

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΕΞΕΡΓΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ**  
**ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΥΡΟΓΑΛΟΥ ΤΗΣ**  
**ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΓΑΛΑΚΤΟΣ ΤΥΡΑΣ Α.Ε.**

υπό

**ΘΩΜΑ ΣΠΑΧΟ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού, 2000

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2010

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΕΞΕΡΓΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ  
ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΥΡΟΓΑΛΟΥ ΤΗΣ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΓΑΛΑΚΤΟΣ ΤΥΡΑΣ Α.Ε.**

υπό

**ΘΩΜΑ ΣΠΑΧΟ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού, 2000

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2010



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

|                      |            |
|----------------------|------------|
| Αριθ. Εισ.:          | 8300/1     |
| Ημερ. Εισ.:          | 26-03-2010 |
| Δωρεά:               | Συγγραφέας |
| Ταξιθετικός Κωδικός: | Δ          |
|                      | 628.445 8  |
|                      | ΣΠΑ        |

© 2010 Θωμάς Σπάχος

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αναστάσιος Σταματέλος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού η σύζυγος μου και εγώ αποκτήσαμε δυο υπέροχα κοριτσάκια, το πρώτο τον Δεκέμβριο του 2008 και το δεύτερο τον Ιανουάριο του 2010. Θα ήθελα λοιπόν καταρχάς να ευχαριστήσω την σύζυγο μου που ανέλαβε πολύ περισσότερες ευθύνες και φορτίο από αυτό που της αναλογεί στην φροντίδα των μωρών μας, χωρίς ποτέ να παραπονεθεί και να δυσανασχετήσει. Την ευχαριστώ που μου έδινε συνέχεια κουράγιο και δύναμη για να συνεχίσω να εργάζομαι για την ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα δύο μωράκια-κοριτσάκια μας που ήρθαν να ομορφύνουν την ζωή μου και μέσα από την ευτυχία που μου έδωσαν να κάνουν πολύ πιο ανεκτή την όποια κούραση από την απασχόληση και το μεταπτυχιακό.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Δημήτρη και Μιχάλη Σαράντη, ιδιοκτήτες του ομίλου ΤΥΡΑΣ, για την άριστη συνεργασία κατά την απασχόληση μου στον όμιλό τους, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσαν να απασχοληθώ σε μια τόσο πρωτότυπη για τα Ελληνικά δεδομένα όσο και εξαιρετικά ενδιαφέρουσα επένδυση, όπως αυτή της αναερόβιας επεξεργασίας τυρόγαλου.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Σταμάτη για την καθοδήγηση του και την αμέριστη βοήθειά του στην ολοκλήρωση της εργασίας μου, καθώς και τους καθηγητές κ. Ανδρίτσο Νικόλαο, Σταματέλο Αναστάσιο, Τσιακάρα Παναγιώτη και Παντελή Δημήτριο γιατί κατά την διάρκεια του μεταπτυχιακού μου έδωσαν περισσότερες γνώσεις από αυτές που προσδοκούσα ότι θα πάρω ξεκινώντας το πρόγραμμα.

Θωμάς Σπάχος

# **ΕΞΕΡΓΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΥΡΟΓΑΛΟΥ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΓΑΛΑΚΤΟΣ ΤΥΡΑΣ Α.Ε.**

**ΘΩΜΑΣ ΣΠΑΧΟΣ**

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, 2010

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης, Επίκουρος Καθηγητής Εφαρμοσμένης  
Θερμοδυναμικής – Θερμικών Σταθμών

## **Περίληψη**

Οι επιπτώσεις της ανεξέλεγκτης χρήσης των ορυκτών καυσίμων είναι πλέον ορατές σε αρκετά μέρη του πλανήτη, όχι μόνο με την εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινομένων αλλά και από οικονομικής άποψης μέσω της εξάρτησης πολλών κρατών από τις τιμές και την διαθεσιμότητα του πετρελαίου. Είναι λοιπόν περισσότερο επιτακτική από ποτέ η ανάγκη για μετακίνηση σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η χρήση αρκετών από αυτά που θεωρούνταν απόβλητα. Κινούμενη προς αυτή την κατεύθυνση, η βιομηχανία γάλακτος ΤΥΡΑΣ Α.Ε., μια από τις μεγαλύτερες στην Ελλάδα, έχει εγκαταστήσει και λειτουργεί ένα αναερόβιο σύστημα επεξεργασίας τυρόγαλου, του πιο δύσκολα επεξεργαζόμενου αποβλήτου των γαλακτοβιομηχανιών. Η αναερόβια επεξεργασία τυρόγαλου ελαττώνει το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD) του τυρόγαλου σε ποσοστό ακόμη και 98%, ενώ παράλληλα σχηματίζεται βιοαέριο. Το βιοαέριο χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως καύσιμο σε έναν ατμολέβητα για την παραγωγή ατμού με σκοπό την κάλυψη

των θερμικών αναγκών του εργοστασίου. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εξεργειακή – οικονομική ανάλυση του αναερόβιου συστήματος επεξεργασίας τυρόγαλου. Τα όρια του εξεταζόμενου συστήματος εκτείνονται από την αποθήκευση του τυρόγαλου σε δεξαμενές μέχρι και την έξοδο του επεξεργασμένου τυρόγαλου από τον αναερόβιο αντιδραστήρα και την διανομή ατμού προς χρήση στο εργοστάσιο. Υπολογίζονται οι εξεργειακές απώλειες κάθε στοιχείου του εξοπλισμού και ο συνολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος, για το υπάρχων σύστημα και για τρία διαφορετικά σενάρια. Τέλος, υπολογίζεται η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) της επένδυσης, έτσι ώστε να εξεταστεί η βιωσιμότητα της επένδυσης. Ο υπολογισμός της NPV γίνεται για το υπάρχων σύστημα και για τα τρία διαφορετικά σενάρια.

## **Πίνακας Περιεχομένων**

|                   |                                                                                               |           |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> | <b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>                                                                          | <b>1</b>  |
| <b>1.1</b>        | <b>ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΤΥΡΟΓΑΛΟΥ.....</b>                              | <b>2</b>  |
| <b>1.2</b>        | <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>                                                          | <b>4</b>  |
| <b>1.3</b>        | <b>ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....</b>                                                   | <b>6</b>  |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> | <b>ΤΥΡΟΓΑΛΟ ΚΑΙ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....</b>                                                | <b>8</b>  |
| <b>2.1</b>        | <b>ΦΥΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΥΡΟΓΑΛΟΥ.....</b>                                                 | <b>8</b>  |
| <b>2.2</b>        | <b>ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....</b>                                                             | <b>10</b> |
| <b>2.2.1</b>      | <b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ.....</b>                                           | <b>10</b> |
| <b>2.2.2</b>      | <b>ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΙ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ<br/>ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ.....</b>                 | <b>12</b> |
| <b>2.2.3</b>      | <b>ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ<br/>UASB.....</b>                          | <b>17</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> | <b>ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΥΡΟΓΑΛΟΥ<br/>ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΓΑΛΑΚΤΟΣ ΤΥΡΑΣ Α.Ε. ....</b> | <b>21</b> |
| <b>3.1</b>        | <b>ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ – ΠΗΓΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΥΡΟΓΑΛΟΥ.....</b>                              | <b>21</b> |
| <b>3.2</b>        | <b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΟΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ.....</b>                                         | <b>24</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b> | <b>ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....</b>                                                                     | <b>29</b> |
| <b>4.1</b>        | <b>ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....</b>                                                                | <b>29</b> |
| <b>4.2</b>        | <b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....</b>                                                                | <b>36</b> |



|                   |                                                                          |           |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b> | <b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>                                                 | <b>41</b> |
| <b>5.1</b>        | <b>ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....</b>                                           | <b>41</b> |
| <b>5.2</b>        | <b>ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....</b>                                           | <b>45</b> |
| <b>5.3</b>        | <b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ.....</b>                                          | <b>47</b> |
| <b>5.3.1</b>      | <b>Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή βιοαερίου.....</b>             | <b>47</b> |
| <b>5.3.2</b>      | <b>Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή αέρα.....</b>                  | <b>48</b> |
| <b>5.3.3</b>      | <b>Πίεση εξόδου βιοαερίου από τον συμπιεστή.....</b>                     | <b>49</b> |
| <b>5.3.4</b>      | <b>Θερμοκρασία απόρριψης καυσαερίων στο περιβάλλον.....</b>              | <b>49</b> |
| <b>5.3.5</b>      | <b>Ποσοστό περιεκτικότητας ξηρών καυσαερίων σε CO<sub>2</sub>.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>5.3.6</b>      | <b>Πίεση παραγωγής ατμού στον ατμολέβητα.....</b>                        | <b>51</b> |
| <b>5.3.7</b>      | <b>Ποσότητα των συμπυκνωμάτων που επιστρέφουν από το εργοστάσιο.....</b> | <b>51</b> |
| <b>5.4</b>        | <b>ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....</b>                                               | <b>52</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b> | <b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>                                                 | <b>60</b> |
|                   | <b>ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.....</b>                                                 | <b>64</b> |
|                   | <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>                                                 | <b>67</b> |
|                   | <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>                                                    | <b>71</b> |

## Κατάλογος Πινάκων

|                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 2-1: Σύσταση πρόβειου, κατσικίσιου και αγελαδινού γάλακτος.....                                                                                                                                                                                            | 8  |
| Πίνακας 2-2: Σύσταση «γλυκού» και «ξινού» τυρόγαλου.....                                                                                                                                                                                                           | 9  |
| Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά τυρόγαλου που οδηγείται στην μονάδα αναερόβιας επεξεργασίας της βιομηχανίας γάλακτος ΤΥΡΑΣ Α.Ε.....                                                                                                                                    | 24 |
| Πίνακας 4-1: Δεδομένα για τον υπολογισμό του <i>TCI</i> .....                                                                                                                                                                                                      | 40 |
| Πίνακας 5-1: Κατάσταση ρευστού, παροχή μάζας, θερμοκρασία, πίεση, ενθαλπία, εντροπία και συνολική εξέργεια σε κάθε κατάσταση του συστήματος.....                                                                                                                   | 42 |
| Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα των εξεργειακών απωλειών και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης του εξοπλισμού του συστήματος, καθώς και του λόγου των εξεργειακών απωλειών του εξοπλισμού σε σχέση με τις συνολικές απώλειες και σε σχέση με την εισερχόμενη εξέργεια..... | 43 |
| Πίνακας 5-3: Υπολογισμός Χρηματοροών και Καθαρής Παρούσας Αξίας.....                                                                                                                                                                                               | 46 |
| Πίνακας 5-4: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και Καθαρή Παρούσα Αξία για διάφορες τιμές πίεσης παραγόμενου ατμού και ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπιεστή αέρα.....                                                                                       | 53 |
| Πίνακας 5-5: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και Καθαρή Παρούσα Αξία για διάφορες τιμές πίεσης παραγόμενου ατμού και θερμοκρασίας εξόδου καυσαερίων προς το περιβάλλον.....                                                                                 | 54 |
| Πίνακας 5-6: Βελτιστοποίηση εξεργειακού βαθμού απόδοσης του συστήματος για διάφορους συνδυασμούς μεταβλητών, και τιμές μεταβλητών που τον βελτιστοποιούν.....                                                                                                      | 58 |

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 5-7: Βελτιστοποίηση NPV της επένδυσης για διάφορους συνδυασμούς μεταβλητών,<br>και τιμές μεταβλητών που τον βελτιστοποιούν..... | 59 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## Κατάλογος Σχημάτων

|                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 2-1: Διαχωρισμός συστατικών γάλακτος και τυρόγαλου με τη χρήση μονάδων Ultrafiltration (UF) .....                                                                                                                                       | 10 |
| Σχήμα 2-2: Ισοζύγιο μετατροπής άνθρακα κατά την αερόβια και την αναερόβια επεξεργασία λυμάτων.....                                                                                                                                            | 15 |
| Σχήμα 2-3: Σχηματική απεικόνιση των σταδίων που λαμβάνουν χώρα κατά την αναερόβια επεξεργασία.....                                                                                                                                            | 15 |
| Σχήμα 2-4: Σχηματική απεικόνιση των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στα διάφορα στάδια της αναερόβιας επεξεργασίας.....                                                                                                                        | 16 |
| Σχήμα 2-5: Απεικόνιση δράσης των διαφορετικού τύπου αναερόβιων μικροοργανισμών – βακτηρίων.....                                                                                                                                               | 17 |
| Σχήμα 2-6: Σχηματική παράσταση του αντιδραστήρα UASB. Με (a) παριστάνεται η περιοχή όπου παράγεται το βιοαέριο, με (b) η περιοχή όπου λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός της υγρής από τη στερεή φάση και με (c) το στρώμα επαναφοράς της ιλύος..... | 18 |
| Σχήμα 3-1: Απλουστευμένο διάγραμμα ροής χρήσης αγελαδινού γάλακτος για παραγωγή λευκού τυριού και μυζήθρας, με χρήση μονάδων UF.....                                                                                                          | 23 |
| Σχήμα 3-2: Διάγραμμα ροής αναερόβιας επεξεργασίας τυρόγαλο.....                                                                                                                                                                               | 28 |
| Σχήμα 5-1: Εξεργειακές απώλειες στα διάφορα τμήματα του εξοπλισμού σε σχέση με την συνολική εξέργεια και με την εισερχόμενη εξέργεια. ....                                                                                                    | 44 |
| Σχήμα 5-2: Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης για το υπάρχων σύστημα και για τα τρία προτεινόμενα σενάρια.....                                                                                                                                       | 45 |

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 5-3: Καθαρή Παρούσα Αξία του υπάρχοντος συστήματος και των τριών προτεινόμενων σεναρίων.....                                           | 47 |
| Σχήμα 5-4: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή βιοαερίου.....            | 48 |
| Σχήμα 5-5: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή αέρα. ....                | 48 |
| Σχήμα 5-6: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με την πίεση εξόδου του βιοαερίου από τον συμπιεστή.....                  | 49 |
| Σχήμα 5-7: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με την θερμοκρασία απόρριψης των καυσαερίων στο περιβάλλον. ....          | 50 |
| Σχήμα 5-8: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με την περιεκτικότητα των καυσαερίων σε CO <sub>2</sub> . ....            | 50 |
| Σχήμα 5-9: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με την πίεση του παραγόμενου ατμού στον ατμολέβητα. ....                  | 51 |
| Σχήμα 5-10: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με το ποσοστό επιστροφής των συμπυκνωμάτων από το εργοστάσιο. ....       | 52 |
| Σχήμα 5-11 (α), (β), (γ): Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος σε σχέση με την πίεση P16 και την περιεκτικότητα X <sub>14,CO2</sub> . .... | 56 |
| Σχήμα 5-12: Καθαρή Παρούσα Αξία σε σχέση με την πίεση P16 και την περιεκτικότητα X <sub>14,CO2</sub> . ....                                  | 57 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δυσάρεστες παρενέργειες από την συνεχιζόμενη και ανεξέλεγκτη κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων, έχουν ήδη γίνει ορατές σε αρκετά μέρη του πλανήτη, όχι μόνο με την εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων αλλά και μέσω της οικονομικής εξάρτησης εταιριών ή και κρατών από τις τιμές των ορυκτών καυσίμων και των αποθεμάτων τους. Γίνεται, λοιπόν, περισσότερο αντιληπτή και επιτακτική από ποτέ η ανάγκη για εξεύρεση λύσεων μέσω τεχνολογιών οι οποίες είτε θα κάνουν χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είτε θα ανακυκλώνουν αυτά που μέχρι τώρα θεωρούνταν απόβλητα με σκοπό την παραγωγή νέων προϊόντων ή ενέργειας.

Από αυτή την πλευρά οι βιομηχανίες γάλακτος προσπαθούν να κινηθούν προς πιο οικολογικές μεθόδους διαχείρισης των λυμάτων τους. Μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια αφορά την αναερόβια επεξεργασία λυμάτων υψηλού ρυπαντικού φορτίου, όπως το τυρόγαλο το οποίο προκύπτει κατά την παραγωγή τυριών και μυζήθρας. Το τυρόγαλο είναι ένα δύσκολο στη διαχείριση απόβλητο εξαιτίας του υψηλού οργανικού του φορτίου, το οποίο μετράται με τη χρήση του Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand -COD). Το σημαντικό πλεονέκτημα της αναερόβιας επεξεργασίας είναι ότι όχι μόνο εξοικονομεί ενέργεια, αφού δεν υπάρχει η απαίτηση για παροχέτευση αέρα, όπως στην αερόβια επεξεργασία, αλλά επίσης παράγει βιοαέριο, καύσιμο δηλαδή το οποίο

αποτελείται κυρίως από μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας.

Η βιομηχανία γάλακτος ΤΥΡΑΣ Α.Ε., η οποία εδρεύει στα Τρίκαλα και είναι μια από τις μεγαλύτερες βιομηχανίες γάλακτος στην Ελλάδα, έχει εγκαταστήσει και λειτουργεί σύστημα αναερόβιας επεξεργασίας τυρόγαλου, το οποίο παράγεται κατά την παραγωγική της διαδικασία. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί να επεξεργάζεται  $150 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  τυρόγαλου. Ο βαθμός απόδοσης της αποδόμησης του οργανικού φορτίου COD φτάνει το 98%, ενώ το παραγόμενο από την μέθοδο βιοαέριο καίγεται σε ατμολέβητα για την παραγωγή ατμού, ο οποίος καλύπτει μέρος θερμικών αναγκών του εργοστασίου.

Στην παρούσα εργασία γίνεται εξεργειακή και οικονομική ανάλυση του συστήματος αναερόβιας επεξεργασίας τυρόγαλου που έχει εγκατασταθεί στην εταιρεία ΤΥΡΑΣ. Εφαρμόζοντας το εργαλείο της εξεργειακής ανάλυσης εντοπίζονται τα σημεία στα οποία οι εξεργειακές απώλειες μειώνουν το βαθμό απόδοσης του συστήματος και ενδεχομένως επιδέχονται βελτιώσεις. Από την άλλη η οικονομική ανάλυση μελετά την βιωσιμότητα της επένδυσης.

## **1.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΤΥΡΟΓΑΛΟΥ**

Τα γαλακτοκομικά προϊόντα αποτελούν την βάση της διατροφικής συνήθειας πολλών ατόμων. Το βασικό συστατικό και η πρώτη ύλη όλων αυτών είναι το γάλα. Αυτό που είναι όμως λιγότερο γνωστό είναι το γεγονός ότι για κάποια προϊόντα, και ιδιαίτερα για την παραγωγή τυριών, η μεγαλύτερη ποσότητα του γάλακτος δεν μετατρέπεται σε τυρί. Για παράδειγμα, η παραγωγή ενός κιλού λευκού-αγελαδινού τυριού απαιτεί 6 κιλά αγελαδινού

γάλακτος, ενώ η παραγωγή ενός κιλού φέτας απαιτεί 4 κιλά αιγοπρόβειου γάλακτος. Το υπόλοιπο μέρος της χρησιμοποιούμενης ποσότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για την παραγωγή περίπου 150 γραμμαρίων μυζήθρας. Συνεπώς, μετά την παραγωγή λευκού τυριού ή φέτας και μυζήθρας απομένουν περίπου 5 κιλά αγελαδινού ή 3 κιλά πρόβειου τυρόγαλου αντίστοιχα τα οποία δεν καταναλώνονται από τον άνθρωπο.

Η διαχείριση αυτών των παραπροϊόντων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των τυροκομικών μονάδων, αφού το τυρόγαλο είναι απόβλητο με πολύ υψηλό ρυπαντικό φορτίο. Ένα χαρακτηριστικό μέτρησης του ρυπαντικού φορτίου των αποβλήτων αποτελεί το Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο γνωστό ως COD (Chemical Oxygen Demand). Είναι λοιπόν χαρακτηριστικό πως ενώ το COD των λυμάτων μιας βιομηχανίας γάλακτος πλην του τυρόγαλου ισούται περίπου με 3.500-4.000 mg/lit, το COD του υπολειμματικού τυρόγαλου είναι περίπου 60.000 mg/lit [1]. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η επεξεργασία του τυρόγαλου στις αερόβιες μονάδες των γαλακτοβιομηχανιών θα απαιτούσε τεράστιες εκτάσεις και πολύ μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας αέρα. Οι λύσεις οι οποίες έχουν επικρατήσει ως προς την διαχείριση του τυρόγαλου, είναι η διάθεση του είτε στις αερόβιες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων είτε σε χοιροτρόφους για να χρησιμοποιηθεί ως ζωοτροφή είτε σε μονάδες ξήρανσης ώστε τα παράγωγα να χρησιμοποιηθούν για άλλους σκοπούς (καλλυντικά, φάρμακα κλπ). Στις περισσότερες περιπτώσεις οι χοιροτρόφοι δεν μπορούν να απορροφήσουν το σύνολο του τυρόγαλου των τυροκομείων της περιοχής όπου βρίσκονται, ενώ σε ότι αφορά τη διάθεση του σε μονάδες ξήρανσης, δεν αποτελεί την ενδεδειγμένη λύση για τις βιομηχανίες γάλακτος, αφού υπάρχουν απαιτήσεις ως προς την ποιότητα του τυρόγαλου προς ξήρανση (π.χ. να είναι κατά το δυνατόν χωρίς αλάτι) και να επιβαρυνθούν τα τυροκομεία με τα έξοδα μεταφοράς.



Όλες λοιπόν οι λύσεις έχουν σαν αποτέλεσμα την επιβάρυνση των τυροκομικών μονάδων με πρόσθετα έξοδα. Έτσι αρκετές είναι οι περιπτώσεις όπου το τυρόγαλο απορρίπτεται ανεξέλεγκτα σε φυσικούς αποδέκτες προκαλώντας ανεπανόρθωτη περιβαλλοντολογική καταστροφή.

Μια πολύ βιώσιμη λύση στο παραπάνω πρόβλημα φαίνεται πως αποτελεί η αναερόβια επεξεργασία του τυρόγαλου, η οποία έχει το πλεονέκτημα πως όχι μόνο επεξεργάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό το τυρόγαλο, αλλά ως προϊόν της επεξεργασίας παράγεται βιοαέριο, δηλαδή καύσιμη ύλη η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την τυροκομική μονάδα. Επίσης, σημαντικό πλεονέκτημα της αναερόβιας επεξεργασίας αποτελεί η σημαντική χαμηλή απαίτηση σε ενέργεια για την επεξεργασία του τυρόγαλου, αφού η λειτουργία τους απαιτεί την κίνηση μικρών σχετικά αντλιών και μικρής ποσότητας θερμικής ενέργειας.

