

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΜΕΘΑΝΙΟΥ ΑΠΟ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΧΩΝΕΥΣΗ ΠΡΟΞΗΡΑΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΩΝ ΤΡΟΦΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ (FORBI) ΣΕ ΤΑΧΥΡΡΥΘΜΟ ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟ ΧΩΝΕΥΤΗΡΑ ΜΕ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ

Δ. Μαθιουδάκης¹, Γ. Μιχαλόπουλος¹, Γ.Μ. Λύτρας¹, Κ. Καλογερόπουλος¹, Κ. Παπαδοπούλου^{1*},
Γ. Λυμπεράτος^{1,2}

¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

²Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής (ΙΤΕ-ΙΕΧΜΗ), Οδός Σταδίου, Πλατάνι, 26504, Ελλάδα
(*krapado@chemeng.ntua.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο Περιοδικός Αναερόβιος Χωνευτήρας με Ανακλαστήρες (Periodic Anaerobic Baffled Reactor, PABR), είναι ένας καινοτόμος ταχύρρυθμος βιοαντιδραστήρας, σχεδιασμένος ώστε να λειτουργεί υπό συνθήκες υψηλής οργανικής φόρτισης. Ο PABR είναι παρόμοιος με έναν απλό αντιδραστήρα με ανακλαστήρες (ABR), με τη διαφορά ότι τα διαμερίσματα του είναι τοποθετημένα σε κυκλική διάταξη. Εκτός από τον χρόνο παραμονής και την οργανική φόρτιση, μία βασική λειτουργική παράμετρος του PABR είναι η περίοδος εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας (T). Όταν η περίοδος εναλλαγής είναι υψηλή, η λειτουργία προσεγγίζει τη λειτουργία ενός απλού ABR, ενώ όταν είναι χαμηλή προσεγγίζεται η λειτουργία βιοαντιδραστήρα ανοδικής ροής τύπου UASB^[1]. Τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευθεί αρκετές εργασίες που περιγράφουν την αναερόβια χώνευση οργανικών υποστρωμάτων σε PABR ^[2-5].

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των λειτουργικών παραμέτρων του PABR, δηλαδή του υδραυλικού χρόνου παραμονής, της περιόδου εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας και του ρυθμού οργανικής φόρτισης στην παραγωγικότητα βιοαερίου που επιτυγχάνεται. Ως υπόστρωμα της διεργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα προϊόν βιομάζας που ονομάζεται FORBI (food residue biomass) και προέρχεται από ξήρανση και τεμαχισμό προδιαλεγμένων στην πηγή οικιακών τροφικών υπολειμμάτων ^[6].

Κατά την πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκαν εννέα διακριτοί πειραματικοί κύκλοι, κατά τους οποίους τροποποιούνταν διαδοχικά οι βασικές λειτουργικές παράμετροι του PABR. Πιο συγκεκριμένα, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής κυμάνθηκε από 9 έως 2,5 ημέρες, η περίοδος εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας από 2 έως 1 ημέρα και ο ρυθμός οργανικής φόρτισης από 1,24 gCOD/L_{bioreactor}*d έως 8,08 gCOD/L_{bioreactor}*d.

Η σύγκριση των πειραματικών κύκλων έδειξε ότι η μέγιστη παραγωγή μεθανίου ανά μονάδα τροφοδοτούμενων στερεών έφτασε στα 348 L_{CH4}/kg_{FORBI} και αντιστοιχεί στη λειτουργία του PABR με υδραυλικό χρόνο παραμονής 5 ημερών, ρυθμό οργανικής φόρτισης 2,14 gCOD/L_{bioreactor}*d και Περίοδο Εναλλαγής 2 ημερών. Παρεμφερή αποτελέσματα με 333 L_{CH4}/kg_{FORBI} παρατηρήσαμε και με αυξημένο ρυθμό οργανικής φόρτισης στα 4,53 gCOD/L_{bioreactor}*d (διατηρώντας σταθερό τον υδραυλικό χρόνο παραμονής και την περίοδο εναλλαγής), όπου αν και η παραγωγή βιοαερίου είναι μεγαλύτερη (531 L_{biogas}/kg_{FORBI} έναντι 500 L_{biogas}/kg_{FORBI}) η συγκέντρωση μεθανίου είναι χαμηλότερη (63% έναντι 69%).

