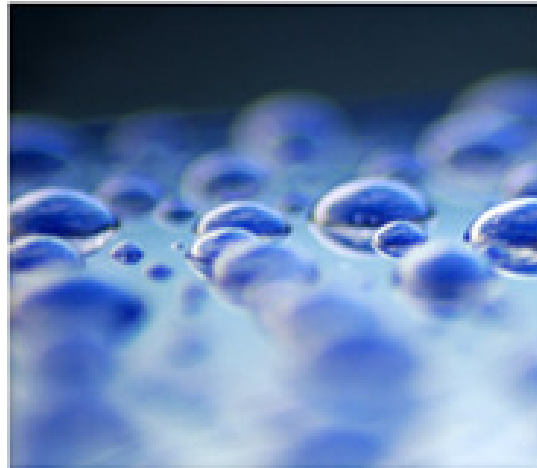


Νιτροποίηση υγρών αστικών αποβλήτων με χρήση εγκλωβισμένων νιτροποιητών

Ζουρνάς Απόστολος

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος



Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	4
1.1	ΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗ	6
1.1.1	Παράγοντες που επηρεάζουν στη Νιτροποίηση	7
1.1.2	Στοιχειομετρία της νιτροποίησης	12
1.1.3	Κινητικές της νιτροποίησης	14
1.2	ΑΠΟΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗ	16
1.2.1	Στοιχειομετρία της απονιτροποίησης.....	17
1.3	Συστήματα Νιτροποίησης - Απονιτροποίησης	18
1.3.1	Αιωρούμενη Βιομάζα.....	18
1.3.2	Ακίνητοποιημένη Βιομάζα.....	18
1.4	Στόχος της εργασίας	21
1.5	Περιγραφή μεθόδων	22
1.5.1	Παρασκευή Standard Solution.....	22
1.5.2	Μέτρηση αμμωνιακών (Μέθοδος Nessler)	23
1.5.3	Μέτρηση COD	24
1.5.4	Μέτρηση νιτρικών.....	24
1.5.5	Κροκίδωση λύματος.....	24
1.5.6	Υπολογισμός της ειδικής ενεργότητας μικροοργανισμών	25
1.6	Πειραματικές διατάξεις και αναλώσιμα.....	26
1.6.1	Βιοαντιραστήρας διαλείποντος έργου (BATCH).....	26
1.6.2	Συνεχής βιοαντιδραστήρας πλήρους ανάμειξης (CSTB)	27
1.6.3	27

1.7	Πειραματική διαδικασία.....	28
1.7.1	1 ^ο μέρος: Νιτροποίηση συνθετικού αποβλήτου	28
1.7.2	2 ^ο μέρος: Νιτροποίηση πραγματικού αποβλήτου.....	32
2	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	34
2.1	1 ^ο μέρος: Νιτροποίηση συνθετικού λύματος	34
2.1.1	Αντιδραστήρας BATCH.....	34
2.1.2	Αντιδραστήρας CSTR.....	36
2.2	42
2.3	42
2.4	2 ^ο μέρος: Νιτροποίηση πραγματικού λύματος:	43
3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	53
3.1	Νιτροποίηση συνθετικού λύματος	53
3.1.1	Βιοαντιδραστήρας διαλείποντος έργου (BATCH).....	53
3.1.2	Βιοαντιδραστήρας συνεχούς ροής πλήρους ανάμειξης (CSTB)	54
3.2	Νιτροποίηση φυσικού λύματος.....	55
4	Συμπεράσματα-Προτάσεις	56
5	Βιβλιογραφία.....	57
6	Δημοσιεύσεις.....	58

1 Εισαγωγή

Άζωτο περιέχεται σε αστικά και βιομηχανικά λύματα κυρίως ως αμμωνιακό άζωτο και οργανικό άζωτο. Οργανικό άζωτο περιέχεται στα αμινοξέα, καθώς και στο ριβονουκλεϊκό οξύ και στο δεοξυριβονουκλεϊκό οξύ. Τα παραπάνω αν αποσυντεθούν δίνουν αμμωνιακά. Η αμμωνία και τα αμμωνιακά είναι τοξικά στα οικοσυστήματα λιμνών ποταμών και θαλασσών, και ιδιαίτερα στις ανώτερες μορφές ζωής, όπως τα ψάρια. Επιπλέον το άζωτο ευνοεί την ανάπτυξη φυτικών οργανισμών, όπως φύκη και μικροάλγη, η οποία αν γίνει ανεξέλεγκτα, οδηγεί στο φαινόμενο του ευτροφισμού, δηλαδή την υπερβολική κατανάλωση οξυγόνου κατά τη φυτική αναπνοή, και θάνατο των υπόλοιπων αερόβιων μορφών ζωής του οικοσυστήματος. Ένα παρόμοιο φαινόμενο είναι η διαδικασία της νιτροποίησης, η οποία αν λάβει χώρα σε κάποιο οικοσύστημα, καταναλώνει μεγάλα ποσά οξυγόνου, με αποτέλεσμα την μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό. Κατά την παραπάνω διαδικασία, την νιτροποίηση, τα αμμωνιακά μετατρέπονται σε νιτρικά, τα οποία είναι και αυτά τοξικά για τους υδρόβιους οργανισμούς.

Τα παραπάνω έχουν οδηγήσει τα τελευταία χρόνια την επεξεργασία λυμάτων προς την κατεύθυνση της διαχείρισης του αζώτου, με στόχο την ελαχιστοποίηση του στους τελικούς αποδέκτες (λίμνες, ποτάμια, θάλασσες, και υπόγειους υδροφορείς). Αυτό γίνεται μέσω των διαδικασιών της νιτροποίησης και της απονιτροποίησης κατά τη διεργασία των λυμάτων σε βιολογικούς καθαρισμούς, διαδικασίες οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.

1.1 ΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗ

Νιτροποίηση ονομάζεται η διαδικασία οξείδωσης αμμωνιακού αζώτου NH_4^+ αρχικά σε NO_2^- και στη συνέχεια σε NO_3^- . Παρ' ότι η νιτροποίηση έχει βρεθεί να γίνεται και από ετερότροφους μικροοργανισμούς, στο περιβάλλον γίνεται ως επί το πλείστον από αυτότροφους μικροοργανισμούς οξείδωσης αμμωνιακών προς νιτρικά, οι οποίοι ονομάζονται νιτροποιητές. Οι νιτροποιητές βρίσκονται σε πληθώρα στο χώμα, σε νερά (θαλάσσια και μη), και σε ιζήματα. Όπως η απομάκρυνση BOD, έτσι και η νιτροποίηση μπορεί να επιτευχθεί σε βιολογικές διεργασίες αιωρούμενης και προσκολλημένης βιομάζας. Τα συστήματα αιωρούμενης βιομάζας διακρίνονται σε μονά και διπλά συστήματα. Στα μονά συστήματα η απομάκρυνση BOD και η νιτροποίηση γίνονται σε μια δεξαμενή, με μια δεξαμενή καθίζησης, ενώ στα διπλά απαιτούνται δυο αντιδραστήρες, με δυο δεξαμενές καθίζησης, και πιο συγκεκριμένα η απομάκρυνση του BOD γίνεται πριν την νιτροποίηση λόγω της πιθανής παρεμπόδισης των ετερότροφων μικροοργανισμών στους νιτροποιητές. (George Tsobanoglous 2006)

Η νιτροποίηση, όπως φαίνεται από τα παραπάνω γίνεται σε δυο στάδια: αμμωνιακά σε νιτρώδη, και νιτρώδη σε νιτρικά. Τα δυο στάδια αυτά εκτελούνται από δυο διαφορετικές ομάδες μικροοργανισμών, τα Nitroso-βακτήρια και τα Nitro-βακτήρια. Τα Nitroso-βακτήρια οξειδώνουν τα αμμωνιακά σε νιτρώδη, και τα Nitro-βακτήρια ολοκληρώνουν την οξείδωση από νιτρώδη σε νιτρικά (Εξίσωση 1). Τα πιο σημαντικά γένη των προαναφερθέντων ομάδων είναι τα *Nitrosomonas* και τα *Nitrobacter*.



Τα νιτρικά μπορούν να καταναλωθούν από τους απονιτροποιητές και να μετατραπούν σε αέριο άζωτο, το οποίο απομακρύνεται από τα λύματα. Τα νιτροποιητικά βακτήρια είναι χημειολιθότροφα (προσλαμβάνουν την απαιτούμενη για την ανάπτυξη τους ενέργεια από την οξείδωση ανόργανων ενώσεων και άνθρακα από CO_2 – η αφομοίωση του οποίου γίνεται με τον κύκλο του Calvin) (Sediak 1991). Ο χρόνος διπλασιασμού των νιτροποιητών είναι, πολύ μεγαλύτερος από αυτόν των ετερότροφων μικροοργανισμών. (Knowles 1982, Sediak 1991, Χατζικωνσταντίνου 2001)

1.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν στη Νιτροποίηση

1.1.1.1 Διαλυμένο οξυγόνο

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι πάρα πολύ βασική για την νιτροποίηση, καθώς το οξυγόνο είναι πολύ βασικό συστατικό για την κυτταρική αναπνοή. Παρακάτω περιγράφεται η σχέση της ανάπτυξης των μικροοργανισμών με τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου, η οποία είναι μια σχέση τύπου Monod. Η σταθερά ημικορεσμού του οξυγόνου (K_{DO}) κυμαίνεται σε ένα πολύ ευρύ φάσμα τιμών, σύμφωνα με την EPA (B.L. Mechals 1970) από 0,15 έως 2,0 mg/l. Ένα τόσο μεγάλο εύρος τιμών δημιουργεί αμφιβολίες για το κατά πόσο οποιαδήποτε τιμή μέσα σε αυτό το φάσμα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε καθορισμένες συνθήκες. Μια τόσο έντονη διακύμανση των τιμών αποδίδεται στις διαφορετικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της σταθεράς, αλλά και στους περιοριστικούς παράγοντες για τη διάχυση του οξυγόνου, όπως για παράδειγμα στο εσωτερικό των βιοκροκιδωμάτων, και ιδίως σε αυτά που έχουν μεγάλο μέγεθος, τις φορτίσεις σε ουσίες τις οποίες καταναλώνουν άλλα είδη μικροοργανισμών, κ.α.

1.1.1.2 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι πλέον σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη των νιτροποιητών, ενώ παίζει καθοριστικό ρόλο και στις τιμές των σταθερών κορεσμού. Από πειράματα που έχουν γίνει, φαίνεται ότι οι βέλτιστη θερμοκρασία για τους νιτροποιητές κυμαίνεται κάπου ανάμεσα στους 28°C και στους 36°C.

Έχει υπολογιστεί πειραματικά ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των νιτροποιητών σε σχέση με τη θερμοκρασία ακολουθεί μια εξίσωση τύπου Arrhenius:

$$\mu_{Tm} = \mu_{15m} \cdot e^{[K \cdot (T-15)]} \quad \text{Εξ.2}$$

Όπου

μ_{Tm} και μ_{15m} ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των νιτροποιητών σε θερμοκρασίες T και 15°C σε d⁻¹

K = η σταθερά θερμοκρασίας σε °C⁻¹

Η επίδραση της θερμοκρασίας μπορεί να εκφραστεί και με μια άλλη σχέση, το λόγο του μέγιστου ειδικού ρυθμού ανάπτυξης για μια θερμοκρασία προς το μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης για 10 °C χαμηλότερα :

$$Q_{10} = \frac{\mu_{(T+10)m}}{\mu_{Tm}} \quad \text{Εξ.3}$$

Έχουν υπολογιστεί (Knowles 1965) ότι για το *Nitrosomonas*, σε ποτάμια και καθαρές καλλιέργειες, $K=0.095$ °C⁻¹, με T ανάμεσα σε 8 °C και 30 °C με $\mu_{15m}=0,47$ d⁻¹ και $Q_{10}=2.59$. Για την ανάπτυξη σε ενεργό ιλύ υπολογίστηκαν $K=0.095$ °C⁻¹, με T ανάμεσα σε 8 °C και 30 °C με $\mu_{15m}=0,18$ d⁻¹ και $Q_{10}=3,32$. Για το *Nitrobacter*,

υπολογίστηκε το $K=0,059 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Βάση του εγχειριδίου Nutrient Control (W.P.F.C. 1983) ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης για θερμοκρασίες $10 \text{ } ^\circ\text{C}$, $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ και $30 \text{ } ^\circ\text{C}$, είναι 0,30, 0.65, και 1.2 d^{-1} αντίστοιχα.

Από τη θερμοκρασία εξαρτώνται και οι σταθερές κορεσμού του οξυγόνου, αλλά και της τροφής των μικροοργανισμών. Παρακάτω παρουσιάζονται σχέσεις συνάρτησης σταθερών κορεσμού για το Nitrosomonas και το Nitrobacter.

Nitrosomonas:

$$K_{NS,T} = K_{NS,15} \cdot e^{[0.118 \cdot (T-15)]} \quad \text{Εξ.4}$$

$$K_{NS,15} = 0.405 \quad \text{Εξ.5}$$

Nitrobacter

$$K_{NB,T} = K_{NB,15} \cdot e^{[0.146 \cdot (T-15)]} \quad \text{Εξ.6}$$

$$K_{NB,15} = 0.625 \quad \text{Εξ.7}$$

Οι παραπάνω σχέσεις δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν παρά μόνο για μια θεωρητική εκτίμηση της επίδρασης της θερμοκρασίας, λόγω της ποικίλης σύστασης των αποβλήτων, και των παρεμποδιστικών ουσιών που μπορεί να υπάρχουν στο λύμα, και άρα η πραγματική επίδραση της θερμοκρασίας πρέπει κάθε φορά να υπολογίζεται πειραματικά. Στην πράξη, η επίδραση της θερμοκρασίας εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως για παράδειγμα το pH. Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι η ευαισθησία των νιτροποιητών αυξάνεται όσο η πιο απότομα γίνονται οι αλλαγές. Αυτό σημαίνει ότι ακαριαίες αλλαγές θερμοκρασίας επηρεάζουν περισσότερο τα βακτήρια από σταδιακές αλλαγές.

