

WP3 Πειραματική αναερόβια χώνευση του μίγματος του συμπυκνώματος και των Αστικών Υγρών Αποβλήτων σε ταχύρρυθμο βιοαντιδραστήρα (PABR)

D3.1. Αναφορά για την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης του μίγματος συμπυκνώματος/ Αστικών Υγρών Αποβλήτων σε PABR

Πειραματική Διάταξη Πιλοτικού PABR

Η πειραματική διάταξη του πιλοτικού PABR, που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της αναερόβιας χώνευσης, αποτελείται από τα μέρη, που αναγράφονται στη συνέχεια:

- 1 αντιδραστήρας PABR πιλοτικής κλίμακας
- 1 ψυγείο συντήρησης της τροφοδοσίας σε χαμηλή θερμοκρασία, στους 4-5°C, με ενσωματωμένο αναδευτήρα
- 1 θερμοσίφωνα
- 12 ηλεκτροβάνες, που μπορούν να λειτουργούν είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα
- 1 περισταλτική αντλία
- 1 χρονόμετρο συνδεδεμένο σε σειρά με την περισταλτική αντλία
- 1 κλικογράφος
- 1 αισθητήρα θερμοκρασίας
- 1 ηλεκτρονικός πίνακας ελέγχου (PLC)
- Σωληνώσεις

Περιγραφή Αντιδραστήρα

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της αναερόβιας χώνευσης χρησιμοποιείται ένας πιλοτικής κλίμακας αναερόβιος αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (PABR), 77 L κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο αντιδραστήρας αποτελείται από δύο ομόκεντρους κυλίνδρους, όπου στον εσωτερικό κύλινδρο περιέχεται λουτρό, το οποίο έχει ως στόχο την διατήρηση της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα στους 35°C, έτσι ώστε αυτός να λειτουργεί στη βέλτιστη θερμοκρασία για μεσόφιλη διεργασία. Το λουτρό αυτό είναι συνδεδεμένο μέσω σωληνώσεων από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) με ένα θερμοσίφωνα, δημιουργώντας ένα κλειστό κύκλωμα όπου ρέει το νερό με τη βοήθεια ενός κυκλοφορητή. Η ροή του νερού και επομένως και η θερμοκρασία του ρυθμίζεται μέσω ενός αισθητήρα θερμοκρασία, ο οποίος βρίσκεται εντός του ενεργού όγκου του αντιδραστήρα.

Από την άλλη πλευρά, ο εξωτερικός κύλινδρος είναι χωρισμένος σε τέσσερα διαμερίσματα, κάθε ένα από τα οποία χωρίζεται σε ένα ανοδικό και ένα καθοδικό τμήμα με τη βοήθεια ανακλαστήρων. Για κάθε διαμέρισμα υπάρχει μία χειροκίνητη βάννα, από την οποία γίνεται η δειγματοληψία. Για τη μετακίνηση του ρευστού από το ένα διαμέρισμα στο επόμενο χρησιμοποιείται ένα σύστημα από ηλεκτροβάνες,

καθώς επίσης και εξωτερικές σωληνώσεις, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Επίσης, η εναλλαγή των διαμερισμάτων και η ροή του υποστρώματος από την δεξαμενή τροφοδοσίας στον αντιδραστήρα γίνονται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Στην παρακάτω Εικόνα 7 απεικονίζεται ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας:



Εικόνα 7 Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με Ανακλαστήρες (PABR)

Εξοπλισμός

Ακολουθεί μία περιγραφή των βασικών μερών του συστήματος, τα οποία υποστηρίζουν τη λειτουργία του περιοδικού αναερόβιου αντιδραστήρα με ανακλαστήρες. Συγκεκριμένα, περιγράφονται το ψυγείο, όπου συντηρείται η τροφοδοσία, η περισταλτική αντλία, με τη βοήθεια της οποίας γίνεται η τροφοδότηση του αντιδραστήρα, ο Πίνακας Ελέγχου, οι ηλεκτροβάνες και ο κλικογράφος, με τον οποίο μετριέται η παραγωγή του βιοαερίου.

Ψυγείο

Το απόβλητο βρίσκεται στη δεξαμενή τροφοδοσίας, η οποία λειτουργεί ως ψυγείο συντήρησης. Το ψυγείο αυτό, που διατηρεί την τροφοδοσία στους 4-5°C, είναι απαραίτητο, επειδή η χαμηλή αυτή θερμοκρασία εμποδίζει την αποικοδόμηση του οργανικού υλικού, που εμπεριέχεται στο απόβλητο, αλλά και την αλλοίωση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του. Ακόμη, μέσα στο ψυγείο υπάρχει αναδευτήρας, ο οποίος αναδύει συνεχώς την τροφοδοσία, έτσι ώστε να αποτραπεί η καθίζηση των αιωρούμενων στερεών, η οποία θα μπορούσε να παρεμποδίσει την ομαλή ροή του υποστρώματος στον αντιδραστήρα και να προκαλέσει μέχρι και φραγή στις διάφορες σωληνώσεις, προκαλώντας πιθανή αστοχία του αντιδραστήρα. Το ψυγείο αυτό απεικονίζεται στην παρακάτω Εικόνα 8:



Εικόνα 8 Ψυγείο Τροφοδοσίας

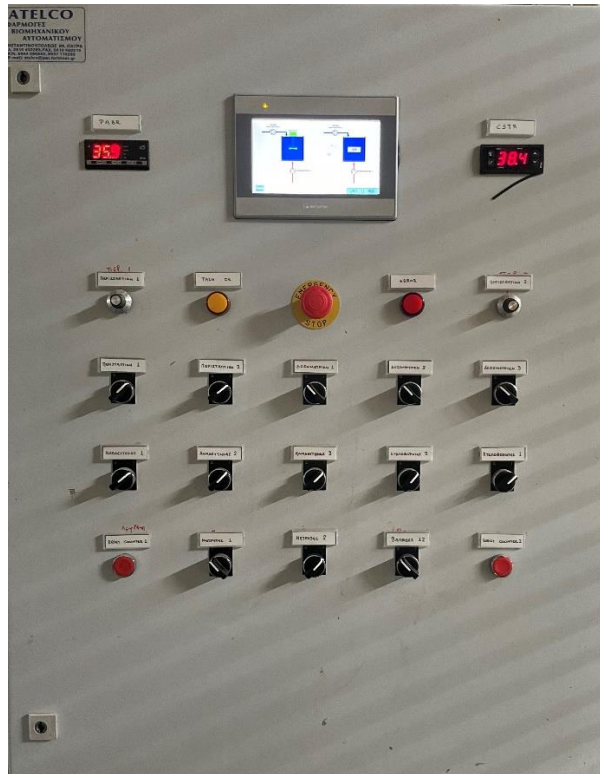
Περισταλτική Αντλία

Το απόβλητο εισέρχεται στον αντιδραστήρα από τη δεξαμενή τροφοδοσίας με χρήση μίας περισταλτικής αντλίας. Η ογκομετρική παροχή του αποβλήτου, δηλαδή η ποσότητα του αποβλήτου με την οποία τροφοδοτεί η αντλία τον αντιδραστήρα στη μονάδα του χρόνου, είναι γνωστή. Συγκεκριμένα, αυτή είναι 250 mL/min. Ακόμη, όταν είναι γνωστός ο υδραυλικός χρόνος παραμονής και εφόσον ο όγκος του αντιδραστήρα είναι επίσης συγκεκριμένος, μπορεί να βρεθεί η ογκομετρική παροχή του αποβλήτου σε L/ημέρα. Έπειτα, επιλέγεται αυθαίρετα από τον χειριστή ο χρόνος που θα παραμένει ανοιχτή η αντλία σε κάθε άνοιγμα, από τον οποίο και υπολογίζεται η ποσότητα του αποβλήτου που εισέρχεται στον αντιδραστήρα κάθε φορά που ανοίγει η αντλία. Έτσι, υπάρχουν όλα τα απαραίτητα δεδομένα, προκειμένου να καθοριστεί κάθε πότε θα ανοίγει η αντλία, έτσι ώστε το σύστημα να τροφοδοτείται με την απαραίτητη ποσότητα αποβλήτου. Συνεπώς, το άνοιγμα και το κλείσιμο της αντλίας πραγματοποιείται μέσω ενός χρονοδιακόπτη, στον οποίο εισάγονται ως δεδομένα ο χρόνος που η αντλία παραμένει ανοιχτή και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι το επόμενο άνοιγμα.

Πίνακας Ελέγχου PLC και Ηλεκτροβάνες

Ο Πίνακας Ελέγχου PLC χρησιμοποιείται εξαιτίας της ανάγκης αυτοματοποίησης της συγκεκριμένης διεργασίας αλλά και της διαρκούς παρακολούθησης των συνθηκών, που επικρατούν σε αυτή.

Ειδικότερα, ο Πίνακας Ελέγχου αποτελεί μία μονάδα επεξεργασίας, η οποία έχει μονάδες εισόδου, που δέχονται εντολές και μονάδες εξόδου, που ανάλογα με το σήμα που έχουν λάβει οι μονάδες εισόδου, εκτελούν ορισμένες ενέργειες. Πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες εισόδου έχουν την ικανότητα να δεχτούν ένα σήμα από κάποιον αισθητήρα ή διακόπτη, ενώ οι μονάδες εξόδου μπορούν να στείλουν μία εντολή σε κάποιο μηχανικό μέρος της διάταξης, όπως μία βαλβίδα ή βάνα. Στον συγκεκριμένο πίνακα, ο οποίος απεικονίζεται στην Εικόνα 9 που ακολουθεί, συνδέονται ένας αισθητήρας θερμοκρασίας, η περισταλτική αντλία, το όργανο μέτρησης παροχής βιοαερίου, που θα αναλυθεί στη συνέχεια και οι ηλεκτροβάνες.



Εικόνα 9 Πίνακας Ελέγχου PLC

Συγκεκριμένα, σε ολόκληρη την πειραματική διάταξη υπάρχουν 12 αυτόματες ηλεκτροβάνες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με τον Πίνακα Ελέγχου PLC, ο οποίος και καθορίζει ποιες θα είναι ανοιχτές και ποιες κλειστές σε κάθε χρονική στιγμή. Σε σταθερά χρονικά διαστήματα, ανάλογα με την περίοδο εναλλαγής των διαμερισμάτων, θα πρέπει να αλλάζουν οι βάνες που είναι ανοιχτές και αυτές που είναι κλειστές. Αυτό γίνεται έτσι ώστε σε κάθε χρονική στιγμή να υπάρχει ένα διαμέρισμα, στο οποίο θα εισέρχεται η τροφοδοσία από το ψυγείο και ένα διαμέρισμα εκροής, του οποίου το περιεχόμενο είναι η τελική εκροή του αντιδραστήρα. Όσο αφορά τα άλλα δύο διαμερίσματα, οι ανοιχτές και οι κλειστές βάνες θα πρέπει να είναι καθορισμένες με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε η εκροή του ενός διαμερίσματος να είναι η εισροή του επόμενου με την τροφοδοσία να περνάει διαδοχικά και από τα τέσσερα διαμερίσματα.

Ειδικότερα, σε κάθε ένα από τα τέσσερα διαμερίσματα υπάρχει εξωτερικά μία τριάδα ηλεκτροβανών. Η πρώτη είναι ανοιχτή, όταν εισέρχεται σε αυτό τροφοδοσία από το ψυγείο, ενώ η τρίτη είναι ανοιχτή όταν η εκροή εξέρχεται από αυτό. Η δεύτερη ηλεκτροβάνα είναι ανοιχτή, όταν το συγκεκριμένο διαμέρισμα δεν λειτουργεί ούτε ως διαμέρισμα τροφοδοσίας ούτε ως διαμέρισμα εκροής. Σε κάθε άλλη περίπτωση

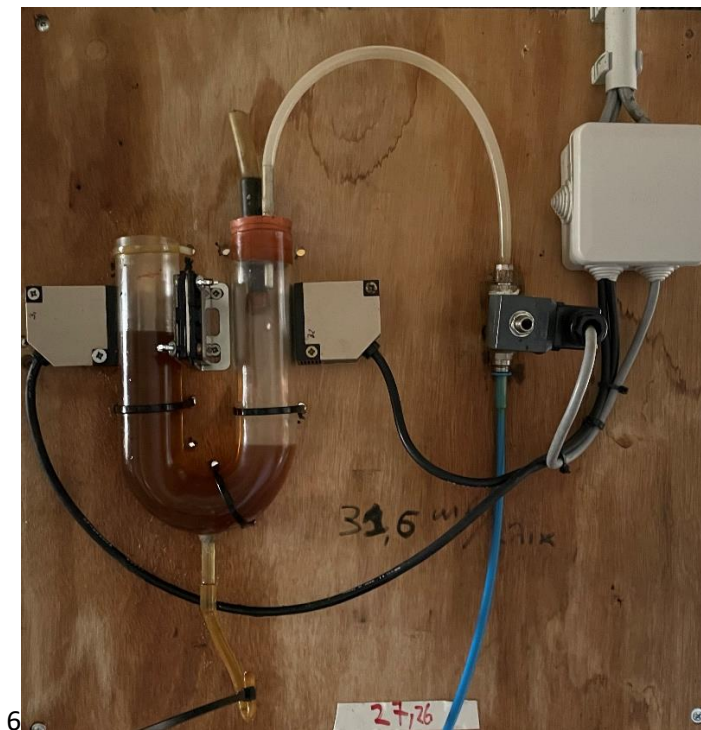
η κάθε μία από αυτές τις ηλεκτροβάνες είναι κλειστή. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η αλλαγή της κατάστασης μίας ηλεκτροβάνας και αυτή δεν συμβαδίζει με την αυτόματη αλλαγή που πραγματοποιείται ανά διαστήματα από τον Πίνακα Ελέγχου PLC, κάθε μία από αυτές τις ηλεκτροβάνες ρυθμίζεται και χειροκίνητα.

Κλικογράφος

Ένα σημαντικό μέρος της πειραματικής διάταξης είναι το όργανο, με το οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση της παραγωγής του βιοαερίου, το οποίο ονομάζεται κλικογράφος. Στην κορυφή του αντιδραστήρα υπάρχουν τέσσερις οπές, μία από την κορυφή του κάθε διαμερίσματος. Σε αυτές τις οπές είναι προσαρτημένοι μικροί σωλήνες, οι οποίοι μεταφέρουν το βιοαέριο, που παράγεται μέσα στον αντιδραστήρα. Οι τέσσερις αυτοί σωλήνες ενώνονται, έτσι ώστε να υπάρχει ένα ρεύμα βιοαερίου, το οποίο οδηγείται σε έναν γυάλινο σωλήνα σχήματος U, ο οποίος περιέχει μία ποσότητα ορυκτελαίου. Το άκρο του σωλήνα που μεταφέρει το βιοαέριο από τον αντιδραστήρα είναι μονωμένο, ώστε η πίεση στον σωλήνα να ταυτίζεται με την πίεση του αερίου μέσα στον αντιδραστήρα. Στην άλλη πλευρά του σωλήνα βρίσκεται ένα φωτοκύτταρο, το οποίο αποστέλλει ηλεκτρικό σήμα στον Πίνακα Ελέγχου PLC, όταν η στάθμη του ορυκτελαίου φτάσει σε ένα συγκεκριμένο ύψος.

Εφόσον το βιοαέριο δεν είναι διαλυτό στο ορυκτέλαιο, καθώς εισέρχεται από το ένα άκρο του σωλήνα σχήματος U ασκεί πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια του ορυκτελαίου, ωθώντας το προς την άλλη μεριά του σωλήνα. Όταν η ελεύθερη επιφάνεια αυτής της μεριάς φτάσει στο επίπεδο που βρίσκεται το φωτοκύτταρο, τότε αποστέλλεται ηλεκτρικό σήμα στον Πίνακα Ελέγχου, ο οποίος δίνει εντολή να ανοίξει η βαλβίδα εκτόνωσης, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον σωλήνα του βιοαερίου πριν αυτός συνδεθεί με τον σωλήνα σχήματος U. Κατά αυτόν τον τρόπο, η ποσότητα του βιοαερίου, που είχε εισέλθει στον γυάλινο σωλήνα, απελευθερώνεται στο περιβάλλον και το ορυκτέλαιο επανέρχεται στην αρχική του θέση μέσα στο σωλήνα, ενώ η βαλβίδα εκτόνωσης κλείνει αμέσως μετά από αυτή την επαναφορά, έτσι ώστε να μην απελευθερωθεί στο περιβάλλον περαιτέρω ποσότητα βιοαερίου εκτός από αυτήν που βρισκόταν μέσα στον γυάλινο σωλήνα. Τη στιγμή που το φωτοκύτταρο στέλνει το ηλεκτρικό σήμα στον Πίνακα Ελέγχου ακούγεται ένας ήχος σαν κλικ και ο αριθμός των κλικ, που καταμετρούνται από αυτόν, αυξάνεται κατά ένα.

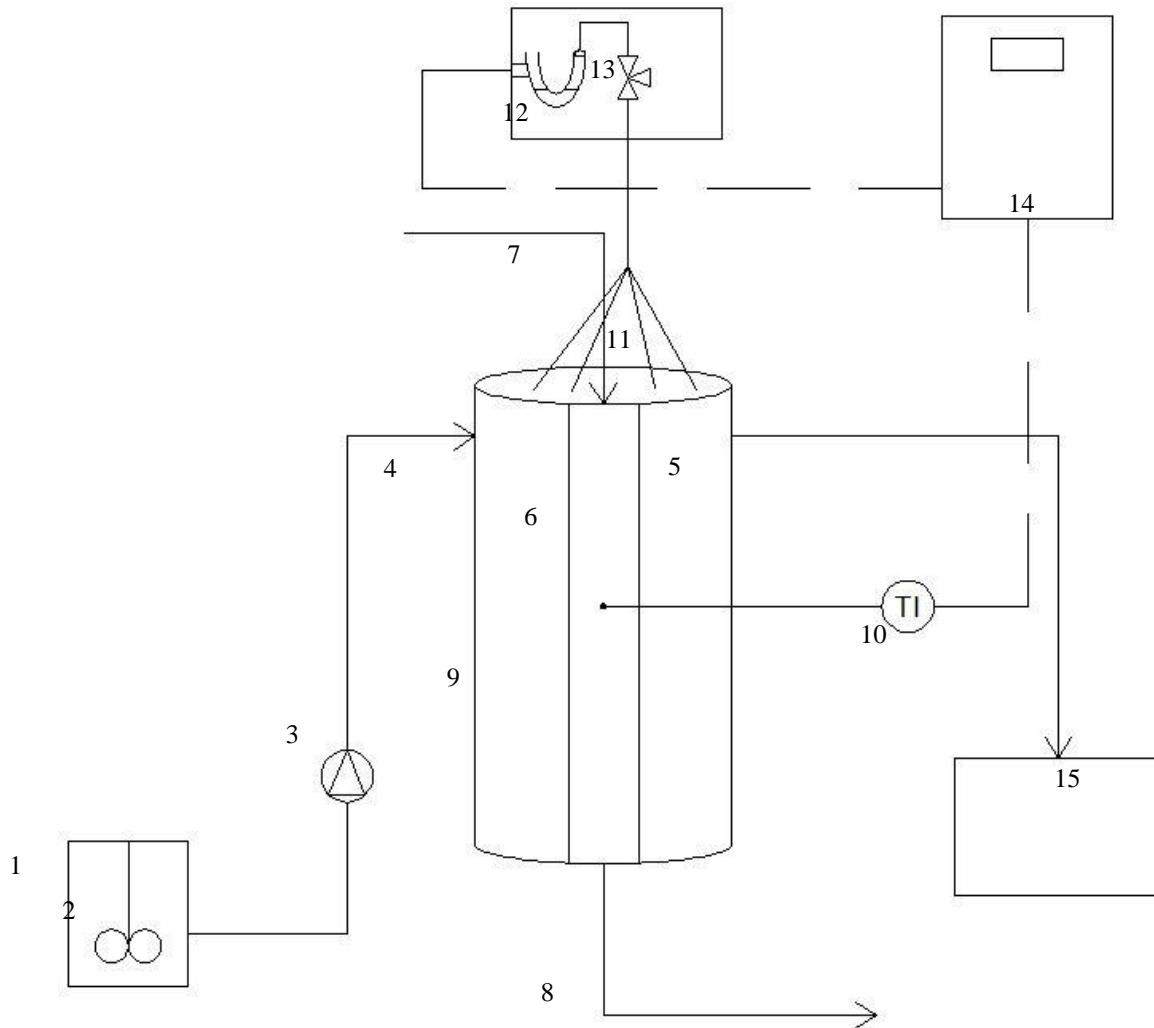
Η συγκεκριμένη διάταξη βαθμονομείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με χρήση σύριγγας, η οποία περιέχει αέριο και μέσω αυτής υπολογίζεται η ποσότητα βιοαερίου που χρειάζεται για να μεταβεί η στάθμη του ορυκτελαίου από την κατάσταση της ηρεμίας στην κατάσταση, όπου το φωτοκύτταρο θα στείλει σήμα στον Πίνακα Ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η ποσότητα του βιοαερίου που αντιστοιχεί σε ένα κλικ και άρα πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των κλικ, που καταγράφει ο Πίνακας Ελέγχου μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, παραδείγματος χάριν μία ημέρα, υπολογίζεται η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου.



