

## ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΙΛΥΟΣ

### Θεωρητικό μέρος

#### Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι μια πολύπλοκη βιοχημική διεργασία που εφαρμόζεται ευρέως για τη σταθεροποίηση των αποβλήτων. Πρόκειται για τη βιολογική αποικοδόμηση του οργανικού υλικού, απουσία μοριακού οξυγόνου, κυρίως προς μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, ενώ είναι δυνατή και η αναερόβια παραγωγή υδρογόνου.

Η αναερόβια διεργασία απαιτεί ακριβείς αναερόβιες συνθήκες για να προχωρήσει, και εξαρτάται από τη συντονισμένη δραστηριότητα ενός σύνθετου μικροβιακού συγκροτήματος για να μετασχηματίσει το οργανικό υλικό κυρίως σε CO<sub>2</sub> και μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) μέσω τεσσάρων διαδοχικών σταδίων τα οποία περιλαμβάνουν την υδρόλυση, οξεογένεση, οξικογένεση και μεθανιογένεση.

Γενικά, τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της αναερόβιας επεξεργασίας είναι: α) Η μικρή παραγωγή βιολογικής ίλυος, β) Η υψηλή απόδοση της επεξεργασίας, γ) η μη απαίτηση οξυγόνου, δ) η παραγωγή μεθανίου (καύσιμο), ε) οι μικρές απαιτήσεις σε θρεπτικά, και στ) το χαμηλό λειτουργικό κόστος. Από την άλλη μεριά, η σχετικά μεγάλη ευαισθησία της διεργασίας και η λειτουργία της σε υψηλές θερμοκρασίες (30-35oC ή 50-55oC) μπορούν να αποτελέσουν μειονεκτήματα για την αποδοτική εφαρμογή της.

#### Αναερόβια επεξεργασία ίλυος

Κατά τη διαχείριση αστικών υγρών αποβλήτων, η διάθεση της ίλυος είναι ένα σημαντικό πρόβλημα, αντιπροσωπεύοντας μέχρι και το 50% του λειτουργικού κόστους μίας μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (ΜΕΥΑ). Οι Μ.Ε.Υ.Α. παράγουν ίλυ ως παραπροϊόν των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Η παραγόμενη ποσότητα ίλυος εκφρασμένη ως ξηρά μάζα (dry solids, DS) ανέρχεται καθημερινά, σε 60 έως 90 gr DS ανά ισοδύναμο πληθυσμού. Η αναερόβια επεξεργασία βρίσκει εφαρμογή εδώ και πολλές δεκαετίες, στην επεξεργασία ίλυος με στόχο την μετατροπή της σε ένα αβλαβές και αφυδατωμένο υλικό. Κατά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης, ένα κλάσμα των οργανικών στερεών μετατρέπεται βιολογικά σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, ενώ πολλοί παθογόνοι μικροοργανισμοί καταστρέφονται. Το τελικό προϊόν είναι μια σταθεροποιημένη ίλυς που μπορεί να εναποτεθεί με ασφάλεια στο έδαφος.

Η μείωση της μάζας και του όγκου της ίλυος από τη μετατροπή των πτητικών στερεών του οργανικού υλικού σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, συνήθως φθάνει το 30-40% της αρχικής προστιθέμενης ποσότητας. Η σταθεροποιημένη ίλυς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό σε αγροτικές καλλιέργειες καθώς περιέχει άζωτο, φώσφορο και άλλα θρεπτικά.

Για την αποδοτική λειτουργία ενός αναερόβιου αντιδραστήρα, απαιτείται να ρυθμιστούν διάφορες παράμετροι του συστήματος όπως είναι το pH, η αλκαλικότητα, η θερμοκρασία, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής κ.α. Στον ακόλουθο πίνακα αναφέρονται οι βέλτιστες και οι μέγιστες συνθήκες λειτουργίας αναερόβιας επεξεργασίας ίλυος.

Το μεθάνιο που παράγεται από τη διεργασία μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί από το σύστημα (ως πηγή ενέργειας) για τη διατήρηση της θερμοκρασίας που λειτουργεί ο αντιδραστήρας καθώς και για την θέρμανση των κτιρίων, και την παραγωγή μηχανικής ή ηλεκτρικής ενέργειας.

**Πίνακας 1** Περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες για μέγιστη παραγωγή μεθανίου κατά την αναερόβια χώνευση ιλύος.