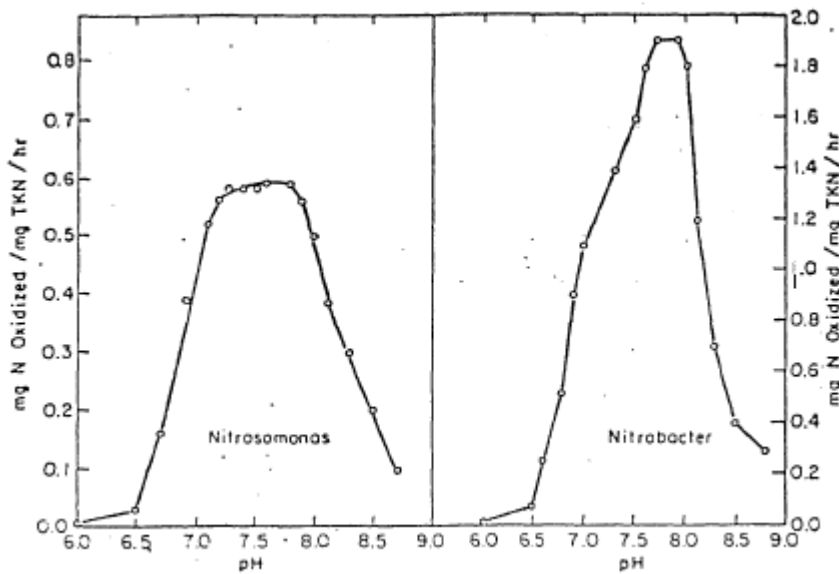
1.1.1.3 pH

Σε μία εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων τα βασικά είδη μικροοργανισμών είναι οι ετερότροφοι μικροοργανισμοί, οι νιτροποιητές και απονιτροποιητές.

Οι ετερότροφοι είναι σχετικά ανθεκτικοί στις μεταβολές του pH εκατέρωθεν της ουδετερότητας ενώ μέσω της κατανάλωσης του οργανικού φορτίου παράγουν CO_2 το οποίο διαλύεται στο νερό σχηματίζοντας

H_2CO_3 , το οποίο με τη σειρά του παράγει HCO_3^- και αυτό με τη σειρά του CO_3^{2-} . Οι πιο πάνω ενώσεις δημιουργούν ρυθμιστικό διάλυμα (δηλαδή διάλυμα ανθεκτικό σε μεταβολές του pH), με συνέπεια να διατηρείται το κατάλληλο περιβάλλον για την ανάπτυξη ετερότροφων.

Οι νιτροποιητές, σε αντίθεση με τους ετερότροφους, είναι ευαίσθητοι στις αλλαγές του pH, και δεν έχουν κάποιο μηχανισμό σταθεροποίησης του. Επιπροσθέτως, μέσω του μεταβολισμού τους καταναλώνουν αλκαλικότητα (το συγκεκριμένο θέμα αναλύεται παρακάτω), με αποτέλεσμα το pH να έχει την τάση να κατεβαίνει. Έτσι πρέπει συνήθως να προστίθεται κάποια βασική ουσία, προκειμένου να διατηρήσουμε την απόδοση της νιτροποίησης σε επιθυμητά επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα, για pH μικρότερα του 6 και μεγαλύτερα του 9 η νιτροποίηση είναι πρακτικά μηδενική. Από το 6 και μέχρι το 7 περίπου η δραστηριότητα των *Nitrosomonas* παρουσιάζει έντονη αύξηση, από το 7 μέχρι το 8, ελαφριά αύξηση, και από το 8 και προς τα βασικά pH αυτή μειώνεται αισθητά. Τα *Nitrobacter* ανάλογα παρουσιάζουν αύξηση της δραστηριότητας τους από pH 6 έως 7.5, σταθερή δραστηριότητα για pH 7.5 με 8 και μείωση από το 8 και σε πιο αλκαλικά pH.



Διάγραμμα 1 Επίδραση του pH στην δραστηριότητα των νιτροποιητών σε εμπλουτισμένες καλλιέργειες (C.P. Leslie Grady 1999)

Το Σχήμα 1 δείχνει την επίδραση του pH στην δραστηριότητα των νιτροποιητών σε εμπλουτισμένες καλλιέργειες. Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι τις καλύτερες συνθήκες λειτουργίας επιτυγχάνουμε για pH 7.5 με 8. (C.P. Leslie Grady 1999). Πρέπει να επισημάνουμε ότι η επίδραση του pH στη λειτουργία των νιτροποιητών εξαρτάται και από τη θερμοκρασία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Το pH επιδρά στην νιτροποίηση λόγω του εξής μηχανισμού: Το pH στο κυτταρόπλασμα των μικροοργανισμών τείνει να παραμένει σταθερό και κοντά στο ουδέτερο. Όταν το pH του κυτταροπλάσματος των νιτροποιητών είναι χαμηλότερο από το pH του εξωτερικού, τότε η ελεύθερη αμμωνία NH_3 διαπερνά την κυτταρική μεμβράνη, και η ιονισμένη αμμωνία NH_4^+ παραμένει εκτός του κυττάρου. Ανάλογα, Όταν το pH του εσωτερικού των νιτροποιητών είναι χαμηλότερο από το pH του εξωτερικού, τότε το ελεύθερο νιτρώδες οξύ διαπερνά την κυτταρική μεμβράνη, ενώ το νιτρώδες ιόν NO_2^- παραμένει εκτός του κυττάρου. Αυτή ακριβώς η ικανότητα των NH_3 και HNO_2 να διαπερνούν στο εσωτερικό του κυττάρου είναι που καθιστά τις ουσίες αυτές παρεμποδιστικές σε μεγάλες συγκεντρώσεις. (Anthonisen 1976) Ταυτόχρονα, αυτές οι ουσίες αποτελούν και την τροφή των νιτροποιητών (*Nitrosomonas* και *Nitrobacter* αντίστοιχα), με αποτέλεσμα αυτές οι ουσίες να έχουν διττό ρόλο στη νιτροποίηση, και να πρέπει να παρακολουθείται η συγκέντρωσή τους για τη σωστή λειτουργία της νιτροποίησης. Η ισορροπία αυτών των ουσιών εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία, τόσο και από το pH. (Mitchell 1992)

1.1.1.4 Παρεμποδιστικές ουσίες

Η διαδικασία της νιτροποίησης μπορεί να αναχαιτιστεί από πολλές οργανικές και ανόργανες ουσίες, καθώς και από την παρουσία και τη συγκέντρωση άλλων μικροοργανισμών, ετερότροφων αλλά και αυτότροφων. Οι (Udo Pagga 2006) μελετήσανε την ανάσχεση της νιτροποίησης από ουσίες συχνά εμφανιζόμενες σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, όπως μεθανόλη, ακετόνη, χλωροφαινολών, ψευδαργύρου κ.α. σε διάφορες συγκεντρώσεις, με ταυτόχρονη ανάσχεση αναπνοής. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα αποτελέσματά τους.

Comparison of the inhibition of nitrification in different tests with the heterotrophic inhibition of respiration

Chemical	ISO 9509 Inhibition of nitrate formation EC ₅₀ (mg l ⁻¹)	ISO 9509 Inhibition of ammonium transformation EC ₅₀ (mg l ⁻¹)	ISO 8192 Inhibition of autotrophic respiration 30 min EC ₅₀ (mg l ⁻¹)	ISO 8192 Inhibition of autotrophic respiration 180 min EC ₅₀ (mg l ⁻¹)	ISO 8192 Inhibition of heterotrophic respiration EC ₅₀ (mg l ⁻¹)
Acetone	>500	>500			
Allylthiourea	0.4	0.5	0.7	0.6	
Bentazon	>100	>100	>100	>100	>100
1H-Benzotriazole	1,6	1			
Chloridazon	>100	>100	>100		>100
3-Chlorophenol	0.9				10–100
4-Chlorophenol	0.5	0.5	0.5		<1
L-2-Chloropropionic acid isobutyl ester	>100	>100	>100		>100
2-Chloromandelonitrile	<1	<1	<1	<1	10–50
2,3-Dichlorophenol	0.09				100–200
2,4-Dichlorophenol	0.15				50–100
2,5-Dichlorophenol	0.38				50–100
3,4-Dichlorophenol	0.8				10–50
3,5-Dichlorophenol	2	4.4	3	2.5	10–50
3,4-Dimethylpyrazolephosphate (DMPP)	0.5	0.7	1.3	0.7	50–100
Ethanol	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
L-Hstidin			14		>100
Imidazole	6.2	5.6	2.1	13	>100
Indole	8.7	6.7	8.3		>50
Methanol	>1000	300	150		>500
N-Methylaniline	1.2	0.9	2	3.4	>100
Sodiumcyanide			0,4		1–5
Nitrobenzene	56	78	<10	50	>100
Phenol	0.8	1	0.4	0.5	>100
Pyrazole	0.16	0.2	0.1		>10
Pyrrole	3	2			
Thioacetamide	0.2		0.4		>5
Thiourea	0.3	0.2	0.1		>5
Zn ²⁺	200	320	380	220	500–1000

Πίνακας 1 Σύγκριση της αναστολής της νιτροποίησης για διάφορα πειράματα, με αναπνευστική αναστολή ετερότροφων οργανισμών

1.1.2 Στοιχειομετρία της νιτροποίησης

Ενεργειακά η οξείδωση της αμμωνίας προς νιτρικά σε δυο στάδια έχει ως ακολούθως:

Nitrosomonas:



Nitrobacter:



Ολική αντίδραση οξείδωση:

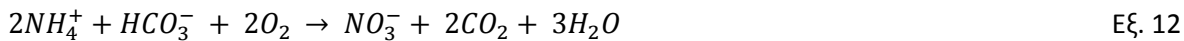


Οι νιτροποιητές μέσω του μεταβολισμού τους κατεβάζουν το pH του διαλείμματος, με αποτέλεσμα να απαιτείται κατανάλωση αλκαλικότητας προκειμένου οι συνθήκες λειτουργίας να είναι βοηθητικές για αυτούς. Συνήθως, λόγω του χαμηλού ρυθμού ανάπτυξης των νιτροποιητών, η αλκαλικότητα που προστίθεται στο διάλυμα μέσω της διάλυσης CO₂ από την ατμόσφαιρα είναι επαρκής. Ορισμένες φορές παρόλα αυτά απαιτείται η προσθήκη χημικών όπως ανθρακικού νατρίου.

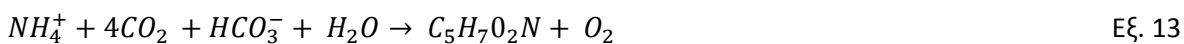
Η προσθήκη αλκαλικότητας στο διάλειμμα περιγράφεται από την παρακάτω χημική αντίδραση:



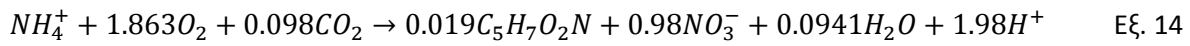
Η αλκαλικότητα που απαιτείται για την παραπάνω αντίδραση μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:



Ενώ η αντίδραση σύνθεσης βιομάζας δίνεται από την εξίσωση 13.:



Η συνολική αντίδραση που λαμβάνει χώρα κατά τη νιτροποίηση είναι η εξής:



Στην εξίσωση 14 οι όροι της εξίσωσης δεν ισοδυναμούν επακριβώς, αλλά το σφάλμα της στρογγυλοποίησης είναι επαρκώς μικρό, ώστε να θεωρηθεί αμελητέο. Από τα παραπάνω μπορεί να εκπονηθεί το συμπέρασμα ότι για κάθε g αμμωνιακού αζώτου (ως N) που μετατρέπεται, καταναλώνονται 4.25 g O₂, σχηματίζονται 0.16 g νέων κυττάρων, απομακρύνονται 7.07 g αλκαλικότητας ως CaCO₃ και χρησιμοποιούνται 0.08 g ανόργανου άνθρακα για το σχηματισμό νέων κυττάρων. (George Tsobanoglous 2006)

1.1.3 Κινητικές της νιτροποίησης

Κινητικές ονομάζονται οι σχέσεις οι οποίες περιγράφουν το ρυθμό ανάπτυξης των μικροοργανισμών και κατανάλωσης υποστρώματος, συναρτήσει του χρόνου. Συγκεκριμένα, Οι κινητικές ανάπτυξης τύπου Monod μπορούν να εκφράσουν με ακρίβεια τον ειδικό ρυθμό ανάπτυξης, για ένα συγκεκριμένο βακτήριο, συναρτήσει της συγκέντρωσης του υποστρώματος, με μια μόνο μορφή υποστρώματος, η συγκέντρωση του οποίου μάλιστα αποτελεί περιοριστικό παράγοντα ανάπτυξης. (Εξ. 15).

$$\mu_n = \left(\frac{\mu_{nm}S}{K_n+S} \right) - k_{dn} \quad \text{Εξ. 15}$$

Όπου:

μ_n = ειδικός ρυθμός ανάπτυξης του εξεταζόμενου μικροοργανισμού (g νέων κυττάρων / g κυττάρων *d)

μ_{nm} = μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης του εξεταζόμενου μικροοργανισμού (g νέων κυττάρων / gκυττάρων *d)

S= συγκέντρωση της συγκεκριμένης τροφής που καταναλώνουν τα βακτηρίδια (g/m³)

K_s = σταθερά ημιταχύτητας, η συγκέντρωση του υποστρώματος (τροφής) όταν $\mu_n/\mu_{nm} = 0.5$ (g/m³)

k_{dn} = συντελεστής ενδογενούς αποσύνθεσης για τους μικροοργανισμούς (gVSS/gVSS *d)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι εξισώσεις για τα Nitrosomonas και τα Nitrobacter γράφονται ως εξής:

Nitrosomonas

$$\mu_{n_{NS}} = \left(\frac{\mu_{nm_{NS}} [NH_4^+ - N]}{K_{n_{NS}} + [NH_4^+ - N]} \right) - k_{dn_{NS}} \quad \text{Εξ. 16}$$

Nitrobacter

$$\mu_{n_{NB}} = \left(\frac{\mu_{nm_{NB}} [NO_2^- - N]}{K_{n_{NB}} + [NO_2^- - N]} \right) - k_{dn_{NB}} \quad \text{Εξ. 17}$$

Πολύ βασικό ρόλο στην ανάπτυξη των νιτροποιητών παίζει η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου. Αυτό παρατηρείται, και μέσω του ότι οι κατά τα άλλα πλήρεις εξισώσεις 16 και 17, μετατρέπονται στις εξισώσεις 18 και 19 αντίστοιχα, για μεγάλες συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου.

