατούνται τα υπολοιπούμενα αιωρούμενα στερεά ώστε να φτάσει η ποιότητα στα απαιτούμενα υψηλά επίπεδα. Η τροφοδοσία των επεξεργασμένων υγρών γίνεται στο άνω μέρος του φίλτρου, ενώ τα φιλτραρισμένα υγρά συγκεντρώνονται από ειδικό συλλέκτη στον πυθμένα του φίλτρου. Η αντίστροφη πλύση του φίλτρου γίνεται με νερό από την τριτοβάθμια εκροή, μία φορά την εβδομάδα περίπου και αυτό επιτυγχάνεται με έναν απλό χειρισμό βανών. Για τον σκοπό αυτό η φυγοκεντρική αντλία τροφοδοσίας του φίλτρου έχει τη δυνατότητα, με κατάλληλο χειρισμό δικλείδων να αναρροφά από μικρή πλευρική δεξαμενή αποθήκευσης καθαρών και να οδηγεί την ροή από τον πυθμένα στη στέψη του δοχείου φίλτρανσης.

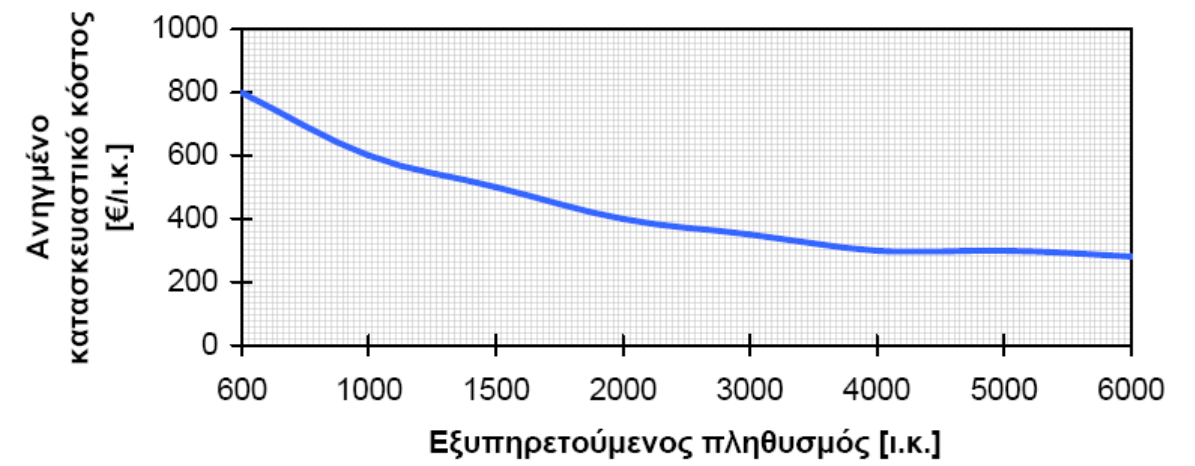


**Εικόνα 3.5 :** Εγκατεστημένη μονάδα εν λειτουργία, για εξυπηρέτηση 500 ι.κ. με πρόβλεψη για επέκταση έως και 1.300 ι.κ.

### 3.6. Οικονομικά στοιχεία

Στο διάγραμμα 3.6 που ακολουθεί φαίνεται το ανηγμένο κατασκευαστικό κόστος μίας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων με συμπαγείς προκατασκευασμένες μονάδες και βιοαντιδραστήρες M.B.B.R., σε συνάρτηση με τους εξυπηρετούμενους κατοίκους από την εγκατάσταση. Όπως είναι φανερό από την παρακάτω γραφική παραστάσεις, το ανηγμένο κατασκευαστικό κόστος μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της δυναμικότητας μιας εγκατάστασης.

**Διάγραμμα 1. Ανηγμένο κατασκευαστικό κόστος σε συνάρτηση με τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό**



## 4<sup>0</sup> Κεφάλαιο

### “ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”

#### 4.1 Εισαγωγή

Το νερό και οι διαδικασίες επεξεργασίας υγρών λυμάτων είναι πηγές ενέργειας, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 30 έως 80 τοις εκατό του κόστους παραγωγής για τη βιομηχανία. Με αυτά τα δεδομένα, οι εταιρείες συμφωνούν για την ανάγκη να προσδιοριστεί το κόστος αποτελεσματικών και βιώσιμων τρόπων παραγωγής ενέργειας για να μειώσουν την εξάρτησή της από τα ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας, τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, τη διασφάλιση της ασφάλειας του εφοδιασμού ενέργειας και την αντιστάθμιση του κόστους της ενέργειας όλο και περισσότερο.

#### 4.2 Αντικατάσταση της πρωτοβάθμιας καθίζησης με επεξεργασία με υφασμάτινα φίλτρα για την ανάκτηση σωματιδίων με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας

Πρόκειται για μία σχετικά πρόσφατα ανεπτυγμένη εφαρμογή η οποία περιλαμβάνει την αντικατάσταση των συμβατικών πρωτοβάθμιων δεξαμενών καθίζησης με υφασμάτινα φίλτρα. Η επεξεργασία με τη χρήση υφασμάτων φίλτρων 200 μ m μπορεί να οδηγήσει σε βαθμό επεξεργασίας ισοδύναμο ή καλύτερο από την πρωτοβάθμια καθίζηση. Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι το χαρτί υγείας που κατακρατείται από ένα υφασμάτινο φίλτρο 200 μm λειτουργεί ως δευτερεύον φίλτρο για την απομάκρυνση των λιπών και των ελαίων. Τα στερεά που απομακρύνονται από το υφασμάτινο φίλτρο, συμπιέζονται ώστε να αποστραγγιστούν (H. Leverenz, G. Tchobanoglous, Gikas, 2010).

Ανάλογα με την εφαρμογή και το βαθμό συμπίεσης, μπορούν να επιτευχθούν συγκεντρώσεις στερεών ίσες με 30% και άνω. Αυτό το ρεύμα στερεών, αποτελούμενο από χαρτί υγείας, υπολείμματα τροφίμων, περιττώματα, λίπη, έλαια και άλλα οργανικά στερεά, όταν ξηραθεί, έχει ενεργειακό περιεχόμενο που είναι συγκρίσιμο με εκείνο του μαλακού ξύλου (περίπου 1516 MJ/kg στερεών), και μπορεί να υποστεί περαιτέρω αφυδάτωση ή (ηλιακή) ξήρανση και να παράγει ενέργεια μέσω μίας διεργασίας αποτέφρωσης ή αεριοποίησης, η οποία μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί από την ίδια την εγκατάσταση (H. Leverenz, G. Tchobanoglous, Gikas, 2010).

Ένα θέμα που έχει ανακύψει είναι το κατά πόσον θα υπάρχει αρκετή οργανική ύλη, που θα έχει απομείνει στα φιλτραρισμένα λύματα, για την διεργασία βιολογικής απονιτροποίησης, εάν μεγάλο μέρος της οργανικής ύλης έχει απομακρυνθεί με το λεπτό φίλτρο. Η διαχείριση του προβλήματος του περιεχόμενου άνθρακα μπορεί να γίνει ανάλογα με το βαθμό συμπίεσης στον οποίο υπόκεινται τα φιλτραρισμένα στερεά. Αν εφαρμοστεί η μέγιστη πίεση κατά τη διάρκεια

συμπύεσης για την απομάκρυνση του οργανικού υλικού από το φίλτρο, τότε το υγρό που επιστρέφει στο ρεύμα λυμάτων που εισρέει στο φίλτρο θα είναι πλούσιο σε οργανική ύλη (H. Leverenz, G. Tchobanoglous, Gikas, 2010).

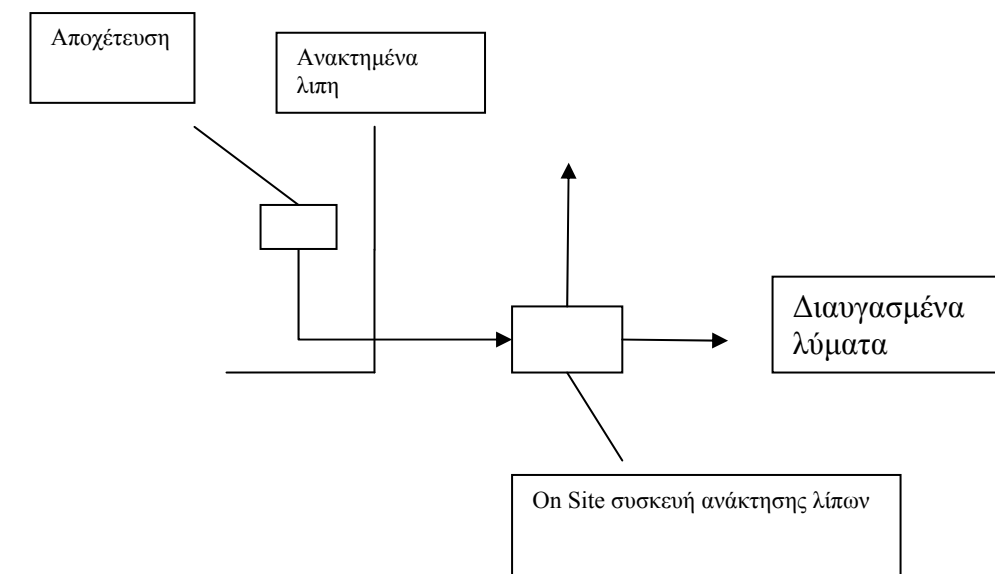
Πέραν της απλούστευσης του διαγράμματος ροής των διεργασιών επεξεργασίας, η χρήση ενός υφασμάτινου φίλτρου έχει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά τη διεργασία βιολογικής επεξεργασίας. Η χρήση υφασμάτινων φίλτρων μεταβάλλει το μέγεθος των σωματιδίων και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων των λυμάτων στα οποία εφαρμόζεται η διεργασία βιολογικής επεξεργασίας. Από νωρίς είχε αναγνωρισθεί ότι η κινητική της επεξεργασίας των λυμάτων επηρεάζεται από το μέγεθος των σωματιδίων (Balmat, 1957). Μειώνοντας το μέγεθος των σωματιδίων, ενισχύεται η απόδοση της διεργασίας βιολογικής επεξεργασίας. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της χρήσης του υφασμάτινου φίλτρου είναι ότι ενδέχεται να ευνοεί την εφαρμογή της διεργασίας Αναπνοχ για την απομάκρυνση του αζώτου (Mulder et al., 1995; Strous et al., 1997).

#### 4.2.1 Αποκεντρωμένα συστήματα στις ΜΕΛ για την ανάκτηση ενέργειας

Τα κύρια στοιχεία ενός δικτύου λυμάτων είναι οι αγωγοί συλλογής των λυμάτων, τα αντλιοστάσια και οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Ανάλογα με την τοπογραφία μίας περιοχής μπορεί να απαιτούνται ένα ή περισσότερα αντλιοστάσια. Γενικά, μέχρι πρόσφατα, ήταν συνήθης η πρακτική να υπάρχει μία κεντρική μονάδα επεξεργασίας λυμάτων. Συνήθως όμως, το ενεργειακό περιεχόμενο των λυμάτων δεν ανακτάται ή ανακτάται μερικώς όπου λαμβάνει χώρα η αναερόβια χώνευση των καταλοίπων της επεξεργασίας, με αποτέλεσμα μία σημαντική ποσότητα ενέργειας των λυμάτων να μην αξιοποιείται και να θέτει πρόσθετες απαιτήσεις στα συστήματα αερισμού κατά τη διάρκεια της αερόβιας επεξεργασίας. Επιπλέον, ένα μεγάλο μέρος του ανακτήσιμου ενεργειακού περιεχομένου των λυμάτων χάνεται κατά τη διάρκεια της μεταφοράς των λυμάτων στα συστήματα συλλογής. Για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις, εξετάζεται η δημιουργία υβριδικών συστημάτων λυμάτων που χρησιμοποιούν αποκεντρωμένες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων στις αστικές περιοχές, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν ευκαιρίες για αποτελεσματική επαναχρησιμοποίηση νερού (H. Leverenz, G. Tchobanoglous, 2009). Αυτές οι αποκεντρωμένες μονάδες επεξεργασίας περιλαμβάνουν την επεξεργασία των λυμάτων με λεπτά φίλτρα για την απομάκρυνση λιπών, ελαίων και καύσιμων συστατικών των λυμάτων για την παραγωγή ενέργειας. Πέρα από την ανάκτηση οργανικής ύλης για την παραγωγή ενέργειας, ένα επιπλέον όφελος της αποκεντρωμένης διεργασίας φίλτρανσης είναι η σημαντική μείωση του εισρέοντος οργανικού φορτίου στις υφιστάμενες ΜΕΛ, η αύξηση της δυναμικότητας και η μείωση των συνθηκών υπερφόρτωσης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Επιπρόσθετα, προβλέπεται ότι η μεγάλης κλίμακας ανάκτηση ενέργειας από τα λύματα θα μειώσει το αποτύπωμα του άνθρακα των συστημάτων διαχείρισης υγρών αποβλήτων. Με βάση κάποιες πρώτες εκτιμήσεις, το οργανικό φορτίο μπορεί να μειωθεί έως και 50%. Η μείωση του οργανικού φορτίου μπορεί να ωφελήσει ΜΕΛ οι οποίες έχουν ασταθή λειτουργία εξαιτίας συνθηκών υπερφόρτωσης ή διακύμανσης του φορτίου. Η μείωση του φορτίου μπορεί, επίσης, να μειώσει την ανάγκη δημιουργίας νέων ΜΕΛ, με συνέπεια τη μείωση της κατανάλωσης πόρων και τη βελτίωση της βιωσιμότητας της διεργασίας. Λόγω του ότι η ιδέα ανάκτησης συστατικών από τα λύματα πριν τη βιολογική επεξεργασία είναι σχετικά καινούρια, η εφαρμογή, η οικονομική σκοπιμότητα και οι κανονιστικές προκλήσεις δεν έχουν ακόμη εξεταστεί λεπτομερώς, ωστόσο οι συνέπειες αυτής της προσέγγισης είναι σημαντικές (H. Leverenz, G. Tchobanoglous, 2009).

#### 4.2.1.1. Αποκεντρωμένη ανάκτηση λιπών και ελαίων για την παραγωγή βιοντίζελ και ενέργειας

Οι παγίδες λιπών (ή λιποσυλλέκτες) χρησιμοποιούνται από το παρελθόν για την κατακράτηση των λιπών σκούρου χρώματος και τον εμπόδιο εισόδου τους στα συστήματα συλλογής λυμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, καθώς μπορεί να αποφράξουν ή να προκαλέσουν υπερχειλίση των αποχετευτικών συστημάτων. Ωστόσο, η απόδοση των συμβατικών παγίδων λιπών, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι συνήθως εφαρμόζεται ανεπαρκής σχεδιασμός και συντήρηση, έχει μειώσει την αποτελεσματικότητα των συστημάτων αυτών. Νέα σχέδια συστημάτων παγίδευσης και κατακράτησης λιπών είναι υπό ανάπτυξη, τα οποία αυτόματα θα συλλέγουν και θα απομακρύνουν τα λίπη, βελτιώνοντας σε μεγάλο βαθμό το ποσοστό απομάκρυνσης λιπών και μειώνοντας τις αντιδράσεις υδρόλυσης οι οποίες επηρεάζουν την ποιότητα των λιπών. Σε πολλές πόλεις αξιολογείται η δυνατότητα εκτεταμένης εγκατάστασης τέτοιων λιποσυλλεκτών νέας γενιάς σε εμπορικές και σε αστικές περιοχές. Τα λίπη στη συνέχεια θα συλλέγονται και θα οδηγούνται σε κατάλληλες εγκαταστάσεις για την παραγωγή καύσιμου βιοντίζελ και/ή την αναερόβια χώνευση τους. Προβλέπεται ότι η ετήσια παραγωγή λιπών σκούρου χρώματος θα είναι περίπου ίση με 7,6 L/άτομο στις αστικές περιοχές, τα οποία θα μπορούν να μετατραπούν σε μία περίπου ίση ποσότητα βιοντίζελ (H. Leverenz, G. Tchobanoglous, 2009).



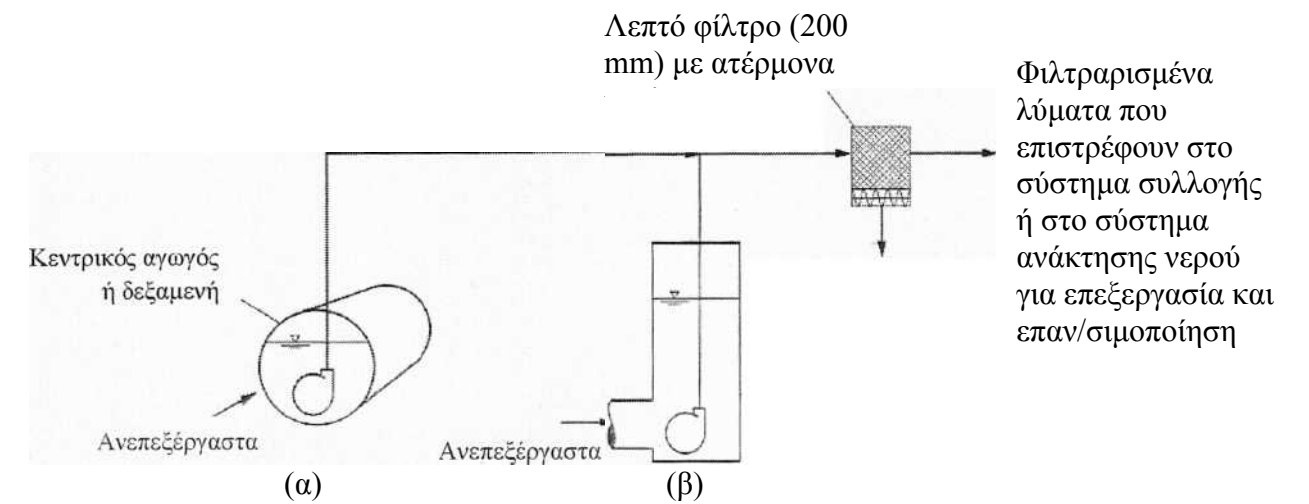
**Σχήμα 4.1:** Σχηματική απεικόνιση ενός αποκεντρωμένου συστήματος ανάκτησης λιπών και ελαίων (H. Leverenz, G. Tchobanoglous, 2009).

#### 4.2.1.2 Αποκεντρωμένη ανάκτηση καύσιμων συστατικών των λυμάτων για την παραγωγή ενέργειας

Η εναπόθεση και συσσώρευση στερεών στα συστήματα συλλογής υγρών αποβλήτων έχει ως αποτέλεσμα την απόφραξη των αγωγών και συμβάλλει στην εμφάνιση περιστατικών υπερχειλίσης. Επιπρόσθετα, η ανάκτηση ενέργειας από τα συστατικά των λυμάτων είναι πιο

δύσκολη μετά τη μεταφορά τους μέσω του συστήματος συλλογής λυμάτων, διότι, καθώς τα λύματα μετακινούνται δια μέσου των συστημάτων συλλογής, το μέγεθος των σωματιδίων μειώνεται λόγω τριβών, ανάμιξης και υγροποίησης, και επιπλέον, ένα κλάσμα της χημικής ενέργειας χάνεται κατά τη βιολογική μετατροπή. Με τη χρήση λεπτών (υφασμάτων) φίλτρων στους κεντρικούς αγωγούς ή στις δεξαμενές συλλογής (αποκεντρωμένων μονάδων επεξεργασίας) και στα αντλιοστάσια μπορούν να ανακτηθούν σωματίδια ανάντη του συστήματος συλλογής, πριν την εναπόθεση και μείωση του μεγέθους τους, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να υποστούν περαιτέρω αφυδάτωση και να καούν για την παραγωγή ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτών των φίλτρων στις αποκεντρωμένες μονάδες επεξεργασίας είναι παρόμοια με εκείνα της εφαρμογής υφασμάτων φίλτρων στις ΜΕΛ. Τα διαφορετικά καύσιμα έχουν και διαφορετικό αδρανιακό περιεχόμενο, επομένως καίγονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες φλόγας, γεγονός που έχει επίδραση στο σχηματισμό των NO<sub>x</sub>. Ο άνθρακας και τα βαριά πετρελαϊκά έλαια δίνουν υψηλότερα επίπεδα εκπομπών NO<sub>x</sub> σε σχέση με τα ελαφρότερα πετρελαϊκά καύσιμα και το φυσικό αέριο, και αυτό απεικονίζεται στην αντιρρυπαντική/περιβαλλοντική νομοθεσία που καθορίζει διαφορετικά όρια εκπομπών για τους διαφορετικούς τύπους καυσίμων (η νομοθεσία θέτει επίσης όρια στις εκπομπές SO<sub>2</sub>). Η παρουσία αυτών των οξειδίων στην ατμόσφαιρα θεωρείται ότι έχει επιβλαβή αποτελέσματα και υπάρχει ένας γενικός στόχος ελαχιστοποίησης των εκπομπών NO<sub>x</sub> από όλες τις εγκαταστάσεις καύσης, συμπεριλαμβανομένων και των μονάδων ΣΗΘ. Η παραγωγή ενέργειας ε καύση συμβατικών ορυκτών καυσίμων και προϊόντων τους είναι η συνηθέστερη μέθοδος παραγωγής διαφόρων μορφών ενέργειας (ηλεκτρική, θερμική κλπ.). Είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα οξείδωσης και αναγωγής.

Κατά την καύση, επειδή οι αντιδράσεις του άνθρακα και του υδρογόνου με το οξυγόνο του αέρα προς παραγωγή CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O είναι εξώθερμες, παράγεται ενέργεια υπό μορφή θερμότητας και φωτεινής ακτινοβολίας (φώς). Μέρος της παραγόμενης θερμότητας καταναλώνεται για τη διατήρηση του νερού υπό μορφή υδρατμών και απάγεται με τα καπναέρια στο περιβάλλον και η υπόλοιπη αξιοποιείται ως θερμική ενέργεια ή μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας (πχ. ηλεκτρική), αφού όμως προηγουμένως η θερμική ενέργεια μετατρέψει ποσότητα νερού σε ατμό (ατμοηλεκτρικά εργοστάσια). Τα αέρια της καύσης είναι CO<sub>2</sub>, CO, υδρατμοί (H<sub>2</sub>O) και NO<sub>x</sub> (μείγμα NO και NO<sub>2</sub>), SO<sub>2</sub> εκπέμπονται μέσω των καμινάδων των σταθμών παραγωγής ενέργειας στην ατμόσφαιρα με δέσμευση των λεπτομερών εκπομπών (λεπτομερή τεμαχίδια τέφρας) ή επικίνδυνων αερίων. Οι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο, έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων και τα μόνα «καυσαέρια» που εκλύουν είναι ο αχρησιμοποίητος αέρας και το νερό. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές στα μέσα μεταφοράς, σε εσωτερικούς χώρους και στα υποβρύχια. Παρόλα αυτά όμως το υδρογόνο δεν είναι ένα στοιχείο που το συναντούμε ελεύθερο στη φύση. Επομένως σε μερικές εφαρμογές απαιτείται ένα προστάδιο επεξεργασίας καυσίμου με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου από μεθανόλη. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν εκπομπές κάποιων καυσαερίων μεταξύ των οποίων και διοξείδιο του άνθρακα. Γενικά αυτές οι εκπομπές είναι χαμηλότερες σε σχέση με εκείνες που προέρχονται από τις συμβατικές τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας



**Σχήμα 4.2:** Σχηματική απεικόνιση των διαφόρων μορφών αποκεντρωμένων συστημάτων ανάκτησης ενέργειας, (α) κεντρικός αγωγός ή δεξαμενή συλλογής και (β) συστέγαση αντλιοστασίου με σύστημα φιλτραρίσματος. Το χαρτί που απομακρύνεται από το φίλτρο λειτουργεί ως δευτερεύον.

#### 4.3. Ανάκτηση θερμικής ενέργειας από τα ανεπεξέργαστα λύματα

Στις ΜΕΛ υπάρχει μεγάλη ποσότητα θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας αποθηκευμένη στα λύματα. Η υψηλότερη θερμοκρασία τους (περίπου 60°C) σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι αυτή που καθιστά τα λύματα ως μία πολύτιμη πηγή ενέργειας. Η ανάκτηση της περίσσειας θερμότητας μπορεί να γίνει από τα ανεπεξέργαστα λύματα που εισέρχονται σε μία μονάδα ή από ροές λυμάτων διεργασιών επεξεργασίας, όπου η ανάκτηση θερμότητας είναι εφικτή. Το ποσό θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί από τα ανεπεξέργαστα λύματα εξαρτάται από τη θερμοκρασία των λυμάτων, την παροχή, το συντελεστή μετάδοσης θερμότητας και την ειδική θερμοχωρητικότητα (NYSERDA, 2010). Η θερμοκρασία των λυμάτων που εισέρχονται σε μία ΜΕΛ πρέπει να είναι πάνω από 10°C έτσι ώστε να μην επηρεαστεί η απόδοση της βιολογικής επεξεργασίας. Συνεπώς, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η αποβαλλόμενη θερμότητα των λυμάτων, θα πρέπει να εντοπίζονται οι θέσεις εντός μίας ΕΕΛ στις οποίες μπορεί να ανακτηθεί θερμότητα πριν την ανάμιξη των διαφόρων ροών λυμάτων, ώστε να αυξηθεί η συνολική διαφορά θερμοκρασίας και το δυναμικό μεταφοράς θερμότητας (NYSERDA, 2010).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την ανάκτηση θερμότητας από τα λύματα, αλλά γενικά χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας ή αντλίες θερμότητας. Τα συστήματα αυτά μεταφέρουν τη θερμική ενέργεια από το ρεύμα λυμάτων σε ένα κλειστό σύστημα σωληνώσεων το οποίο περιέχει ένα εργαζόμενο μέσο, συνήθως νερό ή ένα ψυκτικό μέσο. Αυτό το κλειστό σύστημα σωληνώσεων μεταφέρει στη συνέχεια τη θερμότητα στα σημεία κατανάλωσης (NYSERDA, 2010).