Συμπερασματικά, ο PABR αποτελεί ένα ιδιαίτερα αποδοτικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης. Η παραγωγικότητα μεθανίου που επιτεύχθηκε είναι ιδιαίτερα υψηλή, γεγονός που οφείλεται τόσο στην καταλληλότητα του FORBI ως υπόστρωμα για την αναερόβια χώνευση όσο και στο ίδιο το σύστημα, δηλαδή στον PABR.

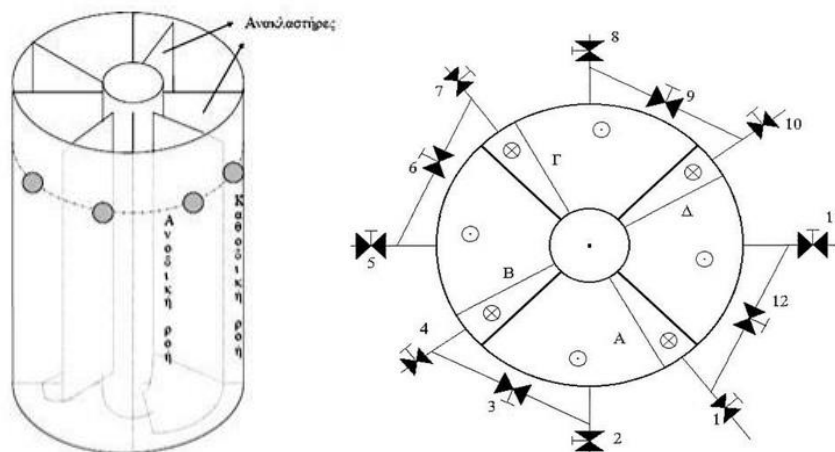
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανεξέλεγκτη διάθεση τεράστιων ποσοτήτων τροφικών υπολειμμάτων (TY) σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), θεωρείται από τους πλέον επιβαρυντικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, ενώ την ίδια στιγμή η πιθανή αξιοποίηση του πλούσιου σε

θρεπτικά συστατικά ρεύματος αυτού θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικά περιβαλλοντικά αλλά και οικονομικά οφέλη^[7]. Μεταξύ των εναλλακτικών διεργασιών αξιοποίησης των ΤΥ, η πιο διαδεδομένη είναι η Αναερόβια Χώνευση (ΑΧ)^[8].

Μέσω της ΑΧ των ΤΥ επιτυγχάνεται η εκτροπή τους από τους ΧΥΤΑ -και άρα η αποτροπή των συνεπαγόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων- αλλά και η ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας στη μορφή βιοαερίου^[9]. Τα τελευταία χρόνια έμφαση έχει δοθεί στην βελτιστοποίηση των διεργασιών ΑΧ με στόχο τη μεγιστοποίηση του περιβαλλοντικού οφέλους καθώς και την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους^[10]. Οι κρίσιμοι παράγοντες στην κατεύθυνση αυτή είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου/μεθανίου ανά ποσότητα υποστρώματος, καθώς και η ελαχιστοποίηση του υδραυλικού χρόνου παραμονής (Hydraulic Retention Time, HRT)^[11].