Nitrosomonas

$$\mu_{n_{NS}} = \left(\frac{\mu_{nm_{NS}} [NH_4^+ - N]}{K_{n_{NS}} + [NH_4^+ - N]} \right) \cdot \left(\frac{DO}{K_0 + DO} \right) - k_{dn_{NS}} \quad \text{Εξ. 18}$$

Nitrobacter

$$\mu_{n_{NB}} = \left(\frac{\mu_{nm_{NB}} [NO_2^- - N]}{K_{n_{NB}} + [NO_2^- - N]} \right) \cdot \left(\frac{DO}{K_0 + DO} \right) - k_{dn_{NB}} \quad \text{εξ. 19}$$

(C.P. Leslie Grady 1999)

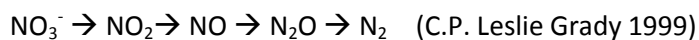
1.2 ΑΠΟΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗ

Απονιτροποίηση ονομάζεται η αναγωγή των νιτρικών σε οξειδία του αζώτου, υποοξειδία του αζώτου με τελικό προϊόν αέριο άζωτο. Η απομάκρυνση του αζώτου σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων γίνεται με συνδυασμό νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Κατά την επεξεργασία λυμάτων η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση λαμβάνουν χώρα ως βιολογικές διεργασίες, λόγω της καλής της απόδοσης και του μικρού της κόστους. (George Tsofanoglous 2006)

Ορισμένα από τα βακτήρια που υπάρχουν υπό φυσιολογικές συνθήκες στα απόβλητα είναι ικανά να εκτελέσουν την απονιτροποίηση, όπως για παράδειγμα τα *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Aerobacter*, *Bacillus* κ.α. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η δημιουργία βιομάζας απονιτροποιητικών μικροοργανισμών να είναι μια σχετικά εύκολη διαδικασία, σε μια πληθώρα περιβαλλοντικών συνθηκών.

Οι απονιτροποιητές μπορούν να χρησιμοποιήσουν το διαλυμένο οξυγόνο στο λύμα ως τελικό δέκτη ηλεκτρονίων κατά την οξειδωση οργανικών ενώσεων, αλλά σε συνθήκες απουσίας αυτού χρησιμοποιούν το οξυγόνο των νιτρικών και των νιτρωδών, τα οποία αντικαθιστούν το διαλυμένο οξυγόνο στην μοριακή αναπνοή. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται μη αφομοιωτική. Η διαφορά αφομοιωτικής και μη αφομοιωτικής, είναι ότι κατά την πρώτη οι απονιτροποιητές μετατρέπουν νιτρικά σε αμμωνιακά για την κάλυψη των αναγκών της σύνθεσης νέας βιομάζας. Η αφομοιωτική μετατροπή των νιτρικών λαμβάνει χώρα μόνο αν τα νιτρικά είναι η μοναδική πηγή οξυγόνου στο διάλυμα.

Κατά την απονιτροποίηση τα νιτρικά μετατρέπονται σε νιτρώδη, τα οποία με τη σειρά τους γίνονται μονοοξείδιο του αζώτου, υποοξείδιο του αζώτου και τελικά αέριο άζωτο.



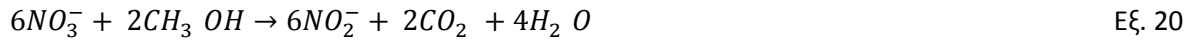
Αφού η απονιτροποίηση είναι αναπνευστική διαδικασία, απαιτείται ένας οξειδωτικός παράγοντας ή ένας δότης ηλεκτρονίων, ως πηγή ενέργειας. Τα απονιτροποιητικά βακτήρια είναι κατά βάση ετερότροφοι οργανισμοί και καταναλώνουν πολύπλοκες οργανικές ενώσεις σαν οξειδωτικούς παράγοντες, ενώ μερικοί απονιτροποιητές μπορούν να χρησιμοποιήσουν και οργανικές ενώσεις με ένα άτομο άνθρακα. Παράλληλα ορισμένοι απονιτροποιητές είναι αυτότροφοι και μπορούν να καταναλώσουν υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα, και μειωμένες ενώσεις του αζώτου. Εκτός από τα παραπάνω υπάρχει και μια φωτοσυνθετική κατηγορία νιτροποιητών, οι οποίοι δεν χρησιμοποιούνται ευρέως στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων.

Λόγω του ότι οι περισσότεροι απονιτροποιητές είναι ετερότροφοι, και απαιτούν κάποια πηγή οργανικού άνθρακα για την απονιτροποίηση, σε ορισμένες εγκαταστάσεις, με ψηλό φορτίο αζώτου, και όχι ανάλογα υψηλό οργανικό φορτίο, απαιτείται προσθήκη αναγωγικών ενώσεων, όπως για παράδειγμα μεθανόλης, για την εκτέλεση της μετατροπής νιτρικών σε αέριο άζωτο. (Carone 2005)

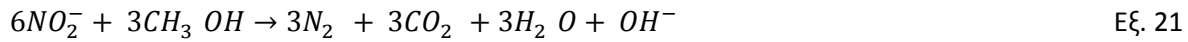
1.2.1 Στοιχειομετρία της απονιτροποίησης

Στην περίπτωση χρήσης μεθανόλης ως αναγωγικό παράγοντα, η αντιδράσεις είναι η εξής:

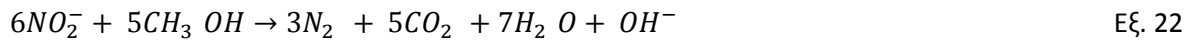
Νιτρικά σε νιτρώδη:



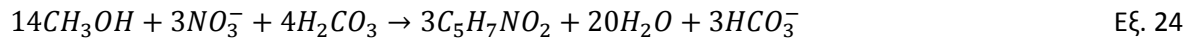
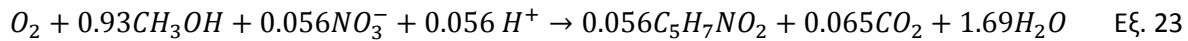
Νιτρώδη σε άζωτο:



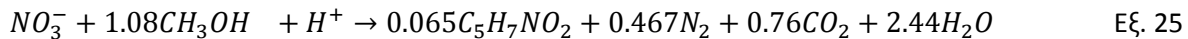
Ολική αντίδραση:



Στις παραπάνω αντιδράσεις φαίνεται η ανάγκη χρήσης ενός οξειδωτικού παράγοντα (π.χ. μεθανόλης) για την μετατροπή των νιτρικών σε αέριο άζωτο. Ταυτόχρονα οι απονιτροποιητές χρησιμοποιούν τη μεθανόλη για να αυξήσουν τη βιομάζα τους όπως φαίνεται παρακάτω:



Συνολική εξίσωση:



Substrate	Stoichiometric equation
Ethanol	$5 \text{ C}_2\text{H}_5\text{OH} + 12 \text{ NO}_3^- \rightarrow 10 \text{ HCO}_3^- + 2 \text{ OH}^- + 9 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ N}_2$
Acetic acid	$0.613 \text{ C}_2\text{H}_3\text{OH} + \text{NO}_3^- \rightarrow 0.102 \text{ C}_6\text{H}_7\text{NO}_2 + 0.714 \text{ CO}_2 + 0.286 \text{ OH}^- + 0.980 \text{ H}_2\text{O} + 0.449 \text{ N}_2$ $5 \text{ CH}_3\text{COOH} + 8 \text{ NO}_3^- \rightarrow 8 \text{ HCO}_3^- + 2 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} + \text{N}_2$ $0.819 \text{ CH}_3\text{COOH} + \text{NO}_3^- \rightarrow 0.068 \text{ C}_6\text{H}_7\text{NO}_2 + \text{HCO}_3^- + 0.301 \text{ CO}_2 + 0.902 \text{ H}_2\text{O} + 0.466 \text{ N}_2$
Propanol	$0.278 \text{ C}_3\text{H}_7\text{OH} + \text{NO}_3^- \rightarrow 0.5 \text{ N}_2 + 0.833 \text{ CO}_2 + 0.611 \text{ H}_2\text{O} + \text{N}_2$
Cellulose	$5(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n + 24n \text{ NO}_3^- \rightarrow 6n \text{ CO}_2 + 13n \text{ H}_2\text{O} + 12n \text{ N}_2 + 24n \text{ HCO}_3^-$
Butanol	$0.208 \text{ C}_4\text{H}_9\text{OH} + \text{NO}_3^- \rightarrow 0.5 \text{ N}_2 + 0.833 \text{ CO}_2 + 0.542 \text{ H}_2\text{O} + \text{OH}^-$
Pentanol	$0.167 \text{ C}_5\text{H}_{11}\text{OH} + \text{NO}_3^- \rightarrow 0.5 \text{ N}_2 + 0.833 \text{ CO}_2 + 0.5 \text{ H}_2\text{O} + \text{OH}^-$
Glycol	$0.5 (\text{CH}_2\text{OH})_2 + \text{NO}_3^- \rightarrow 0.5 \text{ N}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{OH}^-$
Aromatic hydrocarbons	$\text{C}_{61}\text{H}_{67} + 62.2 \text{ H}^+ + 62.2 \text{ NO}_3^- \rightarrow 31.1 \text{ N}_2 + 61 \text{ CO}_2 + 64.6 \text{ H}_2\text{O}$
"Typical" organic matter	$\text{C}_5\text{H}_9\text{NO} + 3.36 \text{ NO}_3^- + 3.92 \text{ H}^+ \rightarrow 1.68 \text{ N}_2 + 0.36 \text{ C}_2\text{H}_7\text{NO}_2 + 3.2 \text{ CO}_2 + 3.92 \text{ H}_2\text{O} + 0.64 \text{ NH}_4^+$
Methane	$5 \text{ CH}_4 + 8 \text{ NO}_3^- + 8 \text{ H}^+ \rightarrow 4 \text{ N}_2 + 5 \text{ CO}_2 + 14 \text{ H}_2\text{O}$
Glucose	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2.8 \text{ NO}_3^- + 0.5 \text{ NH}_4^+ + 2.3 \text{ H}^+ \rightarrow 0.5 \text{ C}_6\text{H}_7\text{NO}_2 + 1.4 \text{ N}_2 + 3.5 \text{ CO}_2 + 6.4 \text{ H}_2\text{O}$

Πίνακας 2 εξισώσεις ετερότροφης απονιτροποίησης για διάφορα υποστρώματα άνθρακα. (V Mateju 1992)

1.3 Συστήματα Νιτροποίησης - Απονιτροποίησης

Τόσο η νιτροποίηση όσο και η απονιτροποίηση μπορούν να επιτευχθούν είτε σε συστήματα αιωρούμενης βιομάζας, είτε σε συστήματα ακινητοποιημένης βιομάζας.

1.3.1 Αιωρούμενη Βιομάζα

Στα συστήματα αιωρούμενης βιομάζας, οι μικροοργανισμοί βρίσκονται αιωρούμενοι στο νερό, μεμονωμένοι ή σε συστάδες (κροκίδες). Στη μέθοδο αυτή, λόγω του μεγάλου χρόνου διπλασιασμού, υπάρχει κίνδυνος έκπλυσης των μικροοργανισμών, δηλαδή της μείωσης της συγκέντρωσης των ενεργοποιημένων μικροοργανισμών σε σημείο στο οποίο η εγκατάσταση δεν επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό γίνεται ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος, με βιοκροκιδώματα και ενεργοποιημένους μικροοργανισμούς, μέσω της οποίας διατηρούμε την συγκέντρωση των ενεργοποιημένων νιτροποιητών σε επιθυμητά επίπεδα. Η ηλικία της ιλύος θα πρέπει να είναι από 10 έως 20 μέρες στους 10°C και από 4 έως 7 μέρες στους 20°C. (George Tsobanoglous 2006)

1.3.2 Ακινητοποιημένη Βιομάζα

Στα συστήματα ακινητοποιημένης βιομάζας, οι μικροοργανισμοί παραμένουν μέσα στον αντιδραστήρα, ενώ υπάρχει είσοδος λυμάτων, και έξοδος επεξεργασμένων λυμάτων, δεν υπάρχει έξοδος κάποιας αξιοσημείωτης ποσότητας μικροοργανισμών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην χρειάζεται να γίνεται επανακυκλοφορία ιλύος με στόχο την διατήρηση της συγκέντρωσης των μικροοργανισμών σε επιθυμητά επίπεδα, αλλά όλοι σχεδόν οι ενεργοποιημένοι νιτροποιητές παραμένουν μέσα στον αντιδραστήρα. Οι πιο συνηθισμένες μορφές ακινητοποίησης μικροοργανισμών είναι η προσκόλληση σε επιφάνεια, ο

περιορισμός πίσω από κάποιο εμπόδιο, και η αυτο-συσσωμάτωση, και τέλος ο εγκλωβισμός σε πορώδες υλικό.

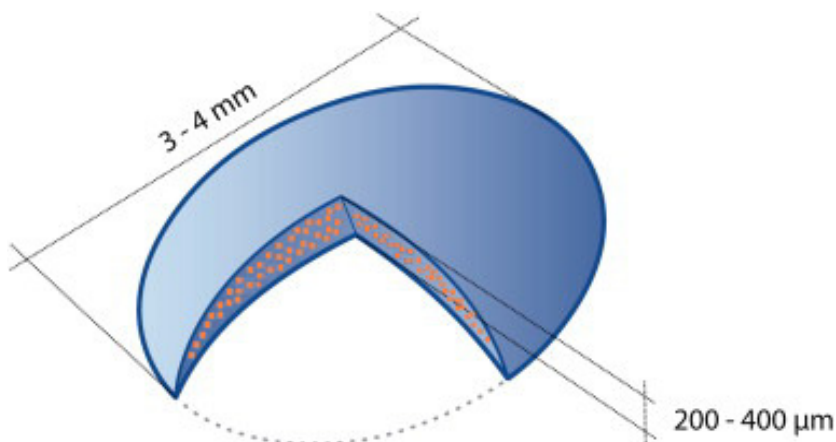
Στα συστήματα αιωρούμενης βιομάζας, και σε σχετικά μικρούς χρόνους παραμονής παρατηρείται το φαινόμενο της έκπλυσης, δηλαδή της απομάκρυνσης των μικροοργανισμών από τον αντιδραστήρα. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός αναπαραγωγής των μικροοργανισμών συν τον ρυθμό εισαγωγής μικροοργανισμών, είναι μικρότερος από τον ρυθμό με τον οποίο οι μικροοργανισμοί εξέρχονται από το σύστημα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η συγκέντρωση βιομάζας να μην διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα και να απαιτείται διαχωρισμός της βιομάζας και ανακυκλοφορία της, για την ομαλή λειτουργία της βιολογικής διεργασίας. Εναλλακτικά, το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με εγκλωβισμό μικροοργανισμών με διάφορους τρόπους και σε ποικίλα μέσα, ώστε να παραμένουν αυτοί μόνιμα στον αντιδραστήρα σε συνθήκες συνεχούς.