## **1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

Η τεχνολογία της αναερόβια επεξεργασία λυμάτων με τη χρήση αντιδραστήρων UASB, αναπτύχθηκε από τον Dr. Lettinga και τους συνεργάτες του στα τέλη της δεκαετίας του '70 στο πανεπιστήμιο Wageningen στην Ολλανδία [2]. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων του, ο Dr. Lettinga παρατήρησε ότι εκτός από την προσκόλληση της βιομάζας στο επεξεργαζόμενο μέσο, ένα μεγάλο μέρος της βιομάζας ανέπτυξε ελεύθερα κοκκώδη συσσωματώματα. Η ιδέα της Αναερόβιας Αιωρούμενης κλίνης με ανακυκλοφορία (UASB) ενδυναμώθηκε σε ένα ταξίδι του στην Νότια Αφρική όπου επισκέφτηκε μια αναερόβια μονάδα που επεξεργάζονταν υπολείμματα κρασιού και παρατήρησε τον σχηματισμό κοκκώδους βιομάζας. Ο αντιδραστήρας αυτός έκανε χρήση ενός «διαχωριστή», ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως πρόγονος του αντιδραστήρα UASB με τη διαφορά ότι ο

«διαχωριστής» δεν έχει κάλυμμα βιοαερίου. Κατά την ανάπτυξη της τεχνολογίας του αντιδραστήρα UASB, ο Dr. Lettinga προσπάθησε να εκμεταλλευτεί τους μικροοργανισμούς εκείνους που δημιουργούν συσσωματώματα, και να αποφύγει εκείνους που παραμένουν διασκορπισμένοι στον αντιδραστήρα. Για να επιτευχθεί αυτό έπρεπε αφενός μεν να δημιουργήσει μια ανοδική ροή στον αντιδραστήρα και αφετέρου να επιτύχει διαχωρισμό των τριών φάσεων, υγρής, αέριας και στερεής ώστε τα συσσωματώματα να μην παρασύρονται από την ροή και φεύγουν από τον αντιδραστήρα.

Η ιδέα του αντιδραστήρα UASB αναπτύχθηκε σε τεχνολογία και ο πρώτος πιλοτικός αντιδραστήρας εγκαταστάθηκε στην Ολλανδία σε μονάδα επεξεργασίας ζαχαρότευτλων. Έκτοτε, ένας μεγάλος αριθμός αναερόβιων αντιδραστήρων εγκαταστάθηκε στην Ολλανδία σε μονάδες ζαχάρεως, σε μονάδες επεξεργασίας αμύλου πατάτας, και άλλες βιομηχανίες τροφίμων όπως επίσης και σε εργοστάσια ανακύκλωσης χαρτιού. Οι πρώτες δημοσιεύσεις για την έννοια της αναερόβιας επεξεργασίας με την μέθοδο UASB εμφανίστηκαν σε Ολλανδικά τεχνικά περιοδικά στα τέλη της δεκαετίας του '70 και η πρώτη διεθνής δημοσίευση έγινε το 1980 [3].

Έκτοτε αρκετές είναι οι μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με την αναερόβια επεξεργασία του τυρόγαλου, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα θεμάτων. Κάποιες από αυτές τις εργασίες έχουν δείξει ότι ο βαθμός απόδοσης, σε ότι αφορά την αποδόμηση του οργανικού φορτίου, είναι πολύ μεγαλύτερος όταν η αναερόβια επεξεργασία λαμβάνει χώρα στην μεσόφιλη περιοχή θερμοκρασιών, από ότι όταν πραγματοποιείται στην υπο-μεσόφιλη ή ψυχρόφιλη περιοχή [4], [5]. Μια άλλη σημαντική παράμετρος που έχει εξεταστεί σε σχέση με τον βαθμό αφαίρεσης COD και το περιεχόμενο του βιοαερίου σε μεθάνιο είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) [6], [7]. Κάποιες δημοσιεύσεις [8], [9] επικεντρώνονται επίσης

στην χρήση του αντιδραστήρα τύπου UASB, ο οποίος είναι και ο αντιδραστήρας που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Άλλες δημοσιεύσεις δίνουν τον ρυθμό παραγωγής μεθανίου ανά κιλό αφαιρούμενου CO, ο οποίος φαίνεται να ποικίλει μεταξύ των δημοσιεύσεων εξαρτώμενος από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) και το COD [10], [11]. Παρόλα αυτά, η χρήση της εξεργειακής ανάλυσης στην αναερόβια επεξεργασία εφαρμόζεται σε άλλους τύπους λυμάτων, όχι στο τυρόγαλο [12].

### **1.3 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Το υπόλοιπο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας χωρίζεται σε τρεις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαιο 2 - 5, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται παρουσίαση της φύσης και των κυριότερων χαρακτηριστικών του τυρόγαλου. Επίσης αναλύονται τα στάδια που λαμβάνουν χώρα κατά την αναερόβια επεξεργασία του τυρόγαλου, των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της μεθόδου καθώς και των κριτηρίων επιλογής του αναερόβιου αντιδραστήρα που χρησιμοποιείται.

Στο Κεφάλαιο 3 μετά από μια σύντομη περιγραφή της εταιρίας ΤΥΡΑΣ Α.Ε. και των πηγών προέλευσης του τυρόγαλου, γίνεται περιγραφή του συστήματος που εξετάζεται και αναλύεται στην εργασία.

Στο Κεφάλαιο 4, γίνεται μοντελοποίηση του συστήματος σε ότι αφορά τόσο την εξεργειακή όσο και την οικονομική ανάλυση του συστήματος. Αναφέρονται δηλαδή οι μαθηματικές σχέσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί καθώς και οι παραδοχές που έχουν γίνει.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος και η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Με τη βοήθεια πινάκων και διαγραμμάτων εντοπίζονται τα σημεία στα οποία παρατηρούνται οι

μεγαλύτερες εξεργειακές απώλειες και οι μικρότεροι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης. Επίσης, εξετάζονται προτάσεις που μπορούσαν να συμβάλουν στην αύξηση της εξεργειακής απόδοσης του συστήματος και εξετάζεται αν από οικονομικής πλευράς θα ήταν συμφέρουσες αυτές οι παρεμβάσεις. Ακόμη, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας του εξεργειακού βαθμού απόδοσης και της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) ως προς τις μεταβλητές των οποίων οι τιμές είναι άγνωστες και ως προς τις παραμέτρους των οποίων οι τιμές μεταβάλλονται ή μπορούν να μεταβληθούν. Τέλος, γίνεται βελτιστοποίηση ως προς τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης του συστήματος ή την NPV σε σχέση με κάποιες παραμέτρους και μεταβλητές διατηρώντας το κόστος επένδυσης σταθερό.

Τα συμπεράσματα της μεταπτυχιακής εργασίας και οι προτάσεις παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΥΡΟΓΑΛΟ ΚΑΙ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

### 2.1 ΦΥΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΥΡΟΓΑΛΟΥ

Όπως προαναφέρθηκε, το γάλα αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή των τυριών. Η σύσταση του ωστόσο δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το είδος του, δηλαδή αν αυτό είναι πρόβειο, αγελαδινό ή κατσικίσιο, την ράτσα των ζώων, τις ζωοτροφές που αυτά καταναλώνουν, την εποχή-καιρικές συνθήκες και το στάδιο της γαλακτογονίας. Μια τυπική σύσταση διαφόρων τύπων γάλακτος δίνεται στον Πίνακα 2.1 [13].

| Είδος Γάλακτος<br>Σύσταση (%) | Πρόβειο | Κατσικίσιο | Αγελαδινό |
|-------------------------------|---------|------------|-----------|
| Νερό                          | 83,0    | 88,9       | 87,8      |
| Πρωτεΐνη                      | 5,4     | 3,1        | 3,2       |
| Λακτόζη                       | 5,1     | 4,4        | 4,8       |
| Λιπαρά                        | 6,      | 3,5        | 3,9       |
| Μεταλλικά Στοιχεία            | 0,5     | 0,1        | 0,3       |

Πίνακας 2-1: Σύσταση πρόβειου, κατσικίσιου και αγελαδινού γάλακτος

Όταν στο γάλα προστεθεί η πυτιά, η οποία είναι απαραίτητη για την παραγωγή του τυριού, τότε προκύπτει ως προϊόν το τυρί και ως παραπροϊόν το τυρόγαλο, το οποίο αποχωρίζεται από την μάζα του τυριού. Το τυρόγαλο αυτό έχει  $\text{pH} > 5,6$  και ονομάζεται «γλυκό» τυρόγαλο.

Όπως επίσης προαναφέρθηκε, το τυρόγαλο από την τυροκόμιση συλλέγεται και χρησιμοποιείται για την παραγωγή μυζήθρας και ανθότυρου. Από την παραγωγή αυτών προκύπτει και πάλι τυρόγαλο το οποίο έχει  $pH < 5,1$  και ονομάζεται «ξινό» τυρόγαλο. Μια τυπική σύσταση του «γλυκού» και του «ξινού» τυρόγαλου δίνεται στον Πίνακα 2.2 [14].

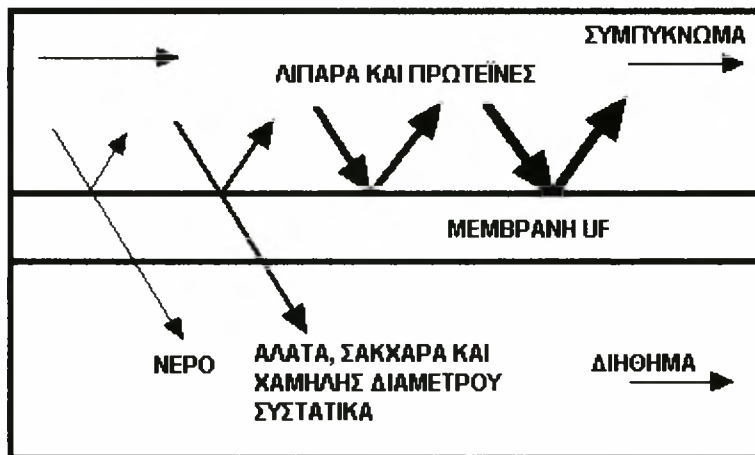
| <b>Είδος Τυρόγαλου</b><br><b>Σύσταση (%)</b> | <b>«Γλυκό»</b><br><b>Τυρόγαλο</b> | <b>«Ξινό»</b><br><b>Τυρόγαλο</b> |
|----------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Νερό                                         | 93-94                             | 94-95                            |
| Πρωτεΐνη                                     | 0,8-1,0                           | 0,8-1,0                          |
| Λακτόζη                                      | 4,5-5,0                           | 3,8-4,3                          |
| Λιπαρά                                       | <0,1                              | <0,1                             |
| Μεταλλικά Στοιχεία                           | <0,1                              | <0,1                             |

Πίνακας 2-2: Σύσταση «γλυκού» και «ξινού» τυρόγαλου [3]

Τα τελευταία χρόνια, και με στόχο την μείωση του κόστους παραγωγής, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες οι οποίες έχουν σαν σκοπό να αφαιρείται το τυρόγαλο από το γάλα πριν αυτό οδηγηθεί προς τυροκόμιση. Γίνεται δηλαδή μια συμπύκνωση του γάλακτος, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ποσότητας προς τυροκόμιση. Κάτι τέτοιο έχει σημαντικά πλεονεκτήματα για τις επιχειρήσεις, αφού έχουν να διαχειριστούν πολύ μικρότερους όγκους κάτι που συνεπάγεται μικρότερη ανάγκη για αποθηκευτικό χώρο, μείωση της απαιτούμενης ενέργειας (ηλεκτρικής, ψυκτικής και θερμικής) και μείωση του χρόνου παραγωγής άρα και μικρότερα εργατικά κόστη. Η συμπύκνωση του γάλακτος επιτυγχάνεται με τη χρήση μονάδων υπερδιήθησης (ULTRAFILTRATION PLANT-UF), οι οποίες κάνουν χρήση μεμβρανών. Οι μεμβράνες αναλόγως των πόρων τους οποίους διαθέτουν επιτρέπουν την διέλευση ορισμένων μόνο σωματιδίων.

Η UF έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή συμπυκνωμένου γάλακτος ή τυρόγαλου, τα οποία αποκαλούνται συμπύκνωμα, και την παραγωγή του αποκαλούμενου διηθήματος, το οποίο είναι και πάλι τυρόγαλο και αποτελείται κυρίως από λακτόζη ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ). Οι

διαστάσεις των πόρων των μονάδων UF είναι αρκετά μικρές ώστε να επιτρέψουν την διέλευση του νερού, αλάτων και σακχάρων όπως η λακτόζη, και να μην επιτρέψουν την διέλευση λιπαρών και πρωτεϊνών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 [15].



Σχήμα 2-1: Διαχωρισμός συστατικών γάλακτος και τυρόγαλου με τη χρήση μονάδων

Ultrafiltration (UF)

## 2.2 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η αναερόβια επεξεργασία είναι μια βιολογική διαδικασία κατά την οποία τα οργανικά απορρίμματα βιοαποικοδομούνται ελεγχόμενα κάτω από συνθήκες έλλειψης οξυγόνου και παράγεται βιοαέριο-δηλαδή μίγμα μεθανίου ( $\text{CH}_4$ ) και διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ )- και ένα υδαρές υπόλειμμα ή χωνευμένη ιλύς [16]. Πρόκειται για μέθοδο η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στην επεξεργασία αποβλήτων με υψηλό ρυπαντικό-οργανικό φορτίο.

### 2.2.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για τους οποίους η αναερόβια επεξεργασίας κερδίζει συνεχώς έδαφος τα τελευταία χρόνια. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι [17]:



- Η επεξεργασία των λυμάτων γίνεται απουσία οξυγόνου με αποτέλεσμα να απαιτείται πολύ μικρότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με άλλες μεθόδους όπως την αερόβια επεξεργασία.
- Από την επεξεργασία παράγεται βιοαέριο, δηλαδή καύσιμη ύλη η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας.
- Μπορούν να επεξεργαστούν πολύ μεγαλύτερα οργανικά φορτία σε σχέση με την αερόβια επεξεργασία.
- Η παραγόμενη ιλύς από την επεξεργασία των λυμάτων είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή που παράγεται κατά την αερόβια επεξεργασία, κάτι το οποίο συνεπάγεται λιγότερα έξοδα για την διαχείριση της και μικρότερες ποσότητες προς διαχείριση.
- Η αναερόβια επεξεργασία είναι πιο σταθερή μέθοδος σε σχέση με την αερόβια κατά την μεταβολή του υδραυλικού και οργανικού φορτίου.
- Οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί απαιτούν λιγότερα θρεπτικά στοιχεία για να ζήσουν και να επεξεργαστούν τα λύματα σε σχέση με τους αερόβιους.

Υπάρχουν ωστόσο και ορισμένοι παράγοντες οι οποίοι δρουν ανασταλτικά στην χρήση της αναερόβιας επεξεργασίας. Ο σημαντικότερος από αυτούς είναι οικονομικός, αφού τα αναερόβια συστήματα είναι, προς το παρόν τουλάχιστον, ακριβότερα στην εγκατάσταση σε σχέση με τα αερόβια. Αυτό έχει να κάνει κυρίως με τους νόμους της προσφοράς και ζήτησης, αφού οι εταιρείες που έχουν αναπτύξει τεχνογνωσία στον τομέα της αναερόβιας επεξεργασίας είναι πολύ λιγότερες από εκείνες που δραστηριοποιούνται στην αερόβια επεξεργασία. Άλλοι παράγοντες είναι [17]:

- Απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την εκκίνηση της εγκατάστασης.



- Συνήθως το λύμα που εξέρχεται από αυτούς απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία ώστε να ικανοποιεί τα όρια προς απόρριψη στον αποδέκτη.
- Οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί είναι συνήθως μεσόφιλοι, δηλαδή χρειάζονται θερμοκρασία περίπου 35°C, προκειμένου να επεξεργαστούν τα λύματα. Αυτό σημαίνει ότι η αναερόβια επεξεργασία απαιτεί την κατανάλωση θερμικής ενέργειας για την θέρμανση του λύματος και την αντιμετώπιση των θερμικών απωλειών.
- Η παραγωγή του βιοαερίου ελλοχεύει τον κίνδυνο εκρήξεων.
- Οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί είναι συνήθως πιο ευαίσθητοι σε τοξικά σοκ, δηλαδή στην είσοδο κάποιας ουσίας που δρα σαν δηλητήριο για τους μικροοργανισμούς.

## **2.2.2 ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΙ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Κύριο χαρακτηριστικό όλων των αναερόβιων αντιδραστήρων είναι η ύπαρξη ενός υποστρώματος, των αναερόβιων μικροοργανισμών-βακτηρίων δηλαδή, οι οποίοι επεξεργάζονται τα λύματα. Δεν πρόκειται για ένα είδος μικροοργανισμού, το οποίο επεξεργάζεται πλήρως τα λύματα, αλλά για διάφορους τύπους οι οποίοι εμπλέκονται στην διαδικασία και μπορούν να καταταχθούν στις εξής κατηγορίες [16], [18]:

- Βακτήρια Οξυγένεσης
- Βακτήρια Ακετογένεσης
- Βακτήρια Μεθανιογένεσης

Οι μικροοργανισμοί αυτοί εμπλέκονται στα τέσσερα στάδια της αναερόβιας ζύμωσης τα οποία είναι [18], [19]:

- Υδρόλυση
- Οξυγένεση
- Ακετογένεση
- Μεθανιογένεση

Κατά την υδρόλυση ένα ή περισσότερα μεγάλα μόρια διαχωρίζονται σε δύο μέρη μέσω της προσθήκης ενός μορίου νερού. Ένα τμήμα του αρχικού μορίου παίρνει ένα ιόν υδρογόνου ( $H^+$ ), ενώ το υπόλοιπο τμήμα παίρνει το εναπομείναν ιόν υδροξυλίου ( $OH^-$ ). Υπό φυσιολογικές συνθήκες πολύ λίγες αντιδράσεις μεταξύ του νερού και οργανικών συνθετικών λαμβάνουν χώρα. Για αυτό τον λόγο η αντίδραση θα πρέπει να καταλυθεί. Στην περίπτωση της αναερόβιας επεξεργασίας των ρόλο του καταλύτη τον παίζουν υδρολυτικά ένζυμα τα οποία εκκρίνονται από τα βακτήρια. Η υδρόλυση των οργανικών ενώσεων είναι μια αργή διαδικασία η οποία αποτελεί και το ρυθμορυθμιστικό βήμα των αναερόβιων διεργασιών. Το ποσοστό της υδρόλυσης εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, οι σημαντικότερες των οποίων είναι το pH και η συγκέντρωση υποστρώματος-μικροοργανισμών. Σε αυτό λοιπόν το στάδιο τα μεγάλα μόρια υδρολύονται και έτσι τα μεγάλα πολυμερή μετατρέπονται σε απλούστερα μονομερή.

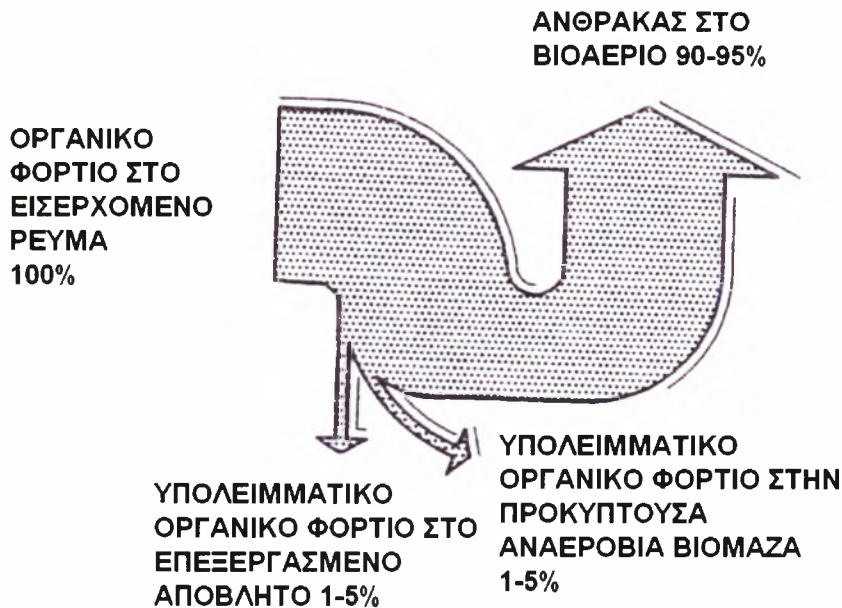
Στο στάδιο της οξυγένεσης, τα απλούστερα μονομερή που παράχθηκαν στο στάδιο της υδρόλυσης μετατρέπονται σε πτητικά λιπαρά οξέα. Η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται με τη δράση των οξυγενών βακτηρίων-μικροοργανισμών, ενώ πέρα από την παραγωγή των πτητικών λιπαρών οξέων σχηματίζεται και αμμωνία, διοξείδιο του άνθρακα καθώς, υδρόθειο ( $H_2S$ ) και άλλα υποπροϊόντα.

Το τρίτο στάδιο της αναερόβιας επεξεργασίας είναι η ακετογένεση. Σε αυτό, τα απλούστερα μόρια που παρήχθησαν στο προηγούμενο στάδιο «επεξεργάζονται» περαιτέρω από τα ακετογενή βακτήρια με σκοπό να παράγουν οξικό οξύ, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Το 70% του μεθανίου που παράγεται στην γενική διαδικασία προέρχεται από την υποβάθμιση του οξικού οξέως, ενώ το υπόλοιπο προέρχεται από την αντίδραση του υδρογόνου με το διοξείδιο του άνθρακα.

Η μεθανιογένεση αποτελεί το τελευταίο στάδιο της αναερόβιας επεξεργασίας. Εδώ τα μεθανιογενή βακτήρια χρησιμοποιούν τα ενδιάμεσα προϊόντα των προηγούμενων σταδίων και τα μετατρέπουν σε μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Αυτά τα στοιχεία αποτελούν και το βιοαέριο το οποίο βγαίνει από την αναερόβια επεξεργασία. Πρόκειται για μια υποβάθμιση του οξικού οξέως καθώς και για μια αντίδραση μεταξύ διοξειδίου του άνθρακα με το υδρογόνο. Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα μεθανιογενή βακτήρια είναι ευαίσθητα σε υψηλά ή χαμηλά pH και ότι η μεθανιογένεση λαμβάνει χώρα σε pH μεταξύ 6,5-8,5.

Το εναπομείναν μη επεξεργασμένο λύμα το οποίο δεν μπορούν να επεξεργαστούν οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί, μαζί με πιθανόν νεκρούς μικροοργανισμούς αποτελούν την εκροή του λύματος από τον αναερόβιο αντιδραστήρα.

Κατά την αναερόβια επεξεργασία, το μεγαλύτερο μέρος του άνθρακα που περιέχεται στα απόβλητα μετατρέπεται σε βιοαέριο, ενώ ένα πολύ μικρό τμήμα είτε μεταφέρεται στην βιομάζα-αναερόβιους μικροοργανισμούς, είτε παραμένει στον απόβλητο αφού δεν μπορεί να αποδομηθεί με την αναερόβια επεξεργασία. Αυτό μπορεί να φανεί παραστατικά στο Σχήμα 2.2, όπου φαίνεται το ισοζύγιο μάζας του άνθρακα κατά την αναερόβια επεξεργασία [18]. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την μέθοδο της αερόβιας επεξεργασίας το 50% του άνθρακα των λυμάτων φεύγει στην ατμόσφαιρα σαν CO<sub>2</sub> και το 50% μεταφέρεται στην βιομάζα [18].

