



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

‘Πειραματική διερεύνηση παραγωγής βιοαερίου από μίγματα
τυρογάλακτος με υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου
διαφορετικής πυκνότητας στη μεσόφιλη περιοχή’

Παναγιώτα Π. Καττή

Επιβλέπων Καθηγητής
Δημήτριος Γεωργακάκης

ΑΘΗΝΑ
2010

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

‘Πειραματική διερεύνηση παραγωγής βιοαερίου από μίγματα τυρογάλακτος με υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου διαφορετικής πυκνότητας στη μεσόφιλη περιοχή’

Παναγιώτα Π. Καττή

Επιβλέπων Καθηγητής
Δημήτριος Γεωργακάκης

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή
Δημήτριος Γεωργακάκης
Χαρίκλεια Καλλιάνου
Χρήστος Καραβίτης

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης, είναι η παραγωγή βιοαερίου από την αναερόβια επεξεργασία υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου, και δευτερευόντως από μίγμα αυτών με τυρόγαλα, σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες ωφέλιμου όγκου 25,6 L. Αρχικά, διερευνήθηκε η επίδραση της πυκνότητας των υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου στην παραγωγή βιοαερίου, σύμφωνα με την οποία αποδείχτηκε πως μεταξύ των τεσσάρων τιμών πυκνότητας που χρησιμοποιήθηκαν (2-4-6-8% Ο.Σ.κ.β.), βέλτιστη ήταν η πυκνότητα 4,7% Ο.Σ.κ.β. ($4 \text{ kg Π.Σ.}/\text{m}^3_{\text{χων}}$), με μέγιστη παραγωγή βιοαερίου $0,55 \text{ Nm}^3/\text{m}^3_{\text{χων}}\cdot 48\text{ωρο}$. Τα αποτελέσματα που αφορούσαν τις πυκνότητες 6% και 8% Ο.Σ.κ.β. κρίθηκαν μη αντιπροσωπευτικά, λόγω της αδυναμίας των εγκαταστάσεων του εργαστηρίου μας να ανταπεξέλθουν σε αυτά τα υψηλά επίπεδα πυκνότητας υγρών διαχωρισμού και γι' αυτό το λόγο δεν προστέθηκαν στο αρχικό μοντέλο υπολογισμού της παραγόμενης ποσότητας μεθανίου (Γεωργακάκης, 1985). Τα υπόλοιπα δυο ποσοστά των 2% και 4% Ο.Σ.κ.β., μαζί με τέσσερις τιμές βιβλιογραφικές (Χριστοπούλου, 2004) από αναερόβια χώνευση βουστασίου, επιβεβαίωσαν το παλαιότερο μοντέλο (Γεωργακάκης, 1985) και ως εκ τούτου επιτρέπουν τη γενίκευσή του στα υγρά κτηνοτροφικά απόβλητα $Y=1,077 \cdot e^{-0,18 \cdot (X-4,3)^2}$. Στη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας, χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά μίγματα υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με την προαναφερθείσα βέλτιστη πυκνότητα, με τυρόγαλα, για τη μελέτη της παραγωγής βιοαερίου, με στόχο την προτεινόμενη άριστη αναλογία $\text{Π.Σ.τυρογάλακτος}/\text{Π.Σ.υγρών χοιροστασίου}=17,5/1$ (Κακούρος, 2009). Ο στόχος αυτός δεν επιτεύχθηκε τελικά, λόγω της ανάγκης περισσότερου χρόνου προσαρμογής των εγκαταστάσεων. Ως εκ τούτου, για τη μελέτη του αντίστοιχου μαθηματικού μοντέλου για μίγματα υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της βιβλιογραφίας (Κακούρος, 2009): $Y=1,47 \cdot e^{-0,14 \cdot (X-3,75)^2}$.

Λέξεις κλειδιά: Αναερόβια χώνευση, μαθηματικό μοντέλο παραγωγής μεθανίου, υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου, τυρόγαλα

ABSTRACT

The objective of this study is biogas production from anaerobic digestion of mechanical separation effluent of piggery wastes, and secondarily of mixture of the latter with whey, in four laboratory reactors with an effective volume of 25,6L. First, the influence of the density of the separated effluent in biogas production was investigated. Four densities were applied (2%-4%-6%-8% TS by weight). An optimum density of 4,7 TS by weight ($4 \text{ kg VS/m}^3_{\text{R}}$), with the maximum biogas production of $0,55 \text{ Nm}^3/\text{m}^3_{\text{reactor}}\cdot 48\text{h}$, was obtained. The results concerning the densities 6% and 8% TS by weight have been considered non representative enough due to our laboratory facilities inability to manage these high-density matters. So, they were not included in the older mathematical model for methane production (Γεωργακάκης, 1985). The results concerning the other two densities (2% and 4% TS by weight) and four literature results (Χριστοπούλου, 2004) confirmed the mathematical model and allowed its generalization: $Y=1,077 \cdot e^{-0,18 \cdot (X-4,3)^2}$. In addition, different mixtures of effluent with the aforementioned optimum density and whey were used to study biogas production, targeting a final optimum VS rate $17,5_{\text{whey}}/1_{\text{effluent}}$ (Κακούρος, 2009). This ratio has never been reached, probably due to system prolonged adaptation time required. However, a corresponding mathematical model for such mixtures was finally obtained, based on literature results (Κακούρος, 2009): $Y=1,47 \cdot e^{-0,14 \cdot (X-3,75)^2}$.

Keywords: Anaerobic digestion, mathematical model for methane production, mechanical separation effluent of piggery wastes, whey

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	8
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	9
ΜΕΡΟΣ Ι - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΣΤΟΧΟΙ	10
I.1. ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ	11
I.1.1. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ	13
I.1.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ	14
I.1.2.1. Ανοιχτές χωμάτινες δεξαμενές	14
I.1.2.2. Κλειστές δεξαμενές παραγωγής βιοαερίου-βιοαντιδραστήρες	15
I.1.3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΟΜΑΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ	17
I.1.4. ΤΟΜΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ	21
I.1.4.1. Ιλύς υγρών αστικών αποβλήτων	21
I.1.4.2. Στερεά αστικά απόβλητα	21
I.1.4.3. Υγρά βιομηχανικά απόβλητα	23
I.1.4.4. Γεωργικά απόβλητα	23
I.1.5. ΒΙΟΑΕΡΙΟ	25
I.1.5.1. Χρήση του βιοαερίου	25
I.1.5.2. Το βιοαέριο στην Ελλάδα	28
I.2. ΠΤΗΝΟ-ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	29
I.2.1. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΤΗΝΟ-ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	29
I.2.1.1. Πρωτοβάθμια επεξεργασία υγρών πτηνο-κτηνοτροφικών αποβλήτων	30
I.2.1.2. Δευτεροβάθμια (βιολογική) επεξεργασία	32

I.2.2.	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΧΟΙΡΟΣΤΑΣΙΩΝ	33
I.2.2.1.	Πρωτοβάθμια επεξεργασία	33
I.2.2.2.	Αναερόβια (δευτεροβάθμια) επεξεργασία	35
I.3.	ΓΑΛΑΚΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	37
I.3.1.	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	37
I.3.2.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΥΡΟΓΑΛΑΚΤΟΣ	39
I.3.2.1.	Παραγωγή και χρήση τυρογάλακτος	41
I.3.2.2.	Ρυπαντικά χαρακτηριστικά τυρογάλακτος	43
I.3.3.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΤΥΡΟΚΟΜΕΙΩΝ	45
I.3.3.1.	Αερόβια διαδικασία	46
I.3.3.2.	Αναερόβια διαδικασία	46
I.4.	ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΑΠΟ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ	48
 ΜΕΡΟΣ ΙΙ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ		49
ΙΙ.1.	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΡΩΤΗΣ ΥΛΗΣ	49
ΙΙ.2.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	50
ΙΙ.3.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΩΝ	52
ΙΙ.4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	57
ΙΙ.5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ	62
I.5.1.	A' ΦΑΣΗ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΥΓΡΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΧΟΙΡΟΣΤΑΣΙΟΥ ΣΕ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ	63
I.5.1.1.	Χωνευτήρας Α (πυκνότητας 8% Ο.Σ. _{κ.β.})	64
I.5.1.2.	Χωνευτήρας Β (πυκνότητας 6% Ο.Σ. _{κ.β.})	66
I.5.1.3.	Χωνευτήρας Γ (πυκνότητας 4% Ο.Σ. _{κ.β.})	68
I.5.1.4.	Χωνευτήρας Δ (πυκνότητας 2% Ο.Σ. _{κ.β.})	70
I.5.1.5.	Συγκριτική λειτουργία τεσσάρων χωνευτήρων Α' φάσης	72
I.5.1.6.	Εφαρμογή πειραματικών αποτελεσμάτων Α' φάσης σε μαθηματικό μοντέλο παραγωγής μεθανίου (Γεωργακάκης, 1985)	78
I.5.2.	B' ΦΑΣΗ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΜΙΓΜΑ ΥΓΡΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΧΟΙΡΟΣΤΑΣΙΟΥ ΜΕ ΤΥΡΟΓΑΛΑ	83

Π.5.2.1. Πρόγνωση κατάρρευσης συστημάτων αναερόβιας χώνευσης Β' φάσης – Δείκτης β' _____ 86

Π.5.2.2. Εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου παραγωγής μεθανίου (Γεωργακάκης, 1985) για μίγματα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου _____ 91

ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ **94**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ **96**

Ευχαριστίες...

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν με τον τρόπο τους στην ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες, θα ήθελα να εκφράσω προς τον επιβλέποντα Καθηγητή κ.Δημήτριο Γεωργακάκη, για την εύστοχη καθοδήγησή του και τη διαρκή παρουσία του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα.Χαρίκλεια Καλλιάνου και τον κ.Χρήστο Καραβίτη για την αποδοχή τους να αξιολογήσουν την παρούσα μελέτη.

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας I 1.1 Επίπεδα παραγωγής μεθανίου από διάφορα αστικά στερεά απόβλητα	22
Πίνακας I 2.1 Τυπική σύσταση και pH των δυο τύπων τυρογάλακτος	40
Πίνακας I 3.1 Σύσταση τυριού Ricotta κατά την παρασκευή του από πλήρες γάλα και από τυρόγαλα	42
Πίνακας II 4.1 Χαρακτηριστικά των μιγμάτων τυρογάλακτος και υγρών μηχανικού διαχωρισμού χοιροστασίου κατά την Β' φάση	61
Πίνακας II 5.1 Ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των υγρών τροφοδοσίας (υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου) των χωνευτήρων	63
Πίνακας II 5.2 Τιμές pH και παραγωγή βιοαερίου χωνευτήρα Α	64
Πίνακας II 5.3 Μέσοι όροι μετρήσεων Α' φάσης χωνευτήρα Α	65
Πίνακας II 5.4 Τιμές pH και παραγωγή βιοαερίου χωνευτήρα Β	66
Πίνακας II 5.5 Μέσοι όροι μετρήσεων Α' φάσης χωνευτήρα Β	67
Πίνακας II 5.6 Τιμές pH και παραγωγή βιοαερίου χωνευτήρα Γ	68
Πίνακας II 5.7 Μέσοι όροι μετρήσεων Α' φάσης χωνευτήρα Γ	69
Πίνακας II 5.8 Τιμές pH και παραγωγή βιοαερίου χωνευτήρα Δ	70
Πίνακας II 5.9 Μέσοι όροι μετρήσεων Α' φάσης χωνευτήρα Δ	71
Πίνακας II 5.10 Συγκεντρωτικός πίνακας του οργανικού φορτίου και της μείωσής του, των μέσων όρων μετρήσεων Ο.Σ., Π.Σ. και COD των υγρών τροφοδοσίας και εξόδου, pH, παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου, ποσοστού μεθανίου στο βιοαέριο για τις τέσσερις πυκνότητες υγρών διαχωρισμού χοιροστασίου κατά την Α' φάση	74
Πίνακας II 5.11 Πειραματικές τιμές οργανικού φορτίου και παραγωγής βιοαερίου από πειράματα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γ.Π.Α., σε διάφορους τύπους αποβλήτων	79
Πίνακας II 5.12 Ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά υγρών χοιροστασίου και τυρογάλακτος τροφοδοσίας των χωνευτήρων	83
Πίνακας II 5.13 Χαρακτηριστικά μιγμάτων υγρών χοιροστασίου με τυρόγαλα	84
Πίνακας II 5.14 Πειραματικές τιμές οργανικού φορτίου και παραγωγής βιοαερίου από πειράματα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γ.Π.Α., σε διάφορους τύπους αποβλήτων	91

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα Π 5.1 Διακύμανση παραγωγής βιοαερίου του χωνευτήρα Α.....	64
Διάγραμμα Π 5.2 Διακύμανση της τιμής του pH του χωνευτήρα Α	65
Διάγραμμα Π 5.3 Διακύμανση παραγωγής βιοαερίου του χωνευτήρα Β.....	66
Διάγραμμα Π 5.4 Διακύμανση της τιμής του pH του χωνευτήρα Β.....	67
Διάγραμμα Π 5.5 Διακύμανση παραγωγής βιοαερίου για τον χωνευτήρα Γ.....	68
Διάγραμμα Π 5.6 Διακύμανση της τιμής του pH για τον χωνευτήρα Γ	69
Διάγραμμα Π 5.7 Διακύμανση της παραγωγής βιοαερίου για τον χωνευτήρα Δ.....	70
Διάγραμμα Π 5.8 Διακύμανση της τιμής του pH για τον χωνευτήρα Δ.....	71
Διάγραμμα Π 5.9 Διακύμανση παραγωγής βιοαερίου των τεσσάρων χωνευτήρων κατά την Α' φάση και ο μέσος όρος τους.....	72
Διάγραμμα Π 5.10 Διακύμανση της τιμής pH των τεσσάρων χωνευτήρων κατά την Α' φάση και ο μέσος όρος τους	73
Διάγραμμα Π 5.11 Παραγωγή βιοαερίου και διακύμανση pH σε συνάρτηση με το ογκομετρικό φορτίο	76
Διάγραμμα Π 5.12 Παραγωγή μεθανίου και διακύμανση pH σε συνάρτηση με το ογκομετρικό φορτίο	77
Διάγραμμα Π 5.13 Παραγωγή μεθανίου από υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου για διάφορες τιμές οργανικού φορτίου (Γεωργακάκης, 1985)	80
Διάγραμμα Π 5.14 Παραγωγή μεθανίου από υγρά διαχωρισμού αποβλήτων βουστασίου (σημεία με καφέ περίγραμμα) και χοιροστασίου για διάφορες τιμές οργανικού φορτίου.....	81
Διάγραμμα Π 5.15 Παραγωγή βιοαερίου και διακύμανση pH των τριών χωνευτήρων στη Β' φάση	84
Διάγραμμα Π 5.16 Παραγωγή μεθανίου από υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου αναμιγμένα με τυρόγαλα (Κακούρος, 2009)	92

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα I.1 Μηχανικός διαχωριστής (αριστερά) και δεξαμενή υποδοχής υγρού κλάσματος αποβλήτων χοιροστασίου(δεξιά) (περιοχή Τανάγρας)	34
Εικόνα I.2 Συλλογή διαχωρισμένου στερεών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου (περιοχή Τανάγρας)	34
Εικόνα I.3 Ανοιχτή χωμάτινη δεξαμενή αναερόβιας επεξεργασίας υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου (περιοχή Τανάγρας)	35
Εικόνα I.4 Χοιροστάσιο στην Βέροια με εγκατάσταση αναερόβιας επεξεργασίας των αποβλήτων με ταυτόχρονη παραγωγή βιοαερίου	36
Εικόνα I.5 Δεξαμενή συλλογής τυρογάλακτος (Τυροκομείο Λιμνών Αργολίδας)	39
Εικόνα I.6 Σημειακή πηγή ρύπανσης με τυρόγαλα σε παραπόταμο του Πηνειού	44
Εικόνα I.7 Τμήμα του Βουραϊκού όπου φαίνεται το τυρόγαλα να ‘ρέει’ στο ποτάμι	44
Εικόνα II.1 Συσκευές τυροκομείου (αριστερά) και δεξαμενή συλλογής τυρογάλακτος (δεξιά) τυροκομείου Λιμνών Αργολίδας	49
Εικόνα II.2 Δεξαμενή συλλογής αποβλήτων (αριστερά) και διαχωρισμένων υγρών (αριστερά) χοιροστασίου Τανάγρας Βοιωτίας (δεξιά)	49
Εικόνα II.3 Πειραματική εγκατάσταση αναερόβιου χωνετήρα.....	51
Εικόνα II.4 Πεχάμετρο.....	52
Εικόνα II.5 Φούρνος ξήρανσης των δειγμάτων.....	53
Εικόνα II.6 Αποτεφρωτήρας.....	53
Εικόνα II.7 Διάταξη οργάνων για την μέτρηση περιεκτικότητας μεθανίου στο βιοαέριο.....	56

Μέρος I - Θεωρητικό

Εισαγωγή - Στόχοι

Το περιβάλλον σήμερα έρχεται αντιμέτωπο με σοβαρότατα προβλήματα ρύπανσης, τα οποία προκαλεί η ανθρώπινη δραστηριότητα απευθείας ή εμμέσως. Ένα από αυτά, είναι η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή αποβλήτων κάθε είδους και μορφής. Απαράδεκτες πρακτικές όπως η ανεξέλεκτη διάθεση ή εναπόθεση αποβλήτων στο περιβάλλον είναι μη αποδεκτές. Το ενδιαφέρον στρέφεται στην ανάπτυξη μεθόδων που θα στοχεύουν στη προστασία του περιβάλλοντος, τη μείωση της ρύπανσης και την αξιοποίηση των αποβλήτων.

Οι πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αφορούν τα συστήματα αναεώσιμων πηγών ενέργειας ορίζουν ως δεσμευτικό στόχο την κάλυψη των ευρωπαϊκών ενεργειακών αναγκών από ανανεώσιμες πηγές σε ποσοστό 20%, έως το 2020, και μάλιστα ένα σημαντικό μέρος των τελευταίων θα προέρχεται από τους χώρους της γεωργίας. Ο τομέας με τον οποίο σχετίζεται η παρούσα μελέτη, είναι η παραγωγή βιοαερίου από την αναερόβια επεξεργασία υγρών αποβλήτων από χοιροστάσια και τυροκομεία.

Πιο συγκεκριμένα, στόχος της μελέτης είναι η διερεύνηση της επίδρασης της πυκνότητας των υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου, στην παραγωγή βιοαερίου κατά την επεξεργασία τους σε αναερόβιους αντιδραστήρες. Σε δεύτερη φάση μελετάται η παραγωγή βιοαερίου μίγματος υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου και τυρογάλακτος, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με προηγούμενη μελέτη, σε επίπεδο πυκνότητας των αποβλήτων χοιροστασίου. Τέλος, τα αποτελέσματα και των δυο φάσεων συνδυάζονται με εκείνα συναφών μελετών σε διαφορετικά είδη ζωικών αποβλήτων, με στόχο την προσθήκη τους σε υπάρχον μαθηματικό μοντέλο παραγωγής μεθανίου από την αναερόβια χώνευση τους, και τη γενίκευση του τελευταίου.

1.1. Αναερόβια χώνευση

Με τον όρο αναερόβια χώνευση, νοείται η βιολογική διαδικασία κατά την οποία ο οργανικός άνθρακας μέσω διαδοχικών οξειδώσεων και αναγωγών μετατρέπεται στην πιο οξειδωμένη (CO_2) και την πιο ανηγμένη (CH_4) του μορφή, υπό την καταλυτική δράση ενός ευρέος φάσματος μικροοργανισμών, σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου. Τα κύρια προϊόντα της διεργασίας είναι τα προαναφερόμενα, διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο, αλλά παράγονται επίσης και μικρές ποσότητες αζώτου, υδρογόνου, αμμωνίας και υδροθείου (συνήθως λιγότερο από το 1% του συνολικού όγκου του αερίου). Το μείγμα των αερίων προϊόντων ονομάζεται βιοαέριο και η διεργασία της συγκεκριμένης αναερόβιας αποδόμησης, με στόχο τη αξιοποίησή του συχνά καλείται και επεξεργασία βιοαερίου (Angelidaki et al., 2003).

Η αναερόβια χώνευση είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται ήδη από το 6500 π.Χ. από τους Ινδούς για τον καθαρισμό και την διαχείριση των απόβρωτων. Η πρώτη, όμως, ιστορική μαρτυρία της χρήσης της αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή ενέργειας, απαντάται στην Ασσυρία το 10 π.Χ. όπου η ενέργεια που παρήγαγαν χρησιμοποιούνταν για την θέρμανση λουτρών (Μάρκου, 2009). Ο Βενιαμίν Φραγκλίνος ήταν ο πρώτος, που ανέφερε το 1764, ότι μπορούσε να βάλει φωτιά σε μια μεγάλη επιφάνεια ρηχής λασπώδους λίμνης στο Νιου Τζέρσεϊ των Η.Π.Α. και αργότερα ο Αλεξάντερ Βόλτα στην Ιταλία ήταν ο πρώτος, που το 1776 περιέγραψε επιστημονικά το σχηματισμό του βιοαερίου σε έλη και σε ιζήματα λιμνών (Γεωργακάκης, 2009β).

Η μέθοδος της αναερόβιας χώνευσης των ζωικών αποβλήτων βρήκε μεγάλη εφαρμογή στην Ασία, εξαιτίας της απλότητας και της σταθερότητάς της στα ζωικά απόβλητα. Στην Κίνα μόνο χρησιμοποιούνταν, μόλις πριν από λίγα χρόνια, 4 - 6 εκατομμύρια αναερόβιοι χωνευτήρες, χαμηλής βεβαίως τεχνολογίας. Το βιοαέριο, που παράγεται χρησιμοποιείται για μαγείρεμα και φωτισμό σπιτιών και κοινοτήτων.

Αυτός ήταν προφανώς και ο λόγος για τον οποίο ο Buswell χρησιμοποίησε το 1936 ζωικά απόβλητα, ως βασικό υπόστρωμα για την παραγωγή βιοαερίου, σε συνδυασμό

με άλλα οργανικά απόβλητα. Δικαίως λοιπόν ο Buswell θεωρείται ο πατέρας της αναερόβιας χώνευσης, η οποία σήμερα ελκύει το ενδιαφέρον των επιστημόνων, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της (Γεωργακάκης, 2009β).

Όσον αφορά στα ζωικά απόβλητα, η αναερόβια χώνευσή τους σε κλειστό σύστημα είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος όχι μόνο για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές όπως το μεθάνιο, αλλά και για την αποφυγή της ανεξέλεκτης εκπομπής αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα κατά τη διαχείριση των πρώτων σε ανοιχτούς χώρους. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, η αναερόβια χώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων σε κλειστά συστήματα εφαρμόζεται κυρίως στη Γερμανία, την Αυστρία, τη Δανία, την Ιταλία, την Ολλανδία και την Ισπανία. (Bernet and Beline, 2008).

Για παράδειγμα, στη Δανία, έχει αναπτυχθεί ένα κεντρικό σύστημα εγκαταστάσεων βιοαερίου που ελέγχεται από τους αγροτικούς συνεταιρισμούς, με στόχο την κεντρική εξυπηρέτηση των αγροτών, σε συνδυασμό με την προστασία του περιβάλλοντος. Στη Γερμανία, το 2007 λειτουργούσαν περισσότερες από 2.500 εγκαταστάσεις παραγωγής βιοαερίου, ενσωματωμένες στη γεωργική εκμετάλλευση. Πολλές από αυτές διαχειρίζονται διαφορετικού τύπου απόβλητα βελτιώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα στην παραγωγή βιοαερίου και το εισόδημα των αγροτών. Στην Ιταλία, χρησιμοποιούνται εγκαταστάσεις χαμηλού κόστους αλλά και τεχνολογίας (Γεωργακάκης, 2009β).

I.1.1. Διαδικασία αναερόβιας χώνευσης

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Γεωργακάκης, 2009β· Ahring, 2003· Yadvica et al., 2003) η αναερόβια χώνευση οργανικών ουσιών είναι μια βαθμιδωτή διεργασία που λαμβάνει χώρα σε τρεις κύριες φάσεις, με τη δράση ειδικών ομάδων βακτηρίων, ως εξής:

Στην πρώτη φάση πραγματοποιείται υδρόλυση των σύνθετων οργανικών ενώσεων, όπως λιπίδια, πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες, λίπη, νουκλεϊκά οξέα, κ.λπ. σε διαλυτή οργανική ουσία, δηλαδή σε ενώσεις κατάλληλες για χρήση ως πηγή ενέργειας και άνθρακα κυττάρων όπως μονοσακχαρίτες, αμινοξέα και άλλες απλές οργανικές ενώσεις. Στη φάση αυτή δρουν αναερόβια βακτήρια (*Bacterides*, *Clostridia*, κ.λπ.) και προαιρετικά βακτήρια (*Streptococci*, κ.λπ.)

Στη δεύτερη φάση πραγματοποιείται η αποικοδόμηση των τελικών προϊόντων της υδρόλυσης της πρώτης φάσης και ο σχηματισμός των οργανικών (πτητικών) οξέων, όπως το προπιονικό και το βουτυρικό, τα οποία με τη σειρά τους μετατρέπονται σε οξικό οξύ, με τη βοήθεια των προαναφερθέντων βακτηρίων. Επιπλέον απελευθερώνεται υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα σε μικρές ποσότητες.

Στην τρίτη φάση, πραγματοποιείται ο σχηματισμός του μεθανίου, κατά 67-70% με τη βοήθεια των οξεοτρόφων μεθανοβακτηρίων (*Methanosarcina spp.* και *Methanotherix spp.*), τα οποία αποικοδομούν τα οργανικά οξέα που σχηματίστηκαν κατά τη προηγούμενη φάση. Το υπόλοιπο 23-30% του μεθανίου προέρχεται από αναγωγή του υδρογόνου και του διοξειδίου του άνθρακα, μέσω υδρογονοτρόφων μεθανοβακτηρίων (*Methanobacterium spp.*, *Methanococcus spp.*, κ.λπ.).

I.1.2. Συστήματα αναερόβιας χώνευσης

Τα αναερόβια συστήματα εφαρμόζονται κατεξοχήν σε απόβλητα μεγάλου οργανικού φορτίου, με τιμές BOD₅ πάνω από 5.000mg/L, όπως είναι τα πτηνο-κτηνοτροφικά και ορισμένα γεωργοβιομηχανικά. Τα συστήματα εφαρμογής της αναερόβιας χώνευσης διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους, τις ανοιχτές χωμάτινες αναερόβιες δεξαμενές και το σύστημα κλειστών αναερόβιων δεξαμενών παραγωγής βιοαερίου.

I.1.2.1. Ανοιχτές χωμάτινες δεξαμενές

Το συγκεκριμένο σύστημα διακρίνεται για την απλότητα και την οικονομικότητά του. Είναι το σύστημα, που κατεξοχήν ταιριάζει σε υγρά πτηνο - κτηνοτροφικά απόβλητα, αλλά και σε κάθε άλλη κατηγορία υγρών αποβλήτων μεγάλου οργανικού φορτίου. Λόγω της μεγάλης προσαρμοστικότητας και της ευκολίας συνδυασμού του με άλλα συστήματα, μπορεί να θεωρηθεί ως το βασικό σύστημα επεξεργασία αποβλήτων μεγάλου ρυπαντικού φορτίου.

Το σύστημα αποτελείται από μια ή δυο συνεχόμενες βαθιές δεξαμενές, οι οποίες κατασκευάζονται με εκσκαφή μέσα στο έδαφος ή απλή επιχωμάτωση πάνω σ' αυτό ή και συνδυασμός των δυο. Σχετικά με τη διαφυγή υγρών στο έδαφος, η σωστή διαδικασία κατασκευής των τοιχωμάτων και η ορθή έναρξη λειτουργίας της δεξαμενής, μειώνουν αισθητά τις απώλειες, οι οποίες μετά την παρέλευση μικρού χρονικού διαστήματος κατά το οποίο οι πόροι και τυχόν ανοίγματα του εδάφους γεμίζουν με οργανικά υλικά. Για την μείωση της διαπερατότητας του εδάφους μπορεί να εφαρμοστεί και προσθήκη αλάτων K και Na (Na₂CO₃, NaHCO₂, NaCl, NaNO₃ κ.λπ.).

Το υγρό περιεχόμενο μιας ανοιχτής χωμάτινης δεξαμενής διακρίνεται:

- στο κατώτερο τμήμα ή τη ζώνη του ιζήματος,
- στο ενδιάμεσο τμήμα ή τη ζώνη υπερκείμενων υγρών και

- στο ανώτερο τμήμα ή τη ζώνη επιπλεόντων συστατικών ή κρούστας.

Η αποδοτική λειτουργία μιας ανοιχτής χωμάτινης δεξαμενής που σημαίνει τη μέγιστη δυνατή βιοαποικοδόμηση του οργανικού φορτίου των αποβλήτων και την ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων οσμών, καθώς και της συσσώρευσης ιζήματος στον πυθμένα και τα πρανή της, γίνεται μόνο σε ευνοϊκές συνθήκες που ευνοούν την δραστηριοποίηση των μικροοργανισμών, οι οποίες είναι:

- pH μεταξύ 6,8 και 7,4
- ηλεκτρική αγωγιμότητα 6.000-8.000μS/cm
- πάχος του λασπώδους ιζήματος και
- θερμοκρασίες υγρών πάνω από 15°C (Γεωργακάκης, 2009β).

1.1.2.2. Κλειστές δεξαμενές παραγωγής βιοαερίου-βιοαντιδραστήρες

Το σύστημα των κλειστών δεξαμενών παραγωγής βιοαερίου συνιστάται από ειδικής κατασκευής εγκαταστάσεις, γνωστές ως αναερόβιοι χωνευτήρες ή βιοαντιδραστήρες. Το παραγόμενο βιοαέριο, λόγω του μεθανίου που περιέχει μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά, με αποτέλεσμα, το συγκεκριμένο σύστημα να συνιστά μια περίπτωση ιδιαίτερου οικονομικού ενδιαφέροντος στα πλαίσια της προώθησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις μέρες μας (Γεωργακάκης, 2009β).