Εικόνα 10: Κλικογράφος

Διάγραμμα Ροής Διεργασίας

Το διάγραμμα ροής της συνολικής διεργασίας, το οποίο απεικονίζει την συσχέτιση των διαφόρων μερών του συνολικού συστήματος της αναερόβιας χώνευσης, δίνεται παρακάτω:



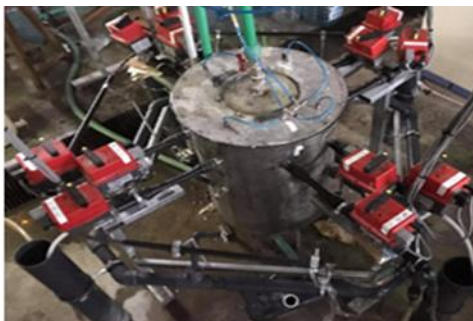
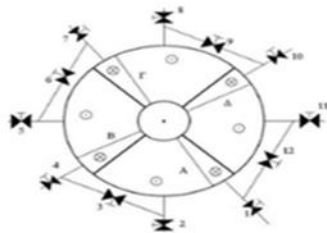
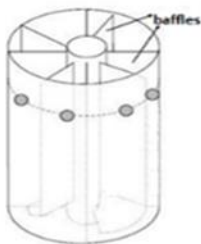
Εικόνα 11 Διάγραμμα Ροής Διεργασίας Αναερόβιας Χώνευσης με:(1) ψυγείο, (2) αναδευτήρας, (3) περισταλτική αντλία, (4) είσοδος τροφοδοσίας, (5) εκροή αντιδραστήρα, (6) λουτρό στον εσωτερικό κύλινδρο, (7) εισροή λουτρού, (8) εκροή λουτρού, (9) διαμερίσματα περιοδικού αναερόβιου αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (PABR), (10) αισθητήρας θερμοκρασίας, (11) σωλήνες μεταφοράς παραγόμενου βιοαερίου, (12) κλικογράφος, (13) τρίοδη βάννα, (14) ηλεκτρονικός Πίνακας Ελέγχου PLC, (15) δοχείο συλλογής εκροής

Πειραματική διαδικασία

Τόσο τα αστικά λύματα όσο και τα τροφικά απόβλητα και κατά συνέπεια το συμπύκνωμα τους, είναι απόβλητα τα οποία παρουσιάζουν συνεχής παραγωγή. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την χρήση αναερόβιου συστήματος ταχύρρυθμης λειτουργίας. Στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε ο Περιοδικός Αναερόβιος Αντιδραστήρας με ανακλαστήρες (Periodic Anaerobic Baffled Reactor, PABR) (Skiadas and Lyberatos 1998). Ο PABR αποτελείται από δύο ομόκεντρους κυλίνδρους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, με τον εσωτερικό να λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας, ώστε να διατηρείτε το σύστημα σε σταθερή θερμοκρασία. Ο χώρος ανάμεσα στον εσωτερικό και τον εξωτερικό κύλινδρο αποτελείται από τέσσερα,

ίσου όγκου διαμερίσματα κάθε ένα από τα οποία χωρίζεται σε ένα ανοδικό και ένα καθοδικό τομέα. Κάθε διαμέρισμα προσομοιάζει υδραυλικά, έναν αναερόβιο αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (Anaerobic Baffled Reactor, ABR) (Bachmann et al., 1983). Η καινοτόμος προσέγγιση του PABR βασίζεται στην εισαγωγή μια νέας παραμέτρου λειτουργίας η οποία ονομάζεται Περίοδος Εναλλαγής (Switching Period) T . Η συγκεκριμένη παράμετρος καθορίζει το χρονικό διάστημα για το οποίο κάθε διαμέρισμα του αντιδραστήρα λειτουργεί ως διαμέρισμα Εισροής ή Εκροής αντίστοιχα. Η περίοδος εναλλαγής T μαζί με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (ΥΧΠ) καθορίζουν την ρεολογική συμπεριφορά του αντιδραστήρα. Συγκεκριμένα για πολύ χαμηλές τιμές της παραμέτρου T ο PABR προσεγγίζει την συμπεριφορά ενός αντιδραστήρα UASBR ενώ για αρκετά μεγάλες τιμές T , όπου πρακτικά δεν έχουμε εναλλαγές μεταξύ των διαμερισμάτων ο αντιδραστήρας προσομοιάζει την συμπεριφορά τεσσάρων αντιδραστήρων ABR συνδεδεμένων σε σειρά.

Η συμπεριφορά του PABR έχει μελετηθεί κατά καιρούς τόσο για στερεά απόβλητα (Mathioudakis et al., 2021) όσο και για απόβλητα υγρής φύσης χωρίς σημαντικές ποσότητες στερεών (Stamatelatos et al., 2004, Liu et al., 2009 and Zarkaliou et al., 2022). Πρόκειται για ένα καινοτόμο σύστημα ικανό να προσαρμόζεται σε μεταβολές και διακυμάνσεις του υποστρώματος που επεξεργάζεται.



Σχήμα 16 Πειραματική διάταξη αντιδραστήρα PABR.

Στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένας αντιδραστήρας τύπου PABR ενεργού όγκου 77L. Για την επιλογή των συνθηκών λειτουργίας του αντιδραστήρα διεξήχθησαν πειράματα με σκοπό την μελέτη της συμπεριφοράς του αντιδραστήρα τόσο υπό λειτουργία PABR, δηλαδή με επιβολή συχνότητας εναλλαγής όσο και σε συνθήκες ABR. Συγκεκριμένα διεξήχθησαν δύο πειραματικοί κύκλοι, ο πρώτος εκ των οποίων αποτελείται από έξι πειραματικές φάσεις και ο δεύτερος από τέσσερις πειραματικές φάσεις. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων ο αντιδραστήρας τροφοδοτήθηκε με συνθετικό μίγμα με βάση την γλυκόζη ως πηγή άνθρακα. Το συνθετικό μίγμα που χρησιμοποιήθηκε έχει παρόμοια χημική σύσταση με το συνθετικό αστικό λύμα, με διαφοροποίηση ως προς την συγκέντρωση γλυκόζης και χλωριούχου αμμωνίου ώστε να μεταβάλλεται σε κάθε φάση το οργανικό φορτίο της τροφοδοσία και ταυτόχρονα να διατηρείται σταθερός ο λόγος άνθρακα προς άζωτο στην τιμή 50. Σε κάθε πειραματικό κύκλο πέραν από

την αξιολόγηση της διεργασίας ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου και την απόδοση σε μεθάνιο, υπήρξε εντατική παρακολούθηση του pH, της ολικής αλκαλικότητας της διεργασίας, καθώς και της συγκέντρωσης ολικών και πτητικών στερεών και πτητικών λιπαρών οξέων με σκοπό την βέλτιστη παρακολούθηση των συνθηκών λειτουργίας της αναερόβιας χώνευσης.

1^{ος} Πειραματικός κύκλος

Διεξήχθησαν έξι πειραματικές φάσεις, οι οποίες διαφοροποιούνταν ως προς τον υδραυλικό χρόνο παραμονής και ως προς την συγκέντρωση της τροφοδοσίας σε οργανικό φορτίο, κρατώντας παράλληλά σταθερά τον ρυθμό οργανικής φόρτισης καθώς και τον λόγο HRT/T.

Στον πίνακα 21 παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά κάθε πειραματικής φάσης για τον πρώτο πειραματικό κύκλο. Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος ήταν η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του αντιδραστήρα υπό συνθήκες PABR, όσον αφορά την απομάκρυνση οργανικού φορτίου και την παραγωγή βιοαερίου σε χαμηλούς χρόνους παραμονής. Οι συγκεκριμένες συνθήκες δεν ήταν δυνατόν να επιβληθούν εξ αρχής στο αναερόβιο σύστημα καθώς έπρεπε αρχικά να εγκλιματιστούν οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί ως προς τις ταχύρρυθμες συνθήκες. Η αναερόβια λάσπη που χρησιμοποιήθηκε για το Start- up της διεργασίας προήλθε από αναερόβιο αντιδραστήρα πλήρους ανάμιξης, ο οποίος επεξεργάζεται περίσσεια ιλύος στο κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων της Μεταμόρφωσης.

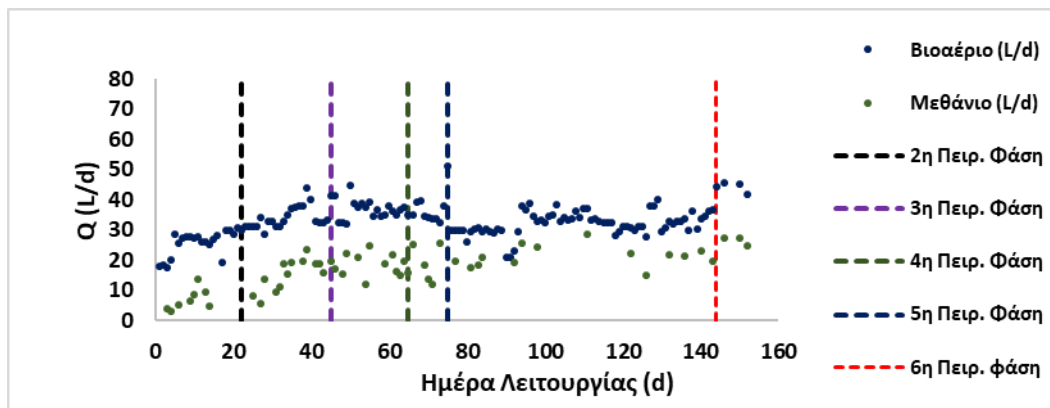
Πίνακας 21 Παράμετροι λειτουργίας πρώτου πειραματικού κύκλου, λειτουργία PABR

Όπως	1 ^{ος} Πειραματικός κύκλος	Πειραματικές φάσεις					
	Παράμετροι Λειτουργίας	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η
	Διάρκεια (d)	21	33	20	10	69	9
	HRT (d)	10	6	4	3	2	1
	T (d)	10	6	4	3	2	1
	OLR(g sCOD/L*d)	0.91	0.96	0.95	0.90	0.91	1.06

παρατηρείται από τον Πίνακα 21 ο ρυθμός οργανικής φόρτισης παραμένει σταθερός κοντά στην τιμή 1 g/L/d και ο λόγος HRT/T παραμένει σταθερός στην τιμή 1 καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων. Η επιλογή αυτών των τιμών οφείλεται στα τελικά χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας του αντιδραστήρα που θα προκύψουν από την ανάμιξη του FMSW condensate και των αστικών λυμάτων. Συγκεκριμένα από το Σχήμα 14 γίνεται κατανοητό ότι η τελική συγκέντρωση του μίγματος σε οργανικό φορτίο θα βρίσκεται κοντά στην τιμή 1 g/L. Επιπροσθέτως απαιτείται ταχύρρυθμη επεξεργασία των συγκεκριμένων αποβλήτων καθώς παρουσιάζουν συνεχή παραγωγή. Με βάσει τα παραπάνω αποφασίστηκε πως ο το αναερόβιο σύστημα θα λειτουργεί σε συνθήκες μίας ημέρας χρόνου παραμονής και κατά συνέπεια ο ρυθμός οργανικής φόρτισης θα βρίσκεται κοντά στην τιμή του 1g/l/d. Όσον αφορά τον λόγο χρόνου παραμονής και περιόδου εναλλαγής αυτό επιλέχθηκε με βασικό κριτήριο, η διάρκεια κατά την οποία οι λειτουργίες των διαμερισμάτων θα εναλλάσσονται (Διαμέρισμα τροφοδοσίας – Διαμέρισμα εκροής) να είναι παρόμοια για κάθε ένα από τα τέσσερα διαμερίσματα. Με βάσει αυτά τα δεδομένα είναι σαφές

πως η πειραματική φάση η οποία ενδιαφέρει περισσότερο την συγκεκριμένη μελέτη είναι η 6^η πειραματική φάση όπου τόσο το συνθετικό απόβλητο όσο και οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος προσομοιάζουν τα χαρακτηριστικά της διεργασίας για την οποία σχεδιάζεται, δηλαδή την αναερόβια συν-χώνευση μίγματος FMSW condensate και αστικών λυμάτων με χρόνο παραμονής μία ημέρα.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του 1^{ου} πειραματικού κύκλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. Η μείωση του χρόνου παραμονής από τις 10 στη 1 ημέρα επηρέασε τον αντιδραστήρα τόσο ως προς την ικανότητα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου όσο και ως προς την παραγωγή βιοαερίου. Οι πειραματικές φάσεις με το μικρότερο HRT παρουσίασαν μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου (1d HRT- 44.3 L/d) καθώς και μεθανίου (1d HRT- 26.5 L/d). Ωστόσο η πειραματική φάση με χρόνο παραμονής 1 ημέρα παρουσίασε την χαμηλότερη απομάκρυνση σε οργανικό φορτίο (68,4%). Στο Σχήμα 17 παρουσιάζεται η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου καθ' όλη την διάρκεια του πρώτου πειραματικού κύκλου και στο Σχήμα 18 η αντίστοιχη συγκέντρωση οργανικού φορτίου στην είσοδο και έξοδο του αντιδραστήρα.

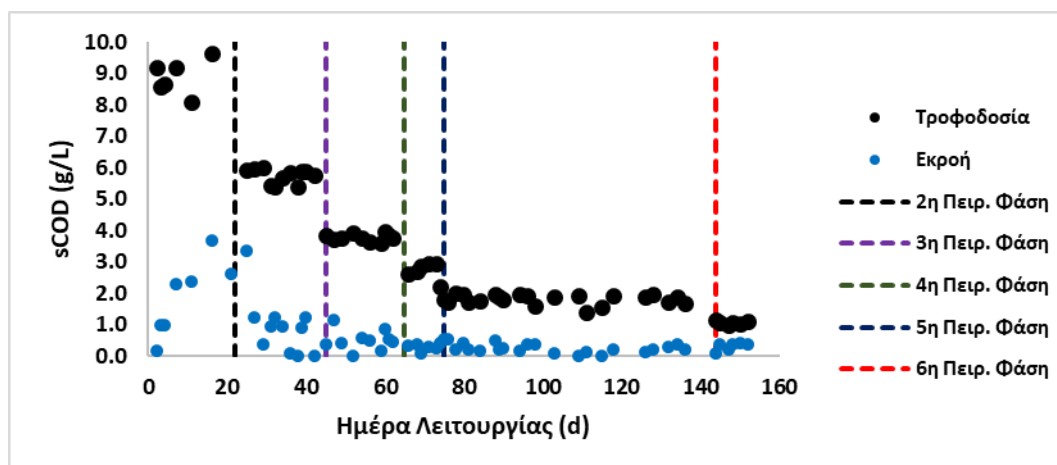


Σχήμα 17 Ημερήσια παραγωγή Βιοαερίου και Μεθανίου καθ' όλη την διάρκεια του 1ου Πειραματικού κύκλου.

Πίνακας 122 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του 1ου πειραματικού κύκλου για κάθε πειραματική φάση.

1 ^{ος} Πειραματικός κύκλος	Πειραματικές φάσεις					
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η
Αποτελέσματα						
Παραγωγή Βιοαερίου (L/d)	25.6 ± 4.2	33.8 ± 3.7	37.0 ± 3.2	35.6 ± 2.5	32.3 ± 4.9	44.3 ± 1.8
Παραγωγή Μεθανίου (L/d)	6.9 ± 3.4	15.2 ± 5.4	18.7 ± 3.7	18.5 ± 5.8	21.1 ± 4.2	26.5 ± 1.6
Ποσοστό Μεθανίου (%)	27.0 ± 10.7	44.5 ± 13.4	50.9 ± 10.5	54.3 ± 17.6	66.5 ± 8.4	59.6 ± 0.6

sCOD Τροφοδοσίας (g/L)	9.11 ± 0.75	5.74 ± 0.23	3.78 ± 0.59	2.71 ± 0.29	1.81 ± 0.16	1.06 ± 0.06
sCOD Εκροής (g/L)	1.86 ± 1.20	0.94 ± 0.94	0.50 ± 0.91	0.28 ± 0.12	0.25 ± 0.15	0.37 ± 0.12
Απομάκρυνση COD (%)	79.5	83.7	86.9	89.6	85.30	64.9

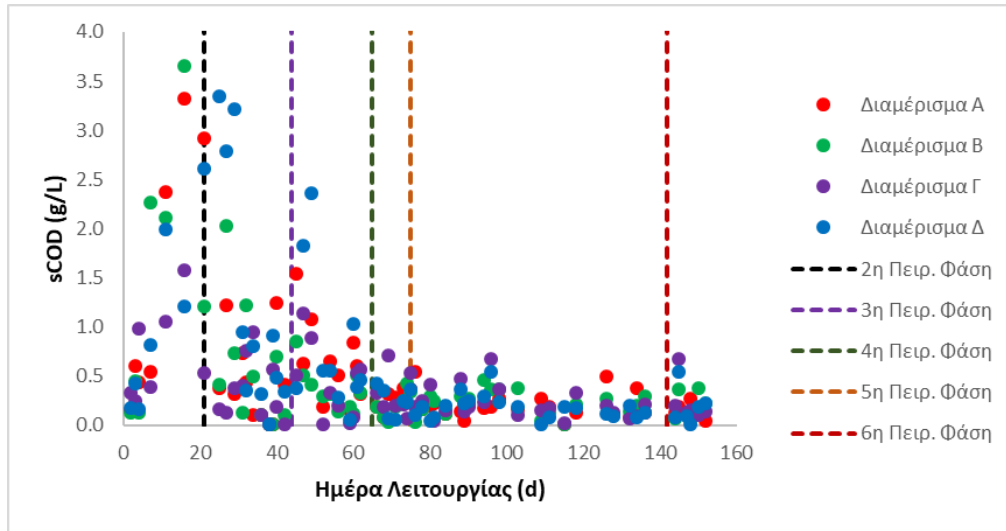


Σχήμα 18 Ημερήσια συγκέντρωση σε οργανικό φορτίο της τροφοδοσίας και της εκροής του συστήματος κατά την διάρκεια του 1ου πειραματικού κύκλου.