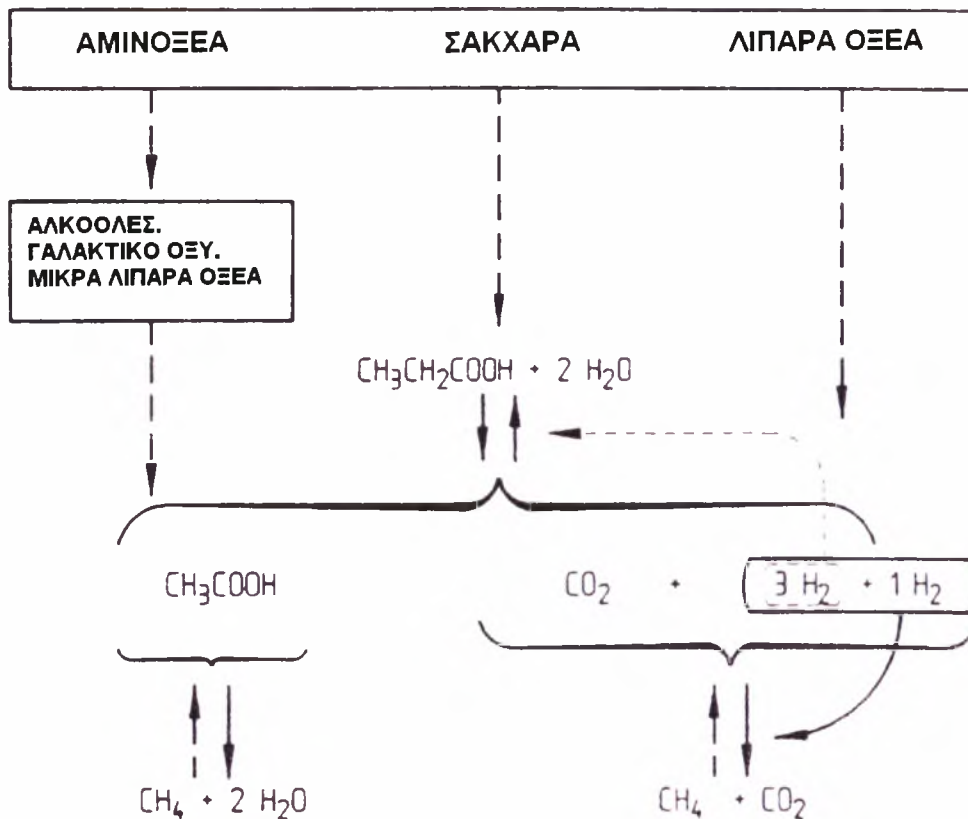
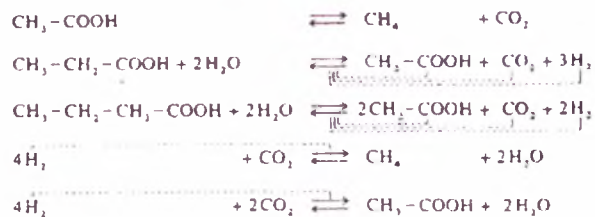


Σχήμα 2-2: Ισοζύγιο μετατροπής άνθρακα κατά την αερόβια και την αναερόβια επεξεργασία λυμάτων

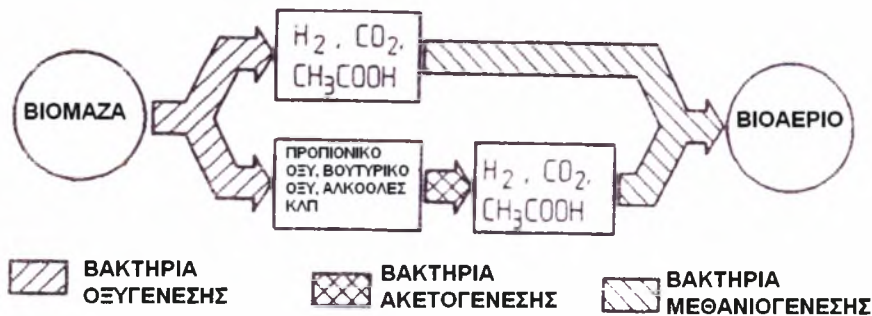
Στα Σχήματα 2.3 και 2.4 φαίνονται σχηματικά τα στάδια και οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την αναερόβια επεξεργασία του λύματος, ενώ στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται η δράση των διαφορετικών μικροοργανισμών-βακτηρίων στα διάφορα στάδια.



Σχήμα 2-3: Σχηματική απεικόνιση των σταδίων που λαμβάνουν χώρα κατά την αναερόβια επεξεργασία



Σχήμα 2-4: Σχηματική απεικόνιση των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στα διάφορα στάδια της αναερόβιας επεξεργασίας



Σχήμα 2-5: Απεικόνιση δράσης των διαφορετικού τύπου αναερόβιων μικροοργανισμών – βακτηρίων

### 2.2.3 ΑΝΑΕΡΟΒΙΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ UASB

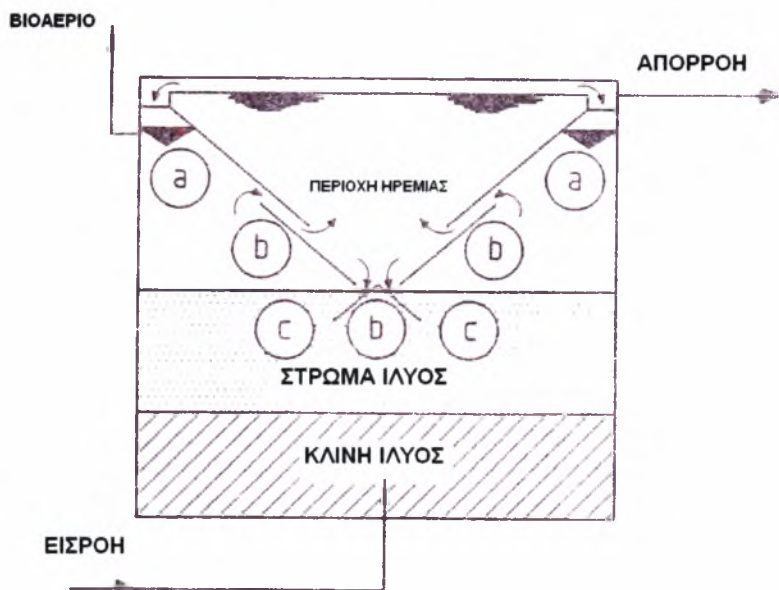
Με την πάροδο των χρόνων έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι αναερόβιων αντιδραστήρων για να καλύψουν ανάγκες που έχουν να κάνουν με την ιδιαιτερότητα του λύματος που έχουν να επεξεργαστούν [20]. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι [18], [20]:

- Ο αντιδραστήρας στερεάς κλίνης
- Ο αντιδραστήρας στερεάς κλίνης με ανακυκλοφορία
- Ο αντιδραστήρας σταθερού φιλμ – μεμβράνης
- Ο αντιδραστήρας αιωρούμενης κλίνης
- Ο αντιδραστήρας αιωρούμενης κλίνης με ανακυκλοφορία (Upflow Anaerobic Sludge Blanket-UASB)



Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, ο τύπος του αντιδραστήρα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο UASB. Βασικό κριτήριο επιλογής αποτέλεσε το γεγονός ότι πρόκειται για απλό τύπο αντιδραστήρα στον οποίο επιτυγχάνονται υψηλές αποδόσεις με

χαμηλούς υδραυλικούς χρόνους παραμονής του λύματος στον αντιδραστήρα [2], [21]. Είναι αντιδραστήρας ο οποίος βασίζεται στην κοκκώδη βιολογική ιλύ, σε συσσωματώματα δηλαδή από αναερόβιους μικροοργανισμούς-βακτήρια τα οποία δημιουργούνται σε συνθήκες ανοδικής ροής. Εξαιτίας του μεγάλους μεγέθους τους, καθώς έχουν διάμετρο από 0,5 έως 2 χιλιοστά, τα συσσωματώματα αυτά δεν μπορούν να παρασυρθούν από την ροή του λύματος προς την έξοδο αφού έχουν πολύ καλή καθιζησιμότητα. Οι ιδιότητες αυτές της κοκκώδους ιλύος επιτρέπουν την υψηλή οργανική φόρτιση του αντιδραστήρα. Η σχηματική παράσταση ενός τέτοιου αντιδραστήρα φαίνεται στο Σχήμα 2.6 στην οποία φαίνονται και οι περιοχές του αντιδραστήρα.



Σχήμα 2-6: Σχηματική παράσταση του αντιδραστήρα UASB. (a) περιοχή όπου παράγεται το βιοαέριο, (b) περιοχή όπου λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός της υγρής από τη στερεή φάση και (c) το στρώμα επαναφοράς της ιλύος.

Ο αντιδραστήρας μπορεί να είναι κυλινδρικής ή ορθογωνικής μορφής, συνήθως όμως για την καλύτερη αντοχή της κατασκευής προτιμάται η κυλινδρική μορφή. Κατασκευάζεται



από διάφορα υλικά όπως μπετόν, PVC, χάλυβα ή ανοξείδωτο χάλυβα, αναλόγως του λύματος που πρόκειται να επεξεργαστεί σε αυτόν. Στο άνω σημείο του διαθέτει κάλυμμα-στέγη. Για την αποφυγή εισαγωγής ατμοσφαιρικού αέρα μέσα στον αντιδραστήρα, απαραίτητη προϋπόθεση για την επιβίωση και την δράση των αναερόβιων βακτηρίων, συνήθως ο αντιδραστήρας βρίσκεται υπό ελαφρά υπερπίεση.

Όπως φαίνεται και από την σχηματική παράσταση του αντιδραστήρα, το λύμα εισέρχεται από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα. Με αυτό τον τρόπο αφενός μεν αποφεύγεται η καθίζηση των αναερόβιων μικροοργανισμών, αφετέρου δε επιτυγχάνεται ο μέγιστος υδραυλικός χρόνος παραμονής του λύματος στον αντιδραστήρα, αφού η έξοδος του είναι στο πάνω μέρος του αντιδραστήρα. Σε πολλές περιπτώσεις, γίνεται ανακυκλοφορία του επεξεργαζόμενου μέσου για την επίτευξη ακόμη μεγαλύτερης αφαίρεσης οργανικού φορτίου και την ακόμη καλύτερη αποφυγή της καθίζησης των αναερόβιων μικροοργανισμών. Συγκεκριμένα το λύμα πριν εξέλθει από την έξοδο του αντιδραστήρα οδηγείται μέσω αντλίας ξανά στην είσοδο του αντιδραστήρα όπου και αναμιγνύεται με το ανεπεξέργαστο λύμα.

Καθώς το λύμα επεξεργάζεται από τα βακτήρια κατά την άνοδο του, παράγεται σαν προϊόν το βιοαέριο, το οποίο λόγω της φύσης του, δηλαδή του γεγονότος ότι είναι αέριο, πάει στο υψηλότερο σημείο του αντιδραστήρα από όπου και συλλέγεται μέσω μιας οπής στο κάλυμμα του. Στο πάνω κεντρικό σημείο του αντιδραστήρα υπάρχει και ο διαχωριστήρας τριών φάσεων. Πρόκειται για ορθογώνια φύλλα λαμαρίνας από ανοξείδωτο συνήθως χάλυβα, οι οποίες είναι τοποθετημένες υπό κάποια γωνία ως προς τον κατακόρυφο άξονα του αντιδραστήρα, στο άνω κεντρικό μέρος του. Όταν το μίγμα υγρής, στερεής και αέριας φάσης έρθει σε επαφή με αυτό τους διαχωριστήρες, τότε το λύμα, το οποίο αποτελεί την υγρή φάση, διέρχεται μέσα από τα κενά που αφήνουν μεταξύ τους τα φύλλα λαμαρίνας, οι



μικροοργανισμοί μετά την πρόσκρουση τους οδηγούνται προς τον πυθμένα του αντιδραστήρα λόγω της βαρύτητας, ενώ το βιοαέριο οδηγείται προς την περίμετρο του αντιδραστήρα, από όπου και συλλέγεται.

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΥΡΟΓΑΛΟΥ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΓΑΛΑΚΤΟΣ ΤΥΡΑΣ Α.Ε.**

## **3.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ – ΠΗΓΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΥΡΟΓΑΛΟΥ**

Όπως προαναφέρθηκε, η διαχείριση του τυρόγαλου αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα τα οποία καλούνται να αντιμετωπίσουν οι βιομηχανίες γάλακτος και κυρίως εκείνες οι οποίες παράγουν τυροκομικά προϊόντα. Αυτό όμως που φαινόταν μέχρι σήμερα ως πρόβλημα, μπορεί να αποτελεί μια σημαντική πηγή εξοικονόμησης ενέργειας.

Αυτό ισχύει και στην περίπτωση της βιομηχανίας ΤΥΡΑΣ Α.Ε., η οποία εδρεύει στο 5<sup>ο</sup> χλμ της Εθνικής οδού Τρικάλων – Πύλης. Η ΤΥΡΑΣ Α.Ε. ανήκει στον όμιλο ΤΥΡΑΣ ο οποίος αριθμεί συνολικά πέντε εργοστάσια και συγκαταλέγεται στις τέσσερις μεγαλύτερες γαλακτοβιομηχανίες της Ελλάδας.

Τα προϊόντα τα οποία παράγονται στην ΤΥΡΑΣ είναι:

- Μαλακά τυριά (Φέτα, Λευκό τυρί από αγελαδινό γάλα)
- Ημίσκληρα και σκληρά τυριά, γνωστά και ως κίτρινα τυριά

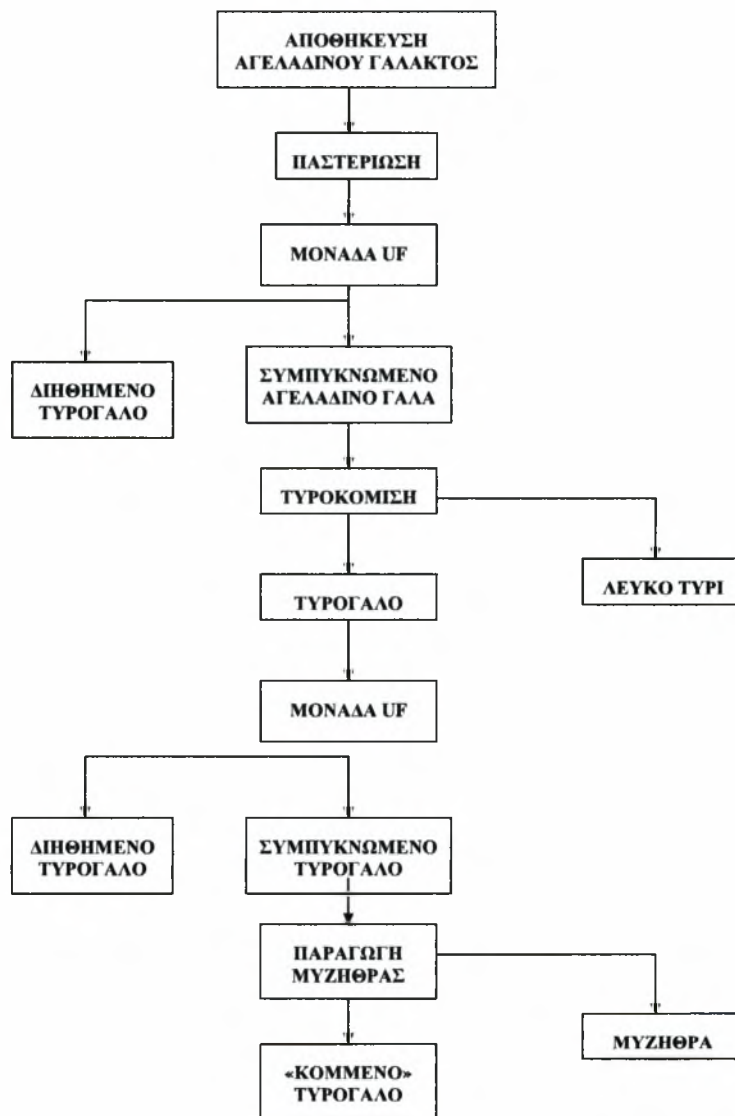
- Γιαούρτια
- Μυζήθρα και ανθότυρο

Η παραγωγή των μαλακών ή λευκών τυριών από πρόβειο ή αγελαδινό γάλα, έχει λοιπόν σαν αποτέλεσμα την παραγωγή τυρόγαλου. Το τυρόγαλο όμως αυτό χρησιμοποιείται εκ νέου στην παραγωγή μυζήθρας και ανθότυρου. Μετά την παραγωγή των τελευταίων παράγεται τελικά τυρόγαλο το οποίο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω παρά μόνο ως ζωοτροφή από χοιροτρόφους.

Στο εργοστάσιο βρίσκονται εγκατεστημένες μονάδες UF τόσο για το γάλα όσο και για το τυρόγαλο. Εκτός από την παραγωγή φέτας, η οποία σαν Π.Ο.Π. προϊόν απαγορεύει την χρήση τέτοιων μονάδων, για τα υπόλοιπα λευκά τυριά γίνεται και χρήση των μονάδων UF με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του τυρόγαλου, να αφαιρείται πριν από την τυροκόμιση. Το τυρόγαλο που προέρχεται από τις μονάδες UF αποτελείται ως επί το πλείστον από λακτόζη. Επίσης το παραγόμενο τυρόγαλο από την τυροκόμιση περνάει από μονάδες UF όπου συμπυκνώνεται αφαιρώντας ξανά πολύ μεγάλη ποσότητα κυρίως λακτόζης και στην συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή μυζήθρας και ανθότυρου.

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται ένα ενδεικτικό απλουστευμένο διάγραμμα ροής για την παραγωγή λευκού τυριού-από αγελαδινό γάλα-και μυζήθρας. Με τον όρο διηθημένο τυρόγαλο, αναφέρεται το τυρόγαλο το οποίο προέρχεται από τις μονάδες-φίλτρα UF και το οποίο αποτελείται κυρίως από λακτόζη. Επίσης, με τον όρο «κομμένο» τυρόγαλο ορίζεται το τυρόγαλο που προέρχεται από την παραγωγή της μυζήθρας ή του ανθότυρου και το οποίο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω στην παραγωγική διαδικασία.

Επίσης, η παραγωγή στραγγιστής γιαούρτης έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή τυρόγαλου, το οποίο αποτελείται κυρίως από λακτόζη. Οι ποσότητες του τυρόγαλου που παράγεται από την τυροκόμιση είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνου που προέρχεται από την παραγωγή της στραγγιστής γιαούρτης.



Σχήμα 3-1: Απλουστευμένο διάγραμμα ροής χρήσης αγελαδινού γάλακτος για παραγωγή λευκού τυριού και μυζήθρας, με χρήση μονάδων UF

Τον Οκτώβριο του 2008 η ΤΥΡΑΣ προχώρησε στην κατασκευή αναερόβιας μονάδας επεξεργασίας του τυρόγαλου που προέρχονταν από την παραγωγική της διαδικασία. Η τεχνογνωσία προήλθε από Γαλλική εταιρεία ενώ το έργο ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2009 και έκτοτε βρίσκεται σε κανονική λειτουργία.

Τα χαρακτηριστικά του τυρόγαλου που οδηγήθηκε στην μονάδα αναερόβιας επεξεργασίας φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Το μεγαλύτερο μέρος του τυρόγαλου προέρχεται από την μονάδα UF του τυρόγαλου, πριν από την παραγωγή της μυζήθρας-ανθότυρου. Γι' αυτό και τα χαρακτηριστικά του τυρόγαλου είναι πιο κοντά σε εκείνα του γλυκού τυρόγαλου.

| Συστατικό          | Περιεκτικότητα (%) |
|--------------------|--------------------|
| Νερό               | 94                 |
| Πρωτεΐνη           | 0,8-1,0            |
| Λακτόζη            | 4,5-5,0            |
| Λιπαρά             | <0,1               |
| Μεταλλικά Στοιχεία | <0,1               |
| pH                 | 4.5-5              |

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά τυρόγαλου που οδηγείται στην μονάδα αναερόβιας επεξεργασίας της βιομηχανίας γάλακτος ΤΥΡΑΣ Α.Ε.

### 3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΟΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ

Το τυρόγαλο που παράγεται στα διάφορα τμήματα της παραγωγικής διαδικασίας, είτε διηθημένο ή «κομμένο», συλλέγεται σε τρεις ανοξείδωτες δεξαμενές χωρητικότητας 125 m<sup>3</sup> η κάθε μια. Οι δεξαμενές διαθέτουν διπλό τοίχωμα και μόνωση από ορυκτοβάμβακα, προκειμένου να περιοριστούν οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον. Η μέση θερμοκρασία που έχει το τυρόγαλο κατά την συλλογή του στις ανοξείδωτες δεξαμενές είναι

περίπου 25°C, ενώ η παραγόμενη ποσότητα είναι 150 m<sup>3</sup> την ημέρα. Το οργανικό φορτίο COD του τυρόγαλου είναι περίπου 60.000mg/lit.