Ιστορικά, ο λόγος για τον οποίο αναπτύχθηκε η τεχνολογία παραγωγής βιοαερίου είναι η ανάγκη για εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Η σύγχρονη κοινωνία παράγει μεγάλες ποσότητες αποβλήτων που συνιστούν μια τεράστια απειλή για το περιβάλλον και την υγεία ανθρώπων και ζώων. Η αναερόβια χώνευση είναι ένας τρόπος εκμετάλλευσης διαφορών τύπων αποβλήτων με στόχο την παραγωγή ενέργειας, η οποία είναι μείζονος σημασίας σε παγκόσμιο επίπεδο (Ahring, 2003).

Για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής βιοαερίου έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες και τύποι των βιοαντιδραστήρων, που βασίζονται σε συνθήκες

λειτουργίας των τελευταίων. Έτσι, μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες λειτουργίας:

- θερμοφίλη με εύρος 45-65°C, μεσόφιλη με εύρος 20-45°C και ψυχρόφιλη με θερμοκρασίες κάτω των 20°C,
- μονοφασική ή διφασική (ή πολυφασική), ανάλογα με τον αριθμό των αντιδραστήρων που συμμετέχουν στο σύστημα επεξεργασίας,
- ημισυνεχούς ή ασυνεχούς (batch) τροφοδοσίας, όπου στην πρώτη περίπτωση ο αντιδραστήρας τροφοδοτείται συνεχώς με απόβλητα σε τακτά χρονικά διαστήματα ενώ συγχρόνως αποβάλλεται από την έξοδο ίση ποσότητα επεξεργασμένων εκροών. Στη δεύτερη περίπτωση η τροφοδοσία πραγματοποιείται μόνο μια φορά κατά την έναρξη της λειτουργίας του αντιδραστήρα, ακολουθεί η σφράγιση του και κατά τη λήξη της διαδικασίας ο αντιδραστήρας εκκενώνεται,,
- πλήρους ανάμιξης ή εμβολοειδούς ροής ανάλογα με την ενεργή ή παθητική αντίστοιχα, ανάμιξη των εισερχομένων υλικών
- υγρή ή ξηρή χώνευση, ανάλογα με το επίπεδο των ολικών στερεών των αποβλήτων. Όταν τα τελευταία έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (ολικά στερεά της τάξης του 10% ή και λιγότερο), τότε η αναερόβια χώνευση ονομάζεται υγρή, ενώ όταν η περιεκτικότητα των αποβλήτων σε ολικά στερεά είναι αυξημένη (της τάξης του 30-40%), έχουμε την περίπτωση της ξηρής χώνευσης.

I.1.3. Παράμετροι ομαλής λειτουργίας βιοαντιδραστήρων

Οι κυριότερες παράμετροι που ρυθμίζουν την διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης και κατ'επέκταση τη λειτουργία των αναερόβιων χωνευτήρων και την παραγωγή βιοαερίου, είναι οι εξής:

- **Θερμοκρασία**

Η θερμοκρασία επηρεάζει το ρυθμό της διεργασίας. Στη θερμοφιλή περιοχή τα επίπεδα παραγωγής βιοαερίου είναι υψηλότερα, συγκριτικά με τη μεσόφιλη. Ωστόσο, οι χαμηλές θερμοκρασίες ευνοούν τη σταθερότητα της αναερόβιας χώνευσης και την κάνουν λιγότερο ευπροσβλητή στις απότομες μεταβολές θερμοκρασίας και φορτίου (Γεωργακάκης, 2009β· Bernet and Beline, 2008).

Γενικά η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης σε υψηλότερη θερμοκρασία έχει θετική επίδραση στη μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών, αλλά οδηγεί σε αστάθεια του συστήματος (Chen et al., 2007). Αναερόβια χώνευση μπορεί να πραγματοποιηθεί και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (20°C ή και λιγότερο) αλλά με πολύ χαμηλότερη παραγωγή βιοαερίου συγκριτικά με τις προηγούμενες περιπτώσεις (Bernet and Beline, 2008).

- **pH και αλκαλικότητα**

Το ευνοϊκότερο εύρος pH για την αναερόβια χώνευση είναι μεταξύ 6,8 και 7,5, αλλά η διαδικασία εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα ικανοποιητικά ακόμα και μεταξύ 6,0 και 8,5. (Γεωργακάκης, 2009β· Angelidaki et al., 2003). Πτώση του pH κάτω από την τιμή 6,5 είναι περισσότερο επικίνδυνη για την ομαλή διαδικασία από απ'ότι η άνοδος του πάνω από την τιμή 8,0.

Ως αλκαλικότητα (ή και ρυθμιστική ικανότητα) νοείται το ισοζύγιο του διοξειδίου του άνθρακα και των διττανθρακικών ιόντων που προβάλλουν αντίσταση σε σημαντικές και απότομες αλλαγές pH. Θεωρείται ως πιο αξιόπιστη μέθοδος εκτίμησης της σταθερότητας ή της αστάθειας της χώνευσης, από την απλή μέτρηση

της τιμής του pH, καθώς η συσσώρευση λιπαρών οξέων θα μειώσει την ρυθμιστική ικανότητα γρηγορότερα απ'ότι θα μειώσει το pH (Ward et al., 2007).

Η τιμή του pH εντός του χωνευτήρα όπου λαμβάνει χώρα η αναερόβια χώνευση, αποτελεί ένδειξη της όξινης ή βασικής φύσης των αποβλήτων. Οι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν το pH κατά την εξέλιξη της αναερόβιας χώνευσης είναι αρκετοί. Πιο συγκεκριμένα, τα οργανικά οξέα και το διοξείδιο του άνθρακα το μειώνουν, ενώ η αμμωνία οδηγεί στην αύξησή του. Συνεπώς, στην ελεύθερη πτώση του pH παρουσία οξέων, το σύστημα αντιστέκεται με την αλκαλικότητά του, η οποία αυξάνεται παρουσία αμμωνίας (Γεωργακάκης, 2009β· Angelidaki et al., 2003).

- **Οργανικό φορτίο**

Με τον όρο οργανικό φορτίο εννοούμε το ποσό οργανικής ουσίας εκφρασμένη σε χημική ζήτηση οξυγόνου (COD) ή πτητικά στερεά (Π.Σ.), ανά μονάδα ενεργού όγκου του χωνευτήρα και ανά μονάδα χρόνου. Πρόκειται για μια πολύ σημαντική παράμετρο, εφόσον καθορίζει το ρυθμό παραγωγής βιοαερίου και εκφράζει τη σταθερότητα του συστήματος. Ανάλογα με την προέλευση των αποβλήτων υπάρχει μια βέλτιστη τιμή οργανικού φορτίου για την οποία προκύπτει ένας μέγιστος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου (Γεωργακάκης, 2009β).

- **Λόγος άνθρακα προς άζωτο (C/N)**

Μεγάλος λόγος C/N οδηγεί στην ταχεία έλλειψη του αζώτου με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της πρωτεϊνικής σύνθεσης στα κύτταρα των μικροοργανισμών και την κατ' επέκταση παρεμπόδιση της ανάπτυξής τους. Μικρός λόγος C/N οδηγεί στην αύξηση της συγκέντρωσης της αμμωνίας που οδηγεί το pH σε τιμές πάνω από 8,5. (Μάρκου, 2009). Τιμές 16/1 έως 18/1 (εύρος 13/1-24/1) θεωρούνται ως άριστες καθόσον επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση σε μεθάνιο και επαρκή σταθερότητα των βιολογικών διεργασιών (Γεωργακάκης, 2009β).

- **Υδραυλικός χρόνος παραμονής**

Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής εκφράζει το μέσο χρόνο που θα πρέπει να παραμείνουν τα απόβλητα στον αντιδραστήρα και εκφράζεται σε ημέρες.

Όσο πιο μεγάλος είναι ο υδραυλικός χρόνος παραμονής, τόσο καλύτερη η επεξεργασία των αποβλήτων και μεγαλύτερη η μείωση του φορτίου και των οσμών που επιτυγχάνεται. Ωστόσο, απαιτείται μεγαλύτερος όγκος εγκατάστασης, οπότε και υψηλότερο κόστος. Στην αντίθετη περίπτωση, ένας μικρότερος υδραυλικός χρόνος εγκυμονεί τον κίνδυνο απομάκρυνσης του ενεργού πληθυσμού των μικροοργανισμών του περιεχομένου του αντιδραστήρα (Γεωργακάκης, 2009β· Yadvika et al., 2003).

- **Ανάδευση**

Η ανάδευση του περιεχομένου ενός αντιδραστήρα είναι απαραίτητη για την στενότερη επαφή μεταξύ των μικροοργανισμών και του υλικού προς επεξεργασία (υπόστρωμα), η οποία με την σειρά της έχει ως αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση της αναερόβιας επεξεργασίας. Η διέγερση αυτή μπορεί να είναι αποτέλεσμα της καθημερινής τροφοδότησης του αντιδραστήρα ή να πραγματοποιηθεί με διάφορες τεχνικές, όπως για παράδειγμα με εγκατάσταση εμβόλων, ακροφυσίων ή και απλών σηληνώσεων διοχέτευσης αέρα στο εσωτερικό του χωνευτήρα (Yadvika et al., 2003).

- **Πτητικά λιπαρά οξέα**

Η μέτρηση της συγκέντρωσης των πτητικών λιπαρών οξέων, τα οποία είναι ενδιάμεσα προϊόντα για την μετατροπή της οργανικής ουσίας σε CH₄ και CO₂, είναι σημαντική γιατί δείχνει άμεσα την δραστηριότητα συγκεκριμένων βακτηριακών ομάδων και την αναμενόμενη παρεμπόδιση από την συσσώρευση συγκεκριμένων οξέων στον αντιδραστήρα (Μάρκου, 2009).

Τα σημαντικότερα για την αναερόβια χώνευση πτητικά λιπαρά οξέα είναι κυρίως το οξικό και δευτερευόντως τα προπιονικό, βουτυρικό, βαλερικό και ισοβαλερικό. Το πρώτο, παράγεται κατά την αναερόβια χώνευση όλων των οργανικών συστατικών και περίπου το 72% της οργανικής ουσίας μετατρέπεται απευθείας σε οξικό, πριν αυτό μετατραπεί τελικά σε μεθάνιο.

Η συσσώρευση πτητικών λιπαρών οξέων στο υγρό περιεχόμενου ενός αναερόβιου χωνευτήρα μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στην ανερόβια χώνευση, αν η ρυθμιστική ικανότητα του συστήματος δεν επαρκεί και το pH δεν μπορέσει να διατηρηθεί σε επιθυμητά επίπεδα. Η επιθυμητή συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων σε έναν αναερόβιο χωνευτήρα κυμαίνεται μεταξύ 50-250mg/L (Γεωργακάκης, 2009β).

- **Θρεπτικά συστατικά - Τοξικότητα**

Για την απρόσκοπτη ανάπτυξη των μικροοργανισμών είναι απαραίτητα ορισμένα θρεπτικά στοιχεία, όπως άζωτο και φώσφορος.

Τα μεθανοβακτήρια συνήθως θεωρούνται τα πιο ευαίσθητα σε τοξικότητες, σε σχέση με τους άλλους μικροοργανισμούς της αναερόβιας χώνευσης. Σε πολλές περιπτώσεις, η τοξικότητα εμφανίζεται να είναι αντιστρεπτή εφόσον έχει περάσει μια περίοδος προσαρμογής του συστήματος (Angelidaki et al., 2003). Οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι τα μεθανοβακτήρια μπορούν να αντέξουν τη δράση τοξικών παραγόντων και επομένως να διατηρήσουν το δυναμικό απόδοσης της αναερόβιας χώνευσης, κάτω από αντίξοες σχετικά συνθήκες (Γεωργακάκης, 2009β).

- **Άλλοι παράγοντες**

Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση είναι (Ward et al., 2007· Yadnika et al., 2003):

- ο σχεδιασμός και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του χωνευτήρα,
- ο συνδυασμός πρώτων υλών,
- η προεπεξεργασία με αλκάλια ή οξέα, θερμότητα ή ακόμα και υπερήχους, με στόχο τη διάσπαση των σύνθετων οργανικών μορίων σε απλούστερα,
- η εγκατάσταση σύγχρονων συστημάτων ελέγχου και διατήρησης επιθυμητών συνθηκών λειτουργίας του αντιδραστήρα,
- το μέγεθος των τεμαχιδίων της πρώτης ύλης.

I.1.4. Τομείς εφαρμογής συστημάτων βιοαντιδραστήρων

Η αναερόβια επεξεργασία μέσω του συστήματος των βιοαντιδραστήρων, σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως σε τέσσερις διαφορετικούς τομείς που αφορούν στην επεξεργασία αποβλήτων:

I.1.4.1. Ιλύς υγρών αστικών αποβλήτων

Η πρωτογενής και δευτερογενής ιλύς που παράγεται κατά τη διάρκεια της αερόβιας επεξεργασίας των υγρών αστικών αποβλήτων, μπορεί να επεξεργαστεί σε αναερόβιες συνθήκες. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση και τη μείωση της τελικής ποσότητας της ιλύος, με ταυτόχρονη παραγωγή βιοαερίου. Το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εν μέρει κάλυψη των αναγκών σε ενέργεια των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Η τεχνική αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη και εφαρμόζεται σε βιομηχανικές χώρες, σε συνδυασμό με τη λειτουργία προηγμένων εγκαταστάσεων επεξεργασίας οικιακών λυμάτων. (Angelidaki et al., 2003)

Πρόκειται για ένα εύκολα αποδομήσιμο υλικό, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο ποσοστό της οργανικής ουσίας που περιέχει να διατίθεται για την αναερόβια επεξεργασία. Γι' αυτό το λόγο έχει υψηλές αποδόσεις σε μεθάνιο. Χαρακτηριστικά αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Ward et al., 2007) πως η παραγωγή μεθανίου από επεξεργασία πρωτογενούς ιλύος ήταν $0,59 \text{ m}^3/\text{kg}$ Π.Σ.

I.1.4.2. Στερεά αστικά απόβλητα

Πρόκειται για μια σχετικά νέα εφαρμογή της αναερόβιας χώνευσης σε βιομηχανική κλίμακα, και αφορά στην επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των στερεών αστικών απορριμμάτων. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι, αρχικά η μείωση της ποσότητας των αποβλήτων στα συμβατικά συστήματα επεξεργασίας των

συγκεκριμένων αποβλήτων, όπως για παράδειγμα στους χώρους υγειονομικής ταφής και στις μονάδες αποτέφρωσης, και δευτερευόντως η ανακύκλωση των στοιχείων που υπάρχουν στη συγκεκριμένη κατηγορία αποβλήτων, στο γεωργικό τομέα (Angelidaki et al., 2003).

Η απόδοση σε μεθάνιο κατά την επεξεργασία των αστικών απορριμμάτων, είναι ίσως η περισσότερο μεταβάλλομενη καθώς εξαρτάται από διαφορους παράγοντες. Ορισμένοι από αυτούς τους παράγοντες είναι η μέθοδος διαλογής των απορριμμάτων, η οποία μπορεί να είναι μηχανική ή χειρονακτική και η εποχή του έτους στην οποία πραγματοποιήθηκε η συλλογή τους. Για παράδειγμα κατά την καλοκαιρινή περίοδο, τα αστικά απορρίμματα συνήθως περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες κηπευτικών προϊόντων, με αποτέλεσμα τη χαμηλότερη απόδοση σε μεθάνιο.

Επίσης, σημασία έχει και η περιοχή από την οποία συλλέχθηκαν τα απορρίμματα, με τις διαφοροποιήσεις στη παραγωγή μεθανίου να οφείλονται στον διαφορετικό τρόπο ζωής ή τις πολιτιστικές διαφορές των ανθρώπων, που με την σειρά τους διαφοροποιούν τις πρακτικές ανακύκλωσης που ακολουθούν και τα είδη απορριμμάτων που παράγονται από την κατανάλωση τροφίμων. Για παράδειγμα, τα απορρίμματα τροφίμων που παράγει μια κοινωνία που καταναλώνει μεγάλες ποσότητες κρέατος, έχουν μεγαλύτερο δυναμικό παραγωγής μεθανίου από μια χορτοφαγική κοινωνία (Ward et al., 2007).

Πίνακας I 1.1 Επίπεδα παραγωγής μεθανίου από διάφορα αστικά στερεά απόβλητα

Στερεά αστικά απόβλητα	Παραγωγή μεθανίου (m³/kg Π.Σ.)
Μαγειρεμένο κρέας	0,482
Κυτταρίνη	0,356
Βρασμένο ρύζι	0,294
Κράμβη	0,277
Ανάμεικτα απόβλητα τροφών	0,472
Γρασίδι	0,209
Απορρίμματα Φύλλα	0,123
από κήπους Κλαδιά	0,134
Μίγμα	0,143
Χαρτί	0,369

Πηγή: Ward et al., 2007

I.1.4.3. Υγρά βιομηχανικά απόβλητα

Τα υγρά απόβλητα τα οποία προέρχονται από τις βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων, βιομάζας ή προϊόντων ζύμωσης (π.χ. γιαούρτι) μπορούν να επεξεργαστούν με αναερόβια χώνευση. Οι προαναφερόμενοι τύποι υγρών αποβλήτων συχνά έχουν ιδιαίτερος υψηλό φορτίο και μπορούν να επεξεργαστούν επιτυχώς σε αναερόβιες συνθήκες, πριν από την απευθείας διάθεσή τους στο περιβάλλον ή στο αποχετευτικό σύστημα. Το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των προαναφερομένων εγκαταστάσεων. Λόγω των περιβαλλοντικών προβλημάτων και των δαπανών σε περίπτωση εναλλακτικής διάθεσης των συγκεκριμένων λυμάτων, οι εφαρμογές της αναερόβιας επεξεργασίας των τελευταίων συνεχώς αυξάνεται (Angelidaki et al., 2003).

I.1.4.4. Γεωργικά απόβλητα

Ο όρος ‘γεωργικά απόβλητα’ αποδίδεται σε κάθε γεωργικής προέλευσης υποπροϊόν ή παράγωγο, που είτε έπαψε να έχει οποιαδήποτε οικονομική αξία για τον παραγωγό, είτε ο παραπέρα χειρισμός ή επεξεργασία του είναι οικονομικά ασύμφορη και ως εκ τούτου θεωρείται ‘άχρηστο’ και απομακρύνεται από τη γεωργική επιχείρηση, σε στερεή ή υγρή μορφή (Γεωργακάκης, 2008).

Η επεξεργασία των αποβλήτων που προέρχονται από ζώα, στοχεύει στην παραγωγή ενέργειας και τη βελτίωση των λιπαντικών ιδιοτήτων των αποβλήτων. Εξαιτίας της αυστηρότητας των κανονισμών που αφορούν στη χρήση, τη διανομή και την αποθήκευση αυτών των αποβλήτων, πρόκειται για μια συνεχώς αυξανόμενη εφαρμογή, ιδίως σε χώρες με μεγάλο δυναμικό ζωικής παραγωγής (Angelidaki et al., 2003).

Από την ερευνητική εμπειρία του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γ.Π.Α. και τη διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει πως οι τιμές ογκομετρικής παραγωγής βιοαερίου κυμαίνονται από **0,8 μέχρι και 2,4 m³/m³_{ωφ.χων} - ημέρα**, ανάλογα με το

είδος και τη σύσταση των εισερχόμενων υγρών στον αναερόβιο αντιδραστήρα (Γεωργακάκης, 2009β).

Ένας άλλος τομέας των γεωργικών αποβλήτων που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας, είναι τα υπολείμματα καλλιεργειών. Αυτά αναφέρονται σε σημαντικές ποσότητες αγροσιμοποίητων στελεχών, άχυρων και φλοιών που παράγονται από διάφορες καλλιέργειες. Ωστόσο, τα υπολείμματα καλλιεργειών συνήθως έχουν υψηλές περιεκτικότητες λιγνοκυτταρινών, και τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης τους, όπως η χαμηλή απόδοση βιοαερίου, συνδέεται με αυτή την υψηλή περιεκτικότητα σε λιγνίνη ή υψηλό λόγο C/N. Επιπλέον, τα κατάλοιπα των φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων που ενδεχομένως βρίσκονται στα υπολείμματα καλλιεργειών ή τα εκχυλίσματα ρητίνης που εκκρίνουν φυσιολογικά για προστασία από τις βιολογικές βλάβες, θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά τη διαδικασία της χώνευσης (Chen et al., 2007).

I.1.5. Βιοαέριο

Το παραγόμενο από την αναερόβια χώνευση, βιοαέριο, είναι μίγμα διαφόρων αερίων (Γεωργακάκης, 2009β):

- μεθανίου, κατά 40-70%,
- διοξειδίου του άνθρακα, κατά 30-60%,
- υδρογόνου, κατά 0-1%,
- υδροθείου, κατά 0-3% και
- άλλων (αμμωνίας, υδρατμών κ.λπ.), κατά 0-2%.

Η τιμή του λόγου μεθάνιο/διοξειδίου του άνθρακα (CH_4/CO_2) εξαρτάται από το βαθμό οξείδωσης της οργανικής ύλης και αναγωγής του προκύπτοντος υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα προς μεθάνιο. Όσο περισσότερο οξειδώνεται η οργανική ουσία και ανάγεται ο άνθρακας της οργανικής ουσίας προς μεθάνιο, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του λόγου CH_4/CO_2 .

Από τα ίχνη άλλων αερίων, το υδρόθειο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθόσον θα πρέπει να αφαιρείται από το βιοαέριο, πριν το τελευταίο χρησιμοποιηθεί για ενεργειακούς σκοπούς, λόγω του έντονα διαβρωτικού, κυρίως θειϊκού οξέος, που παράγεται κατά την οξείδωσή του (Γεωργακάκης, 2009β).

I.1.5.1. Χρήση του βιοαερίου

Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, ανάλογα με τη φύση της πηγής και την τοπική ζήτηση για μια συγκεκριμένη μορφή ενέργειας. Γενικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για (Σιούλας et al., 2010):

- Παραγωγή θερμότητας μέσω άμεσης καύσης, σε λέβητες ή καυστήρες. Πρόκειται για τον απλούστερο τρόπο χρήσης του βιοαερίου και εφαρμόζεται στις αναπτυγμένες χώρες σε καυστήρες φυσικού αερίου. Το βιοαέριο μπορεί να καεί για την παραγωγή θερμότητας είτε επί τόπου, είτε να μεταφερθεί με

σωληνώσεις στους τελικούς χρήστες. Για τις εφαρμογές θέρμανσης το βιοαέριο δεν χρειάζεται καμία αναβάθμιση, και το επίπεδο μόλυνσης δεν περιορίζει την χρήση του. Εντούτοις, το βιοαέριο πρέπει να υποβληθεί σε συμπύκνωση και αφαίρεση των σωματιδίων, συμπίεση, ψύξη και αφυδάτωση.

- Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ), η οποία είναι τυπική εφαρμογή σε πολλές ανεπτυγμένες χώρες και θεωρείται ως μια πολύ αποδοτική χρήση. Πριν από τη μετατροπή της ΣΗΘ, το βιοαέριο στραγγίζεται και ξηραίνεται. Μια μονάδα ΣΗΘ που χρησιμοποιεί μηχανή εσωτερικής καύσης έχει αποδοτικότητα μέχρι 90% και παράγει 35% ηλεκτρική ενέργεια και 65% θερμότητα. Η παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια, στην περίπτωση που δεν πωλείται στο δίκτυο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως ενέργεια διεργασίας για τον ηλεκτρικό εξοπλισμό (αντλίες, συστήματα ελέγχου, αναδευτήρες). Η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις βιομηχανικές διεργασίες, στις γεωργικές δραστηριότητες ή για τη θέρμανση κτιρίων. Ο καταλληλότερος χρήστης είναι η βιομηχανία, δεδομένου ότι η ζήτηση είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ξήρανση προϊόντων, τεμαχίων ξύλου ή για το διαχωρισμό του κομπόστ.
- Εφαρμογές στον τομέα των μεταφορών, ως καύσιμο οχημάτων. Πρόκειται για μια τεχνολογία με μεγάλο δυναμικό και σημαντικά κοινωνικοοικονομικά οφέλη. Το βιοαέριο χρησιμοποιείται ήδη ως καύσιμο οχημάτων σε χώρες όπως η Σουηδία, η Γερμανία και η Ελβετία. Το αναβαθμισμένο βιοαέριο (βιομεθάνιο) θεωρείται ότι έχει το υψηλότερο δυναμικό ως καύσιμο οχημάτων, συγκρινόμενο με άλλα βιοκαύσιμα, και έχει ακόμη υψηλότερο δυναμικό εάν χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη απόβλητα αντί των ενεργειακών καλλιεργειών. Η χρήση του βιομεθανίου έναντι της βενζίνης ή ντίζελ, έχει το πλεονέκτημα των σημαντικά μειωμένων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ανάλογα με το υπόστρωμα πρώτης ύλης και τον τρόπο με τον οποίο παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια (από συμβατικές ή ανανεώσιμες πηγές), που χρησιμοποιείται για την αναβάθμιση, και την συμπίεση του αερίου.

Επίσης μειώνονται δραστικά οι εκπομπές των σωματιδίων και αιθάλης, ακόμη και σε σύγκριση με πολύ σύγχρονες μηχανές ντίζελ, που εξοπλίζονται με φίλτρα σωματιδίων. Επίσης δραστικά παρατηρείται σημαντική μείωση των εκπομπών των NO_x , και των μη μεθανογενών υδρογονανθράκων.

- Έγχυση στο δίκτυο φυσικού αερίου. Το αναβαθμισμένο βιοαέριο (βιομεθάνιο) μπορεί να εγχυθεί και να διανεμηθεί μέσω του δικτύου του φυσικού αερίου, αφού έχει συμπιεστεί στην πίεση των αγωγών. Σύμφωνα με τον κανονισμό της ΕΕ, η πρόσβαση στο δίκτυο του αερίου είναι εγγυημένη για όλους τους προμηθευτές βιοαερίου (Ευρωπαϊκό Κονοβούλιο, 2001). Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα είναι ότι το δίκτυο συνδέει την περιοχή παραγωγής του βιομεθανίου, η οποία συνήθως είναι σε αγροτικές περιοχές με τις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές. Είναι επίσης δυνατό να αυξηθεί η παραγωγή του βιοαερίου σε μια απομακρυσμένη περιοχή, χωρίς ανησυχία για τη χρήση της περίσσεια θερμότητας. Η έγχυση στο δίκτυο σημαίνει ότι η εγκατάσταση βιοαερίου χρειάζεται μόνο μία μικρή μονάδα ΣΗΘ για την παραγωγή της ενέργειας διεργασίας ή έναν καυστήρα βιοαερίου. Πρέπει να τονιστεί το γεγονός όμως, πως πρόκειται για μια αρκετά νέα τεχνολογία και χρειάζεται περαιτέρω ανάπτυξη. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε χώρες με σημαντική εμπειρία σε θέματα βιοαερίου όπως για παράδειγμα στην Γερμανία.
- Παραγωγή ηλεκτρισμού από κυψέλες καυσίμου ή μικροστρόβιλους. Εξαιτίας των πολύ υψηλών δαπανών επένδυσης όλων των κυψελών καυσίμου βιοαερίου (12.000€/kW), δεν πρόκειται για διαθέσιμα εμπορεύσιμα συστήματα, ακόμη. Και οι μικροστρόβιλοι βιοαερίου είναι πάρα πολύ ακριβοί ώστε να είναι οικονομικά ανταγωνιστικοί, αλλά γίνονται πειράματα με το βιοαέριο και αναμένονται μακροπρόθεσμα μειώσεις στα κόστη.

I.1.5.2.

Το βιοαέριο στην Ελλάδα

Στην δεκαετία του '80, στην Ελλάδα υλοποιήθηκαν λίγα έργα για την ενεργειακή αξιοποίηση του βιαερίου, με πρώτη ύλη κυρίως κτηνοτροφικά απόβλητα και απόβλητα από βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων, όπως απόβλητα ελαιοτριβείων. Κάποια από αυτά ήταν επιδεικτικά έργα τα οποία μετά τον αρχικό ενθουσιασμό και την εξασφάλιση επιστημονικής υποστήριξης σταμάτησαν την λειτουργία τους. Σήμερα, η εκμετάλλευση του βιοαερίου αποτελεί μια γνωστή τεχνολογία στις περιπτώσεις των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) και των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ).

Γενικά, η αναερόβια χώνευση χρησιμοποιείται ως μία μέθοδος διαχείρισης αποβλήτων, η οποία δεν συνοδεύεται από την παραγωγή βιοαερίου και ενέργειας (τουλάχιστον όχι σε ευρεία κλίματα μέχρι στιγμής). Επιπρόσθετα, η διάθεση ανεπεξέργαστων αποβλήτων δεν έχει δημιουργήσει ακόμη σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα σε σύγκριση με τις χώρες της Δυτικής Ευρώπης. Στις περισσότερες των περιπτώσεων η αρχή 'ο ρυπαίνων πληρώνει' δεν εφαρμόζεται επαρκώς αν και η ελληνική περιβαλλοντική νομοθεσία είναι αυστηρή.

Σύμφωνα με το Υπουργείο Ανάπτυξης, το 2006 οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) συνεισέφεραν 1,8 ΜΤΠΠ (ΜεγαΤόνοι Ισοδύναμου Πετρελαίου) της ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης. Η βιομάζα συνεισέφερε το 56% αυτού καλύπτοντας κυρίως θερμικές ανάγκες. Το βιοαέριο που παρήχθη από ΕΕΛ, ΧΥΤΑ και μια δύο βιομηχανικές εφαρμογές συνεισέφερε 36.000 ΤΠΠ, κυρίως λόγω ηλεκτροπαραγωγής. Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων βιοαερίου ανήλθε σε 24 MW, με δεδομένο ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ ήταν 3.894 MW. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο ανήλθε σε 92 GWh (1,1% στο σύνολο της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ) (Σιούλας et al., 2010).