Ο αντιδραστήρας PABR (Periodic Anaerobic Baffled Reactor) αναπτύχθηκε από τους Λυμπεράτο και Σκιαδά^[1]. Είναι ένας ταχύρρυθμος, ευέλικτος αντιδραστήρας, ο οποίος μπορεί να επεξεργάζεται υψηλά οργανικά φορτία με μικρούς χρόνους παραμονής. Ο PABR αποτελείται από δύο (2) ομόκεντρους κυλίνδρους^[1], ο χώρος ανάμεσα στους οποίους χωρίζεται σε τέσσερα (4) διαμερίσματα (compartments), έτσι ώστε η διάταξή του να μοιάζει με αυτή του ΑΒΡ^[12], μόνο που τα διαμερίσματα βρίσκονται σε κυκλική διάταξη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Δομή Περιοδικού Αναερόβιου Χωνευτήρα με Ανακλαστήρες (Αριστερά: Η πρόσοψη, Δεξιά: Η κάτοψη του PABR)

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σκοπός της παρούσας ερευνητικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των βασικών λειτουργικών παραμέτρων (υδραυλικός χρόνος παραμονής, ρυθμός οργανικής φόρτισης, π εναλλαγής διαμερίσματος τροφοδοσίας) στην απόδοση της λειτουργίας του PABR, ως προς την παραγωγικότητα βιοαερίου ανά ποσότητα τροφοδοτούμενου υποστρώματος. Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκαν εννέα διακριτοί πειραματικοί κύκλοι, κατά τους οποίους τροποποιούνταν διαδοχικά οι βασικές λειτουργικές παράμετροι του PABR. Πιο συγκεκριμένα, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής κυμάνθηκε από 9 έως 2,5 ημέρες, Η περίοδος εναλλαγής του διαμερίσματος τροφοδοσίας μεταξύ 2 και 1 ημέρας, και ο ρυθμός οργανικής φόρτισης από 1,24 gCOD/L_{bioreactor} *d έως 8,08 gCOD/L_{bioreactor} *d. Σε κάθε πειραματικό κύκλο ελεγχόταν η επίδραση των τροποποιήσεων των λειτουργικών παραμέτρων ως προς την απόδοση του συστήματος.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η πειραματική διάταξη για την παραγωγή μεθανίου αποτελούσαν από έναν πιλοτικής κλίμακας PABR, ενεργού όγκου 77 L. Το σύστημα τροφοδοτούταν με αιώρημα FORBI, διαφορετικών συγκεντρώσεων (10-20 g/L). Καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας δείγματα από τα τέσσερα διαμερίσματα του αντιδραστήρα λαμβάνονταν από ειδικές βάνες δειγματοληψίας που βρίσκονταν στο μέσο του κάθε διαμερίσματος. Επίσης, λαμβάνονταν δείγματα από την