Από τις ανοξείδωτες δεξαμενές το τυρόγαλο αντλείται με σταθερή παροχή 6,25m<sup>3</sup>/hr με τη χρήση φυγοκεντρικής αντλίας προς τους αναερόβιους αντιδραστήρες. Καταρχάς διέρχεται μέσα από έναν σωληνωτό εναλλάκτη θερμότητας όπου θερμαίνεται από το επεξεργασμένο απόβλητο που εξέρχεται από τους αντιδραστήρες. Στη συνέχεια το ανεπεξέργαστο τυρόγαλο αναμιγνύεται με ένα ρεύμα ανακυκλοφορούμενου τυρόγαλου το οποίο συλλέγεται από το πάνω μέρος του αντιδραστήρα, πολύ κοντά στο σημείο εξόδου του επεξεργασμένου τυρόγαλου και ως εκ τούτου έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτό. Η ανάμιξη γίνεται για την διάλυση του ανεπεξέργαστου τυρόγαλου το οποίο βοηθά στην σταθεροποίηση του αντιδραστήρα και αυξάνει την αλκαλικότητα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η ανάγκη προσθήκης αλκαλικού υλικού [11]. Επίσης η αυξημένη ροή που έχει το ρεύμα ανάμιξης βοηθάει στην αποφυγή καθίζησης της βιομάζας στο πάτο του αντιδραστήρα. Το αναμιγμένο ρεύμα ανεπεξέργαστου και ανακυκλοφορούμενου τυρόγαλου εισέρχεται στον αντιδραστήρα, αφού πρώτα περάσει από μια δεύτερη φυγοκεντρική αντλία και έναν δεύτερο σωληνωτό εναλλάκτη θερμότητας, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία των 35°C. Η θέρμανση στον δεύτερο εναλλάκτη επιτυγχάνεται με τη χρήση θερμού νερού το οποίο με τη σειρά του θερμαίνεται σε ένα τρίτο πλακοειδή εναλλάκτη με τη χρήση ατμού. Οι αναερόβιοι αντιδραστήρες είναι δύο με όγκο 625m<sup>3</sup> ο κάθε ένας, το οποίο συνεπάγεται HRT πάνω από 8 ημέρες. Οι αντιδραστήρες είναι τύπου UASB όπως προαναφέρθηκε και λειτουργούν παράλληλα. Η εισαγωγή της εισερχόμενης ροής γίνεται από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα μέσω ανοξείδωτων αγωγών ώστε να επιτυγχάνεται η συνεχής ανάδευση της αναερόβιας βιομάζας και να αποφεύγεται η καθίζηση της. Στο πάνω μέρος του αντιδραστήρα

υπάρχει ο ανοξειδωτος διαχωριστής τριών φάσεων. Το παραγόμενο βιοαέριο συλλέγεται από την οροφή του αντιδραστήρα η οποία είναι κατασκευασμένη από ανοξειδωτο χάλυβα. Το επεξεργασμένο τυρόγαλο οδηγείται επίσης προς την οροφή του αντιδραστήρα όπου βρίσκεται η υπερχειλίση. Λίγο πριν τον αγωγό υπερχειλίσης, βρίσκεται ο αγωγός ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανακυκλοφορία του τυρόγαλου. Τέλος, οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί μετά τον διαχωριστή οδηγούνται με την βαρύτητα προς τον πάτο του αντιδραστήρα, ενώ ο πλεονάζων πληθυσμός τους αφαιρείται κατά διαστήματα με την χρήση αντλιών από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα.

Εντός των αντιδραστήρων το οργανικό φορτίο του τυρόγαλου βιοδιασπάται σε βιοαέριο, μίγμα δηλαδή μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο συλλέγεται από την κορυφή του αντιδραστήρα και αποθηκεύεται σε δεξαμενή αποθήκευσης. Ο αντιδραστήρας διατηρείται σε υπερπίεση 25mbar πάνω από την ατμοσφαιρική για την αποφυγή εισαγωγής ατμοσφαιρικού αέρα σε αυτόν.

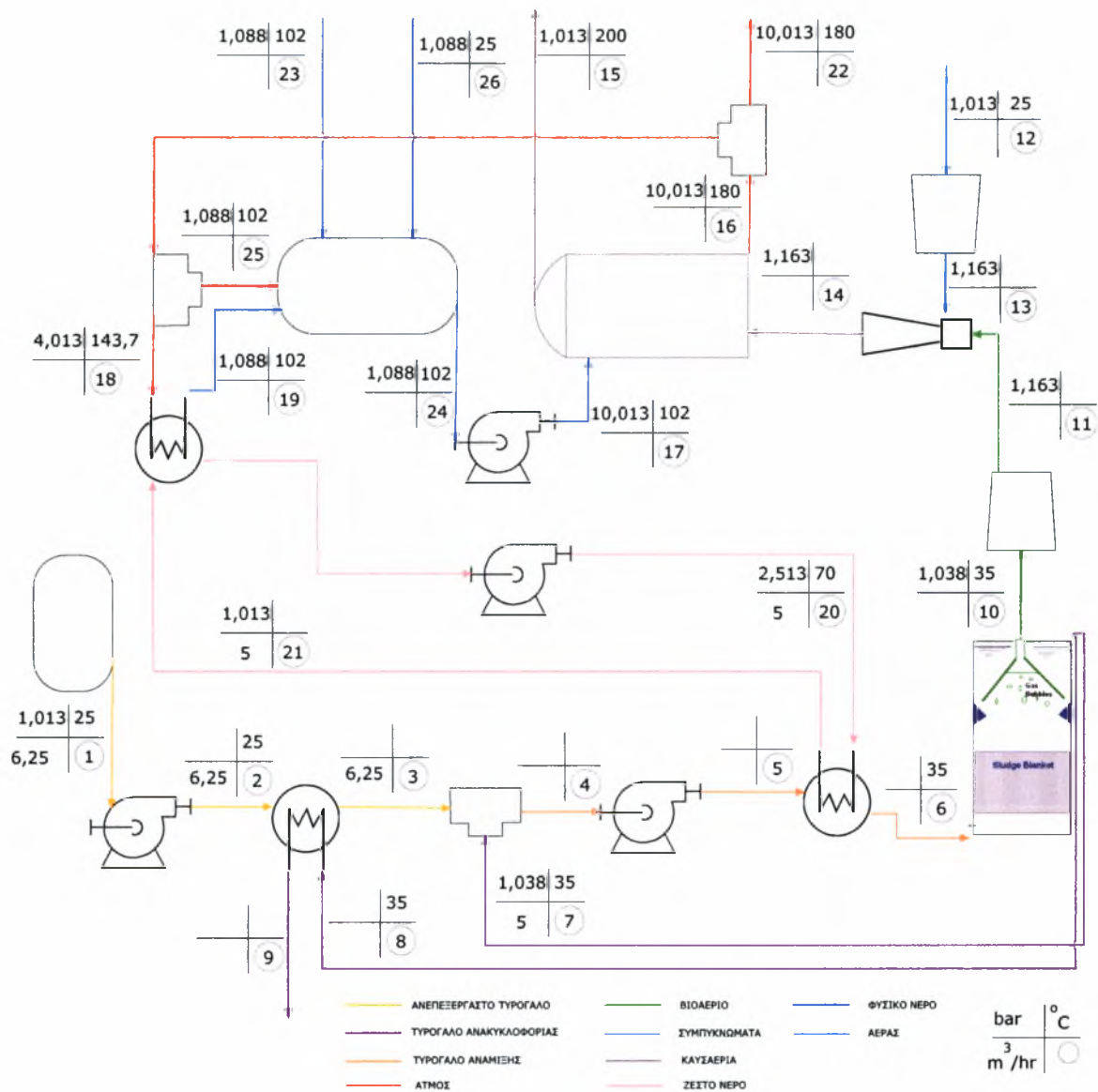
Σε ότι αφορά το επεξεργασμένο τυρόγαλο, το ρυπαντικό του φορτίο COD είναι της τάξης των 1.200mg/lit και χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία προκειμένου να διατεθεί στον τελικό φυσικό αποδέκτη. Αυτό επιτυγχάνεται με την περαιτέρω επεξεργασία του στο αερόβιο σύστημα επεξεργασίας λυμάτων του εργοστασίου.

Σε ότι αφορά το βιοαέριο, αυτό συμπιέζεται με τη βοήθεια ενός συμπιεστή προς έναν ατμολέβητα όπου καίγεται. Ο ατμός που παράγεται προορίζεται να καλύψει μέρος των θερμικών αναγκών του εργοστασίου. Μέρος του παραγόμενου ατμού χρησιμοποιείται στον τρίτο εναλλάκτη για την θέρμανση του νερού. Το εξερχόμενο συμπύκνωμα από τον τρίτο εναλλάκτη συλλέγεται σε απαερωτή, ο οποίος χρησιμοποιείται σαν δεξαμενή ενδιάμεσης αποθήκευσης για την συλλογή και των συμπυκνωμάτων που επιστρέφουν από το εργοστάσιο

μετά την χρήση του ατμού. Εξαιτίας του γεγονότος ότι υπάρχουν απώλειες κατά την χρήση ατμού στο εργοστάσιο, η ποσότητα των συμπυκνωμάτων είναι μικρότερη από εκείνη του παραγόμενου ατμού στον ατμολέβητα. Η επιπλέον ποσότητα που απαιτείται καλύπτεται με την προσθήκη φρέσκου νερού, σε συνθήκες περιβάλλοντος, από το δίκτυο του εργοστασίου. Το περιεχόμενο του απαεριωτή διατηρείται σε κορεσμένη κατάσταση σε θερμοκρασία 102°C, το οποίο επιτυγχάνεται με τη χρήση ατμού από την παραγόμενη ποσότητα στον ατμολέβητα.

Το διάγραμμα ροής του εξεταζόμενου συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2. Οι ιδιότητες που παρουσιάζονται στις διάφορες καταστάσεις στο διάγραμμα ροής είναι τα δεδομένα του συστήματος.





Σχήμα 3-2: Διάγραμμα ροής αναερόβιας επεξεργασίας τυρόγαλο

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

### 4.1 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Για τον υπολογισμό των άγνωστων μεταβλητών χρησιμοποιούνται σε κάθε όγκο ελέγχου τα ισοζύγια:

- Μάζας
- Ενέργειας

Για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των ρευστών σε κάθε κατάσταση γίνεται χρήση των θερμοδυναμικών πινάκων. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μαθηματικές σχέσεις που δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

Η κατάσταση αναφοράς του συστήματος αντιστοιχεί σε θερμοκρασία  $T_0=298,15\text{K}$  και πίεση  $P_0=1,013\text{bar}$ .

Εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας του τυρόγαλου σε λακτόζη σε σχέση με τα υπόλοιπα στερεά, και στα ανεπαρκή στοιχεία σχετικά με τη δομή των πρωτεϊνών και τις ιδιότητές τους, το τυρόγαλο θεωρείται ότι αποτελείται κατά 95% από νερό και κατά 5% από λακτόζη. Το στερεό μέρος του τυρόγαλου που είναι διαλυμένο στο νερό θα αναφέρεται ως διαλυμένη ουσία. Για το ανεπεξέργαστο τυρόγαλο η διαλυμένη ουσία είναι η λακτόζη. Το τυρόγαλο, το οποίο είναι σε υγρή μορφή, είτε είναι ανεπεξέργαστο, ανακυκλοφορούμενο ή

επεξεργασμένο, θεωρείται ότι είναι ασυμπίεστο, ενώ το βιοαέριο και ο αέρας, τα οποία είναι σε αέρια μορφή, θεωρούνται μίγματα ιδανικών αερίων.

Επίσης, θεωρείται ότι δεν υπάρχουν απώλειες θερμότητας από κανένα σημείο του συστήματος, πλην του καυστήρα.

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες, όπως η πίεση, η ενθαλπία και η εντροπία, σε κάθε κατάσταση υπολογίζονται με τη χρήση των εξισώσεων που εφαρμόζονται στα ασυμπίεστα ρευστά και στα μίγματα ιδανικών αερίων και δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

Η συνολική εξέργεια σε κάθε κατάσταση υπολογίζεται ως άθροισμα της φυσικής και της χημικής εξέργειας. Οποιαδήποτε άλλη μορφή εξέργειας, όπως η κινητική και η δυναμική είναι αμελητέες και παραλείπονται. Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της φυσικής, χημικής και συνολικής εξέργειας δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

Ο υπολογισμός των υδραυλικών απωλειών στις σωληνώσεις του συστήματος βασίζεται στην χρήση της εξίσωσης για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής, και οι εξισώσεις δίνονται επίσης στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

Οι αντλίες που χρησιμοποιούνται καθώς και οι συμπιεστές βιοαερίου και αέρα οδηγούνται από μετατροπέα συχνότητας (inverter). Για τον προσδιορισμό της ισχύος που καταναλώνουν, του βαθμού απόδοσης και της συχνότητας τους, δίνονται σε πίνακες στοιχεία σχετικά με τα τρία παραπάνω μεγέθη για διάφορες ογκομετρικές παροχές και πίεση κατάθλιψης. Στη συνέχεια, για δεδομένη ογκομετρική παροχή και πίεση κατάθλιψης γίνεται χρήση διπλής γραμμικής παρεμβολής και έτσι προκύπτουν η απορροφημένη ηλεκτρική ισχύς, ο βαθμός απόδοσης και η συχνότητα.

Στους εναλλάκτες θερμότητας, η απώλεια θερμικής ισχύος του θερμού ρεύματος μεταφέρεται εξολοκλήρου στο ψυχρό ρεύμα αφού θεωρείτε ότι δεν υπάρχουν απώλειες. Για παράδειγμα, εάν 1, 2 είναι η είσοδος και η έξοδος αντίστοιχα του θερμού ρεύματος στον εναλλάκτη και 3, 4 είναι η είσοδος και η έξοδος αντίστοιχα του ψυχρού ρεύματος, τότε:

$$\dot{m}_{hot} \cdot (\bar{h}_1 - \bar{h}_2) = \dot{m}_{cold} \cdot (\bar{h}_4 - \bar{h}_3) \quad (4.1)$$

Η ανάμιξη των ρευμάτων 3, 7 έχει σαν αποτέλεσμα το παραγόμενο μίγμα 4, το οποίο έχει την ίδια πίεση με τις ροές 3 και 7. Η θερμοκρασία του,  $T_4$ , δίνεται από:

$$T_4 = \frac{\dot{m}_3 \cdot T_3 + \dot{m}_7 \cdot T_7}{\dot{m}_3 + \dot{m}_7} \quad (4.2)$$

Το ποσοστό μάζας του  $k$  συστατικού στο νέο μίγμα θα δίνεται από την σχέση:

$$x_{k,4} = \frac{\dot{m}_3 \cdot x_{k,3} + \dot{m}_7 \cdot x_{k,7}}{\dot{m}_3 + \dot{m}_7} \quad (4.3)$$

Η παραγωγή του μεθανίου που περιέχεται στο βιοαέριο δίνεται από τον ειδικό ρυθμό παραγωγής το οποίο είναι ίσο με  $0,4 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{kg COD}_{\text{removed}}$  [10]. Συνεπώς, η ογκομετρική παροχή του μεθανίου θα είναι:

$$\dot{Q}_{10, \text{CH}_4} = \dot{Q}_1 \times \text{COD}_{\text{content}} \times \text{COD}_{\text{removal-efficiency}} \times \frac{0,4 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{\text{kg COD}_{\text{removed}}} \quad (4.4)$$

Το COD του επεξεργασμένου τυρόγαλου έχει μετρηθεί και βρεθεί ίσο με  $1,2 \text{ g/lit}$ , το οποίο σημαίνει ότι η απόδοση ως προς την αφαίρεση COD είναι 98%. Η περιεκτικότητα  $\text{CH}_4$  στο βιοαέριο είναι ίση με 60% και το υπόλοιπο είναι  $\text{CO}_2$ . Έτσι, δεδομένων των πυκνοτήτων  $\text{CH}_4$  και  $\text{CO}_2$  στην κατάσταση 10, μπορεί να υπολογιστεί η παροχή μάζας του βιοαερίου.

Ο Συνολικός Οργανικός Άνθρακας ( $TOC$ ) της εισερχόμενης ροής και του βιοαερίου μπορεί να υπολογιστεί αντίστοιχα από τις εξισώσεις:

$$TOC_1 = \frac{\dot{m}_1 \cdot x_{s,1}}{MB_{s,1}} \times A_{r,C} \times \text{carbon atoms in lactose} \quad (4.5)$$

$$TOC_{10} = \frac{\dot{m}_{CH_4,10}}{M_{CH_4}} \cdot (C \text{ atoms in } CH_4) + \frac{\dot{m}_{CO_2}}{M_{CO_2}} \cdot (C \text{ atoms in } CO_2) \quad (4.6)$$

Από τις εξισώσεις αυτές μπορεί να βρεθεί ότι  $\frac{TOC_{10}}{TOC_1} = 90\%$ . Το υπόλοιπο του  $TOC$ ,

πηγαίνει στην βιομάζα και στο επεξεργασμένο τυρόγαλο, και όπως μπορεί να φανεί και από το Σχήμα 2.2 θεωρείται ότι 5% του  $TOC_1$  πηγαινει στο επεξεργασμένο τυρόγαλο και το 5% στην βιομάζα.

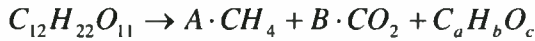
Ο Tai et al [22] έδειξε ότι υπάρχει μαθηματική σχέση που συνδέει το  $TOC$ , την χημική εξέργεια και την ελεύθερη ενέργεια του οργανικού περιεχομένου των αποβλήτων. Συνεπώς, η χημική εξέργεια και η ελεύθερη ενέργεια του επεξεργασμένου τυρόγαλου θα είναι μειωμένη κατά 95% σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του ανεπεξέργαστου τυρόγαλου. Θεωρείται ότι η μείωση της ελεύθερης ενέργειας κατά 95% προέρχεται από την μείωση της ενθαλπίας και της εντροπίας της επεξεργασμένης ροής κατά το ίδιο ποσοστό, 95%. Συνεπώς:

$$\bar{h}_{s,8} = \bar{h}_{s,7} = 0,05 \cdot \bar{h}_{s,1} \quad (4.7)$$

$$\bar{s}_{s,8} = \bar{s}_{s,7} = 0,05 \cdot \bar{s}_{s,1} \quad (4.8)$$

$$\bar{e}_{s,8}^{CH} = \bar{e}_{s,7}^{CH} = 0,05 \cdot \bar{e}_{s,1}^{CH} \quad (4.9)$$

Η διάσπαση της λακτόζης που λαμβάνει χώρα στον αντιδραστήρα θεωρείται ότι προσεγγίζεται από την χημική αντίδραση:



Όπου ο υδρογονάνθρακας  $C_a H_b O_c$ , είναι ότι απομένει στην επεξεργασμένη ροή στην έξοδο. Από την ανωτέρω χημική αντίδραση είναι φανερό ότι 1mole λακτόζης δίνει 1mole  $C_a H_b O_c$ . Επομένως:

$$\frac{\dot{m}_1 \cdot x_{s,1}}{MB_{LACTOSE}} = \frac{\dot{m}_8 \cdot x_{s,8}}{MB_{s,8}} \quad (4.10)$$

Όπου το κλάσμα μάζας  $x_{s,8}$  δίνεται από:

$$x_{s,8} = \frac{\dot{m}_{s,8}}{\dot{m}_8} \quad (4.11)$$

Και αφού θεωρείται ότι 5% του  $TOC_1$  πηγαίνει στην επεξεργασμένη ροή και άλλο 5% καταναλώνεται από την βιομάζα:

$$2 \cdot \dot{m}_{s,8} = \dot{m}_{s,1} - \dot{m}_{10} \quad (4.12)$$

Οι ισεντροπικοί βαθμοί απόδοσης χρησιμοποιούνται για τους συμπιεστές βιοαερίου και αέρα έτσι ώστε να υπολογιστούν οι θερμοκρασίες στην έξοδο των συμπιεστών. Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης δίνεται από τη σχέση [23]:

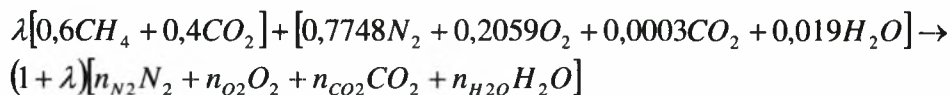
Συμπιεστής βιοαερίου:

$$n_{sc,biogas} = \frac{h_{11,isentropic} - h_{10}}{h_{11} - h_{10}} \quad (4.13)$$

Συμπιεστής αέρα:

$$n_{sc,air} = \frac{h_{13,isentropic} - h_{12}}{h_{13} - h_{12}} \quad (4.14)$$

Η καύση του βιοαερίου εκφράζεται από την χημική αντίδραση :



Το μοριακό κλάσμα κάθε συστατικού στα προϊόντα της αντίδρασης μπορεί να υπολογιστεί σαν συνάρτηση του συντελεστή  $\lambda$  και ισούνται με:

$$n_{N_2} = \frac{0,7748}{1 + \lambda} \quad (4.15)$$

$$n_{CO_2} = \frac{0,0003 + \lambda}{1 + \lambda} \quad (4.16)$$

$$n_{H_2O} = \frac{0,019 + 1,2 \cdot \lambda}{1 + \lambda} \quad (4.17)$$

$$n_{O_2} = \frac{0,2059 - 1,2 \cdot \lambda}{1 + \lambda} \quad (4.18)$$

Με τη χρήση ενός αναλυτή καυσαερίων, το μοριακό κλάσμα του  $CO_2$  έχει μετρηθεί και βρεθεί ίσο με 0,09.

Οι θερμικές απώλειες του καυστήρα θεωρούνται ότι ισούνται με το 2% της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του καυσίμου – βιοαερίου. Έτσι, η εξίσωση του ισοζυγίου διατήρησης ενέργειας παίρνει την μορφή:

$$0 = 0,02 \cdot \lambda \cdot LHV + \bar{h}_{air} + \lambda \cdot \bar{h}_{biogas} - (1 + \lambda) \cdot \bar{h}_{gases} \quad (4.19)$$

Ο ατμολέβητας συμπεριφέρεται όπως ένας εναλλάκτης θερμότητας, υπό την έννοια ότι όλη θερμότητα που χάνεται από το θερμό ρεύμα, δηλαδή τα καυσαέρια, πηγαίνει στο ψυχρό ρεύμα, δηλαδή στα συμπυκνώματα. Επομένως:

$$\dot{m}_{16} \cdot \bar{h}_{16} - \dot{m}_{17} \cdot \bar{h}_{17} = \dot{m}_{14} \cdot \bar{h}_{14} - \dot{m}_{15} \cdot \bar{h}_{15} \quad (4.20)$$

$$\text{Με } \dot{m}_{16} = \dot{m}_{17} \text{ and } \dot{m}_{14} = \dot{m}_{15}$$

Ο απαεριωτής, στον οποίον συλλέγονται τα συμπυκνώματα μετά την χρήση του ατμού, χρησιμοποιείται σαν δεξαμενή τροφοδοσίας του ατμολέβητα και προκειμένου να διατηρείτε το νερό τροφοδοσίας σε κατάσταση κορεσμού σε θερμοκρασία 102°C. Ο λόγος της υπερπίεσης είναι για να ελαχιστοποιηθεί η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό αφού το τελευταίο δρα διαβρωτικά στα τοιχώματα του ατμολέβητα. Το διαλυμένο οξυγόνο αποβάλλεται μέσω του απαεριωτή στην ατμόσφαιρα.

Η μοντελοποίηση του συστήματος περιλαμβάνει κάποιες μεταβλητές των οποίων οι τιμές είτε είναι άγνωστες ή μπορεί να μεταβάλλονται. Τέτοιες παράμετροι είναι:

- Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης των συμπιεστών βιοαερίου και αέρα ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 85%,
- Η πίεση εξόδου του βιοαερίου από τον συμπιεστή του βιοαερίου η οποία λαμβάνεται ίση προς 1,163 bar.
- Οι θερμικές απώλειες του καυστήρα στο περιβάλλον, οι οποίες όπως αναφέρθηκε λαμβάνονται ίσες προς 2% της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του βιοαερίου,
- Τη θερμοκρασία στην οποία τα καυσαέρια απορρίπτονται στο περιβάλλον, και η οποία θεωρήθηκε ίση με 473,15K (200°C), και
- Το ποσοστό της περιεκτικότητας των ξηρών καυσαερίων σε διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο λαμβάνεται ίσο προς 11%.
- Η πίεση παραγωγής ατμού στον ατμολέβητα η οποία λαμβάνεται ίση με 10,013bar.