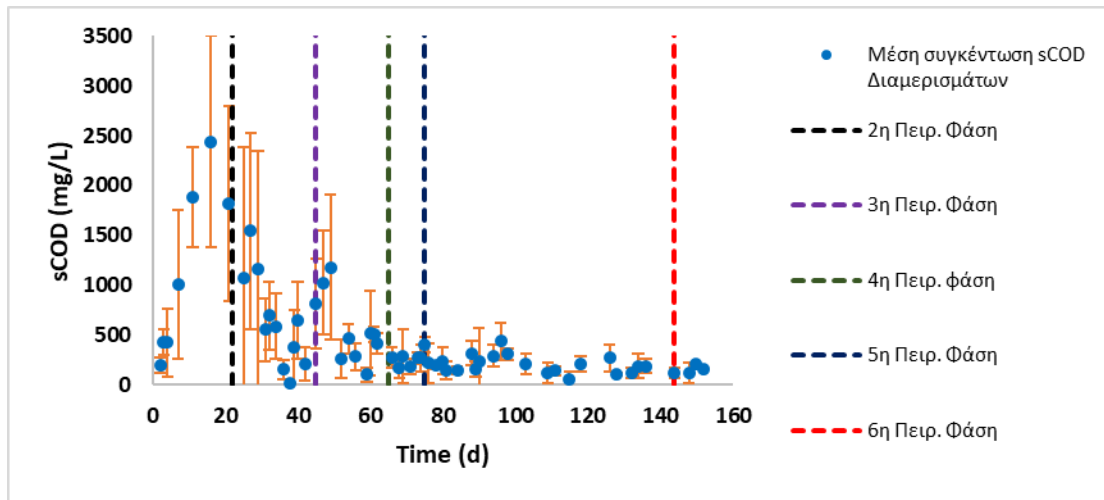
Πέραν της μειωμένης απομάκρυνσης σε οργανικό φορτίο η πειραματική φάση με χρόνο παραμονής μιας ημέρας παρουσίασε μεγάλη αστάθεια στο σύστημα. Αυτό οφείλεται τόσο στην αύξηση της ημερήσιας παροχής σε 77 L ημερησίως όσο και στην εναλλαγή των διαμερισμάτων ανά 6 ώρες. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε άνοδο της στάθμης της βιομάζας δημιουργώντας πρόβλημα στην ομαλή λειτουργία του αντιδραστήρα. Αξίζει να αναφερθεί πως παρότι από την 5^η πειραματική φάση (2d HRT) στην 6^η πειραματική φάση παρουσιάζεται αύξηση κατά 37,5 % στην παραγωγή βιοαερίου η αντίστοιχη αύξηση για το μεθάνιο αντιστοιχεί σε 25,6 % γεγονός που οφείλεται στην μείωση του ποσοστού μεθανίου στο παραγόμενο βιοαέριο κατά την 6^η πειραματική φάση.

Το διάγραμμα 19 εξάγει σαφή συμπεράσματα τόσο για την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου από τον αντιδραστήρα και για την συνολική απόδοση της διεργασίας. Κρίνεται αναγκαίο να εξεταστεί και η μεμονωμένη συμπεριφορά κάθε διαμερίσματος με σκοπό να παρουσιαστεί η κατανομή της συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου στον αντιδραστήρα. Στο Σχήμα 19 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση του διαλυτού οργανικού φορτίου σε κάθε διαμέρισμα του PABR σε μονάδες διαλυτού Χημικώς απαιτούμενου Οξυγόνου (sCOD). Στο Σχήμα 20 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια τιμή της

συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου στον αντιδραστήρα που προκύπτει από τον μέσο όρο των τεσσάρων διαμερισμάτων με γραφική ενσωμάτωση της τυπικής απόκλισης.



Σχήμα 19 Ημερήσια συγκέντρωση διαλυτού οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR κατά την διεξαγωγή του 1ου Πειραματικού κύκλου.



Σχήμα 20 Μέση ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου Διαμερισμάτων PABR και τυπική απόκλιση κατά την διάρκεια του 1ου Πειραματικού κύκλου.

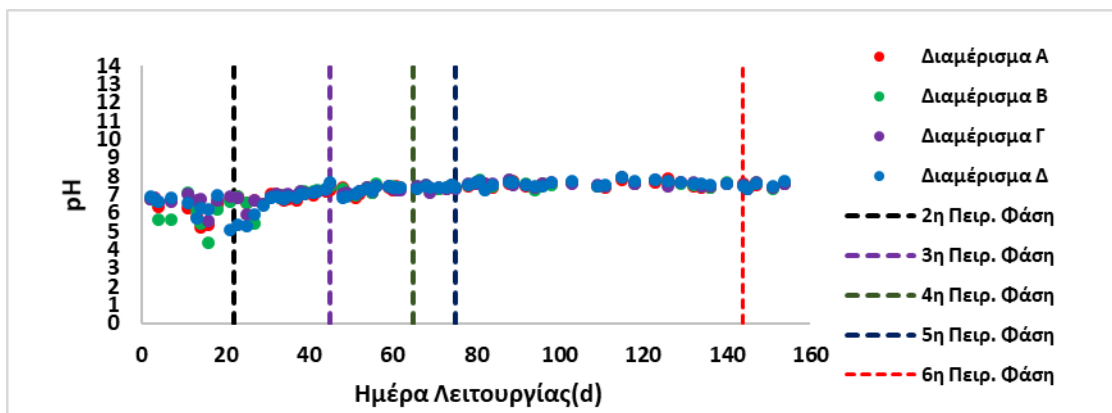
Σημειώνεται πως ο PABR δεν έχει μηχανική ανάδευση με αποτέλεσμα να μην επιβάλλεται εξωγενώς φυσικοχημική ομοιογένεια στις συνθήκες που επικρατούν σε αυτόν. Κατά συνέπεια όταν τα αποτελέσματα της διεργασίας παρουσιάζουν ταύτιση μεταξύ των διαμερισμάτων, αυτή έχει επέλθει ως απόρροια επίτευξης συνθηκών υδραυλικής και φυσικοχημικής ισορροπίας της διεργασίας. Η ομοιογένεια της συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου στα διαφορετικά διαμερίσματα, για του χαμηλότερους χρόνους παραμονής είναι επίσης αποτέλεσμα της επιλογής ο λόγος υδραυλικού χρόνου παραμονής και περιόδου εναλλαγής να διατηρείται σταθερός.

Η τιμή του pH ανάμεσα στα διαμερίσματα του αντιδραστήρα κατά την διάρκεια του 1^{ου} πειραματικού κύκλου παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ιδιαίτερα για τις πειραματικές φάσεις με τους μεγαλύτερους χρόνους παραμονής (10d , 6d). Ξεκινώντας από την 3^η πειραματική φάση οι τιμές του pH σταθεροποιούνται στον αντιδραστήρα σε τιμές ανάμεσα στο 7,0 και 8,0. Οι συγκεκριμένες τιμές pH είναι ευνοϊκές για την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και δεν δημιουργούν φαινόμενα παρεμπόδισης της διεργασίας. Στον αντίποδα η προτεινόμενη βιβλιογραφικά τιμή της ολικής αλκαλικότητας για τα υγρά αστικά λύματα ($0.125 \text{ g/L NaHCO}_3 = 78 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$) είναι εξαιρετικά χαμηλή. Για να αποφευχθεί κάποιο φαινόμενο παρεμπόδισης προστέθηκε στο μίγμα της τροφοδοσίας όξινο ανθρακικό νάτριο με στόχο την αύξηση της ολικής του αλκαλικότητας. Η συγκεκριμένη ενέργεια θεωρείται καίρια για την εξέλιξη της διεργασίας καθώς η αύξηση της ολικής αλκαλικότητας του αντιδραστήρα οδήγησε σε αύξηση της συγκέντρωσης του μεθανίου στο παραγόμενο βιοαέριο. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι η χαμηλή συγκέντρωση αλκαλικότητας που παρουσιάζουν τα υγρά αστικά λύματα ενδέχεται να προκαλέσει παρεμπόδιση στην διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και θα πρέπει να υπάρξουν διορθωτικές παρεμβάσεις. Το φαινόμενο αυτό αναμένεται να είναι εντονότερο σε μεγαλύτερης κλίμακας διεργασίες. Στον Πίνακα 23 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές pH και αλκαλικότητας σε μονάδες (mgCaCO_3/L) για κάθε ένα από τα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα καθώς και για την εκροή του. Σχήμα 21 παρουσιάζεται η ημερήσια τιμή του pH στα τέσσερα Διαμερίσματα του αντιδραστήρα και στο Σχήμα 22 η αντίστοιχη τιμή της ολικής αλκαλικότητας κατά την διάρκεια του 1^{ου} πειραματικού κύκλου.

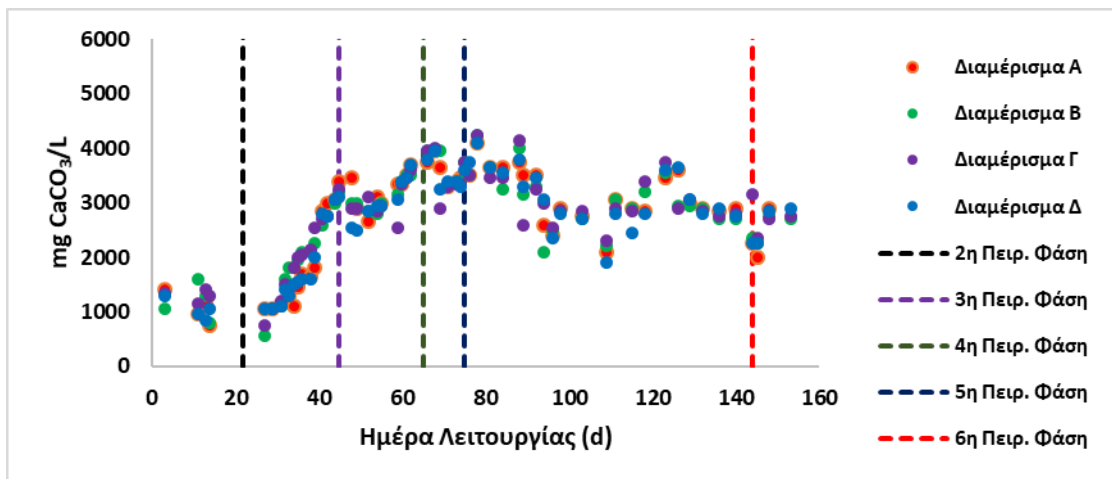
Πίνακας 23 Μέση τιμή pH και ολικής αλκαλικότητας για κάθε Διαμέρισμα του PABR και για την εκροή του αντιδραστήρα κατά την διάρκεια των πειραματικών φάσεων του 1^{ου} Πειραματικού κύκλου.

Πειρ. Φάση	Διαμέρισμα Α		Διαμέρισμα Β		Διαμέρισμα Γ		Διαμέρισμα Δ		Εκροή	
	pH	Αλκαλ/τα mgCaCO_3/L	pH	Αλκαλ/τα mgCaCO_3/L	pH	Αλκαλ/τα mgCaCO_3/L	pH	Αλκαλ/τα mgCaCO_3/L	pH	Αλκαλ/τα mgCaCO_3/L
1 ^η	6.23	1062,50	6.00	1187,50	6.64	1300,00	6.53	1037,50	6.26	1146,88
2 ^η	6.87	1719,23	6.86	1896,15	6.89	1919,23	6.49	1750,00	6.87	1821,15
3 ^η	7.23	3240,00	7.31	3140,00	7.27	3090,00	7.26	3050,00	7.36	3130,00

4 ^η	7.3 6	3583,33	7.4 2	3666,67	7.3 9	3475,00	7.3 8	3516,67	7.5 1	3560,42
5 ^η	7.5 5	3154,55	7.5 6	3095,45	7.5 9	3145,45	7.6 0	3127,27	7.6 5	3130,68
6 ^η	7.4 6	2125,00	7.5 1	2300,00	7.4 9	2737,50	7.4 4	2562,50	7.5 3	2431,25

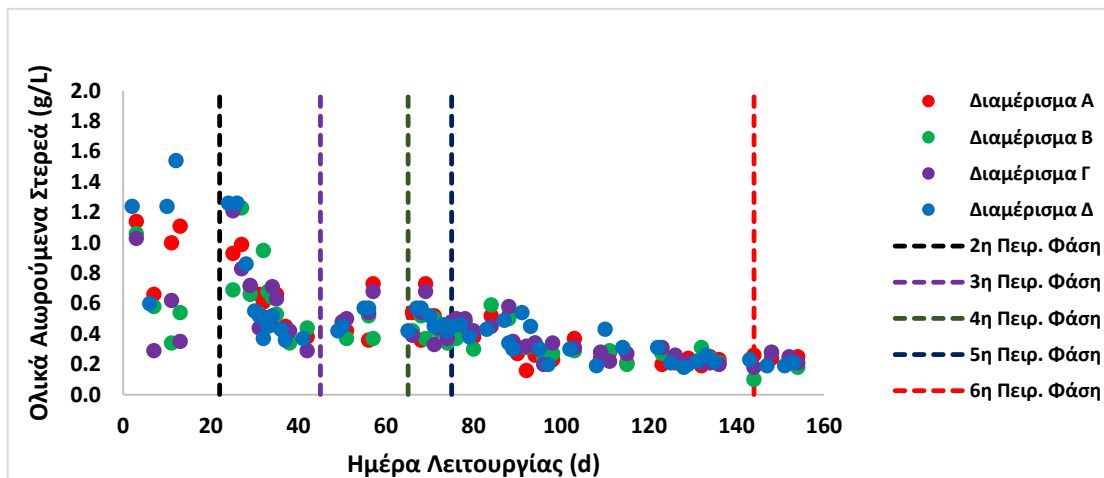


Σχήμα 21 Ημερήσια τιμή pH για κάθε διαμέρισμα του PABR κατά την διάρκεια του 1ου Πειραματικού κύκλου

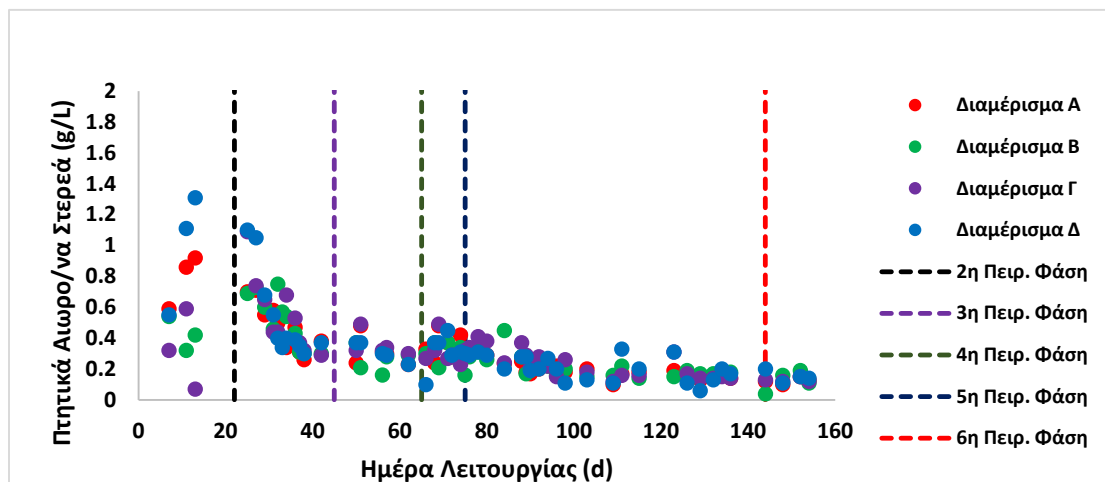


Σχήμα 22 Ημερήσια τιμή ολικής αλκαλικότητας σε κάθε διαμέρισμα του PABR κατά την διάρκεια του 1ου Πειραματικού κύκλου.

Όσον αφορά την συγκέντρωση των στερεών, υπήρξε σαφής μείωση τους κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Το φαινόμενο αυτό μπορεί οδηγήσει στο συμπέρασμα πως μέσω της μείωσης του υδραυλικού χρόνου παραμονής επέρχεται μείωση της συγκέντρωσης της βιομάζας. Ωστόσο η χαμηλή συγκέντρωση στερεών όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 23 και 24 οφείλεται στην καθίζηση των βιοστερεών στα κατώτερα σημεία του αντιδραστήρα, φαινόμενο σύνηθες για τον συγκεκριμένο τύπο βιοαντιδραστήρων. Στο Σχήμα 25 διακρίνεται ένα διφασικό σύστημα που δημιουργείται σε κάθε διαμέρισμα του PABR ανάμεσα στην βιομάζα (στερεή φάση) και το επεξεργασμένο απόβλητο (υγρή φάση). Τα σημεία δειγματοληψίας για τον έλεγχο των συνθηκών που επικρατούν σε κάθε διαμέρισμα είναι τοποθετημένα σε σημεία υψηλότερα από το στρώμα βιομάζας κάθε διαμερίσματος. Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ολικών και πτητικών στερεών για κάθε διαμέρισμα και για την εκροή του PABR.



Σχήμα 23 Ημερήσια Συγκέντρωση Ολικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS) στα διαμερίσματα του PABR κατά την διάρκεια του 1ου πειραματικού κύκλου



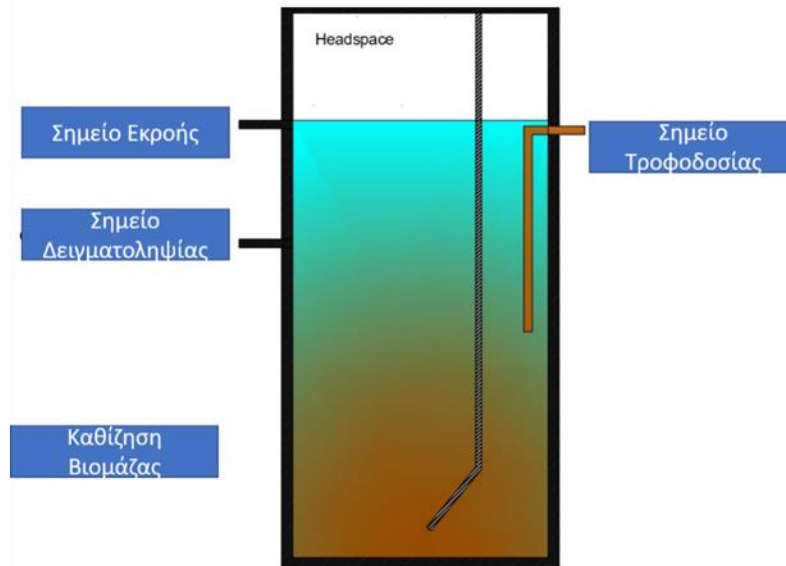
Σχήμα 24 Ημερήσια Συγκέντρωση Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών (VSS) στα διαμερίσματα του PABR κατά την διάρκεια του 1ου πειραματικού κύκλου

Ως γενικό συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί ότι με την μείωση του υδραυλικού χρόνου παραμονής μειώνεται και η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών. Αρχικά στην 1^η πειραματική φάση η μέση συγκέντρωση των ολικών και των πτητικών αιωρούμενων στερεών στον PABR ήταν 0,835 g/L και 0,635 g/L αντίστοιχα ενώ στην τελευταία πειραματική φάση τα δύο αυτά μεγέθη είχαν τιμές 0,22 g/L 0,14 g/L αντίστοιχα. Επιπλέον είναι εμφανής η τάση προς ταύτιση που έχουν τα διαμερίσματα του αντιδραστήρα ως προς την συγκέντρωση των στερεών καθώς μειώνεται ο χρόνος παραμονής. Ενώ στις αρχικές φάσεις παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις ανάμεσα στα διαμερίσματα του PABR όσο εξελίσσεται η πειραματική διαδικασία, οι διακυμάνσεις εξαλείφονται. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά εμφανίζεται και στις υπόλοιπες παραμέτρους που αναλύθηκαν.

Πίνακας 24 Μέση τιμή TSS και VSS για κάθε Διαμέρισμα του PABR και για την εκροή του αντιδραστήρα κατά την διάρκεια των πειραματικών φάσεων του 1^{ου} Πειραματικού κύκλου.