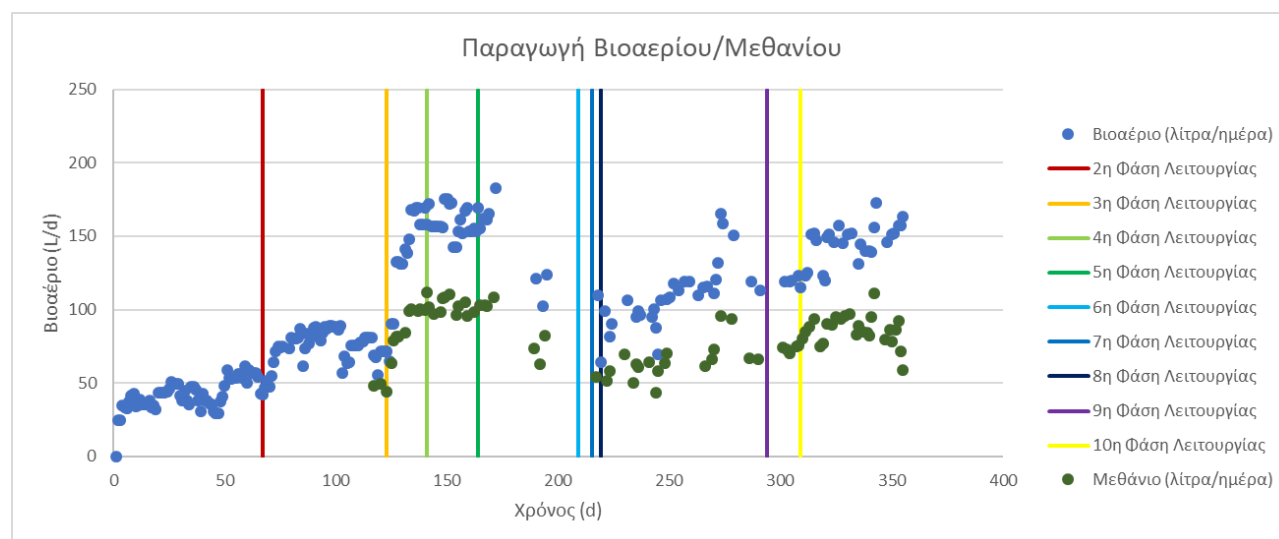
τροφοδοσία. Στα δείγματα αυτά πραγματοποιούνταν εργαστηριακές αναλύσεις για τον προσδιορισμό των ολικών και πτητικών αιωρούμενων στερεών (TSS, VSS), του ολικού και διαλυτού Χημικού Απαιτούμενου Οξυγόνου (tCOD, sCOD), του pH, της αλκαλικότητας και της συγκέντρωσης Πτητικών Λιπαρών Οξέων (VFAs). Επίσης, λαμβάνονταν δείγματα του παραγόμενου βιοαερίου και προσδιοριζόταν η συγκέντρωση του μεθανίου σε αυτό. Η ημερήσια ποσότητα βιοαερίου υπολογιζόταν βάσει μίας τεχνικής εκτόπισης λαδιού^[1]. Οι λειτουργικές παράμετροι του συστήματος, σε κάθε πειραματικό κύκλο παρουσιάζονται στον πίνακα 1:

Πίνακας 1. Λειτουργικές Παράμετροι PABR, 9 πειραματικοί κύκλοι

Λειτουργικές Παράμετροι/Πειραματικοί Κύκλοι	1 ^{ος}	2 ^{ος}	3 ^{ος}	4 ^{ος}	5 ^{ος}	6 ^{ος}	7 ^{ος}	8 ^{ος}	9 ^{ος}
Διάρκεια (ημέρες)	67	56	18	23	45	6	4	75	15
Υδραυλικός χρόνος παραμονής (ημέρες)	8.7	5	5	5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Περίοδος εναλλαγής (ημέρες)	2	2	2	1	2	2	1	1	1
TSin (g/L)	10	10	20	20	10	15	15	10	15
Μέσο tCOD τροφοδοσίας (g/L)	10.83	10.7	22.63	22.63	12.9	20.2	19.8	14.1	19.5
Ρυθμός οργανικής φόρτισης (gCOD/L*d)	1.24	2.14	4.53	4.53	5.16	8.08	7.92	5.64	7.80