I.2. Πτηνο-κτηνοτροφικά απόβλητα

Οι σημαντικότερες κατηγορίες του πτηνοκτηνοτροφικού τομέα είναι τα πτηνοτροφεία, τα βουστάσια, τα αιγο-προβατοστάσια και τα χοιροστάσια. Η ημερήσια παραγωγή αποβλήτων από την εκτροφή ζώων είναι 4.550m^3 δίνοντας ένα ετήσιο ποσό ίσο με $16.610.000\text{ m}^3$. Όμως δεν πρέπει να αγνοείται το γεγονός ότι τα απόβλητα αυτά προέρχονται από πολλές μονάδες μικρού έως μεσαίου μεγέθους παραδοσιακού τύπου, που δυσχεραίνει την συλλογή και τη μεταφορά τους (Skoulou and Zabaniotou, 2005).

Τα απόβλητα των πτηνο-κτηνοτροφικών μονάδων είναι γενικά πυκνά απόβλητα, μικρού σχετικά όγκου και μεγάλου οργανικού φορτίου, συγκρινόμενα με τα απόβλητα των λοιπών βιομηχανιών τροφίμων ή τα υγρά αστικά απόβλητα. Εν τούτοις, είναι γενικά μικρότερου ρυπαντικού φορτίου και μεγαλύτερου ημερήσιου όγκου από τα διάφορα υποπροϊόντα των γεωργικών βιομηχανιών, όπως το τυρόγαλα των τυροκομείων, τον ορό στραγγιστού γιαουρτιού των εργοστασίων γάλακτος και των λιοζουμιών των ελαιοτριβείων.

Τα υγρά απόβλητα των πτηνο-κτηνοτροφικών μονάδων χαρακτηρίζονται από μεγάλη συγκέντρωση αιωρούμενων (καθιζήσιμων και επιπλεόντων) στερεών, που εκδηλώνεται με το σχηματισμό ιζήματος στον πυθμένα και κρούστας στην επιφάνεια των δεξαμενών συλλογής και αποθήκευσής τους (Γεωργακάκης, 2008).

I.2.1. Επεξεργασία πτηνο-κτηνοτροφικών αποβλήτων

Με τα σημερινά δεδομένα, η σωστή διαχείριση των αποβλήτων αποτελεί υποχρέωση και ευθύνη του ιδιοκτήτη κάθε πτηνο-κτηνοτροφικής εγκατάστασης, όχι μόνο για λόγους καθαριότητας και αισθητικής των χώρων, αλλά γενικότερα για την προστασία του περιβάλλοντος της ευρύτερης περιοχής.

Η σωστή διαχείριση αφορά στην:

- απομάκρυνση των αποβλήτων από τις τάφρους και τα κανάλια αποχέτευσης, που υπάρχουν μέσα στα κτίρια εκτροφής καθώς και από τα προαύλια άσκησης των ζώων,
- αποτελεσματική επεξεργασία (κυρίως βιολογική) και αποθήκευσή τους,
- ελεγχόμενη διάθεση των επεξεργασμένων τελικών εκροών ή στερεών σε κατάλληλο αποδέκτη.

Ως καταλληλότερος αποδέκτης των επεξεργασμένων αποβλήτων των πτηνο-κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων θεωρείται σήμερα το γεωργικό έδαφος, εφόσον επιτρέπει την ανακύκλωση των αποβλήτων και την αξιοποίησή τους για λίπανση καλλιεργειών ή αυτοφυών φυτών. Επιπλέον εμπλουτίζουν και βελτιώνουν τη δομή και τη σύσταση του εδάφους με τις οργανικές ουσίες και τα θρεπτικά συστατικά, που περιέχουν. Η επεξεργασία που εφαρμόζεται είναι η κομποστοποίηση (βιολογική επεξεργασία) και το τελικό εμπορεύσιμο, πλούσιο σε οργανική ύλη, προϊόν (κομπόστ) χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό των καλλιεργούμενων εδαφών με θρεπτικά συστατικά και οργανική ουσία.

Αντίθετα για τα υγρά απόβλητα των βιομηχανιών τροφίμων, συνηθέστερος αποδέκτης, λόγω αυξημένων ημερήσιων όγκων παραγωγής είναι οι υδάτινοι αποδέκτες. Για το λόγο αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την επεξεργασία τους η οποία και αναλύεται στη συνέχεια (Γεωργακάκης, 2008).

1.2.1.1. Πρωτοβάθμια επεξεργασία υγρών πτηνο-κτηνοτροφικών αποβλήτων

Κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία υγρών πτηνο-κτηνοτροφικών αποβλήτων περιλαμβάνονται κυρίως διεργασίες φυσικού διαχωρισμού. Μέσω των τελευταίων απομακρύνονται αιωρούμενα, καθιζήσιμα και επιπλέοντα συστατικά, έτσι ώστε τα απόβλητα να οδηγηθούν στο επόμενο στάδιο, απαλλαγμένα κατά το δυνατό από συστατικά που θα προκαλούσαν σημαντικά προβλήματα στην παραπέρα επεξεργασία τους (δευτεροβάθμια ή βιολογική επεξεργασία). Στην πράξη εφαρμόζονται κυρίως:

- διαχωρισμός με μηχανικά μέσα απλούστερης μορφής όπως σχάρες ή στατικές ή περιστρεφόμενες σίτες-κόσκινα, ή ειδικά μηχανήματα, γνωστά ως μηχανικοί διαχωριστές (με βάση το κοσκίνισμα, τη φυγοκέντρωση, τη συμπίεση/φιλτράρισμα με κυλίνδρους ή κοχλία συμπίεσης)

- διαχωρισμός με καθίζηση-επίπλευση, όπου η καθίζηση διενεργείται με τη βοήθεια της βαρύτητας απευθείας ή μετά από κροκκίδωση-συσσωμάτωση με προσθήκη χημικών ουσιών, ενώ η επίπλευση γίνεται συνήθως με την εκτόνωση μίγματος πιεσμένου αέρα και υγρών στη μάζα των αποβλήτων χωρίς ή μετά από εφαρμογή κροκκίδωσης-συσσωμάτωσης με χημικά μέσα. Πολλές φορές, την καθίζηση ακολουθεί η 'πάχυνση' (*thickening*) του προκύπτοντος ιζήματος στην ίδια ή σε χωριστή δεξαμενή. Κατά τη διαδικασία αυτή το υλικό μειώνεται σε όγκο και υγρασία, καθόσον συμπιέζεται κάτω από το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων και έτσι διευκολύνεται ο παραπέρα χειρισμός του.

Πριν από την πρωτοβάθμια επεξεργασία είναι αναγκαίο, σε πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα των αποβλήτων γεωργικών βιομηχανιών, να γίνονται ενέργειες απομάκρυνσης εξαρχής, ακόμα και κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, ορισμένων κλασμάτων αποβλήτων με ιδιαίτερα αυξημένο ρυπαντικό φορτίο, για αποφυγή επιβάρυνσης του κύριου όγκου των αποβλήτων και σημαντικής αύξησης του κόστους επεξεργασίας. Τέτοια κλάσματα είναι το αίμα, από τους χώρους σφαγής ζώων και πτηνών στα σφαγεία και το τυρόγαλα, που απομένει μετά την απομάκρυνση του τυροπήγατος στα τυροκομεία.

Επίσης, η αποφυγή ανάμιξης μεγάλων ποσοτήτων νερού βροχής με τα απόβλητα (χοιροστασίων και βουστασίων), κατά το χειμώνα, με την τοποθέτηση υδρορροών ή περιορισμό των ζώων σε στεγασμένους χώρους, είναι ένα ακόμα ενδεικτικό παράδειγμα μείωσης του αρχικού όγκου των αποβλήτων.

Μια σημαντική επέμβαση προς την κατεύθυνση της ομαλής και σταθερής ροής των υγρών αποβλήτων προς τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας είναι και η πρόβλεψη εξισορρόπησης του ημερήσιου όγκου των αποβλήτων ή του νερού. Αυτό γίνεται με την προσωρινή τους αποθήκευση σε κεντρικές δεξαμενές συλλογής, πριν από τη διοχέτευσή τους στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Η χωρητικότητα των δεξαμενών εξισορρόπησης αντιστοιχεί στην παραγωγή αποβλήτων μιας ή το πολύ δύο ημερών. Τα απόβλητα ή το νερό εισέρχονται στη δεξαμενή εξισορρόπησης, με το ρυθμό που παράγονται, μετά τον σχαρισμό τους και τη μέτρηση της παροχής, όπου αυτή προβλέπεται.

Στη συνέχεια, τα απόβλητα αντλούνται από τη δεξαμενή εξισορρόπησης με σταθερή ωριαία παροχή προς τις εγκαταστάσεις πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, αφού πρώτα ομογενοποιηθούν με μηχανικά μέσα (αναδευτήρες) και, όπου είναι αναγκαίο, εξουδετερωθούν με χημικά μέσα (συνήθως διόρθωση του pH με προσθήκη οξέος ή βάσης) (Γεωργακάκης, 2009α).

1.2.1.2. Δευτεροβάθμια (βιολογική) επεξεργασία

Η δευτεροβάθμια επεξεργασία ανάλογα με τις συνθήκες που εδραιώνονται μέσα στις εγκαταστάσεις διακρίνεται σε αερόβια και αναερόβια. Η πρώτη περίπτωση, χαρακτηρίζεται από συνεχή παροχή αέρα (διάλυση οξυγόνου) στο υγρό περιεχόμενο των εγκαταστάσεων τους για διατήρηση αερόβιων συνθηκών. Αντίθετα η δεύτερη περίπτωση απαιτεί απουσία οξυγόνου και αναλύθηκε εκτενώς στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας μελέτης.

Συνοπτικά για την αερόβια επεξεργασία, πρόκειται μια μέθοδο μεγάλης αποτελεσματικότητας στην εξουδετέρωση των οσμών και του οργανικού φορτίου, που επιτρέπει συνήθως τη συνεχή διάθεση των τελικών εκροών σε υδάτινους αποδέκτες. Ωστόσο, η ανάγκη για συνεχή παρουσία επαρκούς ποσότητας οξυγόνου για τις μεταβολικές δραστηριότητες των αερόβιων μικροοργανισμών, την καθιστά πολύ δαπανηρή και πρακτικά ανεφάρμοστη σε απόβλητα μεγάλου ρυπαντικού φορτίου οργανικής προέλευσης, όπως είναι για παράδειγμα τα υγρά κτηνοτροφικά

απόβλητα. Μόνο κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις μπορεί να εφαρμοστεί συμπληρωματικά της αναερόβιας επεξεργασίας των παραπάνω αποβλήτων και όταν αυτό κρίνεται σκόπιμο. Αντίθετα, είναι το κατεξοχήν σύστημα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων μικρού ρυπαντικού φορτίου, όπως τα υγρά αστικά απόβλητα.

1.2.2. Παραγωγή και επεξεργασία αποβλήτων χοιροστασίων

Στα χοιροστάσια, τα απόβλητα είναι υγρής και ημιυγρής μορφής και συλλέγονται, σχεδόν στο σύνολό τους, σε αποχετευτικά κανάλια κάτω από πλήρως ή μερικώς σχαρωτά δάπεδα. Στα κανάλια αυτά πέφτουν και τα νερά πλυσίματος, καθώς και τα νερά από τυχόν διαρροές του συστήματος ύδρευσης των ζώων. Απομακρύνονται με φυσική ροή προς μια κεντρική δεξαμενή συλλογής, συνεχώς με υπερχειλίση ή ελεγχόμενα, με τη βοήθεια κινητών θυρίδων ή πλαστικών σιφωνίων εκκένωσης (Γεωργακάκης, 2008).

Κατά την επεξεργασία των αποβλήτων χοιροστασίων προηγείται η πρωτοβάθμια, που αναφέρεται κυρίως στον μηχανικό διαχωρισμό τους, και ακολουθεί η δευτεροβάθμια και πιο συγκεκριμένα η αναερόβια επεξεργασία τους στις ανοιχτές χωμάτινες δεξαμενές ή σε βιοαντιδραστήρες.

1.2.2.1. Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Από το εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών του Γ.Π.Α. σε συμφωνία με την ισχύουσα νομοθεσία, για την πρωτοβάθμια επεξεργασία των αποβλήτων χοιροστασίων προτείνεται

- *ο μηχανικός διαχωρισμός και στη συνέχεια, εφόσον απαιτείται φυσική καθίζηση (χωρίς προσθήκη χημικών συσσωμάτωσης ή διάλυση αέρα υπό πίεση) στα υγρά διαχωρισμού και πάχυνση του ιζήματος (Γεωργακάκης, 2009α).*



Εικόνα I.1 Μηχανικός διαχωριστής (αριστερά) και δεξαμενή υποδοχής υγρού κλάσματος αποβλήτων χοιροστασίου(δεξιά) (περιοχή Τανάγρας)

Η καθιέρωση, τα τελευταία 20 χρόνια, εγκαταστάσεων μηχανικού διαχωρισμού στερεών - υγρών στις χοιροτροφικές μονάδες είχε ως αποτέλεσμα και την παραγωγή στερεών, τα οποία συνιστάται να διατηρούνται (αποθηκεύονται) σε καλά στραγγιζόμενους και προστατευόμενους χώρους, γνωστούς ως κοπροσωρούς, για φυσική χώνευση πριν διατεθούν στο έδαφος ως εδαφοβελτιωτικά.

Αν προβλέπεται η συστηματική επέμβαση του παραγωγού για παραγωγή κομπόστας, τότε τα στερεά απόβλητα διευθετούνται σε σωρούς ή σειράδια κομποστοποίησης, τα οποία αναμοχλεύονται με μηχανικά μέσα κατά τακτά χρονικά διαστήματα (Γεωργακάκης, 2009α).



Εικόνα I.2 Συλλογή διαχωρισμένου στερεών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου (περιοχή Τανάγρας)

1.2.2.2. Αναερόβια (δευτεροβάθμια) επεξεργασία

Στην περίπτωση των ανοιχτών χωμάτινων αναερόβιων δεξαμενών (ΑΧΑΔ), η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων χοιροστασίου, είναι εξίσου αποτελεσματική με εκείνη της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας, όταν όμως εφαρμόζεται σωστά.

Τα αποτελέσματα διετούς έρευνας του Εργαστηρίου Γεωργικών Κοτασκευών, πάνω στη λειτουργία των ΑΧΑΔ σε δύο αντιπροσωπευτικά χοιροστάσια της χώρας μας (Γεωργακάκης, 2009β), αν και περιορισμένα παρέχουν μια πολύ ενθαρρυντική εικόνα για την αποτελεσματικότητα του συστήματος στην Ελλάδα. Η ελάχιστη έκλυση οσμών, που παρατηρήθηκε σε σταθερή ένταση, σχεδόν όλο το χρόνο συνηγορεί υπέρ της άποψης, ότι το σύστημα των ανοιχτών αναερόβιων δεξαμενών προσαρμόζεται ιδιαίτερα στη χώρα μας και γενικότερα στις μεσογειακές χώρες, λόγω των ευνοϊκών κλιματικών συνθηκών (μικρή ετήσια διακύμανση θερμοκρασίας). Το γεγονός αυτό επηρεάζει και το μέγεθος των απαιτούμενων δεξαμενών, οδηγώντας έτσι σε οικονομικότερες κατασκευές (Γεωργακάκης, 2009β).



Εικόνα I.3 Ανοιχτή χωμάτινη δεξαμενή αναερόβιας επεξεργασίας υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου (περιοχή Τανάγρας)

Ωστόσο τα περιβαλλοντικά προβλήματα και η επιτακτική ανάγκη για χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σε συνδυασμό με τα κοινωνικοοικονομικά οφέλη της αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση αποβλήτων

γενικότερα, καθιστούν την επεξεργασία των τελευταίων σε συτήματα κλειστών δεξαμενών παραγωγής βιοαερίου άκρως σημαντική. Στη χώρα μας σήμερα, λειτουργεί μόνο μια εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης αποβλήτων χοιροστασίου με παραγωγή βιοαερίου, στην περιοχή της Πρέβεζας (www.erevenanews.gr, www.inews.gr), ενώ άλλη μία πολλά υποσχόμενη εγκατάσταση έχει κατασκευαστεί στην περιοχή της Βεροιας η οποία όμως δεν λειτουργεί ακόμη.



Εικόνα I.4 Χοιροστάσιο στην Βέροια με εγκατάσταση αναερόβιας επεξεργασίας των αποβλήτων με ταυτόχρονη παραγωγή βιοαερίου

Βιβλιογραφικά διαπιστώνεται πως η βελτιστοποίηση της αναερόβιας επεξεργασίας εντός των βιοαντιδραστήρων και η αύξηση του παραγόμενου μεθανίου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την πρωτοβάθμια επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Moller et al. (2003), η ογκομετρική παραγωγή μεθανίου μπορεί να αυξηθεί αν προηγηθεί αποτελεσματικός μηχανικός διαχωρισμός των αποβλήτων σε υγρά-στερεά κλάσματα (πρωτοβάθμια επεξεργασία), εξαιτίας του σχηματισμού αποβλήτων με υψηλότερη περιεκτικότητα πτητικών στερεών.

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται (Bernet et Beline, 2008· Fernandez et al., 2008) πως η επεξεργασία αποβλήτων χοιροστασίου με θερμότητα (135-150°C) πριν την αναερόβια χώνευσή τους, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής μεθανίου, λόγω της επερχόμενης διαλυτοποίησης των οργανικών στερεών.

I.3. Γαλακτοβιομηχανικά απόβλητα

Στις περισσότερες χώρες του κόσμου, ο κλάδος των γαλακτοβιομηχανιών αναπτύσσεται συνεχώς, εξαιτίας της αυξανόμενης ζήτησης γάλακτος και των προϊόντων του. Επίσης, και η παραγωγή γάλακτος ανά κεφαλή ζώου έχει αυξηθεί ως αποτέλεσμα της προόδου της κτηνιατρικής επιστήμης (Arvanitoyannis and Kassaveti, 2008).

Τα απόβλητα αυτής της κατηγορίας προέρχονται από τις διάφορες διεργασίες παρασκευής και διακίνησης γαλακτοκομικών προϊόντων, μετά τη συγκέντρωση του γάλακτος σε κάποιο κεντρικό σταθμό υποδοχής (Γεωργακάκης, 2008). Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των μονάδων παραγωγής γαλακτοκομικών προϊόντων, είναι η περιοδική παραγωγή αποβλήτων (Chen et al., 2007).

Οι γαλακτοκομικές βιομηχανίες μπορούν να καταταχθούν στις εξής κατηγορίες:

- βιομηχανίες παραγωγής γάλακτος (παστεριωμένου, μακράς διαρκείας, συμπυκνωμένου, σκόνης και ξηρού γάλακτος),
- βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων ζύμωσης (γιαούρτι, κρέμα κα.),
- βιομηχανίες παραγωγής βουτύρου,
- βιομηχανίες παραγωγής τυριού και
- βιομηχανίες παραγωγής παγωτών.

Πρέπει να σημειωθεί το γεγονός πως στις περισσότερες παραγωγικές μονάδες δεν παράγεται μόνο ένα προϊόν, αλλά συνήθως δύο ή και περισσότερα προϊόντα.

I.3.1. Παραγωγή και σύσταση αποβλήτων

Η βιομηχανία γαλακτοκομικών προϊόντων είναι μία από τις μεγαλύτερες πηγές των βιομηχανικών αποβλήτων στην Ευρώπη. Ένα τυπικό ευρωπαϊκό γαλακτοκομικό παράγει περίπου 500m³ αποβλήτων λυμάτων ημερησίως. Σε παγκόσμια κλίμακα, η

Ινδία είναι μια από τις μεγαλύτερες παραγωγικές χώρες γάλακτος και γαλακτοκομικών προϊόντων, και προβλέπεται να καταστεί η μεγαλύτερη μεταξύ των εθνών. Με ετήσια συνολική παραγωγή σε γάλα, το έτος 2002, 85 εκατομμύρια τόνοι και με ετήσια αύξηση της τάξης του 2,8, δικαίως μπορεί να θεωρηθεί η μεγαλύτερη παραγωγός γαλακτοκομικών λυμάτων (Arvanitoyannis and Kassaveti, 2008).

Δεδομένου ότι η γαλακτοκομική βιομηχανία παράγει διάφορα προϊόντα, τα χαρακτηριστικά αυτών των λυμάτων ποικίλουν ανάλογα με τα συστήματα και τις μεθόδους λειτουργίας που εφαρμόζονται (Chen et al., 2007· Arvanitoyannis and Kassaveti, 2008). Μερικά από τα γενικά χαρακτηριστικά τους μπορούν να συνοψιστούν ως εξής (Kosseva, 2009):

- υψηλό οργανικό φορτίο (π.χ., λιπαρά οξέα και λακτόζη),
- σημαντικές διακυμάνσεις του pH (4,2-9,4),
- σχετικά μεγάλο φορτίο των αιωρούμενων στερεών (0.4-2 g / L) και
- μεγάλες διακυμάνσεις στην παραγωγή των αποβλήτων.

Τα συγκεκριμένα υγρά απόβλητα ενδέχεται να περιέχουν πρωτεΐνες, άλατα, λιπαρές ουσίες, λακτόζη, καθώς και διάφορα είδη χημικών ουσιών καθαρισμού (Thassitou and Arvanitoyannis, 2001). Ωστόσο περισσότερο η παρουσία γάλακτος, κρέμας γάλακτος ή τυρογάλακτος μπορεί να επιδράσει σημαντικά στην ολική χημική ζήτηση οξυγόνου (COD) λόγω της δικής τους υψηλής τιμής COD, παρά τα απορρυπαντικά που την επηρεάζουν δύσκολα. Τα τελευταία όμως, μπορεί να περιέχουν προσθετες ουσίες οι οποίες έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζουν σημαντικά τα υδάτινα οικοσυστήματα και είναι τοξικές για την υδρόβια ζωή (Kosseva, 2009).

1.3.2. Χαρακτηριστικά τυρογάλακτος

Το τυρόγαλα είναι το υγρό υπόλοιπο που ακολουθεί την καθίζηση και την απομάκρυνση της καζεΐνης του γάλακτος κατά τη διαδικασία παραγωγής τυριού. Το παραπροϊόν αυτό, αντιπροσωπεύει περίπου το 85-95% του όγκου του γάλακτος και συγκρατεί περίπου το 55% από τα θρεπτικά του συστατικά (Καραδήμα, 2009).



Εικόνα 1.5 Δεξαμενή συλλογής τυρογάλακτος (Τυροκομείο Λιμνών Αργολίδας)

Τα κύρια συστατικά του τυρογάλακτος μετά το νερό το οποίο αποτελεί το 93% της σύστασής του, είναι λακτόζη (70-72% των ολικών στερεών), πρωτεΐνες τυρογάλακτος (8-10% των ολικών στερεών) και μέταλλα (12-15% των ολικών στερεών) (Jelen, 2002).

Στο τυρόγαλα βρίσκονται επίσης και άλλα συστατικά σε πολύ μικρότερες αναλογίες, όπως γαλακτικό και κιτρικό οξύ, μη πρωτεϊνικές αζωτούχες ενώσεις όπως ουρία και ουρικό οξύ και βιταμίνες του συμπλέγματος Β (Καραδήμα, 2009).

Το τυρόγαλα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διάφορους τύπους, ανάλογα κυρίως με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την απομάκρυνση της καζεΐνης από το υγρό γάλα. Ο πιο συχνός τύπος του προέρχεται από την παρασκευή τυριού ή ορισμένων βιομηχανικών προϊόντων καζεΐνης. Η διαδικασία βασίζεται στη πήξη της καζεΐνης με

πτυιά, ένα βιομηχανικό παρασκεύασμα που περιέχει χυμοσίνη, ή άλλα ένζυμα που προκαλούν την πήξη της καζεΐνης. Εφόσον, η πήξη της καζεΐνης με πτυιά πραγματοποιείται σε pH 6,5, ο τύπος τυρογάλακτος που παράγεται αναφέρεται ως ‘γλυκό τυρόγαλα’.

Εναλλακτικά, ακολουθείται η διαδικασία ζύμωσης ή προσθήκης οργανικών ή ανόργανων οξέων, με στόχο την πήξη της καζεΐνης, και το τυρόγαλα που προκύπτει χαρακτηρίζεται ως ‘όξινο τυρόγαλα’. Η μέθοδος αυτή ακολουθείται κατά την παρασκευή νωπών τυριών (π.χ. τυρί *cottage* ή *quark*) ή βιομηχανικής καζεΐνης (Jelen, 2002). Στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας I 2.1) παρουσιάζεται μια πιο αναλυτική περιγραφή της σύστασης των δυο τύπων τυρογάλακτος.

Πίνακας I 2.1 Τυπική σύσταση και pH των δυο τύπων τυρογάλακτος

	g / L τυρογάλακτος	
	‘γλυκό’	‘όξινο’
Λακτόζη	46,0-52,0	44,0-46,0
Πρωτεΐνη	6,0-10,0	6,0-8,0
Ασβέστιο	0,4-0,6	1,2-1,6
Φωσφορικά άλατα	1,0-3,0	2,0-4,5
Λακτάση	2,0	6,4
pH	6-7	<5

Πηγή: Jelen, 2002, Καραδήμα, 2009

Οι διαφορές μεταξύ των δυο τύπων τυρογάλακτος, επιδρούν σημαντικά στις θρεπτικές ιδιότητές τους και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή των διάφορων σύγχρονων μεθόδων επεξεργασίας του τυρογάλακτος (Jelen, 2002). Το όξινο τυρόγαλα, συνήθως χρησιμοποιείται πολύ περιορισμένα για βρώση λόγω της όξινης γεύσης του και της υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα (Mawson, 1994).

Σε ορισμένες έρευνες έχει βρεθεί ότι το τυρόγαλα περιέχει σε πολύ μικρές ποσότητες και μερικά βαρέα μέταλλα, τα οποία όμως έχουν εντοπιστεί σε τυρόγαλα που φυλάσσεται σε δεξαμενές αναμιγμένο με νερά πλυσίματος, αλλά και σε σκόνη τυρογάλακτος (Καραδήμα, 2009).

I.3.2.1. Παραγωγή και χρήση τυρογάλακτος

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Kosseva, 2009), με βάση την κατανάλωση τυριού και τα στοιχεία παραγωγής, εκτιμάται ότι εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης παράγονται περίπου 9 εκατομμύρια τόνοι τυριού ετησίως, που οδήγησαν σε μια ετήσια παραγωγή τυρογάλακτος της τάξης των 50 εκατομμυρίων m³. Σε παγκόσμιο επίπεδο, περίπου το 50% της συνολικής παραγωγής τυριού-τυρογάλακτος επεξεργάζεται και μετατρέπεται σε διάφορα προϊόντα διατροφής, από την οποία:

- το 45% του παραγόμενου τυρογάλακτος χρησιμοποιείται απευθείας στην υγρή του μορφή,
- το 30% σε μορφή σκόνης τυρογάλακτος,
- το 15% ως λακτόζη και παραπροϊόντων της, και
- το υπόλοιπο 10% ως συμπυκνωμένες πρωτεΐνες που περιέχουν τυρόγαλα.

Στην Ελλάδα, την περίοδο από το 1990 έως το 1995, η εξαγωγή φέτας ήταν περίπου 7.000 τόνοι το χρόνο και των πρόβιων τυριών 10.000 τόνοι, ποσότητες που αντιστοιχούν στην παραγωγή 600.000 τόνων τυρογάλακτος το χρόνο. Εάν ληφθεί υπόψη ότι για την παρασκευή ενός κιλού τυριού, παράγονται 9 κιλά τυρογάλακτος και με δεδομένο ότι το τυρόγαλα έχει πολύ μικρή περιεκτικότητα σε γάλα, γίνεται εύκολα κατανοητό το πρόβλημα διαχείρισης κυρίως που δημιουργείται από την παραγωγή τέτοιων ποσοτήτων του συγκεκριμένου αποβλήτου (Καραδήμα, 2009).

Η χρήση του τυρογάλακτος ως ζωοτροφή για βοοειδή ή χοίρους, αποτελεί μέχρι και σήμερα μια σημαντική εναλλακτική λύση. Σε εγχώριο επίπεδο, πρόκειται για την πιο συνηθισμένη και εύκολη χρήση του τυρογάλακτος από του τυροκόμους, και αναφέρεται σχεδόν σε όλες τις μελέτες επεξεργασίας και διάθεσης των αποβλήτων των τυροκομείων. Ωστόσο, στην πράξη όλο και λιγότερες εγκαταστάσεις χοιροστασιών χρησιμοποιούν το τυρόγαλα ως τροφή, εξαιτίας των εντερικών διαταραχών που προκαλεί στα ζώα (Μαρκαντωνάτος, 1990).

Μια εναλλακτική έμμεση χρήση του τυρογάλακτος, είναι η χρήση των παραγώγων του, των οποίων η ζήτηση αυξάνεται στις μέρες μας. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως υποκατάστατα ακριβότερων προϊόντων που ήδη υπάρχουν, είτε για τα λειτουργικά και θρεπτικά συστατικά που περιέχουν.