1.3.2.1 Προσκόλληση σε επιφάνεια

Τα κύτταρα μπορούν να προσκολληθούν στην επιφάνεια από κομμάτια ξύλου, κολλαγόνο, μικρομεταφορείς, ή κάποια είδη ρητίνης. Στην περίπτωση αυτή, οι μικροοργανισμοί προσκολλούνται στην επιφάνεια ενός από τα προαναφερθέντα, και ξεκινάνε να πολλαπλασιάζονται πάνω σε αυτό μέχρι να δημιουργηθεί ένα είδος βιοφιλμ γύρω από αυτό, το οποίο ερχόμενο σε επαφή με το προς επεξεργασία υγρό, καταναλώνει το εκάστοτε φορτίο, και το καθαρότερο πλέον υγρό αφαιρείται από τη δεξαμενή.

1.3.2.2 Ενθυλάκωση.

Τα κύτταρα μπορούν να εγκλωβιστούν μέσα σε μικροκάψουλες που έχουν είτε μόνιμη είτε μη μόνιμη ημιπερατή μεμβράνη. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η μεγάλη επιφάνεια επαφής με το λύμα, και ότι η ημιπερατή μεμβράνη επιλεκτικά επιτρέπει μόνο σε ενώσεις με μικρό μοριακό βάρος να περάσουν, και άρα οι μικροοργανισμοί παραμένουν ακινητοποιημένοι μέσα στις μικροκάψουλες. Βασικό μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι υπάρχει περίπτωση να μην είναι επαρκής η διάχυση οξυγόνου, και όσο οξυγόνο διαχέεται εντός της μικροκάψουλας να καταναλώνεται πριν φτάσει στο κέντρο, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια νεκρή περιοχή στον πυρήνα (diffusion inhibition). Προς αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, η εταιρία Lenticats δημιούργησε μια σειρά βιοκαταλυτών, μεταξύ των οποίων και νιτροποιητές. Οι βιοκαταλύτες αυτοί είναι μικροοργανισμοί εγκλωβισμένοι σε πολυβυνλική αλκοόλη, και έχουν σχήμα δίσκου, αντί σφαίρας, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η νεκρή ζώνη στον πυρήνα, και να υπάρχει επαρκές οξυγόνο σε κάθε σημείο της μικροκάψουλας. Το δισκοειδές σχήμα υπερέχει σε σχέση με το σφαιρικό γιατί ενώ μειώνεται το βάθος της διάχυσης, παράλληλα διατηρείται σχετικά μεγάλη διάμετρος, ώστε να καθίσταται ευκολότερη η συγκράτηση των καψουλών στον αντιδραστήρα. Ο εγκλωβισμός έγινε δημιουργώντας το πορώδες μέσο γύρω από αποικίες επιλεκτικά αναπαραγμένων μικροοργανισμών. Μέθοδοι εγκλωβισμού σε PVA, και χρήσεις αυτού περιγράφονται από τους Ariga et al. Το PVA είναι ένα υλικό αρκετά οικονομικό στην παρασκευή του, και οι εγκλωβισμένοι σε αυτό μικροοργανισμοί αποκτούν ανθεκτικότητα σε ειδικά τοξικές συγκεντρώσεις αλάτων, ή άλλων ανασταλτικών ουσιών ή παραγόντων. (Alžběta Boušková 2011).



Διάγραμμα 2 σχηματική απεικόνιση των βιοκαταλυτών

1.3.2.3 Αυτο-συσσωμάτωση

Η αυτοσυσσωμάτωση μπορεί να θεωρηθεί μέθοδος ακινητοποίησης, γιατί τα βιοκροκιδώματα (συσσωματωμένα κύτταρα) παρέχουν πλεονεκτήματα ανάλογα των άλλων μεθόδων ακινητοποίησης. Ορισμένες φορές χρειάζεται η προσθήκη κάποιου κροκιδωτικού παράγοντα για να επιτευχθεί συσσωμάτωση. Για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος αυτή ως εγκλωβισμένη βιομάζα, απαιτείται μεγάλο μέγεθος βιοκροκιδωμάτων το οποίο επιτυγχάνεται με ήπιο ρυθμό ανάδευσης. Γνωρίζοντας όμως ότι στο εσωτερικό των κροκιδών η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μειώνεται σε μεγάλο βαθμό, πρέπει να διατηρήσουμε μεγάλη παροχή οξυγόνου στο υγρό, προκειμένου να αυξήσουμε την απόδοση της εκάστως διαδικασίας.

1.3.2.4 Εγκλωβισμός σε πορώδες μέσο

Τα κύτταρα εισέρχονται αρκετά εύκολα σε πόρους υλικών όπως για παράδειγμα το τούβλο, και αν τους επιτραπεί να διχοτομηθούν αρκετές φορές, η βιομάζα που δημιουργείται, εγκλωβίζεται μέσα στους πόρους. Όταν το πορώδες υλικό με εγκλωβισμένους μικροοργανισμούς εισέλθει σε ρυπασμένο υγρό, το υγρό εισέρχεται στους πόρους, επεξεργάζεται από τους μικροοργανισμούς, και βγάνει εξυγιασμένο. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για εγκλωβισμό μικροοργανισμών, είναι τούβλα, πορώδες γυαλί, κολλαγόνο, και κάποια πολυμερή. Εκτός από το να επιτρέψουμε σε μικροοργανισμούς να αναπτυχθούν σε ένα έτοιμο πορώδες υλικό, μπορούμε να δημιουργήσουμε πορώδες υλικό γύρω από μια αποικία μικροοργανισμών, μια μέθοδος η οποία εξασφαλίζει περισσότερο το ότι δεν θα μολυνθεί κάποιος πόρος με κάποιο άλλο μικροοργανισμό, και ότι οι εγκλωβισμένοι μικροοργανισμοί θα παραμείνουν σε αυτήν την κατάσταση. (Rajiv Dutta, 2008)

1.4 Στόχος της εργασίας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης καταναλώνεται ορισμένες φορές όλο το οργανικό φορτίο, με αποτέλεσμα κατά την απονιτροποίηση να απαιτείται προσθήκη οργανικών αναγωγικών ουσιών για την ολοκλήρωση της. Αυτό οδήγησε στην αναζήτηση τρόπων νιτροποίησης μεγαλύτερης ταχύτητας, έτσι ώστε να μην καταναλώνεται το οργανικό φορτίο (BOD) κατά τη διεργασία.

Το πείραμα διεξήχθη με δυο βασικούς στόχους: α) τη λειτουργία της νιτροποίησης χωρίς την ανάγκη επανακυκλοφορίας ενεργού ιλύος, καθώς με τον εγκλωβισμό των μικροοργανισμών δεν έχουμε έκπλυση της ενεργής βιομάζας των νιτροποιητών, β) τη βέλτιστη λειτουργία της απονιτροποίησης χωρίς την ανάγκη προσθήκης οργανικών ενώσεων, δηλαδή την ολοκλήρωση της νιτροποίησης με ελάχιστη κατανάλωση οργανικού φορτίου (BOD). Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, λόγω έλλειψης οργανικών ενώσεων, ορισμένες φορές είναι αναγκαία η προσθήκη μιας ποσότητας αυτών (συνήθως χρησιμοποιείται μεθανόλη), για ομαλή απονιτροποίηση.

Στόχος του «Εργαστηρίου Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών» είναι η ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας και πρώτων υλών. Αυτό περιλαμβάνει διαδικασίες όπως μικροεσχάρωση στην πρωτοβάθμια επεξεργασία, βιόφιλτρα για κατανάλωση του οργανικού φορτίου στην δευτεροβάθμια κ.α. Στα πειράματα που περιγράφονται στην παρούσα διατριβή, το δείγμα από το βιολογικό καθαρισμό κροκιδώθηκε πριν εισέλθει στον βιοαντιδραστήρα, με στόχο να προσομοιωθεί η μικροεσχάρωση, και να αφαιρεθούν τα αιωρούμενα στερεά. Συγκεκριμένα οι βασικοί στόχοι του πειράματος που περιγράφει η παρούσα εργασία είναι οι εξής: α) τη λειτουργία της νιτροποίησης χωρίς την ανάγκη επανακυκλοφορίας ενεργού ιλύος, καθώς με τον εγκλωβισμό των μικροοργανισμών δεν έχουμε έκπλυση της ενεργής βιομάζας των νιτροποιητών, β) τη βέλτιστη λειτουργία της απονιτροποίησης χωρίς την ανάγκη προσθήκης οργανικών ενώσεων, δηλαδή την ολοκλήρωση της νιτροποίησης με ελάχιστη κατανάλωση οργανικού φορτίου (BOD).

1.5 Περιγραφή μεθόδων

1.5.1 Παρασκευή Standard Solution

Η Παρασκευή του Standard Solution γίνεται με διάλυση των θρεπτικών σε απιονισμένο νερό. Τα θρεπτικά που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι συγκεντρώσεις τους, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Το διάλυμα αυτό χρησιμοποιήθηκε για δυο λόγους στο πείραμα. Αρχικά, μέσα σε αυτό ενεργοποιούνται οι μικροοργανισμοί, ενώ κατά τη διάρκεια των μετρήσεων το Standard Solution ήταν το υγρό στο οποίο διαλύαμε το απόβλητο από το βιολογικό καθαρισμό, μέχρι να προσαρμοστούν σε αυτό οι νιτροποιητές.

Χημική ένωση	Ποσότητα (g/l)
K_2HPO_4	1.16
KH_2PO_4	0.23
$NaHCO_3$	0.34
$MgSO_4 \cdot 7 H_2O$	0.05
$CaCl_2 \cdot 2 H_2O$	0.01
$(NH_4)_2SO_4$	0.66
TES	1.5 ml/l

Πίνακας 3 Χημική σύσταση Standard Solution

Το TES είναι ένα διάλυμα θρεπτικών, το οποίο προσθέτουμε κατά τη διαδικασία παρασκευής Standard Solution, και τα συστατικά του φαίνονται παρακάτω.

Χημική ένωση	Ποσότητα (g)
Na-EDTA	2.5
FeSO ₄ · 7 H ₂ O	1.5
Na ₂ MoO ₄ · 2 H ₂ O	1
CuSO ₄ · 5 H ₂ O	0.3
MnCl ₂ · 4 H ₂ O	0.3
ZnSO ₄ · 7 H ₂ O	0.02
H ₃ BO ₃	0.3
HCl	1

Πίνακας 4 Χημική σύσταση TES

1.5.2 Μέτρηση αμμωνιακών (Μέθοδος Nessler)

1.5.2.1 Αντιδραστήρια

- Αντιδραστήριο Nessler Cat. 21194-49, Hach-Lange
- Σταθεροποιητής μετάλλων Cat. 22766-26, Hach-Lange
- Παράγοντας διασποράς πολυβυνυλαλκοόλης Cat. 23765-26, Hach-Lange

1.5.2.2 Πειραματική διαδικασία

Η μέθοδος Nessler μετράει συγκεντρώσεις αμμωνιακών 0,02 μέχρι 2,50 mg/l, επομένως ανάλογα με το αναμενόμενο αποτέλεσμα απαιτείται και η ανάλογη αραιώση. Για τη μέτρηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών της εισόδου στον βιοαντιδραστήρα η αραιώση ήταν 1:25, ενώ για την μέτρηση της συγκέντρωσης στην έξοδο του βιοαντιδραστήρα, η αραιώση ήταν 1:12,5. Για την προετοιμασία του τυφλού διαλύματος, γεμίζεται η ογκομετρική φιάλη των 25 ml με απιονισμένο νερό. Για την είσοδο του βιοαντιδραστήρα, στην ογκομετρική φιάλη προτίθεται 1 ml λύματος και 24 ml απιονισμένου νερού, ενώ για την έξοδο προστίθενται 2 ml λύματος, και 23 ml απιονισμένου νερού. Έπειτα προστίθενται σε κάθε φιαλίδιο τρεις (3) σταγόνες σταθεροποιητή μετάλλων, τα φιαλίδια σφραγίζονται και ανακινούνται. Κατόπιν προστίθενται σε κάθε φιαλίδιο 3 σταγόνες παράγοντα διασποράς πολυβυνυλαλκοόλης, και τα φιαλίδια σφραγίζονται και ανακινούνται. Τέλος σε κάθε φιαλίδιο προστίθεται ένα (1) ml αντιδραστηρίου Nessler και τα φιαλίδια σφραγίζονται και ανακινούνται. Το διάλυμα αφήνεται να αντιδράσει για ένα λεπτό, αλλά όχι παραπάνω από πέντε λεπτά.

Έπειτα επιλέγεται στο φασματοφωτόμετρο DR 2800 της HACH η μέθοδος Nessler, τοποθετείται το τυφλό σε κυψελίδα, και στο φασματοφωτόμετρο, και πατιέται η επιλογή «τυφλό», η οποία μηδενίζει το φασματοφωτόμετρο. Μετά τοποθετούνται με τη σειρά το δείγμα εισόδου και εξόδου, και πατιέται η επιλογή «μέτρηση», και εμφανίζεται η ένδειξη της συγκέντρωσης στο διάλυμα. Τέλος πολλαπλασιάζεται η ένδειξη του φασματοφωτόμετρου με 25 για την είσοδο, και 12,5 για την έξοδο, και υπολογίζεται η συγκέντρωση των αμμωνιακών.

1.5.3 Μέτρηση COD

Για τη μέτρηση του COD, χρησιμοποιήθηκαν φιαλίδια της σειράς LCK της εταιρίας HACH- LANGE. Στα φιαλίδια αυτά προστίθονταν 2 ml δείγματος, ή 1 ml δείγματος, και 1 ml απιονισμένο νερό, ανάλογα με το ύψος των αναμενόμενων αποτελεσμάτων. Έπειτα, τα φιαλίδια ανακινούνταν, και τοποθετούνταν σε επωαστήρα COD σε θερμοκρασία 148°C για 2 ώρες. Τέλος γινόταν αυτόματη μέτρηση την απορρόφησης συγκεκριμένου μήκους κύματος, σε φασματοφωτόμετρο της ίδιας εταιρίας μοντέλου DR2800.