Με τη χρήση των εναλλακτών θερμότητας μπορούν να καλυφθούν οι θερμικές ανάγκες μίας ΜΕΛ. Υπάρχουν διαθέσιμα δύο είδη εναλλακτών θερμότητας: οι εναλλάκτες θερμότητας εντός δεξαμενών (in-tank heat exchangers), οι οποίοι είναι πιο αποδοτικοί, αλλά απαιτούν επιπλέον εξοπλισμό όταν χρησιμοποιούνται για ανάκτηση θερμότητας από ανεπεξέργαστα λύματα, και οι εναλλάκτες θερμότητας εντός αγωγών (in-pipe heat exchangers), οι οποίοι είναι λιγότερο αποδοτικοί. Γενικά, οι εναλλάκτες θερμότητας ανεπεξέργαστων λυμάτων απαιτούν μέτρα για



την απομάκρυνση των στερεών (πχ. εσχάρωση, φίλτραυση) ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος απόφραξης των σωληνώσεων του εναλλάκτη (Wastewater Treatment Made Clear, 2011).

Με τη χρήση των αντλιών θερμότητας μπορούν να καλυφθούν θερμικές αλλά και ψυκτικές ανάγκες μίας ΜΕΑ. Οι αντλίες θερμότητας είναι ουσιαστικά ψύκτες μηχανικής συμπίεσης, οι οποίοι συνήθως λειτουργούν με ηλεκτρικούς κινητήρες. Αποτελούνται από ένα συμπίεστη, ένα συμπυκνωτή, έναν εξατμιστή και τους ανεμιστήρες συμπυκνωτή και εξατμιστή, το σύστημα ελέγχου (αυτοματισμοί), τη στραγγαλιστική διάταξη και τέλος τον μηχανισμό αντιστροφής της λειτουργίας της. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή ότι ένα υγρό όταν εξατμιστεί απορροφά θερμότητα και η απορρόφηση και απόδοση θερμότητας γίνεται με μεταβολή φάσεων (από υγρό σε αέριο και από αέριο σε υγρό) ρευστού, κατάλληλων θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών, του ψυκτικού μέσου. Υπάρχουν και άλλες ψυκτικές διατάξεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις οποίες δεν υπάρχει συμπίεστης αλλά μία πηγή θερμότητας, με αποτέλεσμα να μην καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια. Ένα παράδειγμα τέτοιας διάταξης είναι οι ψύκτες απορρόφησης.

Η ανακτημένη θερμότητα μπορεί να αξιοποιηθεί σε μία ΜΕΑ για τη θέρμανση και το δροσισμό χώρων/κτιρίων, για την παραγωγή ζεστού/κρύου νερού και για τη θέρμανση διεργασιών, όπως η ζήρανση της ιλύος. Ακόμα και αν η θερμότητα δεν επαρκεί για να θερμάνει πλήρως τις διάφορες ροές των διεργασιών επεξεργασίας, η μερική θέρμανση μπορεί να μειώσει το κόστος θέρμανσης και να αποφέρει σημαντικά οφέλη (NYSERDA, 2010). Η ανακτημένη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και εκτός της ΜΕΑ σε τηλεθέρμανση. Η αξιοποίηση της θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας είναι μία πρόκληση για τις ΜΕΑ. Παρόλο που αυτή η εφαρμογή είναι γενικώς αποδεκτή, πολλές φορές δεν χρησιμοποιείται, επειδή η πηγή θερμότητας είναι χαμηλής θερμοκρασίας, και υπάρχει η εσφαλμένη αντίληψη από πολλούς φορείς λειτουργίας ότι η μερική θέρμανση, σε σύγκριση με την πλήρη θέρμανση, είναι ανεπαρκής και μη αποδοτική (NYSERDA, 2010).

Η εφαρμογή αυτή είναι ιδιαίτερος κατάλληλη σε μονάδες που το κόστος αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλό ή/και που δεν διαθέτουν μονάδα αναερόβιας χώνευσης, και συνεπώς δεν παράγουν βιοαέριο. Κατά την εγκατάσταση του εξοπλισμού και των σωληνώσεων και κατά την εκκίνηση υπάρχει πιθανότητα πρόκλησης μικρών διαταραχών. Ο χρόνος αποπληρωμής είναι σχετικά μικρός (λιγότερο από 2 χρόνια), αλλά αυτό ποικίλλει και είναι άμεση συνάρτηση της απόστασης μεταξύ της πηγής θερμότητας και των σημείων κατανάλωσης της ανακτημένης θερμότητας (NYSERDA, 2010).

Παρόλο που αυτή η εφαρμογή χρησιμοποιείται επιτυχώς σε ορισμένες περιοχές, η οικονομική σκοπιμότητα της ανάκτησης θερμικής ενέργειας από τα λύματα εξαρτάται από τη δυνατότητα αξιοποίησης της εξαγόμενης θερμότητας καθ'όλη τη διάρκεια του χρόνου. (H. Leverenz, G. Tchobanoglous, 2009)

#### **4.3.1 Επεξεργασμένα λύματα εκροής**

Τα επεξεργασμένα λύματα εκροής, πριν τη διάθεση τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός υδροηλεκτρικού έργου μικρής κλίμακας ή/και για την ανάκτηση θερμότητας μέσω αντλιών θερμότητας.

##### **4.3.1.1 Υδροηλεκτρικό έργο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας**

Εάν υπάρχει μία υψομετρική διαφορά μεταξύ του σημείου διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων και του σημείου εισροής των ανεπεξέργαστων λυμάτων, αυτή η διαφορά μπορεί να

αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας μέσω μίας μικρής υδροηλεκτρικής μονάδας. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα (μέχρι 10 MW ισχύος) αξιοποιούν τις υδατοπτώσεις, με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ή και σε μηχανική ενέργεια). Αυτές οι μονάδες διαθέτουν γεννήτριες οι οποίες έχουν την ικανότητα να παράγουν μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να επιβαρύνουν το περιβάλλον. Οι μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες γενικά απαιτούν πολύ λίγο χώρο για την εγκατάσταση και λειτουργία τους (Alternate Power.org, 2008), είναι φιλικές προς το περιβάλλον καθώς δεν εκλύονται αέριοι ρύποι, παράγουν ανανεώσιμη ενέργεια και δεν απαιτούν καμία κατανάλωση καυσίμου. Το σύστημα ελέγχου και τα όργανα μέτρησης των μονάδων αυτών είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να μπορούν να συνδεθούν στο σύστημα ελέγχου των ΜΕΛ, επιτρέποντας την πλήρως αυτοματοποιημένη ανεπιτήρητη λειτουργία. Οι υδροστρόβιλοι μετατρέπουν την ενέργεια του επεξεργασμένου λύματος εκροής που πέφτει σε ισχύ περιστρεφόμενου άξονα και διακρίνονται σε υδροστροβίλους δράσεως και σε υδροστροβίλους αντιδράσεως, ανάλογα με τη διαδικασία που χρησιμοποιείται, προκειμένου να μετατραπεί το υδραυλικό ύψος και η παροχή επεξεργασμένου λύματος, σε μηχανική ισχύ. Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως είναι ολικής προσβολής, δηλαδή ολόκληρος ο δρομέας λειτουργεί αξονοσυμμετρικά, ενώ οι υδροστρόβιλοι δράσεως είναι μερικής προσβολής, και σε κάθε χρονική στιγμή τμήμα μόνο του δρομέα συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή. Επίσης οι υδροστρόβιλοι κατηγοριοποιούνται σε υδροστροβίλους μεγάλου, μεσαίου και μικρού υδραυλικού ύψους, ανάλογα προφανώς με το μέγεθος του υδραυλικού ύψους. Στον **Πίνακα 4.1** φαίνονται συνδυαστικά οι πιο συνήθεις τύποι υδροστροβίλων, για τις διάφορες κατηγορίες που αναφέρθηκαν.

	Μεγάλο Υδρ. Ύψος	Μεσαίο Υδρ. Ύψος	Μικρό Υδρ. Ύψος
1.Στρόβιλοι δράσεως	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pelton</li> <li>• Turgo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cross flow</li> <li>• Pelton πολ/απλων δέσμεων υγρού</li> <li>• Turgo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cross flow</li> </ul>
2.Στρόβιλοι Αντιδράσεως		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Francis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αξονικής ροής</li> <li>• Βολβοειδής</li> <li>• Kaplan</li> </ul>

**Πίνακας 4.1:** Κατηγοριοποίηση υδροστροβίλων (Φ. Κατερινόπουλος, 2007).

Η οικονομική σκοπιμότητα μίας τέτοιας επένδυσης εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες (D. Antakyali, R. Rolle, 2010). Με βάση την ποσότητα του επεξεργασμένου νερού εκροής και το υδραυλικό ύψος, η χρήση ενός στροβίλου τυπικά σχεδιασμένου για μικρά υδροηλεκτρικά έργα με κατάλληλο βαθμό απόδοσης φαίνεται να είναι μία βιώσιμη και ενδιαφέρουσα επιλογή.

Το κόστος μιας μικρής υδροηλεκτρικής μονάδας δε μπορεί να υπολογιστεί άμεσα γνωρίζοντας μόνο το μέγεθος της, αφού εξαρτάται και από πολλούς άλλους παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά του ήλεκτρο μηχανολογικού εξοπλισμού που επιλέχθηκαν, τις συνθήκες της εκάστοτε τοποθεσίας, το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε να εργαστεί το προσωπικό κτλ. Έτσι, το κόστος κάθε μικρού υδροηλεκτρικού έργου είναι μοναδικό. Η τοποθεσία και τα χαρακτηριστικά της παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του κόστους, αφού καθορίζουν περίπου το 75% αυτού. Γενικά πάντως, με τις σύγχρονες τεχνολογίες, το συνολικό κόστος μιας μικρής υδροηλεκτρικής μονάδας κυμαίνεται από 1000 έως 2000 € ανά

εγκατεστημένο kW. Η διάρκεια ζωής τους είναι μεγάλη (25 χρόνια και περισσότερο) και ο χρόνος απόσβεσης σχετικά μικρός (10 χρόνια και μικρότερος).

#### 4.3.1.2 Υδροηλεκτρική ενέργεια χαμηλού ύψους

Η Υ.Ε.Χ.Υ είναι ο όρος που χρησιμοποιείται συχνά για ένα σύστημα υδροπτώσης με ένα ύψος μεταξύ 5 και 20m και η υδροηλεκτρική ενέργεια πολύ χαμηλού ύψους χρησιμοποιείται για ένα σύστημα με λιγότερο από 3m. Μια Υ.Ε.Π.Χ.Υ απαιτεί ένα μεγάλο πέρασμα / άνοιγμα για να φιλοξενήσει μεγάλο όγκο ροής, καθιστώντας χαμηλού ύψους τουρμπίνες αναπόφευκτα σε μεγάλο μέγεθος και ακριβές, κατά συνέπεια, δημιουργώντας μια σειρά από επιπλέον μηχανικές προκλήσεις.

Σε αντίθεση, τα χαμηλού ύψους συστήματα υποφέρουν από πολλές διακυμάνσεις ροής, εξαιτίας της διακύμανσης από τα ύψη και τα επίπεδα του νερού που βρίσκεται κάτω από το φράγμα. Αυτή η παραλλαγή μπορεί να σημαίνει ότι τα 3 m μειώνονται σε 1 m, μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία του συστήματος και την ισχύ εξόδου.

Τύπος Τουρμπίνας	Ονομαστικό Ύψος Hr(m)	Χωρητικότητα(MW)
1.Κάθετου σταθερού έλικα	2-20	0,25-15 και πάνω
2.Κάθετου Kaplan (ρυθμιζόμενη λεπίδα έλικα)	2-20	1-15 και πάνω
3.Κάθετου Francis	8-20	0,25-15
Οριζόντιου Francis	8-20 και πάνω	0,25-2
4.Σωληνοειδής (με ρυθμιζόμενες λεπίδες και σταθερές πύλες)	2-18	0,25-15
5.Σωληνοειδής (σταθερές λεπίδες με θυρίδες)	2-18	0,25-15
6.Σφαιρική	2-20	1-15
7.Στρογγυλή με στεφάνι	2-9	1-8
Δεξιάς γωνίας προπέλα οδήγησης	2-18	0,25-2
Ανοικτού τύπου	2-11	0,25-2
Κλειστού αγωγού	2-20	0,25-3
Αντίστροφης Ροής	6-20	0,25-2

**Πίνακας 4.2** Κατηγορίες Τουρμπινών

Τα μέρη με χαμηλό ύψος τείνουν να είναι πιο συχνά σε υδροηλεκτρικά συστήματα με νερά που έχει λιώσει το χιόνι, αλλά μπορεί επίσης να είναι διαθέσιμο σε εκβολές επεξεργασίας λυμάτων. Π.χ στο επίπεδο νοτιοανατολικά της Αγγλίας, η πλειοψηφία των προγραμμάτων υδροηλεκτρικής ενέργειας έχουν ένα ύψος λιγότερο από 3 m.

Για χαμηλές περιοχές, η συμβατική διαδικασία είναι να επιλεγεί και την εγκατασταθεί τουρμπίνα Kaplan, είτε ως μονάδα κάθετου άξονα, μια μονάδα δίσκου δεξιάς γωνίας ή μία τουρμπίνα στρογγυλή ή μια Francis τουρμπίνα αγωγού νερού με ένα ρυθμιζόμενο πτερύγιο, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2. Αν και αυτές οι τουρμπίνες είναι τεχνικά αποτελεσματικές, είναι απαγορευτικά ακριβό για τα μικρότερα συστήματα.

#### 4.4 Ανάκτηση θερμότητας από τα επεξεργασμένα λύματα εκροής

Η θερμική ενέργεια των επεξεργασμένων λυμάτων εκροής μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί σε μία ΜΕΛ, πριν την τελική διάθεσή τους. Η θερμότητα ανακτάται με τη χρήση εναλλακτών θερμότητας ή αντλιών θερμότητας (που λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια) και αξιοποιείται για την κάλυψη θερμικών και ψυκτικών αναγκών στην ΜΕΛ. Στο **Σχήμα 4.4.1** φαίνεται μία διάταξη ψύκτη μηχανικής συμπίεσης (αντλία θερμότητας) για την ανάκτηση θερμότητας από τα επεξεργασμένα λύματα εκροής.

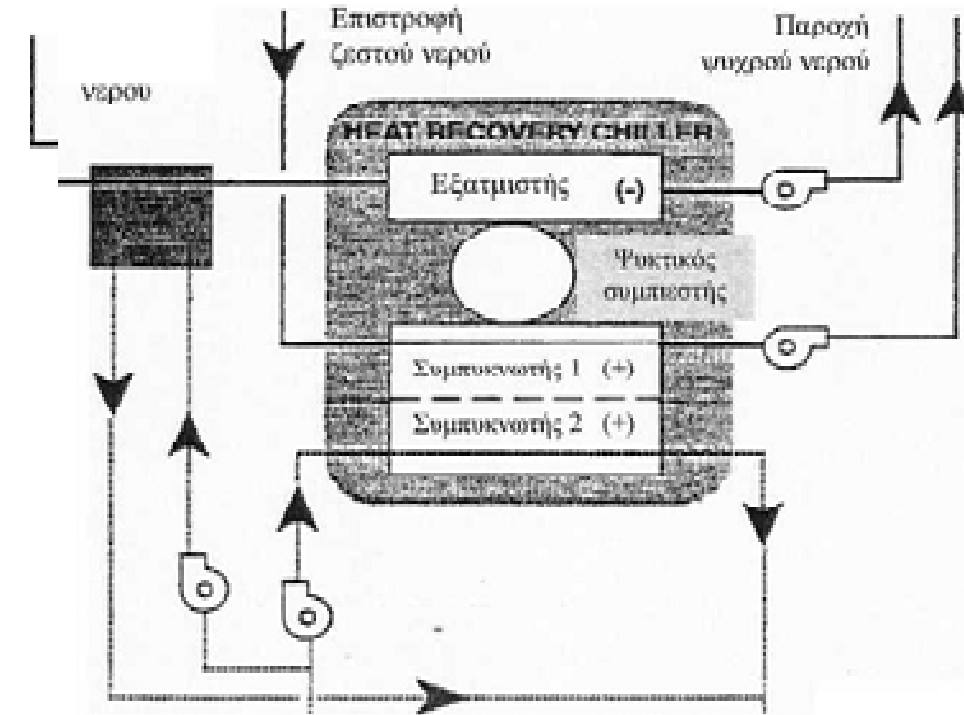
Ότι ισχύει για την ανάκτηση θερμότητας από τα ανεπεξέργαστα λύματα, όσον αφορά τις διατάξεις ανάκτησης θερμότητας και την αξιοποίηση της ανακτημένης θερμότητας σε μία ΜΕΛ, ισχύει και στην περίπτωση της ανάκτησης θερμότητας από τα επεξεργασμένα λύματα εκροής. Οι κύριες διαφορές μεταξύ των δύο εφαρμογών είναι ότι οι εναλλάκτες θερμότητας στην περίπτωση αυτή δεν απαιτούν μηχανισμούς εσχάρωσης και τα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να ψυχθούν σε θερμοκρασίες έως και 6°C. Ωστόσο, το ποσό θερμότητας που ανακτάται πρέπει να είναι ισορροπημένο με ορισμένες απαιτήσεις, όσον αφορά τα ελάχιστα όρια των θερμοκρασιών των επεξεργασμένων λυμάτων, διότι η θερμοκρασία τους μπορεί να επηρεάσει τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, τον τελικό αποδέκτη (περιβάλλον διάθεσης των εξερχόμενων λυμάτων) και την υδρόβια ζωή. Συγκεκριμένα, οι χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να εμποδίσουν τη διάλυση και διασπορά των εξερχόμενων λυμάτων, να προκαλέσουν πήξη των λιπών και των ελαίων στους αποχετευτικούς αγωγούς διάθεσης και να βλάψουν την υδρόβια ζωή (Wastewater Treatment Made Clear, 2011).

##### 4.4.1 Ίλύς

Η λυματολάσπη (ή ίλύς) είναι ένα παραπροϊόν των διεργασιών επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και αποτελείται από ένα μίγμα οργανικών και ανόργανων συστατικών και νερό. Ένα μεγάλο κλάσμα της σύστασης της ίλύος είναι οργανικό με θερμογόνο δύναμη περίπου ίση με 25 MJ/kg-ξηρών στερεών, καθιστώντας την μία σημαντική πηγή ενέργειας με αξιόλογη οικονομική αξία. Λαμβάνοντας υπόψη το αδρανές κλάσμα της ίλύος, η θερμογόνο δύναμη μειώνεται στα 16-20 MJ/kg-ξηρών στερεών για την ανεπεξέργαστη ίλύ, ή 10-14 MJ/kg-ξηρών στερεών για τη χωνεμένη ίλύ (Kott, J., N. Dichtl, 2001). Αυτές οι θερμογόνοι δυνάμεις μπορούν να θεωρηθούν ως τα ανώτερα όρια της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί από την ίλύ (D.J. Lee, J.H. Tay, 2004).

Η ίλύς αρχικά εμφανίζεται ως αιώρημα των υγρών αποβλήτων. Η «πραγματική» θερμογόνο δύναμη αυτού του αιωρήματος είναι ίση με 0.16-0.8 MJ/kg-ίλύος. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη ποσότητα νερού που υπάρχει και την καθιστά πηγή ενέργειας χαμηλής πυκνότητας. Λόγω του γεγονότος ότι η ίλύς έχει υψηλό επίπεδο εντροπίας, η χαμηλής πυκνότητας ενέργεια που περιέχει πρέπει να μετατραπεί σε συμπυκνωμένη μορφή ενέργειας πριν να μπορεί να αξιοποιηθεί σε χρήσιμες εφαρμογές. Οι τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από την ίλύ περιλαμβάνουν διεργασίες με τις οποίες παράγονται διάφορα ενεργειακά προϊόντα. Η πιο εδραιωμένη διεργασία που χρησιμοποιείται είναι η αναερόβια χώνευση, με την οποία παράγεται το καύσιμο βιοαέριο. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες για τη βελτιστοποίηση της αναερόβιας χώνευσης και την αύξηση της παραγωγής βιοαερίου, όπως είναι η θερμική υδρόλυση, η επεξεργασία με υπερήχους και η επεξεργασία με ένζυμα. Άλλες διεργασίες αξιοποίησης του ενεργειακού περιεχομένου της ίλύος είναι οι θερμικές διεργασίες. Οι θερμικές διεργασίες επεξεργάζονται την ίλύ σε υψηλές θερμοκρασίες, είτε σε συνθήκες

παρουσίας οξυγόνου, όπως η αποτέφρωση και η υγρή οξείδωση, είτε σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου, όπως η πυρόλυση και η αεριοποίηση.



**Σχήμα 4.3:** Διάταξη ψύκτη μηχανικής συμπίεσης για την ανάκτηση θερμότητας από τα επεξεργασμένα λύματα και την αξιοποίησή της για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης και ψύξης σε μία ΜΕΛ (SAIC, 1995).

#### 4.5 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μία ελκυστική μέθοδος βιολογικής σταθεροποίησης και μείωσης του όγκου της ιλύος διότι προσφέρει οικονομικά και ενεργειακά οφέλη σε μία ΜΕΛ λόγω της παραγωγής του καύσιμου βιοαερίου το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας στην ίδια τη μονάδα.

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης λαμβάνει χώρα σε κλειστές δεξαμενές, τους χωνευτές, και μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερα στάδια, (1) την υδρόλυση, (2) την οξεογένεση ή ζύμωση, (3) την αναερόβια οξείδωση ή οξικογένεση, και (4) την μεθανογένεση (Davidsson 2007; Leksell. 2005). Κατά το στάδιο της υδρόλυσης γίνεται μετατροπή των σύνθετων οργανικών πολυμερών της ιλύος σε διαλυτά οργανικά μόρια, όπως είναι τα αμινοξέα, τα σάκχαρα και τα λιπαρά οξέα με τη βοήθεια υδρολυτικών βακτηρίων (Davidsson, 2007). Η υδρόλυση είναι σχετικά αργή και μπορεί να περιοριστεί από τη διαλυτότητα των αποβλήτων που περιέχουν μεγάλα σωματίδια με μικρή αναλογία επιφάνειας προς όγκο, όπως για παράδειγμα η λιγνίνη (Borggren, 2007). Κατά το στάδιο της ζύμωσης, ειδικά οξεογενή βακτήρια μετατρέπουν τα σάκχαρα και τα αμινοξέα σε διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο, αμμωνία και οργανικά οξέα. Κατά το στάδιο της αναερόβιας οξείδωσης, ειδικά οξικογενή βακτήρια μετατρέπουν τα οργανικά οξέα που έχουν απομείνει σε οξικό οξύ και πρόσθετη αμμωνία, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα (Wikipedia, 2011). Τέλος, στο τελευταίο

στάδιο, τα οργανικά οξέα μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα από μεθανοβακτήρια. Για την ομαλή λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη δυναμικής ισορροπίας, δηλαδή ο ρυθμός σχηματισμού των οργανικών οξέων να είναι ίδιος με το ρυθμό μετατροπής του σε μεθάνιο .

Οι κυριότερες παράμετροι που ρυθμίζουν τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης και κατ'επέκταση τη λειτουργία των αναερόβιων χωνευτών και την παραγωγή βιοαερίου χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες (Astrid du Petit Thouars, 2007):

- Τα χαρακτηριστικά της ιλύος, που είναι τα ολικά στερεά (TS), τα πτητικά στερεά (VS) και το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD).
- Τις λειτουργικές παραμέτρους, που είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής, η θερμοκρασία, το ποσοστό οργανικού φορτίου, η ανάδευση, ο σχεδιασμός και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του χωνευτή, και ο ρυθμός (και η κανονικότητα) της τροφοδοσίας.
- Τις παραμέτρους ελέγχου, που είναι ο ρυθμός παραγωγής βιοαερίου, η σύσταση του βιοαερίου, το pH, η αλκαλικότητα και η συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων.

Μειονέκτημα της αναερόβιας χώνευσης είναι το υψηλό κόστος επένδυσης, με αποτέλεσμα η επιλογή αυτή να εφαρμόζεται σε σχετικά μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Αγγελάκης κ.α., 2005).

#### 4.5.1 Βελτιστοποίηση της αναερόβιας χώνευσης και αύξηση της παραγωγής Βιοαερίου

Η εμπειρία όσον αφορά τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις χώνευσης βιοστερεών έχει δείξει ότι υπάρχουν δυνατότητες λειτουργικής βελτιστοποίησης της παραγωγής βιοαερίου και στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της παραγωγής. Η βελτιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου είναι σημαντική διότι συμβάλλει στην ενεργειακή αυτάρκεια των ΜΕΛ και στην ελαχιστοποίηση των εξωτερικών δαπανών για την αγορά φυσικού αερίου και άλλων καυσίμων, καθώς ανακτάται και χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση μεγαλύτερη ποσότητα βιοαερίου.

Οι κυριότεροι τρόποι βελτίωσης της απόδοσης της αναερόβιας χώνευσης και ενίσχυσης της παραγωγής βιοαερίου είναι (1) η βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας της διεργασίας, (2) η προεπεξεργασία της ιλύος πριν τη χώνευση και (3) η συν-χώνευση της ιλύος μαζί με άλλα απόβλητα. Οι τρόποι αυτοί προσφέρουν το επιπλέον όφελος της βελτίωσης της ποιότητας της χωνεμένης ιλύος για τις διεργασίες επεξεργασίας και διάθεσης της ιλύος που ακολουθούν (NYSERDA, 2010).

Οι παραπάνω τεχνικές βελτιστοποίησης δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, αλλά κερδίζουν συνεχώς το ενδιαφέρον της βιομηχανίας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Η εξοικονόμηση ενέργειας που θα προκύψει από την εφαρμογή τους είναι ανάλογη της πρόσθετης ποσότητας βιοαερίου που θα παραχθεί και θα αξιοποιηθεί στην ίδια την ΜΕΛ. Επιπλέον, η αποδοχή άλλων αποβλήτων μπορεί να αποφέρει έσοδα στην εγκατάσταση. Οι επιπτώσεις στην παραγωγικότητα κατά την εγκατάσταση του εξοπλισμού είναι ελάχιστες, όμως το οικονομικό όφελος της αυξημένης παραγωγής βιοαερίου μπορεί να μειωθεί από το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού των προτεινόμενων εφαρμογών (NYSERDA, 2010).