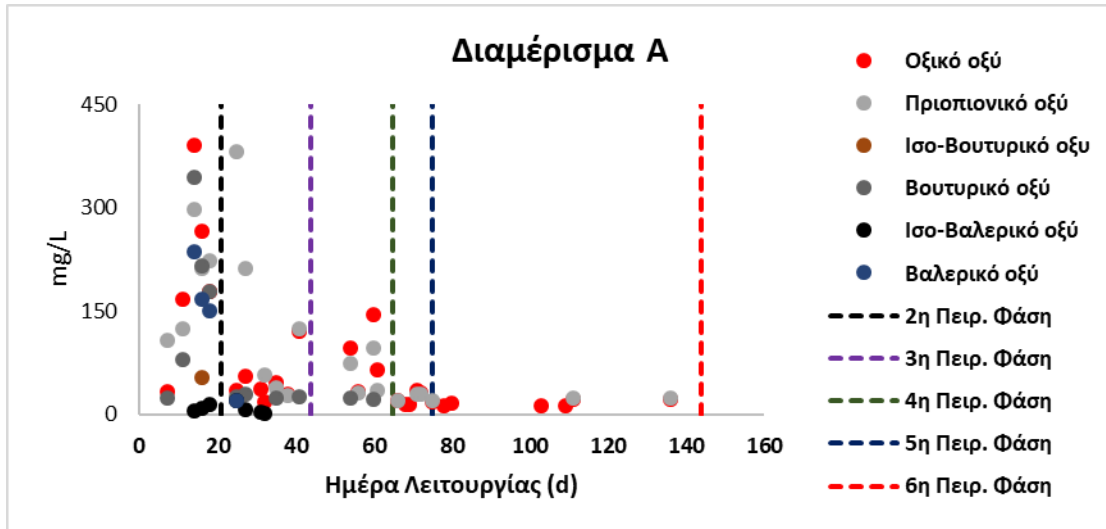
Πειρ. Φάση	Διαμέρισμα Α		Διαμέρισμα Β		Διαμέρισμα Γ		Διαμέρισμα Δ		Εκροή	
	TSS (g/L)	VSS (g/L)	TSS (g/L)	VSS (g/L)	TSS (g/L)	VSS (g/L)	TSS (g/L)	VSS (g/L)	TSS (g/L)	VSS (g/L)
1 ^η	0.98	0.79	0.63	0.43	0.57	0.33	1.16	0.99	0.75	0.63
2 ^η	0.61	0.47	0.64	0.52	0.60	0.54	0.63	0.54	0.58	0.49
3 ^η	0.50	0.31	0.44	0.26	0.55	0.35	0.50	0.31	0.48	0.32
4 ^η	0.50	0.35	0.43	0.31	0.46	0.31	0.50	0.32	0.48	0.32

5 ^η	0.30	0.20	0.32	0.31	0.33	0.23	0.34	0.21	0.45	0.28
6 ^η	0.12	0.24	0.20	0.13	0.24	0.13	0.20	0.15	0.25	0.16

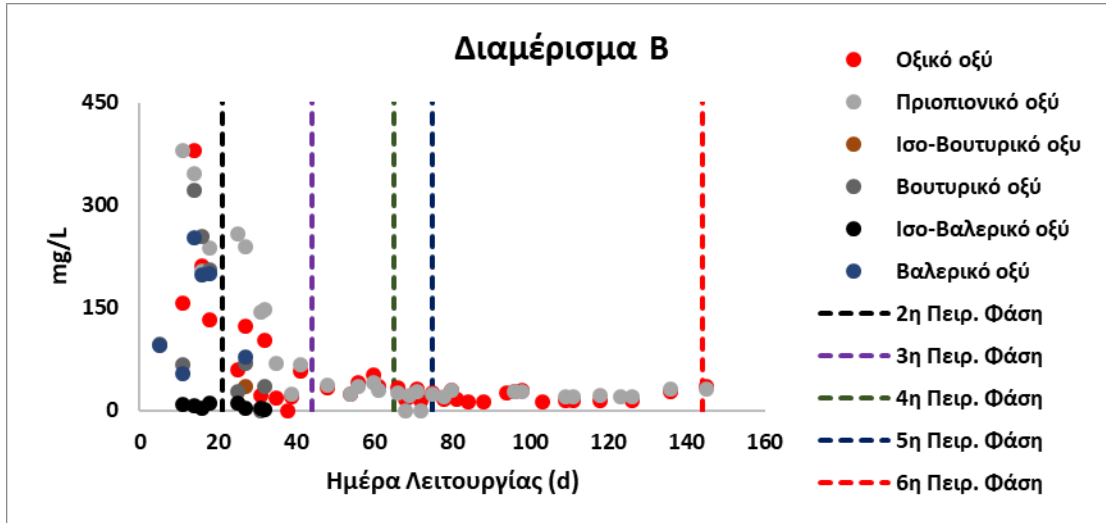


Σχήμα 25 Απεικόνιση μεμονωμένου διαμερίσματος PABR σε τομή.

Μια περαιτέρω παράμετρος που αναλύθηκε με σκοπό τον βέλτιστο έλεγχο της διεργασίας είναι η συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων. Τα πτητικά λιπαρά οξέα ή VFAs (Volatile Fatty Acids) είναι οργανικά οξέα με έως και πέντε άτομα άνθρακα. Τα VFAs παράγονται στο στάδιο της οξεογένεσης της αναερόβιας χώνευσης και καταναλώνονται κατά το στάδιο της ακετογένεσης. Η παρακολούθηση της συγκέντρωσής τους κρίνεται απαραίτητα καθώς, συσσώρευση τους υποδουλώνει παρεμπόδιση της διεργασίας στο στάδιο παραγωγής τους. Στα παρακάτω σχήματα 26, 27, 28, 29 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση των VFAs στα διαμερίσματα Α, Β, Γ και Δ αντίστοιχα, κατά την διάρκεια των πειραματικών φάσεων του 1^{ου} πειραματικού κύκλου. Αξίζει να σημειωθεί πως τα κενά που παρουσιάζονται κυρίως από την 5^η πειραματική φάση και έπειτα δεν οφείλονται σε μη διεξαγωγή μετρήσεων αλλά στην μη ανίχνευση πτητικών λιπαρών οξέων στο σύστημα.

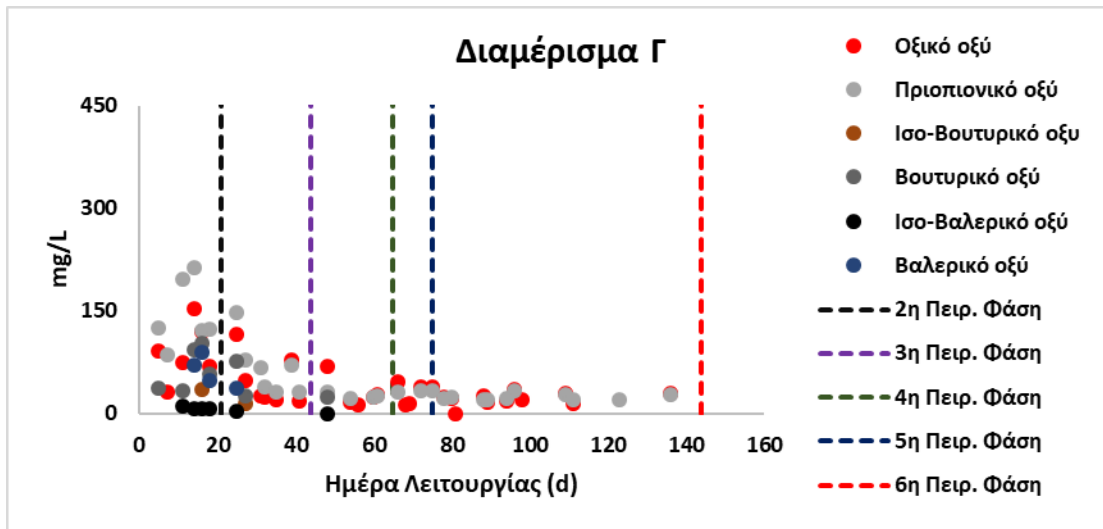


Σχήμα 26 Ημερήσια συγκέντρωση VFAs στο Διαμέρισμα Α του PABR κατά την διάρκεια του 1ου Πειραματικού κύκλου.

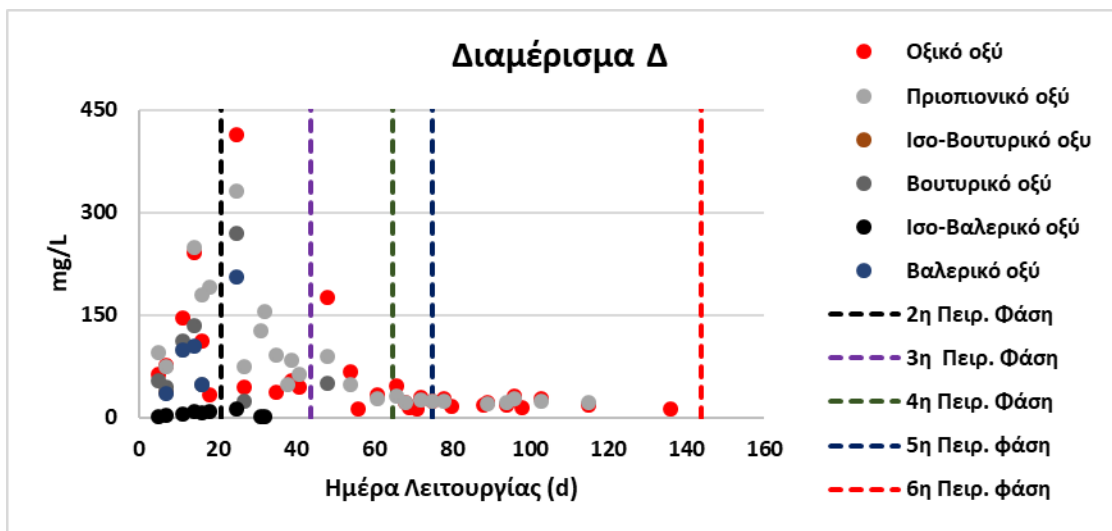


Σχήμα 27 Ημερήσια συγκέντρωση VFAs στο Διαμέρισμα Β του PABR κατά την διάρκεια του 1ου Πειραματικού κύκλου.

Από Σχήματα 26, 29 γίνεται κατανοητό πως όσο μειώνεται ο χρόνος παραμονής μειώνεται η συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων στο σύστημα. Τα κυρίαρχα VFAs που εντοπίζονται σε κάθε διαμέρισμα είναι το οξικό και το προπιονικό οξύ. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς κατά την φάση της ακετογένεσης όλα τα VFAs μετατρέπονται σε οξικό οξύ. Οι υψηλές συγκεντρώσεις VFAs που παρουσιάζονται κατά τις πρώτες αρχικές φάσεις δηλώνουν ότι ο ρυθμός της μεθανογένεσης στις αντίστοιχες φάσεις είναι μικρότερος γεγονός που επαληθεύεται και από τα δεδομένα του Πίνακα 8. Επιπλέον οι υψηλότερες συγκεντρώσεις VFAs που παρουσιάζονται στην 1^η και στη 2^η πειραματική φάση είναι σε πλήρη σύμπτωση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της τιμής του pH για τις φάσεις αυτές, όπως φαίνονται στον Πίνακα 9, όπου αναγράφεται η μέση τιμή του pH για κάθε διαμέρισμα του PABR κατά την διάρκεια του 1^{ου} Πειραματικού κύκλου.



Σχήμα 28 Ημερήσια συγκέντρωση VFAs στο Διαμέρισμα Γ του PABR κατά την διάρκεια του 1ου Πειραματικού κύκλου.



Σχήμα 29 Ημερήσια συγκέντρωση VFAs στο Διαμέρισμα Δ του PABR κατά την διάρκεια του 1ου Πειραματικού κύκλου.

2^{ος} Πειραματικός κύκλος

Κατά την διάρκεια του δεύτερου πειραματικού κύκλου μελετήθηκε κατά αντίστοιχο τρόπο γραμμικής μείωσης του χρόνου παραμονής υπό σταθερό ρυθμό οργανικής φόρτισης η συμπεριφορά του αναερόβιου συστήματος χωρίς επιβολή εναλλαγής μεταξύ των διαμερισμάτων. Διεξήχθησαν τέσσερις διακριτές πειραματικές φάσεις τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 25 Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι, η μετάβαση από τον πρώτο στον δεύτερο πειραματικό κύκλο έγινε απευθείας χωρίς την μεσολάβηση κάποιας νέας περιόδου εγκλιματισμού.

Πίνακας 25. Παράμετροι λειτουργίας δεύτερου πειραματικού κύκλου, λειτουργία ABR

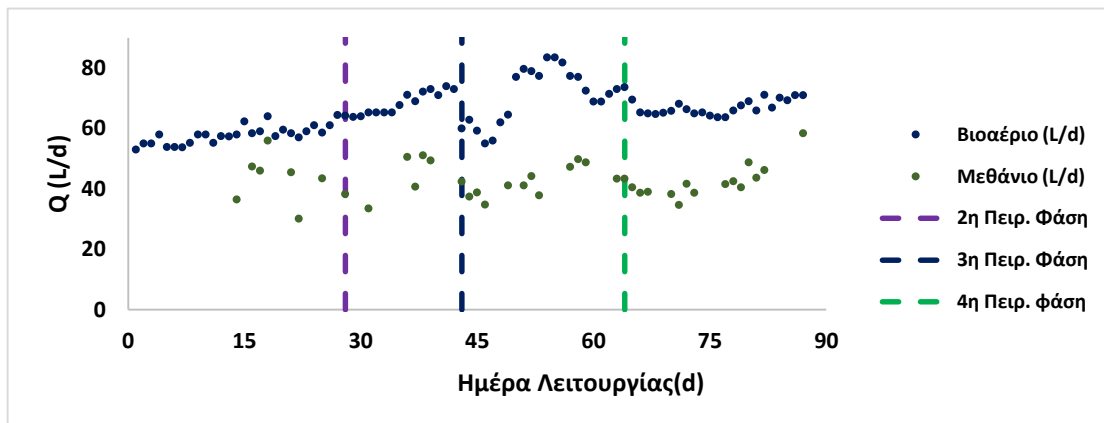
2 ^{ος} Πειραματικός κύκλος	Πειραματικές Φάσεις			
	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
Παράμετροι Λειτουργίας				
Διάρκεια (d)	28	15	15	22
HRT (d)	4	3	2	1
OLR(gCOD/L*d)	0.97	0.97	1.02	1.06

Ο δεύτερος πειραματικός κύκλος παρουσίασε βελτιωμένη συμπεριφορά τόσο ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου όσο και ως προς την παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου και μεθανίου. Ειδικά στην τελευταία πειραματική φάση στην οποία επικεντρώνεται και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, ο αντιδραστήρας παρουσίασε εξαιρετική σταθερότητα και αυξημένες τιμές απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και απόδοσης σε μεθάνιο σε σύγκριση με τον 1^ο πειραματικό κύκλο. Στον Πίνακα 26 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του δεύτερου πειραματικού κύκλου για κάθε πειραματική φάση. Στο Σχήμα 30 και 31 παρουσιάζονται η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου και η ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου σε τροφοδοσία και εκροή αντίστοιχα.

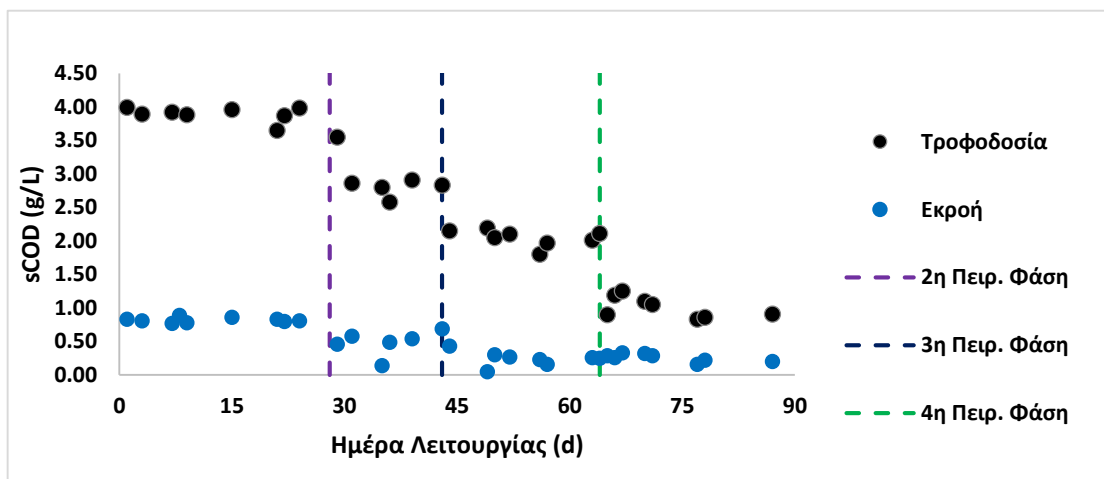
Πίνακας 26 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του 2ου πειραματικού κύκλου για κάθε πειραματική φάση.

2 ^{ος} Πειραματικός κύκλος	Πειραματικές Φάσεις			
	1 st	2 nd	3 rd	4 th
Αποτελέσματα				
Παραγωγή Βιοαερίου (L/d)	58.1 ± 3.1	68.0 ± 4.1	71.6 ± 8.6	66.8 ± 2.3
Παραγωγή Μεθανίου (L/d)	42.9 ± 7.4	44.6 ± 6.4	42.3 ± 4.5	41.1 ± 3.5
Ποσοστό Μεθανίου (%)	71.7 ± 11.2	65.07 ± 7.5	60.01 ± 5.3	61.6 ± 4.7
sCOD Τροφοδοσίας (g/L)	3.89 ± 0.10	2.92 ± 0.30	2.05 ± 0.12	1.03 ± 0.15
sCOD Εκροής (g/L)	0.82 ± 0.04	0.48 ± 0.17	0.24 ± 0.10	0.27 ± 0.06
Απομάκρυνση COD (%)	78.9	83.5	88.3	73.7

Στον δεύτερο πειραματικό κύκλο παρατηρείται αύξηση της απόδοσης της διεργασίας σε μεθάνιο όσο μειώνεται ο χρόνος παραμονής με εξαίρεση την τελευταία πειραματική φάση, όπου παρατηρείται μικρή μείωση. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζει και η απομάκρυνση οργανικού φορτίου.



Σχήμα 30 Ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου κατά την διάρκεια του 2ου πειραματικού κύκλου.



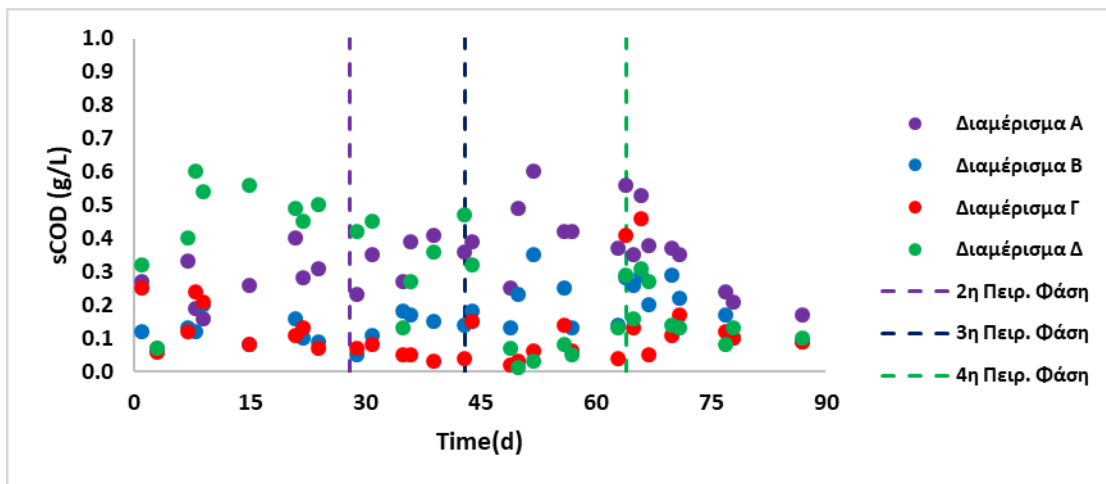
Σχήμα 31 Ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου στην τροφοδοσία και την εκροή του συστήματος κατά την διάρκεια του 2ου πειραματικού κύκλου.