Σε βιομηχανικό επίπεδο, μετά από διαδικασίες μεγάλης κλίμακας, προκύπτει μια σειρά προϊόντων συστατικών ή μόνο των πρωτεϊνών που περιέχονται στο τυρόγαλα, με σκοπό τη χρήση τους ως απαραίτητα θρεπτικά συστατικά σε ειδικά διαιτητικά προϊόντα, για διατροφή βρεφών, ανθρώπων τρίτης ηλικίας ή αθλητών. Ωστόσο, το τυρόγαλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη και για την παραγωγή παραδοσιακών τροφίμων, με σημαντικότερα από αυτά ορισμένα είδη τυριών και αφεψημάτων. Συγκεκριμένα για την πρώτη περίπτωση, το ιταλικού τύπου τυρί *Ricotta* και εκείνο νορβηγικού τύπου *Mysost*, είναι αναγνωρισμέα από από τη διεθνή ομοσπονδία γαλακτοκομικών προϊόντων (*International Dairy Federation*). Στον πίνακα I 3.1 παρουσιάζονται οι διαφορές του τυριού *Ricotta*, όπως αυτές προκύπτουν κατά την παρασκευή του από πλήρες γάλα και από τυρόγαλα (Jelen, 2002).

Πίνακας I 3.1 Σύσταση τυριού *Ricotta* κατά την παρασκευή του από πλήρες γάλα και από τυρόγαλα

	Υγρασία	Λίπος	Πρωτεΐνη	Λακτόζη
Τυρί <i>Ricotta</i>				
<i>πλήρες γάλα</i>	72,2	12,7	11,2	3,0
<i>τυρόγαλα</i>	82,5	0,5	11,3	1,5

Πηγή: Jelen, 2002

Ειδικότερα στην Ελλάδα, για την παραγωγή τυριών χρησιμοποιείται κυρίως αιγοπρόβειο γάλα (90%) και η ανάκτηση των χρήσιμων συστατικών του γάλακτος του τυρογάλακτος χρησιμοποιείται για την παραγωγή μυζήθρας, ανθότυρου κ.λπ. (Μαρκαντωνάτος, 1990). Ενδεικτικά, στον πίνακα I 3.2, εκτιμάται το οργανικό φορτίο των αποβλήτων τυροκομής χωρίς και με παραγωγή μυζήθρας.

Πίνακας I 3.2 Οργανικό φορτίο των αποβλήτων τυροκομείσεως χωρίς και με παραγωγή μυζήθρας.

	Οργανικό φορτίο (kg BOD₅/m³ γάλακτος)
Παραγωγή τυριού χωρίς μυζήθρα με πλήρη αξιοποίηση του τυρογάλακτος	9
Παραγωγή τυριού και μυζήθρας με απόρριψη λακτόζης	37
Παραγωγή τυριού χωρίς μυζήθρα με ολική απόρριψη τυρογάλακτος	46,5

Πηγή: Μαρκαντωνάτος, 1990

Η προαναφερόμενη χρήση του τυρογάλακτος ως ζωοτροφή, εξακολουθεί να είναι πού σημαντική, αλλά σε πολλές αγορές, όπως οι ΗΠΑ, η χρήση του τυρογάλακτος σε σκόνη που προορίζεται για ανθρώπινα τρόφιμα είναι μεγαλύτερη από ότι για τη διατροφή των ζώων. Στην Ευρώπη, ωστόσο, ο τομέας των ζωοτροφών εξακολουθεί να αποτελεί τη κυρίαρχη χρήση του τυρογάλακτος σε σκόνη (Zadow, 2003).

I.3.2.2. Ρυπαντικά χαρακτηριστικά τυρογάλακτος

Το τυρόγαλα έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη. Οι τιμές του σε βιολογική ζήτηση οξυγόνου (BOD₅) κυμαίνονται μεταξύ 30.000-50.000 ppm και σε χημική ζήτηση οξυγόνου από 60.000-80.000 ppm (Καραδήμα, 2009· Jelen, 2002). Συνεπώς, η διάθεσή του ως απόβλητο αποτελεί ένα μείζον οικολογικό θέμα.

Στη χώρα μας, η συνήθης απόρριψη του τυρογάλακτος στους κοντινούς υδάτινους αποδέκτες (ποτάμια, ρεματιές, λίμνες), στις περισσότερες περιπτώσεις χωρίς να έχει προηγηθεί η επεξεργασία του σε βιολογικό καθαρισμό, προκαλεί τεράστια προβλήματα ρύπανσης των υπογείων υδάτων, καθώς και μία γενικότερη υποβάθμιση του περιβάλλοντος γύρω από τα τυροκομεία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι ένας παραπόταμος του Πηνειού ποταμού, ο οποίος δέχεται περίπου 700 τόνους τυρογάλακτος το χρόνο από τα 60 περίπου τυροκομεία του νομού Λάρισας (Εκόνα I.6), και το ποτάμι του Βουραϊκού (Εικόνα I.7), όπου η ανεξέλεγκτη διάθεση των

αποβλήτων των τυροκομείων της περιοχής έχει επιφέρει σημαντική υποβάθμιση σε μεγάλο μέρος του ποταμού.



Πηγή: Καραδήμα, 2009

Εικόνα I.6 Σημειακή πηγή ρύπανσης με τυρόγαλα σε παραπόταμο του Πηνειού



Πηγή: Καραδήμα, 2009

Εικόνα I.7 Τμήμα του Βουραϊκού όπου φαίνεται το τυρόγαλα να ‘ρέει’ στο ποτάμι

Αποτελέσματα της ρίψης τυρογάλακτος, αλλά και γενικότερα αποβλήτων τυροκομείου σε υδάτινους αποδέκτες είναι η δυσοσμία, η υποβάθμιση της ποιότητας των νερών και του περιβάλλοντος και οι σοβαρές επιπτώσεις στους υδρόβιους ζωικούς οργανισμούς. Το φαινόμενο του ευτροφισμού στα σημεία απόρριψης των αποβλήτων αυτών, λόγω της έλλειψης οξυγόνου που παρατηρείται, εφόσον αυτό δεσμεύεται από ομάδες μικροοργανισμών που αναπτύσσονται και επικρατούν σε αυτούς τους αποδέκτες, οδηγεί στο θάνατο πολλών ειδών ψαριών και ασπονδύλων (Καραδήμα, 2009).

I.3.3. Επεξεργασία αποβλήτων τυροκομείων

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για την επεξεργασία των αποβλήτων των γαλακτοβιομηχανιών γενικότερα μπορούν να συνοψιστούν στις εξής (Arvanitoyannis and Kassaveti, 2008):

- αερόβια επεξεργασία,
- αναερόβια επεξεργασία,
- επεξεργασία με μεμβράνες,
- κατασκευή κατάλληλων υγροτόπων,
- πήξη / ηλεκτροπήξη/ κροκίδωση / καθίζηση,
- βιοαποκατάσταση κ.ά.

Πιο συγκεκριμένα για τις μεθόδους επεξεργασίας και διαχείρισης των αποβλήτων των τυροκομείων, εφαρμόζονται η αερόβια και η αναερόβια επεξεργασία, καθώς και βιολογικές μέθοδοι που αξιοποιούν τις πρωτεΐνες του τυρογάλακτος, μέσω φιλτραρίσματος και υπερδιήθησης (Καραδήμα, 2009).

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί σύμφωνα με τη νομοθεσία (Π.Δ. 252, Κ.Υ.Α. 5673/400/97) επιβάλεται η εγκατάσταση βιολογικού καθαρισμού για την επεξεργασία των λυμάτων, χωρίς την οποία δεν αδειοδοτείται η λειτουργία μιας τυροκομικής μονάδας. Παρ' όλα αυτά, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τέτοια εγκατάσταση, είτε δεν υπάρχει, είτε δε λειτουργεί με αποτέλεσμα τα υγρά απόβλητα να απορρίπτονται ανεπεξέργαστα είτε στο έδαφος είτε σε υδάτινα οικοσυστήματα.

Όμως, οι Γαβαλά κ.ά. (1997), προτείνουν ως βασική διεργασία που μπορεί να εφαρμοστεί σε απόβλητα αγροτοβιομηχανιών, όπως και αυτά των τυροκομείων, την αναερόβια χώνευση. Η διεργασία αυτή έχει τα επιπλέον πλεονεκτήματα της μειωμένης παραγωγής σταθεροποιημένης λάσπης και της παραγωγής του ενεργειακά αξιοποιήσιμου βιοαερίου.

I.3.3.1. Αερόβια διαδικασία

Η αερόβια χώνευση στηρίζεται στην ανάπτυξη μικροοργανισμών σε ένα περιβάλλον πλούσιο σε οξυγόνο, οι οποίοι θα οξειδώσουν τα οργανικά συστατικά του αποβλήτου σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και NO_3^- , ορισμένα μη διασπάσιμα οργανικά υλικά και υπολειμματικό (οργανικό) κυτταρικό υλικό. Είναι πολύ ταχύτερη από την αναερόβια και η παροχή οξυγόνου δίνει άφθονη ενέργεια στις βιοοξειδώσεις του υποστρώματος και μετατρέπει σε νέα κυτταρική μάζα το μεγαλύτερο μέρος του βιοαποικοδομούμενου BOD (Καραδήμα, 2009).

Τα υγρά απόβλητα των γαλακτοβιομηχανιών δύναται να επεξεργαστούν με τη συμβατική αερόβια διαδικασία, δεδομένου ότι τα λίπη, η λακτόζη και οι πρωτεΐνες που περιέχουν, είναι εύκολα αποδομήσιμα από βακτηριακούς πληθυσμούς. Αν και πρόκειται για μέθοδο με υψηλή κατανάλωση ενέργειας και δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης, έχει χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου συγκριτικά με την αναερόβια διαδικασία. Επιπλέον, σε σχέση με την αναερόβια επεξεργασία είναι λιγότερο αποτελεσματική στην ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών (Arvanitoyannis and Kassaveti, 2008).

Πιο συγκεκριμένα για την αερόβια επεξεργασία του τυρογάλακτος, σε θεωρητικό επίπεδο είναι εφικτή. Πρακτικά όμως, απαιτούνται μεγάλες εγκαταστάσεις υψηλού κόστους, στο οποίο δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν οι μικρές τυροκομικές εγκαταστάσεις της χώρας μας. Για παράδειγμα, ένα τυροκομείο που παράγει 40m^3 τυρόγαλα την ημέρα, για να πραγματοποιεί ορθή αερόβια επεξεργασία τυρογάλακτος, θα πρέπει να εγκαταστήσει έναν βιολογικό σταθμό τέτοιου μεγέθους όσο μια πόλη 2.000 κατοίκων (Κακούρος, 2009).

I.3.3.2. Αναερόβια διαδικασία

Η αναερόβια επεξεργασία των τυροκομικών αποβλήτων θεωρείται ως η βασική διεργασία που μπορεί να εφαρμοστεί, λόγω του υψηλού οργανικού φορτίου των

συγκεκριμένων αποβλήτων. Όμως, οι υψηλές συγκεντρώσεις των αιωρούμενων στερεών και λιπιδίων που έχουν τα συγκεκριμένα απόβλητα, δύναται να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοση των συμβατικών χρησιμοποιούμενων τεχνικών αναερόβιας επεξεργασίας.

Οι Arvanitoyannis και Kassaveti, (2008) προτείνουν πως θα πρέπει να εξετάζεται συχνότερα η διαφασική αναερόβια επεξεργασία των γακτοβιομηχανικών αποβλήτων, εφόσον έχει καλύτερα αποτελέσματα στην επεξεργασία διαφόρων άλλων βιομηχανικών αποβλήτων (π.χ. υγρά απόβλητα ελαιοτριβείων και επεξεργασίας τροφίμων) με επίσης υψηλές περιεκτικότητες σε αιωρούμενα στερεά και λιπίδια.

Ωστόσο, σε έρευνα των Kalyuzhnyi et al. (1996) αναφέρεται η αποτελεσματική λειτουργία συμβατικού αντιδραστήρα (τύπου UASB, *upflow anaerobic sludge blanket*) όγκου 10,74m³, που χρησιμοποιείται για την αναερόβια επεξεργασία λυμάτων τυρογάλακτος με τιμή pH περίπου 4, σε υψηλές τιμές οργανικού φορτίου. Προϋπόθεση αποτελεί η ορθή εκκίνηση του χωνευτήρα, η οποία εξασφαλίζει την σταθερή λειτουργία του (διαδικασία που διήρκησε 3 μήνες).

Όσον αφορά την εφαρμογή της αναερόβιας επεξεργασίας στα τυροκομεία της χώρας μας, η χωροταξική διασπορά και η εποχιακή λειτουργία τους, καθιστούν αδύνατη τη λειτουργία μεμονομένων μονάδων αναερόβιας επεξεργασίας των αποβλήτων τους. Γι' αυτό το λόγο προτείνεται η συγχώνευση των αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων σε κεντρικές μονάδες επεξεργασίας, διασφαλίζοντας έτσι τη σταθερή λειτουργία των τελευταίων κατά τη διάρκεια του ετήσιου κύκλου με το επιπρόσθετο πλεονέκτημα του μικρότερου οικονομικού κόστους (Γαβαλά κ.ά., 1997). Δεδομένου ότι η αναερόβια χώνευση αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στην επιτακτική ανάγκη για παραγωγή ενέργειας από 'καθαρές' πηγές, η παραγωγή βιοαερίου από τα γαλακτοβιομηχανικά απόβλητα είναι πολύ σημαντική, εφόσον αποτελεί μια πολύτιμη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

I.4. Συνδυασμένη επεξεργασία αποβλήτων από κτηνοτροφικές μονάδες και βιομηχανίες τροφίμων

Η κατασκευή κοινών μονάδων παραγωγής βιοαερίου παρέχει τη δυνατότητα της συνδυασμένης αναερόβιας επεξεργασίας και της αξιοποίησης των αποβλήτων που προέρχονται από τη γεωργία, την επεξεργασία τροφίμων και γενικότερα των οργανικών αποβλήτων που προέρχονται από βιομηχανίες. (Angelidaki et al., 2003).

Το συνηθέστερο υπόστρωμα που χρησιμοποιείται είναι τα ζωικά απόβλητα, κυρίως λόγω της μεγάλης ρυθμιστικής ικανότητας των αποβλήτων αυτών, η οποία διασφαλίζει την εξέλιξη της αναερόβιας διαδικασίας, ρυθμίζοντας την τιμή του pH σε περίπτωση πτώσης του από υψηλές συγκεντρώσεις πτητικών λιπαρών οξέων. Επιπλέον, τα ζωικά απόβλητα αποτελούν εξαιρετικό υπόστρωμα εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας θρεπτικών συστατικών που περιέχουν για την βέλτιστη ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Ένα άλλο πλεονέκτημα των ζωικών αποβλήτων, είναι τα υψηλά ποσοστά νερού που περιέχουν. Με αυτό τον τρόπο διορθώνονται λειτουργικά προβλήματα που προκύπτουν κατά την επεξεργασία πιο στεγνών τύπων αποβλήτων.

Ο τελικός στόχος της συνδυαστικής αναερόβιας επεξεργασίας είναι όχι μόνο η μεγαλύτερη απόδοση σε βιοαέριο και μεθάνιο, αλλά και η σταθεροποίηση της διαδικασίας. Η δεύτερη περίπτωση ισχύει για απόβλητα, τα οποία από μόνα τους θα ήταν δύσκολο να επεξεργαστούν. Όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά και στη βιβλιογραφία (Chen et al., 2007), η αναερόβια συν-γχώνευση αποβλήτων συνιστάται μεταξύ άλλων (προσαρμοστικότητα των μικροοργανισμών έναντι ανασταλτικών ουσιών και ενσωμάτωση μεθόδων απομάκρυνσης ή πρόληψης δημιουργίας τοξικών ουσιών πριν την αναερόβια χώνευση) για την ουσιαστική βελτίωση της απόδοσης της αναερόβιας χώνευσης.

Μέρος II - Πειραματικό

II.1. Προέλευση και διαχείριση πρώτης ύλης

Για την πραγματοποίηση του πειράματος μεταφέρθηκαν τρεις φορές υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου από μια χοιροτροφική μονάδα της Τανάγρας Βοιωτίας και τυρόγαλα από τυροκομείο στις Λίμνες Αργολίδας.



Εικόνα II.1 Συσκευές τυροκομείου (αριστερά) και δεξαμενή συλλογής τυρογάλακτος (δεξιά) τυροκομείου Λιμνών Αργολίδας



Εικόνα II.2 Δεξαμενή συλλογής αποβλήτων (αριστερά) και διαχωρισμένων υγρών (αριστερά) χοιροστασίου Τανάγρας Βοιωτίας (δεξιά)

Στην αρχή κάθε μεταφοράς γινόταν μια αρχική ανάλυση των υγρών αποβλήτων σε ολικά και πτητικά στερεά, ώστε να καθοριστεί το επίπεδο της αραιώσης, ή μη, δεδομένου ότι η επιθυμητές περιεκτικότητες σε ολικά στερεά ήταν 2-4-6-8%. Τα απόβλητα αποθηκεύονταν σε κατάψυξη (-15°C) και από εκεί μεταφερόταν τμηματικά για απόψυξη και εισαγωγή τους στους αντιδραστήρες.

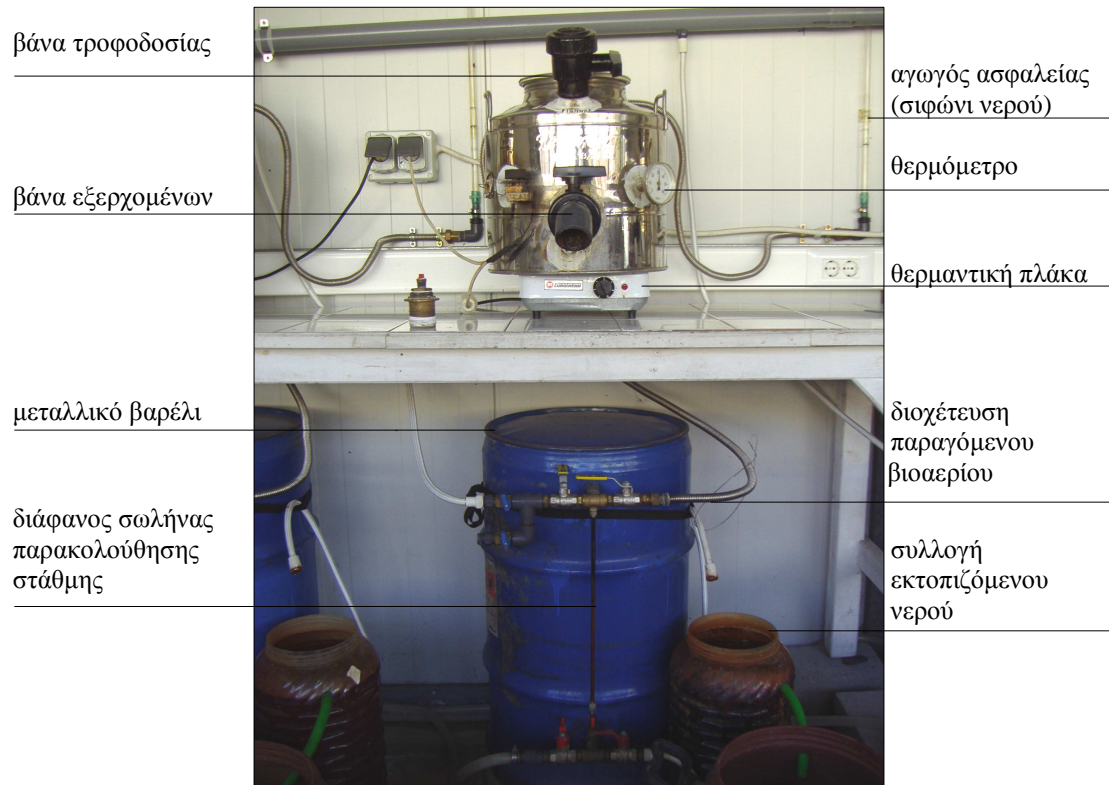
II.2. Πειραματική εγκατάσταση παραγωγής βιοαερίου

Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ανοξείδωτα δοχεία, χωρητικότητας 30L, με ύψος 30cm και διάμετρο 36cm το καθένα, ως αναερόβιοι χωνευτήρες με ενεργό όγκο 25,6L. Τα δοχεία τροποποιήθηκαν έτσι ώστε να διαθέτουν βάνα υποδοχής τροφοδοσίας στο ανώτερο τμήμα τους και μια βάνα στο κατώτερο τμήμα τους για λήψη της εξερχόμενης ποσότητας υγρών από το εσωτερικό του χωνευτήρα. Επίσης, κατασκευάστηκε θέση επαφής θερμομέτρου για τον έλεγχο της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του χωνευτήρα και μια θέση επαφής για θερμοστάτη που διατηρούσε τη θερμοκρασία στη μεσόφιλη περιοχή. Τέλος κάθε χωνευτήρας ήταν τοποθετημένος πάνω σε μια θερμαντική πλάκα, η οποία προσέφερε την απαραίτητη θερμότητα, όποτε αυτό ήταν αναγκαίο σύμφωνα με τον ρυθμισμένο θερμοστάτη.

Κάθε χωνευτήρας συνδεόταν με ένα με ένα μεταλλικό βαρέλι ύψους 84cm και διαμέτρου 44cm, που περιείχε νερό. Το παραγόμενο βιοαέριο από τον χωνευτήρα κατευθυνόταν αναγκαστικά προς το μεταλλικό βαρέλι και εκτόπιζε αντίστοιχο όγκο νερού. Το νερό συλλεγόταν σε πλαστικά μικρότερα δοχεία, για ευκολότερη ζύγιση. Έτσι, το βάρος του νερού αποτελούσε έναν έμμεσο τρόπο μέτρησης της παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου ανά 48ωρο.

Κάθε μεταλλικό βαρέλι ήταν συδεδεμένο εξωτερικά με κατακόρυφο λεπτό διάφανο σωλήνα, μέσω του οποίου ήταν δυνατή η παρακολούθηση της μεταβολής της στάθμης του νερού στο εσωτερικό του βαρελιού (αρχή συγκινωνούντων δοχείων). Μετά από κάθε μέτρηση του βάρους του εκτοπιζόμενου νερού από το βιοαέριο, συμπληρωνόταν η στάθμη στο μεταλλικό βαρέλι μέχρι το αρχικό ύψος της στήλης του.

Κάθε χωνευτήρας διέθετε επίσης έναν αγωγό ασφαλείας (σιφώνι νερού), ώστε σε περίπτωση δυσλειτουργίας η πίεση του αερίου να εκτονώνεται προς την ατμόσφαιρα και να μη δημιουργείται πρόβλημα στη εγκατάσταση.



Εικόνα II.3 Πειραματική εγκατάσταση αναερόβιου χωνευτήρα

Τα εισερχόμενα υγρά αναμυγνύονταν με φυσική ροή κατά τη διαδικασία λήψης της εξερχόμενης ποσότητας και τροφοδοσίας. Όπως αναλύεται στην πειραματική διαδικασία (κεφ. II. 4), αποδείχθηκε πως δημιουργήθηκαν προβλήματα λειτουργίας των χωνευτήρων που περιείχαν τα πυκνότερα απόβλητα, ενδεχομένως λόγω της έλλειψης ικανοποιητικής ανάδευσης του υγρού περιεχομένου των συγκεκριμένων χωνευτήρων.

II.3. Μέθοδοι αναλύσεων και προσδιορισμών

Παρακάτω περιγράφονται οι μέθοδοι και τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των διαφόρων παραμέτρων και μεγεθών του πειράματος.

- **Μέτρηση τιμής pH**

Η μέτρηση της τιμής του pH των αποβλήτων γινόταν με πεχάμετρο τύπου *CyberScan PC 500 pH/Conductivity Meter (Eutech Instruments Pte Ltd)*. Η μέτρηση γινόταν ανά 48 ώρες σε δείγμα υγρών από την εξερχόμενη ποσότητα που λαμβάναμε από κάθε χωνευτήρα. Ταυτόχρονα γινόταν και μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος.



Εικόνα II.4 Πεχάμετρο

- **Προσδιορισμός Ολικών Στερεών (% κ.β.)**

Για τον υπολογισμό των Ολικών Στερεών (Ο.Σ.) χρησιμοποιήθηκαν κάψες πορσελάνης, οι οποίες πριν από κάθε χρήση προθερμούνταν στους 105°C. Η ξήρανση των δειγμάτων γινόταν σε φούρνο ξήρανσης *Memmert* (Type U15) σε θερμοκρασία 103-105°C για 24 ώρες. Οι ζυγίσεις πραγματοποιούνταν με ηλεκτρικό ζυγό τύπου *Mettler H10*, μοντέλο 4/10, ακρίβειας ±0,1 mg.

Τα Ολικά Στερεά υπολογίσθηκαν σύμφωνα με τον τύπο:

$$\text{Ο.Σ.} = \frac{\text{Ξηρό δείγμα}}{\text{Αρχικό δείγμα}} \cdot 100$$



Εικόνα Π.5 Φούρνος ξήρανσης των δειγμάτων

Για αποφυγή απορρόφησης υγρασίας από τα δείγματα μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου και να ζυγιστούν και κατά τη διάρκεια των ζυγήσεων, οι κάψες με το ξηρό δείγμα τοποθετούνταν σε ειδικό γυάλινο κλίβανο που περιείχε υλικό (*silica gel*) για κατακράτηση της υγρασίας.

- **Προσδιορισμός Πτητικών Στερεών (% Ο.Σ.)**

Για τον προσδιορισμό των Πτητικών Στερεών (Π.Σ.) οι κάψες με τα ξηρά δείγματα που είχαν χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστούν τα Ολικά Στερεά του δείγματος, τοποθετούνταν σε αποτεφρωτήρα *Thermolyne Sybron (Type 1400 Furnace)* για την καύση των οργανικών (πτητικών) ουσιών στους 550°C για 12-16 ώρες.



Εικόνα Π.6 Αποτεφρωτήρας

Τα Πτητικά Στερεά υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον τύπο :

$$\text{Ο.Σ.} = \frac{\text{Ξηρό δείγμα} - \text{Τέφρα}}{\text{Ξηρό δείγμα}} \cdot 100$$

Για αποφυγή απορρόφησης υγρασίας από τα δείγματα μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου και να ζυγιστούν και κατά τη διάρκεια των ζυγήσεων, οι κάψες με την τέφρα τοποθετούνταν στον προαναφερόμενο γυάλινο κλίβανο.

- **Προσδιορισμός Χημικής Ζήτησης Οξυγόνου (COD)**

Η Χημική Ζήτηση Οξυγόνου (COD) είναι μία μέθοδος υπολογισμού της ποσότητας του οξυγόνου που απαιτείται για να οξειδωθεί όλη η οργανική ουσία των αποβλήτων με χημικά μέσα. Ο προσδιορισμός του COD βασίζεται στο γεγονός ότι όλη η οργανική ουσία, εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων, μπορεί να οξειδωθεί με τη βοήθεια ισχυρών οξειδωτικών μέσων προς CO₂ και H₂O κάτω από όξινες συνθήκες, παρουσία καταλυτών και υψηλής θερμοκρασίας.

Το οξειδωτικό μέσο που χρησιμοποιείται για τη μέθοδο αυτή είναι το διχρωμικό κάλιο (K₂Cr₂O₇), παρουσία πυκνού θειικού οξέος (H₂SO₄) και θειικού αργύρου ως καταλύτη.

Η οξείδωση της οργανικής ύλης μπορεί να παρασταθεί γενικά ως εξής :



Ο προσδιορισμός της ποσότητας του οξυγόνου που απαιτήθηκε για την οξείδωση των οργανικών ουσιών των δειγμάτων των αποβλήτων, γίνεται έμμεσα με ογκομέτρηση της περίσσειας του οξειδωτικού (K₂Cr₂O₇) μετά την οξείδωση, με εναμμόνιο θειικό σίδηρο [Fe(NH₄)₂(SO₄)₂(6H₂O)].

Η χημική οξείδωση του δείγματος γινόταν σε θερμοκρασία 150°C για δύο ώρες, παρουσία Ag₂SO₄, που δρα ως καταλύτης για ορισμένες ουσίες που οξειδώνονται

δύσκολα και HgSO_4 που δεσμεύει τα χλωριόντα (Cl^-) του δείγματος τα οποία δρουν παρεμποδιστικά.

Ο βρασμός γινόταν στην συσκευή *COD Reactor AL30 CSB/COD AQUA LYTIC*. Στη συνέχεια το μη καταναλωθέν οξειδωτικό μέσο ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) προσδιοριζόταν με ογκομέτρηση.

Η ποσότητα του $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ που καταναλώθηκε, αντιστοιχούσε στην ποσότητα της οργανικής ύλης του δείγματος.

Το αποτέλεσμα του τεστ εκφράζονται τελικά σε mg οξυγόνου/L αποβλήτων, με τη βοήθεια της σχέσης:

$$\text{COD} = \frac{8.000 \cdot (\text{mL}_{\text{μάρτυρα}} - \text{mL}_{\text{δείγματος}}) \cdot \text{Κανονικότητα}}{\text{mL}_{\text{δείγματος}}} \cdot \text{Αραίωση}$$

όπου:

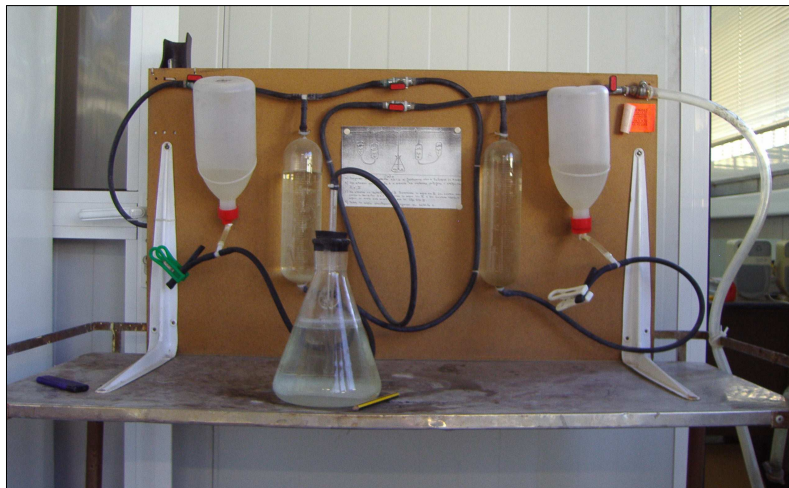
- COD : Χημική Ζήτηση Οξυγόνου (mg/L)
- Κανονικότητα: Κανονικότητα του αναγωγικού μέσου, που χρησιμοποιήθηκε στην ογκομέτρηση
- $\text{mL}_{\text{μάρτυρα}}$ και $\text{mL}_{\text{δείγματος}}$: η ποσότητα του αναγωγικού, που χρησιμοποιήθηκε για την εξουδετέρωση του $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ στον μάρτυρα και στο δείγμα αντίστοιχα.
- Αραίωση: Αραίωση του αρχικού δείγματος.