#### 4.5.1.1 Βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας της διεργασίας αναερόβιας χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δύο εύρη θερμοκρασιών ανάλογα με το είδος των βακτηριδίων, έτσι έχουμε τη μεσόφιλη αναερόβια χώνευση που λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες 30-38°C (μεσόφιλα βακτηρίδια) και τη θερμόφιλη αναερόβια χώνευση που λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες 49-57°C (θερμόφιλα βακτηρίδια). Συνήθως, προτιμάται η μεσόφιλη αναερόβια χώνευση λόγω του ότι τα συστήματα θερμόφιλης χώνευσης θεωρούνται λιγότερο σταθερά και έχουν υψηλότερες απαιτήσεις ενέργειας ώστε να επιτευχθούν οι κατάλληλες λειτουργικές θερμοκρασίες. Από την άλλη, η αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των χωνευτών στη θερμόφιλη χώνευση αυξάνει το ρυθμό καταστροφής των πτητικών στερεών στην ιλύ με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός της αντίδρασης και να επιταχύνεται η παραγωγή βιοαερίου. Επιπλέον, η λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες επιτυγχάνει καλύτερη αποστείρωση των χωνεμένων βιοστερεών (I. Ferrer, S. Ponsa, F. Vasquez, X. Font, 2008).

Ενός τρόπος βελτίωσης της διεργασίας αναερόβιας χώνευσης και αύξησης της παραγωγής βιοαερίου είναι η μετάβαση από την αναερόβια χώνευση μίας φάσης στην χώνευση δύο φάσεων. Κατά τη χώνευση δύο φάσεων διαχωρίζεται το στάδιο της οξικογένεσης από το στάδιο της μεθανογένεσης, έτσι ώστε κάθε φάση να λειτουργεί πιο αποδοτικά και να επιτευχθούν περισσότερα οφέλη από την συνολική διεργασία της χώνευσης (V.J. Srivastava, 1994). Στην αναερόβια χώνευση δύο φάσεων υπάρχουν δύο χωνευτές, ο ένας λειτουργεί σε θερμόφιλες θερμοκρασίες και πραγματοποιούνται οι φάσεις υδρόλυσης, οξεογένεσης και οξικογένεσης και ο άλλος λειτουργεί σε μεσόφιλες θερμοκρασίες και πραγματοποιείται η φάση της μεθανογένεσης. Η ιλύς αρχικά θερμαίνεται διερχόμενη από έναν εναλλάκτη θερμότητας ιλύος/νερού και έπειτα τροφοδοτείται στον πρώτο (θερμόφιλο) χωνευτή όπου παραμένει για περίπου 2 ημέρες. Στο θερμόφιλο χωνευτή, η ιλύς ρευστοποιείται και αποσυντίθενται σε χαμηλού μοριακού βάρους οξέα και σε άλλα ενδιάμεσα προϊόντα. Η υγρή/στερεή εκροή του θερμόφιλου χωνευτή διέρχεται από έναν εναλλάκτη θερμότητας ιλύος/ιλύος για να ψυχθεί, να ανακτηθεί η θερμότητα και να θερμανθεί μερικώς η ανεπεξέργαστη ιλύς (που εισέρχεται στον πρώτο χωνευτή) και στη συνέχεια τροφοδοτείται στον δεύτερο (μεσόφιλο) χωνευτή όπου παραμένει για περίπου 10 ημέρες. Στο μεσόφιλο χωνευτή λαμβάνει χώρα η καταστροφή των πτητικών στερεών και η παραγωγή του βιοαερίου (Infilco Degremont Inc., 2002).

Το πλεονέκτημα του συστήματος αναερόβιας χώνευσης δύο φάσεων είναι ότι συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της μεσόφιλης και θερμόφιλης χώνευσης, ενώ επιπλέον μειώνεται ο συνολικός υδραυλικός χρόνος παραμονής και αυξάνεται το ποσοστό του μεθανίου στη σύσταση του βιοαερίου, με συνέπεια να αυξάνεται η απόδοση της διεργασίας και να αυξάνεται η ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι το αυξημένο κόστος για την αγορά και εγκατάσταση του εξοπλισμού το οποίο πολλές φορές μπορεί να μην αντισταθμίζεται από τα ενεργειακά και οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή.

#### 4.5.1.2 Προεπεξεργασία της ιλύος πριν τη χώνευση

Το στάδιο της υδρόλυσης είναι συχνά ένας περιοριστικός παράγοντας στην αναερόβια χώνευση διότι είναι το στάδιο κατά το οποίο τα σύνθετα οργανικά μόρια (οργανικά πολυμερή) που περιέχονται στην βιολογική ιλύ διασπώνται σε απλά σάκχαρα, αμινοξέα και λιπαρά οξέα προκειμένου το ενεργειακό δυναμικό τους να γίνει διαθέσιμο στα βακτήρια των χωνευτών. Η υδρόλυση μπορεί να βελτιωθεί μέσω της προεπεξεργασίας της ιλύος για να ενισχυθεί η

ικανότητα χώνευσης της ιλύος από τους μικροοργανισμούς και κατά συνέπεια να βελτιωθεί η απόδοση της διεργασίας χώνευσης και να αυξηθεί η παραγωγή βιοαερίου. Υπάρχουν διαθέσιμες ποικίλες μέθοδοι προεπεξεργασίας της ιλύος, οι οποίες μπορεί να είναι χημικές, φυσικές ή βιολογικές μέθοδοι. Τρεις από τις πλέον υποσχόμενες μεθόδους είναι η θερμική υδρόλυση, η επεξεργασία με υπερήχους και η προσθήκη ενζύμων (NYSERDA, 2010).

#### 4.5.2 Θερμική υδρόλυση

Η θερμική υδρόλυση είναι μία φυσική μέθοδος κατά την οποία η ιλύς αφυδατώνεται πριν τη χώνευση και με αυτόν τον τρόπο αξιοποιείται η ενεργειακή αξία της ιλύος, σε σύγκριση με την απλή χώνευση, με αποτέλεσμα να προκύπτει μία καθαρή εισροή ενέργειας. Η θερμική υδρόλυση χρησιμοποιεί θερμοκρασία και πίεση για να προκαλέσει υδρόλυση και να διασπάσει το κυτταρικό υλικό. Η θερμική προεπεξεργασία διαλύει ουσιαστικά τα οργανικά υλικά της ιλύος και αυξάνει τη βιοδιασπασιμότητά τους. Η θερμική υδρόλυση που εφαρμόζεται σε πλήρη κλίμακα γενικά πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες στο εύρος των 160-180°C και πίεση περίπου ίση με 8.4 atm με σύντομο χρονικό διάστημα επαφής γύρω στη 0.5-1 h. Υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές φαίνεται ότι περιορίζουν τη βελτίωση της παραγωγής μεθανίου εξαιτίας του σχηματισμού δύσκολα ή αργά βιοδιασπώμενων προϊόντων (CH<sub>2</sub>M HILL, 2003). Τα συστήματα που έχουν κυκλοφορήσει μέχρι σήμερα στο εμπόριο βασίζονται σε έναν ασυνεχή (κατά παρτίδες) τρόπο λειτουργίας. Τα συστήματα συνεχούς θερμικής υδρόλυσης βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Το σύστημα Cambi διατίθεται προς το παρόν για εφαρμογή σε πλήρη κλίμακα, το οποίο βασίζεται στον ασυνεχή τρόπο λειτουργίας και αποτελείται από μία σειρά τριών δεξαμενών υδρόλυσης υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας. Επιπλέον, οι νεότερες τεχνολογίες έχουν αντικαταστήσει τους εναλλάκτες θερμότητας με συστήματα άμεσης έγχυσης ατμού (CH<sub>2</sub>M HILL, 2003).

Η τεχνολογία της θερμικής υδρόλυσης μπορεί, είτε να τοποθετηθεί μπροστά από υπάρχοντες χωνευτές, είτε να ενσωματωθεί σε νέες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Τα βασικά πλεονεκτήματα της θερμικής υδρόλυσης περιλαμβάνουν τη δυνατότητα να λειτουργούν οι χωνευτές σε υψηλές συγκεντρώσεις στερεών τροφοδοσίας (της τάξης του 10%) λόγω βελτίωσης του ιξώδους μέσω της διεργασίας, τη βελτίωση του βαθμού αφυδάτωσης των βιοστερεών (περίπου 30% ξηρά στερεά) με αποτέλεσμα να μειώνεται ο όγκος των προς διάθεση στερεών, και την δυνατότητα επίτευξης μείωσης των παθογόνων μικροοργανισμών Κλάσης Α μέσω της λειτουργίας της διεργασίας ασυνεχούς επεξεργασίας. Ακόμη, με τη θερμική προ επεξεργασία επιτυγχάνεται αύξηση του ποσοστού καταστροφής των βιοστερεών (περίπου 40-50% αύξηση) και αύξηση του ποσοστού καταστροφής των πτητικών στερεών (γύρω στο 50%), που οδηγεί σε αύξηση της παραγωγής βιοαερίου σε ποσοστό 40-50% (CH<sub>2</sub>M HILL, 2003).

Το κόστος του εξοπλισμού της θερμικής υδρόλυσης είναι υψηλό, καθώς ο εξοπλισμός απαιτείται να έχει αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω των συνθηκών υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν κατά τη θερμική επεξεργασία, που σημαίνει ότι η διεργασία συχνά δεν είναι οικονομικά αποδοτική, εκτός ορισμένων εξαιρέσεων, όπως όταν το κόστος επαναχρησιμοποίησης/διάθεσης των βιοστερεών είναι πολύ υψηλό. Ένα πρόσθετο μειονέκτημα είναι η ανάγκη, σε ορισμένες περιπτώσεις ανάλογα με τους κανονισμούς κάθε χώρας, προσθήκης θερμικών οξειδωτών για τον έλεγχο των οσμών και των αέριων εκπομπών. Εξαιτίας αυτών των απαιτήσεων για έλεγχο της διεργασίας και των περιορισμών σχεδιασμού του εξοπλισμού, το μέγεθος των δεξαμενών θερμικής υδρόλυσης περιορίζεται (CH<sub>2</sub>M HILL, 2003). Προκειμένου να βελτιωθεί η θερμική ισορροπία της διεργασίας, μία εναλλακτική προσέγγιση έχει προταθεί για εφαρμογές στις οποίες δεν απαιτείται η επίτευξη μείωσης



παθογόνων μικροοργανισμών Κλάσης Α. Δεδομένου ότι το κύριος όφελος της υδρόλυσης είναι για τη δευτεροβάθμια ιλύ, η οικονομική αποδοτικότητα και ένα μέρος της πολυπλοκότητας του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί με την εφαρμογή της θερμικής υδρόλυσης μόνο στο ρεύμα δευτεροβάθμιας ιλύος (δευτεροβάθμια βιολογική ιλύς, WAS). Η δευτεροβάθμια ιλύς μπορεί στη συνέχεια να αναμιχθεί με την πρωτοβάθμια ιλύ (που δεν έχει θερμανθεί) για να επιτευχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία τροφοδοσίας που απαιτείται στη μεσόφιλη χώνευση. Με την εναλλακτική αυτή μειώνονται οι απαιτήσεις ατμού και χωρητικότητας των δεξαμενών και έτσι βελτιώνεται το κόστος εφαρμογής της διεργασίας, όμως δεν επιτυγχάνεται μείωση παθογόνων μικροοργανισμών Κλάσης Α, το οποίο ενδιαφέρει τις περισσότερες ΜΕΛ όταν εξετάζουν εφαρμογές με υψηλή θερμοκρασία επεξεργασίας. Αυτή η εναλλακτική επεξεργασίας της δευτεροβάθμιας ιλύος δεν έχει ακόμη εξεταστεί σε βάθος και ως εκ τούτου δεν είναι γνωστή ποια είναι η απόδοση της σε σύγκριση με τη θερμική επεξεργασία του μίγματος πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας ιλύος (CH2M HILL, 2003).

Εναλλακτικά, στις περιπτώσεις που σε μία ΜΕΛ υπάρχει μονάδα συμπαραγωγής ενέργειας, η κατανάλωση ενέργειας για τις απαιτήσεις θέρμανσης στην θερμική προεπεξεργασία της ιλύος μπορεί να μειωθεί με την ανάκτηση και χρήση της θερμότητας που εκλύεται από το σύστημα ψύξης και το σύστημα εξάτμισης της μηχανής της συμπαραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να καλυφθεί ένα μέρος ή το σύνολο των αναγκών θέρμανσης (ατμός και ζεστό νερό) με αποτέλεσμα να ελαττώνεται το κόστος της εφαρμογής (CH2M HILL, 2003).

Γενικά, η εφαρμογή της θερμικής υδρόλυσης μπορεί να αποδειχθεί να είναι οικονομικά αποδοτική σε ΜΕΛ στις οποίες (CH2M HILL, 2003):

- οι χρόνοι παραμονής είναι μικροί με αποτέλεσμα να είναι μειωμένη η σταθερότητα και η απόδοση της διεργασίας χώνευσης,
- το ποσοστό καταστροφής στερεών στους χωνευτές είναι χαμηλό και κατά συνέπεια και η παραγωγή βιοαερίου είναι χαμηλή,
- η αναλογία δευτεροβάθμιων προς πρωτοβάθμιων στερεών είναι υψηλή (πάνω από 45% δευτεροβάθμια στερεά),
- το κόστος επαναχρησιμοποίησης/διάθεσης των βιοστερεών είναι υψηλό,
- υπάρχει πρόβλημα αφρισμού στους χωνευτές,
- η απόδοση της αφυδάτωσης είναι χαμηλή, και
- υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης του πρόσθετου βιοαερίου που παράγεται για ανάκτηση ενέργειας, εξαλείφοντας ή μειώνοντας την ανάγκη αγοράς φυσικού αερίου.

#### 4.6 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση είναι μία ελκυστική εναλλακτική της συμβατικής καύσης για τη θερμική επεξεργασία της ιλύος με σκοπό την ελάττωση του όγκου της και την ανάκτηση ενέργειας. Με τον όρο αεριοποίηση εννοείται η μερική καύση κατά την οποία ένα υλικό πλούσιο σε άνθρακα καίγεται με την παρουσία λιγότερου από τον στοιχειομετρικό αέρα και μετατρέπεται σε αέριο καύσιμο και αδρανές υπόλειμμα (Ανδρεαδάκης, 2003). Αυτός ο τρόπος επεξεργασίας πραγματοποιείται σε υψηλή θερμοκρασία, συνήθως γύρω στους 1000°C (M. Jaeger, M. Mayer, 2000).

Κατά τη διάρκεια της διεργασίας αεριοποίησης λαμβάνουν χώρα εξώθερμες και ενδόθερμες αντιδράσεις. Η θερμότητα για τη συντήρηση της διεργασίας προέρχεται από τις εξωθερμικές αντιδράσεις, ενώ τα καύσιμα συστατικά προέρχονται από τις ενδοθερμικές αντιδράσεις (Ανδρεαδάκης, 2003).

Οι βασικοί τύποι αεριοποιητών είναι πέντε: (1) κάθετης σταθερής κλίνης, (2) οριζόντιας σταθερής κλίνης, (3) ρευστοποιημένης κλίνης, (4) πολλαπλών εστιών και (5) περιστροφικού φούρνου. Από αυτούς οι τρεις πρώτοι είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι.

Η αεριοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί σε αφυδατωμένη ή ξηραμένη ιλύς χωρίς να είναι απαραίτητη η σταθεροποίησή της. Το καύσιμο αέριο που παράγεται είναι ένα καύσιμο μίγμα αερίων αποτελούμενο από μονοδείξιο του άνθρακα, υδρογόνο, άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο το οποίο ονομάζεται syngas και έχει σχετικά χαμηλή θερμογόνο δύναμη (Ανδρεαδάκης, 2003). Επίσης, στα προϊόντα της καύσης υπάρχει και τέφρα.

Το syngas μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ή αεριοστρόβιλους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή σε λέβητα, υπό συνθήκες περίσσειας αέρα, για την παραγωγή θερμότητας (Ανδρεαδάκης, 2003). Επίσης, το syngas μπορεί να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία για την παραγωγή υδρογόνου το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στις κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Waste to energy solutions, 2011). Οι τεχνολογίες των κινητήρων εσωτερικής καύσης, των αεριοστρόβιλων, των λεβήτων και των κυψελών καυσίμου είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούν καύσιμο βιοαέριο και η λειτουργία τους αναλύεται σε επόμενη ενότητα (Εφαρμογές Βιοαερίου, Ενότητα 4.8.1).

Η διεργασία της αεριοποίησης έχει όλα τα πλεονεκτήματα της συμβατικής καύσης ιλύος, συμπεριλαμβανομένου της ολικής αποστείρωσης της ιλύος και της μείωσης του όγκου της στην ελάχιστη δυνατή ποσότητα τέφρας (Waste to energy solutions, 2011). Επιπλέον, η αεριοποίηση δεν παρουσιάζει τα συνήθη προβλήματα που εμφανίζονται κατά τη συμβατική καύση, όπως είναι η ανάγκη για συμπληρωματικό καύσιμο, οι εκπομπές οξειδίου του θείου και των οξειδίων του αζώτου, τα βαρέα μέταλλα και η ιπτάμενη τέφρα και η πιθανή παραγωγή χλωριωμένων διβενζινοδιοξινών και διβενζοφουρανίων. Φυσικά και κατά την αεριοποίηση παράγονται αέριοι ρύποι, αλλά αποτελούνται από υδρόθειο, αμμωνία και άζωτο, οι οποίοι απομακρύνονται από το syngas ευκολότερα από τους αντίστοιχους οξειδωμένους ρύπους, πριν την αξιοποίησή του syngas ως καύσιμο. Αυτά τα πλεονεκτήματα οφείλονται στο γεγονός ότι η αεριοποίηση είναι μία χημικώς καθαρή αναγωγική διεργασία σε αντίθεση με την καύση, που είναι οξειδωτική (Waste to energy solutions, 2011).

#### 4.7 Πυρόλυση

Η πυρόλυση είναι μία διεργασία θερμικής επεξεργασίας η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μία παραλλαγή της αεριοποίησης πραγματοποιούμενη σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Κατά την πυρόλυση, η ξηραμένη ή αφυδατωμένη ιλύς θερμαίνεται υπό πίεση σε μία θερμοκρασία ίση με 350-500°C απουσία οξυγόνου με αποτέλεσμα να διαχωρίζονται (απελευθερώνονται) οι οργανικές της ενώσεις με ένα συνδυασμό θερμικών αντιδράσεων διάσπασης και συμπύκνωσης σε αέρια, υγρά και στερεά κλάσματα. Σε αντίθεση με τις διαδικασίες καύσης και εξαερίωσης που είναι ιδιαίτερα εξωθερμικές, η πυρόλυση είναι πολύ εσωθερμική και απαιτείται εξωτερική πρόσδοση θερμότητας.

Τα τρία βασικά κλάσματα που παράγονται κατά την διαδικασία αυτή είναι (Ανδρεαδάκης, 2003):

1. Ένα ρεύμα αερίων που περιέχει βασικά υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και άλλα αέρια σε μικρές συγκεντρώσεις ανάλογα με τα οργανικά χαρακτηριστικά της ιλύος. Η σύνθεση του αερίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία πυρόλυσης.

2. Ένα υγρό κλάσμα που αποτελείται από ένα ρεύμα πίσσας ή λαδιού (pyrolysis oils), το οποίο περιέχει ακετικό οξύ, ακετόνη, μεθανόλη και σύμπλεγμα οξυγονωμένων υδρογονανθράκων.
3. Ένα στέρεο υπόλειμμα, το οποίο είναι μίγμα από καθαρό άνθρακα (char) με μικρές ποσότητες αδρανών υλικών (τέφρα).

Το ρεύμα αερίων είναι ένα καύσιμο αέριο το οποίο ονομάζεται syngas και μπορεί να αξιοποιηθεί με τους ίδιους τρόπους που χρησιμοποιείται το αέριο καύσιμο της αεριοποίησης. Το στέρεο υπόλειμμα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας. Ένα μέρος του αερίου και του στερεού κλάσματος των προϊόντων της πυρόλυσης καίγεται για την παραγωγή θερμότητας η οποία χρησιμοποιείται στη διεργασία της πυρόλυσης.

Η διεργασία της πυρόλυσης και της αεριοποίησης έχει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τη συμβατική καύση. Ένα πλεονέκτημα είναι ότι στις διεργασίες αυτές δεν παράγεται απευθείας ενέργεια αλλά καύσιμα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας πιο αποδοτικά. Επίσης, μπορούν να παραχθούν πολύτιμα αέρια ως βασικά χημικά στοιχεία ή ως καύσιμα (π.χ. υδρογόνο). Ακόμη, οι διεργασίες αυτές είναι λιγότερο ρυπογόνες, δεν απαιτούν την επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων απαερίων και έχουν μειωμένο κόστος επένδυσης. Ωστόσο, εξαιτίας της παρουσίας τοξικών οργανικών ρύπων στην ιλύ, οι διεργασίες επεξεργασίας των απαερίων είναι πολυπλοκότερες. Γενικά, οι διεργασίες πυρόλυσης και αεριοποίησης είναι πολυπλοκότερες από τη συμβατική καύση.

Πρακτικά, τόσο η πυρόλυση όσο και η αεριοποίηση που αναφέρθηκε παραπάνω, είναι μέθοδοι επεξεργασίας που ακόμα δεν εφαρμόζονται ενεργά στην αξιοποίηση της ιλύος, παρά το ενδιαφέρον που δείχνει η επιστημονική κοινότητα. Με βάση τα σημερινά δεδομένα δεν είναι ξεκάθαρο αν κάποια από τις δύο διεργασίες θα παίξει σημαντικό ρόλο μελλοντικά στο πρόβλημα της διαχείρισης της ιλύος.

#### 4.7.1 Συνδυασμός αεριοποίησης με πυρόλυση

Η θερμική επεξεργασία της ιλύος είναι δυνατή να γίνει με μία τεχνική η οποία συνδυάζει τις διεργασίες αεριοποίησης και πυρόλυσης. Κατά τη συνδυασμένη διεργασία, η οποία αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό επιμέρους εργασιών, η ξηραμένη ιλύς θερμαίνεται σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου σε έναν αεριοποιητή σε θερμοκρασία περίπου ίση με 450°C. Τα οργανικά συστατικά της ιλύος μετατρέπονται σε μία στέρεα ουσία πλούσια σε άνθρακα (char), σε έλαια και σε μη-συμπυκνώσιμα αέρια. Τα μη-συμπυκνώσιμα αέρια έρχονται σε επαφή με το πλούσιο σε άνθρακα στέρεο υλικό και μετατρέπονται σε μία ευθεία αλυσίδα υδρογονανθράκων, οι οποίοι στη συνέχεια μπορούν να συμπυκνωθούν σε ένα καύσιμο έλαιο. Το πλούσιο σε άνθρακα στέρεο υλικό χρησιμοποιείται σαν πηγή ενέργειας για να παρέχει την ενέργεια που απαιτείται στον αεριοποιητή ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα. Το καύσιμο έλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κινητήρες για την παραγωγή ενέργειας ή μπορεί να γίνει πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοκαυσίμου. Η ποιότητα του καυσίμου ελαίου, η οποία είναι σημαντική για την εφαρμογή του προϊόντος, μπορεί να ελεγχθεί με τη χρήση καταλυτών και με την εφαρμογή των κατάλληλων συνθηκών διεργασίας (Wim Rulkens, 2007). Προς το παρόν, αυτή η εφαρμογή είναι πολύ περιορισμένη.

#### 4.8 Βιοαέριο

Η αναερόβια χώνευση είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους για τη σταθεροποίηση της βιολογικής ιλύος (βιοστερεών) κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Η διεργασία περιλαμβάνει την αποσύνθεση των οργανικών συστατικών των βιοστερεών μέσω βακτηρίων που αναπτύσσονται σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου. Εκτός από τα στέρεα υπολείμματα, τα κύρια προϊόντα της αναερόβιας χώνευσης είναι το νερό και ένα ρεύμα βιοαερίου που αποτελείται από μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, και άλλες δευτερεύουσες αέριες ουσίες.

Τα κύρια συστατικά που συνθέτουν το βιοαέριο είναι το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) 55-70% και το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) 30-45%. Το άζωτο και το οξυγόνο υπάρχουν σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, έως 4 και 1%, αντίστοιχα. Το υδρόθειο, το χλώριο και το φθόριο μπορούν να βρεθούν σε ίχνη, παρόλα αυτά μπορούν να επηρεάσουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης του βιοαερίου και ως εκ τούτου πρέπει να ελέγχονται. Το βιοαέριο είναι μία πολύτιμη πηγή ενέργειας με θερμογόνο δύναμη που κυμαίνεται από 20 έως 25 MJ/m<sup>3</sup> ή περίπου 6,5 kWh/m<sup>3</sup>, που αντιστοιχεί στο 60% περίπου της θερμογόνου δύναμης του φυσικού αερίου (D. Antakyalı, R. Rolle, 2010).

Πολλές ΜΕΛ επιλέγουν την επεξεργασία του βιοαερίου, πριν τη χρήση του για ενεργειακούς σκοπούς, για να απομακρύνουν σωματίδια, όπως το υδρόθειο, η αμμωνία, οι σιλοζάνες και το νερό, που μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στον εξοπλισμό αξιοποίησής του (SAIC, 1995). Ιδιαίτερα το υδρόθειο πρέπει να αφαιρείται από το βιοαέριο λόγω του έντονα διαβρωτικού, κυρίως θειικού οξέος, που παράγεται κατά την οξείδωσή του, αλλά και λόγω της δυσσομίας που προκαλεί (Γεωργακάκης, 2009β). Η επεξεργασία του βιοαερίου περιλαμβάνει τον καθαρισμό του για την απομάκρυνση του υδρόθειου, των σιλοξανών και άλλων ανεπιθύμητων αέριων ιχνοστοιχείων, την ξήρανση του για την απομάκρυνση της υγρασίας, τον διαχωρισμό του διοξειδίου του άνθρακα, την συμπίεση του και την αναβάθμιση του, ώστε να επιτευχθεί μία σταθερή θερμογόνο δύναμη (CH<sub>2</sub>M HILL, 2003).

Η σημαντική περιεκτικότητα μεθανίου είναι αυτή που καθιστά το βιοαέριο κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας. Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρισμού και εδαφοβελτιωτικών λιπασμάτων, ενώ μετά την επεξεργασία και την αναβάθμισή του μπορεί να διοχετευθεί στο δίκτυο του φυσικού αερίου και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο μεταφορών (στις αστικές συγκοινωνίες, σε γεωργικά μηχανήματα κ.α.). Η χρήση του βιοαερίου ως καύσιμο μεταφορών απαντάται στη Σουηδία, στην Ελβετία, στη Γαλλία και στην Γερμανία, ενώ στη Σουηδία και στη Γερμανία το βιοαέριο διοχετεύεται και στο δίκτυο του φυσικού αερίου.