Με βάση τα αποτελέσματα παραγωγής βιοαερίου και συγκεκριμένα μεθανίου, καθώς και έχοντας ως κριτήρια την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου αλλά και την σταθερότητα της διεργασίας, επιλέχθηκε η μη επιβολή περιόδου εναλλαγής στον αντιδραστήρα κατά την αναερόβια χώνευση μίγματος FMSW condensate και συνθετικού αστικού λύματος. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε με βάση

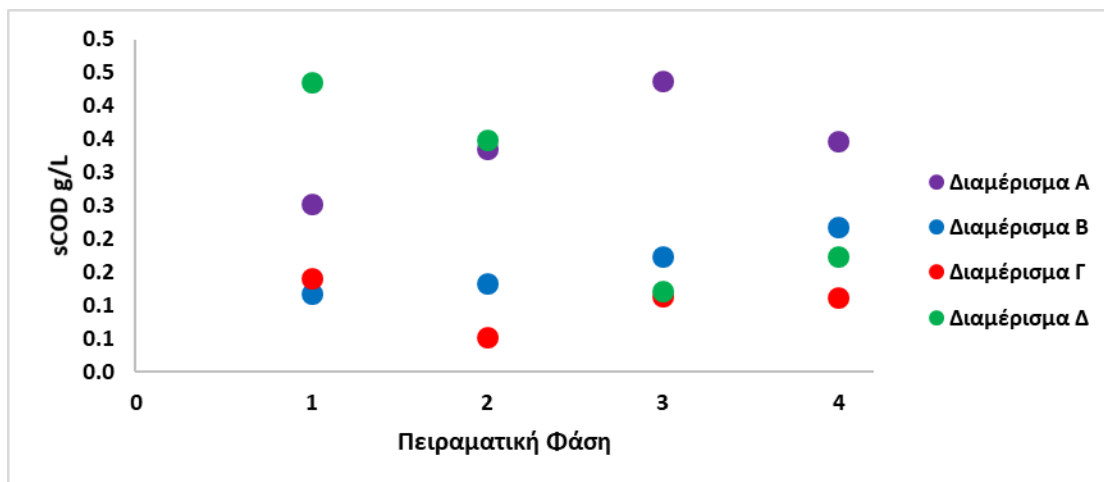
τόσο την αυξημένη παραγωγικότητα σε μεθάνιο όσο και με την αυξημένη απομάκρυνση οργανικού φορτίου.

Όπως και για τον 1^ο πειραματικό κύκλο αξίζει να μελετηθεί πέραν της απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου και η κατανομή της συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου στον αντιδραστήρα. Ενώ στον 1^ο πειραματικό κύκλο η επιβολή περιόδου εναλλαγής

επέφερε ομοιογένεια στα χαρακτηριστικά του PABR κυρίως για τις πειραματικές φάσεις με χαμηλό HRT, στον 2^ο πειραματικό κύκλο η μη επιβολή περιόδου εναλλαγής αναμένεται να δημιουργήσει γραμμική κατανομή στο οργανικό φορτίο μέσα στον PABR. Συγκεκριμένα κατά τον 2^ο πειραματικό κύκλο ο PABR τροφοδοτείται από ένα συγκεκριμένο διαμέρισμα (Διαμέρισμα Α) καθ' όλη την διάρκεια του πειραματικού κύκλου. Επομένως αναμένεται γραμμική μείωση του οργανικού φορτίου από το Διαμέρισμα Α προς το Διαμέρισμα Δ. Στο Σχήμα 32 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR σε μονάδες διαλυτού COD (sCOD), ενώ στο Σχήμα 33 παρουσιάζεται η μέση τιμή της συγκέντρωσης του sCOD για κάθε διαμέρισμα του PABR ανά πειραματική φάση.



Σχήμα 32 Ημερήσια συγκέντρωση sCOD για κάθε διαμέρισμα του PABR κατά την διάρκεια του 2ου πειραματικού κύκλου



Σχήμα 33 Μέση τιμή διαλυτού οργανικού φορτίου διαμερισμάτων PABR κατά την διάρκεια του 2ου πειραματικού κύκλου.

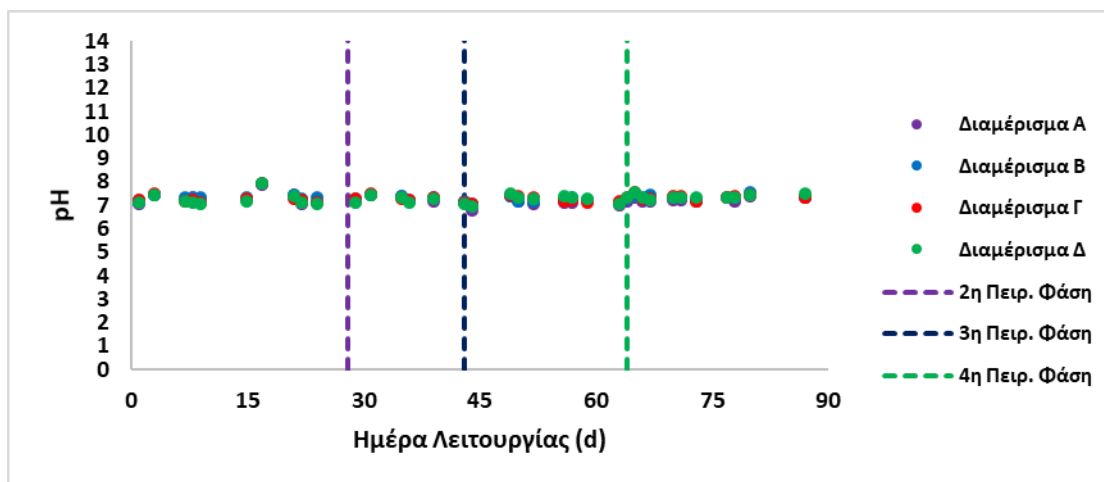
Συγκρίνοντας τη συγκέντρωση του οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR κατά τον 2^ο πειραματικό κύκλο με την αντίστοιχη συγκέντρωση του 1^{ου} πειραματικού κύκλου παρατηρούνται διαφοροποιήσεις τόσο για τις πειραματικές φάσεις με μεγάλο χρόνο παραμονής όσο και για τις πειραματικές φάσεις με μικρότερο HRT. Στον συγκεκριμένο πειραματικό κύκλο η συμπεριφορά του PABR προσομοιάζει θεωρητικά εκείνη ενός αντιδραστήρα ABR που αποτελείται από τέσσερα διαμερίσματα. Κατά τις πρώτες πειραματικές φάσεις δεν αποτυπώνεται η συγκεκριμένη συμπεριφορά όπως φαίνεται από την κατανομή του οργανικού φορτίου στον αντιδραστήρα.

Συγκεκριμένα στην 1^η πειραματική φάση υψηλότερη συγκέντρωση παρουσιάζει το τελευταίο διαμέρισμα και ακολουθεί το πρώτο κατά σειρά εισόδου τροφοδοσίας διαμέρισμα. Η συγκεκριμένη αστοχία οφείλεται στην αδυναμία άμεσης προσαρμογής του αντιδραστήρα στις νέες συνθήκες λειτουργίας. Στην 2^η πειραματική φάση διακρίνεται η τάση βελτίωσης που παρουσιάζει ο αντιδραστήρας με την συγκέντρωση του τελευταίου διαμερίσματος να μειώνεται και εκείνη του πρώτου να αυξάνεται. Στην τρίτη και στην τέταρτη πειραματική φάση η συγκέντρωση του οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR φαίνεται να προσεγγίζει την θεωρητική συμπεριφορά, ωστόσο παρουσιάζεται αστοχία όσον αφορά το τελευταίο και το προ-τελευταίο διαμέρισμα. Η αστοχία αυτή οφείλεται στο ότι, σε κάθε διαμέρισμα παράλληλα με την διεργασίες της αναερόβιας χώνευσης που οδηγούν σε μείωση του οργανικού φορτίου, λαμβάνει χώρα και η αποσύνθεση μικροοργανισμών με αποτέλεσμα να αυξάνεται εν μέρη του διαλυτό οργανικό φορτίο. Η ενίσχυση του οργανικού φορτίου από την αποσύνθεση των μικροοργανισμών είναι εντονότερη στο τρίτο και στο τέταρτο διαμέρισμα καθώς το διαθέσιμο οργανικό φορτίο στα διαμερίσματα αυτά είναι σαφώς μικρότερο. Στον Πίνακα 27 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR και στην εκροή του συστήματος για κάθε πειραματική φάση του 2^{ου} πειραματικού κύκλου.

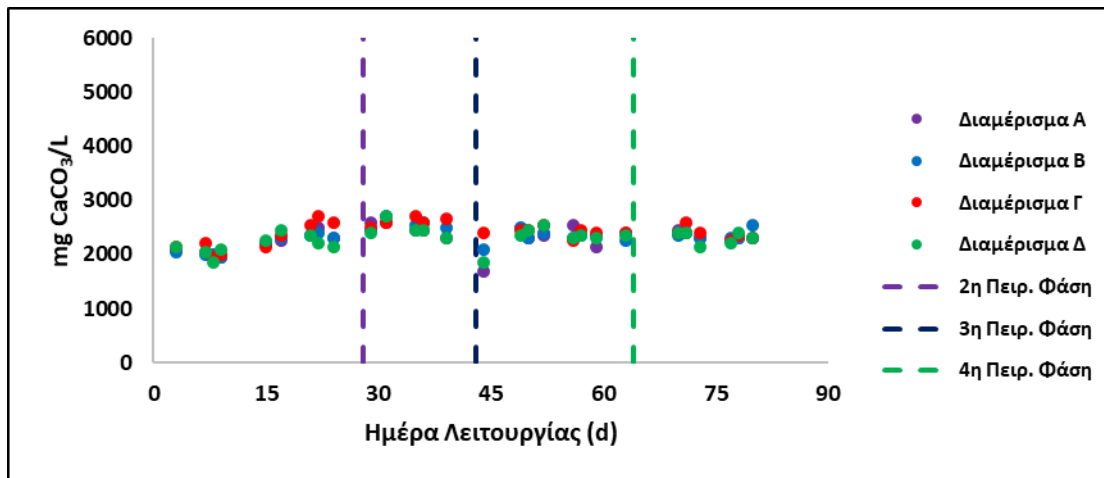
Πίνακας 27 Μέση συγκέντρωση διαλυτού οργανικού φορτίου σε μονάδες sCOD για κάθε διαμέρισμα του PABR και την εκροή του συστήματος κατά την διάρκεια του 2ου πειραματικού κύκλου.

Πειρ. Φάση	Διαμέρισμα Α		Διαμέρισμα Β		Διαμέρισμα Γ		Διαμέρισμα Δ		Εκροή	
	sCOD (g/L)	St. Dev	sCOD (g/L)	St. Dev	sCOD (g/L)	St. Dev	sCOD (g/L)	St. Dev	sCOD (g/L)	St. Dev
1 ^η	0.25	0.1	0.12	0.04	0.14	0.1	0.44	0.1	0.82	0.04
2 ^η	0.34	0.1	0.13	0.04	0.05	0.02	0.35	0.1	0.48	0.17
3 ^η	0.44	0.1	0.17	0.08	0.11	0.12	0.12	0.1	0.24	0.1
4 ^η	0.35	0.1	0.22	0.06	0.11	0.1	0.17	0.1	0.27	0.06

Το pH της διεργασίας όπως παρατηρείται στο Σχήμα 34 παρέμεινε σταθερό καθ' όλη την διάρκεια του 2^{ου} πειραματικού κύκλου χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις. Επιπλέον μέσω της προσθήκη NaHCO₃ στην τροφοδοσία η οποία συνεχίστηκε και κατά τον 2^ο πειραματικό κύκλο διασφαλίστηκε ότι, η αλκαλικότητα του συστήματος παρέμενε σταθερή σε τιμές στο εύρος των 2000-2500 mg CaCO₃/L, όπως φαίνεται στο Σχήμα 35. Στον Πίνακα 14 αναγράφονται οι μέσες τιμές pH και ολικής αλκαλικότητας για τα διαμερίσματα και την εκροή του PABR για κάθε πειραματική φάση του 2^{ου} πειραματικού κύκλου.

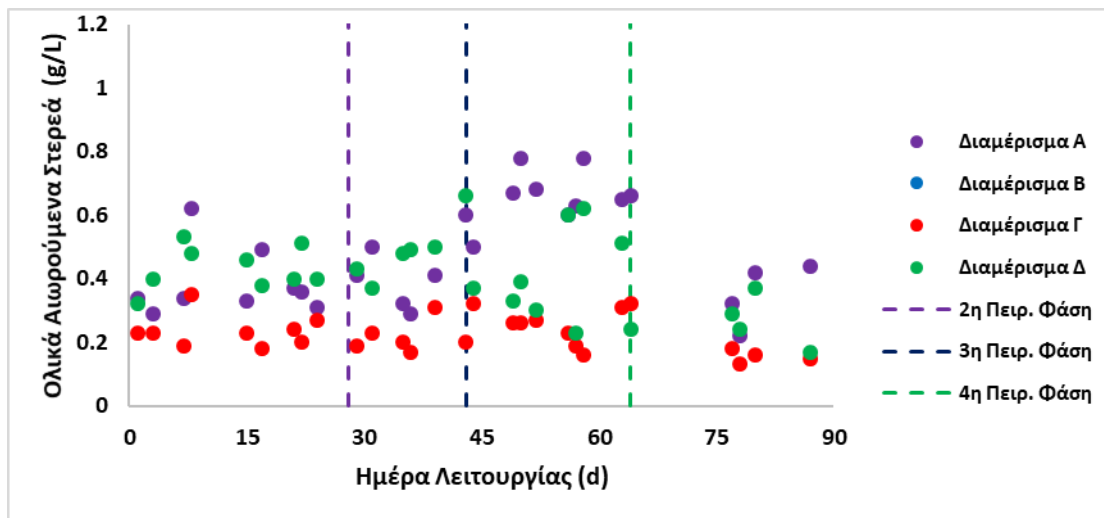


Σχήμα 34 Ημερήσια τιμή pH για κάθε διαμέρισμα του PABR κατά την διάρκεια του 1ου Πειραματικού κύκλου.

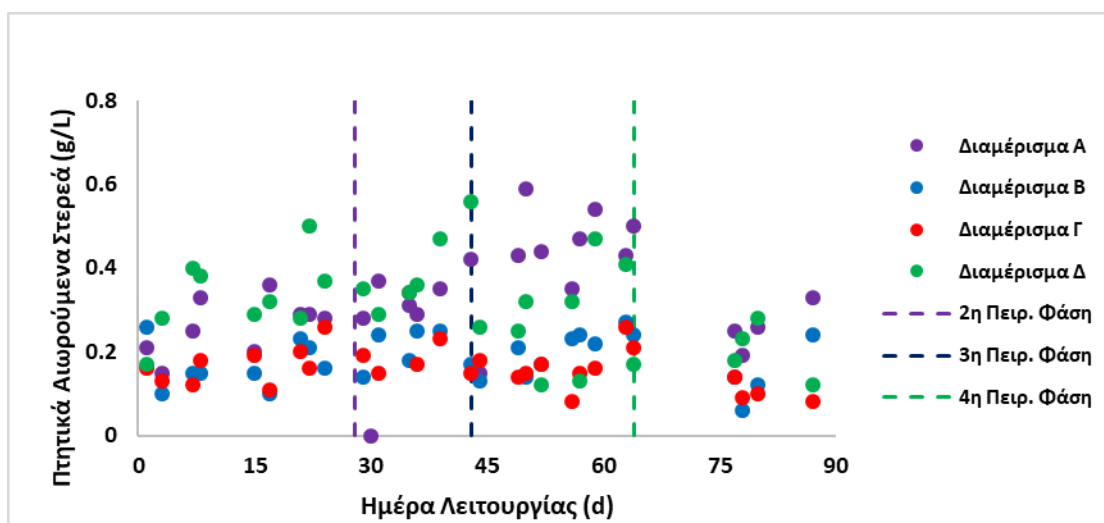


Σχήμα 35 Μέση τιμή pH και ολικής αλκαλικότητας για κάθε Διαμέρισμα του PABR και για την εκροή του αντιδραστήρα κατά την διάρκεια των πειραματικών φάσεων του 2^{ου} Πειραματικού κύκλου

Όσον αφορά την συγκέντρωση των στερεών στην διεργασία, κατά την διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής φάσης, η μεγαλύτερη συγκέντρωση στερεών ανιχνεύθηκε στο διαμέρισμα εκροής (Διαμέρισμα Δ -430 mg/L TSS and 330 mg/L VSS). Παρόμοια αποτελέσματα παρουσίασε και η 2^η πειραματική φάση όπου το ίδιο διαμέρισμα είχε την μεγαλύτερη συγκέντρωση στερεών (490 mg/L TSS and 400 mg/L VSS). Στην 3^η πειραματική φάση η υψηλότερη συγκέντρωση στερεών παρουσιάστηκε στο διαμέρισμα τροφοδοσίας (Διαμέρισμα Α - 660 mg/L TSS and 430mg/L VSS). Η τάση αυτή συνεχίστηκε και στην 4^η πειραματική φάση με το Διαμέρισμα Α να παρουσιάζει συγκέντρωση 320 mg/L TSS and 230 mg/L VSS. Στα παρακάτω Σχήματα 35 και 36 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση των ολικών και των πτητικών αιωρούμενων στερεών για τα διαμερίσματα του PABR κατά την διάρκεια διεξαγωγής του 2^{ου} πειραματικού κύκλου και στον Πίνακα 28 οι αντίστοιχες μέσες τιμές για κάθε πειραματική φάση στα διαμερίσματα του PABR και στην εκροή του συστήματος.



Σχήμα 35 Ημερήσια Συγκέντρωση Ολικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS) στα διαμερίσματα του PABR κατά την διάρκεια του 2ου πειραματικού κύκλου

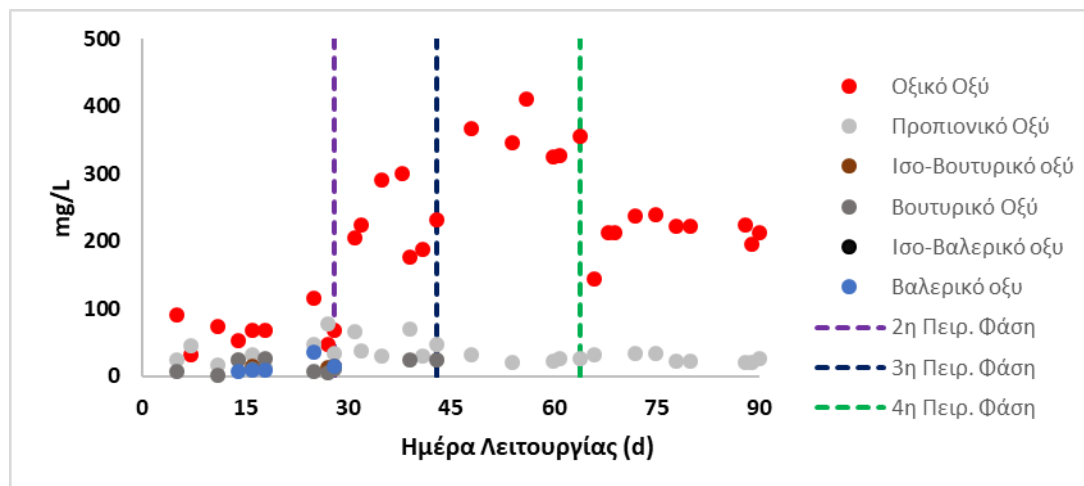


Σχήμα 36 Ημερήσια Συγκέντρωση Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών (VSS) στα διαμερίσματα του PABR κατά την διάρκεια του 2ου πειραματικού κύκλου

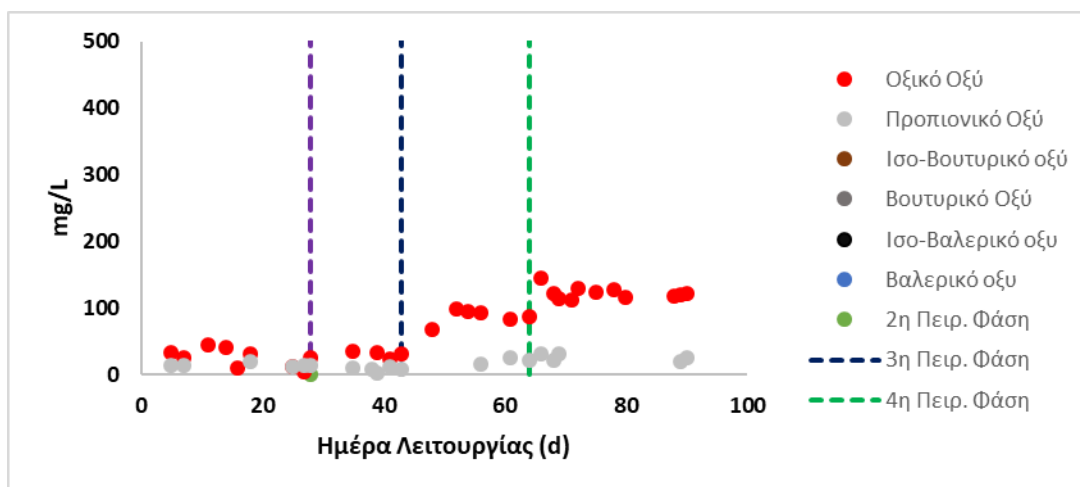
Πίνακας 28 Μέση τιμή TSS και VSS για κάθε Διαμέρισμα του PABR και για την εκροή του αντιδραστήρα κατά την διάρκεια των πειραματικών φάσεων του 2^{ου} Πειραματικού κύκλου.