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

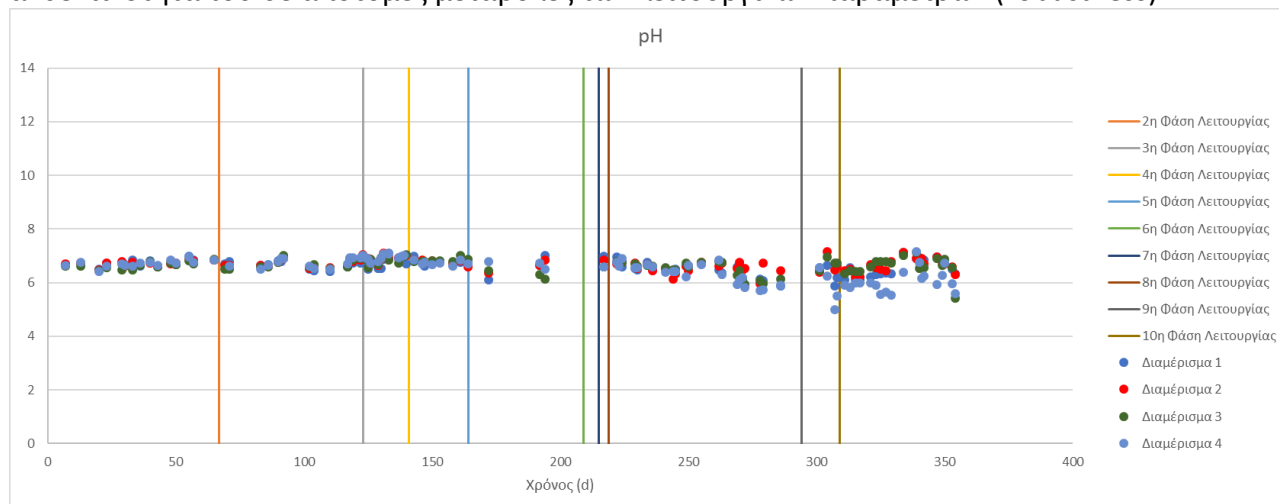
Ο PABR λειτούργησε συνεχόμενα, τροφοδοτούμενος με αιώρημα FORBI για 309 ημέρες. Κατά τους δύο πρώτους πειραματικούς κύκλους ο προσδιορισμός της σύστασης του μεθανίου δεν πραγματοποιούταν σε τακτική βάση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1. Η μέγιστη παραγωγικότητα βιοαερίου παρατηρείται κατά τον 3^ο και 4^ο πειραματικό κύκλο όπου και αγγίζει τα 531 και 517 λίτρα/κίλό_{FORBI} αντίστοιχα, ενώ η ποσότητα παραγόμενου μεθανίου είναι 333 και 325 λίτρα/κίλό_{FORBI} για τις δύο φάσεις, αντίστοιχα.



Σχήμα 1. Παραγωγή Βιοαερίου & Μεθανίου κατά τη διάρκεια των εννέα πειραματικών κύκλων.

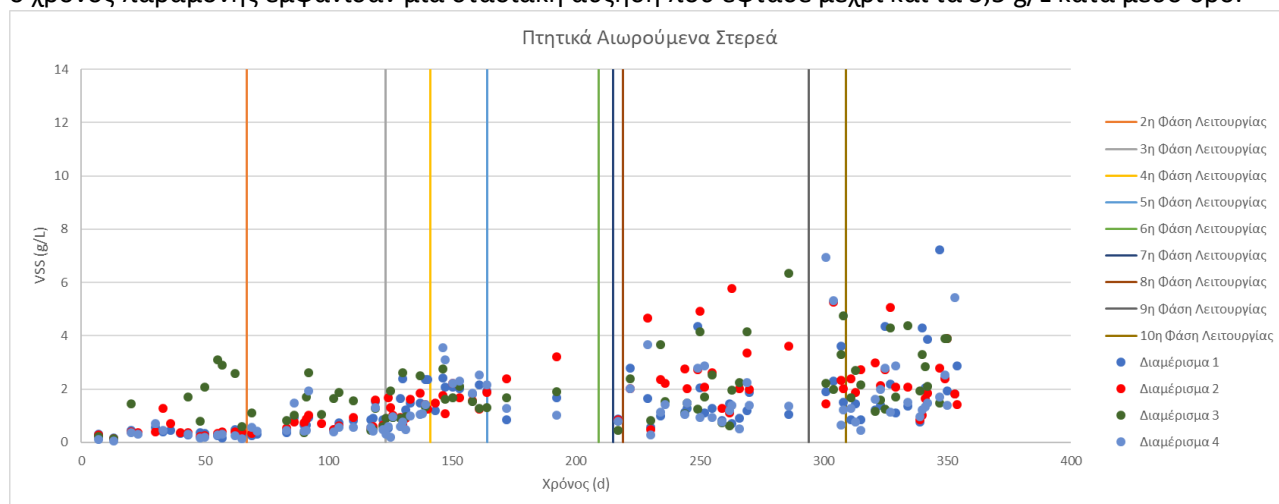
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, το pH και στα 4 διαμερίσματα του PABR διατηρήθηκε σταθερό καθ' όλη σχεδόν τη διάρκεια της λειτουργίας του. Η εμφανής πτώση του pH στο 4^ο διαμέρισμα μετά την 250^η ημέρα, οφείλεται σε υδραυλική δυσλειτουργία του συστήματος, ωστόσο φαίνεται ότι στη συνέχεια και μετά την 310^η ημέρα το pH κυμάνθηκε ξανά στα επιθυμητά όρια, χωρίς να πραγματοποιηθεί κάποια εξωτερική ρύθμιση του. Η σταθερότητα του pH αναδεικνύουν ένα από

τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου αντιδραστήρα που είναι η ανθεκτικότητα του σε απότομες μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων (robustness).



Σχήμα 2. Διακύμανση pH στα τέσσερα διαμερίσματα του PABR κατά τη διάρκεια των εννέα πειραματικών κύκλων.

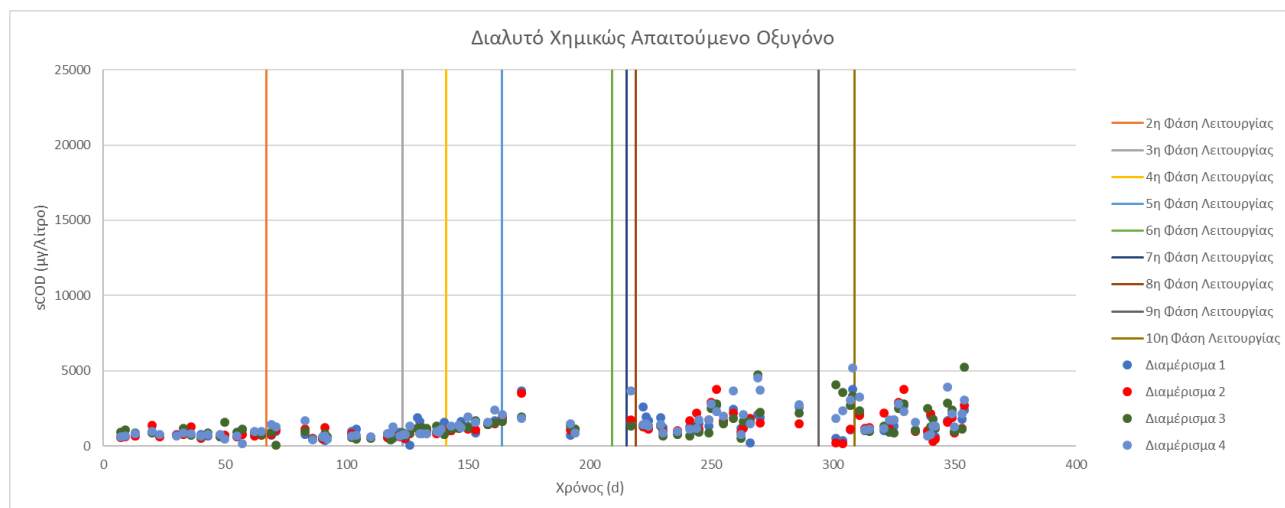
Τα Πτητικά Αιωρούμενα Στερεά κατά τους 5 πρώτους πειραματικούς κύκλους διατηρήθηκαν και για τα 4 διαμερίσματα σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, κάτω του 1,5 g/l, ενώ στη συνέχεια όταν και μειώθηκε σημαντικά ο χρόνος παραμονής εμφάνισαν μία σταδιακή αύξηση που έφτασε μέχρι και τα 3,5 g/L κατά μέσο όρο.