Ανάλογα με την περίπτωση (σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς της κάθε τοποθεσίας), το βιοαέριο μπορεί να αξιοποιηθεί ως καύσιμο είτε εκτός της ΜΕΛ, είτε στην ίδια την εγκατάσταση, για να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση της διεργασίας επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Και οι δύο δυνατότητες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιάσμά νέων εγκαταστάσεων ή κατά την αναβάθμιση υφισταμένων. Οι τοπικοί στόχοι και προϋποθέσεις, όμως, είναι αυτοί που θα καθορίσουν τελικά τον τρόπο αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου σε μία εγκατάσταση (SAIC, 1995).

Η παραγωγή και αξιοποίηση του βιοαερίου στην ίδια την ΜΕΛ προσφέρει αλληλένδετα οικονομικά, περιβαλλοντικά και ενεργειακά οφέλη:

- Η επεξεργασία των βιοστερεών είναι μία διεργασία που λαμβάνει χώρα καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου, με αποτέλεσμα να υπάρχει συνεχής παραγωγή και παροχή βιοαερίου.

- Με τη χρήση του βιοαερίου μειώνεται η ανάγκη αγοράς και χρήσης εισαγόμενων ρυπογόνων καυσίμων.
- Το βιοαέριο αποτελεί μια «καθαρή» μορφή ενέργειας δεδομένου ότι εκπέμπει έως και 95% λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου (C/h. CH<sub>4</sub>, NOX) σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα (το συνολικό ισοζύγιο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που παράγεται κατά την καύση του βιοαερίου είναι ισοδύναμο αυτού που απορροφάται κατά την παραγωγή του, άρα δεν επιβαρύνει την ατμόσφαιρα).
- Το βιοαέριο έχει μηδενική αξία για τη μονάδα, καθώς παράγεται από τα υγρά απόβλητα και δεν υπάρχουν έξοδα συλλογής και μεταφοράς του, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χρημάτων.
- Δίνει τη δυνατότητα παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, η δε πώληση του πλεονάσματος της θερμότητας ή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αποδώσει έσοδα.
- Θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.
- Συμβάλλει στην ενεργειακή αυτάρκεια της εγκατάστασης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης και τα χαρακτηριστικά της ύλης, η αποτελεσματικότητα αξιοποίησης του βιοαερίου μπορεί να διαφέρει. Γενικά, η διαδικασία αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου είναι οικονομικά βιώσιμη σε μεγάλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας δυναμικότητας άνω των 50.000-100.000 ισοδύναμων κατοίκων. Τέτοιες μεγάλες εγκαταστάσεις έχουν ακόμη και τη δυνατότητα να είναι αυτάρκεις. Παρόλα αυτά, ακόμα και σε μικρότερες εγκαταστάσεις, π.χ. 10.000 ισοδύναμων κατοίκων, το 50% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να καλυφθεί από το ιδιοπαραγόμενο βιοαέριο (D. Antakyali, R. Rolle, 2010).

#### 4.8.1 Εφαρμογές βιοαερίου

Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα πλήθος εφαρμογών, ανάλογα με την ζήτηση για μία συγκεκριμένη μορφή ενέργειας σε μία μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Είναι, λοιπόν, σημαντικό για τις ΜΕΛ που παράγουν βιοαέριο να επιδιώκουν τη συλλογή και αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου του, παρά την απλή καύση του σε πυρσούς ασφαλείας, εφαρμογή η οποία όχι μόνο δεν προσφέρει καμία ωφέλιμη ενεργειακή αξία, αλλά επιπλέον συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (NYSERDA, 2010).

Οι εφαρμογές αξιοποίησης του βιοαερίου που τελικά θα επιλεξιεί μία ΜΕΛ επιδρούν στις απαιτήσεις σχεδιασμού και εξοπλισμού για την επεξεργασία του βιοαερίου, στην αποθήκευση και στο κόστος του συστήματος μετατροπής βιοαερίου. Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα άμεσης καύσης (λέβητες, τουρμπίνες, κυψέλες καυσίμου) για την θέρμανση χώρων, τη θέρμανση νερού, την ξήρανση, την ψύξη με απορρόφηση και την παραγωγή ατμού. Επιπλέον, το βιοαέριο που χρησιμοποιείται άμεσα στις τουρμπίνες και τις κυψέλες καυσίμου μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Μία εναλλακτική επιλογή αξιοποίησης του βιοαερίου είναι η χρήση του σε ακίνητες ή κινούμενες μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή έργου ή/και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα περισσότερα συστήματα καύσης που έχουν σχεδιαστεί για την χρήση προπανίου ή φυσικού αερίου μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν ώστε να χρησιμοποιούν καύσιμο βιοαέριο. Όταν λαμβάνουν χώρα τέτοιες τροποποιήσεις θα πρέπει να δίνεται σημασία στο ρυθμό εισροής θερμότητας, στην ικανότητα χειρισμού του καυσίμου, στη σταθερότητα της φλόγας και στην ατμόσφαιρα του κλιβάνου. Επίσης, εξαιτίας της χαμηλότερης θερμογόνου δύναμης

του βιοαερίου, ο εξοπλισμός μπορεί να λειτουργεί με χαμηλότερο βαθμό απόδοσης και το μέγεθος των σωληνώσεων εισαγωγής του βιοαερίου (τροφοδοσία) μπορεί να χρειαστεί να αυξηθεί.

#### 4.8.2 Λέβητες (Boilers)

Η παραγωγή θερμότητας με την άμεση καύση βιοαερίου σε λέβητες για την παραγωγή ζεστού νερού ή/και ατμού είναι ο απλούστερος τρόπος χρήσης του στις ΕΕΑ, και εφαρμόζεται σε αρκετές χώρες σε ειδικά διαμορφωμένους καυστήρες φυσικού αερίου (T. Al Seadi, 2008). Κατά την καύση του βιοαερίου, με περιεκτικότητα 60-70% σε μεθάνιο, παράγεται μπλε φλόγα ενώ παράλληλα εκλύεται θερμογόνος δύναμη των 4.500-5.500 kcal/tr ή 18,8-23,0 MJ/mJ. Ε[ θερμική δύναμή του είναι άμεσα συνδεδεμένη με το ποσοστό του περιεχομένου σε αυτό μεθανίου. Η περιεκτικότητα σε μεθάνιο με τη σειρά της εξαρτάται από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ύλης που τροφοδοτείται στους αναερόβιους χωνευτές. Από τη στιγμή που η σύσταση του αερίου ποικίλλει, οι καυστήρες που έχουν σχεδιαστεί για φυσικό αέριο, βουτάνιο ή LPG όταν χρησιμοποιούνται ως καυστήρες βιοαερίου έχουν μικρότερη απόδοση. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται ειδικά σχεδιασμένοι καυστήρες βιοαερίου που έχουν θερμική απόδοση 55-65% (Arizona-energy.org, 2011).

Στους λέβητες, το βιοαέριο καίγεται σε ένα θάλαμο καύσης και παράγεται θερμότητα η οποία θερμαίνει το εργαζόμενο μέσο (νερό ή άλλο υγρό) που κυκλοφορεί μέσα σε σωλήνες. Με τη βοήθεια της θερμότητας το εργαζόμενο μέσο μετατρέπεται σε ατμό και μεταφέρει, μέσω των σωληνώσεων, τη θερμότητα στα σημεία κατανάλωσης. Στη συνέχεια, έχοντας μειωμένη θερμοκρασία, επιστρέφει στο θάλαμο καύσης για να αναθερμανθεί. Στους καινούριους λέβητες βιοαερίου, οι οποίοι ονομάζονται λέβητες συμπύκνωσης, το εργαζόμενο μέσο διέρχεται μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης (D. Graan, R. Backman, 2010).

Το βιοαέριο με την καύση του παράγει θερμότητα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση διεργασιών και/ή για τη θέρμανση χώρων (κτιρίων) στις ΕΕΑ. Για τις εφαρμογές θέρμανσης το βιοαέριο δεν χρειάζεται αναβάθμιση. Ωστόσο, πρέπει να υποβληθεί σε συμπύκνωση, αφαίρεση σωματιδίων, συμπίεση, ψύξη και ξήρανση.

Για τις ΕΕΑ οι οποίες χρησιμοποιούν την αναερόβια χώνευση ως μέθοδο σταθεροποίησης της ύλης, η παραγόμενη θερμότητα από την καύση του βιοαερίου σε ένα λέβητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προθέρμανση της ύλης που τροφοδοτείται στους χωνευτές. Είναι γνωστό ότι η θερμοκρασία είναι μία από τις σημαντικότερες λειτουργικές παραμέτρους της διεργασίας αναερόβιας χώνευσης και είναι απαραίτητο να διατηρείται σταθερή για την επιβίωση και σωστή ανάπτυξη των μικροοργανισμών που αποικοδομούν την ύλη. Έτσι λοιπόν, μπορεί να αξιοποιηθεί το ενεργειακό περιεχόμενο του βιοαερίου για τη διατήρηση του περιεχομένου των χωνευτών στη βέλτιστη θερμοκρασία. 30-38°C για μεσόφιλη και 49- 57°C για θερμοφιλή αναερόβια χώνευση. Για τη μεσόφιλη χώνευση (η οποία συνήθως εφαρμόζεται στις ΕΕΑ), η θερμοκρασία του λέβητα θα πρέπει να διατηρείται σε θερμοκρασία άνω των 100°C και η θερμοκρασία του ζεστού νερού στον εναλλάκτη θερμότητας των βιοστερεών δεν θα πρέπει να ξεπερνά τους 71°C, διότι μειώνεται ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του συστήματος (SAIC, 1995).

Η θερμότητα που παράγεται στους λέβητες με την καύση βιοαερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες διεργασίες, όπως είναι η παστερίωση της χωνεμένης ύλης και η εξάτμιση του γλωρίου για τη διεργασία αποχλωρίωσης (SAIC, 1995).

Πέρα από τη θέρμανση διεργασιών, η θερμότητα που παράγεται από ένα λέβητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση των κτιρίων μίας ΕΕΛ μέσω ενός συστήματος σωληνώσεων μεταφοράς θερμότητας, αντικαθιστώντας το φυσικό αέριο ή οποιοδήποτε άλλο συμβατικό καύσιμο χρησιμοποιείται. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να επεκταθεί αποτελεσματικά και για την ψύξη χώρων με τον συνδυασμό του συστήματος θέρμανσης με μονάδες ψύξης με απορρόφηση. Στην περίπτωση αυτή, το ζεστό νερό που παράγεται με την καύση του βιοαερίου σε ένα λέβητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή κρύου νερού, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να διοχετευθεί με σωλήνες στις εγκαταστάσεις για την ψύξη χώρων και εξοπλισμού. Τις περισσότερες φορές, αυτή η εφαρμογή μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση χρημάτων λόγω της εξάλειψης της ανάγκης για υπερβολικό αερισμό στις εγκαταστάσεις. Αναλυτικότερη αναφορά στους ψύκτες απορρόφησης και γενικότερα στα συστήματα ανάκτησης θερμότητας γίνεται σε επόμενη ενότητα.

Με την καύση βιοαερίου σε λέβητες, εκτός από θερμότητα, μπορεί να παραχθεί και ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό γίνεται με την εκτόνωση του παραγόμενου ατμού σε ατμοστρόβιλο ο οποίος κινεί μία γεννήτρια. Η εφαρμογή αυτή εξετάζεται αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα.

#### **4.8.3 Αποτεφρωτήρες ιλύος**

Οι ΕΕΛ οι οποίες διαθέτουν μονάδες αποτέφρωσης ιλύος μπορούν να τροποποιήσουν την τροφοδοσία της μονάδας αποτέφρωσης ώστε να χρησιμοποιεί καύσιμο βιοαέριο για την καύση στον κλίβανο. Η εφαρμογή αυτή είναι μία εναλλακτική λύση για την αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου και προσφέρει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη σε μία ΜΕΛ, καθώς αντικαθίσταται η χρήση συμβατικών καυσίμων (π.χ. πετρέλαιο). Η εφαρμογή αυτή, πάραυτα, δεν είναι μία από τις πρώτες επιλογές που θα εξετάσει μία ΜΕΛ για την αξιοποίηση του βιοαερίου που παράγει.

#### **4.8.4 Μονάδες ξήρανσης**

Οι ΜΕΛ οι οποίες διαθέτουν μονάδες ξήρανσης ιλύος μπορούν να τροποποιήσουν την τροφοδοσία των καυστήρων της μονάδας ξήρανσης ώστε να χρησιμοποιούν καύσιμο βιοαέριο. Έτσι λοιπόν, στους άμεσους και στους περιστρεφόμενους ξηραντήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν καυστήρες βιοαερίου ή καυστήρες διπλού καυσίμου (βιοαερίου – φυσικού αερίου) για την παραγωγή των θερμών αερίων που απαιτούνται για την ξήρανση, ενώ στους έμμεσους ξηραντήρες και στους ξηραντήρες ρευστοποιημένης κλίνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί καύσιμο βιοαέριο στους λέβητες για την παραγωγή του ζεστού ατμού που απαιτείται για την ξήρανση. Η εφαρμογή αυτή προσφέρει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη στην ΜΕΛ.

#### **4.8.5 Μηχανοκίνητος εξοπλισμός**

Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την τροφοδότηση σταθερών μηχανών εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) για την παραγωγή μηχανικού έργου ή/και ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ΜΕΛ. Το μηχανικό έργο που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άμεση ή έμμεση κίνηση μηχανοκίνητου εξοπλισμού της εγκατάστασης.

Η χρήση ΜΕΚ βιοαερίου για την άμεση κίνηση εξοπλισμού είναι μία εναλλακτική που μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε τύπο μονάδας επεξεργασίας και συνήθως εφαρμόζεται

σε μηχανοκίνητα μέρη του εξοπλισμού τα οποία έχουν μεγάλες απαιτήσεις ιπποδύναμης κατά τη διάρκεια συνθηκών αιχμής (φορτίου ή ροής), όπως είναι οι αντλίες εισροής ανεπεξέργαστων λυμάτων, οι αντλίες εκροής επεξεργασμένων λυμάτων και οι φυσητήρες αερισμού. Η χρήση MEK βιοαερίου στην περίπτωση αυτή εξαλείφει την ανάγκη ύπαρξης ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων σε κατάσταση αναμονής για τη λειτουργία του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια των περιόδων αιχμής. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα σε μία MEΛ να αντιμετωπίσει το μεγάλο εύρος διακυμάνσεων της ροής λυμάτων, και παρέχει την απαιτούμενη ευελιξία για την χωριστή λειτουργία των συστημάτων επεξεργασίας αστικών και εποχιακών υγρών αποβλήτων. Η ευελιξία αυτή, με τη σειρά της, εξαλείφει την ανάγκη για διακοπτόμενη άντληση.

Η χρήση MEK βιοαερίου για την έμμεση κίνηση εξοπλισμού παρέχει σε μία MEΛ ένα εξαιρετικά ευέλικτο σύστημα. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί (1) για τη μείωση των ζητήσεων αιχμής του βασικού εξοπλισμού ο οποίος είναι εγκατεστημένος σε μεγάλη απόσταση από την πηγή του καυσίμου και τη μονάδα συντήρησης, (2) για την κίνηση τοπικού και απομακρυσμένου εξοπλισμού, (3) για την επίτευξη μεταβλητότητας στην ταχύτητα λειτουργίας του βασικού απομακρυσμένου εξοπλισμού, και (4) για τη χρήση των ηλεκτρογεννητριών τόσο για την έμμεση κίνηση εξοπλισμού μίας ΕΕΛ, όσο και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γενικής χρήσης. Η πρόσθετη ευελιξία που εξασφαλίζεται με τη χρήση MEK βιοαερίου για την έμμεση κίνηση εξοπλισμού μπορεί να κάνει τη διαφορά ανάμεσα στην αποδοτική και μη αποδοτική χρήση του βιοαερίου.

Περαιτέρω ανάλυση για τις MEK βιοαερίου και τη χρήση τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε επόμενη ενότητα (*Εμβολοφόρες μηχανές ή Αεριομηχανές*, Ενότητα 4.8.7).

#### 4.8.6 Ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες

Μία από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές αξιοποίησης βιοαερίου σε μία ΕΕΛ είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτροπαραγωγική ικανότητα μίας MEΛ ποικίλλει ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, η οποία, με τη σειρά της, καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της μονάδας. Κατά κανόνα, η χρήση βιοαερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μία οικονομικά αποδοτική επιλογή για εγκαταστάσεις επεξεργασίας με μέση εισροή λυμάτων μεγαλύτερη των 19.000 m<sup>3</sup>/d (NYSERDA, 2010). Επιπλέον, υπάρχει ένα πλήθος ρυθμιστικών απαιτήσεων που περιορίζουν τη χρήση των συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Οι απαιτήσεις για την τήρηση ορισμένων ορίων αέριων εκπομπών μπορεί να περιορίσουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ΕΕΛ, εκτός αν το σύστημα είναι εξαιρετικά καθαρό. Οι απαιτήσεις αξιοπιστίας των χρησιμοποιούμενων συστημάτων μπορεί να θέσουν περιορισμούς στην επιτόπια ηλεκτροπαραγωγή. Τέλος, τα πρωτόκολλα διασύνδεσης απαιτούν στενή συνεργασία με τον φορέα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για να διασφαλιστεί ότι μία ηλεκτρογεννήτρια είναι σο<sup>ς</sup>τά συνδεδεμένη με το δίκτυο.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το βιοαέριο μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί ως ενέργεια διεργασίας για τον ηλεκτρικό εξοπλισμό μίας ΕΕΛ, όπως είναι οι αντλίες, τα συστήματα ελέγχου και οι αναδευτήρες (*Έμμεση κίνηση εξοπλισμού*, Ενότητα 4.4.1.4), είτε να πωληθεί σε τοπική εταιρία ηλεκτροδότησης. Σε πολλές χώρες με υψηλά τιμολόγια αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, όλη η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πωλείται στο δίκτυο και η ηλεκτρική ενέργεια της διεργασίας αγοράζεται από το ίδιο το δίκτυο. Το κόστος σύνδεσης στο τοπικό δίκτυο ηλεκτροδότησης πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη όταν μία ΕΕΛ σχεδιάζει να εγκαταστήσει μία μονάδα αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή



βιοαερίου. Σε ορισμένες περιοχές το κόστος αυτό μπορεί να είναι πολύ υψηλό και να επηρεάζει την οικονομική αποδοτικότητα της συγκεκριμένης εφαρμογής (Anaerobic-digestion.com, 2011).

Οι τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση βιοαερίου είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK), οι αεριοστρόβιλοι, οι κυψέλες καυσίμου, οι μικροστρόβιλοι και οι μηχανές Stirling, οι οποίες είναι συζευγμένες με γεννήτριες. Οι γεννήτριες έχουν συνήθως μια σταθερή ταχύτητα περιστροφής (1.500 στροφές/λεπτό) προκειμένου να είναι συμβατές με τη συχνότητα του δικτύου ηλεκτρισμού. Οι MEK μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πλειοψηφία των μεγεθών των ΜΕΛ, οι αεριοστρόβιλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ΜΕΛ μεγάλης και μεσαίας κλίμακας με ηλεκτροπαραγωγική ικανότητα μεγαλύτερη από 1 MW, και οι μικροστρόβιλοι και οι κυψέλες είναι καταλληλότερες για εφαρμογή σε ΜΕΛ μικρού μεγέθους. Η Εταιρία Συμπααραγωγής Ενέργειας της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος εκτιμά ότι περίπου 491kWh ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να παραχθούν με την τεχνολογία των μικροστρόβιλων και 525 kWh ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να παραχθούν με την τεχνολογία των MEK για κάθε εκατομμύριο γαλόνια λυμάτων που επεξεργάζεται μία ΕΕΛ, το οποίο αντιστοιχεί σε 0,13 kWh και 0,14 kWh ηλεκτρικής ενέργειας ανά m<sup>3</sup> επεξεργασμένων λυμάτων για την τεχνολογία των μικροτουρμπίνων και των MEK, αντίστοιχα.

Τα επίπεδα υδρόθειου και το περιεχόμενο υγρασίας στο βιοαέριο επηρεάζουν την οικονομική και τεχνική απόφαση εγκατάστασης μίας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Τα υψηλά επίπεδα υδρόθειου προκαλούν διάβρωση των κινητήρων, ενώ άλλα ίχνη ουσιών, όπως οι σιλοξάνες, μπορεί να προκαλέσουν επιβλαβείς επιπτώσεις στις συσκευές καύσης. Συνεπώς, μπορεί να καταστεί απαραίτητη η εγκατάσταση πλυντρίδων αερίου για τη μείωση των επιπέδων υδρόθειου και η επεξεργασία του βιοαερίου για την απομάκρυνση της υγρασίας και των σιλοξάνων πριν την χρήση του στις μηχανές εσωτερικής καύσης και ιδιαίτερα στους μικροστρόβιλους. Η συμπίεση του βιοαερίου είναι, επίσης, αναγκαία πριν τη χρήση του βιοαερίου, ενώ η αναβάθμιση του δεν είναι τόσο σημαντική για τη χρήση του βιοαερίου στους μικροστρόβιλους, όσο είναι για τη χρήση του σε εμβολοφόρες μηχανές (NYSERDA, 2010).

#### 4.8.7 Εμβολοφόρες μηχανές ή Αεριομηχανές (Gas engines)

Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε εμβολοφόρες μηχανές οι οποίες κινούν γεννήτριες που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Οι εμβολοφόρες μηχανές ανήκουν στην κατηγορία των παλινδρομικών μηχανών εσωτερικής καύσης (MEK), διατίθενται σε διάφορα μεγέθη και η ηλεκτρική τους ισχύς κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες kW έως αρκετά MW.

Οι MEK που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως φτωχής καύσης με υπερτροφοδότηση καυσίμου (turbo charge) οι οποίες καίνε καύσιμο με περίσσεια αέρα. Η χρήση MEK χωρίς υπερτροφοδότηση δεν συνηθίζεται, παρόλο που οι κινητήρες αυτοί είναι λιγότερο πολύπλοκοι, γιατί έχουν μειωμένη ισχύ εξόδου και αυξημένες εκπομπές. Όταν οι MEK λειτουργούν με βιοαέριο, μειώνεται η ισχύς εξόδου τους κατά 5 με 15% σε σύγκριση με αυτές που λειτουργούν με φυσικό αέριο. Το συνολικό ποσό θερμότητας που παράγεται κυμαίνεται από 2.700 έως 3.500 kcal βιοαερίου ανά κιλοβάτώρα (kWh). Ορισμένοι γνωστοί κατασκευαστές των κινητήρων αυτών είναι οι: Caterpillar, Jenbacher, Waukesha, Cooper-Superior και Cummings (SCS Engineers, 1994).

Στις MEK φτωχής καύσης, η διεργασία της καύσης ενισχύεται από την προ-ανάμιξη του αέρα με το καύσιμο πριν την εισαγωγή τους στο θάλαμο καύσης, ανάντη του συστήματος υπερτροφοδότησης, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ομογενοποιημένο μίγμα αέρα-καυσίμου και να μειώνεται ο κίνδυνος προανάφλεξης και το «χτύπημα» του κινητήρα. Η πίεση

τροφοδότησης του μίγματος μπορεί να μεταβάλλεται ώστε να διατηρείται σταθερή η παροχή ενέργειας προς τον κινητήρα. Ένα πλεονέκτημα της φτωχής καύσης είναι η μείωση της θερμοκρασίας της καύσης, λόγω της περίσσειας αέρα, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου σχεδόν κατά 50%, σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες φυσικού αερίου. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η αύξηση της απόδοσης της καύσης και της ισχύος που παράγεται με την ίδια ποσότητα καυσίμου, λόγω της διαθέσιμης περίσσειας οξυγόνου. Επιπλέον, οι MEK φτωχής καύσης που είναι εφοδιασμένες με ηλεκτρονικά συστήματα πλήρους ελέγχου του κινητήρα έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν με βιοαέριο διαφόρων συστάσεων, ενώ η χρήση ειδικών συστημάτων ελέγχου με αισθητήρες μέτρησης του οξυγόνου των καυσαερίων βοηθάει στη διατήρηση βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας της μηχανής και αυξάνει την παραγόμενη ισχύ (UK Environmental Agency, 2004). Η καθαρή ενεργειακή απόδοση των MEK βιοαερίου φτωχής καύσης κυμαίνεται περίπου στο 32-33%.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κινητήρων, ο κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα (ή κινητήρας Otto) και ο κινητήρας ανάφλεξης με συμπίεση (ή κινητήρας Diesel) (Marchaim, 1992) και οι τύποι MEK που κυκλοφορούν στο εμπόριο και μπορούν να λειτουργούν με βιοαέριο είναι οι κινητήρες Otto καθαρού αερίου, οι τροποποιημένοι κινητήρες Diesel διπλού καυσίμου και οι τροποποιημένοι κινητήρες Diesel καθαρού αερίου. Θεωρητικά, οι κινητήρες Otto είναι πιο αποδοτικοί από τους κινητήρες Diesel. Πρακτικά όμως, οι κινητήρες Diesel είναι πιο αποδοτικοί, λόγω του γεγονότος ότι η αναλογία συμπίεσης αναστέλλει την απόδοση των κινητήρων Otto.