- **Προσδιορισμός Περιεκτικότητας Μεθανίου στο Βιοαέριο (% κ.ό.)**

Ο προσδιορισμός του ποσοστού του μεθανίου στο βιοαέριο πραγματοποιούνταν με μια συσκευή, που κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και βασίστηκε σε γαλλική βιβλιογραφία (Lagrange, 1979).

Η λειτουργία της συσκευής είχε ως εξής (Χριστοπούλου, 2004):

Μέρος του παραγόμενου βιοαερίου διοχετεύεται σε ένα γυάλινο βαθμονομημένο δοχείο εκτοπίζοντας ίσο όγκο νερού. Στη συνέχεια αυτή η ποσότητα του αερίου περνάει από κορεσμένο διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (ΚΟΗ) και κατέληγε σε δεύτερο πανομοιότυπο βαθμονομημένο γυάλινο δοχείο. Στο διάλυμα του ΚΟΗ κατακρατιόταν το CO₂ και έτσι κατέληγε στο δεύτερο δοχείο μόνο το μεθάνιο. Ο λόγος της διαφοράς των όγκων του νερού των βαθμονομημένων γυάλινων δοχείων αντιπροσώπευε κάθε φορά το ποσοστό μεθανίου στο βιοαέριο (Εικόνα II 7).



Εικόνα II.7 Διάταξη οργάνων για την μέτρηση περιεκτικότητας μεθανίου στο βιοαέριο

Για τον υπολογισμό του ποσοστού του μεθανίου χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$\% \text{CH}_4 = \frac{\text{Όγκος δοχείου B}}{\text{Όγκος δοχείου A}} \cdot 100$$

II.4. Πειραματική διαδικασία

Η συνολική διαδικασία χωρίζεται σε δυο φάσεις. Στην πρώτη φάση χρησιμοποιήθηκαν υγρά απόβλητα μηχανικού διαχωρισμού χοιροστασίου διαφορετικών πυκνοτήτων και ολοκληρώθηκε σε ένα στάδιο. Κατά τη δεύτερη φάση, χρησιμοποιήθηκε μίγμα των παραπάνω υγρών επιλεχθείσας πυκνότητας με τυρόγαλα. Για το λόγο αυτό, η δεύτερη φάση διαχωρίστηκε σε ένα στάδιο προσαρμογής των χωνευτήρων στο νέο υλικό, και σε ένα δεύτερο όπου χρησιμοποιήθηκε το επιθυμητό μίγμα. Τέλος, μετά την ολοκλήρωση και της δεύτερης φάσης πραγματοποιήθηκε προσθήκη των αποτελεσμάτων σε υπάρχοντα διαγράμματα παραγωγής βιοαερίου σε διάφορες τιμές οργανικού φορτίου (Γεωργακάκης κ.ά., 1985). Αναλυτικότερα:

- **Α' Φάση:** Επιλογή βέλτιστης πυκνότητας των υγρών αποβλήτων χοιροστασίου κατά την αναερόβια επεξεργασία τους. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η παραγωγή βιοαερίου από υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου, σε τέσσερις διαφορετικές ονομαστικές πυκνότητες: **2, 4, 6 και 8%**, με αντίστοιχες πραγματικές τιμές οργανικού φορτίου **1,66, 3,37, 5,05 και 5,73 kg Π.Σ./m³_{χων-48ωρο}**, με τελικό στόχο την κατάδειξη εκείνης που δίνει τη μέγιστη παραγωγή βιοαερίου. Οι επιθυμητές πυκνότητες προέκυπταν με ανάμιξη κατάλληλου όγκου πυκνότερων με αραιότερα υγρά διαχωρισμού, ή νερό βρύσης κατά περίπτωση.

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις χωνευτήρες των 25,6L ωφέλιμου όγκου ο καθένας. Η τροφοδοσία κάθε χωνευτήρα γινόταν ανά 48 ώρες με 3.200 mL υγρών με την επιθυμητή πυκνότητα και η αναερόβια χώνευσή τους λάμβανε χώρα στη μεσόφιλη περιοχή (30-40°C). Σύμφωνα με την παραπάνω ποσότητα 48ωρης τροφοδοσίας, ο επιθυμητός χρόνος παραμονής των αποβλήτων μέσα στους χωνευτήρες ήταν 16 ημέρες. Ο συγκεκριμένος χρόνος παραμονής είναι συνήθης για την παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα χοιροστασίων, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία (Burton and Turner, 2003). Ωστόσο, ανά αραιά χρονικά διαστήματα ήταν απαραίτητη η προσθήκη μικρών ποσοτήτων νερού (450-500mL) εντός των χωνευτήρων για την διόρθωση της στάθμης του υγρού περιεχομένου, εξαιτίας των απωλειών νερού λόγω εξάτμισης.

Παράλληλα με την 48ωρη τροφοδοσία των χωνευτήρων πραγματοποιούνταν μετρήσεις της τιμής του pH στα υγρά εξόδου και της παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου κάθε χωνευτήρα, για την παρακολούθηση της πορείας της χώνευσης. Μετά τη σταθεροποίηση της παραγωγής βιοαερίου, γίνονταν μετρήσεις της περιεκτικότητας του βιοαερίου σε μεθάνιο, των ολικών και πτητικών στερεών και της χημικής ζήτησης οξυγόνου (COD) των υγρών εξόδου κάθε χωνευτήρα. Μετρήσεις των ολικών και πτητικών στερεών και της COD των υγρών τροφοδοσίας, γίνονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Ο πρώτος χωνευτήρας (Α) τροφοδοτήθηκε με υγρά απόβλητα μηχανικού διαχωρισμού με τη μεγαλύτερη πυκνότητα (8% Ο.Σ.). Η λειτουργία του αλλά και η λήψη των σχετικών μετρήσεων, ήταν προβληματική λόγω της μεγάλης πυκνότητας των υγρών. Συγκεκριμένα:

α) παρατηρήθηκε το φαινόμενο της αυτοθέρμανσης, οπότε και μειώσαμε σταδιακά την παροχή θερμότητας στον χωνευτήρα μέχρι την οριστική διακοπή της. Η θερμοκρασία του υγρού περιεχομένου του χωνευτήρα διατηρήθηκε έτσι στα επίπεδα της μεσόφιλης χώνευσης, χωρίς την ανάγκη κατανάλωσης ενέργειας για 18 ημέρες. Σημειώνεται πως η θερμοκρασία χώρου όπου βρίσκονταν οι χωνευτήρες, στη συγκεκριμένη φάση, ήταν κατά μέσο όρο 23°C η ελάχιστη και 31°C η μέγιστη.

β) τα υγρά εξόδου του χωνευτήρα Α εμφάνιζαν έντονη ανομοιογένεια, η οποία δήλωνε και την έντονη στρωμάτωση του υγρού περιεχόμενου του χωνευτήρα. Πιο συγκεκριμένα, κατά την εξαγωγή των 3,2L ανά 48ωρο, τα πρώτα 500mL περίπου ήταν υγρής μορφής ενώ η υπόλοιπη ποσότητα είχε λασπώδη ή και ημιστερεή μορφή. Συνεπώς, τα δείγματα που λαμβάνονταν για τις μετρήσεις στερεών και χημικής ζήτησης οξυγόνου των υγρών εξόδου δεν θεωρούνται αντιπροσωπευτικά, και οι αντίστοιχες μετρήσεις σημειώνονται στα αποτελέσματα με διαφορετικό χρώμα (γκρι).

Για τους παραπάνω λόγους, καταργήθηκε ο χωνευτήρας (Α) μετά το τέλος της Α' φάσης.

Παρόμοια ανομοιογένεια παρουσιάστηκε στα υγρά εξόδου και του δεύτερου χωνευτήρα (Β), αλλά σε μικρότερο βαθμό. Ο χωνευτήρας Β τροφοδοτήθηκε με την αμέσως επόμενη αραιότερη πυκνότητα (6% σε ολικά στερεά) και η λειτουργία του δεν παρουσίασε σημαντικά προβλήματα. Ωστόσο, για λόγους ασφαλείας τα αποτελέσματα των μετρήσεων στερεών και χημικής ζήτησης οξυγόνου των υγρών εξόδου του κρίνονται επίσης μη αντιπροσωπευτικά και σημειώνονται στους αντίστοιχους πίνακες με διαφορετικό χρώμα (γκρι).

Πιθανότερη αιτία πρόκλησης των παραπάνω προβλημάτων των χωνευτήρων Α(8%Ο.Σ.) και Β(6%Ο.Σ.) θεωρείται η αδυναμία των εγκαταστάσεων του εργαστηρίου μας να αναπεξέλθουν στα υψηλότερα επίπεδα πυκνότητας υγρών διαχωρισμού. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται πως η αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα σε κατάλληλες εγκαταστάσεις και σε υψηλότερα επίπεδα πυκνοτήτων διαχωρισμένων υγρών, όπως για παράδειγμα σε πιλοτικό πρόγραμμα παραγωγής βιοαερίου σε διαχωρισμένα υγρά χοιροστασίου, όπου οι μέσες τιμές των ολικών και πτητικών στερεών ήταν 12,2% και 9,3% κ.β. κατά μέσο όρο αντίστοιχα (Moller et al, 2007). Συνεπώς, τα όρια λειτουργίας των χωνευτήρων του εργαστηρίου μας δεν μπορούσαν να υποστηρίξουν τέτοιες συνθήκες πυκνότερων αποβλήτων. Ωστόσο, από την εμπειρία μας από επισκέψεις σε χοιροστάσια της Ελλάδας, τα υγρά μηχανικού διαχωρισμού μετά βίας φθάνουν την τιμή πυκνότητας 4%Ο.Σ.

Όσον αφορά τους επόμενους δυο χωνευτήρες Γ και Δ, τροφοδοτήθηκαν με υγρά απόβλητα μηχανικού διαχωρισμού χοιροστασίου ονομαστικών πυκνοτήτων 4% και 2% σε ολικά στερεά, αντίστοιχα. Η λειτουργία τους και οι μετρήσεις υπήρξαν ομαλές, χωρίς προβλήματα.

Μετά την ολοκλήρωση του πειραματικού μέρους της Α' φάσης ακολούθησε η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, απ' όπου προέκυψε ότι για την τιμή **4 kg Π.Σ./m³_{χων} ή 4,7%Ο.Σ.** εμφανίζεται η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου και

μεθανίου στα αντίστοιχα διαγράμματα. Η τιμή αυτή θεωρήθηκε ως βέλτιστη και επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση της δεύτερης φάσης της πειραματικής διαδικασίας.

- **Β' Φάση**: Μελέτη της παραγωγής βιοαερίου από υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου πυκνότητας 4,7% Ο.Σ.κ.β. αναμιγμένα με τυρόγαλα, σε συγκεκριμένη αναλογία πτητικών στερεών, η οποία είναι η μέση τιμή του βέλτιστου εύρους τιμών πτητικών στερεών που προτείνεται σε προηγούμενη μελέτη (Κακούρος, 2009). Πιο συγκεκριμένα, στην προηγούμενη μεταπτυχιακή διατριβή χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά μίγματα τυρογάλακτος με υγρά διαχωρισμού 2%κ.β. Ο.Σ., και το προκύπτον βέλτιστο εύρος τιμών πτητικών στερεών ήταν 11-24/1 (Π.Σ.τυρ/κτος/Π.Σ.υγρών διαχωρισμού). Στην παρούσα στην παρούσα φάση χρησιμοποιήθηκε μίγμα τυρογάλακτος με υγρά διαχωρισμού ονομαστικής πυκνότητας 4,7% Ο.Σ.κ.β., σε αναλογία πτητικών στερεών τη μέση τιμή του προαναφερόμενου εύρους, δηλαδή:

$$\frac{\text{Π.Σ.τυρογάλακτος}}{\text{Π.Σ.υγρών χοιρ.}} = \frac{17,5}{1}$$

Το τυρόγαλα που χρησιμοποιήθηκε και στις δυο μελέτες είχε τα ίδια χαρακτηριστικά και συνεπώς, στην παρούσα φάση αξιολογήθηκε η προτεινόμενη αναλογία πτητικών στερεών σε μεγαλύτερης (σχεδόν διπλάσιας) πυκνότητας υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου.

Η τροφοδοσία των χωνευτήρων συνεχίστηκε συστηματικά ανά 48ωρο με προσθήκη 3,2L μίγματος. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν μόνο υγρά μηχανικού διαχωρισμού πυκνότητας, για ομοιογενοποίηση του υγρού περιεχομένου των χωνευτήρων. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε μίγμα υγρών διαχωρισμού και τυρόγαλα. Για το τελευταίο κρίθηκε αναγκαία η σταδιακή αύξηση της ποσότητάς του στο μίγμα τροφοδοσίας έως την τελική αναλογία για λόγους ασφαλείας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικοί λόγοι ανάμιξης πτητικών στερεών μέχρι την τελική επιθυμητή αναλογία 17,5/1, όπως φαίνονται στον πίνακα Π 4.1. Η τιμή pH του υγρού περιεχομένου των χωνευτήρων έπρεπε να διατηρηθεί σε ασφαλή επίπεδα για την

απρόσκοπτη δραστηριότητα των μικροοργανισμών και κατ' επέκταση την ομαλή πορεία της χώνευσης εντός των χωνευτήρων.

Πίνακας Π 4.1 Χαρακτηριστικά των μιγμάτων τυρογάλακτος και υγρών μηχανικού διαχωρισμού χοιροστασίου κατά την Β' φάση

	Μίγμα τροφοδοσίας (L)	Ποσοστό τυρογάλακτος (%)	Ποσοστό υγρών χοιροστασίου (%)	Αναλογία όγκων (Vτ/Vχ)	Αναλογία πτητικών στερεών (Π.Σ.τ/Π.Σ.χ)
1	2,2X + 1,0T	31,25	68,75	0,45/1	0,75/1
2	1,7X + 1,5T	46,87	53,13	0,88/1	1,46/1
3	1,2X + 2,0T	62,50	37,50	1,67/1	2,76/1
4	0,6X + 2,6T	81,25	18,75	4,33/1	7,17/1
5	0,3X + 2,9T	90,62	9,38	9,67/1	17,5/1

Κατά τις τρεις πρώτες δοσολογίες εφαρμόστηκε μόνο η τυπική 48ώρη παρακολούθηση της πορείας λειτουργίας των χωνευτήρων με μετρήσεις της τιμής του pH και του παραγόμενου βιοαερίου. Στην τέταρτη δοσολογία μετρήθηκαν επιπλέον και το ποσοστό μεθανίου στο βιοαέριο και οι τιμές στερεών (Ο.Σ. και Π.Σ.) και COD στα υγρά εισόδου και εξόδου κάθε χωνευτήρα, μετά από την σταθεροποίηση της αναερόβιας χώνευσης, η οποία έλαβε χώρα μετά από 14 ημέρες. Οι μετρήσεις αυτές της 4^{ης} δοσολογίας έγιναν για λόγους ασφαλείας σε περίπτωση κατάρρευσης των συστημάτων στην επόμενη δοσολογία. Και στην πέμπτη δοσολογία εφαρμόστηκαν όλες οι παραπάνω μετρήσεις, σε διαφορετικό όμως χρόνο σταθεροποίησης, ο οποίος ήταν 16 ημέρες. Ο χρόνος σταθεροποίησης των συστημάτων στις τρεις πρώτες δοσολογίες δεν μας απασχόλησε ουσιαστικά, εφόσον αυτές δεν είχαν πειραματικό ενδιαφέρον παρά μόνο λειτουργικό, για την ασφαλέστερη πορεία της χώνευσης.

II.5. Αποτελέσματα - Συζήτηση

Ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου σε σταθερή πίεση και θερμοκρασία καθορίζεται από την ημερήσια ογκομετρική φόρτιση (kg COD ή $\text{Π.Σ./m}^3_{\text{χων}}-48\omega\text{ρο}$). Διαφορετικές τιμές ογκομετρικής φόρτισης αποδίδουν και διαφορετική ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου ($\text{m}^3/\text{m}^3_{\text{χων}}$).

Ο ωφέλιμος όγκος του αναερόβιου χωνευτήρα, καθώς και η ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου επηρεάζονται από το βαθμό αραίωσης των αποβλήτων. Υπερμεγέθεις χωνευτήρες, λόγω των αραιωμένων αποβλήτων, με δεδομένο χρόνο παραμονής, αποδίδουν μικρή 'καθαρή' ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου (με τον όρο 'καθαρή' παραγωγή νοείται η ποσότητα βιοαερίου που είναι διαθέσιμη για αξιοποίηση, μετά από την αφαίρεση της ποσότητας που απαιτείται για τη θέρμανση του χωνευτήρα).

Σε μια τέτοια περίπτωση η μεγαλύτερη ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου απορροφάται στη θέρμανση του περιεχομένου του, αποτελούμενο κυρίως από νερό αραίωσης, το οποίο δεν μπορεί να παράγει φυσικά βιοαέριο και ως εκ τούτου συνιστά παθητικό για την όλη διαδικασία.

Κατά συνέπεια, μια οικονομικά αποδεκτή εγκατάσταση παραγωγής βιοαερίου θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από όσο το δυνατό μεγαλύτερες τιμές ογκομετρικής παραγωγής βιοαερίου. Τέτοιες τιμές μπορούν να ληφθούν μόνο μετά από συμπύκνωση ('πάχυνση' αποβλήτων με καθίζηση) ή μετά από ανάμιξη κατάλληλων αποβλήτων (π.χ. για διόρθωση του λόγου C/N) και γενικά, διατηρώντας το νερό ή τα πολύ αραιωμένα απόβλητα εκτός της εγκατάστασης παραγωγής βιοαερίου.

Από πολύ παλιά το Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών ανέπτυξε ερευνητική δραστηριότητα για τον προσδιορισμό της ογκομετρικής παραγωγής βιοαερίου κάτω από διαφορετικές τιμές ογκομετρικής φόρτισης (Γεωργακάκης κ.ά., 1985).

II.5.1. Α' Φάση: Παραγωγή βιοαερίου από υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου σε τέσσερις διαφορετικές πυκνότητες

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, καθένας από τους τέσσερις χωνευτήρες τροφοδοτήθηκε με υγρά μηχανικού διαχωρισμού χοιροστασίου διαφορετικής πυκνότητας και πιο συγκεκριμένα:

- Χωνευτήρας Α → 8% Ο.Σ._{κ.β.}
- Χωνευτήρας Β → 6% Ο.Σ._{κ.β.}
- Χωνευτήρας Γ → 4% Ο.Σ._{κ.β.}
- Χωνευτήρας Δ → 2% Ο.Σ._{κ.β.}

Στον πίνακα II 5.1 παρουσιάζονται τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των υγρών τροφοδοσίας, για καθέναν από τους τέσσερις χωνευτήρες όπως αυτοί διαχωρίζονται ανάλογα την πυκνότητα των πρώτων.

Πίνακας II 5.1 Ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των υγρών τροφοδοσίας (υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου) των χωνευτήρων

Όνομαστική πυκνότητα	Ο.Σ.	Π.Σ.		Οργανικό φορτίο (kg Π.Σ./m ³ _{χων} -48ωρο)	COD (mg/L)
	(%κ.β.)	% Ο.Σ.	% κ.β.		
8%	7,81	60,43	4,72	5,73	77.976
	7,38	60,58	4,47		
	7,65	59,33	4,54		
	7,84	58,53	4,59		
M.O.	7,67	59,72	4,58		
6%	6,93	62,31	4,32	5,05	38.304
	6,77	62,00	4,20		
	6,15	58,93	3,63		
M.O.	6,62	61,08	4,05		
4%	3,73	75,03	2,80	3,37	28.272
	4,40	66,72	2,93		
	3,79	61,78	2,34		
M.O.	3,97	67,84	2,69		
2%	1,81	74,75	1,35	1,66	8.496
	2,02	72,14	1,46		
	1,89	62,13	1,18		
M.O.	1,91	69,67	1,33		

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συνθήκες λειτουργίας και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για κάθε χωνευτήρα.

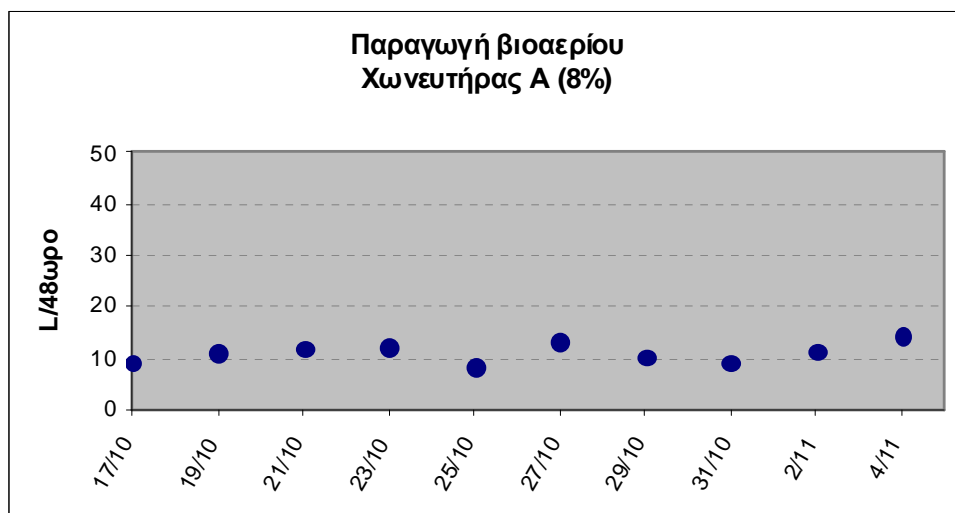
II.5.1.1. Χωνευτήρας Α (πυκνότητας 8% Ο.Σ.κ.β.)

Οι διακυμάνσεις της τιμής του pH και του παραγόμενου βιοαερίου, στη σταθεροποιημένη φάση του χωνευτήρα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί και στα αντίστοιχα διαγράμματα.

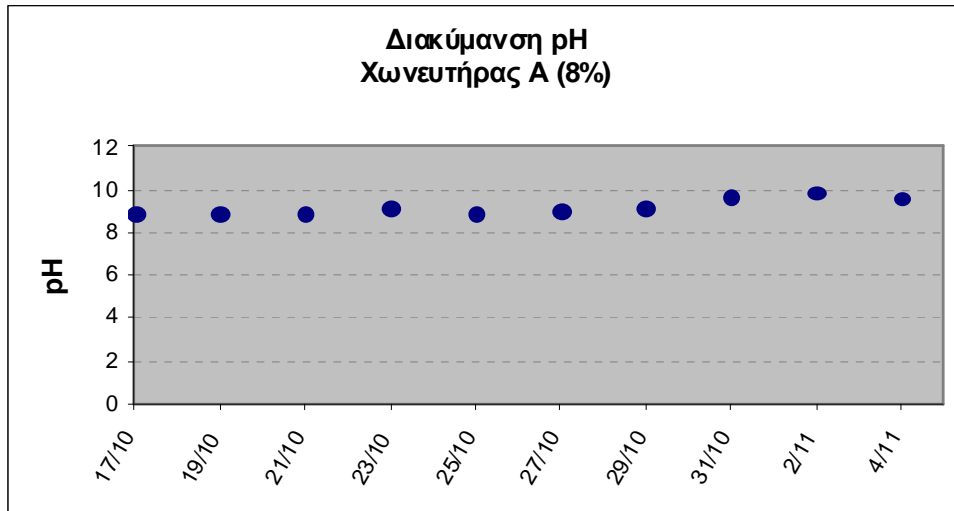
Πίνακας II 5.2 Τιμές pH και παραγωγή βιοαερίου χωνευτήρα Α

	pH	Βιοαέριο	
		L/48ωρο	Nm ³ /m ³ _{χων} -48ωρο
17/10	8,80	9,20	0,34
19/10	8,86	10,9	0,40
21/10	8,85	11,9	0,44
23/10	9,12	12,2	0,45
25/10	8,85	8,40	0,31
27/10	9,00	13,4	0,49
29/10	9,13	10,3	0,38
31/10	9,60	9,10	0,33
2/11	9,80	11,4	0,42
4/11	9,58	14,4	0,53
M.O.	9,16	11,12	0,41

Διάγραμμα II 5.1 Διακύμανση παραγωγής βιοαερίου του χωνευτήρα Α



Διάγραμμα Π 5.2 Διακύμανση της τιμής του pH του χωνευτήρα Α



Οι τιμές του pH στη σταθεροποιημένη φάση του χωνευτήρα, διατηρήθηκαν σε υψηλά επίπεδα, και συγκεκριμένα πάνω από την τιμή 8,8.

Στον πίνακα Π 5.3 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων βιοαερίου, μεθανίου, pH, στερεών και COD που πραγματοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της Α' φάσης για τον χωνευτήρα Α. Με γκρι χρώμα φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που κρίνονται μη αντιπροσωπευτικά λόγω των προβλημάτων που προέκυψαν, όπως αυτά αναλύονται στο κεφάλαιο Π 4.

Πίνακας Π 5.3 Μέσοι όροι μετρήσεων Α' φάσης χωνευτήρα Α

Βιοαέριο	% Μεθάνιο	Μεθάνιο	pH	Ο.Σ. %κ.β.	Π.Σ. %κ.β.	COD mg/L
0,41 Nm ³ /m ³ _{χων} -48ωρο	91,6	0,38 Nm ³ /m ³ _{χων} -48ωρο	9,16	4,84	2,94	27.328
0,072 Nm ³ /kg Π.Σ.		0,066 Nm ³ /kg Π.Σ.				

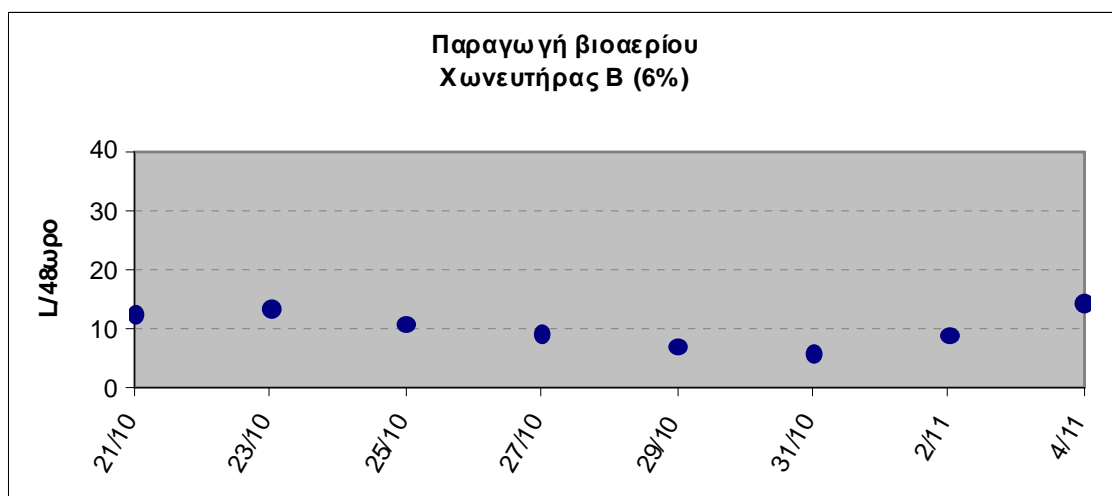
II.5.1.2. Χωνευτήρας Β (πυκνότητας 6% Ο.Σ.κ.β.)

Οι διακυμάνσεις της τιμής του pH και του παραγόμενου βιοαερίου, στη σταθεροποιημένη φάση του χωνευτήρα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί και στα αντίστοιχα διαγράμματα.

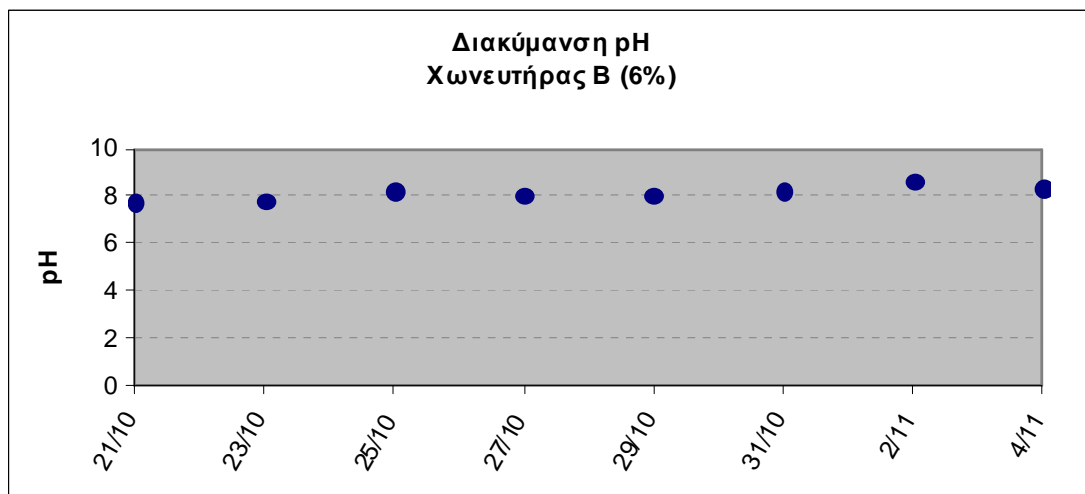
Πίνακας II 5.4 Τιμές pH και παραγωγή βιοαερίου χωνευτήρα Β

	pH	Βιοαέριο	
		L/48ωρο	Nm ³ /m ³ _{χων} -48ωρο
21/10	7,79	12,7	0,48
23/10	7,80	13,6	0,51
25/10	8,25	10,9	0,41
27/10	8,04	9,20	0,35
29/10	8,03	7,10	0,27
31/10	8,23	6,10	0,23
2/11	8,62	9,10	0,34
4/11	8,32	14,4	0,54
Μ.Ο.	8,14	10,39	0,39

Διάγραμμα II 5.3 Διακύμανση παραγωγής βιοαερίου του χωνευτήρα Β



Διάγραμμα Π 5.4 Διακύμανση της τιμής του pH του χωνευτήρα Β



Η τιμή του pH διατηρήθηκε πάνω από την τιμή 8 στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, αλλά σε χαμηλότερα επίπεδα από εκείνα του χωνευτήρα Α (7,8-8,62).