Πειρ. Φάση	Διαμέρισμα Α		Διαμέρισμα Β		Διαμέρισμα Γ		Διαμέρισμα Δ		Εκροή	
	TSS (g/L)	VSS (g/L)	TSS (g/L)	VSS (g/L)	TSS (g/L)	VSS (g/L)	TSS (g/L)	VSS (g/L)	TSS (g/L)	VSS (g/L)
1 ^η	0,38	0,26	0,24	0,17	0,24	0,17	0,43	0,33	0,48	0,34
2 ^η	0,39	0,34	0,30	0,21	0,22	0,21	0,49	0,40	0,52	0,38
3 ^η	0,66	0,43	0,31	0,21	0,26	0,17	0,40	0,27	0,26	0,19
4 ^η	0,32	0,23	0,19	0,11	0,16	0,11	0,30	0,23	0,18	0,13

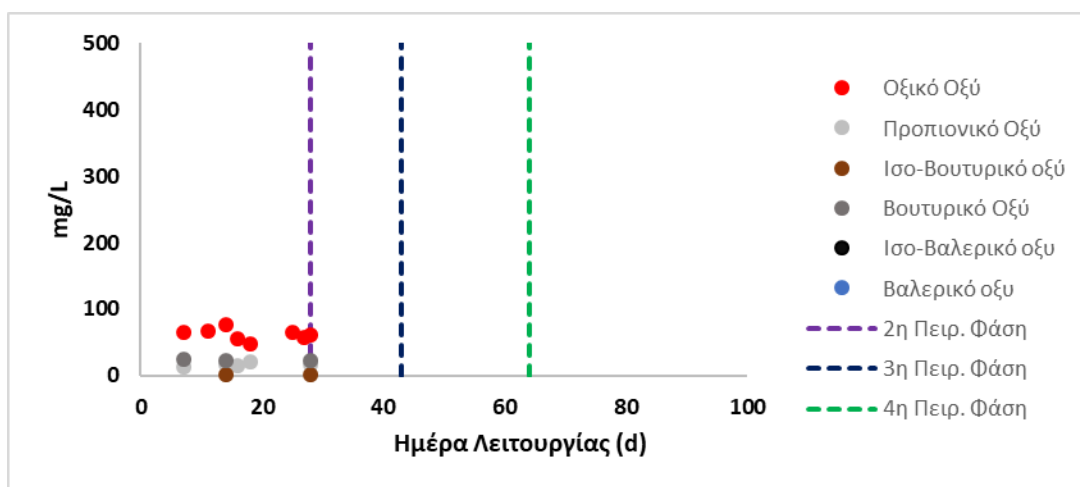
Όσον αφορά τα πτητικά λιπαρά οξέα κατά την πρώτη πειραματική φάση υψηλότερη συγκέντρωση παρουσιάζει το Διαμέρισμα Δ το οποίο αποτελεί Διαμέρισμα εκροής της διεργασίας. Όσο εξελίσσεται ο πειραματικός κύκλος η συγκέντρωση των VFAs αυξάνεται στο Διαμέρισμα Α το οποίο αποτελεί Διαμέρισμα τροφοδοσίας της διεργασίας και μειώνεται στα υπόλοιπα. Παρομοίως με τον 1^ο πειραματικό κύκλο κυρίαρχα πτητικά οξέα είναι το οξικό και το προπιονικό, με τα υπόλοιπα είτε να εντοπίζονται σποραδικά σε χαμηλές συγκεντρώσεις είτε να μην ανιχνεύονται καθόλου. Στα Σχήματα 37-40 παρουσιάζεται η συγκέντρωση των ανιχνευμένων πτητικών λιπαρών οξέων σε κάθε διαμέρισμα του PABR.



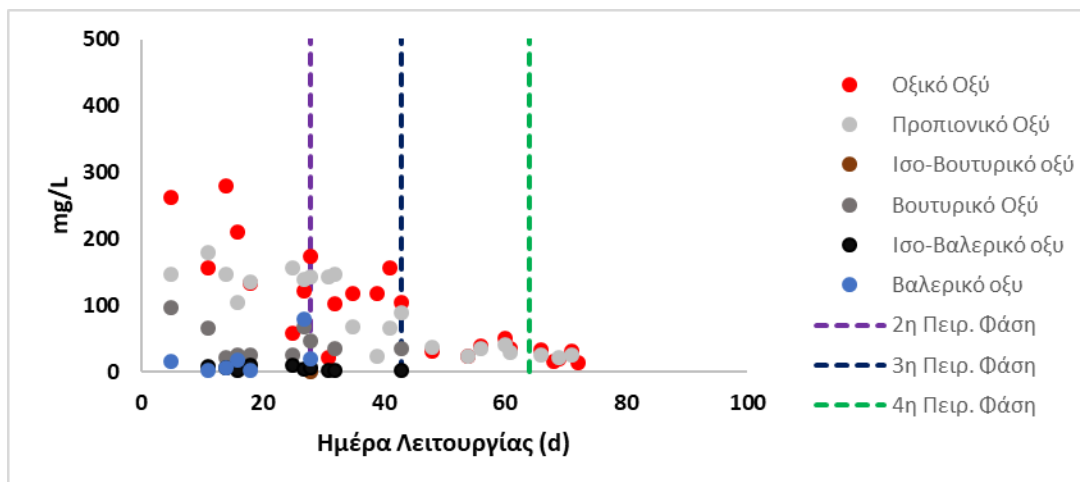
Σχήμα 37 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο διαμέρισμα Α του PABR κατά την διάρκεια του 2ου πειραματικού κύκλου



Σχήμα 38 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο διαμέρισμα Β του PABR κατά την διάρκεια του 2ου πειραματικού κύκλου



Σχήμα 39 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο διαμέρισμα Γ του PABR κατά την διάρκεια του 2ου πειραματικού κύκλου



Σχήμα 40 Συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο διαμέρισμα Δ του PABR κατά την διάρκεια του 2ου πειραματικού κύκλου

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο πειραματικών κύκλων εξάγεται το συμπέρασμα ότι, τόσο κατά την λειτουργία του PABR με επιβολή περιόδου εναλλαγής όσο και κατά την λειτουργία του χωρίς επιβολή περιόδου εναλλαγής, παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου όσο και ως προς την πιθανή ανάκτηση ενέργειας μέσω του παραγόμενου μεθανίου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τελευταία πειραματική φάση κάθε κύκλου όπου η τροφοδοσία προσομοιάζει τα χαρακτηριστικά του μίγματος FMSW condensate και synthetic Municipal Wastewater.

Ως προς το ενεργειακό υπόβαθρο της διεργασίας κατά την 6^η πειραματική φάση του 1^{ου} πειραματικού κύκλου η μέση παραγωγή μεθανίου έφτασε τα 26,5 L ημερησίως. Κατά την αντίστοιχη πειραματική φάση του 2^{ου} πειραματικού κύκλου η μέση ημερήσια παραγωγή μεθανίου αυξήθηκε και έφτασε τα 41,1 L. Στον 1^ο πειραματικό κύκλο η απομάκρυνση οργανικού φορτίου για τις πειραματικές φάσεις με χαμηλά HRT βρίσκεται σε ικανοποιητικά επίπεδα, παρουσιάζοντας όμως μείωση στην τελευταία πειραματική φάση, όπου η μέση ημερήσια απομάκρυνση COD ήταν 64,9 %. Παρόμοια συμπεριφορά επέδειξε και ο 2^{ος} πειραματικός κύκλος όπου η μέση ημερήσια απομάκρυνση οργανικού φορτίου ήταν 73,7%. Τόσο από ενεργειακής σκοπιάς όσο και από την πλευρά της απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου ο 2^{ος} πειραματικός κύκλος παρουσίασε βελτιωμένα αποτελέσματα. Επιπλέον κατά τη λειτουργία του χωρίς επιβολή περιόδου εναλλαγής ο αντιδραστήρας παρουσίασε μεγαλύτερη σταθερότητα ως προς την υδραυλική του συμπεριφορά. Η ταυτόχρονη μείωση της συχνότητας εναλλαγής που συνόδευε την μείωση του χρόνου παραμονής δημιουργούσε περιστασιακά προβλήματα στην ροή του αποβλήτου διαμέσου των διαμερισμάτων.

Με βάση τα συμπεράσματα που εξάγονται από την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε παραπάνω αποφασίστηκε η πειραματική φάση όπου ο αντιδραστήρας θα τροφοδοτηθεί με το μίγμα FMSW condensate και synthetic Municipal Wastewater να λειτουργήσει χωρίς την επιβολή περιόδου εναλλαγής.

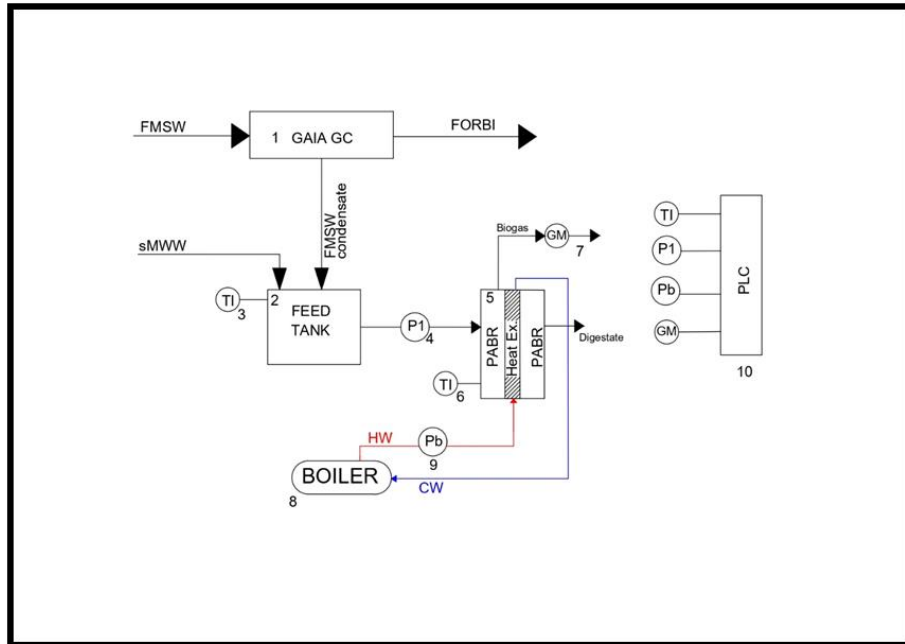
Αναερόβια Χώνευση μίγματος FMSW condensate – synthetic Municipal Wastewater

Ο αντιδραστήρας τροφοδοτήθηκε σε χρόνο παραμονής μίας ημέρας χωρίς την εφαρμογή περιόδου εναλλαγής. Η επιλογή των συγκεκριμένων παραμέτρων επιλέχθηκε με βάση την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του αντιδραστήρα σε διάφορες τιμές λειτουργικών παραμέτρων. Πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν πως για τον συγκεκριμένο τύπο αποβλήτων η λειτουργία με ΥΧΠ μία ημέρα και μη εφαρμογή περιόδου εναλλαγής παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά ως προς την παραγωγή βιο-μεθανίου και την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου. Το FMSW condensate συλλέχθηκε μέσω της ξήρανσης τροφικών υπολειμμάτων που συλλέχθηκαν με την βοήθεια του Δήμου Χαλανδρίου, ενώ το συνθετικό αστικό λύμα παρασκευαζόταν ημερησίως στο Εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στον Πίνακα 29 παρουσιάζονται οι λειτουργικές παράμετροι της διεργασίας και στο Σχήμα 41 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας καθώς και πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε. Στον Πίνακα 30 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της τελικής τροφοδοσίας του αντιδραστήρα και οι διακυμάνσεις τους.

Πίνακας 29 Λειτουργικές παράμετροι πειραματικής διεργασίας

Διάρκεια Πειραματικής Διαδικασίας	230 d
Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής HRT	1 d
Περίοδος Εναλλαγής T	-
Ρυθμός Οργανικής Φόρτισης OLR	1,035 (gCOD/L/d)
Μέση Θερμοκρασία Δοχείου Τροφοδοσίας	4 (°C)
Μέση Θερμοκρασία Διεργασίας	35 (°C)

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα ροής η διεργασία είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και ελέγχεται από μονάδα PLC. Κατά αυτόν τον τρόπο η διεργασία ελέγχεται πλήρως ώστε να μην υπάρχουν διακυμάνσεις και διαταραχές στις λειτουργικές παραμέτρους της. Η θερμοκρασία στον PABR διατηρείται σταθερή στους 35 °C με την βοήθεια ηλεκτρικού θερμαντήρα τύπου Boiler. Η τροφοδοσία συντηρείται σε σταθερή θερμοκρασία 4 °C σε δοχείο αποθήκευσης δυνατότητα ψύξης. Η παραγωγικότητα σε βιοαέριο ελέγχεται με την βοήθεια μετρητή αερίου (Σύστημα κλικογράφου).



Σχήμα 41 Διάγραμμα ροής διεργασίας. 1) Ξηραντήρας αποβλήτων τύπου GAIA GC 600. 2) Δοχείο αποθήκευσης τροφοδοσίας όγκου 120 L. 3) Ρυθμιστής Θερμοκρασίας δοχείου τροφοδοσίας. 4) Περισταλτική αντλία τροφοδότησης αντιδραστήρα. 5) Αντιδραστήρας PABR 77 L. 6) Θερμοστοιχείο ελέγχου θερμοκρασίας PABR. 7) Σύστημα μέτρησης παραγόμενου βιοαερίου. 8) Boiler. 9) Αντλία Ζεστού νερού. 10) Μονάδα PLC .

Πίνακας 30 Χαρακτηριστικά Τροφοδοσία PABR

Χαρακτηριστικά	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
COD mg/L	1035	86
TOC mg/L	408.7	11.25
TN mg/L	46.53	0.83
TP mg/L	4.5	0.1
pH	8,0	0,3
Alkalinity mg CaCO ₃ /L	1780	140
Οξικό Οξύ mg/L		
Προπιονικό οξύ mg/L		

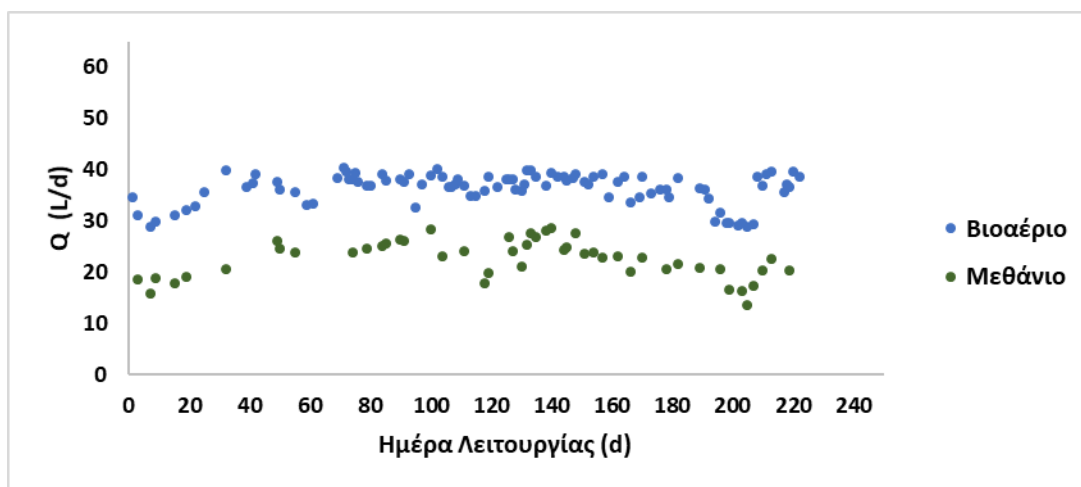
Η πειραματική μελέτη της διεργασίας παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου η οποία κυμάνθηκε στο ποσοστό του 94 % . Η απόδοση της διεργασίας λοιπόν ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου είναι ανάλογη της βιολογικής οξειδωσης χωρίς ωστόσο να καταναλώνεται το αντίστοιχο ποσοστό ενέργειας. Ωστόσο η απόδοση της διεργασίας ως προς την απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου ουσιών εξίσου επικίνδυνων περιβαλλοντικά με τον οργανικό άνθρακα, δεν είναι ικανοποιητική. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται συσσώρευση των δυο αυτών ουσιών στον αντιδραστήρα με αποτέλεσμα η εκροή του PABR να χρήζει περαιτέρω επεξεργασίας.

Σε αντίθεση με την βιολογική οξείδωση η αναερόβια χώνευση παρέχει και την δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας μέσω του βιο-μεθανίου που παράγεται. Η μέση παραγωγή μεθανίου για την διεργασία ανέρχεται στα 22,6 L/d. Η ποσότητα αυτή μεταφράζεται σε 0,29 L CH₄ ανά L επεξεργασμένου αποβλήτου. Η απόδοση της αναερόβιας χώνευσης ορίζεται επίσης με βάση τη μέγιστη θεωρητικά μετατροπή, η οποία ορίζεται ως η ποσότητα του μεθανίου που παράγεται εάν όλο το καταναλισκόμενο COD μετατρέπεται σε μεθάνιο. Με βάση το συγκεκριμένο μέγεθος η απόδοση της αναερόβιας χώνευσης υπολογίστηκε στο 86%, γεγονός που δείχνει ότι το μίγμα FMSW condensate/ συνθετικό αστικό λύμα αποτελεί κατάλληλη τροφοδοσία για την διεργασία. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της διεργασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 31 Στο Σχήμα 42 παρουσιάζεται η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και βιο-μεθανίου ενώ στο Σχήμα 43 η ημερήσια συγκέντρωση του οργανικού φορτίου στην τροφοδοσία και την εκροή του αντιδραστήρα.