- Η ποσότητα των συμπυκνωμάτων που επιστρέφουν από το εργοστάσιο και η οποία λαμβάνεται ίση προς 70% του ατμού που διανέμεται στο εργοστάσιο.

Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των απωλειών εξέργειας στα διάφορα τμήματα του εξοπλισμού και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης τους δίνονται στο Π ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon_{system} = \frac{\dot{E}_{product}}{\dot{E}_{fuel}} = \frac{\dot{E}_{22} - \dot{E}_{23}}{\dot{E}_1 + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{26} - (W_{P1} + W_{P2} + W_{P3} + W_{P4} + W_{C1} + W_{C2})} \quad (4.21)$$

## 4.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η οικονομική ανάλυση γίνεται με χρήση της μεθόδου της *Καθαρής Παρούσας Αξίας* (*NPV*), η οποία εκφράζει την αξία που προκύπτει από την προεξόφληση στο παρόν όλων των ετήσιων καθαρών χρηματοροών που προβλέπονται σε ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα ζωής μίας επένδυσης, και δίνεται από την σχέση [24]:

$$NPV = \sum \frac{NCF}{(1+i)^t} - TCI \quad (4.22)$$

Το άθροισμα αναφέρεται στη διάρκεια ζωής της επένδυσης.

Το *Συνολικό Επενδυμένο Κεφάλαιο* (*TCI*), είναι το συνολικό κόστος του συστήματος που περιγράφηκε. Είναι το άθροισμα κόστους όπως:

- Εξοπλισμός όπως
  - Δεξαμενές ενδιάμεσης αποθήκευσης,
  - Αντλίες,
  - Εναλλάκτες θερμότητας

- Σωληνώσεις
- Αντιδραστήρες
- Συμπιεστές
- Καυστήρας
- Ατμολέβητας
- Απαεριοτής
- Δεξαμενή ενδιάμεσης αποθήκευσης βιοαερίου
- Μετρητικά και δειγματοληπτικά όργανα
- Ηλεκτρολογικό υλικό
- Έργα Πολιτικού Μηχανικού
- Εγκατάσταση

Τα κόστη αυτά δίνονται στον Πίνακα 4.1. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σύστημα διαιρείται σε δύο υποσυστήματα. Ο λόγος είναι ότι το έργο εκτελέστηκε από περισσότερους του ενός προμηθευτές οι οποίοι είχαν διαφορετική τιμολογιακή πολιτική. Το πρώτο υποσύστημα εκτείνεται μέχρι και τον συμπιεστή βιοαερίου, εξαιρώντας τις δεξαμενές ενδιάμεσης αποθήκευσης τυρόγαλου, ενώ το δεύτερο εκτείνεται από τον συμπιεστή αέρα μέχρι και την παροχή ατμού στο εργοστάσιο. Το κόστος των μετρητικών και δειγματοληπτικών οργάνων στο πρώτο υποσύστημα δίνεται σαν ποσοστό του κόστους αγοράς του εξοπλισμού, ενώ το κόστος εγκατάστασης περιλαμβάνεται στο κόστος του εξοπλισμού. Για το δεύτερο υποσύστημα, το κόστος εγκατάστασης δίνεται σαν ποσοστό του κόστους αγοράς του εξοπλισμού, ενώ τα μετρητικά και όργανα και ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός περιλαμβάνεται στο κόστος εξοπλισμού. Το TCI του συστήματος υπολογίζεται αθροίζοντας το TCI των δύο υποσυστημάτων και προσθέτοντας το κόστος Πολιτικού

Μηχανικού. Η ανάλυση που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του TCI είναι συμβατή με την [23].

Για τον υπολογισμό της *NPV* λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες παράμετροι και κόστη:

- Η λειτουργία του αναερόβιου συστήματος θα διαρκεί 270 μέρες το χρόνο ή 6.480 ώρες.
- Εργατικά: Δύο άτομα θα απασχολούνται στο σύστημα. Το κόστος των εργατικών θα αυξάνεται ετησίως κατά 3%.
- Αναλώσιμα: Έχουν να κάνουν με αναλώσιμα όπως η σόδα που χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του pH στον αντιδραστήρα. Το κόστος τους αυξάνεται ετησίως κατά 3%.
- Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας: Είναι το κόστος για την λειτουργία των αντλιών και των συμπιεστών. Η συνολική ισχύς αυτού του εξοπλισμού υπολογίστηκε ίση με 21,55kW, και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ισούται με 0,08€/kWh. Το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ότι αυξάνεται ετησίως κατά 7%.
- Κόστος συντήρησης: Το κόστος συντήρησης διαιρείται σε τρεις κατηγορίες:
  - Στο κόστος συντήρησης των αντλιών και των συμπιεστών, το οποίο θεωρείται ίσο προς 4% του κόστους αγοράς τους,
  - Στο κόστος συντήρησης των μετρητικών και δειγματοληπτικών οργάνων και ηλεκτρονικού υλικού το οποίο αναφέρεται στα όργανα που χρησιμοποιούνται στο πρώτο υποσύστημα, και λαμβάνεται ίσο προς 2% του κόστους αγοράς τους,και

- Στο κόστος συντήρησης για τον λοιπό εξοπλισμό όπως αντιδραστήρες, ατμολέβητας, απαεριοτή, μονάδα ανάμιξης και ατμοδιαχωριστής, εναλλάκτες θερμότητας, σωληνώσεις και λαμβάνεται ίσο προς 0,5% του κόστους αγοράς τους.

Η ετήσια αύξηση του κόστους συντήρησης είναι 3%

- Η εταιρεία θα καλύψει το κεφάλαιο της επένδυσης από Τραπεζικό δανεισμό, με επιτόκιο δανεισμού 7%. Το ετήσιο ποσό της δόσης μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση [25]:

$$AD = \frac{\varepsilon \cdot (1 + \varepsilon)^v}{(1 + \varepsilon)^v - 1} \cdot K \quad (4.23)$$

Η αποπληρωμή του δανείου θα γίνει σε 10 έτη. Οι δόσεις θα είναι σταθερές σε αυτό το διάστημα.

Σε ότι αφορά τα έσοδα, αυτά προέρχονται από την εξοικονόμηση σε φυσικό αέριο. Το φυσικό αέριο είναι το καύσιμο που χρησιμοποιείται από την εταιρεία για την κάλυψη των θερμικών αναγκών. Συνεπώς, η ίδια ποσότητα ατμού που διανέμεται στο εργοστάσιο και προέρχεται από την καύση του βιοαερίου, θα έπρεπε να παραχθεί από την καύση του φυσικού αερίου. Ως εκ τούτου, με δεδομένη την ατμοπαραγωγή από το βιοαέριο, το φυσικό αέριο το οποίο θα έπρεπε εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί ισούται περίπου με 157m<sup>3</sup>/hr, και λαμβάνοντας υπόψη ότι το μέσο κόστος του φυσικού αερίου για το 2009 ήταν 0,31879€/m<sup>3</sup>, προκύπτει ότι η εξοικονόμηση για το πρώτο έτος ανέρχεται σε 347.587€. Το κόστος του φυσικού αερίου για τα επόμενα έτη θεωρείται ότι αυξάνεται ετησίως κατά 7%.

Επιπλέον, το επιτόκιο προεξόφλησης λαμβάνεται ίσο προς 5%.

|                                                   | <b>Κόστος<br/>(€)</b> |
|---------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>Υποσύστημα#1</b>                               |                       |
| Αντλία#1                                          | 5.000                 |
| Εναλλάκτης Θερμότητας#1                           | 15.000                |
| Μονάδα Ανάμιξης                                   | 3.000                 |
| Αντλία#2                                          | 5.000                 |
| Εναλλάκτης Θερμότητας #2                          | 15.000                |
| Αντιδραστήρες UASB                                | 440.000               |
| Συμπιεστής Βιοαερίου                              | 80.000                |
| Λοιπά (Σωληνώσεις, Βαλβίδες, Εγκατάσταση)         | 237.000               |
| Κόστος Εξοπλισμού (PEC) του Υποσυστήματος#1       | 800.000               |
| Μετρητικά και Δειγματοληπτικά Όργανα (6% του PEC) | 48.000                |
| Ηλεκτρολογικό Υλικό και Συνδέσεις (19% του PEC)   | 152.000               |
| <b>TCI του Υποσυστήματος#1</b>                    | <b>1.000.000</b>      |
| <b>Υποσύστημα#2</b>                               |                       |
| Συμπιεστής Βιοαερίου                              | 5.000                 |
| Καυστήρας                                         | 55.000                |
| Ατμολέβητας                                       | 150.000               |
| Διαχωριστής ατμού                                 | 2.000                 |
| Εναλλάκτης Θερμότητας #3 και Αντλία#3             | 5.000                 |
| Απαερωτής                                         | 60.000                |
| Αντλία#4                                          | 3.000                 |
| Δεξαμενές ενδιάμεσης αποθήκευσης τυρόγαλου        | 120.000               |
| Λοιπά (Σωληνώσεις, Βαλβίδες Στηρίγματα)           | 165.000               |
| Κόστος Εξοπλισμού (PEC) του Υποσυστήματος#2       | 565.000               |
| Κόστος Εγκατάστασης (~45% του PEC)                | 254.000               |
| <b>TCI του Υποσυστήματος#2</b>                    | <b>819.000</b>        |
| <b>Έργα Πολιτικού Μηχανικού</b>                   | <b>250.000</b>        |
| <b>TCI του Συστήματος</b>                         | <b>2.069.000</b>      |

Πίνακας 4-1: Δεδομένα για τον υπολογισμό του TCI

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΕΞΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η παροχή μάζας, η θερμοκρασία, η πίεση, η ενθαλπία, η εντροπία και η συνολική εξέργεια σε κάθε κατάσταση του συστήματος φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Ο Πίνακας 5.2 δείχνει τις εξεργειακές απώλειες επιμερισμένες στα διάφορα στοιχεία του εξοπλισμού που απαρτίζουν το σύστημα. Ο πίνακας δείχνει επίσης την εξεργειακή απόδοση για κάθε στοιχείο του εξοπλισμού και τις εξεργειακές απώλειες του εξοπλισμού σε σχέση με τις συνολικές εξεργειακές απώλειες και σε σχέση με την εισερχόμενη στο σύστημα εξέργεια. Όπως μπορεί να φανεί από τα αποτελέσματα ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι αρκετά χαμηλός (23,30%). Αυτό οφείλεται στις μεγάλες εξεργειακές απώλειες στον καυστήρα και τον ατμολέβητα, αφού και τα δύο μαζί είναι υπεύθυνα για το 91% περίπου των συνολικών εξεργειακών απωλειών. Από την άλλη, εξοπλισμός όπως αντλίες και εναλλάκτες θερμότητας δεν έχουν τόσο μεγάλη συνεισφορά στις συνολικές εξεργειακές απώλειες. Ωστόσο, από τον ίδιο πίνακα φαίνεται ότι ο χειρότερος εξεργειακός βαθμός απόδοσης απαντάται στις αντλίες και τους εναλλάκτες θερμότητας, όπως επίσης και στον απαεριωτή. Το Σχήμα 5.1 δείχνει τις εξεργειακές απώλειες του εξοπλισμού σε σχέση με τις συνολικές απώλειες και σε σχέση με την εισερχόμενη στο σύστημα εξέργεια, που ουσιαστικά είναι η εξέργεια του τυρόγαλου.

| Κατάσ<br>ταση | Ρευστό                        | $\dot{m}$<br>(kg/hr) | $T$<br>(K) | $P$<br>(bar) | $\bar{h}$<br>(kJ/kmol) | $\bar{s}$<br>(kJ/kmol K) | $\dot{E}$<br>(kW) |
|---------------|-------------------------------|----------------------|------------|--------------|------------------------|--------------------------|-------------------|
| 1             | Ανεπεξέργαστο<br>Τυρόγαλο     | 6341,7               | 298,15     | 1,013        | -8994                  | 14,862                   | 1526,21           |
| 2             | Ανεπεξέργαστο<br>Τυρόγαλο     | 6341,7               | 298,15     | 1,569        | -8992                  | 14,862                   | 1526,3            |
| 3             | Ανεπεξέργαστο<br>Τυρόγαλο     | 6341,7               | 302,15     | 1,038        | -8450                  | 16,675                   | 1526,4            |
| 4             | Μίγμα*                        | 11333,1              | 304,79     | 1,038        | -2023                  | 13,375                   | 1579,58           |
| 5             | Μίγμα                         | 11333,1              | 304,79     | 1,873        | -2021                  | 13,374                   | 1579,84           |
| 6             | Μίγμα                         | 11333,1              | 308,15     | 1,852        | -1652                  | 14,579                   | 1581              |
| 7             | Ανακυκλοφορούμενο<br>Τυρόγαλο | 4991,4               | 308,15     | 1,038        | 2612                   | 9,08                     | 63,65             |
| 8             | Ανακυκλοφορούμενο<br>Τυρόγαλο | 6046,8               | 308,15     | 1,072        | 2612                   | 9,08                     | 77,11             |
| 9             | Ανακυκλοφορούμενο<br>Τυρόγαλο | 6046,8               | 300,58     | 1,013        | 2043                   | 7,211                    | 76,02             |
| 10            | Βιοαέριο                      | 272,7                | 308,15     | 1,038        | -201964                | 203,721                  | 1387,21           |
| 11            | Βιοαέριο                      | 272,7                | 317,53     | 1,163        | -201617                | 203,886                  | 1388,04           |
| 12            | Αέρας                         | 2724,7               | 298,15     | 1,013        | -4713                  | 199,13                   | 0                 |
| 13            | Αέρας                         | 2724,7               | 312,15     | 1,163        | -4302                  | 199,328                  | 9,27              |
| 14            | Καυσαέρια                     | 2997,4               | 1569,33    | 1,163        | -24627                 | 257,132                  | 852,78            |
| 15            | Καυσαέρια                     | 2997,4               | 473,15     | 1,013        | -63967                 | 216,156                  | 60,76             |
| 16            | Ατμός                         | 1760,1               | 453,1      | 10,013       | 50044                  | 118,647                  | 401,55            |
| 17            | Συμπυκνώματα                  | 1760,1               | 375,15     | 10,013       | 7714                   | 23,938                   | 19,1              |
| 18            | Ατμός                         | 66,8                 | 416,89     | 4,013        | 49339                  | 124,224                  | 12,8              |
| 19            | Συμπυκνώματα                  | 66,8                 | 375,15     | 1,088        | 7702                   | 23,951                   | 0,71              |
| 20            | Ζεστό Νερό                    | 4985                 | 343,15     | 2,513        | 5282                   | 17,202                   | 21,56             |
| 21            | Ζεστό Νερό                    | 4985                 | 335,78     | 1,013        | 4724                   | 15,566                   | 16,15             |
| 22            | Ατμός                         | 1626,5               | 453,1      | 10,013       | 50044                  | 118,647                  | 371,07            |
| 23            | Συμπυκνώματα                  | 1138,6               | 375,12     | 1,088        | 7700                   | 23,946                   | 12,07             |
| 24            | Συμπυκνώματα                  | 1760,1               | 375,12     | 1,088        | 7700                   | 23,946                   | 18,66             |
| 25            | Ατμός                         | 66,8                 | 375,12     | 1,088        | 48262                  | 132,075                  | 9,28              |
| 26            | Φυσικό Νερό                   | 554,8                | 298,15     | 1,088        | 1889                   | 6,611                    | 0,39              |

\*Αναφέρεται στο μίγμα του ανεπεξέργαστου και του ανακυκλοφορούμενου τυρόγαλου, τα οποία αντιστοιχούν στις ροές 3 και 7.

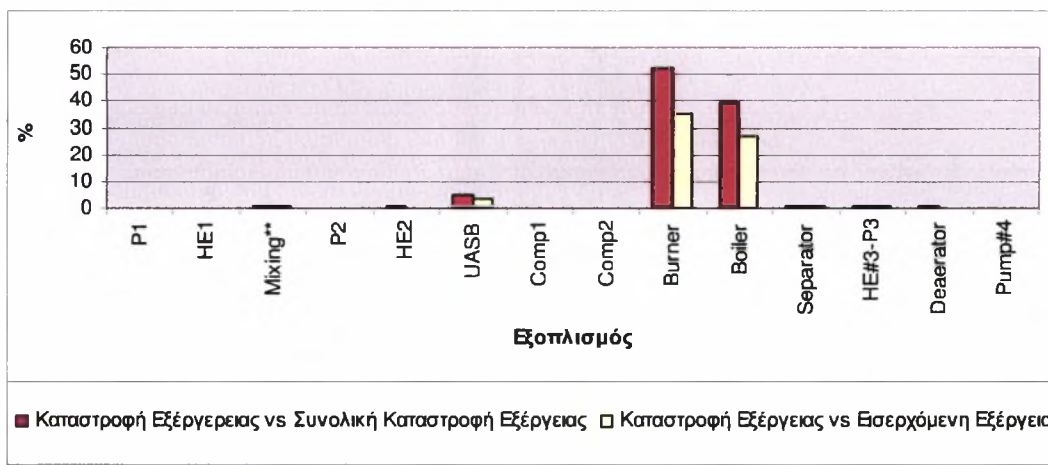
Πίνακας 5-1: Κατάσταση ρευστού, παροχή μάζας, θερμοκρασία, πίεση, ενθαλπία, εντροπία και συνολική εξέργεια σε κάθε κατάσταση του συστήματος.

| No        | Εξοπλισμός                                  | Εξεργειακές<br>Απώλειες<br>(kW) | Εξεργειακός<br>Βαθμός<br>Απόδοσης, ε<br>(%) | Καταστροφή<br>εξέργειας σε<br>σχέση με τις<br>συνολική<br>καταστροφή<br>εξέργειας<br>(%) | Καταστροφή<br>εξέργειας σε<br>σχέση με την<br>εισερχόμενη<br>εξέργεια<br>(%) |
|-----------|---------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1         | Αντλία#1                                    | 0,2                             | 31,42                                       | 0,02                                                                                     | 0,01                                                                         |
| 2         | Εναλλάκτης<br>Θερμότητας#1                  | 0,99                            | 8,91                                        | 0,09                                                                                     | 0,06                                                                         |
| 3         | Ανάμιξη**                                   | 10,46                           | 99,34                                       | 1                                                                                        | 0,68                                                                         |
| 4         | Αντλία#2                                    | 0,31                            | 44,92                                       | 0,03                                                                                     | 0,02                                                                         |
| 5         | Εναλλάκτης<br>Θερμότητας #2                 | 4,25                            | 21,42                                       | 0,41                                                                                     | 0,28                                                                         |
| 6         | Αντιδραστήρες<br>UASB                       | 53,03                           | 96,65                                       | 5,07                                                                                     | 3,44                                                                         |
| 7         | Συμπιεστής<br>Βιοαερίου                     | 0,14                            | 85,88                                       | 0,01                                                                                     | 0,01                                                                         |
| 8         | Συμπιεστής Αέρα                             | 1,56                            | 85,62                                       | 0,15                                                                                     | 0,1                                                                          |
| 9         | Καυστήρας                                   | 544,53                          | 61,03                                       | 52,1                                                                                     | 35,35                                                                        |
| 10        | Ατμολέβητας                                 | 409,57                          | 48,29                                       | 39,19                                                                                    | 26,59                                                                        |
| 11        | Διαχωριστής<br>Ατμού                        | 8,4                             | 97,91                                       | 0,8                                                                                      | 0,55                                                                         |
| 12        | Εναλλάκτης<br>Θερμότητας #3 και<br>Αντλία#3 | 7,26                            | 42,69                                       | 0,69                                                                                     | 0,47                                                                         |
| 13        | Απαεριωτής                                  | 3,78                            | 83,14                                       | 0,36                                                                                     | 0,25                                                                         |
| 14        | Αντλία#4                                    | 0,67                            | 39,8                                        | 0,06                                                                                     | 0,04                                                                         |
| <b>15</b> | <b>ΣΥΣΤΗΜΑ</b>                              | <b>1045,15</b>                  | <b>23,30</b>                                | <b>100</b>                                                                               | <b>67,84</b>                                                                 |

\*\* Αναφέρεται στην ανάμιξη του ανεπεξέργαστου με το ανακυκλοφορούμενο τυρόγαλο από τις καταστάσεις 3 και 7 αντίστοιχα.

Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα των εξεργειακών απωλειών και του εξεργειακού βαθμού απόδοσης του εξοπλισμού του συστήματος, καθώς και του λόγου των εξεργειακών απωλειών του εξοπλισμού σε σχέση με τις συνολικές απώλειες και σε σχέση με την εισερχόμενη εξέργεια.





Σχήμα 5-1: Εξεργειακές απώλειες στα διάφορα τμήματα του εξοπλισμού σε σχέση με την συνολική εξέργεια και με την εισερχόμενη εξέργεια.

Στη συνέχεια εξετάζονται τρία σενάρια ως προς την βελτίωση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης:

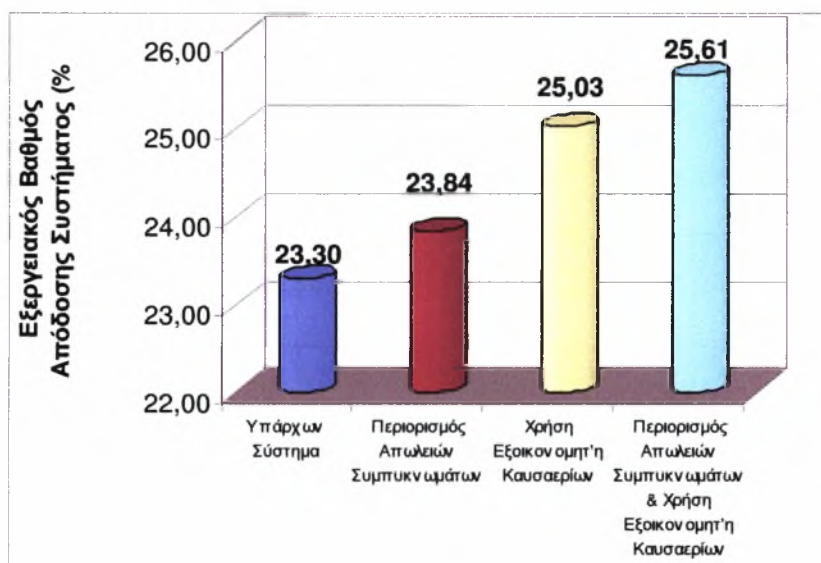
Το πρώτο σενάριο αφορά τον περιορισμό των απωλειών ατμού και συμπυκνωμάτων εντός του εργοστασίου, έτσι ώστε οι απώλειες να είναι το 5% αντί για 30% της ποσότητας ατμού που διανέμεται στο εργοστάσιο. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος να βελτιώνονταν στο 23,84%.