Κινητήρες Otto καθαρού αερίου: Οι περισσότεροι κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα που χρησιμοποιούνται μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν ώστε να καταναλώνουν συμπιεσμένο φυσικό αέριο, προπάνιο ή βιοαέριο. Υπάρχουν δύο αλλαγές που πρέπει να γίνουν κατά τη μετάβαση από τη βενζίνη στο βιοαέριο. Πρώτον, πρέπει να εγκατασταθεί ένα καρμπυρατέρ αερίου, το οποίο πρέπει να τροποποιηθεί καταλλήλως, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ώστε να αντισταθμιστεί η αργή ταχύτητα της φλόγας και να αυξηθεί η κατανάλωση αέρα, και δεύτερον, πρέπει να εγκατασταθούν αναφλεκτήρες υψηλής θερμοκρασίας ώστε να επιτευχθούν οι απαιτούμενες υψηλές θερμοκρασίες της καύσης μεθανίου (Constant & Naveau, 1989). Οι ειδικά τροποποιημένες MEK βιοαερίου μπορούν να χρησιμοποιούν ως καύσιμο είτε βιοαέριο, είτε φυσικό αέριο, ή μίγμα των δύο αερίων. Επίσης, ορισμένες εφαρμογές χρησιμοποιούν καρμπυρατέρ διπλού καυσίμου έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί προπάνιο ή φυσικό αέριο για την εκκίνηση και τον τερματισμό της λειτουργίας του κινητήρα, καθώς αυτός είναι ένας αποδοτικός τρόπος απομάκρυνσης ιχνών σουλφιδίων από το εσωτερικό του κινητήρα. Οι μηχανές πρέπει να ρυθμίζονται σε σχέση με την σύνθεση του αερίου, κυρίως ως προς την περιεκτικότητα σε μεθάνιο, για το λόγο αυτό

εγκαθίσταται ένα σύστημα ελέγχου καυσίμου των μηχανών το οποίο μπορεί αυτόματα και γρήγορα να προσαρμόζει την αναλογία καυσίμου-αέρα, ανάλογα με τις μεταβολές του φορτίου της μηχανής ή της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου. Είναι συνήθως μικρές μηχανές (15-30 kW), ελαφρές, με μεγάλη συγκέντρωση ισχύος. Η μετατροπή, επηρεάζει πολύ λίγο τον βαθμό απόδοσης, ενώ μειώνει την ισχύ κατά 18% περίπου. Χάρη στη μαζική παραγωγή οι τιμές τους είναι χαμηλές αλλά η διάρκεια ζωής τους είναι σχετικά μικρή (1.000-3.000 ώρες).

Τροποποιημένοι κινητήρες Diesel διπλού καυσίμου: Πρόκειται για κινητήρες Diesel που μετατρέπονται σε αεριομηχανές οι οποίες καταναλώνουν μόνο βιοαέριο. Η μετατροπή επιτυγχάνεται με τροποποιήσεις των εμβόλων, των κεφαλών και του μηχανισμού των βαλβίδων, που επιβάλλονται λόγω του ότι η έναυση δεν γίνεται πλέον με απλή συμπίεση αλλά με σπινθηριστή. Οι κυριότερες τροποποιήσεις που γίνονται είναι η αφαίρεση των εγχυτήρων (μπέκ), η προσθήκη ενός καρμπυρατέρ αερίου (μπουζί) και η μείωση της αναλογίας συμπίεσης. Παρόλο που αυτός είναι ο πολυπλοκότερος τρόπος κατασκευής ενός κινητήρα βιοαερίου, είναι και ο καταλληλότερος για χρήση βιοαερίου. Το σύστημα αποκλειστικής

κατανάλωσης βιοαερίου είναι αποδοτικότερο εξαιτίας της χαμηλότερης ταχύτητας, της υψηλότερης αναλογίας συμπίεσης και του ανθεκτικότερου σχεδιασμού. Συνήθως, η μετατροπή δεν προκαλεί μείωση της ισχύος, καθώς υπάρχει περιθώριο μείωσης της περισσειας αέρα. Έχουν ισχύ μέχρι 200 kW.

Οι εμβολοφόρες μηχανές έχουν σχετικά υψηλό κόστος συντήρησης και για την επιτυχή λειτουργία τους απαιτείται ειδική επίβλεψη από εξειδικευμένο προσωπικό (Μ.Α. Γούλα, 2011). Η επαρκής απομάκρυνση του υδρόθειου από το βιοαέριο σε επίπεδα χαμηλότερα των 10 ppm είναι σημαντική για την μείωση των απαιτήσεων συντήρησης των μηχανών, ενώ η τακτική αλλαγή των λαδιών της μηχανής και η εξέταση της περιεκτικότητας τους σε θείο μπορεί να αυξήσει τη διάρκεια ζωής των μηχανών. Για τον συνεχή έλεγχο του συστήματος, θεωρούνται απαραίτητοι αυτοματισμοί που περιλαμβάνουν αναλυτές αερίων (κυρίως CH<sub>4</sub> και O<sub>2</sub>), μετρητές πίεσης για την ενεργοποίηση του πυρσού σε περιπτώσεις πτώσης της, συστήματα monitoring καυσαερίων, πυρασφάλειας κλπ.

#### 4.8.8 Τουρμπίνες αερίου (ή Αεριοστρόβιλοι)

Υπάρχουν δυο βασικές διατάξεις αεριοστρόβιλων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: ανοικτού κύκλου και κλειστού κύκλου. Οι περισσότερες μονάδες αέριο στρόβιλου είναι ανοικτού τύπου. Η αρχή λειτουργίας του ανοικτού κύκλου είναι η εξής: αέρας αναρροφάται από την ατμόσφαιρα, συμπιέζεται και οδηγείται στον θάλαμο καύσης, όπου αναμιγνύεται με το καύσιμο και το μίγμα αναφλέγεται. Τα υψηλής ταχύτητας και όγκου καυσαέρια εκτονώνονται στον αεριοστρόβιλο, από τον οποίο αποβάλλονται σε θερμοκρασίες 300-600°C. Ο αεριοστρόβιλος περιστρέφεται και παράγει μηχανική ενέργεια, από την οποία ένα μέρος χρησιμοποιείται για την περιστροφή του συμπιεστή και το μεγαλύτερο μέρος κινεί μία γεννήτρια, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η σημαντική ισχύς που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή και η υψηλή θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων είναι οι κύριες αιτίες του μικρού βαθμού απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος ηλεκτροπαραγωγής (25-35% και σε σύγχρονες προηγμένες μονάδες 40%).

Στα συστήματα κλειστού κύκλου, το εργαζόμενο ρευστό (συνήθως ήλιο ή αέρας) κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα. Θερμαίνεται μέχρι την κατάλληλη θερμοκρασία σε εναλλάκτη θερμότητας, πριν από την είσοδο στον αεριοστρόβιλο, και ψύχεται μετά την έξοδό του από αυτόν. Καθώς το ρευστό δεν συμμετέχει στην καύση, διατηρείται καθαρό και έτσι αποφεύγεται η μηχανική και η χημική διάβρωση του αεριοστρόβιλου από τα προϊόντα της καύσης του βιοαερίου (Ε. Μουφλουζέλης, 2005). Ο αριθμός των συστημάτων αυτού του τύπου είναι ακόμη περιορισμένος. Μετά την απόκτηση αρκετής εμπειρίας, η αξιοπιστία των συστημάτων κλειστού κύκλου προβλέπεται ότι θα είναι τουλάχιστον ίση με εκείνη των συστημάτων ανοικτού κύκλου, ενώ η διαθεσιμότητα θα είναι υψηλότερη χάρη στις μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης, που οφείλονται στην καθαρότητα του εργαζόμενου ρευστού.

Οι τουρμπίνες που χρησιμοποιούν βιοαέριο διατίθενται ευρέως, η ηλεκτρική τους ισχύς κυμαίνεται από 3 έως 8 MW ανά μονάδα και μπορούν να λειτουργούν με βιοαέριο χαμηλότερης περιεκτικότητας σε μεθάνιο σε σχέση με τις εμβολοφόρες μηχανές. Επιπλέον, τα συστήματα με τουρμπίνες έχουν γενικά καθαρότερες εκπομπές ρύπων και χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης σε σχέση με τις εμβολοφόρες μηχανές. (Η απόδοση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη χημική ενέργεια του καυσίμου είναι περίπου 30%).

#### 4.8.9 Κυψέλες καυσίμου (Fuel cells)

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μία ακόμη τεχνολογία η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις ΜΕΛ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και έχει εμφανιστεί στην αγορά τα τελευταία χρόνια. Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές ενεργειακής μετατροπής της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια, με τη μορφή συνεχούς ρεύματος (The California Energy Commission, Fuel cells. 2011). Ως καύσιμο χρησιμοποιούν υδρογόνο, το οποίο παράγεται είτε από το ίδιο το βιοαέριο, είτε από το μεθάνιο το οποίο ανακτάται από το βιοαέριο, μέσω της διαδικασίας αναμόρφωσης (reforming), που γίνεται σε ειδικές συσκευές που ονομάζονται αναμορφωτές. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτείται η επεξεργασία του βιοαερίου πριν τη χρήση του, για την απομάκρυνση θειούχων ενώσεων που περιέχει, διότι είναι τοξικές για τις κυψέλες.

Η βασική δομική μονάδα μιας κυψέλης καυσίμου αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια και μία μεμβράνη που τα διαχωρίζει, η οποία έχει το ρόλο του ηλεκτρολύτη. Μεταξύ αυτής της πολυμερισμένης μεμβράνης και των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα στρώμα καταλύτη. Το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης - το αρνητικό ηλεκτρόδιο - το οποίο ερχόμενο σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Η άνοδος και ο καταλύτης είναι τέτοιας κατασκευής ώστε η διάχυση των ατόμων του υδρογόνου να γίνεται με ομογενή τρόπο. Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερώθηκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο δημιουργώντας ηλεκτρισμό αφού η μεμβράνη αποτρέπει τη διέλευση τους μέσω αυτής. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου διαπερνούν τη μεμβράνη και ενώνονται με το οξυγόνο το οποίο τροφοδοτεί την κάθοδο - το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο - και παράγεται νερό. Όπως και πριν, την ομογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει η κατασκευή του ηλεκτροδίου. Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του. Μία απλή κυψέλη καυσίμου παράγει περίπου 0,7 Volt. Προκειμένου να παραχθούν μεγαλύτερες (και πρακτικά αξιοποιήσιμες) τάσεις, χρησιμοποιούνται περισσότερες κυψέλες σε σειρά, οι λεγόμενες συστοιχίες κυψελών καυσίμου (fuel cell stack). (Βικιπαιδεία, 2011).

Οι τύποι κυψελών καυσίμου που υπάρχουν διαχωρίζονται κυρίως από τον τύπο του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν και μπορούν να είναι κυψέλες καυσίμου χαμηλής (AFC, PEMFC, DMFC), μέσης (PAFC) ή υψηλής θερμοκρασίας (MCFC, SOFC). Η επιλογή της κυψέλης καυσίμου εξαρτάται από το αέριο εισαγωγής και τη χρήση της θερμότητας.

Η κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης ή μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) έχει το πλεονέκτημα της απλότητας της κατασκευής. Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιούν είναι ένα στέρεο πολυμερές μέσα στο οποίο κινούνται τα πρωτόνια. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας της (80°C) η θερμότητα μπορεί να τροφοδοτηθεί άμεσα σε ένα δίκτυο θερμότητας/ζεστού νερού. Ο τύπος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται επηρεάζει τη λειτουργική ζωή των PEMFC. καθώς είναι πολύ ευαίσθητες στις ακαθαρσίες του αερίου καυσίμου, κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα και του θείου, οι οποίες καταστρέφουν την άνοδο και υποβαθμίζουν τη λειτουργία της κυψέλης. Για το λόγο αυτό, είναι πολύ σημαντικός ο καθαρισμός του βιοαερίου για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου. Η ισχύς που παράγει μια τέτοια κυψέλη κυμαίνεται μεταξύ 50 και 250 kW.

Η περισσότερο αναπτυγμένη και εμπορικά διαθέσιμη κυψέλη καυσίμου είναι η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέως (PAFC). Οι θερμοκρασίες λειτουργίας της βρίσκονται στην περιοχή των 150 με 200°C. Σε αντίθεση με άλλες κυψέλες καυσίμου, η ηλεκτρική αποδοτικότητά της είναι χαμηλή, αλλά το πλεονέκτημά της έγκειται στο γεγονός ότι είναι λιγότερο ευαίσθητη στην παρουσία διοξειδίου του άνθρακα και μονοξειδίου του άνθρακα στο αέριο, με αποτέλεσμα να επιτρέπει περισσότερα είδη καυσίμων για τη τροφοδότηση της.

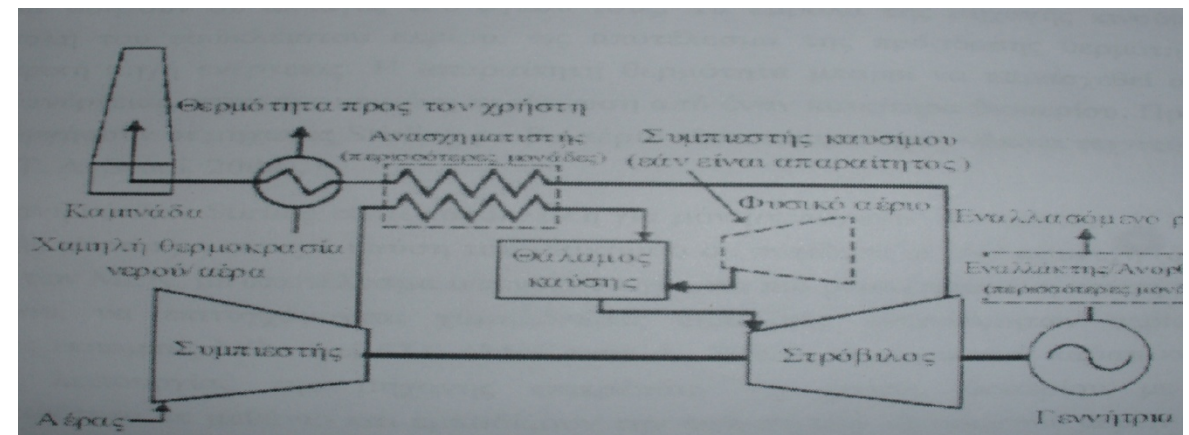
Επίσης, τα κελιά αυτά έχουν το αξιωματικό πλεονέκτημα να δομούν εξαιρετικά αξιόπιστα και χωρίς συντήρηση συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (Π.Σ. Χρήστου, 2010). Τα μειονεκτήματα των κυψέλων καυσίμου PAFC είναι το μεγάλο μέγεθος και βάρος, και ο ακριβός καταλύτης που χρησιμοποιείται (λευκόχρυσος). Η κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) χρησιμοποιείται με μια ροή ρευστού άνθρακα ως ηλεκτρολύτη. Η κυψέλη καυσίμου MCFC επιδέχεται συγκεντρώσεις του μονοξειδίου του άνθρακα έως και 40% κατ' όγκο χωρίς να επηρεάζεται από αυτό. Λόγω της θερμοκρασίας λειτουργίας της, που είναι από 600 έως 700°C, μπορούν να επιτευχθούν υψηλοί ρυθμοί αντιδράσεων χωρίς τη χρήση ακριβών καταλυτών και μπορεί να γίνει άμεση τροφοδότηση καυσίμου, όπως είναι το βιοαέριο, διότι η μετατροπή του μεθανίου σε υδρογόνο (αναμόρφωση) μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα στην κυψέλη χωρίς τη χρήση ξεχωριστής συσκευής. Μια άλλη υψηλής θερμοκρασίας κυψέλη καυσίμου είναι η κυψέλη καυσίμου σταθεροποιημένων ή στερεών οξειδίων (SOFC), η οποία λειτουργεί σε θερμοκρασίες μεταξύ 750 και 1.000°C. Η κυψέλη καυσίμου SOFC έχει υψηλή ηλεκτρική αποδοτικότητα και ο μετασχηματισμός του μεθανίου σε υδρογόνο μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα στην κυψέλη. Είναι ιδανική για τη χρήση βιοαερίου λόγω της χαμηλής ευαισθησίας της στο θείο (T. Al Seadi, 2008). Ένα μειονέκτημα των κελιών καυσίμου είναι η χαμηλή ταχύτητα της αντίδρασης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μικρά ρεύματα και χαμηλά ποσά ισχύος. Ένα ακόμη μειονέκτημά τους είναι ότι έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής, καθώς κάθε 5 με 7 χρόνια το σύστημα συστοιχιών κυψελών καυσίμου πρέπει να ανακατασκευάζεται. Επίσης, τα κόστη επένδυσης όλων των κυψελών καυσίμου βιοαερίου είναι πολύ υψηλά (12.000 €/kW), λόγω της περιορισμένης εφαρμογής τους μέχρι τώρα. Το ήδη υψηλό κόστος των κυψελών σε συνδυασμό με την ανάγκη ταυτόχρονης εγκατάστασης αναμορφωτών για την παραγωγή υδρογόνου αυξάνει κατά πολύ το κόστος επένδυσης, αλλά και το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του συστήματος, κάνοντας την εφαρμογή αυτή σε πολλές περιπτώσεις μη οικονομικά αποδοτική. Σε ορισμένες περιοχές, μπορεί να προσφέρονται οικονομικά κίνητρα για τη μερική κάλυψη του κόστους επένδυσης.

Παρόλο που οι κυψέλες καυσίμου έχουν υψηλό κόστος εγκατάστασης, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την απόδοση, την αξιοπιστία και τις εκπομπές σε σχέση με τις τουρμπίνες και τις ΜΕΚ. Οι κυψέλες καυσίμου είναι πιο αποδοτικές από τα συμβατικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούνται στις ΕΕΛ, καθώς μετατρέπουν το 30-55% της χημικής ενέργειας του βιοαερίου σε ηλεκτρική ενέργεια, σε σύγκριση με τις τουρμπίνες και τις ΜΕΚ που μετατρέπουν περίπου το 32%, ενώ μπορούν και διατηρούν την υψηλή τους απόδοση ακόμα και σε κατάσταση μη πλήρους φόρτισης. Παράγουν, επίσης, εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές ρύπων, όπως τα οξείδια του αζώτου και το μονοξείδιο του άνθρακα, από ότι οι ΜΕΚ βιοαερίου. Γεγονός που προσφέρει στις ΜΕΛ που θέλουν να επεκτείνουν τις εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής τους και δεν μπορούν λόγω των αυστηρών ορίων αέριων εκπομπών που τους έχουν τεθεί, μία καλή εναλλακτική εφαρμογή αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου. Επιπλέον, στις κυψέλες καυσίμου, η αντίδραση λαμβάνει χώρα χωρίς καύση, δεν χρησιμοποιούνται κινούμενα μέρη (στον εξοπλισμό), ο θόρυβος που δημιουργούν κατά τη λειτουργία τους είναι αμελητέος, έχουν γρήγορη απόκριση στις αλλαγές του φορτίου και παρουσιάζουν ευελιξία κατά τη διαστασιολόγησή τους. Τέλος, απαιτούν λιγότερη συντήρηση, καθώς το πιο κοινό είδος κυψέλης καυσίμου απαιτεί μόνο μία διήμερη διακοπή λειτουργίας για λόγους συντήρησης κάθε έτος.

#### 4.9. Μικροστρόβιλοι Αερίου (Microturbines)

Οι μικροστρόβιλοι αερίου είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, κατάλληλη για μικρής κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μικροστρόβιλοι είναι μικρές αεριωθούμενες

μηχανές που συνδέονται με μικρές ηλεκτρικές γεννήτριες και έχουν περίπλοκα ηλεκτρονικά συστήματα, τα οποία τους επιτρέπουν να παρέχουν ασφαλή και αποδοτική λειτουργία με διαρκή έλεγχο της κατάστασης. Οι αποδόσεις τους είναι της τάξης του 25-35% και η ηλεκτρική τους ισχύς είναι εν γένει κάτω από 200 kW, συνήθως κυμαίνεται από 25-80 kW. Οι μονάδες μικροτροβίλων είναι μικρού μεγέθους, πολύ υψηλής ταχύτητας και συνήθως συμπεριλαμβάνουν ένα μικροστρόβιλο μεγάλης ταχύτητας, ένα συμπιεστή, μία γεννήτρια υψηλής ταχύτητας και τα ηλεκτρονικά ισχύος για τη σύνδεση τους στο δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μηχανής, ο ατμοσφαιρικός αέρας εισέρχεται στη μονάδα και διέρχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας (ανασχηματιστής), όπου προθερμαίνεται πριν την εισαγωγή του στο θάλαμο καύσης. Ο αέρας στη συνέχεια περνάει στον καυστήρα, όπου αναμιγνύεται με καύσιμο βιοαέριο, αναφλέγεται και καίγεται. Ο αναφλεκτήρας χρησιμοποιείται μόνο κατά την εκκίνηση και από εκεί και έπειτα η φλόγα είναι αυτοσυντηρούμενη. Τα θερμά αέρια καύσης από τον καυστήρα εκτονώνονται στον στρόβιλο και η θερμική ενέργεια των καυτών διεσταλμένων αερίων μετατρέπεται σε στρεφόμενη μηχανική ενέργεια του στρόβιλου, ο οποίος κινεί το συμπιεστή και τη γεννήτρια. Τα θερμά αέρια καύσης που εξέρχονται από τον στρόβιλο κατευθύνονται προς τον εναλλάκτη θερμότητας όπου ανακτάται ένα τμήμα της θερμότητάς τους και μεταβιβάζεται στο εισερχόμενο κρύο ρεύμα αέρα. Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται το σύστημα λειτουργίας των μικροτουρμπίνων. Οι κύριες κατασκευαστικές διαφορές των μικροστρόβιλων από τους συμβατικούς αεριοστρόβιλους είναι η χρησιμοποίηση ενός ενιαίου άξονα για την οδήγηση του συμπιεστή, του στρόβιλου και της γεννήτριας και η ύπαρξη ενός εναλλάκτη θερμότητας (ανασχηματιστή) που με τη λειτουργία του μειώνει την κατανάλωση καυσίμου και αυξάνει περαιτέρω την απόδοση. Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου μπορεί να είναι της τάξης του 30-40%. Επιπλέον, τα συστήματα μικροστρόβιλων έχουν υψηλότερη πυκνότητα ισχύος (σε σχέση με το βάρος τους) σε σύγκριση με τις συμβατικές γεννήτριες και μπορούν να λειτουργούν με βιοαέριο με χαμηλό ποσοστό μεθανίου.



Σχήμα 4.4 Σύστημα λειτουργίας Μικροτουρμπίνων

Τα πλεονεκτήματα των μικροστρόβιλων είναι η σχεδόν αθόρυβη λειτουργία με λίγες δονήσεις, τα χαμηλά επίπεδα εκπομπής ρύπων, το μικρό βάρος, το μικρό μέγεθος, ο μικρός αριθμός κινούμενων μερών και η υψηλή αξιοπιστία. Επιπλέον, εγκαθίστανται εύκολα, καταλαμβάνουν περιορισμένο χώρο και δεν απαιτούν ιδιαίτερη συντήρηση (χρειάζεται όμως καταρτισμένο τεχνικό προσωπικό). Οι ταχύτητες τους είναι υψηλές, της τάξης των 60.000 rpm και η θερμική αποδοτικότητά τους φτάνει το 5-30%.

Το κύριο μειονέκτημα των μικροστροβίλων είναι το όριο στον αριθμό των φορών που μπορούν να εκκινηθούν και να τεθούν εκτός λειτουργίας. Κατά συνέπεια, είναι κοινή η πρακτική να κρατούνται διαρκώς σε λειτουργία μόλις εκκινηθούν. Επίσης, ενώ είναι σχεδιασμένοι ώστε να εκπέμπουν λίγους ρύπους σε πλήρες φορτίο, κατά τη λειτουργία τους σε χαμηλό φορτίο αυξάνονται οι εκπομπές.

Η τεχνολογία των μικροστροβίλων είναι σχετικά καινούρια με αποτέλεσμα να μην έχει εφαρμοστεί ακόμη σε μεγάλη κλίμακα και να μην υπάρχουν επαρκή στοιχεία για την πραγματική απόδοση, το χρόνο ζωής, και τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης τέτοιων μονάδων.

#### 4.9.1 Μηχανές Stirling

Το βιοαέριο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε μηχανές Stirling για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μηχανή Stirling είναι μία παλινδρομική μηχανή εξωτερικής καύσης η οποία λειτουργεί βάσει της αρχής ότι οι αλλαγές στη θερμοκρασία των αερίων οδηγούν σε αλλαγές του όγκου τους. Τα έμβολα της μηχανής κινούνται από την διαστολή του εσώκλειστου αερίου, ως αποτέλεσμα της πρόσδοσης θερμότητας από μια εξωτερική πηγή ενέργειας. Η απαραίτητη θερμότητα μπορεί να παρασχεθεί από διάφορες πηγές ενέργειας, στην προκειμένη περίπτωση από έναν καυστήρα βιοαερίου. Προκειμένου να λειτουργήσουν οι μηχανές Stirling με βιοαέριο είναι απαραίτητη κάποια τεχνική προσαρμογή τους.

Η μηχανή κύκλου Stirling είναι κατάλληλη για μόνιμη παραγωγή ενέργειας. Η λειτουργία της μηχανής γίνεται με συνεχή καύση του καυσίμου σε αντίθεση με την ασυνεχή (διακοπτόμενη) καύση των MEK, με αποτέλεσμα αφενός, να γίνεται πιο ολοκληρωμένη καύση του καυσίμου, αφετέρου, να επιτυγχάνονται χαμηλότερες εκπομπές ανεπιθύμητων αερίων (ιδιαίτερα χαμηλές εκπομπές NOx και CO). Η εξωτερική καύση και ο κλειστός κύκλος λειτουργίας της μηχανής επιτρέπουν τη χρήση βιοαερίου με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε μεθάνιο και εμποδίζουν την έκθεση των κινούμενων μερών του κινητήρα στα προϊόντα της καύσης, με αποτέλεσμα οι φθορές να είναι περιορισμένες και οι δαπάνες συντήρησης να είναι χαμηλές. Ωστόσο, απαιτούνται στεγανωτικές διατάξεις για την αποφυγή διαρροών τόσο του αερίου υψηλής πίεσης προς το εξωτερικό του κυλίνδρου, όσο και του λιπαντικού λαδιού προς το εσωτερικό του κυλίνδρου. Επιπλέον, οι μηχανές Stirling έχουν χαμηλά επίπεδα θορύβου, υψηλές αποδόσεις κατά τη διάρκεια μερικής λειτουργίας του φορτίου και παρέχουν ασφαλή λειτουργία με αναμενόμενο χρόνο ζωής 25.000 ώρες.

Η ηλεκτρική αποδοτικότητά των μηχανών αυτών κυμαίνεται μεταξύ 24 και 28% και προς το παρόν έχουν δοκιμαστεί μόνο μικρής ιπποδύναμης μηχανές (9-52 kW<sub>el</sub>). Τα έξοδα κεφαλαίου είναι σχετικά υψηλά, κυρίως διότι οι μηχανές κατασκευάζονται σε μικρές ποσότητες, και γενικά δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία που να αφορούν στην αξιοπιστία και στο προσδόκιμο ζωής των μηχανών αυτών. Για τους λόγους αυτούς, η εφαρμογή των μηχανών Stirling για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις ΜΕΛ είναι ακόμη πολύ περιορισμένη.