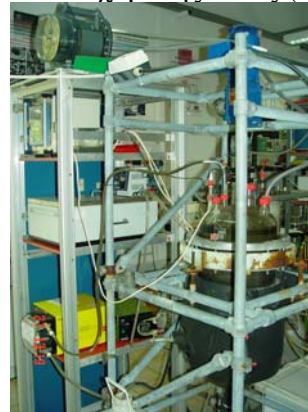
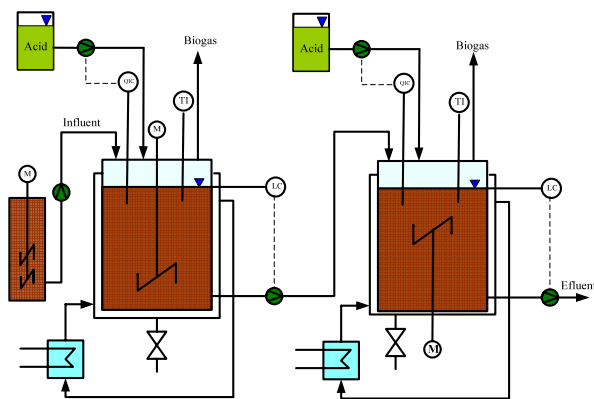
Μεταβλητή	Βέλτιστη τιμή	Ακραίες τιμές
pH	6.8-7.4	6.4-7.8
Οξειδοαναγωγικό δυναμικό (ORP) (mV)	-520 με -530	-490 με -550
Πτητικά οξέα (mg/l οξικού οξέος)	50-500	>2000
Αλκαλικότητα (mg/l CaCO <sub>3</sub> )	1500-3000	1000-5000
Θερμοκρασία		
Μεσόφιλη	30-35 °C	20-40 °C
Θερμόφιλη	50-56 °C	45-60 °C
Υδραυλικός χρόνος παραμονής (d)	10-15	7-30
Σύσταση βιοαερίου		
CH <sub>4</sub> (%κ.ο)	65-70	60-75
CO <sub>2</sub> (%κ.ο)	30-35	25-40

### Συνεπεξεργασία αποβλήτων

Η συνεπεξεργασία αποβλήτων στην αναερόβια χώνευση είναι μία τεχνική που αναπτύσσεται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια, καθώς τα συνεπαγόμενα οφέλη αποτελούν μια ελκυστική προοπτική για την παραγωγή ενέργειας. Η συνεπεξεργασία της ιλύος με άλλα απόβλητα μπορεί να ενισχύσει τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης καθώς αυτά τα συν-υποστρώματα μπορούν να παρέχουν θρεπτικά τα οποία εκλείπουν και να έχουν μια συνολική θετική συνεργιστική επίδραση στο προς χώνευση μέσο, οδηγώντας σε σταθερές συνθήκες χώνευσης και ενισχυμένη απόδοση βιοαερίου. Συνήθως, τα περισσότερα συν-υποστρώματα που χρησιμοποιούνται παρουσιάζουν προβλήματα στην αυτόνομη επεξεργασία τους, δεν έχουν καμία άλλη χρήση ή υπάρχει αναγκαιότητα διάθεσής τους. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι απόβλητα τροφίμων, σφαγείων, αποστακτηρίων, τυροκομείων, διασταλλάγματα, απόβλητα από την παραγωγή ελαιοκάρπου καθώς και η γλυκερίνη που αποτελεί κατάλοιπο κατά την παραγωγή βιοντίζελ. Η συνεπεξεργασία με την ιλύ είναι σημαντική καθώς η ιλύς είναι ένα εξαιρετικό υπόστρωμα, το οποίο έχει υψηλά ποσοστά υγρασίας, μπορεί να παρέχει τα απαραίτητα θρεπτικά για την χώνευση ενώ ταυτόχρονα λειτουργεί ως ρυθμιστικό το οποίο βοηθά να ξεπερνιούνται κάποια λειτουργικά προβλήματα.

## Πειραματική Διαδικασία

Στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Υγρών Αποβλήτων μελετήθηκε η αναερόβια χώνευση της απορριπτόμενης ενεργού ιλύος σε συνεπεξεργασία με αγροτοβιομηχανικά υγρά απόβλητα. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η περίπτωση της γλυκερίνης, του ελαιουργικού καθώς και του τυροκομικού αποβλήτου. Διάφορα μίγματα δευτερογενούς ιλύος και του εκάστοτε αποβλήτου μελετήθηκαν κάτω από μεσόφιλες συνθήκες σε μία συστοιχία δύο αντιδραστήρων διαλείποντος έργου πλήρους αναμίξεως οι οποίοι λειτουργούσαν σε ένα φάσμα υδραυλικών χρόνων παραμονής και με διαφορετικές οργανικές φορτίσεις προκειμένου να καθοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας. Αντίστοιχα πειράματα πραγματοποιήθηκαν και σε ένα σύστημα ενός σταδίου με αντίστοιχους χρόνους παραμονής (Εικόνα 1). Όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα από την αναερόβια επεξεργασία παχυμένης ιλύος (control).