Το δεύτερο σενάριο αφορά την χρήση εξοικονομητή καυσαερίων στην έξοδο τους από τον ατμολέβητα, έτσι ώστε η θερμοκρασία απόρριψης των καυσαερίων στο περιβάλλον να ισούται με 110°C αντί για 200°C, και η επιπλέον θερμότητα να χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του νερού εισόδου στον ατμολέβητα. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος να ανέλθει στο 25,03%. Η θερμοκρασίες εξόδου των καυσαερίων δεν πρέπει να πέσει κάτω από τους 110°C, αφού στο βιοαέριο

υπάρχουν ίχνη  $H_2S$ , τα οποία κατά την καύση μετατρέπονται σε  $H_2SO_4$ , το οποίο υγροποιείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες των  $110^{\circ}C$  και διαβρώνει τα μέταλλα.

Το τρίτο σενάριο αφορά τον συνδυασμό των βελτιώσεων που περιγράφηκαν στα δύο πρώτα σενάρια. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης να βελτιωθεί στο 25,61%.

Οι εξεργειακοί βαθμοί απόδοσης για το υπάρχων σύστημα και για τα τρία προτεινόμενα σενάρια απεικονίζονται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5-2: Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης για το υπάρχων σύστημα και για τα τρία προτεινόμενα σενάρια

## 5.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

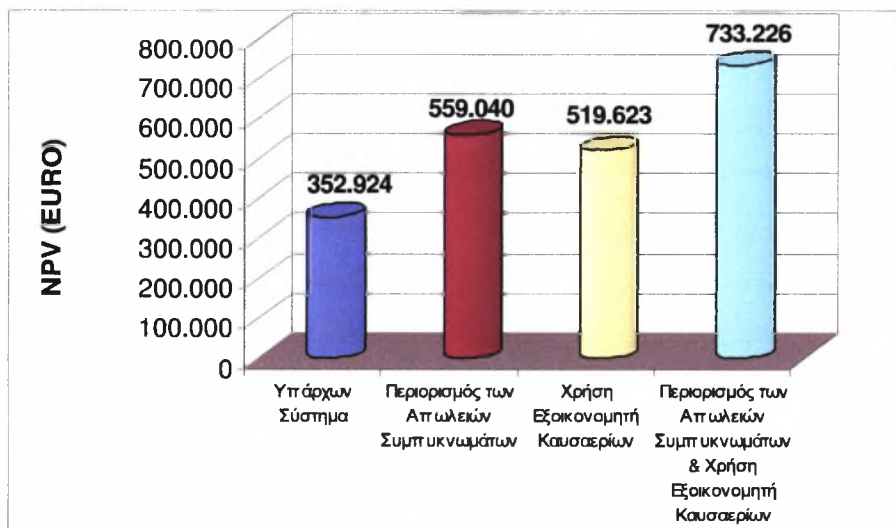
Τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης συνοψίζονται στον Πίνακα 5.3, όπου υπολογίζεται και η *NPV*. Στον πίνακα απεικονίζονται σε ετήσια βάση τα έσοδα που προέρχονται από την εξοικονόμηση σε φυσικό αέριο καθώς και τα έξοδα: λειτουργικά,

συντήρησης και δόσεις του δανείου. Οι δόσεις περιορίζονται σε χρονική διάρκεια 10 ετών αφού τέτοια ορίστηκε η περίοδος αποπληρωμής του δανείου. Τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι η αναερόβια επεξεργασία τυρόγαλου είναι μια βιώσιμη και κερδοφόρα επένδυση για την επιχείρηση.

| Έτος | Ημερολογιακό Έτος | Έξοδα             |           |                    |                     |        |       |         | Έσοδα     | Χρηματοροή | Χρηματοροή Αναγόμενη σε Παρούσες Τιμές |
|------|-------------------|-------------------|-----------|--------------------|---------------------|--------|-------|---------|-----------|------------|----------------------------------------|
|      |                   | Λειτουργικά Έξοδα |           |                    | Έξοδα Συντήρησης    |        |       |         |           |            |                                        |
|      |                   | Εργατικά Κόστη    | Αναλώσιμα | Ηλεκτρική Ενέργεια | Αντλίες- Συμπιεστές | Όργανα | Λοιπά | Δόσεις  |           |            |                                        |
| 0    | 2009              |                   |           |                    |                     |        |       |         |           | -2.069.000 | -2.069.000                             |
| 1    | 2010              | 70.000            | 53.000    | 7.442              | 6.320               | 1.000  | 4.610 | 294.579 | 306.333   | -130.618   | -124.398                               |
| 2    | 2011              | 72.100            | 54.590    | 7.963              | 6.510               | 1.030  | 4.748 | 294.579 | 327.776   | -113.744   | -103.169                               |
| 3    | 2012              | 74.263            | 56.228    | 8.520              | 6.705               | 1.061  | 4.891 | 294.579 | 350.721   | -95.526    | -82.519                                |
| 4    | 2013              | 76.491            | 57.915    | 9.117              | 6.906               | 1.093  | 5.037 | 294.579 | 375.271   | -75.866    | -62.415                                |
| 5    | 2014              | 78.786            | 59.652    | 9.755              | 7.113               | 1.126  | 5.189 | 294.579 | 401.540   | -54.659    | -42.827                                |
| 6    | 2015              | 81.149            | 61.442    | 10.438             | 7.327               | 1.159  | 5.344 | 294.579 | 429.648   | -31.790    | -23.722                                |
| 7    | 2016              | 83.584            | 63.285    | 11.168             | 7.546               | 1.194  | 5.505 | 294.579 | 459.723   | -7.138     | -5.073                                 |
| 8    | 2017              | 86.091            | 65.183    | 11.950             | 7.773               | 1.230  | 5.670 | 294.579 | 491.904   | 19.428     | 13.149                                 |
| 9    | 2018              | 88.674            | 67.139    | 12.787             | 8.006               | 1.267  | 5.840 | 294.579 | 526.337   | 48.046     | 30.971                                 |
| 10   | 2019              | 91.334            | 69.153    | 13.682             | 8.246               | 1.305  | 6.015 | 294.579 | 563.181   | 78.867     | 48.417                                 |
| 11   | 2020              | 94.074            | 71.228    | 14.640             | 8.494               | 1.344  | 6.195 |         | 602.603   | 406.629    | 237.748                                |
| 12   | 2021              | 96.896            | 73.364    | 15.664             | 8.748               | 1.384  | 6.381 |         | 644.786   | 442.347    | 246.315                                |
| 13   | 2022              | 99.803            | 75.565    | 16.761             | 9.011               | 1.426  | 6.573 |         | 689.921   | 480.782    | 254.969                                |
| 14   | 2023              | 102.797           | 77.832    | 17.934             | 9.281               | 1.469  | 6.770 |         | 738.215   | 522.132    | 263.712                                |
| 15   | 2024              | 105.881           | 80.167    | 19.189             | 9.560               | 1.513  | 6.973 |         | 789.890   | 566.607    | 272.548                                |
| 16   | 2025              | 109.058           | 82.572    | 20.533             | 9.846               | 1.558  | 7.182 |         | 845.182   | 614.433    | 281.479                                |
| 17   | 2026              | 112.329           | 85.049    | 21.970             | 10.142              | 1.605  | 7.398 |         | 904.345   | 665.852    | 290.509                                |
| 18   | 2027              | 115.699           | 87.601    | 23.508             | 10.446              | 1.653  | 7.620 |         | 967.649   | 721.123    | 299.641                                |
| 19   | 2028              | 119.170           | 90.229    | 25.153             | 10.759              | 1.702  | 7.848 |         | 1.035.385 | 780.522    | 308.879                                |
| 20   | 2029              | 122.745           | 92.936    | 26.914             | 11.082              | 1.754  | 8.084 |         | 1.107.862 | 844.347    | 318.225                                |
|      |                   |                   |           |                    |                     |        |       |         |           | <b>NPV</b> | <b>353.440</b>                         |

Πίνακας 5-3: Υπολογισμός Χρηματοροών και Καθαρής Παρούσας Αξίας

Οι μεταβολές της NPV για τα τρία προτεινόμενα σενάρια όπως αυτά περιγράφηκαν στα αποτελέσματα της εξεργειακής ανάλυσης, απεικονίζονται στο Σχήμα 5.3. Ο περιορισμός των απωλειών συμπτκνωμάτων που επιστρέφουν από το εργοστάσιο έχει κόστος επένδυσης ίσο με 20.000€, ενώ και το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του εξοικονομητή καυσασερίων ανέρχεται στα 20.000€.



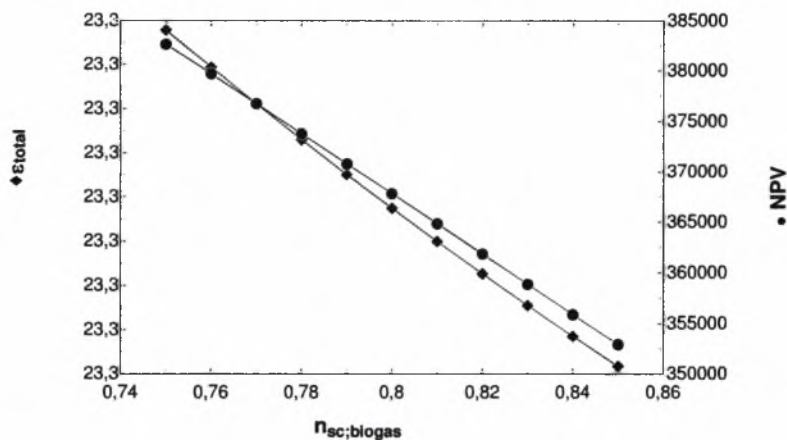
Σχήμα 5-3: Καθαρή Παρούσα Αξία του υπάρχοντος συστήματος και των τριών προτεινόμενων σεναρίων

### 5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.1 οι τιμές ορισμένων μεταβλητών είτε δεν είναι σταθερές είτε άγνωστες, είτε μπορούν να μεταβληθούν. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί η επίδραση των μεταβλητών αυτών στον εξεργειακό βαθμό απόδοσης του συστήματος που συμβολίζεται με  $\epsilon_{total}$  και στην  $NPV$  της επένδυσης για διάφορες τιμές τους, εντός κάποιων ορίων. Η μεταβλητή της οποίας η επίδραση δεν εξετάζεται είναι οι απώλειες θερμότητας του θαλάμου καύσης.

#### 5.3.1 Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή βιοαερίου

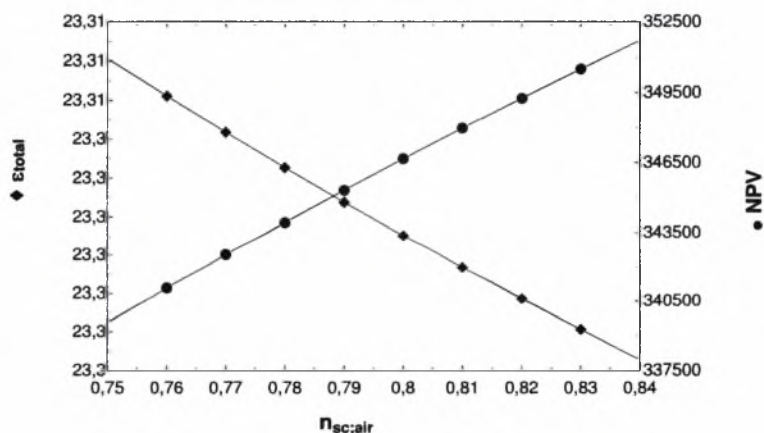
Η τιμή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή βιοαερίου μπορεί να κυμαίνεται από 75-85%. Στο εξεταζόμενο σύστημα η τιμή του λήφθηκε ίσος προς 85%. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.4 τόσο ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος όσο και η  $NPV$  μειώνονται με την αύξηση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή.



Σχήμα 5-4: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή βιοαερίου.

### 5.3.2 Ισεντροπικός βαθμός απόδοσης συμπιεστή αέρα

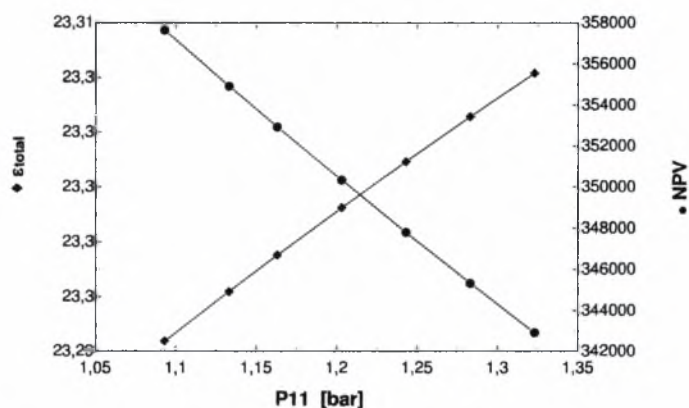
Η τιμή του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή αέρα, η οποία επίσης είναι άγνωστη και λήφθηκε ίση προς 85%, μπορεί να κυμαίνεται από 75-85%. Από το Σχήμα 5.5 φαίνεται ότι ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος μειώνεται με την αύξηση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή, ενώ αντίθετα η NPV αυξάνει.



Σχήμα 5-5: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπιεστή αέρα.

### 5.3.3 Πίεση εξόδου βιοαερίου από τον συμπιεστή

Η πίεση εξόδου του βιοαερίου από τον συμπιεστή μπορεί να κυμαίνεται από 1,193-1,313mbar, ενώ η τιμή ρύθμισης της είναι 150 mbar. Η ρύθμιση επιτυγχάνεται με τη χρήση πιεζοστάτη στην κατάθλιψη του συμπιεστή και την κίνηση του συμπιεστή μέσω ρυθμιστή στροφών-inverter. Από τη γραφική παράσταση που φαίνεται στο Σχήμα 5.6 φαίνεται ότι ενώ ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης αυξάνει με την αύξηση της πίεσης κατάθλιψης, η NPV μειώνεται.

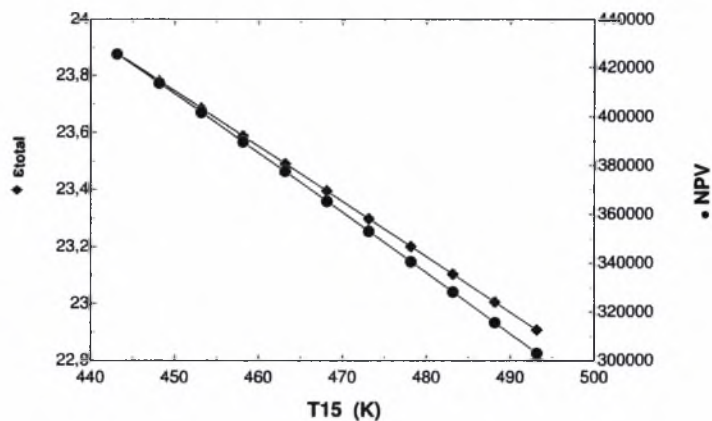


Σχήμα 5-6: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με την πίεση εξόδου του βιοαερίου από τον συμπιεστή.

### 5.3.4 Θερμοκρασία απόρριψης καυσαερίων στο περιβάλλον

Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον θάλαμο καύσης και απόρριψής τους στο περιβάλλον μπορεί να κυμαίνεται από 180-220°C. ενώ όπως αναφέρθηκε για τους υπολογισμούς λήφθηκε ίση προς 200°C. Από το Σχήμα 5.7 φαίνεται ότι και ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης και η NPV μειώνονται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων, η οποία μεταφράζεται σε εξεργειακές απώλειες.

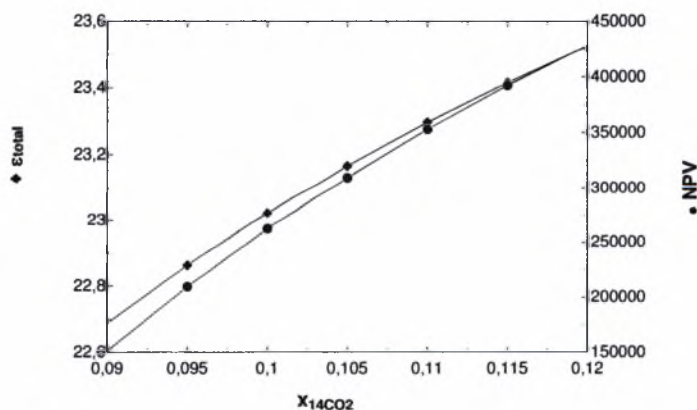




Σχήμα 5-7: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με την θερμοκρασία απόρριψης των καυσαερίων στο περιβάλλον.

### 5.3.5 Ποσοστό περιεκτικότητας ξηρών καυσαερίων σε CO<sub>2</sub>.

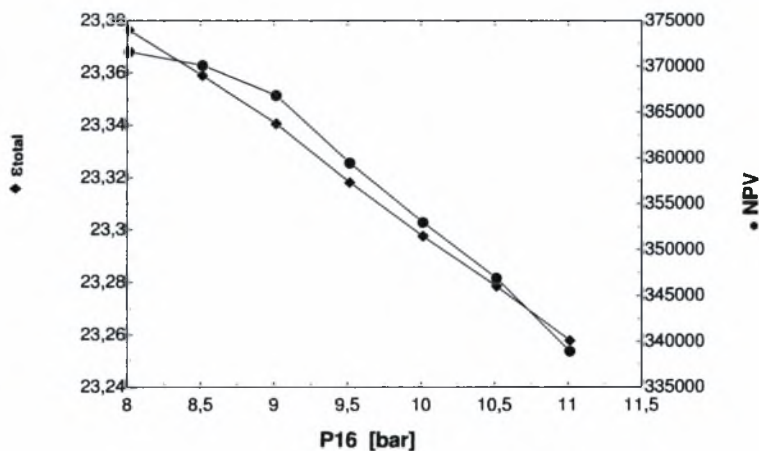
Το ποσοστό περιεκτικότητας των ξηρών καυσαερίων, δηλαδή χωρίς να υπολογίζεται το περιεχόμενο των υδρατμών στα καυσαέρια, μπορεί να κυμαίνεται από 9-12%, ενώ για του υπολογισμούς λήφθηκε ίσο προς 11%. Από τη γραφική παράσταση του σχήματος 5.8 φαίνεται ότι όσο αυξάνει η περιεκτικότητα των καυσαερίων σε CO<sub>2</sub> ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης και η NPV αυξάνουν.



Σχήμα 5-8: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με την περιεκτικότητα των καυσαερίων σε CO<sub>2</sub>.

### 5.3.6 Πίεση παραγωγής ατμού στον ατμολέβητα

Η πίεση λειτουργίας του ατμολέβητα, η οποία είναι η πίεση του παραγόμενου ατμού, καθορίζεται από την ελάχιστη δυνατή αποδεκτή από το εργοστάσιο πίεση που πρέπει να έχει ο ατμός και από τη μέγιστη δυνατή πίεση λειτουργίας του ατμολέβητα. Έτσι, το εύρος της πίεσης του παραγόμενου ατμού κυμαίνεται από 8,013-11,013bar, μιας και η ελάχιστη σχετική πίεση που πρέπει να έχει ο ατμός στο εργοστάσιο είναι 7bar και η μέγιστη πίεση λειτουργίας του ατμολέβητα είναι 10bar. Η πίεση του παραγόμενου ατμού έχει ρυθμιστεί στα 10,013bar. Από το Σχήμα 5.9 φαίνεται ότι εξεργειακός βαθμός απόδοσης και η NPV γίνονται μέγιστα για την ελάχιστη δυνατή πίεση λειτουργίας του ατμολέβητα.



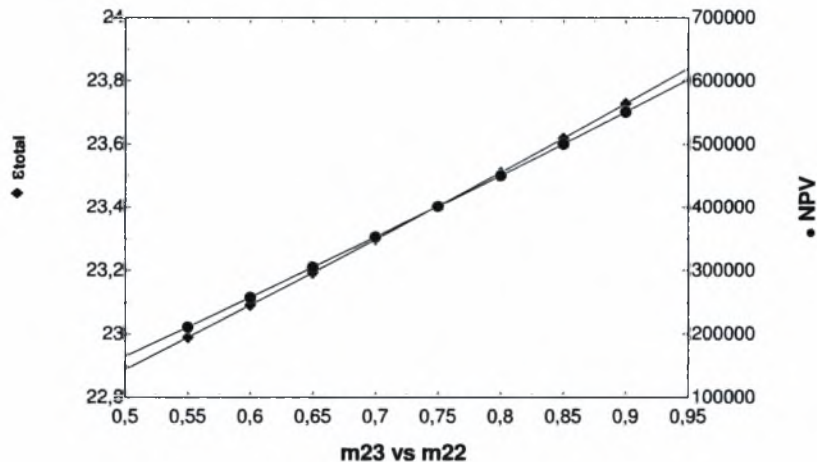
Σχήμα 5-9: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με την πίεση του παραγόμενου ατμού στον ατμολέβητα.

### 5.3.7 Ποσότητα των συμπυκνωμάτων που επιστρέφουν από το εργοστάσιο

Η ποσότητα των συμπυκνωμάτων που επιστρέφουν από το εργοστάσιο εξαρτάται από τις απώλειες ατμού και συμπυκνωμάτων εντός του εργοστασίου και μπορεί, αναλόγως και το αν γίνεται απευθείας έγχυση του ατμού, να κυμαίνεται από 50-95% σε σχέση με την



ποσότητα του ατμού που διανέμεται στο εργοστάσιο. Στους υπολογισμούς οι απώλειες εκτιμώνται κατά μέση τιμή στο 30% του παραγόμενου ατμού. Το Σχήμα 5.10 δείχνει ότι μεγαλύτερο ποσοστό επιστρεφόμενων συμπυκνωμάτων συνεπάγεται μεγαλύτερο εξεργειακό βαθμό απόδοσης και NPV.



Σχήμα 5-10: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και NPV σε σχέση με το ποσοστό επιστροφής των συμπυκνωμάτων από το εργοστάσιο.

## 5.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται βελτιστοποίηση είτε ως προς τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης του συστήματος είτε ως προς την NPV. Η βελτιστοποίηση μπορεί να γίνει σε σχέση με δύο ή περισσότερες μεταβλητών που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5.3. Αρχικά υπολογίζεται ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης ή η NPV σε σχέση με ένα πλήθος από ζεύγη τιμών των μεταβλητών ώστε να εντοπιστεί η περιοχή στην οποία εμφανίζεται η βέλτιστη τιμή. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του προγράμματος Engineering Equation Solver και

υποθέτοντας τιμές μεταβλητών στην περιοχή όπου υπάρχει το ολικό βέλτιστο βελτιστοποιείται το ζητούμενο μέγεθος.