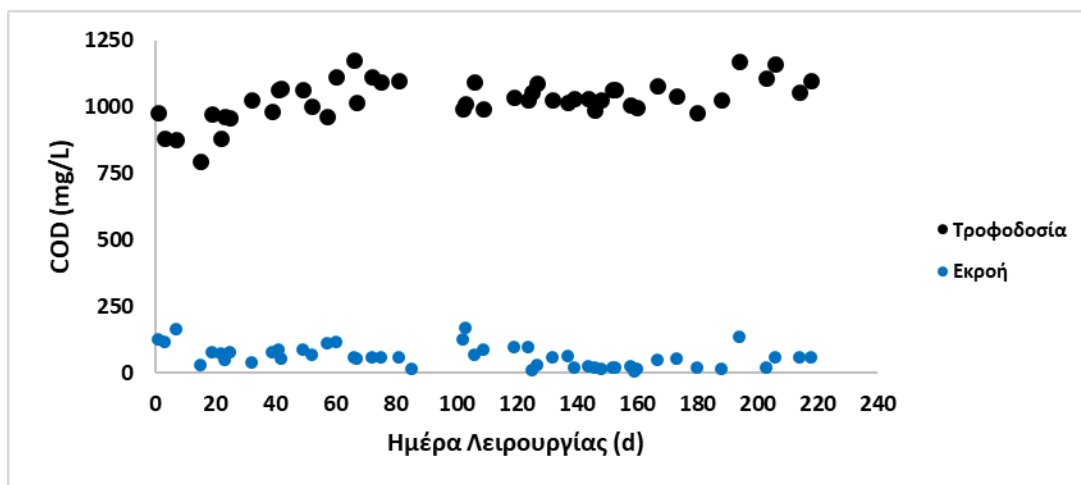
Πίνακας 31 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Αναερόβιας συν-Χώνευσης μίγματος FMSW condensate / sMWW σε ταχύρρυθμο αντιδραστήρα PABR.

Χαρακτηριστικά	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
Παραγωγή Βιοαερίου	36,3 L/d	3.1
Παραγωγή Μεθανίου	22.6 L/d	3.6
Ποσοστό Μεθανίου	63.1 %	6.5
Απόδοση Μεθανογένεσης	86%	12.0
Απομάκρυνση οργανικού φορτίου	94%	4.0
COD Εκροής	62,27 mg/L	39,8
TOC Εκροής	5.36 mg/L	1.42
TN Εκροής	57.96 mg/L	2.65
TP Εκροής	4.7 mg/L	0.23
pH Εκροής	7.41	0.21

Alkalinity mg CaCO ₃ /L Εκροής	1775 mg/L	257.3
TSS Εκροής g/L		
VSS Εκροής g/L		



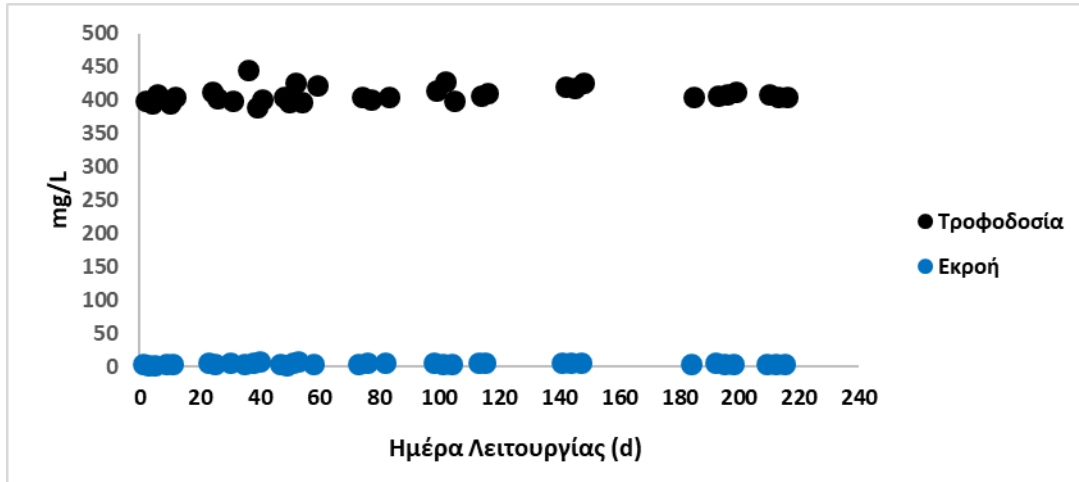
Σχήμα 42 Ημερήσια παραγωγή Βιοαερίου και Μεθανίου στον PABR



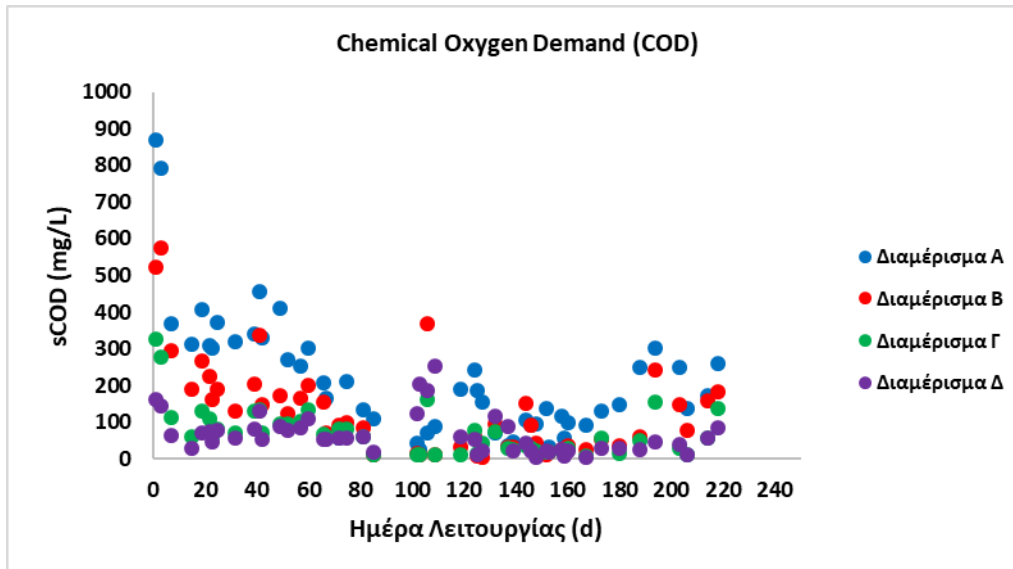
Σχήμα 43 Ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου στην τροφοδοσία και την εκροή του PABR σε μονάδες COD.

Είναι φανερό πως από τις πρώτες κιόλας μέρες της λειτουργίας η διεργασία παρουσιάζει ικανοποιητική συμπεριφορά ως προς την απομάκρυνση οργανικού φορτίου. Το ολικό COD της διεργασίας βρίσκεται

κάτω από το περιβαλλοντικό όριο των 120mg/L που ορίζει για τα λύματα η νομοθεσία. Η ανωτέρω μείωση του οργανικού φορτίου επιβεβαιώνεται και από τις μετρήσεις διαλυτού οργανικού άνθρακα σε μονάδες TOC (mg C/L) όπως φαίνεται στο Σχήμα 44. Η μέθοδος προσδιορισμού του TOC είναι καταλληλότερη και πιο αξιόπιστη για την συγκεκριμένη τάξη μεγέθους.

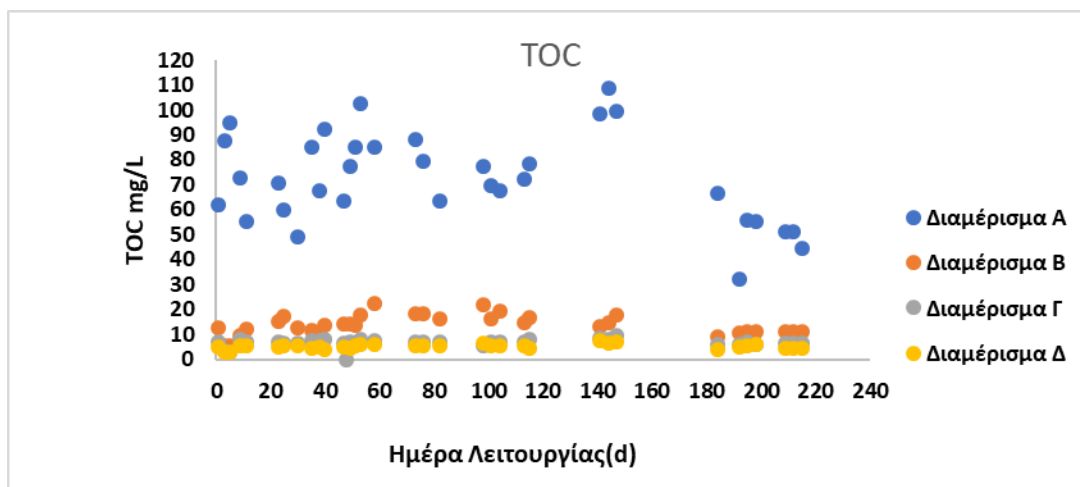


Σχήμα 44 Ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου στην τροφοδοσία και την εκροή του PABR σε μονάδες TOC.



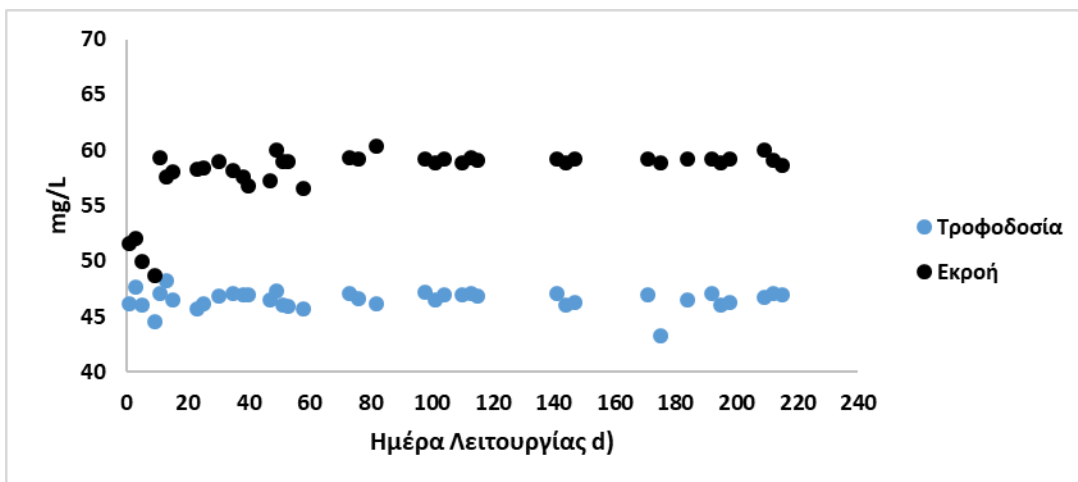
Σχήμα 45 Ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR σε μονάδες COD

Η κατανομή του οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR παρουσίαζε γραμμική μείωση από το διαμέρισμα τροφοδοσίας στο διαμέρισμα εκροής. Η συγκεκριμένη κατανομή διακρίνεται στο σχήμα 45 όπου φαίνεται η ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου σε μονάδες COD στον PABR καθώς και στο σχήμα 46 όπου παρουσιάζεται η αντίστοιχη συγκέντρωση σε μονάδες TOC.

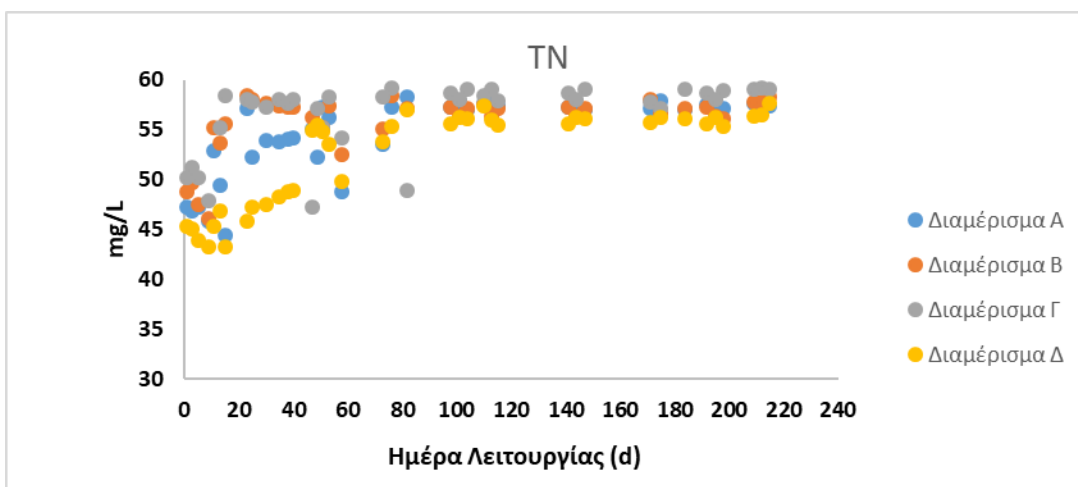


Σχήμα 46 Ημερήσια συγκέντρωση οργανικού φορτίου στα διαμερίσματα του PABR σε μονάδες TOC

Είναι προφανές πως η διεργασία παρουσιάζει ικανοποιητικά επίπεδα απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, εφόσον αυτών της βιολογικής οξειδωσης. Επιπλέον από την κατανομή της συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου στον PABR είναι αντιληπτό πως η ρεολογική του συμπεριφορά προσομοιάζει την αναμενόμενη. Ο PABR συμπεριφέρεται όπως ένας αντίστοιχος ABR αντιδραστήρας με τέσσερα διαδοχικά και διακριτά διαμερίσματα. Ωστόσο όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 18 καθώς και από το σχήμα 47 δεν συμβαίνει το ίδιο με την συγκέντρωση του ολικού αζώτου. Συγκεκριμένα το άζωτο είναι σχεδόν τετραπλάσιο του περιβαλλοντικού ορίου των 12mg/L και στο συντριπτικό του ποσοστό είναι αμμωνιακής φύσης. Επιπροσθέτως η διεργασία παρουσιάζει συσσώρευση αζώτου καθώς στον αντιδραστήρα εντοπίζονται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από ότι στην τροφοδοσία. Στο Σχήμα 48 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση αζώτου στα Διαμερίσματα του PABR.

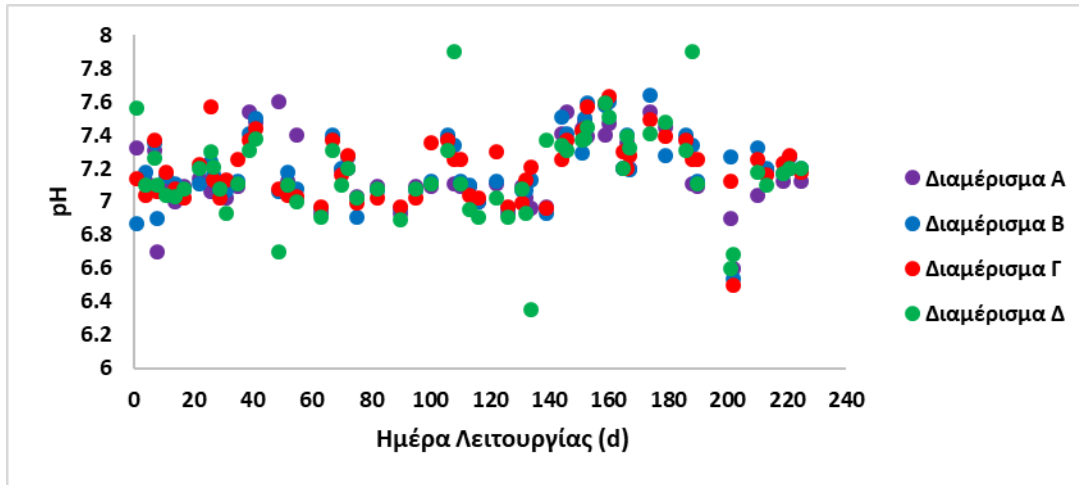


Σχήμα 47 Ημερήσια συγκέντρωση ολικού αζώτου στην τροφοδοσία και στην εκροή του PABR.



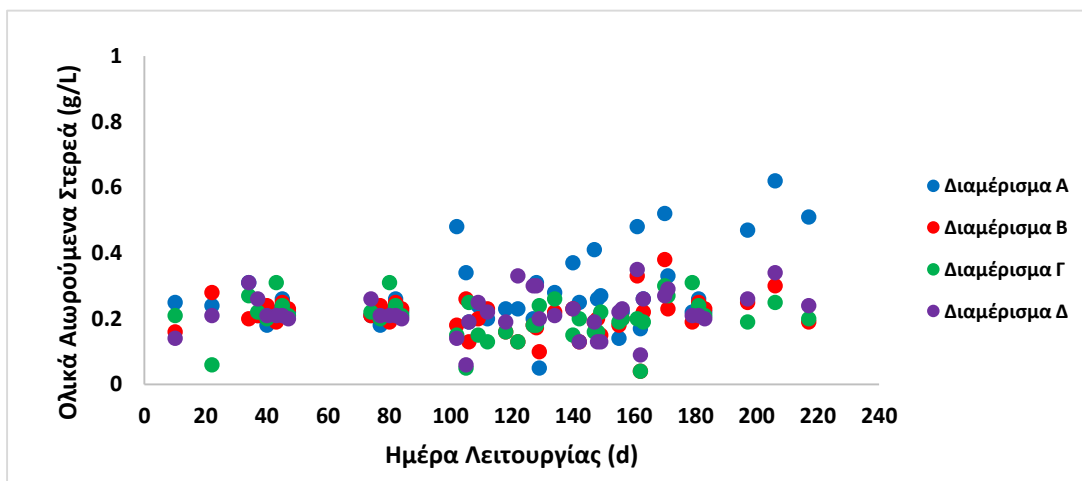
Σχήμα 48 Ημερήσια συγκέντρωση ολικού αζώτου στα διαμερίσματα του PABR.

Όπως και στους προηγούμενους πειραματικούς κύκλους το pH της διεργασίας παρουσίασε σταθερότητα χωρίς διακυμάνσεις. Η τιμή του pH παρέμεινε στο εύρος 7,0 – 7,5 καθ' όλη την πειραματική φάση. Η αλκαλικότητα της διεργασίας παρουσίασε τάση μείωσης κατά την πειραματική φάση, ωστόσο με κατάλληλη προσθήκη NaHCO_3 επανήλθε στα επιθυμητά επίπεδα. Στο Σχήμα 49 παρουσιάζεται η ημερήσια τιμή του pH στα διαμερίσματα του PABR. Η μέση τιμή του pH και της ολικής αλκαλικότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 32

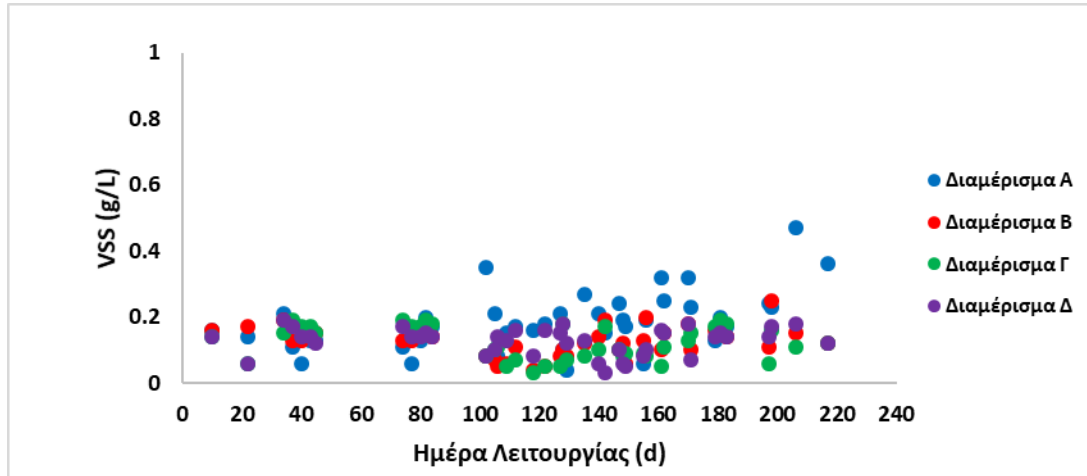


Σχήμα 49 Ημερήσια τιμή pH στα διαμερίσματα του PABR.