**Εικόνα 1.** Σχηματική αναπαράσταση της συστοιχίας (αριστερά) και φωτογραφία του ενός αναερόβιου αντιδραστήρα (δεξιά).

Μίγμα παχυμένης ιλύος με απόβλητο διοχετευόταν συνεχώς μέσω περισταλτικής αντλίας στον πρώτο αντιδραστήρα, η εκροή του οποίου υπερχειλίζονταν στον δεύτερο αντιδραστήρα της συστοιχίας. Ο ενεργός όγκος των αντιδραστήρων ήταν 40l και 65l αντίστοιχα. Ο όγκος του αναερόβιου χωνευτή στο σύστημα ενός σταδίου ήταν 43l. Οι όγκοι διατηρούνταν σταθεροί με τη βοήθεια ελεγκτών στάθμης. Η παραγωγή βιοαερίου μετρούνταν συνεχώς με τη διοχέτευσή του σε έναν μηχανικό μετρητή βιοαερίου με τη βοήθεια του οποίου προσδιοριζόταν ο όγκος του. Η θερμοκρασία ήταν σταθερή στους 37°C και η τιμή του pH διατηρούνταν σταθερή μεταξύ 6.8 και 7.2.

Η δευτεροβάθμια παχυμένη ιλύς προερχόταν από τη Μονάδα Επεξεργασίας Αστικών Αποβλήτων στην Κομοτηνή, η οποία λειτουργεί υπό συνθήκες παρατεταμένου αερισμού.

Η γλυκερόλη προερχόταν από την παραγωγή βιοντίζελ στο εργοστάσιο ΕΛΒΙ στο Κιλκίς. Συγκεκριμένα, πρόκειται για απόβλητο που περιέχει κυρίως γλυκερίνη, νερό, μεθανόλη και σαπούνια. Το ελαιουργικό απόβλητο προερχόταν από το ελαιοτριβείο Δερμετζίδης στην Ξάνθη ενώ το τυρόγαλο από το τηροκομείο Μήλιος στη Δράμα. Τα χαρακτηριστικά της ιλύος και των αποβλήτων συνεπεξεργασίας συνοψίζονται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας1.** Χημική ανάλυση της ιλύος και των αγροτοβιομηχανικών υγρών αποβλήτων που χρησιμοποιήθηκαν για συνεπεξεργασία.

Parameter	Ιλύς	Ελαιουργικό	Τυρόγαλο	Γλυκερόλη
VSS g/l	19.6	0.9	0.98	0
sCOD g/l	0.58	38	70	1000
conductivity $\mu\text{S}/\text{cm}$	380	44.3	5.83	
pH	7.12	4.8	5.9	10.7
Water %				15.7
Methanol %				7.1
Soaps %				26.5
Glycerin %				50.6
Catalyst ( $\text{CH}_3\text{ONa}$ ) %				0.1

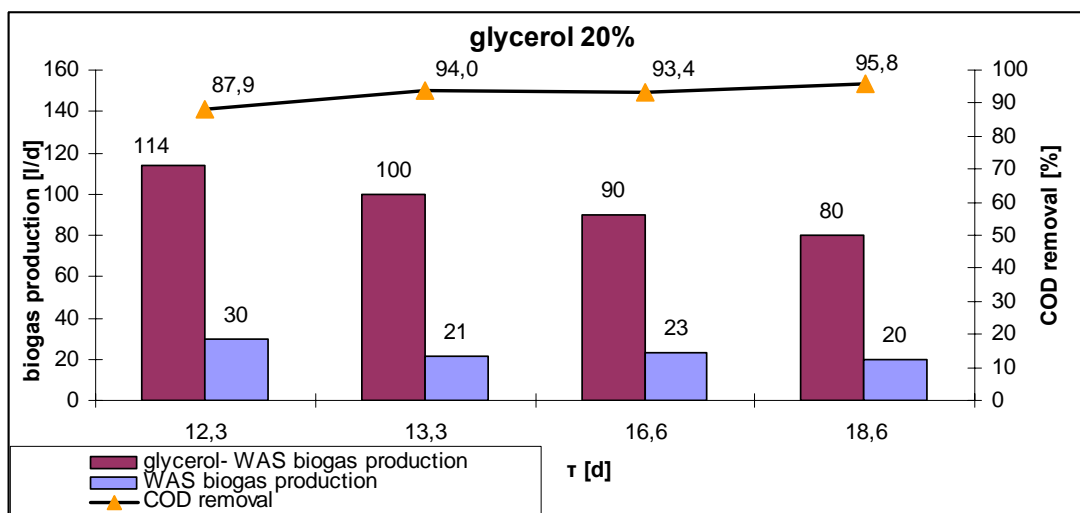
## Αποτελέσματα

### Γλυκερόλη

Προκειμένου να βρεθούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της διαδικασίας, εξετάστηκαν οι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής 12.3, 13.3, 16.6 και 18,6 ημέρες. Σε όλες τις περιπτώσεις ο αναερόβιος αντιδραστήρας τροφοδοτήθηκε με διάφορα μίγματα που αποτελούνταν από:

1. 20% γλυκερίνη (αραιωμένη 10 φορές) και 80% ιλύς
2. 30% γλυκερίνη (αραιωμένη 10 φορές) και 70 % ιλύς

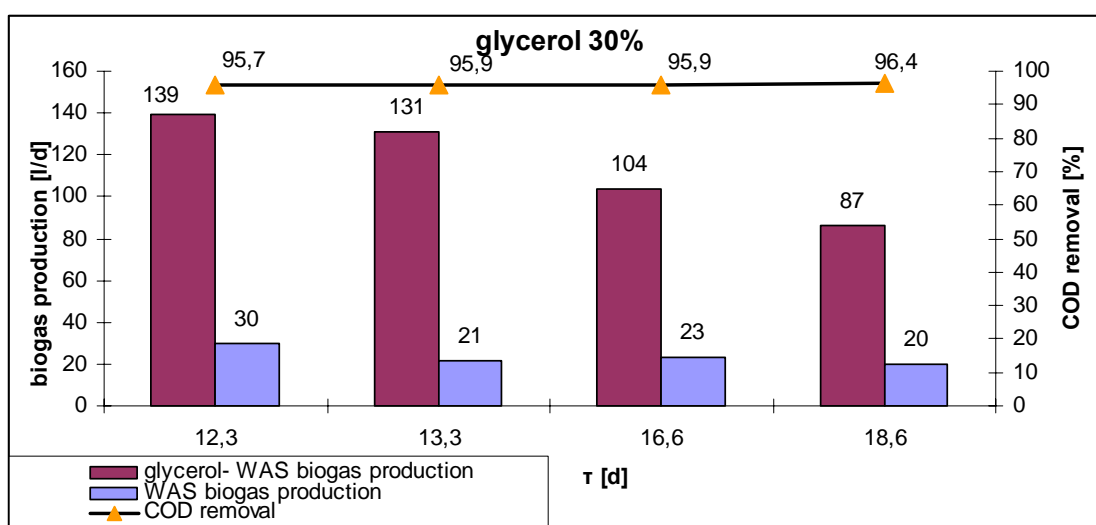
Η Εικόνα 2 αναπαριστά την παραγωγή βιοαερίου (l/d) σε ένα μίγμα 20% γλυκερόλης και 80% ιλύος σε σύγκριση με την ημερήσια παραγωγή βιοαερίου από την αναερόβια χώνευση ιλύος για το σύστημα της συστοιχίας. Για υδραυλικό χρόνο παραμονής (HRT) 12.3 ημέρες, η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου αυξήθηκε από 30l/d σε 114l/d. Για HRT 13.3 ημέρες η αντίστοιχη αύξηση εκτιμήθηκε από 21l/d σε 100l/d. Για την περίπτωση των 16.6 ημερών, η αύξηση στην παραγωγή βιοαερίου με την χρήση της γλυκερόλης ήταν 2.9 φορές μεγαλύτερη (από 23l/d σε 90l/d).



**Εικόνα 2.** Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου στη συστοιχία συναρτήσεως του χρόνου παραμονής (SRT) για το μίγμα 20% γλυκερόλης και 80% ιλύος (WAS) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές αναερόβιας χώνευσης ιλύος.

Τέλος, για HRT 18.6d, η παραγωγή βιοαερίου αυξήθηκε από 20l/d σε 80l/d. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3, σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρήθηκαν υψηλές αποδόσεις στην απομάκρυνση διαλυτού COD (πάνω από 88%) για οργανικούς ρυθμούς φόρτισης μεταξύ 1.0 και 1.7 g COD/L<sub>d</sub>.