1.5.4 Μέτρηση νιτρικών

Η μέτρηση της συγκέντρωσης νιτρικών, γινόταν με φιαλίδια της σειράς LCK 339 της εταιρίας HACH-LANGE. Στο φιαλίδιο προστίθονταν 2 ml δείγματος, ή 1 ml δείγματος και 1 ml απιονισμένο νερό, ανάλογα με το ύψος των αναμενόμενων αποτελεσμάτων. Έπειτα προστιθόταν 1 ml του αντιδραστηρίου A και γινόταν ανακίνηση. Μετά από 15 λεπτά γινόταν αυτόματη μέτρηση απορρόφησης στο φασματοφωτόμετρο DR2800 της HACH-LANGE.

Στις παραπάνω μετρήσεις, σε περίπτωση αραιώσης γινόταν πολλαπλασιασμός των αποτελεσμάτων με τον κατάλληλο συντελεστή, για αναγωγή της συγκέντρωσης του συμπυκνωμένου αποβλήτου.

1.5.5 Κροκίδωση λύματος

1.5.5.1 Εξοπλισμός

- a. Πιπέτα δέκα(10) ml
- b. Ποτήρι ζέσης εκατό (100) ml
- c. Μαγνητικός αναδευτήρας και μαγνήτης ανάδευσης
- d. Ποτήρι ζέσης δύο (2) λίτρων
- e. Ζυγαριά ακριβείας

1.5.5.2 Αντιδραστήρια

- a. Χλωριούχο πολυαλουμίνιο
- b. Πολυηλεκτρολύτης (μπλε μπουκαλάκι)
- c. Απιονισμένο νερό

1.5.5.3 Διαδικασία

Αρχικά, τοποθετούνταν 0,2 g πολυηλεκτρολύτη σε 100 ml απιονισμένου νερού, και γινόταν ανάδευση με το μαγνητικό αναδευτήρα για μισή ώρα σε 150 στροφές το λεπτό, μέχρι το διάλυμα να γίνει παχύρευστο, και να διαλυθούν όλοι οι κόκκοι του πολυηλεκτρολύτη. Έπειτα σε 2 λίτρα λύματος προσθέτονταν 1,2 ml PAC, και γινόταν αργή χειροκίνητη ανάδευση. Μετά προσθέτονταν 12 ml του διαλύματος πολυηλεκτρολύτη και γινόταν αργή χειροκίνητη ανάδευση, και το λύμα αφηνόταν να ηρεμήσει. Στο λύμα έτσι δημιουργούνταν κροκιδώματα τα οποία καθίζαναν σε μικρό χρόνο. Η απομάκρυνση των στερεών ήταν μεγαλύτερη από 90%.

1.5.6 Υπολογισμός της ειδικής ενεργότητας μικροοργανισμών

Η ενεργότητα ($\text{mg}_{\text{N-NH}_4}\text{kg}^{-1}_{\text{LB}}\text{h}^{-1}$) των βιοκαταλυτών για βιοαντιδραστήρα συνεχούς ροής υπολογίστηκε μέσω της Εξίσωσης 26 -1.

$$activity = \frac{C_{in(N-NH_4)} - C_{out(N-NH_4)}}{m_{LB}} * Q \quad \text{Εξ.26-1}$$

Ενώ για βιοαντιδραστήρα διαλείποντος έργου από την εξίσωση 26-2

$$activity = \frac{C_{in(N-NH_4)} - C_{out(N-NH_4)}}{m_{LB}} * \frac{V}{T} \quad \text{Εξ. 26-2}$$

1.6 Πειραματικές διατάξεις και αναλώσιμα

1.6.1 Βιοαντιραστήρας διαλείποντος έργου (BATCH)

1.6.1.1 Πειραματική διάταξη

- a. Γυάλινος Βιοαντιδραστήρας μέγιστου όγκου 2,5 l, Adams & Chittenden Scientific, USA.
- b. Μετρητής pH, Alpha- pH 800, Eutech, UK
- c. Μετρητής Οξυγόνου, Alpha DO PPG, Eutech UK
- d. Θερμόμετρο
- e. Θερμοστάτης CAL, 9900, UK
- f. Σύστημα μεταλλικών σωλήνων μέσα στον βιοαντιδραστήρα για ψύξη
- g. Πίνακας Ελέγχου
- h. Διάφορα σκεύη όπως κωνικές και ογκομετρικές φιάλες
- i. Μηχανικός αναδευτήρας
- j. Σύστημα παροχής οξυγόνου
- k. Δύο (2) περισταλτικές αντλίες για ρύθμιση του pH, Bioflo 110, UK

1.6.1.2 Αναλώσιμα

- a. Υδροχλωρικό οξύ
- b. Καυστικό νάτριο
- c. Μικροπιπέτες

1.6.2 Συνεχής βιοαντιδραστήρας πλήρους ανάμειξης (CSTB)

1.6.2.1 Πειραματική διάταξη

- a. Γυάλινος Βιοαντιδραστήρας μέγιστου όγκου 2,5 l, Adams & Chittenden Scientific, USA.
- b. Μετρητής pH, Alpha- pH 800, Eutech, UK
- c. Μετρητής Οξυγόνου Alpha DO PPG, Eutech, UK
- d. Θερμόμετρο
- e. Θερμοστάτης CAL, 9900, UK
- f. Σύστημα μεταλλικών σωλήνων μέσα στον βιοαντιδραστήρα για ψύξη
- g. Πίνακας Ελέγχου
- h. Διάφορα σκεύη όπως κωνικές και ογκομετρικές φιάλες
- i. Μηχανικός αναδευτήρας
- j. Σύστημα παροχής οξυγόνου
- k. Δύο (2) περισταλτικές αντλίες για ρύθμιση του pH, Bioflo 110, UK
- l. Δύο (2) περισταλτικές αντλίες εισροής – εκροής από τον βιοαντιδραστήρα, Watson-Marlow, 101 U/R, UK και Percom-1, Spain.
- m. Μηχανικός αναδευτήρας
- n. Σύστημα παροχής οξυγόνου

1.6.2.2 Αναλώσιμα

- a. Υδροχλωρικό οξύ
- b. Καυστικό νάτριο
- c. Μικροπιπέτες

1.7 Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία αποτελείται από δυο μέρη. Αρχικά έγινε νιτροποίηση συνθετικού αποβλήτου, και προσδιορισμός της ειδικής ενεργότητας και των επιδόσεων των ενθυλακωμένων μικροοργανισμών, και έπειτα έγινε χρήση αποβλήτου που είχε ληφθεί από τον βιολογικό καθαρισμό του δήμου Χανίων, και προσδιορίστηκαν οι επιδόσεις των μικροοργανισμών.

1.7.1 1^ο μέρος: Νιτροποίηση συνθετικού αποβλήτου

Η νιτροποίηση συνθετικού λύματος είχε δυο στόχους. Αρχικά μετά την προμήθεια των βιοκαταλυτών από την εταιρία Lentikats οι μικροοργανισμοί χρειάζονταν μια περίοδο ενεργοποίησης, σε αντιδραστήρα διαλείποντος έργου, μέσα σε ένα διάλυμα ειδικό για την ανάπτυξή τους (Standard solution).

Η ενεργοποίηση διεξήχθη ως εξής: Στον αντιδραστήρα εισήχθησαν 130 g βιοκαταλυτών σε ένα λίτρο Standard Solution και ο αντιδραστήρας λειτούργησε σε συνθήκες διαλείποντος έργου. Η θερμοκρασία ρυθμιζόταν στους 26 ± 1 °C, το pH 7.1 ± 0.1 , με προσθήκη διαλυμάτων HCl ή NaOH ανάλογα. Το DO κυμαινόταν από 2 έως 4 mg L⁻¹. Η ειδική ενεργότητα των βιοκαταλυτών μετριοταν καθημερινά και όταν αυτή ξεπέρασε τα 250 mg_{N-NH₄} kg⁻¹_{LB} h⁻¹ θεωρήθηκε ότι η ενεργοποίηση είχε ολοκληρωθεί. Η περίοδος ενεργοποίησης διήρκεσε 2 εβδομάδες. Μετέπειτα έγιναν πειράματα με στόχο τον προσδιορισμό της απόδοσης και της ειδικής ενεργότητας των μικροοργανισμών, τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

1.7.1.1 Αντιδραστήρας διαλείποντος έργου (Batch)

1.7.1.1.1 Πειραματική διαδικασία

Μετά την ενεργοποίηση των βιοκαταλυτών, ο αερισμός και η ανάδευση σταμάτησαν, και με περισταλτική αντλία αντλήθηκε το Standard Solution από τον βιοαντιδραστήρα και σε αυτόν παρέμειναν μόνο οι βιοκαταλύτες. Έπειτα έγινε προσθήκη 2 λίτρων Standard Solution και $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_2$, ώστε να επιτευχθεί ή επιθυμητή συγκέντρωση αμμωνιακών NH_4^+ στο διάλυμα.

Καθημερινά μετρούταν η συγκέντρωση αμμωνιακών ($\text{NH}_4\text{-N}$) στο διάλυμα με στόχο τον υπολογισμό της απόδοσης των μικροοργανισμών. Συγκεκριμένα, κάθε πρωί προστιθόταν ποσότητα $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_2$ στο διάλυμα και αμέσως μετά λαμβανόταν μικρή ποσότητα διαλύματος από τον βιοαντιδραστήρα και μετρούνταν τα αμμωνιακά στο διάλυμα με τη μέθοδο Nessler. Μετά από μερικές ώρες (2-5) γινόταν λήψη μικρής ποσότητας διαλύματος και πάλι μέτρηση αμμωνιακών με την ίδια μέθοδο, και υπολογιζόταν η απόδοση (activity) της νιτροποίησης των βιοκαταλυτών με βάση την κατανάλωση των αμμωνιακών στο διάλυμα τις ώρες που πέρασαν. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβανόταν καθημερινά. Περιστασιακά γινόταν και μέτρηση νιτρικών, προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι η νιτροποίηση γίνεται μέχρι τέλους, και ότι δεν υπάρχει κάποιο μέρος των αμμωνιακών που παραμένει σε μορφή νιτρωδών ιόντων. Οι συνθήκες μέσα στον βιοαντιδραστήρα διατηρούνταν σταθερές όπως περιγράφεται στην παράγραφο 1.7.1.

Λόγω του ότι κατά τη νιτροποίηση δημιουργούνται νιτρικά ιόντα, και αυτά είναι τοξικά για τους νιτροποιητές σε μεγάλες συγκεντρώσεις, γινόταν αλλαγή του διαλύματος κάθε 10 ημέρες με δυο εβδομάδες, ανάλογα με την ποσότητα αμμωνιακών που είχε προστεθεί την προηγούμενη περίοδο στον βιοαντιδραστήρα. Η αλλαγή γινόταν όπως περιγράφηκε παραπάνω στην παράγραφο 1.7.1.1.1 .

1.7.1.2 Αντιδραστήρας συνεχούς ροής (CSTR)

1.7.1.2.1 Πειραματική διαδικασία

Μετά τη μελέτη των βιοκαταλυτών σε αντιδραστήρα διαλείποντος έργου (BATCH) το επόμενο στάδιο ήταν η μελέτη αυτών σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής (CSTR). Στόχος του σκέλους αυτού του πειράματος ήταν η μελέτη των δυνατοτήτων των βιοκαταλυτών σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής, και επίσης την προσαρμογή τους σε αυτές τις συνθήκες, καθώς ο τελικός στόχος του πειράματος ήταν νιτροποίηση λύματος βιολογικού καθαρισμού σε τέτοιου τύπου αντιδραστήρα.

Για την προετοιμασία για το στάδιο αυτό έγινε εκκένωση του αντιδραστήρα από το Standard Solution και σταθεροποιήθηκε το ακροφύσιο της αντλίας εξόδου στο ύψος στο οποίο θέλαμε να φτάνει η στάθμη του υγρού, και έτσι ρυθμιζόταν ο όγκος λειτουργίας του αντιδραστήρα.

Εισαγάγαμε Standard Solution σε ένα δοχείο, το οποίο είχε καθαριστεί διεξοδικά, και προσθέσαμε $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή συγκέντρωση αμμωνιακών ($\text{NH}_4\text{-N}$). Έπειτα τοποθετήθηκε διάταξη άντλησης στο δοχείο αυτό, και ενεργοποιήθηκαν η αντλίες εισόδου και εξόδου. Το δοχείο γέμισε μέχρι την επιθυμητή στάθμη, και μόλις η επιφάνεια του υγρού έφτασε στο επιθυμητό ύψος η επιφάνεια του υγρού, ξεκίνησε και η άντληση προς την έξοδο. Η αντλία εξόδου κατέληγε σε ένα κενό δοχείο συλλογής. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων οι συνθήκες στον αντιδραστήρα διατηρούνταν σταθερές όπως περιγράφεται παραπάνω στην παράγραφο 1.7.1.

Καθημερινά μετριόταν η συγκέντρωση αμμωνιακών στην έξοδο του βιοαντιδραστήρα, και έπειτα προστιόταν νέο Standard Solution στο δοχείο εισόδου, ενώ αδειάζοταν και το δοχείο εξόδου. Έπειτα μετριόταν η συγκέντρωση αμμωνιακών με την ίδια μέθοδο στο δοχείο εισόδου. Περιστασιακά μετριόταν και η συγκέντρωση νιτρικών στην είσοδο και την έξοδο του βιοαντιδραστήρα, με στόχο να επιβεβαιωθεί η πλήρης νιτροποίηση, ότι δηλαδή μετατρέπονται τα αμμωνιακά πλήρως σε νιτρικά, και δεν μένουν στο στάδιο των νιτρωδών ιόντων. Για τη μέτρηση των αμμωνιακών και νιτρικών στην έξοδο, λαμβανόταν για ένα μικρό χρονικό διάστημα το υγρό το οποίο έβγαινε από την αντλία εξόδου, και γινόντουσαν μετρήσεις σε αυτό. Ορισμένες φορές μετριούνταν οι συγκεντρώσεις και στο δοχείο εξόδου, το οποίο έδινε έναν μέσο όρο των συγκεντρώσεων από την τελευταία φορά που αδειάστηκε το δοχείο. Τα αντιδραστήρια για τη μέθοδο Nessler προμηθεύτηκαν από την εταιρία HACH-LANGE. Οι μετρήσεις νιτρικών γίνονταν με χρήση

έτοιμων LCK φιαλιδίων, της ίδιας εταιρίας, ενώ και για τις δυο μετρήσεις χρησιμοποιούταν φασματοφωτόμετρο της ίδιας εταιρίας με αριθμό μοντέλου DR2800.