Η συγκέντρωση των ολικών και των πτητικών στερεών παρουσίασε παρόμοια συμπεριφορά με τον δεύτερο πειραματικό κύκλο. Οι διαφορές στην συγκέντρωση των στερεών ανάμεσα στα διαμερίσματα του PABR είναι εμφανής αλλά όχι ιδιαίτερα σημαντικές. Μια τάση που εμφανίστηκε κατά την περιγραφόμενη πειραματική διεργασία είναι η τάση αύξησης της συγκέντρωσης των στερεών στον 1^ο τη σειρά διαμέρισμα του PABR (Διαμέρισμα Α) σε σχέση με τα υπόλοιπα τρία διαμερίσματα. Η μέση συγκέντρωση TSS και VSS στα διαμερίσματα του PABR αναφέρεται στον Πίνακα 32. Στα Σχήματα 50 και 51 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών και πτητικών αιωρούμενων στερεών στα διαμερίσματα του PABR.

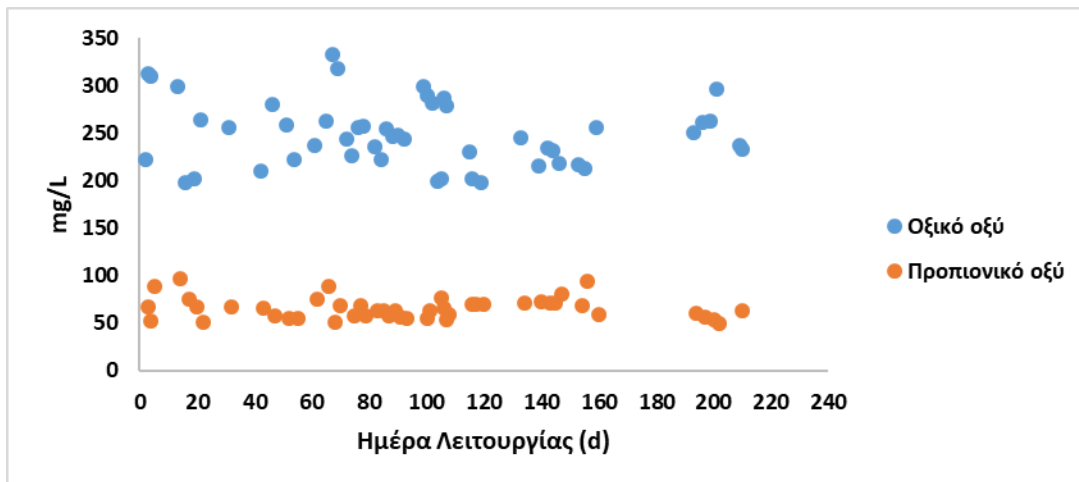


Σχήμα 50 Ημερήσια Συγκέντρωση Ολικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS) στα διαμερίσματα του PABR.

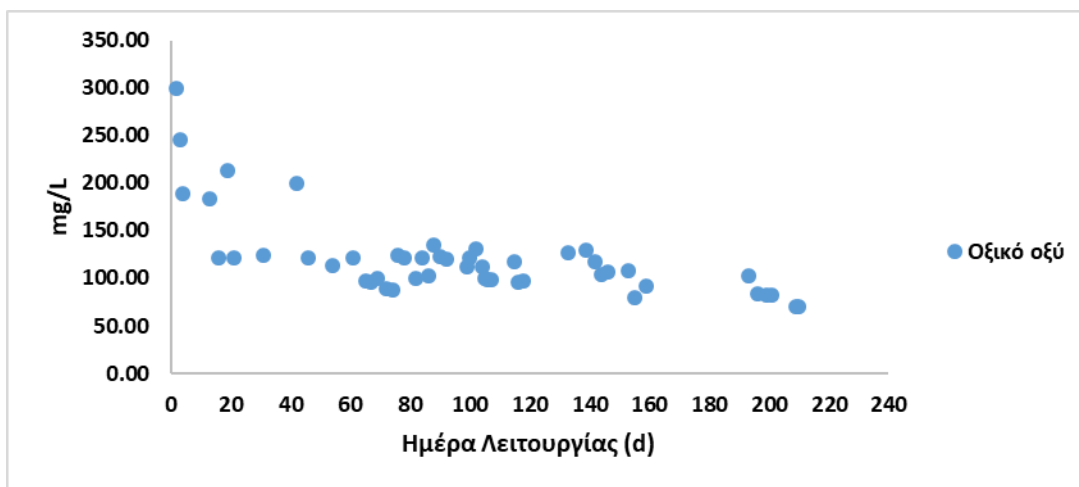


Σχήμα 51 Ημερήσια Συγκέντρωση Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών (VSS) στα διαμερίσματα του PABR

Κατά την διεργασία αναερόβιας χώνευσης μίγματος FMSW condensate και συνθετικού αστικού λύματος υπήρξε διαφοροποίηση σε σχέση με τους προηγούμενους πειραματικούς κύκλους που διεξήχθησαν ως προς την συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων. Αρχικά σε αυτή την πειραματική φάση υπάρχει ανίχνευση VFAs στην τροφοδοσία του PABR, τα οποία προέρχονται από την συμμετοχή του FMSW condensate σε αυτήν. Ωστόσο η συγκέντρωσή τους είναι σημαντικά χαμηλότερη λόγω της ανάμιξης με το συνθετικό αστικό απόβλητο. Επιπλέον σε αυτήν την πειραματική λειτουργία δεν ανιχνεύθηκαν VFAs στα διαμερίσματα του PABR, πέραν του 1^{ου} κατά σειρά εισόδου στον PABR διαμέρισμα. Στην τροφοδοσία του PABR ανιχνεύθηκαν οξικό και προπιονικό οξύ, με το οξικό να είναι κυρίαρχο ενώ στο 1^ο διαμέρισμα του PABR ανιχνεύθηκε μόνο οξικό οξύ. Στο Σχήμα 52 παρουσιάζεται η ημερήσια συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην τροφοδοσία του PABR, ενώ στο Σχήμα 53 η αντίστοιχη συγκέντρωση στο 1^ο διαμέρισμα του PABR.



Σχήμα 52 Ημερήσια συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στην τροφοδοσία του PABR.



Σχήμα 53 Ημερήσια συγκέντρωση πτητικών λιπαρών οξέων στο 1ο διαμέρισμα (Διαμέρισμα Α) του PABR.

Πίνακας 32 Μέση τιμή αναλυόμενων παραμέτρων στα διαμερίσματα του PABR.

	Διαμέρισμα Α	Διαμέρισμα Β	Διαμέρισμα Γ	Διαμέρισμα Δ
COD mg/L	217.8	128.6	70.0	64.8
TOC mg/L	72.7	13.9	6.8	5.1
TN mg/L	54.6	55.8	56.7	52.4

pH	7.2	7.2	7.1	7.2
Alkalinity mg/L	1974	1971	1976	1949
TSS g/L	0.35	0.28	0.27	0.29
VSS g/L	0.21	0.18	0.17	0.17
Acetic Acid mg/L	120.6	-	-	-

Τα αποτελέσματα που αντλήθηκαν από την πειραματική μελέτη της διεργασίας οδηγούν στο συμπέρασμα πως η διεργασία είναι κατάλληλη για την άμεση επεξεργασία του μίγματος FMSW condensate και αστικών λυμάτων. Συγκεκριμένα τόσο ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου και ως προς την παραγωγή μεθανίου το συγκεκριμένο μοντέλο διαχείρισης παρουσιάζει αισιόδοξα αποτελέσματα. Επιπλέον επιβεβαιώνεται ότι η υπάρχουσα τεχνολογία ταχύρρυθμων αναερόβιων συστημάτων είναι ικανή να αντικαταστήσει την βιολογική οξείδωση. Η διεργασία παρουσίασε σταθερότητα καθ' όλη την διάρκεια της.

Ωστόσο, η εκροή του PABR δεν αποτελεί ένα σταθεροποιημένο απόβλητο το οποίο μπορεί να απορριφθεί με ασφάλεια στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα το ολικό άζωτο της εκροής του PABR είναι σημαντικά υψηλότερο από το επιτρεπτό περιβαλλοντικό όριο. Επίσης ο ολικός φώσφορος στην εκροή του αντιδραστήρα είναι υπερδιπλάσιος από το επιτρεπτό όριο των 2,0 mg/L για αστικές περιοχές με έως και 10000 κατοίκους.

Παρ' όλα αυτά, αξίζει να αναφερθεί πως η απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου με βάση την υφιστάμενη διεργασία επεξεργασίας των αστικών λυμάτων δεν λαμβάνει χώρα στην δεξαμενή της βιολογικής οξείδωσης. Ειδικότερα για την ταυτόχρονη απομάκρυνση αζώτου, φωσφόρου και οργανικού άνθρακα είναι αναγκαία η ύπαρξη αναερόβιων, αερόβιων και ανοξικών συνθηκών. Συνεπώς η διεργασία που μελετήθηκε θα μπορούσε να συμβάλει στην μείωση της ενέργειας της βιολογικής οξείδωσης ένα δεχόταν ως υπόστρωμα ένα σημαντικό κλάσμα αστικών λυμάτων. Με αυτό τον τρόπο θα επιτευχθεί αντίστοιχη απομάκρυνση οργανικού φορτίου, με σαφώς χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

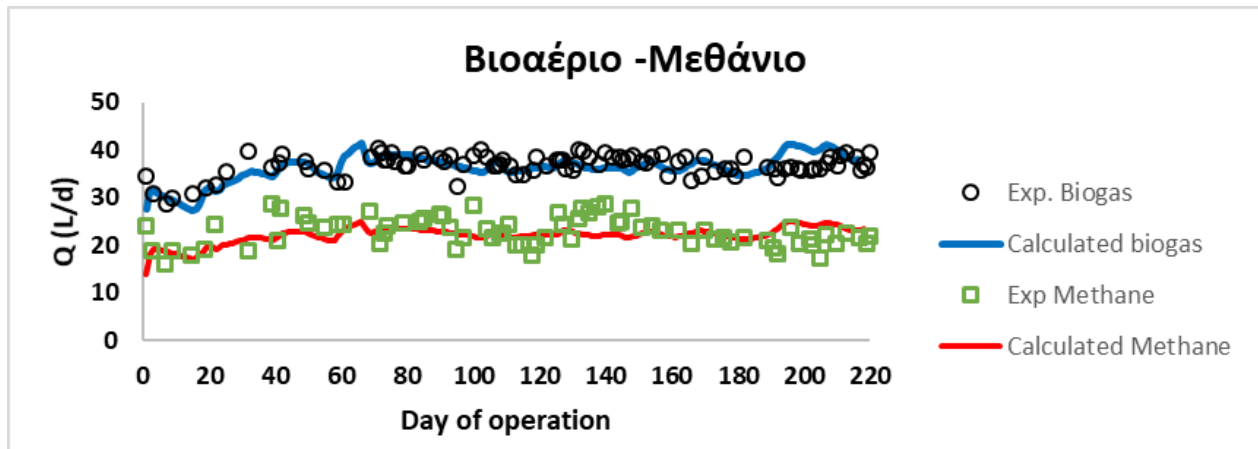
Για την ολοκλήρωση του προτεινόμενου πλάνου συν-διαχείρισης FMSW condensate και MWW προστίθεται στην έξοδο του συστήματος αναερόβιας χώνευσης μια διεργασία ταυτόχρονης απομάκρυνσης οργανικού φορτίου, αζώτου και φωσφόρου η οποία μελετάτε στην συνέχεια.

D3.2. Μοντέλο της διεργασίας της Αναερόβιας Χώνευσης

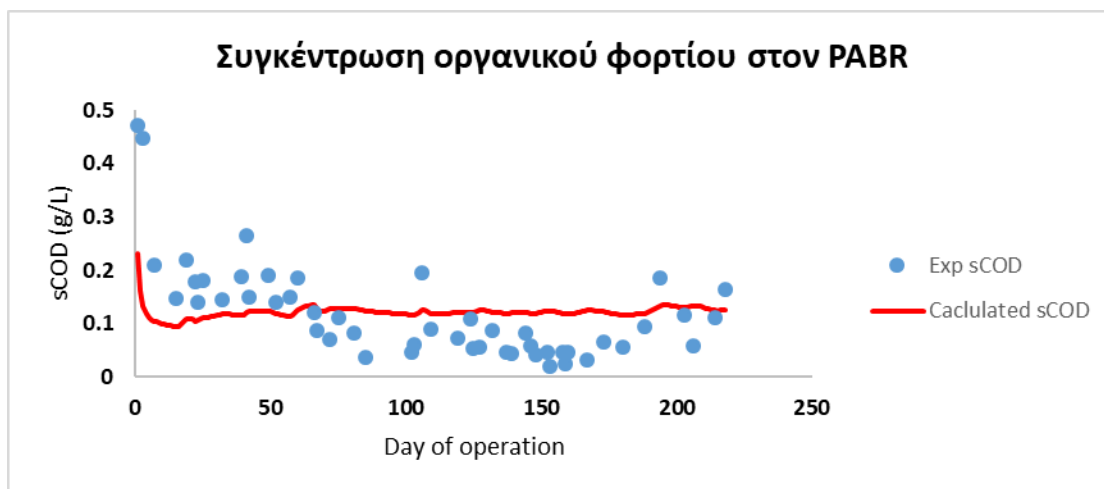
Παρακάτω παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της διεργασίας αναερόβιας συγχώνευσης συνθετικού αστικού λύματος και συμπυκνώματος τροφικών αποβλήτων σε ταχύρρυθμο αντιδραστήρα PABR με τη βοήθεια του λογισμικού Aquasim 2.0 και του υπολογιστικού μοντέλου ADM1.

Για την μοντελοποίηση της διεργασίας που μελετήθηκε πειραματικά χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό λογισμικό Aquasim 2.0. Στο λογισμικό εισήχθησαν οι παράμετροι που προβλέπει το μοντέλο Anaerobic Digestion Model 1 -ADM1. Το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης περιγράφει ικανοποιητικά την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης σε αντιδραστήρες πλήρους ανάμιξης τύπου CSTR. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το μοντέλο τροποποιήθηκε με την εισαγωγή της παραμέτρου tres_x. Η συγκεκριμένη παράμετρος εισάγεται για να προσεγγίσει την συμπεριφορά του PABR ως προς την κατακράτηση βιομάζας σε αντίθεση με τον συμβατικό αντιδραστήρα CSTR όπου η απομάκρυνση της βιομάζας είναι αμιγώς συνδεδεμένη με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής.

Το μοντέλο προσφέρει ικανοποιητική περιγραφή της διεργασίας τόσο ως προς την παραγωγή βιοαερίου όσο και ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου. Με την προσομοίωση των πειραματικών μετρήσεων κατά την διάρκεια της πειραματικής διεργασίας υπολογίζονται οι βέλτιστες τιμές των βιοχημικών σταθερών που περιγράφουν την διεργασία της αναερόβιας χώνευσης βάσει της κινητικής τύπου Monod. Στο Σχήμα 54 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και οι υπολογισμοί του μοντέλου για την παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου. Όπως παρατηρείται υπάρχει σημαντική προσέγγιση και για τις δυο παραμέτρους. Στο Σχήμα 55 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και τα αποτελέσματα του μοντέλου για το διαλυτό οργανικό φορτίο στον PABR όπου και πάλι υπάρχει ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 54 Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου και μεθανίου της διεργασίας.



Σχήμα 55 Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα ημερήσιας συγκέντρωσης διαλυτού οργανικού φορτίου στον PABR.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται κατανοητό πως η τροποποίηση του υπολογιστικού μοντέλου ADM1 μέσω της εισαγωγής της παραμέτρου $tres_x$ προσεγγίζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του PABR. Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης sCOD του αντιδραστήρα χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή της αντίστοιχης συγκέντρωσης των τεσσάρων διαμερισμάτων. Ουσιαστικά η υδραυλικά συμπεριφορά του αντιδραστήρα προσομοιάζεται με εκείνη ενός CSTR με την διαφοροποίηση της αύξησης του χρόνου παραμονής των στερεών σε αυτόν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Algapani D. E. et al., "Long-term bio-H₂ and bio-CH₄ production from food waste in a continuous two-stage system: Energy efficiency and conversion pathways," *Bioresour. Technol.*, vol. 248, pp. 204–213, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.05.164.
- Allen E., J. D. Browne, and J. D. Murphy, "Evaluation of the biomethane yield from anaerobic co-digestion of nitrogenous substrates," *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 34, no. 13–14, pp. 2059–2068, 2013, doi: 10.1080/09593330.2013.806564.
- Bachmann., "Comparision of fixed-film reactors with a modified sludge blanket reactor.," *Pollut. Technol. Rev.*, vol. 10, pp. 1–23, 1983.
- Clark R. M. (University of Missouri - Rolla and U. . Speece, R. E. (New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, "The pH Tolerance of Anaerobic Digestion," in 5th Internation Water Pollution Research Conference July -August 1970, 1970, pp. 11–27.
- Liu G., X. Xu, L. Zhu, S. Xing, and J. Chen, "Biological nutrient removal in a continuous anaerobic-aerobic-anoxic process treating synthetic domestic wastewater," *Chem. Eng. J.*, vol. 225, pp. 223–229, 2013, doi: 10.1016/j.cej.2013.01.098.
- Liu X., N. Ren, and Y. Yuan, "Performance of a periodic anaerobic baffled reactor fed on chinese traditional medicine industrial wastewater," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 104–110, 2009, doi: 10.1016/j.biortech.2008.06.007.
- Mathioudakis D., I. Michalopoulos, K. Kalogeropoulos, K. Papadopoulou, and G. Lyberatos, "Anaerobic digestion of dried/shredded food waste in a periodic anaerobic baffled reactor," *Water Sci. Technol.*, vol. 84, no. 2, pp. 420–430, 2021, doi: 10.2166/wst.2021.230.
- Mohan D., K. P. Singh, and V. K. Singh, "Wastewater treatment using low cost activated carbons derived from agricultural byproducts-A case study," *J. Hazard. Mater.*, vol. 152, no. 3, pp. 1045–1053, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.079.
- Skiadas G., I. V., Lyberatos, "The periodic anaerobic baffled reactor," *Water Sci. Technol.*, vol. 38(8–9), pp. 401–408, 1998.
- Solarte J. C. Toro, J. P. Mariscal Moreno, and B. H. Aristizábal Zuluaga, "Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio," *Rev. ION*, vol. 30, no. 1, pp. 105–116, 2017, doi: 10.18273/revion.v30n1-2017008.
- Sosnowski P., A. Wiczorek, and S. Ledakowicz, "Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes," *Adv. Environ. Res.*, vol. 7, no. 3, pp. 609–616, 2003, doi: 10.1016/S1093-0191(02)00049-7.
- Stamatelatou K., I. V. Skiadas, and G. Lyberatos, "On the behavior of the periodic anaerobic baffled reactor (PABR) during the transition from carbohydrate to protein-based feedings," *Bioresour. Technol.*, vol. 92, no. 3, pp. 321–326, 2004, doi: 10.1016/j.biortech.2003.09.006.

Tang Y. Q. et al., "Ethanol production from kitchen waste using the flocculating yeast *Saccharomyces cerevisiae* strain KF-7," *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, no. 11, pp. 1037–1045, 2008, doi: 10.1016/j.biombioe.2008.01.027.

Vavouraki A. I., E. M. Angelis, and M. Kornaros, "Optimization of thermo-chemical hydrolysis of kitchen wastes," *Waste Manag.*, vol. 33, no. 3, pp. 740–745, 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2012.07.012.

Zarkaliou A., C. Kougias, A. Mokou, K. Papadopoulou, and G. Lyberatos, "Anaerobic Digestion of Synthetic Municipal Wastewater (MWW) in a Periodic Anaerobic Baffled Reactor (PABR): Assessment of COD Removal and Biogas Production," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 24, pp. 1–14, 2022, doi: 10.3390/app122413037.

Zhang L., Y. W. Lee, and D. Jahng, "Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 8, pp. 5048–5059, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.01.082.

Λυμπεράτος, Γ. Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2016.