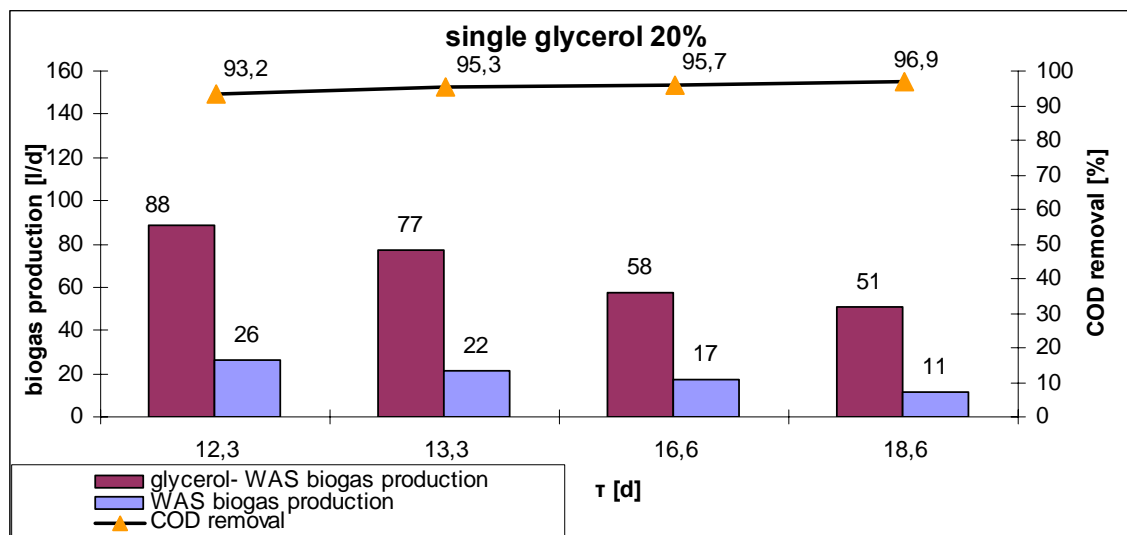
Η Εικόνα 3 αναπαριστά την παραγωγή βιοαερίου (l/d) για το μίγμα 30% της αραιωμένης γλυκερόλης και 70% ιλύος σε σύγκριση με την ημερήσια παραγωγή βιοαερίου από την αναερόβια επεξεργασία μόνο της ιλύος στο σύστημα της συστοιχίας. Υπάρχει μια σημαντική αύξηση στην ημερήσια παραγωγή βιοαερίου όταν χρησιμοποιείται ως συν-υπόστρωμα μίγμα που περιέχει 30% γλυκερόλη. Συγκεκριμένα, η αύξηση εκτιμάται περίπου στο 360%, 520%, 350% και 335% για 12.3 d, 13.3 d, 16.6 d και 18,6 d αντίστοιχα.. Σε όλες τις περιπτώσεις χρόνων παραγωγής που μελετήθηκαν, η αποικοδόμηση του COD βρέθηκε υψηλή και κυμάνθηκε μεταξύ 95.7% και 96.4%. Το μέγιστο ποσοστό απομάκρυνσης COD της τάξης του 96.4% πραγματοποιήθηκε σε χρόνο παραμονής 18,6 ημέρες, με οργανικό ρυθμό φόρτισης 1.3 g COD/l<sub>d</sub>.



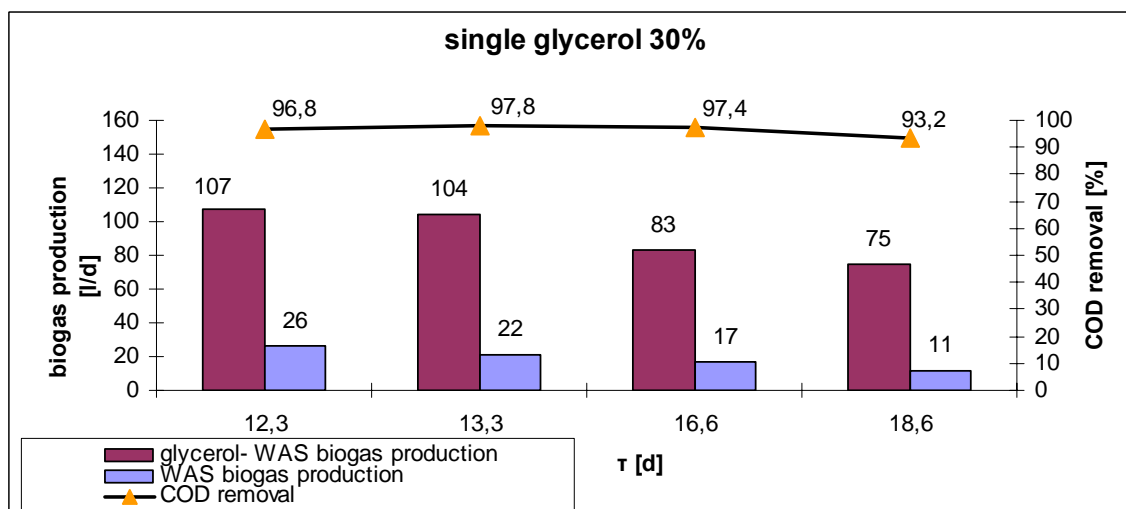
**Εικόνα 3.** Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου στη συστοιχία συναρτήσεως του χρόνου παραμονής (SRT) για το μίγμα 30% γλυκερόλης και 70% ιλύος (WAS) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές αναερόβιας χωνευμένης ιλύος.