Έτσι, στην περίπτωση βελτιστοποίησης σε σχέση με την πίεση παραγωγής ατμού και την περιεκτικότητα των ξηρών καυσαερίων σε CO<sub>2</sub>, το εύρος τιμών της πίεση του παραγόμενου ατμού είναι 8,013-11,013bar, ενώ το εύρος τιμών της περιεκτικότητας των ξηρών καυσαερίων, δηλαδή μετά την απομάκρυνση των υδρατμών, σε CO<sub>2</sub>, είναι 9-12%. Γι' αυτό το εύρος τιμών σχηματίζουμε τον Πίνακα 5.4.

| <b>Πίεση<br/>Παραγόμενου<br/>Ατμού<br/>P16 (bar)</b> | <b>Περιεκτικότητα<br/>Ξηρών<br/>Καυσαερίων σε<br/>CO<sub>2</sub> (%)</b> | <b>Εξεργειακός<br/>Βαθμός<br/>Απόδοσης<br/>Συστήματος<br/><math>\epsilon_{total}</math> (%)</b> | <b>Καθαρή<br/>Παρούσα Αξία<br/>NPV(€)</b> |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 8,013                                                | 9,00                                                                     | 22,765                                                                                          | 169.234                                   |
| 8,013                                                | 10,00                                                                    | 23,101                                                                                          | 280.552                                   |
| 8,013                                                | 11,00                                                                    | 23,376                                                                                          | 371.574                                   |
| 8,013                                                | 12,00                                                                    | 23,606                                                                                          | 447.387                                   |
| 9,013                                                | 9,00                                                                     | 22,730                                                                                          | 164.878                                   |
| 9,013                                                | 10,00                                                                    | 23,066                                                                                          | 275.970                                   |
| 9,013                                                | 11,00                                                                    | 23,341                                                                                          | 366.808                                   |
| 9,013                                                | 12,00                                                                    | 23,570                                                                                          | 442.467                                   |
| 10,013                                               | 9,00                                                                     | 22,688                                                                                          | 151.292                                   |
| 10,013                                               | 10,00                                                                    | 23,023                                                                                          | 262.221                                   |
| 10,013                                               | 11,00                                                                    | 23,298                                                                                          | 352.924                                   |
| 10,013                                               | 12,00                                                                    | 23,526                                                                                          | 428.471                                   |
| 11,013                                               | 9,00                                                                     | 22,649                                                                                          | 137.530                                   |
| 11,013                                               | 10,00                                                                    | 22,984                                                                                          | 248.329                                   |
| 11,013                                               | 11,00                                                                    | 23,258                                                                                          | 338.926                                   |
| 11,013                                               | 12,00                                                                    | 23,486                                                                                          | 414.386                                   |

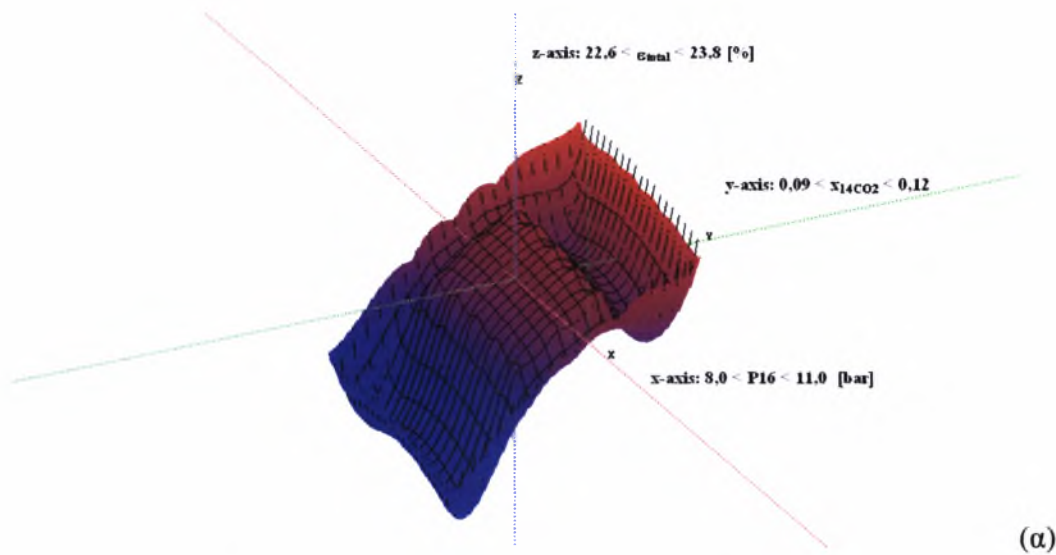
Πίνακας 5-4: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και Καθαρή Παρούσα Αξία για διάφορες τιμές πίεσης παραγόμενου ατμού και ισεντροπικού βαθμού απόδοσης συμπιεστή αέρα

Από τον πίνακα φαίνεται ότι τόσο ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης όσο και η NPV γίνονται μέγιστα για χαμηλές τιμές της πίεσης P16 και υψηλές τιμές της περιεκτικότητας  $X_{14,CO_2}$ , κάτι που φαίνεται ακόμη καλύτερα στο Πίνακα 5-5.

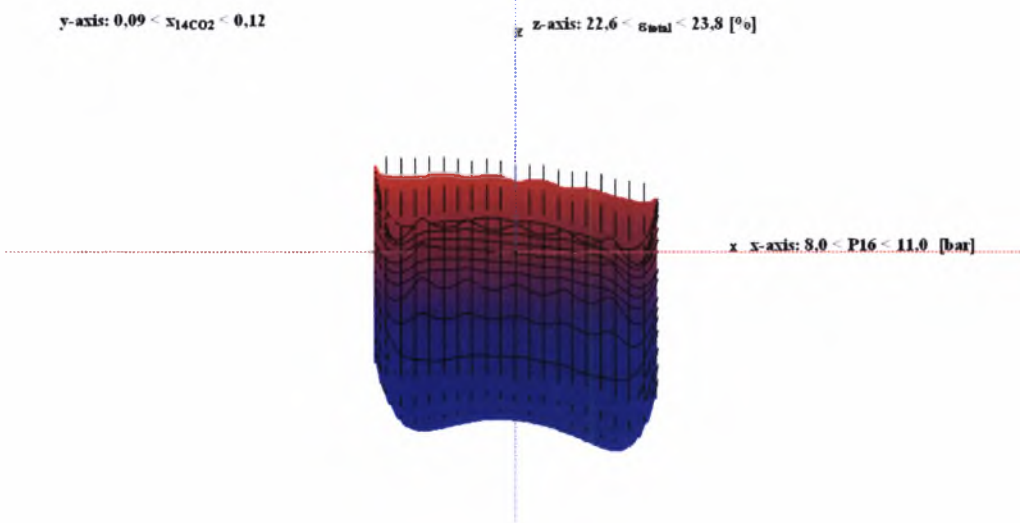
| <b>Πίεση<br/>Παραγόμενου<br/>Ατμού<br/>P16 (bar)</b> | <b>Περιεκτικότητα<br/>Ξηρών<br/>Καυσαερίων σε<br/>CO<sub>2</sub> (%)</b> | <b>Εξεργειακός<br/>Βαθμός Απόδοσης<br/>Συστήματος<br/><math>\epsilon_{total}</math> (%)</b> | <b>Καθαρή Παρούσα<br/>Αξία<br/>NPV(€)</b> |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 8,013                                                | 11,00                                                                    | 23,376                                                                                      | 371.574                                   |
| 8,013                                                | 11,25                                                                    | 23,438                                                                                      | 391.795                                   |
| 8,013                                                | 11,50                                                                    | 23,496                                                                                      | 411.133                                   |
| 8,013                                                | 11,75                                                                    | 23,552                                                                                      | 429.647                                   |
| 8,013                                                | 12,00                                                                    | 23,606                                                                                      | 447.387                                   |
| 8,263                                                | 11,00                                                                    | 23,367                                                                                      | 370.781                                   |
| 8,263                                                | 11,25                                                                    | 23,429                                                                                      | 390.991                                   |
| 8,263                                                | 11,50                                                                    | 23,487                                                                                      | 410.321                                   |
| 8,263                                                | 11,75                                                                    | 23,543                                                                                      | 428.825                                   |
| 8,263                                                | 12,00                                                                    | 23,597                                                                                      | 446.557                                   |
| 8,513                                                | 11,00                                                                    | 23,359                                                                                      | 370.096                                   |
| 8,513                                                | 11,25                                                                    | 23,420                                                                                      | 390.297                                   |
| 8,513                                                | 11,50                                                                    | 23,479                                                                                      | 409.616                                   |
| 8,513                                                | 11,75                                                                    | 23,535                                                                                      | 428.111                                   |

Πίνακας 5-5: Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος και Καθαρή Παρούσα Αξία για διάφορες τιμές πίεσης παραγόμενου ατμού και θερμοκρασίας εξόδου καυσαερίων προς το περιβάλλον

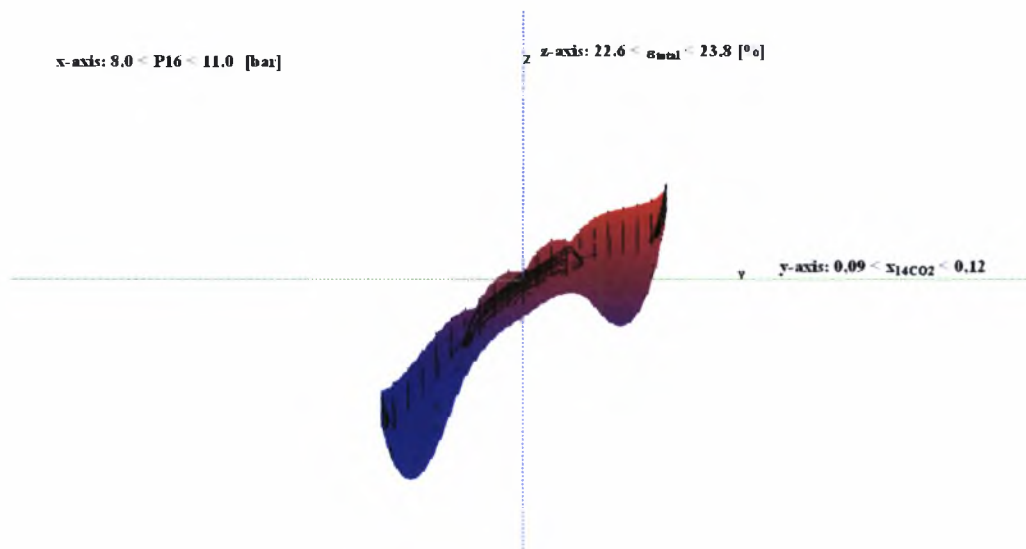
Η τρισδιάστατη απεικόνιση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης και της NPV ως προς την πίεση P16 και την περιεκτικότητα  $X_{14,CO_2}$ , οι οποίες φαίνονται στα Σχήματα 5-11 και 5-12 αντίστοιχα δείχνουν το ίδιο αποτέλεσμα.



(α)

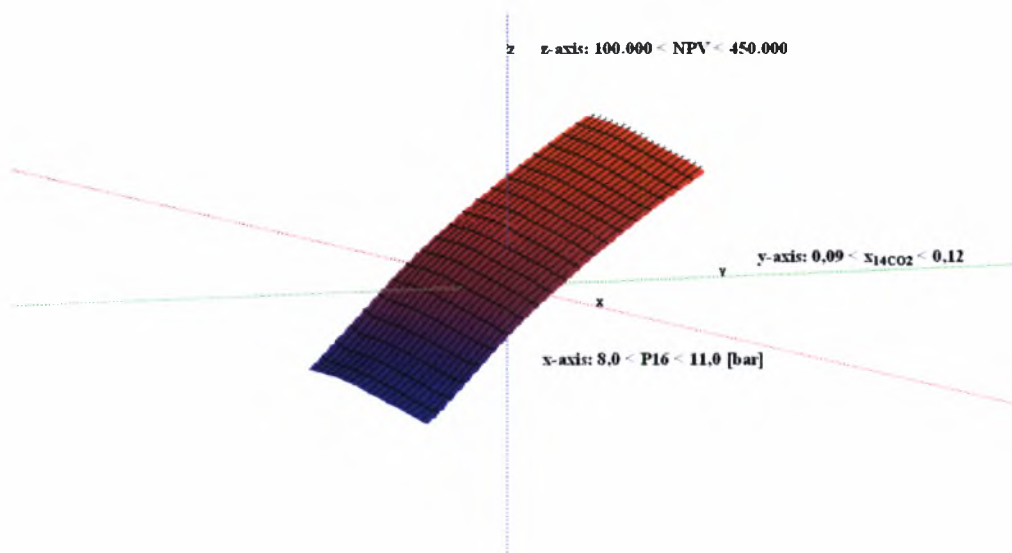


(β)

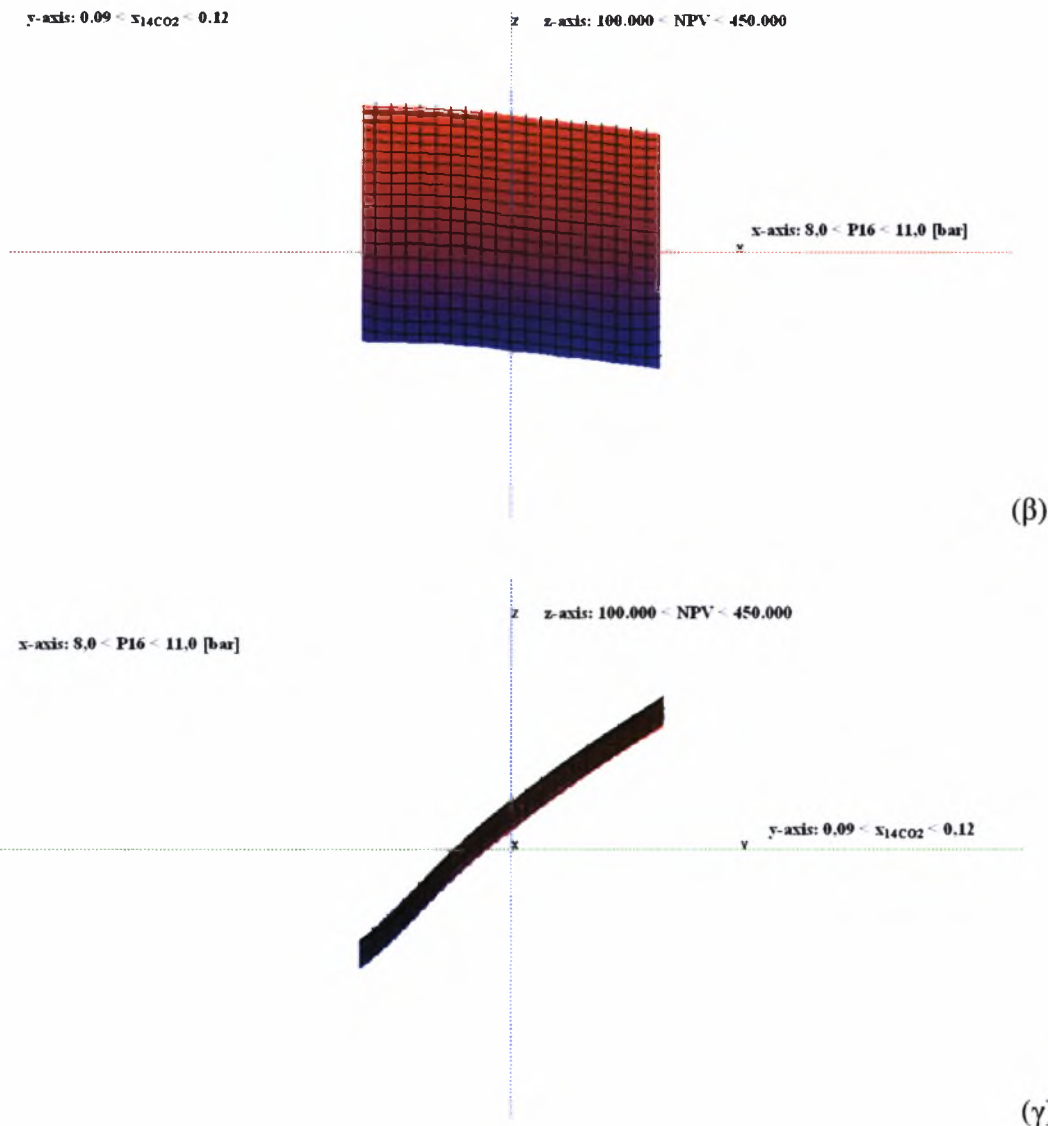


(γ)

Σχήμα 5-11 (α), (β), (γ): Εξεργειακός βαθμός απόδοσης συστήματος σε σχέση με την πίεση  $P_{16}$  και την περιεκτικότητα  $X_{14CO_2}$ .



(α)



Σχήμα 5-12: Καθαρή Παρούσα Αξία σε σχέση με την πίεση P16 και την περιεκτικότητα  $X_{14,CO_2}$ .

Η βελτιστοποίηση και ως προς τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης και ως προς την NPV δίνει τις ίδιες τιμές  $P16=8,013\text{bar}$  και  $X_{14,CO_2}=12\%$ , για τις οποίες  $\epsilon_{total}=23,606\%$  και  $NPV=447.387\text{€}$ .

Ακολουθώντας την διαδικασία αυτή σχηματίζονται ο Πίνακας 5-6, στον οποίο φαίνεται ο μέγιστος εξεργειακός βαθμός απόδοσης και ο Πίνακας 5-7, στον οποίο φαίνεται η μέγιστη NPV για διάφορους συνδυασμούς μεταβλητών, καθώς και οι τιμές των μεταβλητών για τις οποίες βελτιστοποιείται το ζητούμενο μέγεθος.

| Περίπτωση | Μεταβλητές                                                    | Τιμή μεταβλητής που μεγιστοποιεί τον $\epsilon_{total}$ | $\epsilon_{total}$ (%) |
|-----------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|
| 1         | P16, $X_{14,CO_2}$                                            | P16 = 8,013 bar                                         | 23,606                 |
|           |                                                               | $X_{14,CO_2} = 12\%$                                    |                        |
| 2         | P16, T15                                                      | P16 = 8,013 bar                                         | 23,765                 |
|           |                                                               | T15 = 453,15 K                                          |                        |
| 3         | P16, $n_{sc,air}$                                             | P16 = 8,013 bar                                         | 23,385                 |
|           |                                                               | $n_{sc,air} = 75\%$                                     |                        |
| 4         | T15, $X_{14,CO_2}$                                            | T15 = 453,15 K                                          | 23,887                 |
|           |                                                               | $X_{14,CO_2} = 12\%$                                    |                        |
| 5         | T15, P11                                                      | T15 = 453,15 K                                          | 23,691                 |
|           |                                                               | P11 = 1,313 bar                                         |                        |
| 6         | $n_{sc,air}$ , $n_{sc,biogas}$                                | $n_{sc,air} = 75\%$                                     | 23,307                 |
|           |                                                               | $n_{sc,biogas} = 75\%$                                  |                        |
| 7         | P16, $X_{14,CO_2}$ , P11                                      | P16 = 8,013 bar                                         | 23,612                 |
|           |                                                               | $X_{14,CO_2} = 12\%$                                    |                        |
|           |                                                               | P11 = 1,313 bar                                         |                        |
| 8         | P16, $X_{14,CO_2}$ , P11, $n_{sc,air}$                        | P16 = 8,013 bar                                         | 23,620                 |
|           |                                                               | $X_{14,CO_2} = 12\%$                                    |                        |
|           |                                                               | P11 = 1,313 bar                                         |                        |
|           |                                                               | $n_{sc,air} = 75\%$                                     |                        |
| 9         | P16, $X_{14,CO_2}$ , P11, T15, $n_{sc,air}$ , $n_{sc,biogas}$ | P16 = 8,013 bar                                         | 23,982                 |
|           |                                                               | $X_{14,CO_2} = 12\%$                                    |                        |
|           |                                                               | P11 = 1,313 bar                                         |                        |
|           |                                                               | T15 = 453,15 K                                          |                        |
|           |                                                               | $n_{sc,air} = 75\%$                                     |                        |
|           |                                                               | $n_{sc,biogas} = 75\%$                                  |                        |

Πίνακας 5-6: Βελτιστοποίηση εξεργειακού βαθμού απόδοσης του συστήματος για διάφορους συνδυασμούς μεταβλητών, και τιμές μεταβλητών που τον βελτιστοποιούν

| Περίπτωση | Μεταβλητές                                                                        | Τιμή μεταβλητής που μεγιστοποιεί την NPV | NPV (€) |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------|
| 1         | P16, X <sub>14,CO2</sub>                                                          | P16 = 8,013 bar                          | 447.387 |
|           |                                                                                   | X <sub>14,CO2</sub> = 12%                |         |
| 2         | P16, T15                                                                          | P16 = 8,013 bar                          | 420.487 |
|           |                                                                                   | T15 = 453,15 K                           |         |
| 3         | P16, n <sub>sc,air</sub>                                                          | P16 = 8,013 bar                          | 371.574 |
|           |                                                                                   | n <sub>sc,air</sub> = 85%                |         |
| 4         | T15, X <sub>14,CO2</sub>                                                          | T15 = 453,15 K                           | 468.479 |
|           |                                                                                   | X <sub>14,CO2</sub> = 12%                |         |
| 5         | T15, P11                                                                          | T15 = 453,15 K                           | 406.362 |
|           |                                                                                   | P11 = 1,093 bar                          |         |
| 6         | n <sub>sc,air</sub> , n <sub>sc,biogas</sub>                                      | n <sub>sc,air</sub> = 85%                | 382.677 |
|           |                                                                                   | n <sub>sc,biogas</sub> = 75%             |         |
| 7         | P16, X <sub>14,CO2</sub> , P11                                                    | P16 = 8,013 bar                          | 452.110 |
|           |                                                                                   | X <sub>14,CO2</sub> = 12%                |         |
|           |                                                                                   | P11 = 1,093 bar                          |         |
| 8         | P16, X <sub>14,CO2</sub> , P11, n <sub>sc,air</sub>                               | P16 = 8,013 bar                          | 452.110 |
|           |                                                                                   | X <sub>14,CO2</sub> = 12%                |         |
|           |                                                                                   | P11 = 1,093 bar                          |         |
|           |                                                                                   | n <sub>sc,air</sub> = 85%                |         |
| 9         | P16, X <sub>14,CO2</sub> , P11, T15, n <sub>sc,air</sub> , n <sub>sc,biogas</sub> | P16 = 8,013 bar                          | 522.700 |
|           |                                                                                   | X <sub>14,CO2</sub> = 12%                |         |
|           |                                                                                   | P11 = 1,093 bar                          |         |
|           |                                                                                   | T15 = 453,15 K                           |         |
|           |                                                                                   | n <sub>sc,air</sub> = 85%                |         |
|           |                                                                                   | n <sub>sc,biogas</sub> = 75%             |         |

Πίνακας 5-7: Βελτιστοποίηση NPV της επένδυσης για διάφορους συνδυασμούς μεταβλητών, και τιμές μεταβλητών που τον βελτιστοποιούν



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι δυσμενείς επιπτώσεις από την ανεξέλεγκτη χρήση των ορυκτών καυσίμων καθιστούν επιτακτική την εξοικονόμηση και αναζήτηση εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Σημαντικό ρόλο προς αυτή την κατεύθυνση μπορούν να παίξουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως και η εκμετάλλευση αυτών που μέχρι σήμερα θεωρούνταν απορρίμματα. Η αξιοποίηση των αποβλήτων-αστικών και βιομηχανικών- μπορεί να βοηθήσει σε μεγάλο βαθμό στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Ιδιαίτερα τα απόβλητα με υψηλό οργανικό φορτίο, όπως είναι το τυρόγαλο που προκύπτει από τις βιομηχανίες γάλακτος, μπορούν να μετατραπούν από σημαντικό πρόβλημα σε σημαντική πηγή εσόδων για τον παραγωγό τους.