Σε κάποιο σημείο του πειράματος λήφθηκε νέα παρτίδα βιοκαταλυτών, ήδη ενεργοποιημένοι, οι οποίοι δοκιμάστηκαν απευθείας σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής. Αφού εκκενώθηκε ο βιοαντιδραστήρας και καθαρίστηκε, οι παλιοί μικροοργανισμοί τοποθετήθηκαν σε Standard Solution, και αποθηκεύτηκαν στο ψυγείο, και τοποθετήθηκαν οι νέοι στον βιοαντιδραστήρα, οπότε και ξεκίνησε το πείραμα εκ νέου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η ίδια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω. Η αλλαγή αυτή έγινε για να γίνουνε δοκιμές με μεγαλύτερη συγκέντρωση βιοκαταλυτών, και έγινε στις 19/7/2013.

1.7.2 2^ο μέρος: Νιτροποίηση πραγματικού αποβλήτου

1.7.2.1 Αντιδραστήρας CSTR

1.7.2.1.1 Πειραματική διαδικασία

Μετά τη μελέτη των βιοκαταλυτών σε νιτροποίηση συνθετικού λύματος (Standard Solution με προσθήκη αμμωνιακών), το επόμενο στάδιο του πειράματος ήταν να προσθέσουμε σταδιακά υγρά απόβλητα από τον βιολογικό καθαρισμό Χανίων. Προκειμένου να αποφευχθεί το σοκ από την απότομη αλλαγή συνθηκών, αλλά και για να υπάρχουν πιο διεξοδικά δεδομένα για τις επιδόσεις των μικροοργανισμών, σε πληθώρα συνθηκών, η αλλαγή από Standard Solution σε λύμα έγινε σταδιακά, σε αναλογίες λύμα:συνολικός όγκος υγρού 1:4, 1:2 και τελικά 1:1, δηλαδή 100% λύμα. Η αλλαγή από μια συγκέντρωση στην επόμενη γινόταν όταν η ειδική ενεργότητα των βιοκαταλυτών σταθεροποιούνταν.

Το λύμα πριν εισέλθει στο δοχείο εισόδου του βιοαντιδραστήρα, περνούσε από διεργασίες κροκίδωσης, συσσωμάτωσης, και καθίζησης, ώστε τα στερεά στον βιοαντιδραστήρα να ελαχιστοποιηθούν, και το BOD αλλά και τα αμμωνιακά να βρίσκονται μόνο σε διαλυτή μορφή και όχι σε σωματιδιακή.

Το λύμα από τον βιολογικό καθαρισμό λαμβανόταν από την έξοδο της πρωτοβάθμιας καθίζησης, και μετά το σημείο προσθήκης των στραγγιδίων από την επεξεργασία ιλύος.

Το ακροφύσιο της αντλίας εξόδου ήταν τοποθετημένο σε τέτοιο ύψος, ώστε να αντλεί το υγρό που βρισκόταν σε στάθμη μεγαλύτερη από την επιθυμητή, και έτσι ο όγκος του υγρού στον βιοαντιδραστήρα διατηρούταν σταθερός. Οι συνθήκες στον βιοαντιδραστήρα διατηρούνταν σταθερές, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 1.7.1.

Όσο ο βιοαντιδραστήρας λειτουργούσε στο μεταβατικό στάδιο, δηλαδή με διάλυμα λύματος από το βιολογικό και Standard Solution, καθημερινά μετριούνταν οι συγκεντρώσεις αμμωνιακών, περιστασιακά το COD στην είσοδο και την έξοδο του βιοαντιδραστήρα, καθώς και οι ανάλογες συγκεντρώσεις νιτρικών. Έπειτα αδειάζόταν το δοχείο εξόδου, και προστιθόταν καινούριο υγρό στο δοχείο εισόδου, ανάλογα με το στάδιο του πειράματος. Για τις μετρήσεις στην έξοδο, λαμβανόταν για ένα μικρό χρονικό διάστημα το υγρό το οποίο έβγαινε από την αντλία εξόδου, και γινότουσαν μετρήσεις σε αυτό. Ορισμένες φορές μετριούνταν οι συγκεντρώσεις και στο δοχείο εξόδου, το οποίο έδινε έναν μέσο όρο των συγκεντρώσεων από την τελευταία φορά που αδειάστηκε το δοχείο.

Αφού η συγκέντρωση λύματος έφτασε στο 100%, καθημερινά μετριούνταν οι συγκεντρώσεις αμμωνιακών, το COD στην είσοδο και την έξοδο του βιοαντιδραστήρα, και περιστασιακά γίνονταν και μετρήσεις νιτρικών. Έπειτα αδειάζοταν το δοχείο εξόδου, και προστιθόταν καινούριο υγρό στο δοχείο εισόδου. Για τις μετρήσεις στην έξοδο, λαμβανόταν για ένα μικρό χρονικό διάστημα το υγρό το οποίο έβγαινε από την αντλία εξόδου, και γινότουσαν μετρήσεις σε αυτό. Ορισμένες φορές μετριούνταν οι συγκεντρώσεις και στο δοχείο εξόδου, το οποίο έδινε έναν μέσο όρο των συγκεντρώσεων από την τελευταία φορά που αδειάστηκε το δοχείο.

2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

2.1 1^ο μέρος: Νιτροποίηση συνθετικού λύματος

2.1.1 Αντιδραστήρας BATCH

Ημερομηνία	NH ₃ -N (mg/l)	Χρόνος αντίδρασης (h)	Ειδική Ενεργότητα (mg/kg _{AB} /h)
4/16/2013	65		
4/16/2013	50.75	4	150
4/18/2013	34.5		
4/18/2013	24.5	2.3	183
4/19/2013	25.5		
4/19/2013	11	3	203
4/22/2013	62.5		
4/22/2013	43	4	204
4/23/2013	93.5		
4/24/2013	0.5	24	163
4/24/2013	134		
4/24/2013	104	4	315
4/26/2013	138		
4/26/2013	115	2.4	402

Πίνακας 5 Πίνακας Αποτελεσμάτων για αντιδραστήρα διαλείποντος έργου, όγκου λειτουργίας ένα λίτρο, μάζα βιοκαταλύτη 50 g.

Αλλαγή υγρού δοκιμών:

Ημερομηνία	NH ₃ -N (mg/l)	Χρόνος αντίδρασης (h)	Ειδική Ενεργότητα (mg/kg _{AB} /h)
5/13/2013	145		400
5/13/2013	114	3	
5/14/2013	168.5		
5/14/2013	146	2	509
5/14/2013	120	2	509
5/15/2013	132		
5/15/2013	109	1	966

Πίνακας 6 Πίνακας Αποτελεσμάτων για αντιδραστήρα διαλείποντος έργου, όγκου λειτουργίας ένα λίτρο, μάζα βιοκαταλύτη 50 g

Αλλαγή υγρού δοκιμών

Ημερομηνία	NH ₃ -N (mg/l)	Χρόνος αντίδρασης (h)	Ειδική Ενεργότητα (mg/kg _{AB} /h)
5/17/2013	74.5		300
5/17/2013	67.5	1	
5/17/2013	59.5	1	300
5/20/2013	175		470
5/20/2013	150	2	
5/20/2013	139	1	470

Πίνακας 7 Πίνακας Αποτελεσμάτων για αντιδραστήρα διαλείποντος έργου, όγκου λειτουργίας ένα λίτρο, μάζα βιοκαταλύτη 50 g.

Η περίοδος ανάμεσα στις 4/26/2013 και 5/13/2013 ήταν η περίοδος των διακοπών του Πάσχα, και έγινε συντήρηση του συστήματος, και δεν γινότανε λήψη μετρήσεων. Αλλαγή του διαλύματος έγινε στις 4/26/2013 και στις 5/16/2013. Η αλλαγή γίνονταν για να αποφευχθεί η συσσώρευση νιτρικών σε υψηλά επίπεδα, καθώς μπορεί να αναπτυχθούν τοξικές συνθήκες για τους νιτροποιητές.



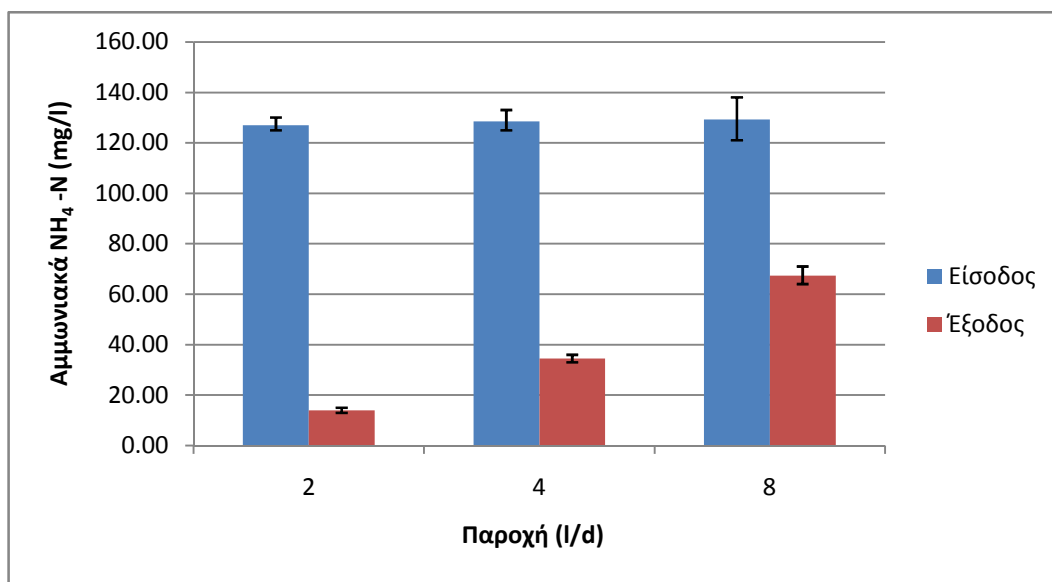
Διάγραμμα 3 Διάγραμμα ειδικής ενεργότητας μικροοργανισμών για αντιδραστήρα διαλείποντος έργου, όγκο λειτουργίας 1 l και μάζα βιοκαταλυτών 50 g.

2.1.2 Αντιδραστήρας CSTR

Για όγκο λειτουργίας του βιοαντιδραστηρα δύο λίτρα, και μάζα βιοκαταλύτη 50 g, τα αποτελέσματα έχουνε ως εξής:

Παροχή	Συγκέντρωση αμμωνιακών (mg/l)	
	Είσοδος	Έξοδος
2lt / 24h	126	14
2lt / 24h	125	13
2lt / 24h	130	15
4lt / 24h	129	35
4lt / 24h	125	34
4lt / 24h	133	36
4lt / 24h	127	33
8lt / 24h	121	64
8lt / 24h	138	71
8lt / 24h	129	67

Πίνακας 8 Αποτελέσματα απομάκρυνσης αμμωνιακών σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής για όγκο ενός λίτρου και μάζα βιοκαταλύτη 50 g

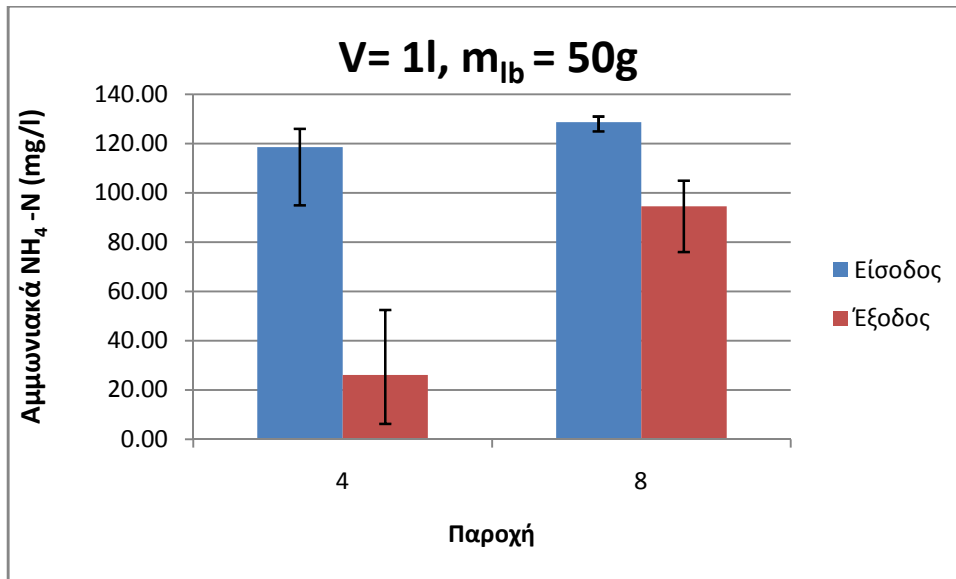


Διάγραμμα 4 Διάγραμμα συγκεντρώσεων αμμωνιακών εισόδου και εξόδου σε βιοαντιδραστήρα συνεχούς ροής για όγκο δυο λίτρων και μάζα βιοκαταλύτη 50 g

Για όγκο λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα ένα λίτρο, και μάζα βιοκαταλύτη 50g, τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

Παροχή	Συγκέντρωση αμμωνιακών (mg/l)	
	Είσοδος	Έξοδος
4lt / 24h	126	6.5
4lt / 24h	126	7.5
4lt / 24h	125	6.3
4lt / 24h	120	39.5
4lt / 24h	95	13
8lt / 24h	131	102.5
8lt / 24h	130	105
8lt / 24h	125	76
4lt / 24h	120	52.5
4lt / 24h	120	51.5
4lt / 24h	117	32

Πίνακας 9 Αποτελέσματα απομάκρυνσης αμμωνιακών σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής για όγκο λειτουργίας ένα λίτρο και μάζα βιοκαταλύτη 50 g