Σχήμα 3. Διακύμανση Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών στα τέσσερα διαμερίσματα του PABR κατά τη διάρκεια των εννέα πειραματικών κύκλων.

Παρόμοια τάση με αυτή των Πτητικών Αιωρούμενων Στερεών ακολούθησε και το Διαλυτό Χημικό Απαιτούμενο Οξυγόνο, διατηρούμενο σταθερό κάτω του 1 g/L κατά τους 5 πρώτους πειραματικούς κύκλους, ενώ στη συνέχεια ακολούθησε αυξητική τάση φτάνοντας μέχρι και τα 5 g/L (Σχήμα 4).

Τα Πτητικά Λυπαρά Οξέα διατηρήθηκαν σε σχεδόν μηδενικά επίπεδα κατά τη διάρκεια όλων των πειραματικών κύκλων.



Σχήμα 4. Διακύμανση Διαλυτού Χημικώς Απαιτούμενου Οξυγόνου στα τέσσερα διαμερίσματα του PABR κατά τη διάρκεια των εννέα πειραματικών κύκλων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά των διαφόρων πειραματικών φάσεων, καθώς και η απόδοση του συστήματος. Προκύπτει ότι κατά τον 3^ο πειραματικό κύκλο επιτεύχθηκαν τα βέλτιστα αποτελέσματα τόσο όσον αφορά στην παραγωγικότητα βιοαερίου όσο και στην απομάκρυνση του οργανικού φορτίου.

Πίνακας 1. Λειτουργικές Παράμετροι PABR, 9 πειραματικοί κύκλοι

	Κύκλος 1	Κύκλος 2	Κύκλος 3	Κύκλος 4	Κύκλος 5	Κύκλος 6	Κύκλος 7	Κύκλος 8	Κύκλος 9
Διάρκεια (ημέρες)	67	56	18	23	45	6	4	75	15
Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής	8.7	5	5	5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Περίοδος Εναλλαγής	2	2	2	1	2	2	1	1	1
Tsin (g/L)	10	10	20	20	10	15	15	10	15
Μέσο tCOD τροφοδοσίας (g/L)	10.83	10.7	22.63	22.63	12.9	20.2	19.8	14.1	19.5
Ρυθμός Οργανικής Φόρτισης (gCOD/L*d)	1.24	2.14	4.53	4.53	5.16	8.08	7.92	5.64	7.80
tCOD εκροής (g/L)	1.86	2.03	3.44	5.43	3.01	3.8	3.9	3.4	4.6
Απομάκρυνση tCOD (%)	86.4	80.5	85.6	74.3	76.7	81.2	80.3	75.9	76.4
Παραγωγικότητα βιοαερίου (L/L/d)	0.56	0.98	2.09	2.07	1.32	1.46	1.55	1.75	0.9
Παραγωγικότητα (L/kgFORBI)	484	500	531	517	330	243	258	438	150
%CH ₄	0.675	0.696	0.627	0.628	0.62	0.54	0.55	0.62	0.575
Παραγωγικότητα CH ₄ (L/kgFORBI)	327	348	333	325	205	131	142	271	86

Κατά την αναερόβια χώνευση στον ταχύρρυθμο PABR τόσο η παραγωγικότητα μεθανίου όσο και η απομάκρυνση οργανικού φορτίου διατηρήθηκαν σε σημαντικά υψηλότερα επίπεδα σε σύγκριση με κοινά συστήματα AX (CSTR) στα οποία χρησιμοποιήθηκε το ίδιο οργανικό υπόστρωμα. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη παραγωγή μεθανίου που είχε επιτευχθεί σε αντιδραστήρα τύπου CSTR άγγιζε τα 310 L/kg-FORBI, ενώ η απομάκρυνση οργανικού φορτίου ήταν επίσης σημαντικά χαμηλότερη φτάνοντας κατά το βέλτιστο στο 67%. Πολύ σημαντική ωστόσο ήταν και η ελαχιστοποίηση του Υδραυλικού Χρόνου Παραμονής μέχρι και τις 2.5 ημέρες τη στιγμή που σε συμβατικούς χωνευτήρες τύπου CSTR ο χρόνος παραμονής που απαιτούνταν ήταν της τάξης των 20 ημερών. Αυτό συνεπάγεται σημαντική εξοικονόμηση εφόσον επιτυγχάνεται η ίδια απόδοση με 8 φορές μικρότερο μέγεθος αντιδραστήρα,