Αντίστοιχα πειράματα πραγματοποιήθηκαν και στο σύστημα ενός σταδίου. Στην Εικόνα 4 αναπαρίσταται η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου για τη περίπτωση του μίγματος που περιελάμβανε 20% γλυκερόλη και 80% ιλύ. Για να πραγματοποιηθεί σύγκριση με το σύστημα της συστοιχίας η τιμές του βιοαερίου ανήχθησαν σε όγκο ίσο με τον όγκο της συστοιχίας. Η τιμή κυμάνθηκε μεταξύ 51 και 88 l/d αυξανόμενη με τη μείωση του χρόνου παραμονής. Οι τιμές αυτές συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες του control πειράματος βρέθηκαν να είναι 3.4, 3.5, 3.4 και 4.6 φορές μεγαλύτερες για τους χρόνους παραμονής 12.3 d, 13.3 d, 16.6 d και 18,6 d αντίστοιχα.. Η ποσοστιαία απομάκρυνση του COD κυμάνθηκε και σε αυτή την περίπτωση σε υψηλά επίπεδα, μεγαλύτερα από 93%.

Η Εικόνα 5 αναπαριστά την ημερήσια παραγωγή βιοαερίου για τη περίπτωση του μίγματος που περιελάμβανε 30% γλυκερόλη και 70% ιλύ στο σύστημα ενός σταδίου. Η τιμή κυμάνθηκε μεταξύ 75 και 107 l/d και εκτιμήθηκε από 4.1 έως 6.8 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στα πειράματα control. Η ποσοστιαία απομάκρυνση του COD κυμάνθηκε και σε αυτή την περίπτωση σε υψηλά επίπεδα, μεγαλύτερα από 93%.



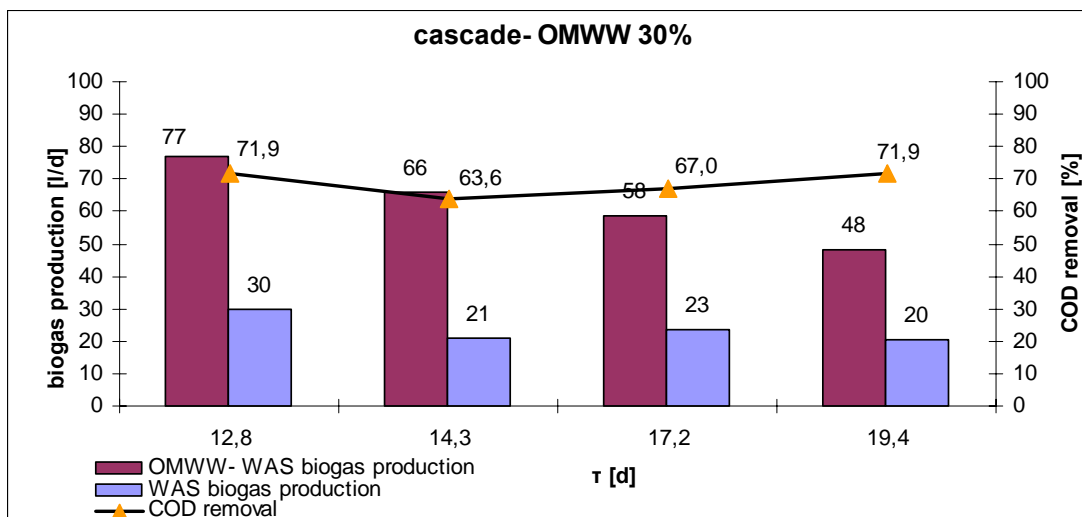
**Εικόνα 4.** Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου στο σύστημα ενός σταδίου συναρτήσει του χρόνου παραμονής (SRT) για το μίγμα 20% γλυκερόλης και 80% ιλύος (WAS) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές αναερόβιας χωνευμένης ιλύος.



**Εικόνα 5.** Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου στο σύστημα ενός σταδίου συναρτήσει του χρόνου παραμονής (SRT) για το μίγμα 30% γλυκερόλης και 70% ιλύος (WAS) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές αναερόβιας χωνευμένης ιλύος.