#### 4.10 Συστήματα αξιοποίησης της ανακτημένης θερμότητας

Στις ΕΕΛ, αποβάλλονται μεγάλες ποσότητες θερμότητας από τη λειτουργία διαφόρων μερών του εξοπλισμού που κατά κύριο λόγο δεν έχουν σχεδιαστεί για την παραγωγή θερμότητας (όπως MEK, αέριο στρόβιλοι, αποτεφρωτήρες). Στο βαθμό που αυτή η απόβλητη θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω παραγωγή ενέργειας, η

συνολική απόδοση του συστήματος αυξάνεται και παράγεται πρόσθετη ενέργεια από την ίδια ποσότητα καυσίμου (CH2M HILL, 2003).

Η απορριπτόμενη θερμότητα προέρχεται από τα συστήματα ψύξης των μηχανών του εξοπλισμού και από το θερμικό περιεχόμενο των καυσαερίων διαφόρων εφαρμογών, και ανακτάται με τη βοήθεια συστημάτων εναλλακτών θερμότητας, με λέβητες καυσαερίων (ή λέβητες ανακομιδής θερμότητας) και από όσα περιβλήματα μηχανών είναι κατασκευασμένα από ειδικά υλικά κατάλληλα για την ανάκτηση θερμότητας.

Η ανακτημένη θερμότητα είναι υπό μορφή θερμού νερού ή ατμού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για κάλυψη αναγκών θέρμανσης της εγκατάστασης (θέρμανση διεργασιών, θέρμανση κτιρίων, ζήρανση ιλύος), είτε για (περαιτέρω) παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση αμμοστρόβιλων, ή για την κάλυψη αναγκών ψύξης (π.χ. δροσισμός/κλιματισμός κτιρίων, ψύξη για διεργασίες όπως η αφύγρανση βιοαερίου) με τη χρήση ψυκτών απορρόφησης και συστημάτων θερμικής αποθήκευσης της ψύξης με πάγο.

#### 4.10.1. Αμμοστρόβιλος (Κύκλος βάσης Rankine)

Ο αμμοστρόβιλος εξαρτάται από κάποια χωριστή πηγή ενέργειας και δεν μετατρέπει άμεσα το καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι αμμοστρόβιλοι απαιτούν μία πηγή ατμού υψηλής πίεσης που παράγεται σε κάποιο λέβητα ή αμμοπαραγωγό ανάκτησης θερμότητας. Ο αμμοστρόβιλος μπορεί να αποτελείται από πολλές βαθμίδες, κάθε μία από τις οποίες μπορεί να οριστεί με την ανάλυση της εκτόνωσης του ατμού από μία υψηλότερη σε μία χαμηλότερη πίεση.

Ο θερμοδυναμικός κύκλος του αμμοστρόβιλου είναι ο κύκλος Rankine. Στον κύκλο βάσης Rankine, εργαζόμενο μέσο είναι το νερό, που εξατμίζεται με ανάκτηση θερμότητας από αέρια υψηλής θερμοκρασίας (600°C ή και υψηλότερης) (CH2M HILL, 2003). Ο ατμός ρέει μέσα από το στρόβιλο και παράγει μηχανική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μίας γεννήτριας η οποία είναι συζευγμένη με το στρόβιλο. Όταν εξέρχεται από το στρόβιλο συμπυκνώνεται και επιστέφει στο λέβητα για να επαναληφθεί η διαδικασία. Η παραγωγή μηχανικής/ηλεκτρικής ενέργειας με ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας (80-300°C) είναι δυνατή εάν χρησιμοποιηθούν οργανικά ρευστά, όπως η τολουένη και το πεντάνιο, τα οποία έχουν θερμοκρασία βρασμού αρκετά χαμηλότερη από εκείνη του νερού (CH2M HILL, 2003).

Για τις εφαρμογές βιοαερίου, η απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί από τα καυσαέρια μίας ηλεκτροπαραγωγικής MEK (εμβολοφόρα μηχανή ή αεριοστρόβιλο) και να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός αμμοστρόβιλου. Με την εφαρμογή αυτή αυξάνεται κατά 4% η απόδοση ενός συστήματος με εμβολοφόρα μηχανή και κατά 8% η απόδοση ενός συστήματος με αεριοστρόβιλο. Έτσι, τα συστήματα με MEK, που τυπικά έχουν ένα βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται στο 33-38%, αυξάνουν το βαθμό απόδοσής τους περίπου στο 37-42% και ία συστήματα με αεριοστρόβιλο, που τυπικά έχουν ένα βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται στο 28%, αυξάνουν το βαθμό απόδοσής τους περίπου στο 36%. Το σύστημα των μικροστρόβιλων δεν είναι κατάλληλο για την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας (CH2MHILL, 2003).

Ο βαθμός απόδοσης των αμμοστρόβιλων είναι μικρός (10-30%), αλλά σημασία έχει το γεγονός, ότι ένα τέτοιο σύστημα παράγει πρόσθετη ισχύ χωρίς να ξοδεύει καύσιμο. Το ελάχιστο μέγεθος για την πρακτική εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας σε μία ΕΕΛ μεσαίας κλίμακας είναι ένα αμμοστρόβιλος ισχύος 250 kW, συνδεδεμένος σε μία MEK ισχύος 1,8 MW και πάνω, από την οποία θα ανακτάται θερμότητα (CH2M HILL, 2003). Είναι δυνατή όμως και η εγκατάσταση συστημάτων μικρότερης ισχύος. Από κατασκευαστικής πλευράς,

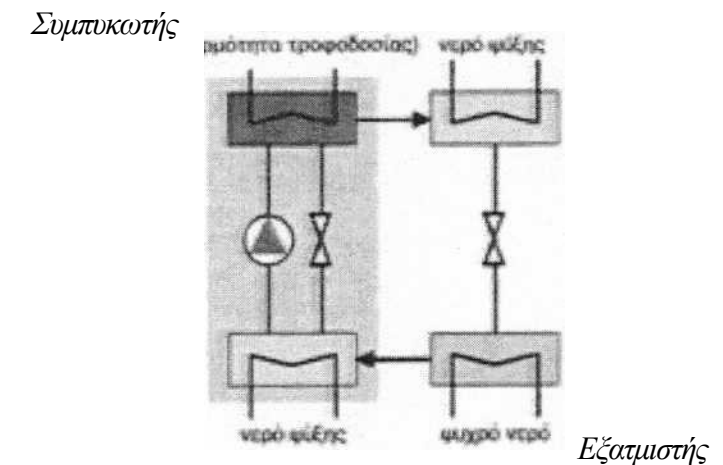


χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των υλικών, ώστε να μην παθαίνουν διάβρωση από το οργανικό ρευστό (π.χ. χρήση ανοξείδωτου χάλυβα), και στη στεγανότητα των στοιχείων του συστήματος, ώστε να μην διαφεύγει το οργανικό ρευστό στην ατμόσφαιρα. Επίσης, εξαιτίας της ανάγκης άντλησης των καυσαερίων των MEK, η συμβατότητα της εφαρμογής αυτής με τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις είναι οριακή, και επομένως είναι απαραίτητο να αξιολογείται με βάση τις εγκαταστάσεις της κάθε MEA (CH2M HILL, 2003).

Ο χρόνος εγκατάστασης μικρών συστημάτων (μέχρι 50 kW) είναι 4-8 μήνες, ενώ για μεγαλύτερες μονάδες είναι 1-2 έτη. Καθώς η τεχνολογία αυτή είναι σχετικά νέα, δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες για την αξιοπιστία των συστημάτων. Εκτιμάται ότι η μέση ετήσια διαθεσιμότητά τους είναι 80-90% και η αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 20 έτη.

#### 4.10.2 Ψύκτες απορρόφησης

Οι ψύκτες απορρόφησης είναι οι πιο διαδεδομένοι ψύκτες παγκοσμίως. Η θερμική συμπίεση του ψυκτικού μέσου επιτυγχάνεται με τη χρήση υγρού διαλύματος ψυκτικού μέσου/ροφητικού υλικού και πηγή θερμότητας, αντικαθιστώντας με αυτόν τον τρόπο την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ενός μηχανικού συμπιεστή. Ως πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται η θερμότητα που ανακτάται από τις MEK και τους αεριοστρόβιλους. Η ανακτώμενη θερμότητα μπορεί να είναι και χαμηλής θερμοκρασίας (90°C), έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και τριτογενή απορριπτόμενη θερμότητα μετά την εφαρμογή ενός κύκλου βάσης Rankine (CH2M HILL, 2003).



Σχήμα 4.5: Αρχή λειτουργίας ψύκτη απορρόφησης.

Για ψυχρό νερό άνω των 0°C, όπως απαιτείται στον κλιματισμό, τυπικά χρησιμοποιείται ένα υγρό διάλυμα  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ , με το νερό ως ψυκτικό μέσο. Τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν εσωτερική αντλία για το διάλυμα, καταναλώνοντας όμως μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη λειτουργία του ψύκτη απορρόφησης  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ , η κρυστάλλωση του διαλύματος πρέπει να αποφευχθεί με εσωτερικό έλεγχο της θερμοκρασίας απόρριψης θερμότητας στη μηχανή. Τα κύρια σημεία ενός ψύκτη απορρόφησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5 (ΚΑΠΕ, 2011). Ο συνδυασμός νερού (ψυκτικό μέσο) και άλατος  $\text{LiBr}$  (μέσο απορρόφησης) χρησιμοποιείται για την παραγωγή ψυχρού νερού σε θερμοκρασίες 6-12°C. Για την παραγωγή χαμηλότερων θερμοκρασιών (από +5°C μέχρι -60°C) χρησιμοποιείται ο

συνδυασμός αμμωνίας (ψυκτικό μέσο) και νερού (μέσο απορρόφησης). Επομένως, τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον κλιματισμό χώρων αλλά και για ψυκτικούς θαλάμους.

Η ψύξη βασίζεται στην εξάτμιση του ψυκτικού μέσου (νερό) στον εξατμιστή σε πολύ χαμηλές πιέσεις. Το ατμοποιημένο ψυκτικό μέσο απορροφάται στον απορροφητή, αραιώνοντας το διάλυμα I-bO/LiBr (για να καταστεί η διαδικασία απορρόφησης αποδοτική, απαιτείται ψύξη σε αυτό το στάδιο της διεργασίας). Το διάλυμα αντλείται συνεχώς στον αναγεννητή (γεννήτρια ατμού), όπου επιτυγχάνεται η αναγέννηση του διαλύματος χρησιμοποιώντας θερμότητα (θερμότητα αναγέννησης/τροφοδοσίας). Το ψυκτικό μέσο στη συνέχεια, συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή και κυκλοφορεί με τη βοήθεια μιας στραγγαλιστικής/εκτονωτικής βαλβίδας πάλι στον εξατμιστή.

Οι μόνιμες εγκαταστάσεις αυτής της τεχνολογίας απαιτούν ζεστό νερό (π.χ. από το σύστημα ψύξης μίας μηχανής), νερό ψύξης (ψυκτικό μέσο) και μία μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, απαιτείται ένα σύστημα κυκλοφορίας ψυχρού νερού στην εγκατάσταση. Η απαίτηση αυτή καθιστά την τεχνολογία του ψύκτη απορρόφησης ασύμβατη με τις περισσότερες υφιστάμενες εγκαταστάσεις και επομένως πρέπει να σχεδιάζεται για νέες ΜΕΛ, διότι η εγκατάσταση της εξαρτάται από τη συμβατότητα του υπάρχοντος συστήματος κλιματισμού με το σύστημα ψυχρού νερού, ενώ επιπλέον πρέπει να βρίσκεται κοντά στη ΜΕΚ που παράγει τη θερμότητα που χρησιμοποιείται (CH2M HILL, 2003).

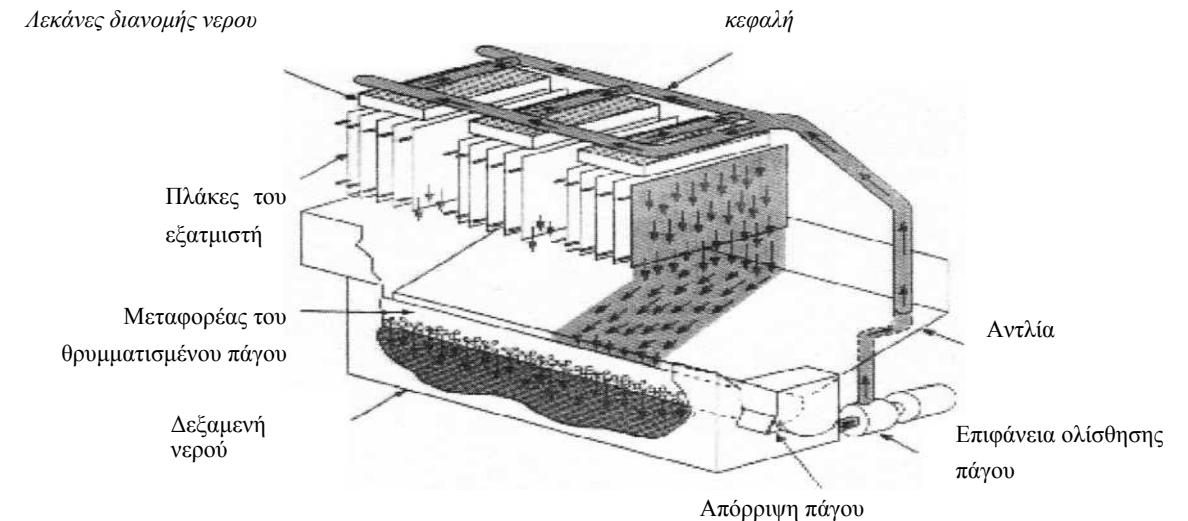
Η ονομαστική ψυκτική ικανότητα των ψυκτών απορρόφησης είναι της τάξης αρκετών εκατοντάδων kW (15kW - 5MW). Το ελάχιστο μέγεθος μονάδας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά για αυτήν την εφαρμογή είναι της τάξης των 10 kW. Η απαιτούμενη θερμοκρασία της θερμικής πηγής είναι συνήθως πάνω από 80°C (80-110°C) για τις μηχανές μονής βαθμίδας ενώ ο COP είναι της τάξης του 0,6 έως 0.8. Μηχανές διπλής βαθμίδας με δύο στάδια συμπίεσης, απαιτούν θερμοκρασία άνω των 140°C, αλλά ο COP μπορεί να επιτύχει τιμές μέχρι και 1,2. Η τεχνολογία αυτή είναι γνωστή και ώριμη, χρησιμοποιείται ευρέως και το κόστος συντήρησής της αναμένεται χαμηλό.

Το αρχικό κόστος εγκατάστασης των ψυκτών απορρόφησης είναι περίπου 50% μεγαλύτερο από τις συμβατικές μονάδες, για το λόγο αυτό κάθε ΜΕΛ που σκέφτεται να εφαρμόσει την τεχνολογία αυτή χρειάζεται να διεξάγει μία οικονομοτεχνική μελέτη σκοπιμότητας.

#### **4.10.3 Αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας με παγολεκάνες, σε συνδυασμό με ψύκτη απορρόφησης**

Ένας τρόπος καλύτερης εκμετάλλευσης του ψύκτη απορρόφησης σε μία εγκατάσταση κλιματισμού είναι η χρησιμοποίηση συστήματος αποθήκευσης ψύχους. Η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ψύχους βασίζεται στην πρόσκαιρη αποθήκευση θερμικής ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας, κατά την διάρκεια των περιόδων εκτός ωρών αιχμής και την απόδοσή της σε ώρες αιχμής, όταν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο υψηλή. Η ψύξη με απορρόφηση από μόνη της δεν μπορεί να δημιουργήσει πάγο διότι ο εξατμιστής του συστήματος θα παγώσει. Ωστόσο, με τη χρήση ενός ψύκτη απορρόφησης ως συμπυκνωτή, είναι δυνατή η αποτελεσματική αποθήκευση της ψυκτικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της νύχτας, με την κατανάλωση μόνο μίας μικρής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας (CH2M HILL, 2003). Αντί λοιπόν να έχουμε έναν ψύκτη μεγάλης ισχύος που θα λειτουργεί 10-12 ώρες την ημέρα, χρησιμοποιούμε έναν μικρότερης ισχύος ο οποίος θα λειτουργεί περισσότερες ώρες την ημέρα και με μικρότερη ισχύ η οποία θα είναι κοντά στην ονομαστική του. Άρα ο ψύκτης θα έχει καλύτερη απόδοση .

Η αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας σε μορφή πάγου, κάνει χρήση της λανθάνουσας θερμότητας τήξης του νερού, 335 kJ/kg στους 0°C. Μπορεί να επιτευχθεί μείωση του όγκου αποθήκευσης μέχρι και 25% σε σύγκριση με εκείνου που απαιτείται αν χρησιμοποιηθεί αποθήκευση ψυχρού νερού για το ίδιο ποσό ενέργειας που αποθηκεύεται. Πρόκειμένου να αποθηκευθεί η ενέργεια, ο εξοπλισμός (η εγκατάσταση) ψύξης θα πρέπει να διαθέτει ψυκτικό υγρό σε θερμοκρασίες από -12 °C έως -5°C. Το ρευστό μετάδοσης της θερμότητας που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του πάγου, θα μπορούσε να είναι ένα ψυκτικό ή ένα δευτερεύον ψυκτικό υγρό, όπως η γλυκόλη ή κάποιο άλλο αντιψυκτικό διάλυμα. Στις εφαρμογές αποθήκευσης πάγου συνήθως χρησιμοποιείται διάλυμα 25% αιθυλενογλυκόλης (ethylene glycol) σε νερό.



**Σχήμα 4.6 :** Σύστημα αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας με θρυμματοποίηση πάγου (CH2M HILL, 2003).

Όταν ο νέος ψύκτης λειτουργεί με σκοπό να αποθηκεύσει ψυκτική ενέργεια (θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C) θα έχει μειωμένη ισχύ κατά 20 - 30°C σε σχέση με τον αντίστοιχο ψύκτη νερού που καλύπτει απευθείας τα ψυκτικά φορτία στη συμβατική περίπτωση (θερμοκρασία περιβάλλοντος 35°C). Όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης, η αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας γίνεται τις νυχτερινές ώρες όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι αρκετά χαμηλότερη από τη θερμοκρασία της ημέρας, οπότε ο βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος. Όμως λόγω της προσθήκης γλυκόλης ο βαθμός απόδοσης πέφτει, επομένως ο βαθμός απόδοσης είναι λίγο μεγαλύτερος από την συμβατική-περίπτωση.

Μία από τις τεχνολογίες αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας με παγολεκάνες είναι η θρυμματοποίηση πάγου. Στην εφαρμογή αυτή ο πάγος δημιουργείται πάνω στην επιφάνεια πλακών ενός εξατμιστή και περιοδικά αποδεσμεύεται (αποψύχεται) σε μια δεξαμενή γεμάτη με νερό (Δ. Φλώρος, 2010). Όταν υπάρχει ανάγκη για ψύξη στην ΕΕΛ, μια ροή ψυχρού νερού εισάγεται στη δεξαμενή αποθήκευσης πάγου και ψύχεται σε θερμοκρασία λίγο πάνω από τη θερμοκρασία δημιουργίας πάγου, ενώ ο πάγος λιώνει (CH2M HILL, 2003). Απαιτείται αρκετός ελεύθερος χώρος πάνω από τη δεξαμενή ώστε να τοποθετηθεί το συγκρότημα του εξατμιστή. Στο **Σχήμα 4.6** φαίνεται ένα σύστημα αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας με θρυμματοποίηση πάγου. Το ελάχιστο μέγεθος πρακτικής εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας είναι ψυκτικής ικανότητας 25 t. Το βέλτιστο μέγεθος εφαρμογής δεν είναι γνωστό - πιθανόν να είναι ψυκτικής ικανότητας 100 t για την ανάκτηση θερμότητας από μία ΜΕΚ 1,8 MW (CH2M HILL, 2003).

#### 4.11 Μονάδα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ)

Η Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας αποτελεί σύνηθες χαρακτηριστικό των ΜΕΛ μεγάλης κλίμακας και έχει αποδειχθεί ότι είναι μία αξιόπιστη, αποτελεσματική και οικονομικά αποδοτική μέθοδος παραγωγής ενέργειας. Επειδή η ΣΗΘ εκμεταλλεύεται τη θερμότητα που σε άλλη περίπτωση θα χανόταν κατά τη συμβατική διακριτή παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής ενέργειας), η συνολική απόδοση αυτών των ολοκληρωμένων συστημάτων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των μεμονωμένων συστημάτων. Επιπλέον, με την αξιοποίηση της αποβαλλόμενης θερμότητας περιορίζονται οι πρόσθετες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου προς το περιβάλλον, ιδιαίτερα του CO<sub>2</sub> και μειώνεται σημαντικά η ολική κατανάλωση καυσίμων. Σε μία μονάδα ΣΗΘ, γίνεται ανάκτηση και αξιοποίηση των μεγάλων ποσών θερμότητας που αποβάλλονται στο περιβάλλον είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων των μηχανών, είτε μέσω των καυσαερίων. Η αποβαλλόμενη θερμότητα ανακτάται με τη βοήθεια συστημάτων εναλλακτών θερμότητας, με λέβητες καυσαερίων και από όσα περιβλήματα μηχανών είναι κατασκευασμένα από ειδικά υλικά κατάλληλα για την ανάκτηση θερμότητας, και μπορεί να αξιοποιηθεί είτε απευθείας για την κάλυψη θερμικών αναγκών της εγκατάστασης (θέρμανση διεργασιών, θέρμανση κτιρίων, ζήρανση ιλύος), είτε για την περαιτέρω παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση αμμοστρόβιλων. Έτσι, ενώ οι συμβατικές ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες έχουν βαθμό απόδοσης 30-45%, ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων συμπαραγωγής φθάνει το 80- 90%. Τα αποδοτικότερα συστήματα ΣΗΘ (με πάνω από 80% συνολικό βαθμό απόδοσης) είναι εκείνα που ικανοποιούν μεγάλη θερμική ζήτηση με ταυτόχρονη παραγωγή σχετικά μικρότερης ηλεκτρικής ισχύος. Η απόδοση του συνολικού συστήματος προκύπτει από μια αλληλεπίδραση μεταξύ των μεμονωμένων βαθμών απόδοσης των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής και ανάκτησης θερμότητας. Δεδομένου ότι από ένα σύστημα ΣΗΘ προκύπτουν δύο ή περισσότερα χρησιμοποιήσιμα ενεργειακά προϊόντα, ο καθορισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης των συστημάτων αυτών είναι πιο σύνθετος απ' ό,τι στα απλά συστήματα.

Μια συνηθισμένη συμβατική μονάδα συμπαραγωγής αποτελείται από μια ηλεκτροπαραγωγική μονάδα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που συμπεριλαμβάνει τον εξοπλισμό επεξεργασίας του βιοαερίου, ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας, ένα σύστημα ελέγχου (της λειτουργίας του συστήματος, των αερίων εκπομπών, της περιεκτικότητας του βιοαερίου σε H<sub>2</sub>S, κ.α.) και μία εξάτμιση. Λόγω των σύνθετων διεργασιών στα συστήματα ΣΗΘ, απαιτείται συνεχής επίβλεψη των εγκαταστάσεων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται και ένα σύστημα ηχομόνωσης του συστήματος. Το είδος της τεχνολογίας ΣΗΘ που θα χρησιμοποιηθεί σε μία ΜΕΛ καθορίζεται από τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις και από τις κανονιστικές ρυθμίσεις που ισχύουν σε κάθε περιοχή. Πολλά από τα επιμέρους στοιχεία μίας μονάδας ΣΗΘ επιλέγονται με βάση τη διαθέσιμη ποσότητα βιοαερίου, το ρυθμιστικό καθεστώς που ισχύει και τις εκτιμήσεις κόστους.

Κάθε ΜΕΛ που σκέφτεται να εγκαταστήσει μία μονάδα συμπαραγωγής χρειάζεται να διεξάγει μία οικονομοτεχνική μελέτη σκοπιμότητας για να καθορίσει την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης αυτής στις υφιστάμενες εγκαταστάσεις της. Οι επιπτώσεις κατά την εγκατάσταση του συστήματος ΣΗΘ είναι ελάχιστες.