Στον πίνακα Π 5.5 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων βιοαερίου, μεθανίου, pH, στερεών και COD που πραγματοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της Α' φάσης για τον χωνευτήρα Β. Με γκρι χρώμα φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που κρίνονται μη αντιπροσωπευτικά λόγω των προβλημάτων που προέκυψαν, όπως αυτά αναλύονται στο κεφάλαιο Π 4.

Πίνακας Π 5.5 Μέσοι όροι μετρήσεων Α' φάσης χωνευτήρα Β

Βιοαέριο	% Μεθάνιο	Μεθάνιο	pH	Ο.Σ. %κ.β.	Π.Σ. %κ.β.	COD mg/L
0,39 Nm ³ /m ³ χων-48ωρο	92,3	0,36 Nm ³ /m ³ χων-48ωρο	8,14	5,42	3,43	46.848
0,077 Nm ³ /kg Π.Σ.		0,071 Nm ³ /kg Π.Σ.				

Παρατηρείται αύξηση της παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου ανά kg Π.Σ. σε σχέση με τον προηγούμενο χωνευτήρα, κάτι αναμενόμενο λόγω του ευνοϊκότερου pH λειτουργίας του χωνευτήρα Β.

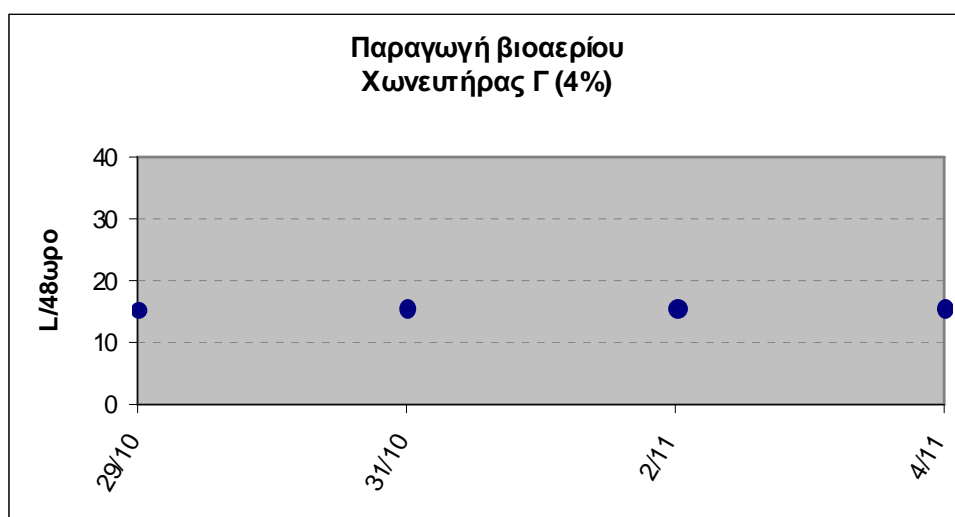
II.5.1.3. Χωνευτήρας Γ (πυκνότητας 4% Ο.Σ.κ.β.)

Οι διακυμάνσεις της τιμής του pH και του παραγόμενου βιοαερίου, στη σταθεροποιημένη φάση του χωνευτήρα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί και στα αντίστοιχα διαγράμματα.

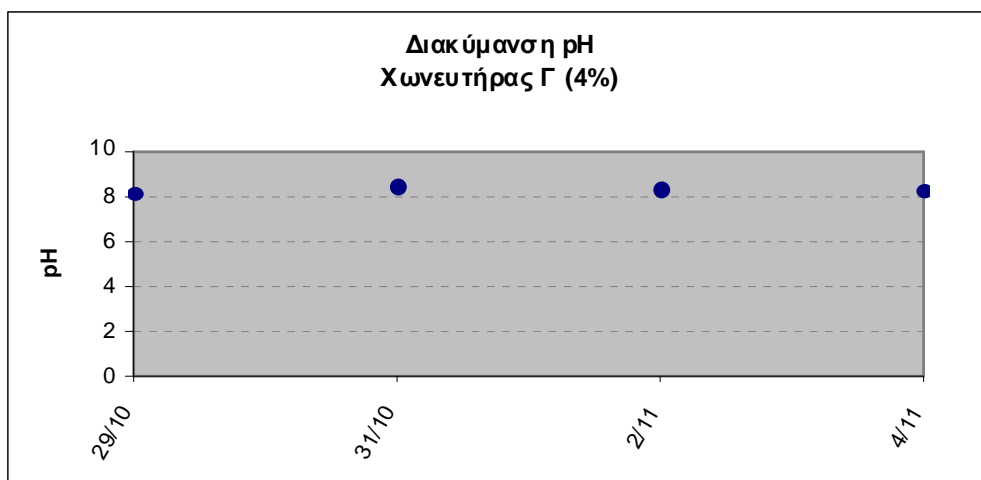
Πίνακας II 5.6 Τιμές pH και παραγωγή βιοαερίου χωνευτήρα Γ

	pH	Βιοαέριο	
		L/48ωρο	Nm ³ /m ³ _{χων} -48ωρο
29/10	8,13	15,40	0,58
31/10	8,40	15,72	0,59
2/11	8,35	15,60	0,58
4/11	8,26	15,50	0,58
M.O.	8,29	15,56	0,58

Διάγραμμα II 5.5 Διακύμανση παραγωγής βιοαερίου για τον χωνευτήρα Γ



Διάγραμμα Π 5.6 Διακύμανση της τιμής του pH για τον χωνευτήρα Γ



Η τιμή του pH του χωνευτήρα Γ στη σταθεροποιημένη φάση του, διατηρήθηκε σε ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα από εκείνα του χωνευτήρα Β (8,13-8,4).

Στον πίνακα Π 5.7 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων βιοαερίου, μεθανίου, pH, στερεών και COD που πραγματοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της Α' φάσης για τον χωνευτήρα Γ.

Πίνακας Π 5.7 Μέσοι όροι μετρήσεων Α' φάσης χωνευτήρα Γ

Βιοαέριο	% Μεθάνιο	Μεθάνιο	pH	Ο.Σ. %κ.β.	Π.Σ. %κ.β.	COD mg/L
0,58 Nm ³ /m ³ _{χων} -48ωρο	90,2	0,52 Nm ³ /m ³ _{χων} -48ωρο	8,29	1,22	0,76	5.501
0,17 Nm ³ /kg Π.Σ.		0,15 Nm ³ /kg Π.Σ.				

Συγκρίνοντας τους πίνακες Π 5.1 και Π 5.7 προκύπτει μείωση του οργανικού φορτίου 71,75% σε πτητικά στερεά και 40,45% σε COD.

Επίσης, παρατηρείται ακόμα πιο υψηλή τιμή παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου ανά kg Π.Σ. σε σχέση με τους δύο προηγούμενους χωνευτήρες.

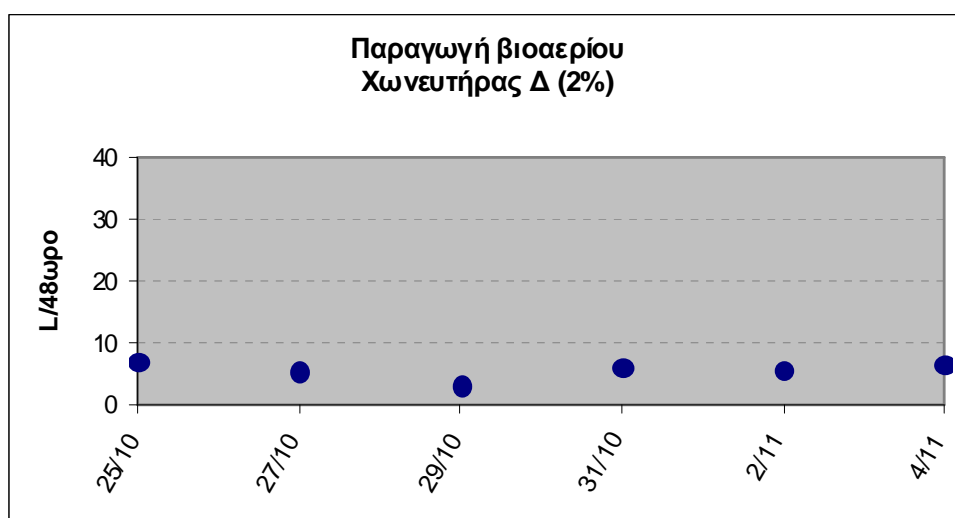
II.5.1.4. Χωνευτήρας Δ (πυκνότητας 2% Ο.Σ.κ.β.)

Οι διακυμάνσεις της τιμής του pH και του παραγόμενου βιοαερίου, στη σταθεροποιημένη φάση του χωνευτήρα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί και στα αντίστοιχα διαγράμματα.

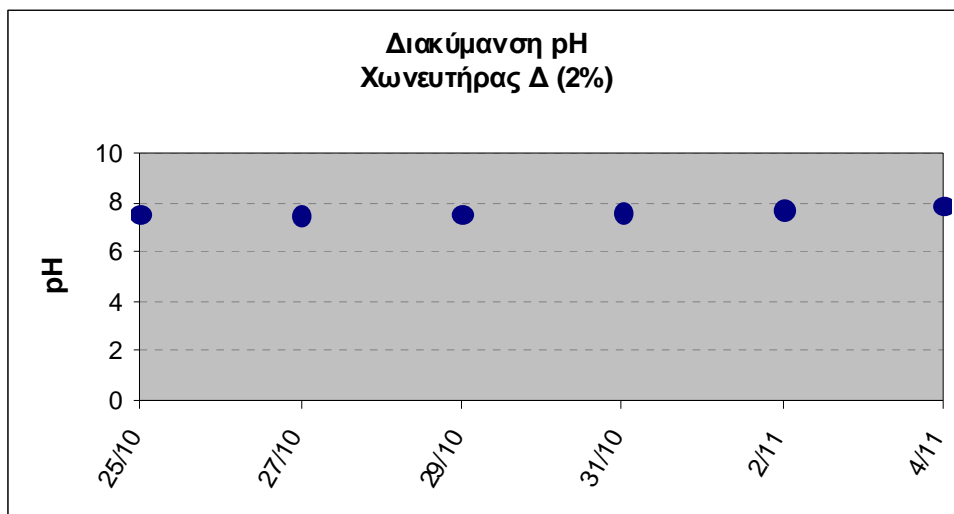
Πίνακας II 5.8 Τιμές pH και παραγωγή βιοαερίου χωνευτήρα Δ

	pH	Βιοαέριο	
		L/48ωρο	Nm ³ /m ³ _{χων} -48ωρο
25/10	7,56	7,00	0,26
27/10	7,51	5,30	0,20
29/10	7,54	3,20	0,12
31/10	7,61	6,00	0,22
2/11	7,71	5,70	0,21
4/11	7,87	6,50	0,24
M.O.	7,63	5,62	0,21

Διάγραμμα II 5.7 Διακύμανση της παραγωγής βιοαερίου για τον χωνευτήρα Δ



Διάγραμμα Π 5.8 Διακύμανση της τιμής του pH για τον χωνευτήρα Δ



Ο χωνευτήρας Δ εμφάνισε τα χαμηλότερα επίπεδα τιμών pH (7,51-7,87) συγκριτικά με τους άλλους τρεις χωνευτήρες, ήταν όμως εντός των ορίων ομαλής εξέλιξης της διαδικασίας της χώνευσης.

Στον πίνακα Π 5.9 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των μετρήσεων βιοαερίου, μεθανίου, pH, στερεών και COD που πραγματοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της Α' φάσης για τον χωνευτήρα Δ.

Πίνακας Π 5.9 Μέσοι όροι μετρήσεων Α' φάσης χωνευτήρα Δ

Βιοαέριο	% Μεθάνιο	Μεθάνιο	pH	Ο.Σ. %κ.β.	Π.Σ. %κ.β.	COD mg/L
0,21 Nm ³ /m ³ _{χων-48ωρο}	87,7	0,18 Nm ³ /m ³ _{χων-48ωρο}	7,63	0,55	0,325	5.368*
0,126 Nm ³ /kg Π.Σ.		0,11 Nm ³ /kg Π.Σ.				

*Αποτέλεσμα μιας εκ των δύο μετρήσεων COD που διενεργήθηκαν, εφόσον η δεύτερη ήταν πολύ υψηλή και κρίθηκε λανθασμένη (11.224 mg/L)

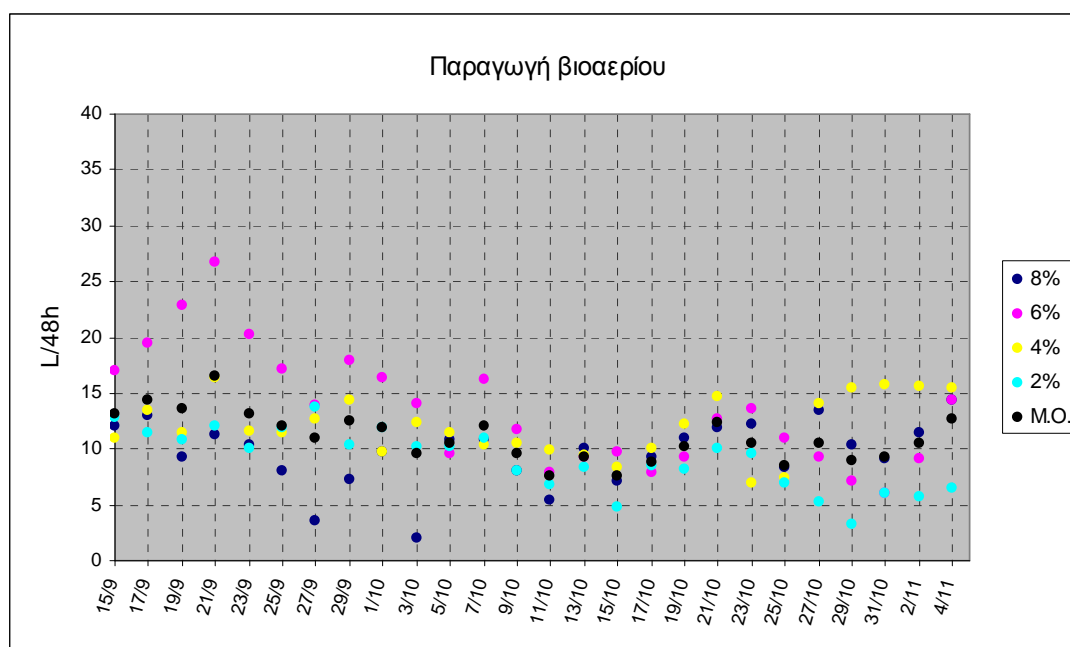
Συγκρίνοντας τους πίνακες Π 5.1 και Π 5.9 προκύπτει μείωση του οργανικού φορτίου 75,56% σε πτητικά στερεά και 36,81% σε COD.

Η παραγωγή βιοαερίου ήταν σαφώς η μικρότερη σε σχέση με τους υπόλοιπους χωνευτήρες λόγω του χαμηλότερου οργανικού φορτίου.

II.5.1.5. Συγκριτική λειτουργία τεσσάρων χωνευτήρων Α' φάσης

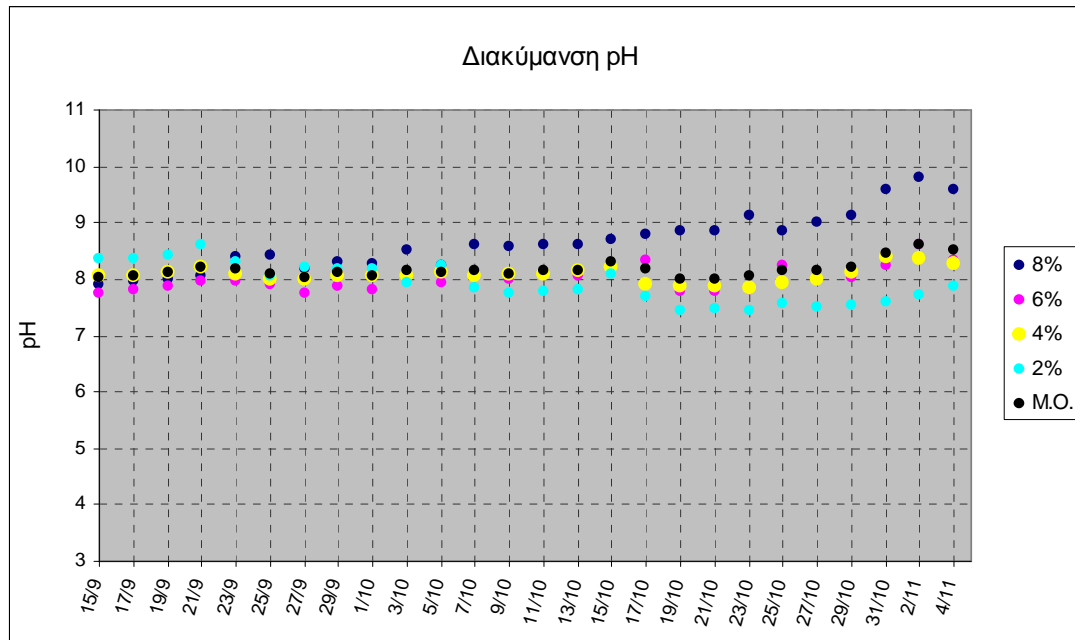
Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά τα πλήρη διαγράμματα της διακύμανσης της παραγωγής του βιοαερίου και του pH καθ' όλη τη διάρκεια της Α' φάσης, για τους τέσσερις χωνευτήρες.

Διάγραμμα II 5.9 Διακύμανση παραγωγής βιοαερίου των τεσσάρων χωνευτήρων κατά την Α' φάση και ο μέσος όρος τους



Παρατηρούμε πως η παραγωγή βιοαερίου των χωνευτήρων Γ(4%) και Δ(2%) κυμάνθηκαν κοντά στο μέσο όρο. Εκείνες των χωνευτήρων Α(8%) και Β(6%) που παρουσίασαν έντονη διαφοροποίηση κατά τις πρώτες 18 ημέρες. Επίσης ο χωνευτήρας Γ σταθεροποιήθηκε σημαντικά κατά τις 6 τελευταίες ημέρες (42 ημέρες μετά την έναρξη) και εμφάνισε τις υψηλότερες τιμές παραγωγής βιοαερίου τη συγκεκριμένη περίοδο. Στις ημέρες αυτές και οι άλλοι τρεις χωνευτήρες έδειξαν τάση σταθεροποίησης, και πιο συγκεκριμένα ο χωνευτήρας Δ δίνοντας τις χαμηλότερες τιμές παραγωγής βιοαερίου, ενώ οι χωνευτήρες Α και Β κινήθηκαν στον μέσο όρο με τάση ελαφρώς αυξητική.

Διάγραμμα Π 5.10 Διακύμανση της τιμής pH των τεσσάρων χωνευτήρων κατά την Α' φάση και ο μέσος όρος τους



Παρατηρούμε πως κατά τις πρώτες 22 ημέρες όλοι οι χωνευτήρες εμφάνισαν παραπλήσιες τιμές pH, ενώ στη συνέχεια διαφοροποιήθηκαν οι χωνευτήρες Α(8%) που έδωσε συνεχώς αυξανόμενες τιμές pH (έως 9,8), και Δ(2%) με τις χαμηλότερες τιμές (έως 7,43). Οι χωνευτήρες Β(6%) και Γ(4%) παρουσίασαν τις μικρότερες διακυμάνσεις pH. Γενικά, οι τιμές pH των τεσσάρων χωνευτήρων κατά τη διάρκεια της Α' φάσης κυμάνθηκαν στα παρακάτω πλαίσια:

- Α (8%) $7,90 < \text{pH} < 9,80$
- Β (6%) $7,75 < \text{pH} < 8,62$
- Γ (4%) $7,84 < \text{pH} < 8,35$
- Δ (2%) $7,43 < \text{pH} < 8,62$

Όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά στη βιβλιογραφία (Γεωργακάκης, 2009β), το ευνοϊκότερο εύρος τιμών pH για την αναερόβια χώνευση είναι μεταξύ 6,8 και 7,5, αλλά η διαδικασία εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα ικανοποιητικά ακόμα και μεταξύ 6,5 και 8,0 (με μέγιστες τιμές 7-8). Επίσης, στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί και το γεγονός ότι περισσότερο η πτώση κάτω από την τιμή 6, παρά η άνοδος πάνω από το 8, είναι επικίνδυνη για την ομαλή διαδικασία παραγωγής μεθανίου.

Στο συγκεντρωτικό πίνακα Π 5.10 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των ολικών και πτητικών στερεών και χημικής ζήτησης οξυγόνου των υγρών τροφοδοσίας και εξόδου, των τιμών pH λειτουργίας, του παραγόμενου βιοαερίου και μεθανίου καθώς και της περιεκτικότητας του πρώτου στο δεύτερο, για καθένα από τους τέσσερις χωνευτήρες.

Πίνακας Π 5.10 Συγκεντρωτικός πίνακας του οργανικού φορτίου και της μείωσής του, των μέσων όρων μετρήσεων Ο.Σ., Π.Σ. και COD των υγρών τροφοδοσίας και εξόδου, pH, παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου, ποσοστού μεθανίου στο βιοαέριο για τις τέσσερις πυκνότητες υγρών διαχωρισμού χοιροστασίου κατά την Α' φάση

		Πυκνότητα υγρών διαχωρισμού χοιροστασίου (%Ο.Σ.)				
		8%	6%	4%	2%	
Οργανικό φορτίο	(kg Π.Σ./m ³ _{χων} -48ωρο)	5,73	5,05	3,37	1,66	
Εισερχόμενα	Ο.Σ. (%κ.β.)	7,67	6,62	3,97	1,91	
	Π.Σ.	(%Ο.Σ.)	59,72	61,08	67,84	69,67
		(%κ.β.)	4,58	4,05	2,69	1,33
		COD (mg/L)	77.976	38.304	28.272	8.496
Εξερχόμενα	Ο.Σ. (%κ.β.)	4,84	5,42	1,22	0,55	
	Π.Σ.	(%Ο.Σ.)	60,75	63,59	62,63	62,43
		(%κ.β.)	2,94	3,43	0,76	0,325
		COD (mg/L)	27.328	46.848	5.501	8.296
pH		9,16	8,14	8,29	7,63	
Βιοαέριο	(Nm ³ /m ³ _{χων} -48ωρο)	0,41	0,39	0,58	0,21	
	(Nm ³ /kg Π.Σ.)	0,072	0,077	0,17	0,126	
% Μεθανίου		91,6	92,3	90,2	87,7	
Μεθάνιο	(Nm ³ /m ³ _{χων} -48ωρο)	0,38	0,36	0,52	0,18	
	(Nm ³ /kg Π.Σ.)	0,066	0,07	0,15	0,11	
Μείωση φορτίου	% Π.Σ.	-	-	71,75	75,56	
	% COD	-	-	40,45	36,81	

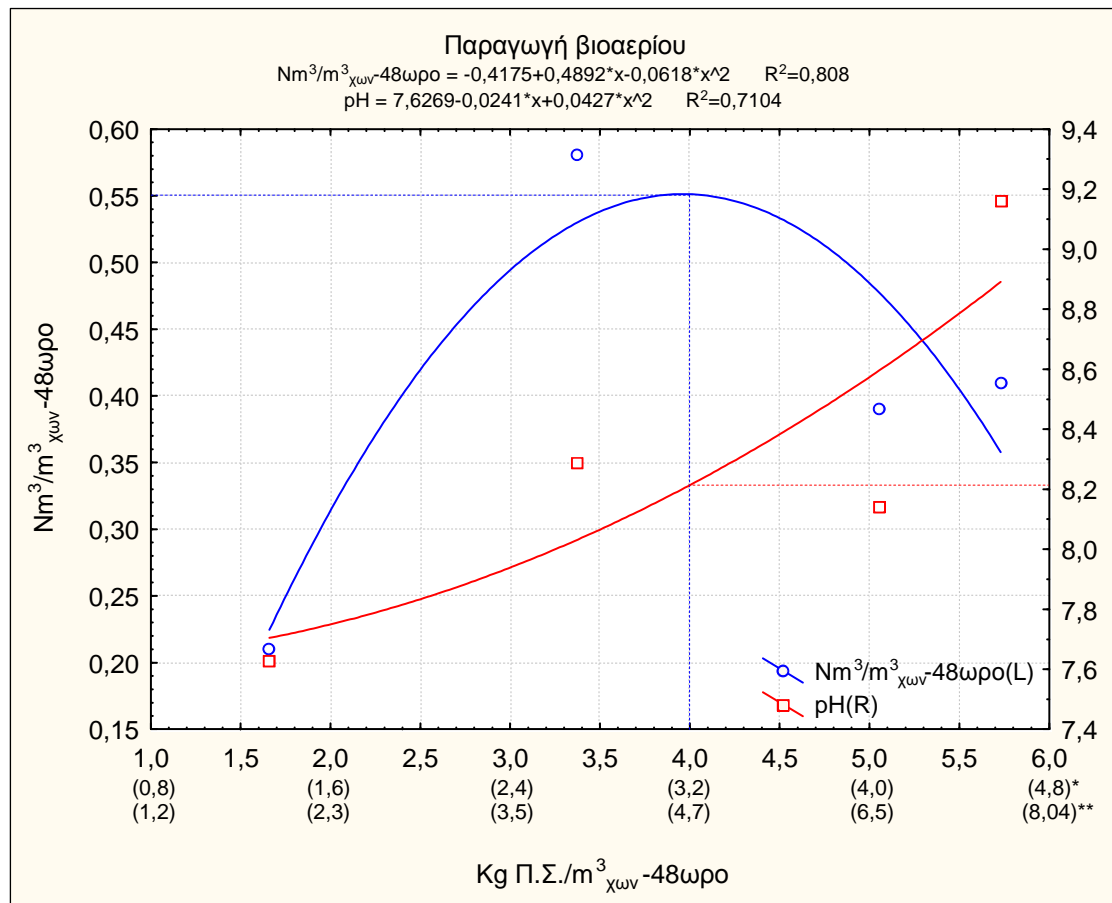
Ένα στοιχείο που αξίζει να σχολιαστεί, πριν την ανάλυση της παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου των τεσσάρων χωνευτήρων, είναι η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο, η οποία όπως φαίνεται στον πίνακα Π 5.10, είναι αρκετά υψηλή. Μάλιστα, το ποσοστό μεθανίου στο βιοαερίο που αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Γεωργακάκης, 2009β) κυμαίνεται μεταξύ 60-70% για υγρά αποβλητα χοιροστασίου, ενώ οι τιμές των τεσσάρων χωνευτήρων όπως φαίνονται στον πίνακα Π 5.10, είναι αρκετά υψηλότερες (87,7-92,3%).

Όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο Π.3 (Μέθοδοι αναλύσεων και προσδιορισμών), η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο μετριόταν ογκομετρικά με απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) σε κορεσμένο διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου (NaOH). Καθώς η μέτρηση της περιεκτικότητας σε μεθάνιο γινόταν με μεταβολή όγκων και το διοξείδιο του άνθρακα είναι ευδιάλυτο στο νερό, είναι αποδεκτά αυτά τα υψηλά ποσοστά μεθανίου εφόσον ένα μικρό μέρος του CO_2 είχε διαλυθεί. Σημειώνεται πως το παραγόμενο βιοαερίο βρισκόταν συνεχώς σε επαφή με νερό, εφόσον η αποθήκευση του γινόταν σε μεταλλικό βαρέλι που περιείχε νερό.

Επίσης στη σχετική βιβλιογραφία (Moller et al, 2003) αναφέρεται πως το υψηλό pH ευνοεί τη διάλυση του CO_2 , προκαλώντας έτσι ακόμα υψηλότερη συγκέντρωση μεθανίου στο βιοαέριο.

Από τα στοιχεία του πίνακα Π 5.10 σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα Π 5.11 και Π 5.12 όπου απεικονίζονται η διακύμανση της τιμής του pH και του παραγόμενου βιοαερίου και μεθανίου αντίστοιχα, σε σχέση με το ογκομετρικό φορτίο.