Με βάση την εξεργειακή και οικονομική ανάλυση των προηγούμενων κεφαλαίων, είναι φανερό ότι η αναερόβια επεξεργασία του τυρόγαλο είναι μια βιώσιμη επένδυση, η οποία όχι μόνο προσφέρει λύση στο περιβαλλοντικό πρόβλημα διαχείρισης του, αλλά αποφέρει και κέρδος στον παραγωγό του.

Ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος δεν είναι πολύ υψηλός, στην περίπτωση που το παραγόμενο καύσιμο-βιοαέριο προορίζεται για καύση σε ατμολέβητα για την παραγωγή ατμού. Ωστόσο, όπως προέκυψε από τον υπολογισμό της Καθαρής Παρούσας Αξίας της επένδυσης, η αναερόβια επεξεργασία είναι ένας κερδοφόρος τρόπος επεξεργασίας του τυρόγαλου για την εταιρεία, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους επεξεργασίας αποβλήτων όπως η αερόβια μέθοδος η οποία δεν έχει οικονομικό όφελος παρά

μόνο έξοδα, εγκατάστασης και λειτουργικά. Να σημειωθεί ότι η οικονομική ανάλυση για τον υπολογισμό της *NPV* έγινε για την περίπτωση που το συνολικό κόστος της επένδυσης καλύπτεται από τραπεζικό δανεισμό.

Η σχετικά μικρή τιμή του εξεργειακού βαθμού απόδοσης οφείλεται στις μεγάλες εξεργειακές απώλειες που παρατηρούνται στον καυστήρα του βιοαερίου και στον ατμολέβητα. Τα δύο αυτά κομμάτια του εξοπλισμού του συστήματος είναι υπεύθυνα για το 91% περίπου των συνολικών εξεργειακών απωλειών.

Τρία σενάρια προτείνονται για την αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης του συστήματος:

- Το πρώτο αφορά τον περιορισμό των απωλειών ατμού και συμπυκνωμάτων εντός του εργοστάσιου έτσι ώστε να αυξηθεί η ποσότητα των συμπυκνωμάτων που επιστρέφει στο υπό εξέταση σύστημα. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης κατά 2,32% ενώ η *NPV* θα βελτιώνονταν κατά 58,32%.
- Το δεύτερο σενάριο αφορά την προσθήκη ενός εξοικονομητή καυσαερίων στην έξοδο των καυσαερίων από τον ατμολέβητα. Αυτό θα βελτίωνε τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης του συστήματος κατά 7,42% ενώ η *NPV* θα βελτιώνονταν κατά 47,17%.
- Το τρίτο σενάριο αφορά τις βελτιώσεις που περιγράφονται στα δύο προηγούμενα, κάτι που θα βελτίωνε τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης κατά 9,91% ενώ η *NPV* θα βελτιώνονταν κατά 107,60%.

Επιπλέον όμως των τριών σεναρίων, η ανάλυση ευαισθησίας ως προς μεταβλητές των οποίων οι τιμές είτε δεν είναι γνωστές, όπως οι ισεντροπικού βαθμοί απόδοσης των

συμπιεστών βιοαερίου και αέρα, είτε δεν είναι σταθερές, όπως η πίεση παραγωγής ατμού, η περιεκτικότητα των καυσαερίων σε CO<sub>2</sub>, άρα και η περίσσεια αέρα που χρησιμοποιείται για την καύση, η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον ατμολέβητα και η πίεση εισόδου του βιοαερίου στον θάλαμο καύσης

Επιπλέον όμως των τριών σεναρίων, η ανάλυση ευαισθησίας και η βελτιστοποίηση σε σχέση μεταβλητές των οποίων οι τιμές είτε δεν είναι γνωστές είτε δεν είναι σταθερές, έδειξε ότι τόσο ο εξεργειακός βαθμός απόδοσης του συστήματος όσο και η NPV της επένδυσης μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά. Ειδικότερα:

- Η παραγωγή ατμού στην ελάχιστη δυνατή πίεση, η εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής περιεκτικότητας των καυσαερίων σε CO<sub>2</sub> και η έξοδος των καυσαερίων στην ελάχιστη δυνατή θερμοκρασία μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τόσο των εξεργειακό βαθμό απόδοσης όσο και την NPV.
- Η είσοδος του βιοαερίου στον θάλαμο καύσης στην μέγιστη δυνατή πίεση μπορεί να αυξάνει τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης αλλά η αύξηση της NPV επιτυγχάνεται με την είσοδο του βιοαερίου στον θάλαμο με την ελάχιστη δυνατή πίεση.
- Σε ότι αφορά τους ισεντροπικούς βαθμούς απόδοσης των συμπιεστών βιοαερίου, οι τιμές τους είναι άγνωστες. Όπως προκύπτει όμως τόσο από την ανάλυση ευαισθησίας όσο και από την βελτιστοποίηση
  - ο Οι μέγιστες τιμές του εξεργειακού βαθμού απόδοσης επιτυγχάνονται με τις ελάχιστες τιμές των ισεντροπικών βαθμών

- ο Οι μέγιστες τιμές της NPV επιτυγχάνονται όταν ο ισηντροπικός βαθμός του συμπιεστή βιοαερίου πάρει την ελάχιστη δυνατή τιμή ενώ ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης του συμπιεστή αέρα την μέγιστη δυνατή τιμή.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο υπολογισμός της NPV δεν λαμβάνει υπόψη πιθανή κρατική επιδότηση για τέτοιου είδους επενδύσεις η οποία ανέρχεται στο 40% του TCI του συστήματος. Επίσης, δεν έχουν ληφθεί υπόψη επιπλέον εξοικονομήσεις οι οποίες προκύπτουν από το κόστος που θα επιβαρύνονταν η εταιρεία ΤΥΡΑΣ Α.Ε. εάν διαχειρίζονταν το τυρόγαλο με μία από τις εναλλακτικές μεθόδους, δηλαδή επεξεργασία στο αερόβιο ή συμπύκνωση και μεταφορά σε μονάδα για την αποξήρανση του ή διοχέτευση σε χοιροτρόφους. Η μόνη ανέξοδη λύση η οποία είναι η διοχέτευση του τυρογάλου σε χοιροτρόφους δεν λύνει το πρόβλημα αφού οι χοιροτρόφοι δεν μπορούν να καταναλώσουν το σύνολο της ποσότητας, και συνεπώς η επεξεργασία περιλαμβάνει και μια εκ των δύο ή και τις δύο άλλες εναλλακτικές. Ο συνυπολογισμός λοιπόν του κόστους για την εναλλακτική διαχείριση του τυρογάλου πλην του αναερόβιου συστήματος θα είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής της NPV κάνοντας την επένδυση ακόμη πιο ελκυστική.

## ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

|           |                       |
|-----------|-----------------------|
| $T$       | Θερμοκρασία           |
| $P$       | Πίεση                 |
| $\bar{h}$ | Ειδική ενθαλπία       |
| $H$       | Ενθαλπία              |
| $\bar{s}$ | Ειδική εντροπία       |
| $S$       | Εντροπία              |
| $\bar{e}$ | Ειδική εξέργεια       |
| $\dot{E}$ | Εξέργεια              |
| $\dot{m}$ | Ροή μάζας             |
| $\dot{Q}$ | Ογκομετρική παροχή    |
| $x$       | Κλάσμα μάζας          |
| $\bar{v}$ | Ειδικός όγκος         |
| $N$       | Moles                 |
| $R$       | Σταθερά αερίων        |
| $D$       | Πυκνότητα             |
| $f$       | Συντελεστής τριβής    |
| $Re$      | Αριθμός Reynolds      |
| $k_s$     | Ταχύτητα σωλήνας      |
| $D$       | Διάμετρος σωλήνας     |
| $U$       | Μέση ταχύτητα ρευστού |
| $\nu$     | Κινηματικό ιξώδες     |

|                       |                                                                                    |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>L</i>              | Ισοδύναμο μήκος                                                                    |
| <i>TOC</i>            | Συνολικός Οργανικός Άνθρακας                                                       |
| <i>M</i>              | Μοριακό βάρος                                                                      |
| <i>A<sub>r</sub></i>  | Ατομικό βάρος                                                                      |
| <i>LHV</i>            | Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη                                                         |
| <i>NPV</i>            | Καθαρή Παρούσα Αξία                                                                |
| <i>NCF</i>            | Καθαρή Χρηματοροή                                                                  |
| <i>TCI</i>            | Συνολικό Κόστος Επένδυσης                                                          |
| <i>i</i>              | Επιτόκιο προεξόφλησης                                                              |
| <i>t</i>              | Έτος, από 1 έως 20                                                                 |
| <i>AD</i>             | Τοκοχρεωλυτική δόση                                                                |
| <i>ε</i>              | Επιτόκιο δανεισμού                                                                 |
| <i>ν</i>              | Αριθμός ετών για την<br>αποπληρωμή του δανείου                                     |
| <i>K</i>              | Κεφάλαιο δανεισμού                                                                 |
| <i>Subscript</i>      |                                                                                    |
| <i>H<sub>2</sub>O</i> | Νερό                                                                               |
| <i>S</i>              | Διαλυμένη ουσία-για το ανεπεξέργαστο τυρόγαλο η διαλυμένη ουσία είναι η<br>λακτόζη |
| <i>f</i>              | Κορεσμένη υγρή φάση                                                                |
| <i>sat</i>            | Κορεσμένη                                                                          |
| <i>k</i>              | k-οστό συστατικό μίγματος                                                          |
| <i>0</i>              | Κατάσταση αναφοράς                                                                 |

|                    |                                       |
|--------------------|---------------------------------------|
| $1,2,...,26$       | Αριθμός κατάστασης                    |
| <i>air</i>         | Αέρας                                 |
| <i>biogas</i>      | Βιοαέριο                              |
| <i>gases</i>       | Καυσαέρια                             |
| $P1,...,P4$        | Αντλία 1,...,4                        |
| $C1, C2$           | Συμπιεστής βιοαερίου, Συμπιεστής αέρα |
| <i>Superscript</i> |                                       |
| $PH$               | Φυσική                                |
| $CH$               | Χημική                                |

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μαρκαντωνάτος Γρηγόρης (1986), “Επεξεργασία και διάθεση υγρών αποβλήτων, αστικά λύματα, βιομηχανικά απόβλητα, ζωικά απορρίμματα”, Α Έκδοση, Αθήνα.
2. Field, Jim and Sierra, Reyes. Anaerobic Sludge Bed Technology Pages. Retrieved October 5, 2010 from the World Wide Web: <http://www.uasb.org/discover/granules.htm>.
3. Lettinga, G., A. F. M. van Velsen, S. W. Hobma, W. De Zeeuw, A. Klapwijk (1980) “Use of upflow sludge blanket reactor concept for biological waste water treatment, especially for anaerobic treatment”. *Biotechnology Bioengineer*. 22: 699-734.
4. Kalyuzhnyi, S.V.; Perez Martinez, E.; and Rodriguez, Martinez (1997). “Anaerobic Treatment of High-Strength Cheese Whey Wastewaters in Laboratory and Pilot UASB-Reactors”. *Bioresource Technology* 60(1): 59-65.
5. McHugh, Sharon; Collins, Gavin; and O’Flaherty, Vincent (2006). “Long-term, high-rate anaerobic biological treatment of whey wastewaters at psychrophilic temperatures”. *Bioresource Technology* 97(64): 1669-1678.
6. Patel, Priti; Desai, Manik; and Madamwar, Datta (1995). “Biomethanation of Cheese Whey Using Anaerobic Upflow Fixed Film Reactor”. *Journal Of Fermentation and Bioengineering* 79(4): 398-399.
7. Hwang, S. H.; Hansen, C. L. (1992) “Biokinetics of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor Treating Whey Permeate”. *Bioresource Technology* 41(3): 223-230.



8. Gavala, H. N.; Kopsinis, H.; Skiadas, I. V.; Stamatelatou, K.; and Lyberatos, G. (1999) “Treatment of Dairy Wastewater Using an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor”, *Journal of Agricultural Engineering Research* 73(1): 59-63.
9. Yan, J. Q.; Lo, K. V.; and Liao, P. H. (1989) “Anaerobic digestion of cheese whey using up-flow anaerobic sludge blanket reactor”. *Biological Wastes* 27(4): 289-305.
10. Wildenauer F. X.; and Winter, J. (1985) “Anaerobic digestion of high-strength acidic whey in a pH-controlled up-flow fixed film loop reactor” *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol 22(5): 367—372.
11. García, P.A.; Rico, J.L, and Polanco, F. Fdz. (1991) “Anaerobic Treatment of Cheese Whey in a Two-Phase UASB Reactor” *Environmental Technology* 12(4): 355-362.
12. Ptasiński, K. J.; Hamelinck, C.; and Kerkhof, P. J. A. M. (2002) “Exergy analysis of methanol from the sewage sludge process”. *Energy Conversion and Management* 43(9-12): 1445-1457.
13. Milk, Ανακτήθηκε από: [http://en.wikipedia.org/wiki/Milk#cite\\_note-62](http://en.wikipedia.org/wiki/Milk#cite_note-62). Τελευταία τροποποίηση 27 Φεβρουαρίου 2010, 00:06
14. Whey, Ανακτήθηκε από: <http://www.dairyforall.com/whey.php>.
15. Goff, Douglas H. Dairy Science and Technology, Education Series. University of Guelph, Ανακτήθηκε από: <http://www.foodsci.uoguelph.ca/deicon/ro.html>
16. Anaerobic Digestion, Ανακτήθηκε από: [http://en.wikipedia.org/wiki/Anaerobic\\_digestion](http://en.wikipedia.org/wiki/Anaerobic_digestion). Τελευταία τροποποίηση 28 Φεβρουαρίου 2010, 12:13
17. Advantages and Disadvantages of Anaerobic Treatment, Ανακτήθηκε από: [http://www.anaerobic-digestion.com/html/pros\\_cons.html](http://www.anaerobic-digestion.com/html/pros_cons.html)

18. Αϊβαζίδης Αλέξανδρος (2000) “Τεχνολογία και Διαχείριση υγρών Αποβλήτων ΙΙ”.  
Πανεπιστημιακό Σύγγραμμα. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή,  
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Ξάνθη.
19. Residua, Information Sheet. Retrieved. Ανακτήθηκε από:  
[http://www.waste.nl/content/download/472/3779/file/WB89-InfoSheet\(Anaerobic%20Digestion\).pdf](http://www.waste.nl/content/download/472/3779/file/WB89-InfoSheet(Anaerobic%20Digestion).pdf)
20. Anaerobic Digester Types, Ανακτήθηκε από:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Anaerobic\\_digester\\_types](http://en.wikipedia.org/wiki/Anaerobic_digester_types), Τελευταία τροποποίηση 16  
Δεκεμβρίου 2009, 05:30
21. Ball, A.S; and Dhagat N.N. (2001) “Upflow anaerobic sludge blanket reactor--a review”  
*Indian Journal of Environmental Health* 43(2): 1-82
22. Tai, Shingo; Matsushige, Kazuo; and Goda, Takeshi. (1986) “Chemical Exergy of  
Organic Matter in Wastewater” *International Journal of Environmental Studies* 27(3):  
301-315.
23. Bejan, Adrian; Tsatsaronis, George; and Moran, Michael. (1996) “*Thermal Design and  
Optimization*”. New York: John Wiley and Sons.
24. Καλιαμπάκος, Δ. και Δαμίγος Δ., (2008) “Χρηματοοικονομική και κοινωνικοοικονομική  
αξιολόγηση επενδύσεων”. Σημειώσεις Μαθήματος: Οικονομικά του Περιβάλλοντος και  
των Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διατμηματικό Πρόγραμμα  
Μεταπτυχιακών Σπουδών, Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Ανακτήθηκε  
από:  
[http://postgra.hydro.ntua.gr/docs/lessons/51/damigos/Axiologisi\\_ependyseon\\_notes.pdf](http://postgra.hydro.ntua.gr/docs/lessons/51/damigos/Axiologisi_ependyseon_notes.pdf)

25. Δαμίγος Δ., (2008) “Οικονομικά του Περιβάλλοντος και των Υδατικών Πόρων, Αξιολόγηση Επενδύσεων”. Σημειώσεις Μαθήματος: Οικονομικά του Περιβάλλοντος και των Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων. Ανακτήθηκε από:

[http://postgra.hydro.ntua.gr/docs/lessons/51/damigos/Axiologisi\\_ependyseon.pdf](http://postgra.hydro.ntua.gr/docs/lessons/51/damigos/Axiologisi_ependyseon.pdf)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Οι μαθηματικές σχέσεις που δίνονται περιγράφονται στο «Thermal Design and Optimization» [23].

### Υπολογισμός ενθαλπίας ουσίας

$$\bar{h} = 10^3 \left[ H^+ + ay + \frac{b}{2} y^2 - cy^{-1} + \frac{d}{3} y^3 \right] \quad (1)$$

Όπου  $y = 10^{-3} T$ .

Οι συντελεστές  $H^+$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  για κάθε ουσία μπορούν να βρεθούν από πίνακες [23].

### Υπολογισμός εντροπίας ουσίας

$$\bar{s} = S^- + a \ln(T) + by - \frac{c}{2} y^{-2} + \frac{d}{2} y^2 \quad (2)$$

Ο συντελεστής  $S^-$  για κάθε ουσία υπολογίζεται επίσης από πίνακες [23].

Θερμοδυναμικές Ιδιότητες Τυρόγαλου (ανεπεξέργαστου, ανακυκλοφορούμενου και επεξεργασμένου):

- Η ειδική ενθαλπία του τυρόγαλου δίνεται από την σχέση:

$$\bar{h} = x_{H_2O} \cdot \bar{h}_{H_2O} + x_s \cdot \bar{h}_s \quad (3)$$

Η ενθαλπία του νερού για κάποια θερμοκρασία και πίεση δίνεται από την σχέση:

$$\bar{h}_{H_2O}(T, P) = \bar{h}_{f, H_2O}(T) + \bar{v}_{f, H_2O} \cdot [P - P_{sat}(T)] \quad (4)$$

Η ενθαλπία της διαλυμένης ουσίας  $\bar{h}_s$  λαμβάνεται για την κατάσταση αναφοράς ( $T_0=298,15\text{K}$  και  $P_0=1,013\text{bar}$ ) και θεωρείται ότι είναι σταθερή για το εύρος των θερμοκρασιών και πιέσεων που απαντώνται στην παρούσα εργασία.

- Η ειδική εντροπία του τυρόγαλου δίνεται από:

$$\bar{s} = x_{H_2O} \cdot \bar{s}_{H_2O} + x_s \cdot \bar{s}_s \quad (5)$$

Η εντροπία του νερού για οποιαδήποτε θερμοκρασία και πίεση δίνεται από την σχέση:

$$\bar{s}_{H_2O}(T, P) = \bar{s}_{f, H_2O}(T) \quad (6)$$

Η εντροπία της διαλυμένης ουσίας  $\bar{s}_s$  λαμβάνεται επίσης για την κατάσταση αναφοράς ( $T_0=298,15\text{K}$  και  $P_0=1,013\text{bar}$ ) και θεωρείται ότι είναι σταθερή για το εύρος των θερμοκρασιών και πιέσεων που απαντώνται στην παρούσα εργασία.

#### Θερμοδυναμικές ιδιότητες Βιοαερίου και Αέρα:

Το βιοαέριο και ο αέρας θεωρούνται μίγματα ιδανικών αερίων. Έτσι, οι θερμοδυναμικές ιδιότητες και για τα δύο μίγματα λαμβάνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

- Η μερική πίεση  $P_k$  για οποιοδήποτε από τα συστατικά του μίγματος είναι:

$$P_k = \frac{n_k}{n} \cdot P \quad (7)$$

- Η ενθαλπία του μίγματος είναι:

$$H = \sum_{k=1}^N n_k \cdot \bar{h}_k \quad (8)$$

Επειδή κάθε ένα από τα συστατικά του μίγματος θεωρείται ιδανικό αέριο, η ενθαλπία του είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας η οποία είναι ίση με την θερμοκρασία του μίγματος.

- Η εντροπία του μίγματος είναι:

$$S = \sum_{k=1}^N n_k \cdot \bar{s}_k \quad (9)$$

Η εντροπία ενός ιδανικού αερίου είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πίεσης. Η θερμοκρασία κάθε συστατικού του μίγματος είναι ίση με την θερμοκρασία του μίγματος ενώ η πίεση του ισούται με την μερική του πίεση.

#### Φυσική, Χημική και Συνολική Εξέργεια:

- Φυσική εξέργεια:

$$E^{PH} = \dot{m} \cdot \left[ (\bar{h} - \bar{h}_0) + P_0 \cdot (\bar{s} - \bar{s}_0) \right] \quad (10)$$

- Χημική Εξέργεια:

$$E^{CH} = \dot{m} \cdot \left( \sum x_k \cdot \bar{e}_k^{CH} + R \cdot T_0 \cdot \sum x_k \cdot \ln(x_k) \right) \quad (11)$$

- Συνολική Εξέργεια:

$$E = E^{PH} + E^{CH} \quad (12)$$

#### Υπολογισμός παροχής μάζας

$$\dot{m} = \dot{Q} \cdot d \quad (13)$$

#### Υπολογισμός Υδραυλικών Απωλειών

- Αριθμός Reynolds:

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (14)$$

- Συντελεστής τριβής (Εξίσωση Colebrook):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{k_s / D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (15)$$

- Πτώση Πίεσης:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = f \cdot \left( \frac{2 \cdot L}{D} \right) \cdot \left( \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \right)^2 \quad (16)$$

### Καταστροφή Εξέργειας

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \cdot \dot{Q}_j - \left( \dot{W}_{cv} - P_0 \cdot \frac{dV_{cv}}{dt} \right) + \sum_{inlet} \dot{m}_{inlet} \cdot \bar{e}_{inlet} - \sum_{outlet} \dot{m}_{outlet} \cdot \bar{e}_{outlet} - \dot{E}_D \quad (17)$$

Η ανάλυση γίνεται για μόνιμες συνθήκες, συνεπώς,  $\frac{dE_{cv}}{dt} = \frac{dV_{cv}}{dt} = 0$ . Επίσης, όπως

αναφέρθηκε δεν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες θερμότητας, δηλαδή  $\sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \cdot \dot{Q}_j = 0$ .

### Εξεργειακός Βαθμός Απόδοσης

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_{Product}}{\dot{E}_{Fuel}} \quad (18)$$

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000073754