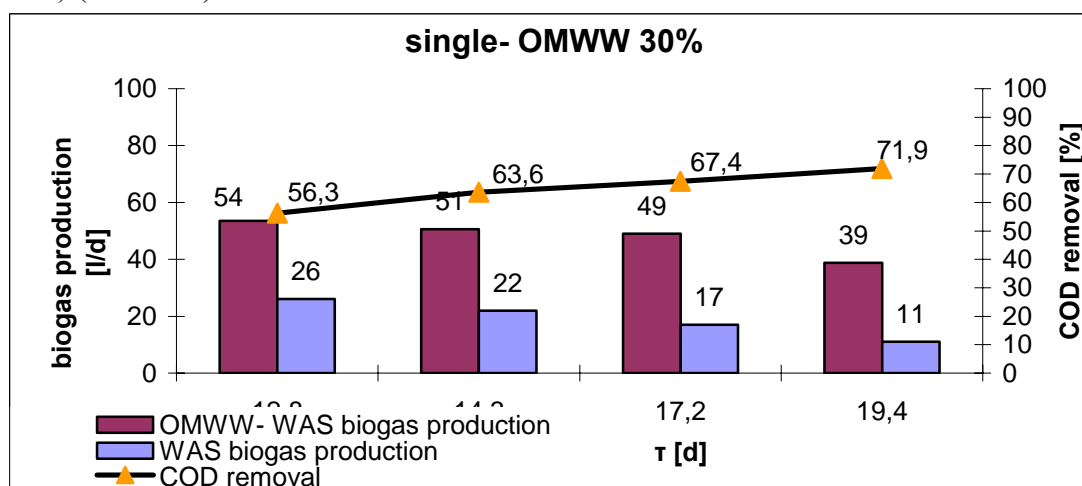
### Ελαιουργικό

Από τα πειράματα στο σύστημα της συστοιχίας, υπολογίσθηκε ότι στην περίπτωση του ελαιουργικού αποβλήτου η παραγωγή του βιοαερίου κυμάνθηκε μεταξύ 48.4 και 77.0  $L_{\text{bioogas}}/d$  ακολουθώντας την αναμενόμενη αύξηση, με τη μείωση του χρόνου παραμονής. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα από την αναερόβια επεξεργασία ιλύος μόνο, βρέθηκαν να είναι 2.5-3 φορές μεγαλύτερα. Επιπλέον, το ποσοστό απομάκρυνσης του COD παρατηρήθηκε ότι αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου παραμονής και κυμάνθηκε μεταξύ 64 και 72%. Ενδεικτικά παρατίθεται η Εικόνα 6 που παρουσιάζει την παραγωγή βιοαερίου και την επί τοις εκατό απομάκρυνση του COD συναρτήσει των χρόνων παραμονής που μελετήθηκαν στο σύστημα των εν σειρά αντιδραστήρων όπου το ποσοστό του ελαιουργικού αποβλήτου στο μίγμα ήταν 30%.



**Εικόνα 6:** Παραγωγή βιοαερίου και επί τοις εκατό απομάκρυνση του διαλυτού COD συναρτήσει του χρόνου παραμονής στο σύστημα των εν σειρά αντιδραστήρων για την περίπτωση του μίγματος ιλύος-ελαιουργικού αποβλήτου.

Ανάλογα πειράματα πραγματοποιήθηκαν και στο σύστημα ενός σταδίου όπου στην περίπτωση του μίγματος της ιλύος με το ελαιουργικό απόβλητο, η παραγωγή του βιοαερίου κυμάνθηκε μεταξύ 39 και 54  $L_{\text{biogas}}/d$ , παρουσιάζοντας αντίστοιχη εικόνα με την περίπτωση της συστοιχίας, μειωμένος κατά 20% περίπου. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από τη χώνευση της ιλύος βρέθηκαν 2, 2.3, 2.9 και 3.5 φορές μεγαλύτερα για χρόνους παραμονής 12.8d, 14.3d, 17.2d και 19.4d. Τα ποσοστά απομάκρυνσης του COD κυμάνθηκαν σε παρόμοια επίπεδα με τη συστοιχία (μεταξύ 56% και 72%) (Εικόνα 7).



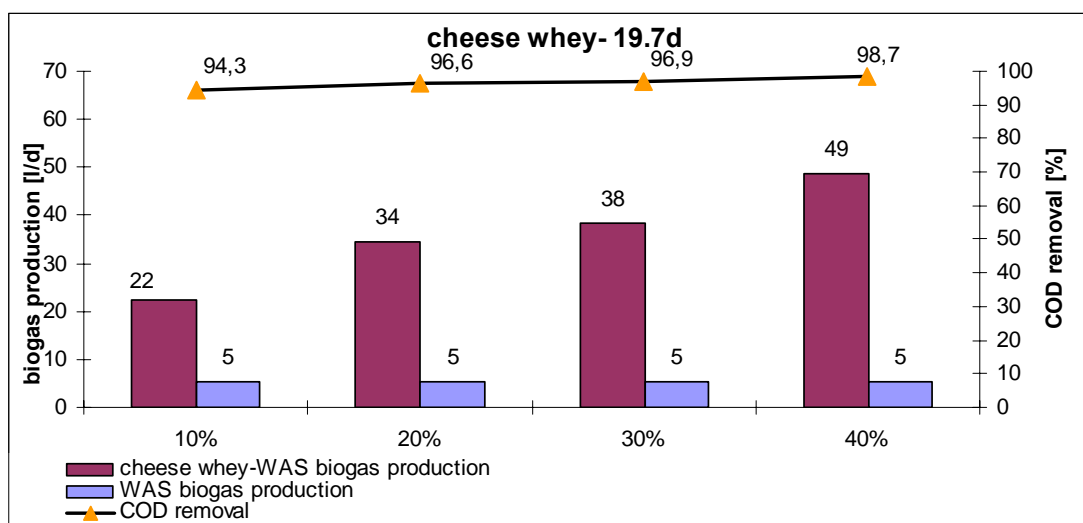
**Εικόνα 7:** παραγωγή βιοαερίου και επί τοις εκατό απομάκρυνση του διαλυτού COD συναρτήσει του χρόνου παραμονής στο σύστημα του αντιδραστήρα ενός σταδίου για την περίπτωση του μίγματος ελαιουργικού αποβλήτου.