Διάγραμμα Π 5.11 Παραγωγή βιοαερίου και διακύμανση pH σε συνάρτηση με το ογκομετρικό φορτίο

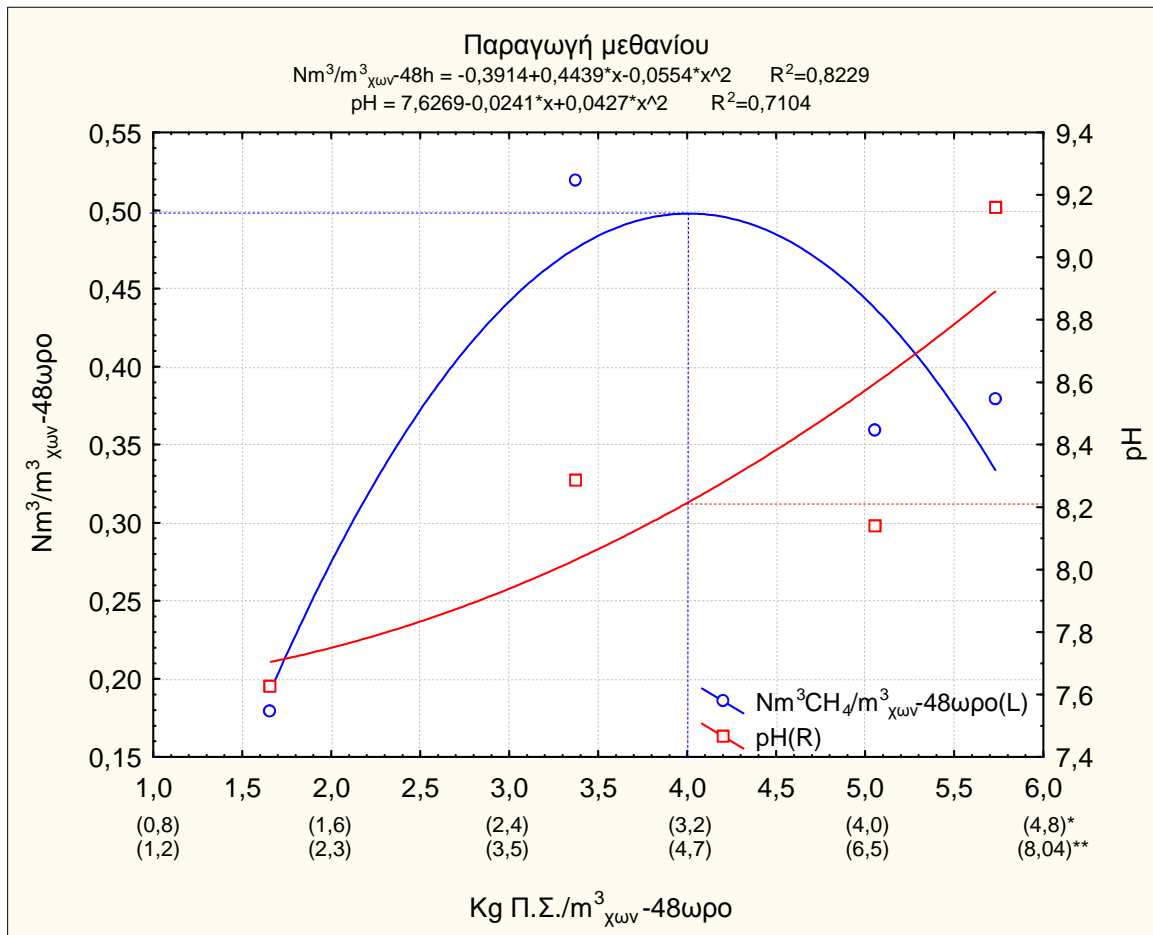


* Π.Σ.%κ.ό.

** Ο.Σ.%κ.β.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, η βαθμιαία αύξηση της συγκέντρωσης των πτητικών στερεών στα υγρά τροφοδοσίας, είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής βιοαερίου έως τη μέγιστη τιμή **0,55 Nm³/m³_{χων-48ωρο}**, για την τιμή οργανικού φορτίου **4,0 kg Π.Σ./m³_{χων-48ωρο}**, με αντίστοιχη περιεκτικότητα ολικών στερεών 4,7%κ.β. και πτητικών 3,2%κ.ό. Στη συνέχεια παρατηρήθηκε μείωση της παραγωγής του βιοαερίου.

Διάγραμμα Π 5.12 Παραγωγή μεθανίου και διακύμανση pH σε συνάρτηση με το ογκομετρικό φορτίο



* Π.Σ.%κ.ό.

** Ο.Σ.%κ.β.

Όπως και στο διάγραμμα παραγωγής βιοαερίου (Διαγρ. Π 5.11), έτσι και στο αντίστοιχο μεθανίου (Διαγρ. Π 5.12), η βαθμιαία αύξηση της συγκέντρωσης των πτητικών στερεών στα υγρά τροφοδοσίας, είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής του μεθανίου έως τη μέγιστη τιμή **0,50 Nm³/m³_{χ_{ων}-48ωρ}**, στη τιμή οργανικού φορτίου **4,0 kg Π.Σ./m³_{χ_{ων}-48ωρ}** με αντίστοιχη περιεκτικότητα ολικών στερεών 4,7%κ.β. και πτητικών 3,2%κ.ό.

Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως η αύξηση του οργανικού φορτίου οδήγησε τη σταθεροποίηση της αναερόβιας χώνευσης σε ολοένα και υψηλότερη τιμή pH. Οι μέγιστες τιμές παραγόμενου βιοαερίου και μεθανίου αντιστοιχούσαν σε τιμή pH περίπου 8,2, η οποία είναι ελαφρώς υψηλότερη από το ευνοϊκό εύρος της αναερόβιας χώνευσης της βιβλιογραφίας (Γεωργακάκης, 2009β).

Συνεπώς, κρίθηκε πως η τιμή του οργανικού φορτίου στο σημείο μέγιστης παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου, ήταν η βέλτιστη και η μέγιστη δυνατή για τη λειτουργία των χωνευτήρων της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου μας. Συνεπώς, η πυκνότητα 4,7%Ο.Σ.κ.β. επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση της δεύτερης φάσης της πειραματικής διαδικασίας.

II.5.1.6. Εφαρμογή πειραματικών αποτελεσμάτων Α' φάσης σε μαθηματικό μοντέλο παραγωγής μεθανίου (Γεωργακάκης, 1985)

Το εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών έχει ασχοληθεί συστηματικά με την παραγωγή βιοαερίου από γεωργο-πτηνο-κτηνοτροφικά απόβλητα τα τελευταία 25 χρόνια.

Η εφαρμογή μεθόδων συμπύκνωσης των υγρών αποβλήτων χοιροστασιών με φυσική καθίζηση και αραίωση των στερεών αποβλήτων με ορό γιαουρτιού, υπήρξαν δυο από τις πρώτες εφαρμογές πιλοτικής κλίμακας στον Ελληνικό χώρο στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών (1984-1985), αλλά όπως αποδείχθηκε, καθοριστικές για την οικονομικότητα των εγκαταστάσεων παραγωγής βιοαερίου.

Στον πίνακα II 5.11 παρουσιάζονται οι τιμές του οργανικού φορτίου που δοκιμάστηκαν και οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές παραγωγής βιοαερίου από

πειράματα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, σε διάφορους τύπους αποβλήτων. Σημειώνεται πως εφόσον οι πειραματικές τιμές οργανικού φορτίου και παραγόμενου βιοαερίου της περιόδου 1985 ήταν ανά ημέρα, ήταν αναγκαία η μετατροπή των πειραματικών δεδομένων της Α' φάσης από 48ωρη βάση σε 24ωρη.

Πίνακας Π 5.11 Πειραματικές τιμές οργανικού φορτίου και παραγωγής βιοαερίου από πειράματα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γ.Π.Α., σε διάφορους τύπους αποβλήτων

Τύπος αποβλήτων	Οργανικό φορτίο (kg Π.Σ./m ³ _{χων} -ημέρα)				
	Παραγωγή μεθανίου (m ³ CH ₄ /m ³ _{χων} -ημέρα) (35°C-1atm)				
Διαχωρισμένα υγρά χοιροστασίου (Γεωργακάκης, 1985) ¹	1,80	2,80	3,80	4,80	5,30
	0,39	0,56	1,02	1,09	0,86
Διαχωρισμένα υγρά βουστασίου (Χριστοπούλου, 2004) ²	2,08	2,17	2,35	2,53	-
	0,39	0,45	0,74	0,73	-
Διαχωρισμένα υγρά χοιροστασίου (Κακούρος, 2009 και Καττή, 2010)	0,83	1,69	0,38	-	-
	0,11 ³	0,26	0,08	-	-

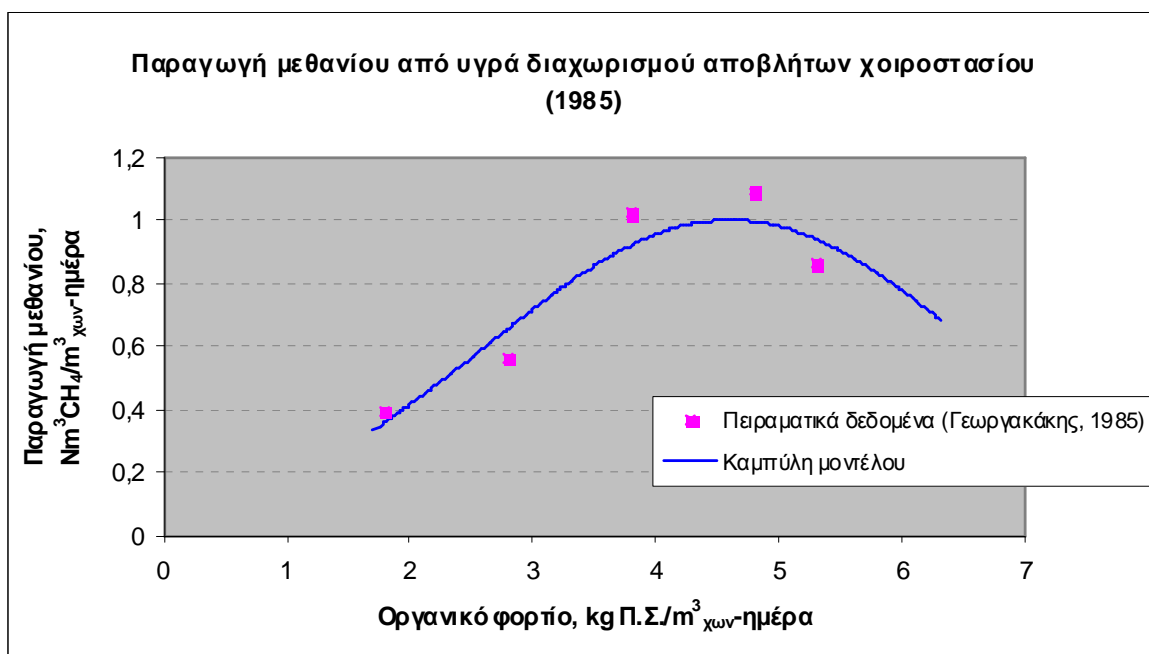
¹ Υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου

² Υγρά διαχωρισμού αποβλήτων βουστασίου σε διάφορες αραιώσεις με νερό βρύσης

³ Μέση τιμή παραγωγής μεθανίου από Κακούρο (2009) και Καττή (2010)

Στο διάγραμμα Π 5.13 φαίνεται η παραγωγή μεθανίου από υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου για τις διάφορες τιμές οργανικού φορτίου (Γεωργακάκης, 1985), όπως προκύπτουν από τον πίνακα Π 5.11.

Διάγραμμα Π 5.13 Παραγωγή μεθανίου από υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου για διάφορες τιμές οργανικού φορτίου (Γεωργακάκης, 1985)



Το παραγόμενο μεθάνιο, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, παρουσίασε μια μέγιστη τιμή στα απόβλητα που χρησιμοποιήθηκαν, σε μια συγκεκριμένη τιμή οργανικού φορτίου, διαφορετική για κάθε περίπτωση, ακολουθώντας το μαθηματικό μοντέλο:

$$Y = a \cdot e^{-b(X-c)^2}$$

όπου:

Y = ογκομετρική παραγωγή μεθανίου (m³/m³ χων-ημέρα)

X = ογκομετρικό φορτίο (kg Π.Σ./m³ χων-ημέρα)

a, b, c = σταθερές χαρακτηριστικές για κάθε τύπο αποβλήτου, και συγκεκριμένα για συμπυκνωμένα απόβλητα χοιροστασίου:

$$a = 1,00 \quad b = 0,13 \quad c = 4,60 \quad (r^2 = 0,951)$$

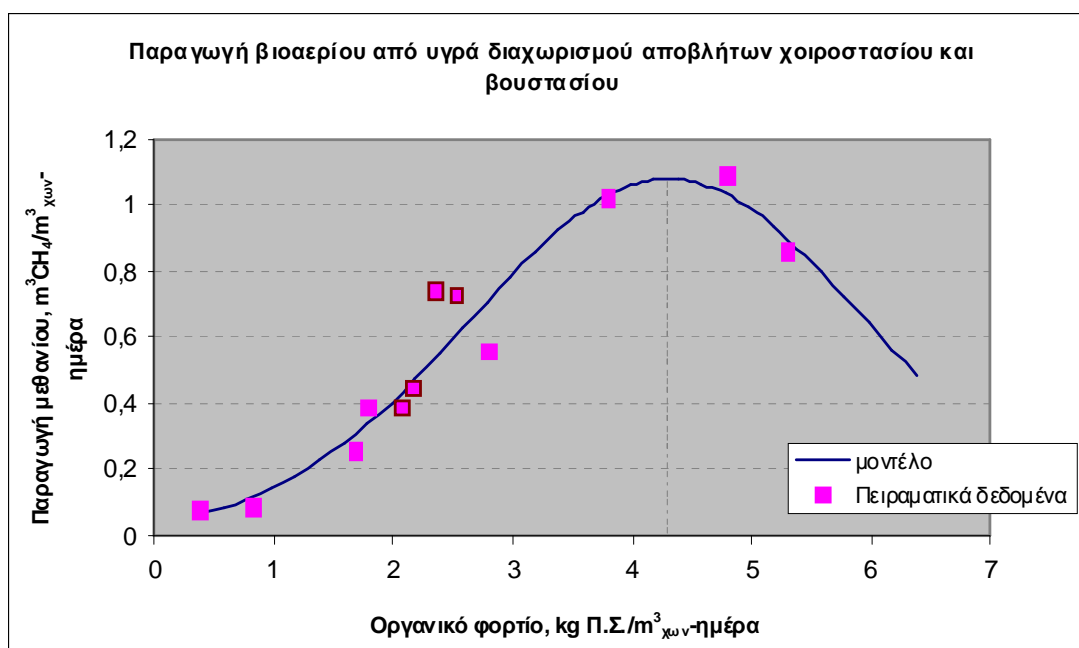
Συγκρίνοντας την καμπύλη που περιγράφει το μαθηματικό μοντέλο (διάγραμμα Π 5.13), με εκείνη που προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα της Α' φάσης

(διάγραμμα Π 5.12) παρατηρούμε πως είναι της ίδιας μορφής. Ωστόσο, η δοκιμή των πειραματικών τιμών παραγωγής μεθανίου των τεσσάρων χωνευτήρων της Α' φάσης, στο μαθηματικό μοντέλο, είχε αποτέλεσμα μόνο για τα δεδομένα που προέκυψαν από τους χωνευτήρες με πυκνότητα υγρών τροφοδοσίας 2 και 4%Ο.Σ.κ.β., ενώ εκείνα των χωνευτήρων με πυκνότητα υγρών τροφοδοσίας 6 και 8%Ο.Σ.κ.β. ήταν εκτός του μοντέλου. Εξάλλου, τα τελευταία αποτελέσματα κρίθηκαν επισφαλής εξαιτίας των προβλημάτων που προέκυψαν κατά τη λειτουργία των συγκεκριμένων χωνευτήρων λόγω της υψηλής πυκνότητας των υγρών τροφοδοσίας (καφάλαιο Π 4).

Επιπλέον, για εμπλουτισμό των δεδομένων, προστέθηκαν και στοιχεία από προηγούμενες μελέτες των Χριστοπούλου (1994) και Κακούρου(2009) που αφορούσαν σε υγρά απόβλητα βουστασίου και χοιροστασίου αντίστοιχα, και τα οποία ακολουθούν πιστά το μαθηματικό μοντέλο.

Στο διάγραμμα Π 5.14 φαίνεται η διασπορά των πειραματικών δεδομένων και η γραφική παράσταση του μαθηματικού μοντέλου μετά την προσθήκη σε αυτό και των προαναφερόμενων αποτελεσμάτων.

Διάγραμμα Π 5.14 Παραγωγή μεθανίου από υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου και βουστασίου (σημεία με καφέ περίγραμμα) και χοιροστασίου για διάφορες τιμές οργανικού φορτίου



Οι νέοι συντελεστές του μαθηματικού μοντέλου το οποίο περιγράφει την παραγωγή μεθανίου από υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου και βουστασίου είναι:

$$a = 1,077, b = 0,18 \text{ και } c = 4,3 \text{ (} r^2 = 0,9535 \text{)}$$

και το τροποποιημένο μαθηματικό μοντέλο είναι:

$$Y = 1,077 \cdot e^{-0,18(X-4,3)^2}$$

Σύμφωνα με το τροποποιημένο μαθηματικό μοντέλο, η μέγιστη τιμή παραγωγής μεθανίου από την αναερόβια χώνευση υγρών διαχωρισμού από απόβλητα χοιροστασίου ή βουστασίου είναι $1,077 \text{ Nm}^3/\text{m}^3_{\text{χων-ημέρα}}$. Η τιμή αυτή είναι σχεδόν ίση με εκείνη που δίνει το αρχικό μαθηματικό μοντέλο ($1,00 \text{ Nm}^3/\text{m}^3_{\text{χων-ημέρα}}$).

II.5.2. Β' Φάση: Παραγωγή βιοαερίου από μίγμα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα

Όπως προαναφέρθηκε, η συγκεκριμένη φάση αποτελείται από δυο διαδοχικά στάδια, εκ των οποίων το πρώτο πραγματοποιήθηκε για την ασφαλέστερη εξέλιξη της διαδικασίας χώνευσης.

Στους επόμενους δύο πίνακες II 5.12 και II 5.13 παρουσιάζονται τα ποιοτικά και τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του τυρογάλακτος, των υγρών χοιροστασίου ονομαστικής πυκνότητας 4,7%κ.β. σε Ο.Σ., και των μιγμάτων τους ανάλογα με τη δοσολογία τροφοδοσίας, αντίστοιχα.

Πίνακας II 5.12 Ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά υγρών χοιροστασίου και τυρογάλακτος τροφοδοσίας των χωνευτήρων

	Ο.Σ.		Π.Σ.		COD mg/L
	%κ.β.	% Ο.Σ.	% κ.β.	% Ο.Σ.	
X (4,7%)	3,70	78,52	2,90	78,52	33.040
	3,98	79,80	3,17	79,80	28.272
	3,86	69,13	2,67	69,13	20.377
M.O.	3,85	75,82	2,91	75,82	27.230
Τυρόγαλα	5,62	85,58	4,81	85,58	-
	5,13	90,28	4,63	90,28	62.304
	5,69	88,90	5,06	88,90	66.053
M.O.	5,48	88,25	4,83	88,25	64.179

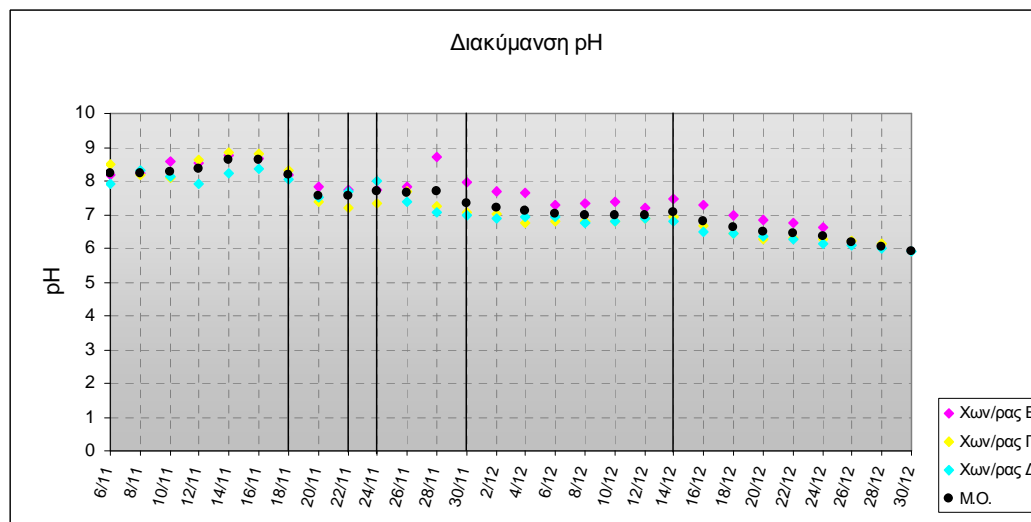
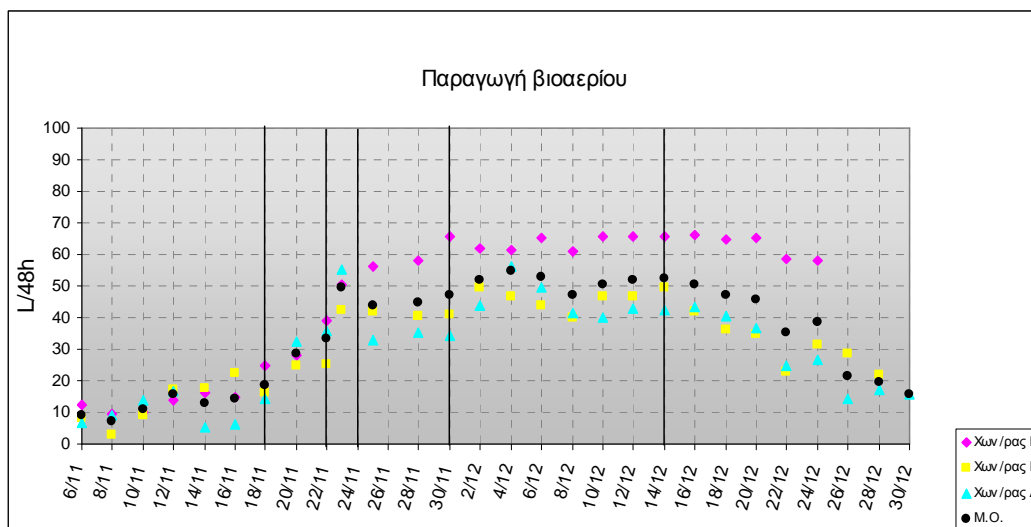
Όπως διαπιστώνεται από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα, η πυκνότητα των υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου που επεύχθη στη πράξη ήταν μικρότερη από την επιθυμητή.

Πίνακας Π 5.13 Χαρακτηριστικά μιγμάτων υγρών χοιροστασίου με τυρόγαλα

Ποσοστό τυρ/κτος στο μίγμα τροφοδοσίας	Ο.Σ. %κ.β.	Π.Σ.		COD mg/L	Οργανικό φορτίο kg Π.Σ./m ³ _{χων} -48ωρο
		%Ο.Σ.	%κ.β.		
31,25%Τ	4,36	79,70	3,51	38.776	4,34
46,87%Τ	4,61	81,65	3,81	44.548	4,71
62,50%Τ	4,87	83,59	4,11	50.323	5,09
81,25%Τ	5,17	85,92	4,47	57.251	5,56
90,62%Τ	5,33	87,09	4,65	60.713	5,80

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της παραγωγής βιοαερίου και της τιμής του pH για καθέναν από τους τρεις χωνευτήρες, καθ'όλη τη διάρκεια της δεύτερης φάσης.

Διάγραμμα Π 5.15 Παραγωγή βιοαερίου και διακύμανση pH των τριών χωνευτήρων στη Β' φάση



Όπου: 6/11 → προσαρμογή χωνευτήρων στην πυκνότητα 4% Ο.Σ.

- 1^ο στάδιο:

18/11 → 31,25% κ.ό. τυρογάλακτος

22/11 → 46,87% κ.ό. τυρογάλακτος

24/11 → 62,50% κ.ό. τυρογάλακτος

30/11 → 81,25% κ.ό. τυρογάλακτος

- 2^ο στάδιο

14/12 → 90,62% κ.ό. τυρογάλακτος

Έως τα μέσα του πρώτου σταδίου παρατηρήθηκε αυξανόμενη παραγωγή βιοαερίου, λόγω της αύξησης της ποσότητας τυρογάλακτος ανά δόση. Η παραγωγή βιοαερίου του χωνευτήρα Β διαφοροποιήθηκε ελαφρώς και σημείωσε τις υψηλότερες τιμές, ενώ εκείνες των άλλων δύο κυμάνθηκαν σε παραπλήσια επίπεδα κοντά στο μέσο όρο.

Οι τιμές του pH παρουσίασαν γενικά συνεχή πτώση σε όλη τη διάρκεια της Β' φάσης, όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ποσότητας του χαμηλού σε pH τυρογάλακτος στο μίγμα τροφοδοσίας. Ο χωνευτήρας Β διαφοροποιήθηκε και στις τιμές pH εμφανίζοντας τις υψηλότερες τιμές, σε αντίθεση με τους άλλους δυο οι οποίοι παρουσίασαν παραπλήσιες τιμές.

Κρίνοντας με βάση την παραγωγή βιοαερίου, μπορούμε να πούμε πως τα συστήματα χώνευσης των εργαστηριακών αντιδραστήρων παρουσίασαν μια τάση σταθεροποίησης κατά το τρίτο κατά σειρά μίγμα τροφοδοσίας (για τις ημερομηνίες 24-28/11). Η ασταθής διακύμανση που ακολούθησε, σε συνδυασμό με τη συνεχή πτώση του pH δεν επιτρέπουν την έκδοση ασφαλών αποτελεσμάτων στο τελικό μίγμα τροφοδοσίας με την επιθυμητή αναλογία $\text{Π.Σ.τυρογάλακτος}/\text{Π.Σ.υγρών χοιροστασίου} = 17,5/1$.

Συνεπώς, η διερεύνηση της παραγωγής βιοαερίου από μίγμα υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου πυκνότητας 4%Ο.Σ.κ.β. με τυρόγαλα, σε αναλογία $\text{Π.Σ.τυρογάλακτος}/\text{Π.Σ.υγρών χοιροστασίου} = 17,5/1$ δεν επετεύχθη.