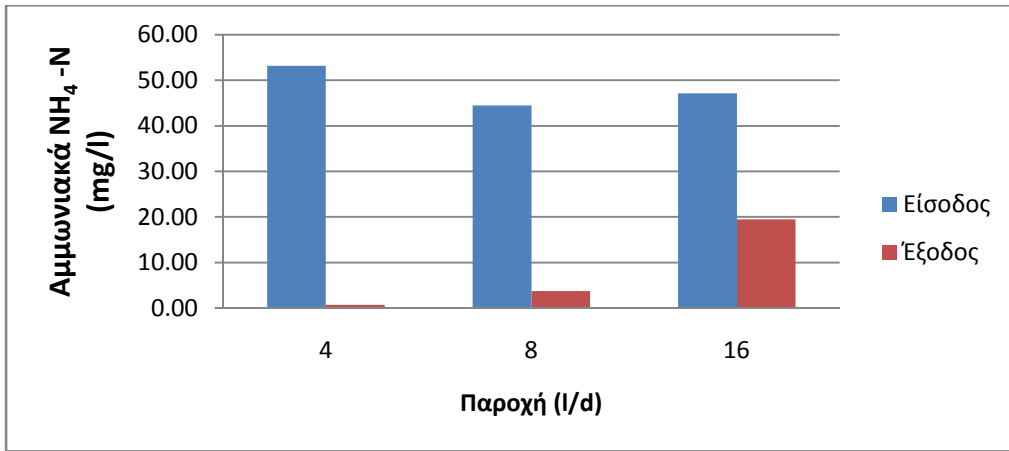


Διάγραμμα 5 Διάγραμμα συγκεντρώσεων αμμωνιακών εισόδου και εξόδου σε βιοαντιδραστήρα συνεχούς ροής για όγκο λειτουργίας ένα λίτρο και μάζα βιοκαταλύτη 50 g

Για όγκο λειτουργίας βιοαντιδραστήρα 2 λίτρα, και μάζα βιοκαταλυτών 130 g

Ημερομηνία	Ημέρα λειτουργίας	Παροχή	Συγκέντρωση αμμωνιακών (mg/l)	
			Είσοδος	Έξοδος
7/19/2013	1	4lt / 24h	57.5	0.75
7/22/2013	2	4lt / 24h	57.5	0.75
7/23/2013	3	4lt / 24h	50.75	0.75
7/26/2013	4	4lt / 24h	47	0.5
7/29/2013	5	8lt / 24h	50	4
7/24/2013	6	8lt / 24h	43	3.75
7/25/2013	7	8lt / 24h	43	3.5
7/30/2013	8	8lt / 24h	46	3.75
7/31/2013	9	8lt / 24h	45.75	3.75
8/2/2013	10	16lt / 24h	45.5	19.5
8/3/2013	11	16lt / 24h	49.5	23
8/5/2013	12	16lt / 24h	48	16
8/6/2013	13	16lt / 24h	45.5	19.25
8/8/2013	14	8lt / 24h	43	5
7/19/2013	15	8lt / 24h	50	4
7/22/2013	16	4lt / 24h	57.5	0.75
7/23/2013	17	4lt / 24h	57.5	0.75
7/24/2013	18	8lt / 24h	43	3.75
7/25/2013	19	8lt / 24h	43	3.5
7/26/2013	20	4lt / 24h	50.75	0.75
7/29/2013	21	4lt / 24h	47	0.5
7/30/2013	22	8lt / 24h	46	3.75
7/31/2013	23	8lt / 24h	45.75	3.75
8/2/2013	24	16lt / 24h	45.5	19.5
8/3/2013	25	16lt / 24h	49.5	23
8/5/2013	26	16lt / 24h	48	16
8/6/2013	27	16lt / 24h	45.5	19.25
8/8/2013	28	8lt / 24h	43	5
8/9/2013	29	8lt / 24h	37	1

Πίνακας 10 Αποτελέσματα απομάκρυνσης αμμωνιακών σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής για όγκο δυο λίτρων και μάζα βιοκαταλύτη 130 g

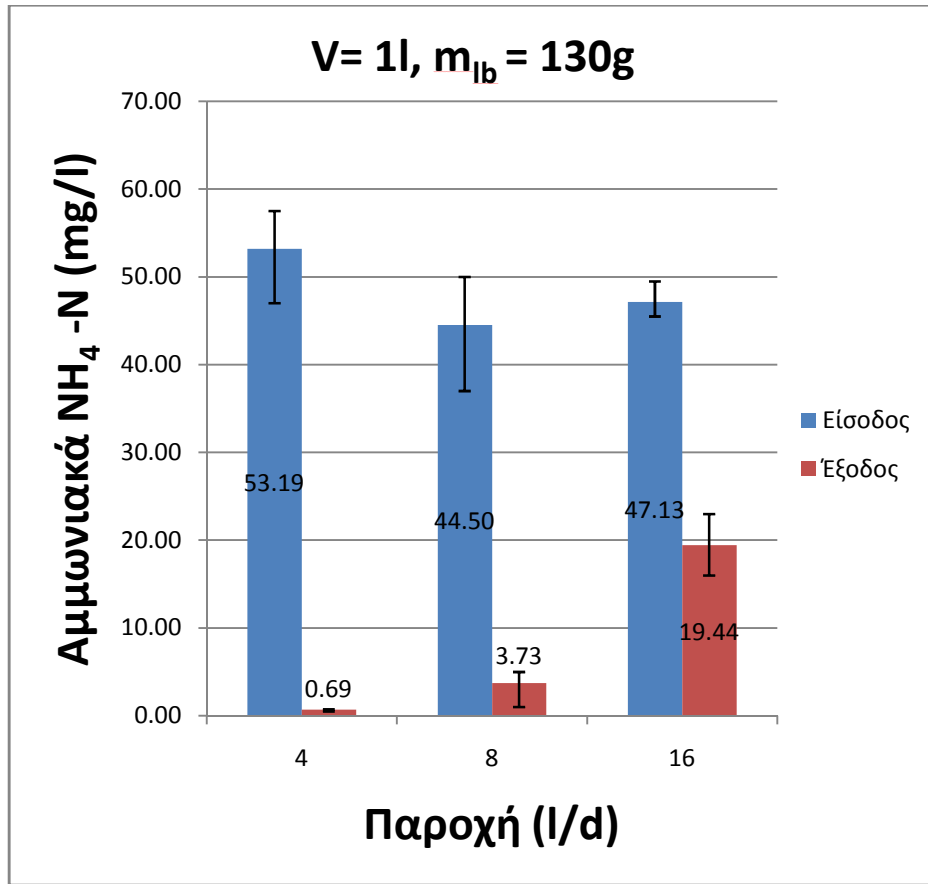


Διάγραμμα 6 Διάγραμμα συγκέντρωσης αμμωνιακών στην είσοδο και στην έξοδο βιοαντιδραστήρα συνεχούς ροής για όγκο δυο λίτρων και μάζα βιοκαταλύτη 130 g

Τέλος, για όγκο λειτουργίας δύο λίτρα και μάζα βιοκαταλυτών 130 γραμμάρια, τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

Ημέρα λειτουργίας	Παροχή	Συγκέντρωση αμμωνιακών (mg/l)	
		Είσοδος	Έξοδος
1	8lt / 24h	46	5.5
2	8lt / 24h	45.75	5.25
3	8lt / 24h	45.75	11.5
4	8lt / 24h	45.25	11
5	8lt / 24h	33.5	1
6	8lt / 24h	41	2.25
7	8lt / 24h	39	1
8	16lt / 24h	46.75	21.5
9	8lt / 24h	48	3.5
10	8lt / 24h	52.25	4.75
11	4lt / 24h	50.25	0.25
12	4lt / 24h	48	0.25
13	4lt / 24h	47.25	0.25
14	4lt / 24h	48.5	0.5
15	4lt / 24h	50.25	0.5
16	4lt / 24h	50	0.5
17	4lt / 24h	49	0.25
18	4lt / 24h	49.5	0.25
19	4lt / 24h	52	1
20	4lt / 24h	54	3.5
21	4lt / 24h	85.25	36.75
22	4lt / 24h	56.5	6.75
23	4lt / 24h	60	7.2
24	4lt / 24h	62	7.9
25	4lt / 24h	63	8.1
26	4lt / 24h	65.5	8.5
27	4lt / 24h	65	8.6
28	4lt / 24h	68	8.9
29	4lt / 24h	68	9
30	4lt / 24h	69	9.5

Πίνακας 11 Αποτελέσματα απομάκρυνσης αμμωνιακών σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής για όγκο ενός λίτρου και μάζα βιοκαταλύτη 130 g



Διάγραμμα 7 Διάγραμμα συγκεντρώσεων αμμωνιακών εισόδου και εξόδου σε βιοαντιδραστήρα ενός λίτρου και μάζα βιοκαταλύτη 130 g

2.2 2^ο μέρος: Νιτροποίηση πραγματικού λύματος:

Για όγκο λειτουργίας ένα λίτρο, μάζα βιοκαταλυτών 130 γραμμάρια, και όγκο λύματος : συνολικό όγκο διαλύματος 1:4, τα αποτελέσματα που προέκυψαν έχουν ως εξής:

Ημέρα λειτουργίας	Παροχή	Συγκέντρωση αμμωνιακών (mg/l)	
		Είσοδος	Έξοδος
1	4lt / 24h	55	0.25
2	4lt / 24h	114.5	49.25
3	4lt / 24h	91.25	46.25
4	4lt / 24h	82	38
5	4lt / 24h	50	18.6
6	4lt / 24h	54	1
7	4lt / 24h	54.5	0.25
8	4lt / 24h	62	0.4
9	4lt / 24h	75	0.25
10	4lt / 24h	83	0.5
11	4lt / 24h	75	0.8
12	4lt / 24h	102.5	0.25
13	8lt / 24h	75	21
14	8lt / 24h	50	23.75
15	4lt / 24h	61.25	0.25
16	8lt / 24h	62	0.75
17	8lt / 24h	75	3

Πίνακας 12 Αποτελέσματα απομάκρυνσης αμμωνιακών σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής για όγκο ενός λίτρου και μάζα βιοκαταλύτη 130 g

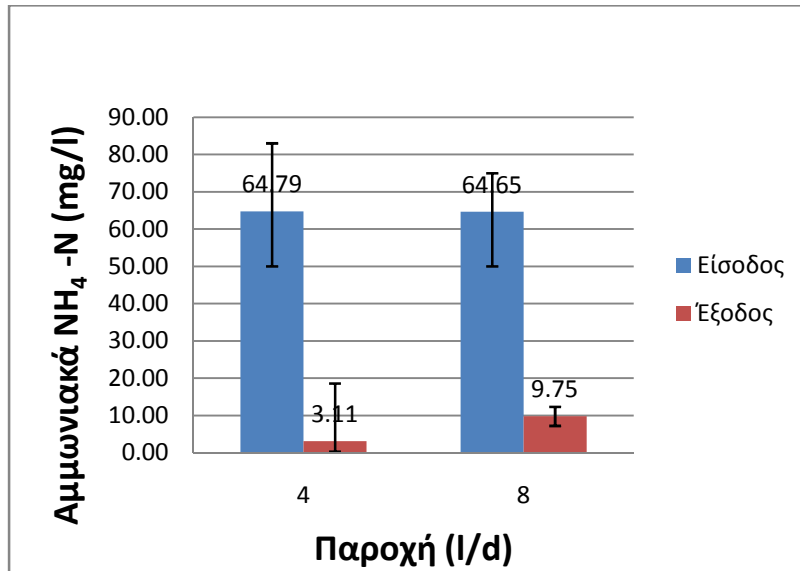
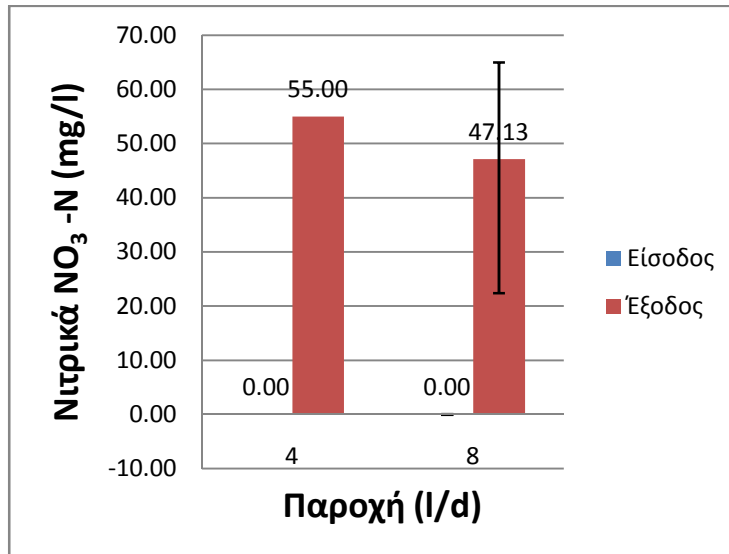


Figure 1 Διάγραμμα συγκεντρώσεων αμμωνιακών εισόδου και εξόδου σε βιοαντιδραστήρα ενός λίτρου και μάζα βιοκαταλύτη 130 γραμμάρια.