## Τυρόγαλο

Στην περίπτωση του τυροκομικού αποβλήτου μελετήθηκαν τέσσερα μίγματα με ιλύ σε ποσοστά 10%, 20%, 30% και 40%. Όλα τα παραπάνω μίγματα εξετάστηκαν σε δύο χρόνους παραμονής, 19.7 ημέρες και 16.4 ημέρες στο σύστημα ενός σταδίου και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα από τα control πειράματα της αναερόβιας χώνευσης ιλύος.

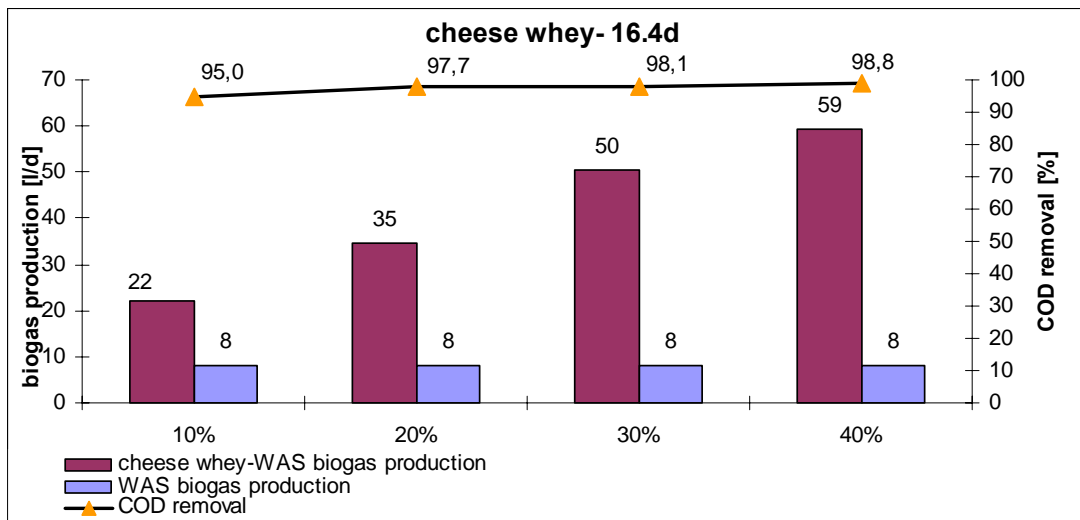
Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς στην Εικόνα 7, η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου αυξάνεται με αύξηση του ποσοστού του τυρόγαλου στο προς επεξεργασία μίγμα, καθώς αυξάνεται η οργανική φόρτιση του συστήματος. Σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την επεξεργασία μόνο ιλύος, τα ποσοστά βιοαερίου είναι υψηλότερα κατά 4.4, 6.8, 7.6 και 9.8 φορές. Επιπλέον, η απομάκρυνση του διαλυτού COD είναι σε όλες τις περιπτώσεις υψηλή και ξεπερνάει το 94%.



**Εικόνα 8:** Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και επί τοις εκατό απομάκρυνση του διαλυτού COD συναρτήσει του χρόνου παραμονής στο σύστημα του αντιδραστήρα ενός σταδίου για την περίπτωση μιγμάτων τυροκομικού αποβλήτου και χρόνο παραμονής 19.7 ημέρες.

Με τη μείωση του χρόνου παραμονής στις 16.4 ημέρες παρατηρείται αύξηση στην ημερήσια παραγωγή βιοαερίου του συστήματος λόγω της αυξημένης παροχής του εκάστοτε μίγματος προς χώνευση και κατά συνέπεια και του εισερχόμενου οργανικού φορτίου (Εικόνα 8). Στην προκειμένη περίπτωση η αύξηση σε σχέση με τα control δείγματα είναι ακόμα μεγαλύτερη και φτάνει τις 4.4, 7, 10, και 11.8 φορές. Και σε αυτή την περίπτωση η ποσοστιαία απομάκρυνση του COD είναι ιδιαίτερα υψηλή και κυμαίνεται μεταξύ 95 και 98.8%.





**Εικόνα 8:** Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και επί τοις εκατό απομάκρυνση του διαλυτού COD συναρτήσει του χρόνου παραμονής στο σύστημα του αντιδραστήρα ενός σταδίου για την περίπτωση μιγμάτων τυροκομικού αποβλήτου και χρόνο παραμονής 19.7 ημέρες.