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «Moving towards Life Cycle Thinking by integrating Advanced Waste Management Systems-[WASTE4THINK]», και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του Horizon 2020 (κωδικός έργου: 688995).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Skiadas, I.V., Lyberatos, G.: The periodic anaerobic baffled reactor. *Water Sci. Technology*. **38**, 401–408 (1998)
2. Michalopoulos, I., Chatzikonstantinou, D., Mathioudakis, D., Vaiopoulos, I., Tremouli, A., Georgiopolou, M., Papadopoulou, K., Lyberatos, G.: Valorization of the Liquid Fraction of a Mixture of Livestock Waste and Cheese Whey for Biogas Production Through High-rate Anaerobic Co-digestion and for Electricity Production in a Microbial Fuel Cell (MFC). *Waste and Biomass Valorization*. (2017). doi:10.1007/s12649-017-9974-1
3. Liu, X., Ren, N., Yuan, Y.: Performance of a periodic anaerobic baffled reactor fed on chinese traditional medicine industrial wastewater. *Bioresour. Technol.* **100**, 104–110 (2009). doi:10.1016/j.biortech.2008.06.007
4. Michalopoulos, I., Mathioudakis, D., Premetis, I., Michalakidi, S., Papadopoulou, K., Lyberatos, G.: Anaerobic Co-digestion in a Pilot-Scale Periodic Anaerobic Baffled Reactor (PABR) and Composting of Animal By-Products and Whey. *Waste and Biomass Valorization*. (2017). doi:10.1007/s12649-017-0155-z
5. Skiadas, I. V, Gavala, H.N., Lyberatos, G.: Modelling of the periodic anaerobic baffled reactor (PABR) based on the retaining factor concept. *Water Res.* **34**, 3725–3736 (2000). doi:https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00137-8
6. WASTE4Think: WASTE4Think, Moving towards Life cycle Thinking by integrating Advanced Waste Management Systems. 2015–2016 (2015)
7. Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., Tan, T.: Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **38**, 383–392 (2014). doi:10.1016/j.rser.2014.05.038
8. Michalopoulos, I., Lytras, G.M., Papadopoulou, K., Goumenos, A., Zacharopoulos, I., Lytras, C., Lyberatos, G.: Hydrogen and Methane Production from Food Residue Biomass Product (FORBI). In: 15th International Conference on Environmental Science and Technology. pp. 1–5 (2017)
9. Carlsson, M., Naroznova, I., Møller, J., Scheutz, C., Lagerkvist, A.: Resources , Conservation and Recycling Importance of food waste pre-treatment efficiency for global warming potential in life cycle assessment of anaerobic digestion systems. "Resources, Conserv. Recycl. **102**, 58–66 (2015). doi:10.1016/j.resconrec.2015.06.012
10. Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., Lu, X.: Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **76**, 1485–1496 (2017). doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184
11. Chiu, S.L.H., Lo, I.M.C.: Reviewing the anaerobic digestion and co-digestion process of food waste from the perspectives on biogas production performance and environmental impacts. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **24**, 24435–24450 (2016). doi:10.1007/s11356-016-7159-2
12. Grobicki, A., Stuckey, D.C.: Hydrodynamic characteristics of the anaerobic baffled reactor. *Water Res.* **26**, 371–378 (1992). doi:https://doi.org/10.1016/0043-1354(92)90034-2