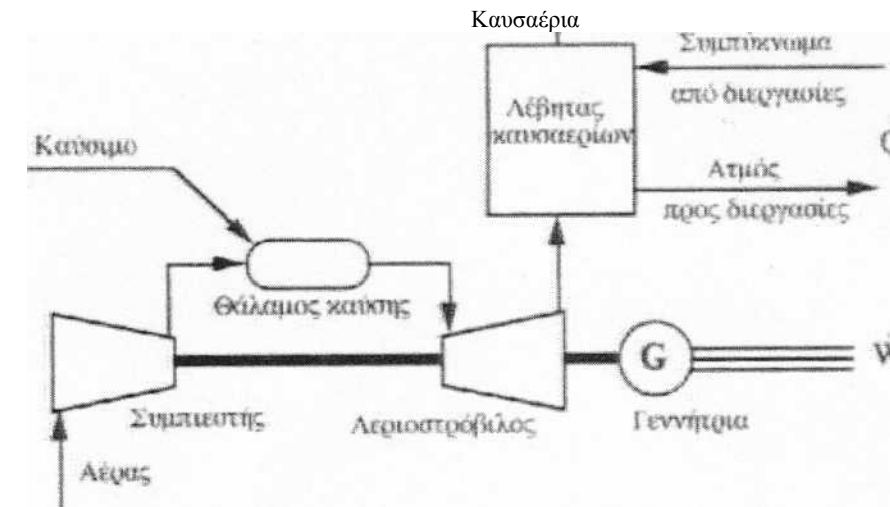
##### 4.11.1 ΣΗΘ με αεριοστρόβιλο

Στα συστήματα ΣΗΘ με αεριοστρόβιλο επιτυγχάνεται ανάκτηση μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας υψηλής ποιότητας που απορρίπτεται με τα καυσαέρια του αμμοστρόβιλου με τη

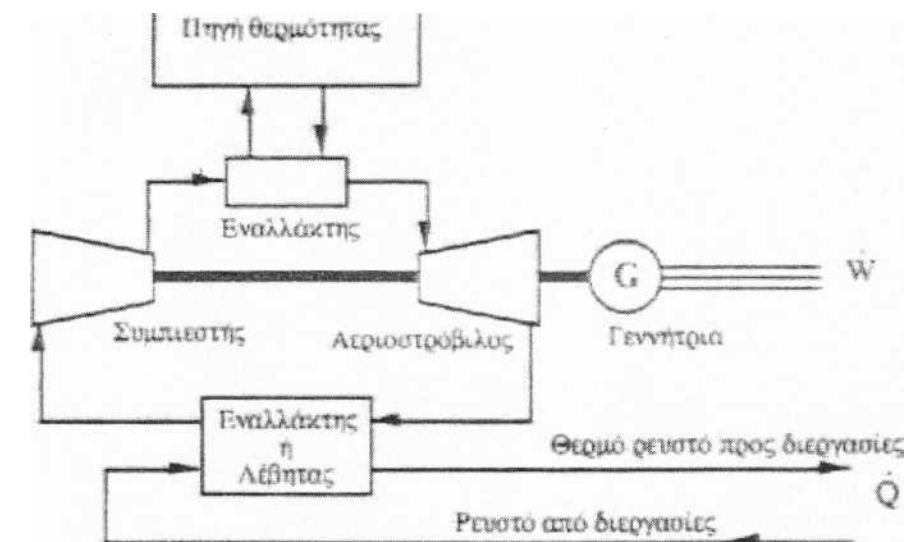
χρήση ενός εναλλάκτη θερμότητας. Τα καυσαέρια εκτονώνονται στον αεριοστρόβιλο (που κινεί τη γεννήτρια), από τον οποίο αποβάλλονται σε θερμοκρασίες 300- 600°C. Η υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων κάνει τις μονάδες αυτές ιδανικές για συμπαραγωγή, με αντίστοιχη αύξηση του βαθμού απόδοσης στο 60-80%. Στο **Σχήμα 4.7** φαίνεται ένα σύστημα ΣΗΘ με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου, ενώ στο **Σχήμα 4.8** φαίνεται ένα σύστημα ΣΗΘ με αεριοστρόβιλο κλειστού κύκλου.

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι εκμετάλλευσης της θερμότητας των καυσαερίων :

- Άμεση χρήση σε θερμικές διεργασίες (θέρμανση, ξήρανση κλπ).



**Σχήμα 4.7:** Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου



**Σχήμα 4.8:** Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο κλειστού κύκλου .

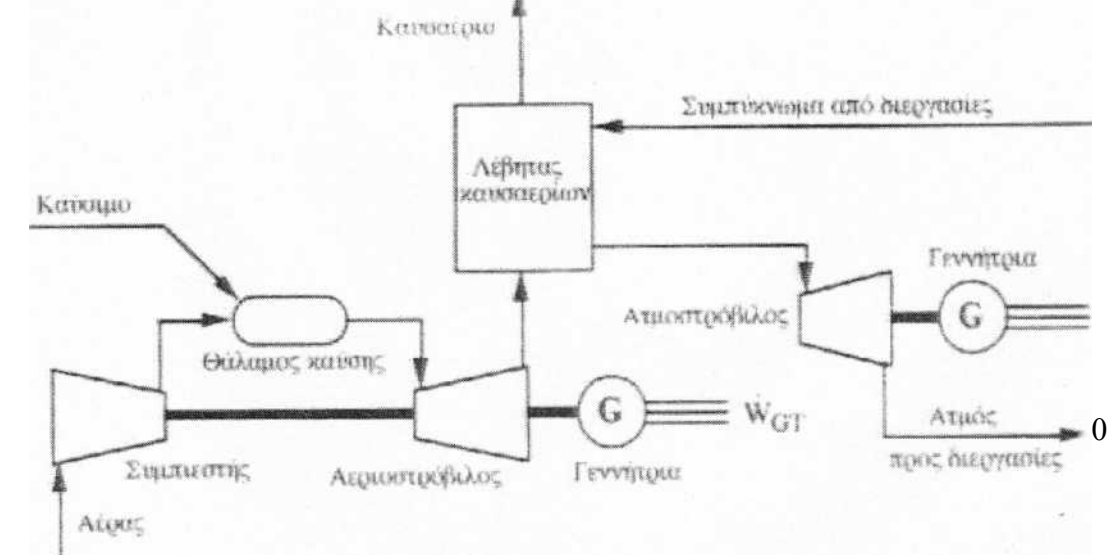
- Διοχέτευση των καυσαερίων σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας (λέγεται και λέβητας καυσαερίων). Εκεί παράγεται ατμός υψηλών χαρακτηριστικών, που είναι κατάλληλος όχι μόνον για θερμικές διεργασίες αλλά και για την κίνηση ατμοστρόβιλου (συνδεδεμένου με γεννήτρια ή άλλο μηχάνημα). Στη δεύτερη περίπτωση πρόκειται για σύστημα συνδυασμένου κύκλου. Και στους δύο τρόπους, είναι δυνατή η αύξηση του θερμικού περιεχομένου (δηλ. της

θερμοκρασίας) των καυσαερίων και επομένως της αποδιδόμενης θερμότητας, όταν απαιτείται, με την τοποθέτηση και λειτουργία καυστήρων μετά τον αεριοστρόβιλο, οι οποίοι εκμεταλλεύονται την υψηλή περιεκτικότητα οξυγόνου των καυσαερίων για την καύση πρόσθετου καυσίμου.

#### 4.11.2 ΣΗΘ συνδυασμένου κύκλου

Ο όρος «συνδυασμένος κύκλος» αναφέρεται σε συστήματα με δύο θερμοδυναμικούς κύκλους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κάποιο εργαζόμενο ρευστό και λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας, αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης. Τα πιο διαδεδομένα συστήματα συνδυασμένου κύκλου είναι εκείνα με συνδυασμό αεριοστρόβιλου με ατμοστρόβιλο (κύκλοι Joule - Rankine). Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στο **Σχήμα 4.9**.

Η υψηλή περιεκτικότητα οξυγόνου στα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου (περίπου 17%), επιτρέπει την καύση συμπληρωματικού καυσίμου στον λέβητα καυσαερίων, εάν κριθεί αναγκαία για την αύξηση ισχύος του συστήματος. Η συμπληρωματική καύση αυξάνει τον βαθμό απόδοσης του συστήματος κατά τη λειτουργία σε μερικό φορτίο, αλλά κάνει την εγκατάσταση και ιδιαίτερα τις διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου πιο περίπλοκες. Η ισχύς των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου κυμαίνεται συνήθως στην περιοχή 20-400 MW, ενώ κατασκευάζονται επίσης και μικρότερες μονάδες με ισχύ 4-11 MW (Ε. Μουφλουζέλης, 2005). Η συγκέντρωση ισχύος (ισχύς ανά μονάδα όγκου) των συστημάτων αυτών είναι υψηλότερη από τη συγκέντρωση ισχύος των συστημάτων απλού κύκλου αεριοστρόβιλου (Joule).



**Σχήμα 4.9:** Σύστημα συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης (κύκλος βάσης Rankine) (Φραγκόπουλος Χ. Α. et al, 1994).

Ο χρόνος εγκατάστασης είναι 2-3 έτη. Είναι δυνατή η ολοκλήρωση της εγκατάστασης σε δύο πεδία: Εγκαθίσταται πρώτα η μονάδα αεριοστρόβιλου, που μπορεί να είναι έτοιμη για λειτουργία σε 12-18 μήνες. Ενώ αυτή λειτουργεί, συμπληρώνεται το σύστημα με τη μονάδα του ατμοστρόβιλου. Η αξιοπιστία των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου είναι 80-85%, η

μέση ετήσια διαθεσιμότητα 77-85% και ο οικονομικός χρόνος ζωής 15-25 έτη (Φραγκόπουλος X. A. et al., 1994).

#### 4.12 ΣΗΘ με παλινδρομικές ΜΕΚ

Η πιο συνήθης εφαρμογή των μονάδων ΣΗΘ είναι οι θερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής τύπου συστοιχίας (BTTP), με κινητήρες καύσης που συνδέονται με μια γεννήτρια. Η θερμότητα ανακτάται από το σύστημα εξάτμισης και ψύξης. Η θερμότητα των καυσαερίων της καύσης βιοαερίου ή/και του νερού ψύξης του κινητήρα εσωτερικής καύσης (70°C - 90°C) μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη θερμικών απαιτήσεων άλλων τμημάτων της εγκατάστασης (συστήματα επεξεργασίας στραγγισμάτων, αναερόβιοι χωνευτές, κλίνες ξήρανσης κ.λπ.) με την βοήθεια εναλλακτών θερμότητας.

Όπως και στην περίπτωση των αεριοστρόβιλων, τα καυσαέρια των κινητήρων βρίσκουν είτε άμεση είτε έμμεση χρήση. Η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι 300- 400°C, δηλ. αισθητά χαμηλότερη από εκείνη του αεριοστρόβιλου, γι' αυτό και κάνει πιο συχνή την ανάγκη για συμπληρωματική πηγή θερμότητας. Αυτή αποκτάται, είτε με τοποθέτηση καυστήρα και προσαγωγή αέρα για καύση συμπληρωματικού καυσίμου στον λέβητα καυσαερίων (ή στον κλίβανο της θερμικής διεργασίας), είτε με εγκατάσταση βοηθητικού λέβητα. Οι μεγάλοι κινητήρες προσφέρουν τη δυνατότητα συνδυασμένου κύκλου. Η διάταξη μοιάζει με εκείνη του ΣΗΘ συνδυασμένου κύκλου, όπου η μονάδα συμπιεστή - θαλάμου καύσης - αεριοστρόβιλου αντικαθίσταται από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης και τους εναλλάκτες θερμότητας που τον συνοδεύουν.

Μία μονάδα ΣΗΘ που χρησιμοποιεί ΜΕΚ έχει συνολικό βαθμό απόδοσης που φτάνει το 91% και παράγει 25-37% ηλεκτρική ενέργεια και 48-64% θερμότητα. Η διάρκεια ζωής της είναι 15-20 έτη και εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας, την ποιότητα του καυσίμου και την ποιότητα της συντήρησης. Οι παλινδρομικοί κινητήρες απαιτούν τακτικότερη συντήρηση σε σχέση με τα προηγούμενα συστήματα, με αποτέλεσμα μικρότερη μέση ετήσια διαθεσιμότητα (80-90%).

##### 4.12.1 ΣΗΘ με μικροστροβίλους

Η χρήση μικροστροβίλων στα συστήματα ΣΗΘ με βιοαέριο, ενώ είναι ακόμα περιορισμένη, ολοένα και αυξάνεται. Τα συστήματα ΣΗΘ με μικροστροβίλους μπορούν να εξασφαλίσουν απόδοση πάνω από 80%.

Η απόδοση του μικροστροβίλου σε ένα σύστημα συμπαραγωγής, μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω με την παράλληλη αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας και πίεσης του κύκλου, γεγονός όμως που απαιτεί την κατασκευή του συστήματος με υλικά υψηλής θερμικής αντοχής. Εντούτοις, οι υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν μεγαλύτερες εκπομπές NO<sub>x</sub>, δημιουργώντας την ανάγκη για διαφορετική σχεδίαση του συμπιεστή προκειμένου να αποφευχθούν οι επιπλέον εκπομπές.

##### 4.12.2 ΣΗΘ με κυψέλες καυσίμου

Η συμπαραγωγή ενέργειας με κυψέλες καυσίμου είναι δυνατή, αλλά η εφαρμογή αυτή είναι ακόμη υπό ανάπτυξη. Τα βασικά χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου στην ολοκλήρωση με συστήματα ΣΗΘ είναι, η χαμηλή στάθμη θορύβου, οι χαμηλές εκπομπές ρύπων, η υψηλή

απόδοση (ακόμη και στις μικρές μονάδες), η πολύ καλή διαχείριση σε χαμηλό φορτίο, οι μικρές απαιτήσεις συντήρησης και η αρθρωτή (modular) δομή, που διευκολύνει την κατασκευή μονάδων με την επιθυμητή ισχύ .

Η ηλεκτρική απόδοση μιας κυψέλης, καθορίζεται από τις αντίστοιχες αποδόσεις των επί μέρους υποσυστημάτων που τη συνθέτουν, ενώ η απόδοση των συστημάτων ΣΗΘ κυψελών καυσίμου είναι συνάρτηση του τύπου της κυψέλης και της δυναμικότητάς της (Energy Nexus Group, Apr. 2002). Τα συστήματα συμπαραγωγής που βασίζονται στις κυψέλες PEMFC και SOFC, έχουν πολύ υψηλές αποδόσεις στη συμπαραγωγή (80%), χρησιμοποιούν λίγα καύσιμα, προκαλούν ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και θεωρούνται καλή λύση για εφαρμογή σε επίπεδο ΣΗΘ μικρής κλίμακας .

#### **4.12.3 ΣΗΘ με μηχανές Stirling**

Η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας είναι επίσης δυνατή με μηχανές Stirling, καθώς οι θερμοκρασίες των καυσαερίων στις μηχανές Stirling κυμαίνεται μεταξύ 250 και 300°C. Η τεχνική αυτή δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί και διαδοθεί αρκετά, αλλά το ενδιαφέρον για την ανάπτυξή της έχει αυξηθεί χάρη στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει σε σύγκριση με συστήματα κινητήρων Diesel, αεριοστρόβιλων ή ατμοστρόβιλων, που είναι η δυνατότητα υψηλότερου βαθμού απόδοσης, η μεγαλύτερη ευελιξία καυσίμου, η καλή συμπεριφορά σε μερικό φορτίο, οι χαμηλές εκπομπές ρύπων και η χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.



## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥΣ

#### 5.1 Ψυττάλεια

Το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων Ψυττάλειας (ΚΕΛΨ) είναι η κύρια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, με μέση παροχή εισερχομένων λυμάτων 760.000 m<sup>3</sup>/d. Οι εγκαταστάσεις του κατασκευάστηκαν σε 2 φάσεις. Οι εγκαταστάσεις της Α΄ Φάσης λειτουργούν από το 1994, ενώ το 2004 ξεκίνησε η δοκιμαστική λειτουργία των εγκαταστάσεων της Β΄ Φάσης.

Οι εγκαταστάσεις της Α΄ Φάσης περιλαμβάνουν προεπεξεργασία των λυμάτων σε εγκαταστάσεις του Ακροκεράμου, με απομάκρυνση των βαρέων στερεών, εσχάρωση εξάμμωση και απόσπηση. Τα προεπεξεργασμένα λύματα μεταφέρονται με υποθαλάσσιους αγωγούς στη νήσο Ψυττάλεια όπου η επεξεργασία συνεχίζεται με πρωτοβάθμια επεξεργασία στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης και επεξεργασία της ιλύος, που περιλαμβάνει προπάχυνση, αναερόβια χώνευση μεταπάχυνση και αφυδάτωση. Οι εγκαταστάσεις της Β΄ Φάσης περιλαμβάνουν τη βιολογική βαθμίδα επεξεργασίας των λυμάτων με το σύστημα της ενεργού ιλύος, που αποτελείται από τους βιολογικούς αντιδραστήρες και τις τελικές καθιζήσεις, καθώς και την επεξεργασία της βιολογικής ιλύος που περιλαμβάνει μηχανική πάχυνση αναερόβια χώνευση, μεταπάχυνση και αφυδάτωση. Κατά τη διεργασία της χώνευσης της πρωτοβάθμιας ιλύος παράγονται κατά μέσο όρο περίπου 50.000 m<sup>3</sup> βιοαερίου την ημέρα.

Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως μεθάνιο CH<sub>4</sub> σε ποσοστό 61 - 65% και διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub> σε ποσοστό 34 - 38%. Επίσης το βιοαέριο περιέχει και υδροθείο H<sub>2</sub>S σε συγκέντρωση 1.000 – 1.200 ppm. Το βιοαέριο χρησιμοποιείται ως καύσιμο στη μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (ΣΗΘΕ), ηλεκτρικής ισχύος 7,14 MW και 10,35 MW ωφέλιμης θερμότητας. Το βιοαέριο που παράγεται στους χωνευτές κατευθύνεται στα αεριοφυλάκια και αφού καθαριστεί στην πλυντρίδα, προκειμένου η συγκέντρωση του υδροθείου να φθάσει σε επίπεδα χαμηλότερα από 1000 ppm. Στην συνέχεια συμπιέζεται σε 3 συμπιεστές και κατόπιν υποβάλλεται σε αφύγρανση. Στην συνέχεια το συμπιεσμένο αέριο καίγεται σε 3 αερομηχανές και μέσω των 3 γεννητριών, η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο του ΚΕΛΨ καλύπτοντας τις ανάγκες των εγκαταστάσεων επεξεργασίας, καθώς επίσης και σε θερμική ενέργεια, η οποία αξιοποιείται με την ψύξη των λιπαντικών και του νερού των χιτωνίων των αερομηχανών και μέσω εναλλακτών καλύπτει τις θερμικές ανάγκες των χωνευτών.

Οι τρεις εγκατεστημένες αερομηχανές είναι του οίκου Dresser Waukesha και καταναλώνουν βιοαέριο σε πίεση 3,2 bar. Οι γεννήτριες είναι του οίκου Leroy Somer και παράγουν ρεύμα 3300 V σε συχνότητα 50 Hz. Η τάση αυτή μετασχηματίζεται σε 20 kV και στη συνέχεια διατίθεται στις εγκαταστάσεις του ΚΕΛΨ και στον ΔΕΣΜΗΕ. Στην παρούσα

φάση η παραγωγή της μονάδας ΣΗΘΕ καλύπτει τις ανάγκες των εγκαταστάσεων Α΄ Φάσης του ΚΕΛΨ σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμική ενέργεια (θέρμανση δεξαμενών αναερόβιας χώνευσης), με αντίστοιχη εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους, ενώ παράλληλα υπάρχει οικονομικό όφελος μέσω της πώλησης της περίσσειας της ηλεκτρικής ενέργειας στον ΔΕΣΜΗΕ.

Η συνολική μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται κατά μέσο όρο σε 2.700 MWh. Με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτονται οι ενεργειακές απαιτήσεις για την λειτουργία των εγκαταστάσεων Α΄ Φάσης που ανέρχονται μηνιαίως κατά μέσο όρο σε 1.414 MWh.



Εικ 5.1 Η Ψυττάλεια από ψηλά

## 5.2 Δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας

### 5.2.1. Συν-χώνευση ιλύος με λίπη

Στο ΚΕΛΨ δεν υπάρχουν διατάξεις απολίπανσης. Υπάρχουν κάποιες διατάξεις συλλογής των επιπλεόντων στις ΔΠΚ, στις οποίες ίσως να συγκρατείται ένα μικρό μέρος των εισερχόμενων λιπών, αλλά δεν επιτυγχάνεται αποτελεσματική απολίπανση, με αποτέλεσμα μία ποσότητα λιπών να εισέρχεται στις δεξαμενές αερισμού προκαλώντας την υπερβολική αύξηση των νηματοειδών βακτηρίων και την εμφάνιση αφρισμού και διόγκωσης. Τα λίπη που απομακρύνονται μεταφέρονται και διατίθενται σε ΧΥΤΑ. Ένας τρόπος αύξησης της παραγωγής βιοαερίου είναι η αύξηση της απόδοσης απομάκρυνσης λιπών στην πρωτοβάθμια επεξεργασία και η μεταφορά τους στους χωνευτές για τη συν - χώνευσή τους με την ιλύ. Με την εφαρμογή αυτή, πέρα από την αύξηση της παραγωγής βιοαερίου, βελτιώνεται η απόδοση των μετέπειτα διεργασιών επεξεργασίας λυμάτων, καθώς

εμποδίζεται η είσοδος των λιπών στις δεξαμενές αερισμού, και εξαλείφεται το κόστος μεταφοράς και διάθεσης των λιπών στους ΧΥΤΑ.

#### **5.2.1.1 Βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας της αναερόβιας χώνευσης**

Η μετάβαση από τη μεσόφιλη (37°C) στη θερμοφιλή (55°C) αναερόβια χώνευση με αύξηση της θερμοκρασίας είναι μία εφαρμογή με την οποία μπορεί να αυξηθεί η παραγωγή του βιοαερίου και κατά συνέπεια και η on-site παραγωγή ενέργειας. Καθώς ο χρόνος παραμονής των χωνευτών είναι ήδη μικρός (18 ημέρες κατά μέσο όρο), μία τέτοια αλλαγή θα βοηθήσει να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της υπερφόρτωσης των χωνευτών, που αντιμετωπίζει το ΚΕΛΨ, και θα εξαλείψει την ανάγκη επένδυσης για την επέκταση της χωρητικότητας των χωνευτών. Επιπλέον, με την εφαρμογή αυτή θα μειωθεί το οργανικό υλικό στην χωνεμένη ιλύ (από 66% σε 57%), ενώ τα ξηρά στερεά θα αυξηθούν ελαφρώς (από 3,2% σε 4%), γεγονός το οποίο θα έχει θετική επίδραση στην αφυδάτωση της ιλύος.

### **5.3 Αξιοποίηση Βιοαερίου στο Κ.Ε.Α.Ψ**

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το 2010, το 49% της ηλεκτρικής ενέργειας αγοράστηκε (53 GWh/έτος) και το 51% (ή 55 GWh/έτος) παράχθηκε από τις μονάδες ΣΗΘ του ΚΕΛΨ (29 GWh παράχθηκαν από τις ΣΗΘ βιοαερίου και 26 GWh από τη ΣΗΘ φυσικού αερίου), ενώ 2,5 GWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκαν στο ΚΕΛΨ πωλήθηκαν στην ΔΕΗ. Οι θερμικές ανάγκες της μονάδας ξήρανσης καλύπτονταν από μία ΣΗΘ με αεριοστρόβιλο φυσικού αερίου και οι θερμικές ανάγκες της χώνευσης καλύπτονταν από την θερμότητα που ανακτάται από τις ΣΗΘ βιοαερίου (συμπληρωματικά υπάρχει και ένας λέβητας βιοαερίου).

Λίγο πριν το 2011, μετά από απόφαση της Διοίκησης του ΚΕΛΨ, ο αεριοστρόβιλος σταμάτησε να λειτουργεί με αποτέλεσμα έκτοτε οι θερμικές ανάγκες της μονάδας ξήρανσης να καλύπτονται από τους (συμπληρωματικούς) καυστήρες διπλού καυσίμου (βιοαερίου - φυσικού αερίου). Ταυτόχρονα, αποφασίστηκε να χρησιμοποιείται μεγαλύτερη ποσότητα βιοαερίου για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της μονάδας ξήρανσης παρά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ούτως ώστε να μειωθεί η αγορά φυσικού αερίου. Με βάση τη στρατηγική αυτή, προβλέπεται ότι το 2011 το ΚΕΛΨ θα έχει 7% αυτονομία ηλεκτρικής ενέργειας, 55% αυτονομία θερμικής ενέργειας υψηλής θερμοκρασίας και 128% αυτονομία θερμικής ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας.

Με βάση την ενεργειακή ανάλυση, η στρατηγική που αποφάσισε να ακολουθήσει το ΚΕΛΨ για το 2011 δεν είναι ο πιο ενεργειακά αποδοτικός τρόπος αξιοποίησης του βιοαερίου και μείωσης των ενεργειακών δαπανών. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η βελτιστοποίηση του τρόπου με τον οποίο χρησιμοποιείται το βιοαέριο για την on-site παραγωγή ενέργειας (ηλεκτρική-θερμική).

Με βάση την τωρινή παραγωγή βιοαερίου, που είναι ίση με 66.000 m<sup>3</sup>/ημέρα, προτείνεται ο εξής διαχωρισμός της ποσότητας βιοαερίου: (1) χρήση 45.000 m<sup>3</sup>/ημέρα βιοαερίου στη νέα και στην παλιά ΣΗΘ βιοαερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την ανάκτηση θερμότητας, (2) χρήση 18.000 m<sup>3</sup>/ημέρα βιοαερίου στον καυστήρα διπλού καυσίμου για την ανάκτηση θερμότητας για τις ανάγκες της μονάδας ξήρανσης, και (3) χρήση 2.500 m<sup>3</sup>/ημέρα βιοαερίου στον λέβητα βιοαερίου για την παραγωγή θερμότητας για τις ανάγκες της χώνευσης. Αυτός ο καταμερισμός της ποσότητας βιοαερίου χρειάζεται να μελετηθεί αναλυτικότερα για να επιβεβαιωθεί ότι είναι ο βέλτιστος.

Εναλλακτικά, για τη βελτιστοποίηση της χρήσης βιοαερίου, υπό τις τρέχουσες συνθήκες τιμών αγοράς ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου, προτείνεται η μεγιστοποίηση της on-site

παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας: (1) ενισχύοντας την χρήση βιοαερίου στη νέα και στην παλιά ΣΗΘ βιοαερίου, (2) λειτουργώντας τον αεριοστρόβιλο, ούτως ώστε να παραχθεί πρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια on-site, και (3) ελαχιστοποιώντας την ποσότητα βιοαερίου που καίγεται στους δαυλούς καύσης.

Χωρίς την λειτουργία του αεριοστρόβιλου και χωρίς την εφαρμογή των βελτιώσεων που προτείνονται για την εξοικονόμηση και την ανάκτηση ενέργειας στο ΚΕΛΨ, εκτιμάται ότι με τη χρήση του βιοαερίου στις ΣΗΘ μπορεί να παραχθεί έως και το 52% της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται ετησίως για τις ανάγκες του ΚΕΛΨ. Εάν οι προτεινόμενες βελτιώσεις εφαρμόζονταν, χωρίς την λειτουργία του αεριοστρόβιλου, εκτιμάται ότι η αυτονομία σε ηλεκτρική ενέργεια του ΚΕΛΨ θα μπορούσε να φτάσει το 80-90%. Τέλος, εάν επαναλειτουργούσε ο αεριοστρόβιλος, χωρίς την εφαρμογή των προτεινόμενων βελτιώσεων, εκτιμάται ότι το ΚΕΛΨ θα μπορούσε να επιτύχει το 100% της αυτονομίας σε ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα που ανακτάται από τις ΣΗΘ βιοαερίου και η θερμότητα που παράγεται από το λέβητα βιοαερίου θα ήταν αρκετή για να καλύψει τις θερμικές ανάγκες των χωνευτών.