Ωστόσο ενδιαφέρον παρουσίασε η επιβεβαίωση της χρήσης του δείκτη β' , για την πρόγνωση της κατάρρευσης των συστημάτων της αναερόβιας χώνευσης και αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

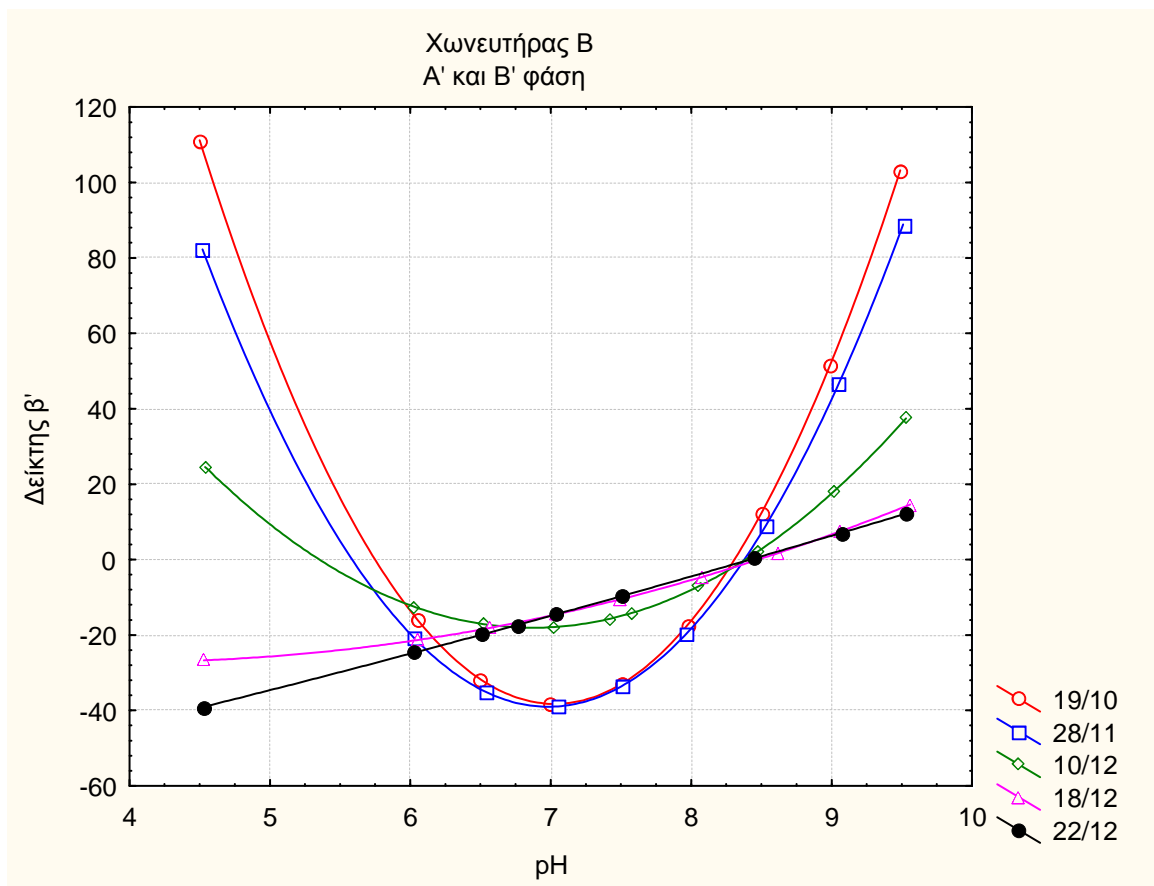
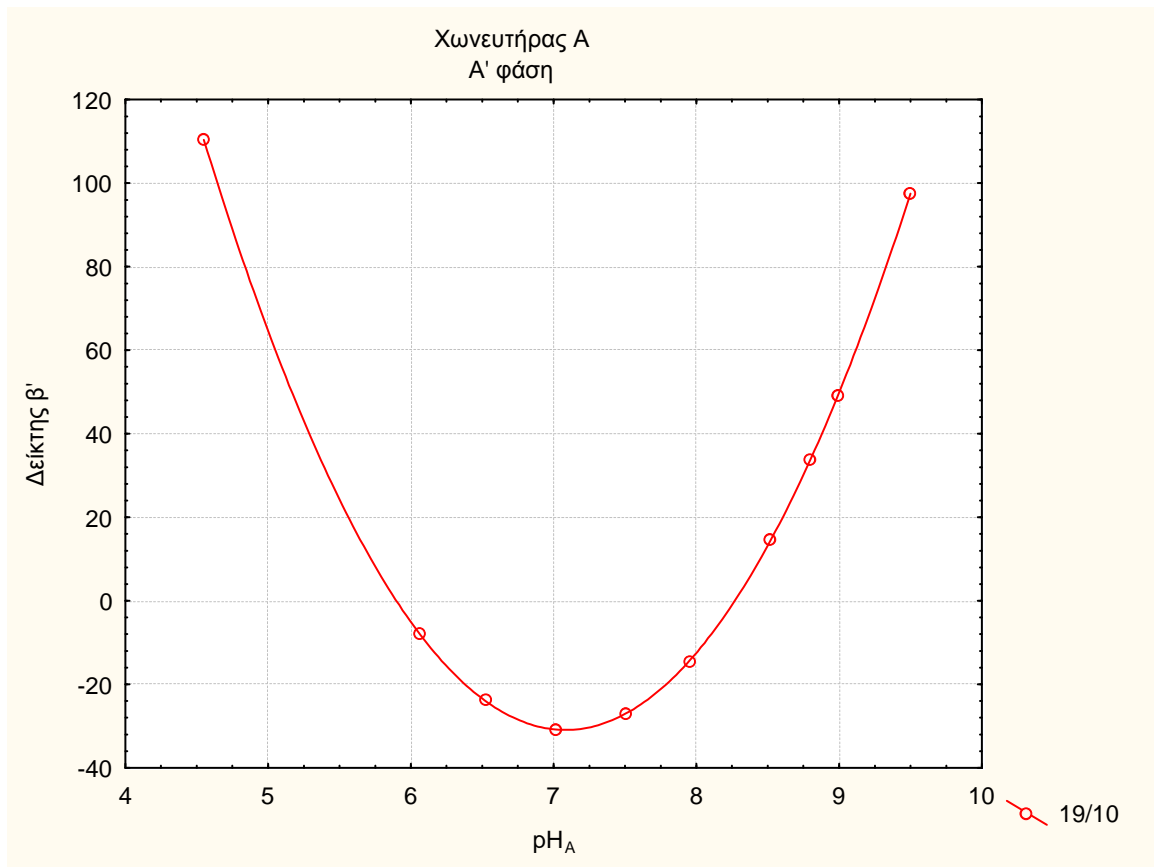
II.5.2.1. Πρόγνωση κατάρρευσης συστημάτων αναερόβιας χώνευσης Β' φάσης – Δείκτης β'

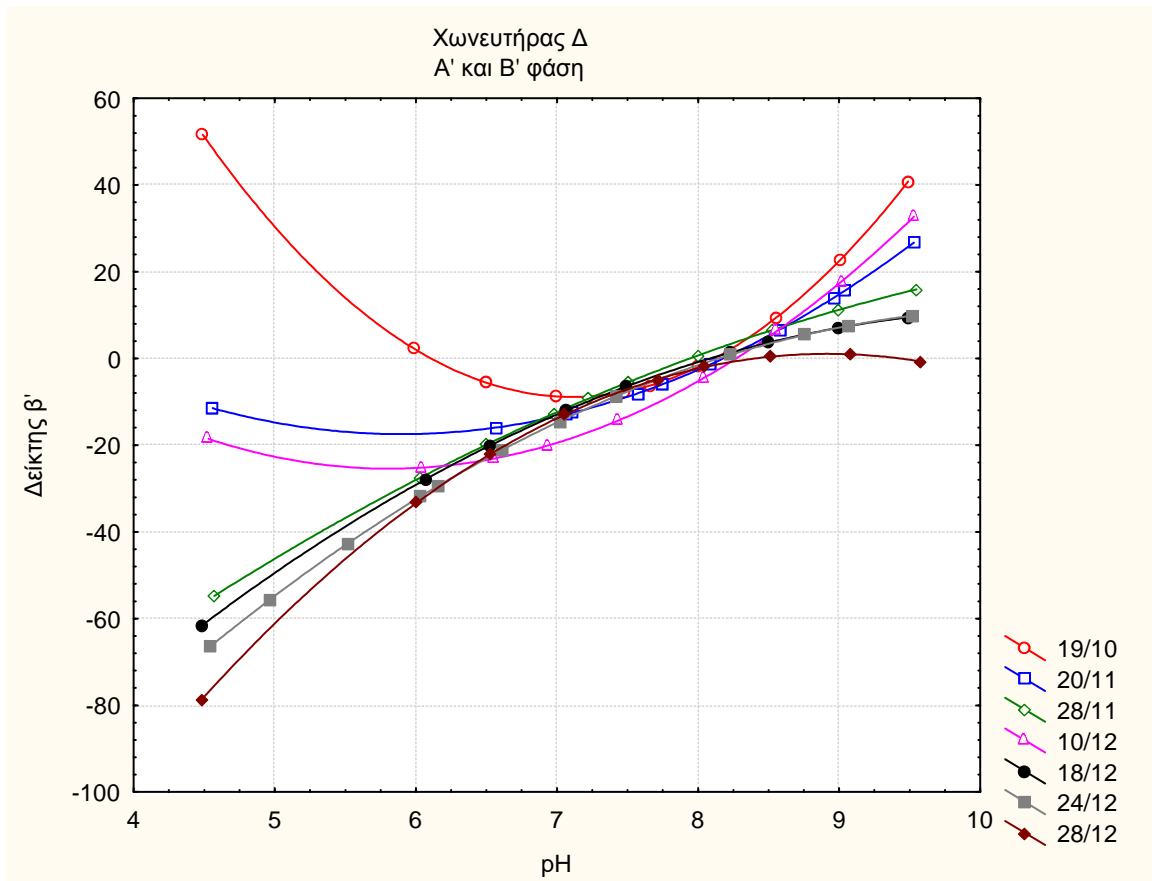
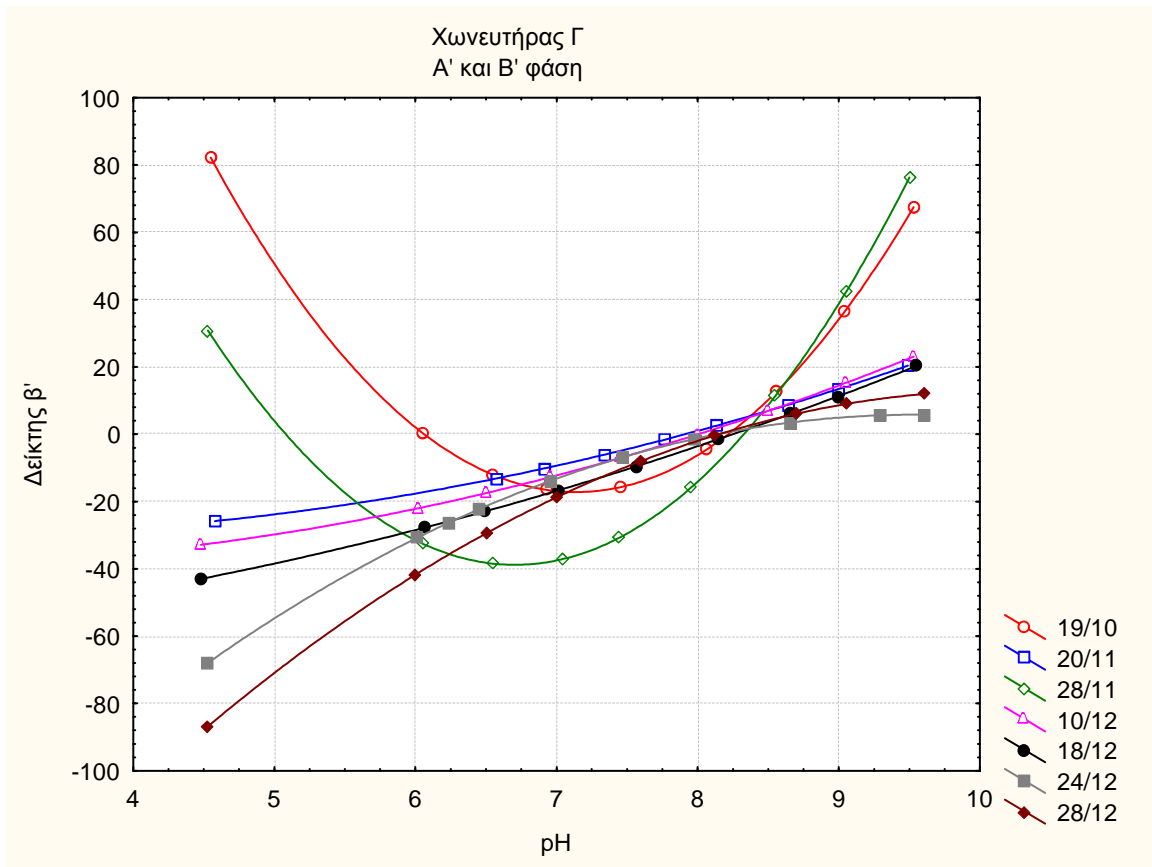
Ο δείκτης της ρυθμιστικής ικανότητας (β ή *b-value* ή *buffer index*) είναι η ποσότητα του ισχυρού οξέος ή της ισχυρής βάσης, που απαιτείται για αλλαγή της τιμής του pH κατά μια μονάδα. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η ποσότητα, τόσο ισχυρότερο είναι το ρυθμιστικό διάλυμα και τόσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης β . Στα φυσικά ρυθμιστικά διαλύματα, όπως είναι τα υγρά γεωργοκτηνοτροφικά απόβλητα, ο δείκτης β εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της ισορροπίας περισσοτέρων του ενός ασθενών οξέων και βάσεων, κυρίως των πτητικών οξέων, του ανθρακικού οξέος και της αμμωνίας. Μαθηματικά, ο δείκτης β ορίζεται ως η α' παράγωγος της καμπύλης τιτλοδότησης του ρυθμιστικού διαλύματος με ισχυρό οξύ (οξύτητα) και βάση (αλκαλικότητα) και χρησιμοποιήθηκε ως μέσο πρόβλεψης της καλής ή κακής πορείας της αναερόβιας χώνευσης.

Στο Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πρόγνωσης, με βάση ένα τροποποιημένο (πιο ευαίσθητο) δείκτη, τον δείκτη β' , ο οποίος είναι το αποτέλεσμα της β' παραγωγής της μαθηματικής σχέσης που εκφράζει την καμπύλη τιτλοδότησης οξύτητας-αλκαλικότητας.

Η γνώση της μεταβολής του δείκτη β' , σε σχέση με το pH, φαίνεται να δίνει πιο πιστά από τον δείκτη β , χρήσιμες πληροφορίες για την πορεία της αναερόβιας χώνευσης σε ένα χωνευτήρα παραγωγής βιοαερίου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δεικτών β' για καθέναν από τους τέσσερις χωνευτήρες.





Οι ημερομηνίες των υπομνημάτων στα παραπάνω διαγράμματα αντιστοιχούν στις εξής κατηγορίες τροφοδοσίας:

19/10 → υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου Α-8%, Β-6%, Γ-4%, Δ-8%

20/11 → μίγμα υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου και τυρόγαλα σε αναλογία Π.Σ.Τ/Π.Σ.Χ=0,75/1

28/11 → μίγμα υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου και τυρόγαλα σε αναλογία Π.Σ.Τ/Π.Σ.Χ=2,76/1

10/12 → μίγμα υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου και τυρόγαλα σε αναλογία Π.Σ.Τ/Π.Σ.Χ=7,17/1

16-24-28/12 → μίγμα υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου και τυρόγαλα σε αναλογία Π.Σ.Τ/Π.Σ.Χ=17,5/1

Στα διαγράμματα του δείκτη β' , το pH περιγράφεται σαν μια σφαίρα η οποία:

- εγκωβίζεται στο κάτω κυρτό μέρος της γραφικής παράστασης και το σύστημα χαρακτηρίζεται από ευστάθεια (χωνευτήρες Α, Β, Γ και Δ κατά την Α' φάση:19/10),
ή
- κυλαεί προς χαμηλότερες τιμές και το σύστημα χαρακτηρίζεται ασταθές (χαρακτηριστικές καμπύλες χωνευτήρων Β, Γ και Δ κατά την Β' φάση:18 έως 28/12).

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα, **η προοδευτική αλλαγή της κυρτότητας των καμπυλών, δηλώνει τη μεταβολή της σταθερότητας του συστήματος της αναερόβιας χώνευσης**. Πιο συγκεκριμένα, όσο μειώνεται η κυρτότητα και η γραφική παράσταση τείνει να μετατραπεί σε κοίλη, το pH καταρρέει και το σύστημα αποσταθεροποιείται.

Συγκεκριμένα στο διάγραμμα του χωνευτήρα Β, παρατηρούμε πως η προσθήκη τυρογάλακτος στο μίγμα τροφοδοσίας, αρχικά επηρέασε ελαφρώς το σύστημα (28/11: μικρό 'άνοιγμα' της καμπύλης), όσο όμως η αναλογία του στο μίγμα τροφοδοσίας αυξανόταν, επηρέαζε σημαντικά τη σταθερότητα του συστήματος έως την τελική κατάρρευσή του (22/12). Συνεπώς, η επερχόμενη κατάρρευση του συστήματος γίνεται εμφανής από τις 10/12 (μέσα 4^{ης} δοσολογίας μίγματος τροφοδοσίας).

Ομοίως και στο διάγραμμα του χωνευτήρα Δ, η σταδιακή προσθήκη του τυρογάλακτος σε σύντομο χρονικό διάστημα οδήγησε σε κατάρρευση του συστήματος, η οποία θα μπορούσε να προβλεφεί με ασφάλεια και νωρίτερα από τις 10/12.

Στο διάγραμμα του χωνευτήρα Γ, αμέσως μετά την έναρξη της 1^{ης} δόσολογίας (20/11) ο ευαίσθητος δείκτης β' προμημύει την αστάθεια του συστήματος. Ωστόσο, προς το τέλος της 3^{ης} δόσολογίας (28/11), το σύστημα εμφανίζει μια τάση ευστάθειας αλλά σε χαμηλότερο επίπεδο pH συγκριτικά με εκείνο που είχε το σύστημα στην αρχική και πλήρως ευσταθή φάση. Οι επόμενες καμπύλες δείχνουν ολοφάνερα την κατάρρευση του συστήματος.

II.5.2.2. Εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου παραγωγής μεθανίου (Γεωργακάκης, 1985) για μίγματα υγρών μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου

Σχετικά με την προσαρμογή του μαθηματικού μοντέλου έτσι ώστε να περιγράψει την παραγωγή μεθανίου από υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου αναμιγμένα με τυρόγαλα, χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία της μελέτης του Κακούρου (2009). Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διεξαγωγή του πειράματος της προαναφερθείσας μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με 2% Ο.Σ.κ.β. και τυρόγαλα με 5,56% Ο.Σ.κ.β. σε διαδοχικές αναλογίες ανάμιξης. Η παραγωγή μεθανίου στις διαφορές τιμές οργανικού φορτίου που εφαρμόστηκαν, φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας II 5.14 Πειραματικές τιμές οργανικού φορτίου και παραγωγής βιοαερίου από πειράματα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γ.Π.Α., σε διάφορους τύπους αποβλήτων

Τύπος αποβλήτων	Οργανικό φορτίο (kg Π.Σ./m ³ _{χων} -ημέρα)				
	Παραγωγή μεθανίου (m ³ CH ₄ /m ³ _{χων} -ημέρα) (35°C-1atm)				
Διαχωρισμένα υγρά χοιροστασίου και τυρόγαλα (Κακούρος, 2009)	1,54	1,89	2,11	2,48	3,12
	0,72	0,97	0,98	1,15	1,40

Στη συνέχεια παρουσιάζονται το προσαρμοσμένο μαθηματικό μοντέλο, στα παραπάνω πειραματικά δεδομένα, και η διαγραμματική απεικόνιση της διασποράς των τελευταίων καθώς και του προσαρμοσμένου μαθηματικού μοντέλου.

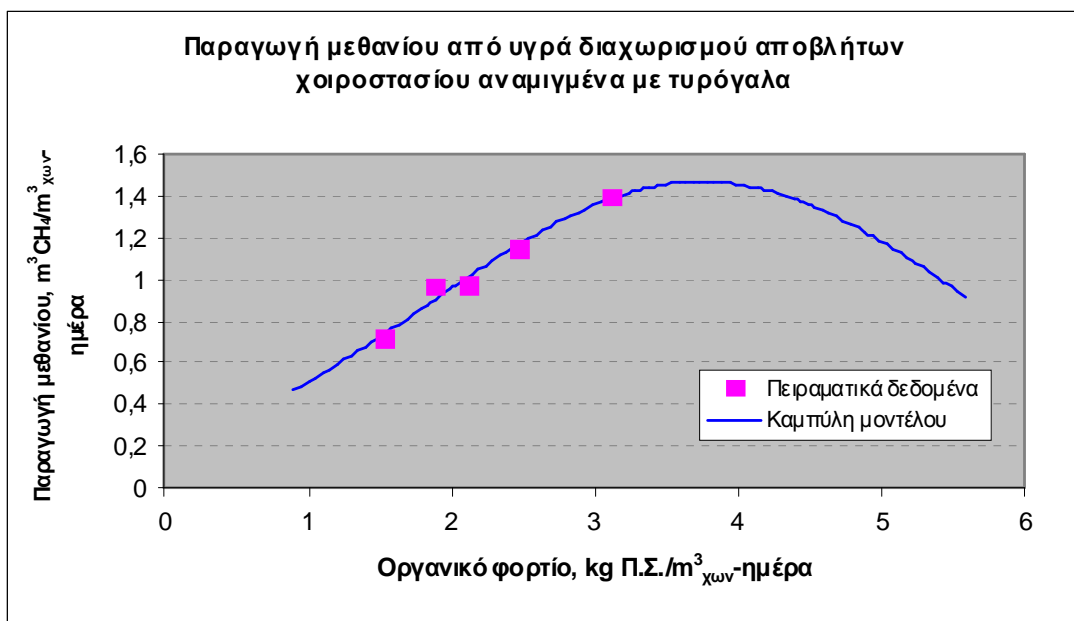
Οι συντελεστές a, b και c του μαθηματικού μοντέλου που δημιουργήθηκε, βασισμένο στη γενική μορφή του που αναφέρθηκε παραπάνω, τροποποιήθηκαν ως εξής:

$$a = 1,47, b = 0,14 \text{ και } c = 3,75 (r^2 = 0,9696)$$

και το νέο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την παραγωγή μεθανίου από υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου αναμιγμένα με τυρόγαλα είναι:

$$Y = 1,47 \cdot e^{-0,14 (X - 3,75)^2}$$

Διάγραμμα Π 5.16 Παραγωγή μεθανίου από υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου αναμιγμένα με τυρόγαλα (Κακούρος, 2009)



Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, η παραγωγή μεθανίου σύμφωνα με τη γραφική παράσταση του μοντέλου παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή 1,47 Nm³/m³_{χων}-ημέρα. Συγκριτικά με τη μέγιστη παραγωγή μεθανίου που δίνει το μαθηματικό μοντέλο για υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου και βουστασίου (1,077 Nm³/m³_{χων}-ημέρα), η μέγιστη τιμή παραγωγής μεθανίου από μίγματα υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου με τυρόγαλα, είναι σαφώς μεγαλύτερη.

Επιπλέον παρατηρούμε, πως η μέγιστη τιμή παραγωγής βιοαερίου παρουσιάστηκε για επίπεδο οργανικής φόρτισης $3,6 \text{ kgΠ.Σ./m}^3_{\text{χων}}\text{-ημέρα}$. Ωστόσο, οι τιμές οργανικού φορτίου των πειραματικών δεδομένων είναι μικρότερες από αυτή την τιμή, με αποτέλεσμα την διασπορά των πειραματικών δεδομένων αριστερό τμήμα της καμπύλης που περιγράφει το μοντέλο. Η αιτία των χαμηλών επιπέδων οργανικού φορτίου συγκριτικά με εκείνο στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη τιμή παραγωγής μεθανίου, είναι η αδυναμία για περαιτέρω αύξηση του οργανικού φορτίο στα συγκεκριμένα μίγματα, λόγω του κινδύνου αποσταθεροποίησης του χωνευτήρα.

Μέρος III - Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Α' φάσης της παρούσας μελέτης, κατά την οποία εξετάστηκε η επίδραση της μεταβολής της πυκνότητας των υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίων, στην παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου κατά την αναερόβια επεξεργασία τους σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες:

- η αύξηση της πυκνότητας των υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίων οδηγεί σε υψηλότερη ογκομετρική παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου. Ωστόσο, η παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου εκφραζόμενη ανά μονάδα οργανικού φορτίου (kg Π.Σ.) δεν παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις
- η λειτουργία των εργαστηριακών αντιδραστήρων σε υψηλότερες τιμές πυκνοτήτων, χωρίς ανάδευση είναι προβληματική
- η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου, πειραματικά ήταν **0,58 και 0,52 Nm³/m³_{χων}-48ωρο** αντίστοιχα, για πυκνότητα υγρών διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου **4%Ο.Σ.κ.β.**
- η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου, διαγραμματικά ήταν **0,55 και 0,50 Nm³/m³_{χων}-48ωρο** αντιστοίχως, για βέλτιστη τιμή οργανικού φορτίου **4,0 kg Π.Σ./m³_{χων}-48ωρο (4,7%Ο.Σ.κ.β. και 3,2%Π.Σ.κ.ά.)**

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Β' φάσης:

- δεν επιτεύχθηκε η βέλτιστη προτεινόμενη αναλογία Π.Σ.τυρογάλακτος/Π.Σ.υγρών χοιροστασίου από προηγούμενη μελέτη (Κακούρος, 2009) 17,5/1 για το μίγμα τυρογάλακτος με υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου διπλάσιας πυκνότητας

- η κατάρρευση των συστημάτων της αναερόβιας χώνευσης στους εργαστηριακούς αντιδραστήρες είχε προβλεφθεί από το δείκτη β' .

Τέλος, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν το αρχικό μοντέλο υπολογισμού της παραγόμενης ποσότητας μεθανίου (Γεωργακάκης, 1985), και επιτρέπουν τη γενίκευση της εφαρμογής του και σε απόβλητα βουστασίου:

$$Y = a \cdot e^{-b(X-c)^2}$$

όπου:

Y = ογκομετρική παραγωγή μεθανίου ($m^3/m^3_{\chi\omega\nu}$ -ημέρα)

X = ογκομετρικό φορτίο ($kg \text{ Π.Σ.}/m^3_{\chi\omega\nu}$ -ημέρα)

και σταθερές a , b c :

$$a = 1,077, b = 0,1831 \text{ και } c = 4,3 (r^2 = 0,9535)$$

Αντίστοιχο μαθηματικό μοντέλο προέκυψε και για μίγματα τυρογάλακτος με υγρά μηχανικού διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου, με συντελεστές:

$$a = 1,47, b = 0,14 \text{ και } c = 3,75 (r^2 = 0,9696)$$

Οι μέγιστες τιμές παραγωγής μεθανίου, σύμφωνα με το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο είναι:

- **1,08 $Nm^3/m^3_{\chi\omega\nu}$ -ημέρα** για υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου και βουστασίου
- **1,47 $Nm^3/m^3_{\chi\omega\nu}$ -ημέρα** για υγρά διαχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίου αναμιγμένα με τυρόγαλα.

Βιβλιογραφία

- Ahring B. K.** (2003) Perspectives for Anaerobic Digestion in *Biomethanation I, Advances in Biomechanical Engineering/Biotechnology*, T. Scheper (Series editor) Vol. 81, pp. 1-30, Springer Berlin/Heidelberg
- Angelidaki I., Ellegaard L. and Ahring B. K.** (2003) Applications of the Anaerobic Digestion, in *Biomethanation II, Advances in Biomechanical Engineering/Biotechnology*, T. Scheper (Series editor) Vol. 82, pp. 1-33, Springer Berlin/Heidelberg
- Arvanitoyannis I. S. and Kassaveti A.** (2008) Dairy waste management: Treatment methods and potential uses of treated waste, *Waste management for the food industries*, pp. 801-860, Elsevier
- Bernet N. and Beline F.** (2008) Challenges and innovations on biological treatment of livestock effluents, *Bioresource Technology* 100 (2009), 5431-5436
- Burton C. H. and Turner C.** (2003) Manure management-Treatment strategies for sustainable agriculture, *Livestock management*, Vol.102, pp 256-257, Elsevier
- Chen Y., Cheng J. J. and Creamer K. S.** (2007) Inhibition of anaerobic digestion process: A review, *Bioresource Technology* 99, 4044-4064
- Fernandez G. C., Cofreces L. C. and Encina G. A. P.** (2008) Different pretreatments for increasing the anaerobic biodegradability in swine manure, *Bioresource Technology* 99, 8710-8714
- Jelen P.** (2002) Utilization and products, *Encyclopedia of Dairy Sciences, Whey processing* (2004), pp. 2739-2745, Elsevier
- Kalyuzhnyi S. V., Martinez E. P. and Martinez J. R.** (1996) Anaerobic treatment of high-strength cheese-whey and whey wastewaters in laboratory and pilot UASB-reactors, *Bioresource Technology* 60 (1997), 59-65
- Kosseva R. M.** (2009) Processing of Food Wastes, *Advances in Food and Nutrition Research*, Vol. 58, pp. 57-136, Elsevier Science Ltd
- Mawson A. J.** (1994) Bioconversions for whey utilization and waste abatement, *Bioresource Technology*, 47, 195-203.

- Moller H. B., Nielsen A. M., Nakakubo R. and Olsen H.J.** (2007) Process performance of biogas digesters incorporating pre-separated manure, *Livestock Science* 112, 217-223
- Lagrange B.** (1979) *Biomethan Principes-techniques-utilisations*, Edisud, Aix-en Provence
- Moller H. B., Sommera S. G., and Ahring B. K.** (2003) Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure, *Biomass and Bioenergy* 26 (2004), 485-495
- Skoulou V. and Zabaniotou A.** (2005) Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007), 1698-1719
- Thassitou P. K. and Arvanitoyannis I. S.** (2001) Bioremediation: a novel approach to food waste management. *Trends in Food Science & Technology* 12, 185-196
- Ward A. J., Hobbs P. J., Holliman P. J. and Jones D. L.** (2007) Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources, *Bioresource Technology* 99, (2008) 7928-7940
- Yadvika, Santosh, Sreekrishnan T.R., Kohli S. and Rana V.** (2003) Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques - a review, *Bioresource Technology* 95 (2004), 1-10
- Zadow J. G.** (2003) Production and uses, *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, pp. 6147-6152, Elsevier Science Ltd
-
- Γαβαλά Χ. Ν., Σκιαδας Ι. Β. και Λυμπεράτος Γ.** (1997) Αναερόβια συγχώνευση εποχιακώς παραγόμενων αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων, στο 1^ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, 29-31 Μαΐου, σελ. 921-926, Πάτρα
- Γεωργακάκης Δ.** (2008) Περιβάλλον και γεωργο-πτηνο-κτηνοτροφικές εγκαταστάσεις, *Διαχείριση αποβλήτων*, τεύχος 1ο, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα

- Γεωργακάκης Δ., Ξενικός Στ. και Κυρίτσης Σπ.** (1985) Βελτιστοποίηση της απόδοσης των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας σε κτηνοτροφικές μονάδες, Β' Εθνικό Συνέδριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας, Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής, Θεσσαλονίκη, τόμος Β, σελ. 671-678
- Γεωργακάκης Δ.** (2009) (α) Διεργασίες πρωτοβάθμιας επεξεργασίας γεωργο-βιομηχανικών αποβλήτων και νερού, *Διαχείριση αποβλήτων*, τεύχος 2^ο, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα
- Γεωργακάκης Δ.** (2009) (β) Αναερόβιες Διεργασίες, Δευτεροβάθμια (βιολογική) επεξεργασία γεωργο-βιομηχανικών αποβλήτων, *Διαχείριση αποβλήτων*, τεύχος 3ο, Μέρος Α', Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα
- Κακούρος Α.** (2009) Πειραματική μελέτη βελτιστοποίησης της παραγωγής βιοαερίου με προσθήκη τυρογάλακτος σε υγρά μηχανικού διχωρισμού αποβλήτων χοιροστασίων στη μεσόφιλη περιοχή. Μεταπτυχιακή διατριβή. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής
- Καραδήμα Κ.** (2009) Εκτίμηση της τοξικότητας διαφόρων σταδίων επεξεργασίας αποβλήτων τυροκομικών μονάδων με χρήση βιοδεικτών. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Βιολογίας, Τομέας Βιολογίας ζώων
- Μαρκαντωνάτος Γ.** (1990) *Επεξεργασία και διάθεση υγρών αποβλήτων*, σελ 467-473 Β έκδοση, Αθήνα
- Μάρκου Γ.** (2009) Παραγωγή βιοαερίου από ενσίρωμα αραβόσιτου εμπλουτισμένου με υγρά απόβλητα χοιροστασίου. Μεταπτυχιακή διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής
- Σιούλας Κ., Seadi A. T., Runtz D., Prassl H., Kottner M., Finsterwalder T., Volk S. and Janssen R.** (2010) Εγχειρίδιο βιοαερίου, *Ενεργειακή αξιοποίηση βιοαερίου*, εκπαιδευτικό σεμινάριο, Κ.Α.Π.Ε., 24-25 Φεβρουαρίου, Λαρισα
- Χριστοπούλου Ν.** (2004) Παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα βουστασίων γαλακτοπαραγωγής. Μεταπτυχιακή διατριβή. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής

Ιστοσελίδες

http://europa.eu/legislation_summaries/energy/renewable_energy/127065_el.htm

<http://www.erevnanews.gr/epikairoτητα/119-news1/562-se-xoirotrofikes-monades-o-b-iwannou.html>

<http://www.inews.gr/60/oi-ktinotrofikes-monades-paragoun-vioaerio.htm>