### **5.3.1. Ανάκτηση θερμότητας για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων**

Στις εγκαταστάσεις προεπεξεργασίας στον Ακροκέραμο και στις εγκαταστάσεις κύριας επεξεργασίας στην Ψυττάλεια υπάρχουν κτίρια τα οποία απαιτείται να θερμανθούν το χειμώνα και να ψυχθούν το καλοκαίρι. Η ζήτηση θερμικής ενέργειας στην Ψυττάλεια είναι 80.920 kWh/έτος και στον Ακροκέραμο είναι 135.660 kWh/έτος. Η ζήτηση ψυκτικής ενέργειας στην Ψυττάλεια είναι 20.310 kWh/έτος και στον Ακροκέραμο είναι 38.225 kWh/έτος.

Οι ανάγκες θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων και του εξοπλισμού των εγκαταστάσεων στην Ψυττάλεια μπορούν να καλυφθούν από τη θερμότητα που ανακτάται από τις ΣΗΘ, χωρίς να απαιτείται η χρήση ενός ξεχωριστού λέβητα θέρμανσης. Η ανάκτηση θερμότητας και η χρήση της είτε για θέρμανση, είτε για ψύξη χώρων μπορεί να γίνει με τη χρήση αντλιών θερμότητας, οι οποίες χρησιμοποιούν ζεστό νερό θερμοκρασίας 80<sup>ο</sup> ως πηγή θερμότητας. Αυτές οι αντλίες είναι ειδικά κατασκευασμένες για τη χρήση ανακτημένης θερμότητας από μονάδες ΣΗΘ και κυρίως χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κρύου νερού για την κάλυψη των ψυκτικών αναγκών το καλοκαίρι. Ονομάζονται και αντλίες θερμότητας απορρόφησης και είναι διαθέσιμες για ένα εύρος τιμών απόδοσης ψύξης μεταξύ 30 και 140 kW.

Για εφαρμογή στην Ψυττάλεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντλία θερμότητας απορρόφησης με τα εξής χαρακτηριστικά: απόδοση ψύξης ίση με 30 kW, θερμοκρασία κρύου νερού εισόδου ίση με 15<sup>ο</sup>C, θερμοκρασία κρύου νερού εξόδου ίση με 9<sup>ο</sup>C, ισχύ εισόδου (από ΣΗΘ - ζεστό νερό) ίση με 40 kW, θερμοκρασία ζεστού νερού ΣΗΘ ίση με 86<sup>ο</sup>C και ισχύ απόβλητης θερμότητας ίση με 75 kW.

Η απόβλητη θερμότητα αυτής της αντλίας απορρόφησης συνήθως απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα μέσω ενός πύργου ψύξης. Στην Ψυττάλεια, μπορεί να εφαρμοστεί μία καλύτερη λύση: η απόβλητη θερμότητα μπορεί να απελευθερωθεί απευθείας στο ρεύμα λυμάτων εισροής ή εκροής, εξοικονομώντας το κόστος του ανεμιστήρα του πύργου ψύξης και αυξάνοντας την απόδοση της αντλίας θερμότητας. Η μετάδοση θερμότητας στα λύματα κατά προτίμηση πραγματοποιείται με μία ειδική πλάκα εναλλαγής θερμότητας η οποία είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα. Αυτή η πλάκα πρέπει να τοποθετηθεί στον αγωγό των λυμάτων με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε να μπορεί να απομακρύνεται για τον καθαρισμό της. Μία επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας περίπου 22 m είναι απαραίτητη για τη

συγκεκριμένη εφαρμογή. Αυτό σημαίνει ότι μία πλάκα εναλλαγής θερμότητας 11 m<sup>2</sup> η οποία χρησιμοποιεί και τις δύο πλευρές της θα είναι αρκετή.

Τέλος, οι ανάγκες θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων και του εξοπλισμού των εγκαταστάσεων στον Ακροκέραμο μπορούν να καλυφθούν με τη χρήση μία αντλίας θερμότητας, η οποία θα χρησιμοποιεί τα εισερχόμενα λύματα ως πηγή θερμότητας.

#### 5.4 Υδροηλεκτρικό έργο

Στο ΚΕΛΨ υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης μίας μικρής υδροηλεκτρικής μονάδας που θα εκμεταλλεύεται την εκροή των επεξεργασμένων λυμάτων για την παραγωγή μίας πρόσθετης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας. Το συμπέρασμα από μία πρώτη προκαταρκτική μελέτη είναι ότι είναι δυνατή η εγκατάσταση ενός υδροστροβίλου, υδραυλικής ισχύος 300 kW και υδραυλικής κεφαλής 3,5 m, στο σημείο εκροής. Το κόστος αυτής της επένδυσης για την παραγωγή 1,9 GWh/έτος (περίπου το 2% της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ψυττάλεια) είναι υψηλό, αλλά ο χρόνος απόσβεσης της εφαρμογής φαίνεται αρκετά λογικός (γύρω στα 4 χρόνια).

Εκτός των μέτρων που προτείνονται από την ενεργειακή ανάλυση, συνίσταται και η εξέταση των εξής εφαρμογών:

- Εφαρμογή μίας μεθόδου προεπεξεργασίας της βιολογικής ιλύος πριν τη χώνευση (θερμική υδρόλυση, επεξεργασία με υπερήχους, επεξεργασία με ένζυμα κτλ.) για την ενίσχυση της παραγωγής βιοαερίου.
- Ενεργειακή αξιοποίηση της ξηραμένης ιλύος με αποτέφρωση ή αεριοποίηση ή πυρόλυση για ανάκτηση θερμότητας on-site.
- Αντικατάσταση ορισμένων κινητήρων του εξοπλισμού της μονάδας που έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις με κινητήρες υψηλής απόδοσης.
- Πραγματοποίηση βελτιώσεων στο σύστημα συλλογής των λυμάτων, προκειμένου να μειωθεί η εισροή ανεπιθύμητων βιομηχανικών αποβλήτων στα λύματα που εισέρχονται στο ΚΕΛΨ.

#### 5.5 Μονάδα επεξεργασίας λυμάτων Seine Amont (MEΛ Seine Amont)

##### 5.5.1 Γενική περιγραφή της μονάδας

Η MEΛ Seine Amont βρίσκεται στο Valenton, το οποίο ανήκει στο Νομό Val-de-Marne που βρίσκεται στα νοτιοανατολικά του Παρισιού. Οι εγκαταστάσεις της καταλαμβάνουν μία έκταση γης ίση με 197 στρέμματα. Η MEΛ επεξεργάζεται τα λύματα του ανατολικού και νοτιοανατολικού Παρισιού, τα οποία αποτελούνται κυρίως από αστικά υγρά απόβλητα και ένα μικρό ποσόστο (20%) από βιομηχανικά υγρά απόβλητα. Στην Εικόνα 5.9 απεικονίζονται οι εγκαταστάσεις της MEΛ Seine Amont.

Η MEΛ Seine Amont κατασκευάστηκε σε τέσσερις φάσεις. Το 1987 τέθηκε σε λειτουργία το πρώτο μισό της πρώτης γραμμής επεξεργασίας (Valenton 1), δυναμικότητας 150.000 m<sup>3</sup>/ημέρα. Το 1992 τέθηκε σε λειτουργία το δεύτερο μισό της πρώτης γραμμής επεξεργασίας, δυναμικότητας 150.000 m<sup>3</sup>/ημέρα. Το 2004 έγινε διεύρυνση της MEΛ με μία δεύτερη γραμμή επεξεργασίας (Valenton 2), δυναμικότητας 300.000 m<sup>3</sup>/ημέρα. Η δεύτερη γραμμή επεξεργασίας καταλαμβάνει δύο φορές λιγότερη έκταση από την πρώτη γραμμή επεξεργασίας. Τέλος, το 2006 λειτούργησε η μονάδα θερμικής ξήρανσης και η μονάδα πυρόλυσης της ιλύος.

Η ΜΕΛ Seine Amont δέχεται τα λύματα από 3.500.000 ισοδύναμους κατοίκους. Η ημερήσια δυναμικότητα επεξεργασίας της ανέρχεται σε 600.000 m<sup>3</sup>/ημέρα σε ξηρές συνθήκες και σε 1.500.000 m<sup>3</sup>/ημέρα σε βροχερές συνθήκες. Η μέγιστη παροχή εισερχόμενων λυμάτων στη μονάδα είναι 21 m<sup>3</sup>/s.

Χώρος διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων είναι ο Σηκουάνας ποταμός. Οι τρόποι αξιοποίησης της επεξεργασμένης ύλης είναι η πυρόλυση με ταυτόχρονη ανάκτηση ενέργειας, η αξιοποίηση της ξηραμένης ύλης στη γεωργία και η ενεργειακή αξιοποίηση της ύλης στις τσιμεντοβιομηχανίες. Όσον αφορά τα απόβλητα της προεπεξεργασίας: τα εσχαρίσματα αποτεφρώνονται, τα λίπη χωνεύονται και η άμμος αξιοποιείται σε δημόσια έργα. Το παραγόμενο βιοαέριο χρησιμοποιείται ως καύσιμο στη μονάδα ξήρανσης της ύλης.



Εικόνα 5.2: Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων της ΜΕΛ Seine Amont.

#### 5.5.1.1 Περιγραφή των σταδίων επεξεργασίας της μονάδας

Τα λύματα, μέσω ενός αποχετευτικού αγωγού, φτάνουν στην ΜΕΛ. Αρχικά, λαμβάνει χώρα η προεπεξεργασία των λυμάτων, η οποία περιλαμβάνει την εσχάρωση, την εξάμμιση και την απολίπανση των λυμάτων. Τα εσχαρίσματα συν-αποτεφρώνονται με την ιλύ και τα λίπη που απομακρύνονται συν-χωνεύονται με την ιλύ. Με αυτόν τον τρόπο εξαλείφεται η ανάγκη μεταφοράς και διάθεσης των αποβλήτων της προεπεξεργασίας εκτός της μονάδας.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η κύρια επεξεργασία των λυμάτων, η οποία λαμβάνει χώρα σε δύο παράλληλες γραμμές επεξεργασίας, την παλιότερη γραμμή επεξεργασίας, Valenton 1 (V1), και την νεότερη γραμμή επεξεργασίας, Valenton 2 (V2). Η ροή των λυμάτων που εξέρχεται

από τις εγκαταστάσεις προεπεξεργασίας χωρίζεται και μία ποσότητα λυμάτων κατευθύνεται προς την πρώτη γραμμή επεξεργασίας (V1) και η υπόλοιπη ποσότητα λυμάτων κατευθύνεται προς την δεύτερη γραμμή επεξεργασίας (V2).

Στην πρώτη γραμμή επεξεργασίας (Valenton 1), τα λύματα εισέρχονται στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας επεξεργασίας όπου υφίστανται πρωτοβάθμια καθίζηση. Κατά το στάδιο αυτό της επεξεργασίας απομακρύνεται μία ποσότητα ιλύος, η λεγόμενη πρωτοβάθμια ιλύς V1. Στη συνέχεια, τα λύματα υφίστανται βιολογική επεξεργασία. Η βιολογική μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος ενεργού ιλύος η οποία λαμβάνει χώρα στις δεξαμενές αερισμού. Οι δεξαμενές αυτές είναι χωρισμένες σε δύο ζώνες, στις αερόβιες ζώνες γίνεται η οξείδωση των ανθρακούχων και αζωτούχων ουσιών (νιτροποίηση) και στις ανοξικές ζώνες γίνεται η αναγωγή των νιτρικών σε αέριο άζωτο (απονιτροποίηση). Ο απαραίτητος αερισμός των δεξαμενών αερισμού παρέχεται από ένα σύστημα αερισμού με διαχύτες λεπτής φυσαλίδας οι οποίοι τροφοδοτούνται από φυσητήρες. Τα λύματα, ακολούθως, εισέρχονται στις δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης, όπου γίνεται διαχωρισμός των στερεών και υγρών των λυμάτων. Τα στερεά καθιζάνουν στον πάτο των δεξαμενών, σχηματίζοντας τη λεγόμενη ενεργό ιλύ. Η ενεργός ιλύς απομακρύνεται από τον πάτο των δεξαμενών, μία ποσότητα της επιστρέφει στις δεξαμενές αερισμού μέσω των αντλιών ανακυκλοφορίας ιλύος και οδηγούνται σε έναν ομογενοποιητή. Στον ίδιο ομογενοποιητή οδηγούνται και η τριτοβάθμια ιλύς και η πρωτοβάθμια ιλύς της πρώτης γραμμής επεξεργασίας. Μετά την ομογενοποίηση των διαφόρων ρευμάτων ιλύος, μία ποσότητα ομογενοποιημένης ιλύος οδηγείται στους χωνευτές όπου υφίσταται αναερόβια χώνευση και η υπόλοιπη ποσότητα οδηγείται στον ίδιο αναμίκτη που πηγαίνουν οι βιολογικές ιλεις. Από την αναερόβια χώνευση της ιλύος παράγεται βιοαέριο, περίπου 36.539 Nm<sup>3</sup>/ημέρα. Μία ποσότητα του βιοαερίου που παράγεται στην αναερόβια χώνευση επιστρέφει στους χωνευτές και η μεγαλύτερη ποσότητα χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε καυστήρα για την παραγωγή της θερμότητας που απαιτείται για τη θερμική ξήρανση της ιλύος. Η χωνεμένη ιλύς, αρχικά, οδηγείται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης της χωνεμένης ιλύος και στη συνέχεια πηγαίνει στον αναμίκτη όπου αναμιγνύεται με την βιολογική και την ομογενοποιημένη ιλύ. Το ρεύμα ιλύος που εξέρχεται από τον αναμίκτη αφυδατώνεται με φυγοκέντρηση και έπειτα αποθηκεύεται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης μαζί με την αφυδατωμένη με φιλτρόπρεσσες ιλύ. Ακολούθως, μία ποσότητα αφυδατωμένης ιλύος οδηγείται στη μονάδα ξήρανσης και μία ποσότητα οδηγείται σε έναν αποτεφρωτήρα. Η αποτέφρωση της ιλύος είναι ένας τρόπος διάθεσης της ιλύος και γίνεται σε έναν αποτεφρωτήρα ρευστομηχανικής κλίσης δυναμικότητας 2.860 kg ξηρά στερεά/ώρα. Η ξήρανση της ιλύος γίνεται σε 3 τύμπανα ξήρανσης δυναμικότητας εξάτμισης 7 t νερού/ώρα/ξηραντή. Η μονάδα ξήρανσης επιτρέπει τη μείωση του όγκου της ιλύος σε ποσοστό 75%. Η ξηραμένη ιλύς, η οποία είναι σε κοκκώδη μορφή, οδηγείται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης ξηραμένης ιλύος και τελικά αξιοποιείται, είτε on-site σε μία μονάδα πυρόλυσης, είτε off-site στη γεωργία και σε τσιμεντοβιομηχανίες. Από την πυρόλυση της ξηραμένης ιλύος ανακτώνται περίπου 4,5 MWh/έτος οι οποίες χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της μονάδας ξήρανσης. Η κάλυψη των θερμικών αναγκών της αναερόβιας χώνευσης και της αποτέφρωσης γίνεται με την καύση φυσικού αερίου.

Τα ευαίσθητα μέρη των εγκαταστάσεων επεξεργασίας, όπως οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης, οι παχυντές ιλύος και οι δεξαμενές αποθήκευσης ιλύος, είναι καλυμμένα. Ακόμη, το σύνολο των αποβλήτων (π.χ. υγρά ιλύος) από τις διεργασίες επεξεργασίας της ιλύος επανατροφοδοτούνται στην κεφαλή (αρχή) της δεύτερης γραμμής επεξεργασίας της μονάδας.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υπερκατανάλωση αγαθών και υπηρεσιών και ταυτόχρονα η ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού συνιστούν το σύγχρονο βιομηχανικό τρόπο ζωής. Την εικόνα αυτή την παρατηρούμε καθημερινά είτε στην χώρα που ζούμε είτε σε εικόνες που φτάνουν στα μάτια μας από όλο τον κόσμο.

Οι επιπτώσεις των λυμάτων και ιδιαίτερα αυτών που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης και προσοχής λόγω των περιβαλλοντικών κινδύνων που αναμφισβήτητα υφίστανται. Η ανεξέλεγκτη διαθεσή τους είναι μόνιμη απειλή για το περιβάλλον, τους υδατικούς πόρους, το έδαφος και την δημόσια υγεία.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, καθίσταται αναγκαία η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Είναι γεγονός, ότι τον τελευταίο καιρό όλο και περισσότερο τα αστικά λύματα επεξεργάζονται με κύριο στόχο την μείωση του οργανικού φορτίου και πληθώρας ρυπαντών στο υδάτινο περιβάλλον. Η διαδικασία αυτή οδηγεί σε αύξηση της παραγωγής λυματολάσπης η βιολογικής ίλυος.

Στο προσεχές μέλλον οι τάσεις αύξησης του πληθυσμού παγκοσμίως αναμένεται να κορυφωθούν. Σήμερα υπολογίζεται ότι ο μισός πληθυσμός της Γης κατοικεί σε απόσταση μεταξύ 60 και 20km από την ακτογραμμή, ενώ αναμένεται ο διπλασιασμός αυτού του πληθυσμού έως το 2025. Με δεδομένο ότι η αύξηση του πληθυσμού συνοδεύεται και από αντίστοιχη οικιστική ανάπτυξη, οι παραλιακές περιοχές σε όλο το κόσμο πρόκειται να δεχθούν έντονη οικιστική πίεση. Καθώς οι πόλεις ολοένα και αναπτύσσονται αρχίζουν και καταλαμβάνουν περιοχές απομονωμένες, στις οποίες είναι ήδη τοποθετημένες εγκαταστάσεις βιολογικών καθαρισμών. Επιπλέον, όσο περισσότερο κατοικούνται οι περιοχές γύρω από τους βιολογικούς καθαρισμούς, τόσο οι αγροτικές καλλιέργειες μετατοπίζονται όλο και πιο μακριά από τις αστικές περιοχές, με αποτέλεσμα την ανάγκη επέκτασης του αρδευτικού δικτύου για την μεταφορά και διανομή του επεξεργασμένου νερού στις καλλιεργούμενες εκτάσεις.

Η αλλαγή του κλίματος και η αύξηση της στάθμης της θάλασσας αναμένεται να επηρεάσουν μεγάλες εγκαταστάσεις βιολογικών καθαρισμών, οι οποίες είναι εγκατεστημένες σε παράκτιες περιοχές. Εκτός από την ανάγκη προστασίας των εγκαταστάσεων υγρών αποβλήτων από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, η διείσδυση αλμυρού νερού σε συλλέκτες που οδηγούν σε μονάδες επεξεργασίας θα περιορίσει τις γεωργικές δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης, λόγω των αρνητικών επιπτώσεων της αλατότητας στην ανάπτυξη των φυτών. Ως εκ τούτου, το κόστος διάθεσης του επεξεργασμένου νερού θα ανέβει λόγω της ειδικής επεξεργασίας που θα απαιτείται, εξαιτίας της υψηλής αλατότητας του προς επεξεργασία νερού. Λαμβάνονται υπόψη τα παραπάνω, γίνεται φανερό η σπουδαιότητα των περιφερειακών και υποστηρικτικών μονάδων βιολογικού καθαρισμού, στην διαχείριση των υγρών αποβλήτων.

Η εναλλαγή των καιρικών συνθηκών και η επερχόμενη μείωση της διαθεσιμότητας των υδατικών αποθεμάτων σε πολλές περιοχές του πλανήτη θα αλλάξει πολλές στερεότυπες απόψεις σχετικές με τη διαχείριση των υδάτων και πιο συγκεκριμένα με την διαχείριση και την επαναχρησιμοποίηση των υγρών λυμάτων. Η λογική της προστασίας και της λελογισμένης χρήσης του πόσιμου νερού με παράλληλη αύξηση της χρήσης του ανακυκλωμένου θα επικρατήσουν τα επόμενα χρόνια. Λόγω της αναμενόμενης καιρικής αστάθειας αλλά και των ακραίων καιρικών φαινομένων που ολοένα και συχνότερα παρατηρούνται, η διαθεσιμότητα πλέον του γλυκού νερού θα παρουσιάσει αυξομειώσεις. Σε



πολλές περιοχές, η χρήση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων αναμένεται να αποτελέσει τη μοναδική λύση στο πρόβλημα της ανεπάρκειας των υδατικών αποθεμάτων και το επεξεργασμένο νερό να διατίθεται ακόμα και για εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων. Σε αυτή τη περίπτωση, κρίνεται αναγκαίο ένα αυστηρό νομικό και ελεγκτικό πλαίσιο, το οποίο θα διασφαλίσει την δημόσια υγιεινή και παράλληλα την προστασία του περιβάλλοντος.

Παγκοσμίως, ο εξοπλισμός των εγκαταστάσεων των βιολογικών καθαρισμών είναι ξεπερασμένος και σε μεγάλο του ποσοστό χρειάζεται επιδιόρθωση ή και αντικατάσταση. Μία από τις πιο σημαντικές αλλαγές που έχει σημειωθεί τα τελευταία 15 χρόνια είναι η μείωση της ποσότητας του νερού που απορρίπτεται στο σύστημα συλλογής λυμάτων.

Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αλλαγή των συνηθειών που παρατηρούνται τελευταία ως προς την επαναχρησιμοποίηση των οικιακών υγρών αποβλήτων. Αυτή η μείωση υγρών αποβλήτων όμως συντελεί στην συσσώρευση στερεάς ύλης στους βιολογικούς καθαρισμούς και την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων μεθανίου. Στο μέλλον, το κόστος αποκατάστασης των υφιστάμενων συστημάτων συλλογής θα είναι τεράστιο. Αυτό θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ώστε οι εγκαταστάσεις και οι τεχνικές να προσαρμοστούν στις επερχόμενες αλλαγές για να λειτουργήσουν αποδοτικά.

Τα υγρά απόβλητα είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, θρεπτικών στοιχείων και νερού. Λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη την παραπάνω φράση (ή τα πλεονεκτήματα της επαναχρησιμοποίησης), σε συνδυασμό με τις καινοτόμες τεχνολογίες και νέες διαδικασίες για την επαναχρησιμοποίηση, η μελλοντική ανάπτυξη της επαναχρησιμοποίησης θα κατευθυνθεί προς: 1) την ανάπτυξη και χρησιμοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου των υγρών αποβλήτων, 2) την ανάκτηση των θρεπτικών στοιχείων των υγρών αποβλήτων, 3) την παραγωγή νερού για διάφορες χρήσεις.

Είναι γνωστό ότι οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων μπορούν να αποτελέσουν αυτόνομες πηγές παροχής ενέργειας. Αυτό που είναι ακόμα σε δοκιμαστικό στάδιο είναι οι βέλτιστες προδιαγραφές των εγκαταστάσεων που απαιτούνται για την ανάκτηση ενέργειας, θρεπτικών συστατικών και νερού. Νέες τεχνικές αναπτύσσονται και δοκιμάζονται για την ανάκτηση ενέργειας από τα υγρά απόβλητα συμπεριλαμβανομένης και αυτής από το στερεό υπόλειμμα το οποίο προκύπτει από την επεξεργασία. Η εφαρμογή νέων τεχνολογιών στις διεργασίες καθαρισμού των λυμάτων θα αντικαταστήσουν παραδοσιακές τεχνικές και θα είναι σε θέση να παράγουν υψηλής ποιότητας νερό, η χρήση του οποίου δεν θα περιοριστεί μόνο για αρδευτικούς σκοπούς.

Για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες και τα προβλήματα τα οποία περιγράφονται παραπάνω, οι νέες πρακτικές θα πρέπει να είναι σε θέση να ικανοποιήσουν τόσο ποιοτικά, όσο και ποσοτικά κριτήρια στην διάθεση ανακυκλωμένου νερού. Έτσι, το μέλλον της ανακύκλωσης νερού θα διαμορφωθεί από διάφορους παράγοντες, όπως την εντατική λειτουργία περιφερειακών και αποκεντρωμένων μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, την ανάγκη για ανάκτηση θρεπτικών ουσιών, ενέργειας και νερού από τα υγρά απόβλητα, τη διαθεσιμότητα προηγμένων τεχνολογιών για την παραγωγή καλής ποιότητας νερού και τέλος από τη διαθεσιμότητα των υδατικών αποθεμάτων, τα οποία θα καθορίσουν και την ποιότητα του παραγόμενου νερού.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. B. Rusten, J.G. Siljudalen and B. Nordeidet, "Upgrading to nitrogen removal with KMT moving bed biofilm process", Water Science & Technology, Vol. 29, No 12, 185-195, 1994
2. H.Leverenz, G.Tchobanoglous, Gikas, "Water Conservation, Reuse, Recycling", National Research Council of the National Academies, Washington, 2003
3. Herbert Fang , "Environmental Anaerobic Technology", Imperial College Press,London,2010
4. CH2M HILL, Super Fund and mining Megasites, National Research Council of the national Academies, Washington, 2001.
5. Giusy Lofrano, "Emerging compounds removal from wastewater", Giusy Lofrano,Italy, 2012
6. UK Environmental Agency, Meeting UK energy and climate needs, Science and Technology Comitee, Vol 2,England, 2005-06
7. Valentina Lazarova-Peter Cornel, "Water Energy-Interaction of water reuse", IWA, London, 2012
8. Metcalf & Eddy," Wastewater Treatment and reuse", McGraw-Hill, 4th Edition, U.S.A,2004
9. Νίκος Κάρτσωνας (Πολιτικός Μηχ),"Εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισης παραπροϊόντων επεξεργασίας από μικρές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων",Άρθρο,Καρδίτσα,2005
10. Στάμος, "Εφαρμοσμένη υδραυλική", Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2008
11. Νικόλαος Μουσιόπουλος, "Παρουσίαση μεθόδων ανάκτησης ενέργειας στις μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης,2011
12. Μαμάης Δάνος, Ανδρεαδακης," Διαχείριση ιλύων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων στην Ευρώπη με έμφαση στην Ελλάδα", Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2010
13. Χρήστος Ζαφείρης, MSc - Υπεύθυνος Δέσμης Έργων Βιοαερίου,"Ενεργειακή Αξιοποίηση του Βιοαερίου": Τάσεις & Προοπτικές , Κ.Α.Π.Ε , Άρθρο, Πικέρμι, 2010
14. <http://www.nomosphysis.org.gr/articles.php?artid=4237&lang=1&catid=2>

15. <http://ipublishing.co.in/jesvol1no12010/EIJES1036.pdf>

**Τόπος**  
**Ιούνιος - 2012**