Ημέρα λειτουργίας	Παροχή	COD (mg/l)		NO3-N (mg/l)	
		Είσοδος	Εξοδος	Είσοδος	Εξοδος
1	4lt / 24h			1.06	45.8
2	4lt / 24h				
3	4lt / 24h	41.2	58.4		
4	4lt / 24h	28	34	1.17	42.3
5	4lt / 24h				
6	4lt / 24h	21	58	0	55
7	4lt / 24h	34.5	39.2	-	-
8	4lt / 24h	21.4	17.6	-	-
9	4lt / 24h				
10	4lt / 24h				
11	4lt / 24h	27.6	31.5		
12	4lt / 24h	26.7	30.5	1.2	98.9
13	8lt / 24h				
14	8lt / 24h			0.21	22.4
15	4lt / 24h				
16	8lt / 24h	19	27.1	0.17	54
17	8lt / 24h	24.1	31.4	0.1	65

Πίνακας 13 Πίνακας αποτελεσμάτων για COD, και νιτρικά, για είσοδο και έξοδο του βιοαντιδραστήρα, για όγκο λειτουργίας ένα λίτρο και μάζα βιοκαταλύτη 130g

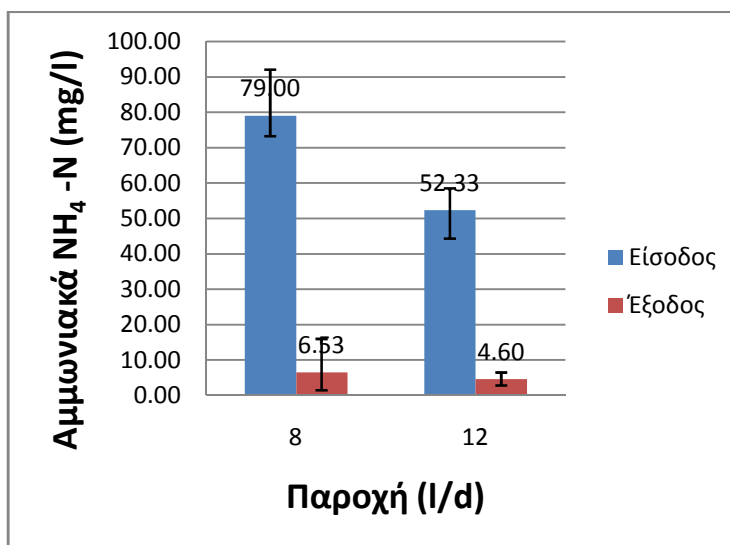


Διάγραμμα 8 2 Διάγραμμα συγκεντρώσεων νιτρικών στον βιοαντιδραστήρα με όγκο λειτουργίας ένα λίτρο και μάζα βιοκαταλυτών 130 g

Για όγκο λύματος:συνολικό όγκο διαλύματος 1:2 στο υγρό, όγκο λειτουργίας ένα λίτρο και μάζα βιοκαταλύτη 130 γραμμάρια, τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

Ημερομηνία	Ημέρα λειτουργίας	Παροχή	Συγκέντρωση αμμωνιακών (mg/l)	
			Είσοδος	Έξοδος
12/10/2013	1	8lt / 24h	73.25	2.125
12/11/2013	2	8lt / 24h	77.5	6.5
12/12/2013	3	8lt / 24h	73.25	1.5
12/13/2013	4	8lt / 24h	92	16
12/17/2013	5	12lt/24h	58.5	4.3
12/18/2013	6	12lt/24h	51.5	4.75
12/19/2013	7	12lt/24h	55	6.5
12/20/2013	8	12lt/24h	44.3	2.87

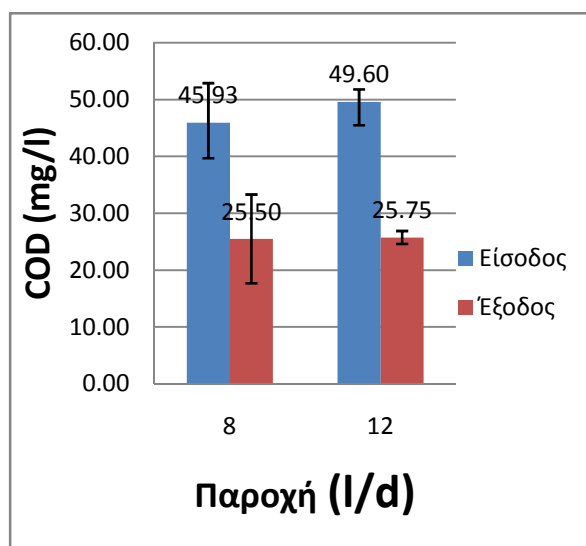
Πίνακας 14 Αποτελέσματα απομάκρυνσης αμμωνιακών σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής για όγκο ενός λίτρου και μάζα βιοκαταλύτη 130 g.



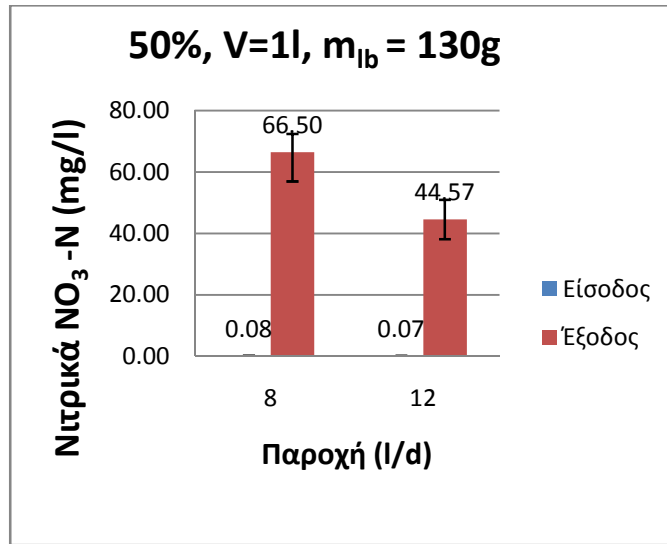
Διάγραμμα 9 Διάγραμμα συγκεντρώσεων αμμωνιακών εισόδου και εξόδου σε βιοαντιδραστήρα ενός λίτρου και μάζα βιοκαταλύτη 130 g.

Ημέρα λειτουργίας	Παροχή	COD (mg/l)		NO3-N (mg/l)	
		Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος
1	8lt / 24h	39.7	27.4	0.166	72.50
2	8lt / 24h	45.2	27.7	0.05	57.00
3	8lt / 24h	52.9	21.4	0.035	70.00
4	8lt / 24h				
6	12lt/24h	41.8	24.6	0.067	51.00
7	12lt/24h	57.4	26.9	0.05	44.50
8	12lt/24h			0.1	38.20
9	12lt/24h				

Πίνακας 15 Πίνακας αποτελεσμάτων για COD, και νιτρικά, για είσοδο και έξοδο του βιοαντιδραστήρα, για όγκο λειτουργίας ένα λίτρο και μάζα βιοκαταλύτη 130 g.



Διάγραμμα 10 Διάγραμμα συγκεντρώσεων COD στην είσοδο και την έξοδο βιοαντιδραστήρα με όγκο λειτουργίας ένα λίτρο μάζα βιοκαταλύτη 130 g.

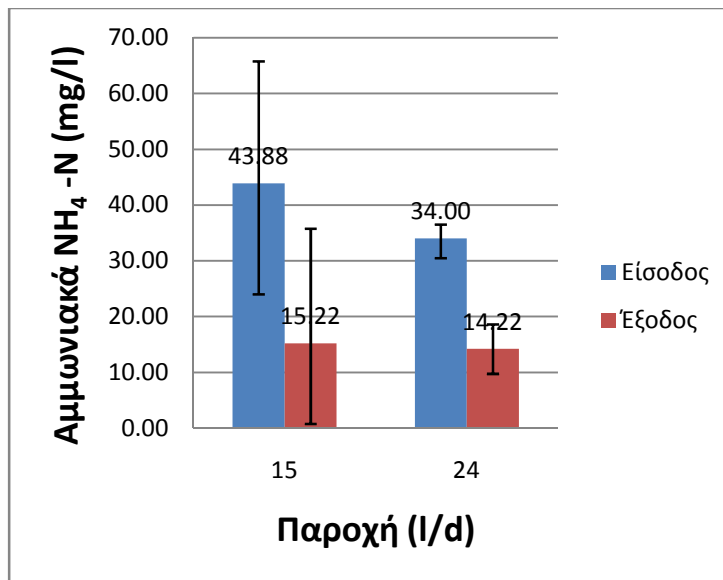


Διάγραμμα 11 Διάγραμμα συγκεντρώσεων νιτρικών στην είσοδο και την έξοδο βιοαντιδραστήρα με όγκο λειτουργίας ένα λίτρο και μάζα 130 g.

Για βιοαντιδραστήρα όγκου ενός λίτρου και μάζα βιοκαταλυτών 130 g, με 100% λύμα:

Ημερομηνία	Ημέρα λειτουργίας	Παροχή	Συγκέντρωση αμμωνιακών (mg/l)	
			Είσοδος	Έξοδος
12/22/2013	1	15lt / 24h	46.5	15.9
12/24/2013	2	15lt / 24h	47.25	11.5
12/25/2013	3	15lt / 24h	47.25	13.12
12/27/2013	4	15lt / 24h	65.75	35.75
12/29/2013	5	15lt / 24h	24	0.87
1/7/2014	6	15lt / 24h	35.4	0.8
1/13/2013	7	15lt / 24h	44	19.25
1/14/2014	8	15lt / 24h	28	7.75
1/15/2014	9	15lt / 24h	56.75	32
1/8/2014	10	24lt / 24h	30.5	9.75
1/9/2014	11	24lt / 24h	36.5	18.6
1/12/2014	12	24lt / 24h	35	14.3

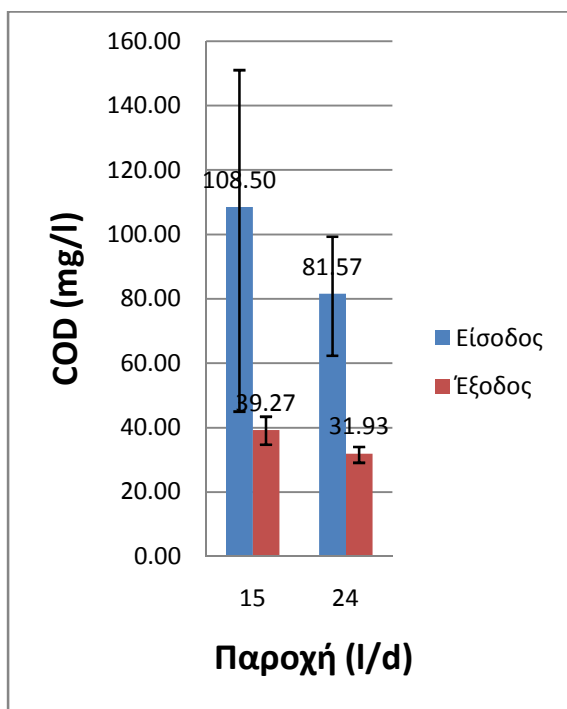
Πίνακας 16 1 Αποτελέσματα απομάκρυνσης αμμωνιακών σε αντιδραστήρα συνεχούς ροής για όγκο ενός λίτρου και μάζα βιοκαταλύτη 130 g.



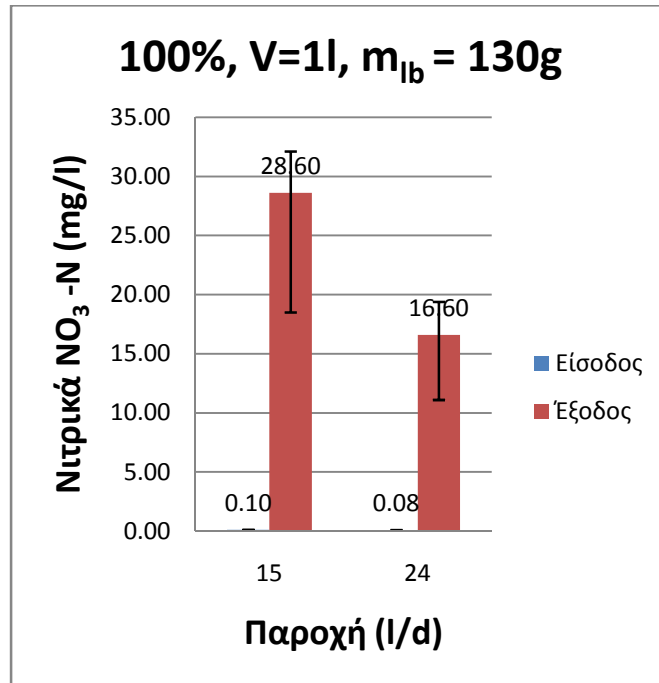
Διάγραμμα 12 Διάγραμμα συγκεντρώσεων αμμωνιακών στην είσοδο και την έξοδο βιοαντιδραστήρα όγκου λειτουργίας ενός λίτρου και μάζας βιοκαταλυτών 130 g.

Ημέρα λειτουργίας	Παροχή	COD (mg/l)		NO3-N (mg/l)	
		Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος
1	15lt / 24h	134	35	0.09	29.6
2	15lt / 24h			0.10	32.1
3	15lt / 24h	95	37	0.08	31.6
4	15lt / 24h			0.10	31.2
5	15lt / 24h	45	20		
6	15lt / 24h	78	33		
7	15lt / 24h	151	53.6	0.12	18.5
8	15lt / 24h	148	57		
9	15lt / 24h				
10	24lt / 24h	85.7	29.1	0.09	19.4
11	24lt / 24h	77	32.7	0.07	11.1
12	24lt / 24h	82	34	0.08	19.3

Πίνακας 17 Πίνακας αποτελεσμάτων για COD, και νιτρικά, για είσοδο και έξοδο του βιοαντιδραστήρα, για όγκο λειτουργίας ένα λίτρο και μάζα βιοκαταλύτη 130 g



Διάγραμμα 13 Διάγραμμα συγκεντρώσεων COD στην είσοδο και την έξοδο του βιοαντιδραστήρα όγκου ενός λίτρου και μάζα βιοκαταλυτών 130 g.



Διάγραμμα 14 Διάγραμμα συγκεντρώσεων νιτρικών στην είσοδο και την έξοδο του βιοαντιδραστήρα όγκου ενός λίτρου και μάζα βιοκαταλυτών 130 g.

3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

3.1 Νιτροποίηση συνθετικού λύματος

3.1.1 Βιοαντιδραστήρας διαλείποντος έργου (BATCH)

Από τα πειραματικά αποτελέσματα, φαίνεται ότι οι ενθυλακωμένοι μικροοργανισμοί νιτροποίησης έχουν υψηλές επιδόσεις στην απομάκρυνση αμμωνιακών και μετατροπή τους σε νιτρικά, και άρα στην διαδικασία της νιτροποίησης, σε σχέση την διεργασία ενεργού ιλύος.

Η ειδική ενεργότητα των βιοκαταλυτών αυξάνεται με την αύξηση της αρχικής συγκέντρωσης αμμωνιακών στο διάλυμα, και με την μείωση του χρόνου αντίδρασης. Αυτό συμβαίνει διότι οι μικροοργανισμοί έχουν δυνατότητα κατανάλωσης αμμωνιακών, σε πολύ μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από αυτές που εξετάστηκαν στο πείραμα, με αποτέλεσμα να καταναλώνονται σε ρυθμούς μεγαλύτερους όσο αυξάνεται η συγκέντρωση των αμμωνιακών.

Η αποτελεσματικότητα των βιοκαταλυτών στην νιτροποίηση ωθεί στην περεταίρω εξέταση τους, με στόχο την παρακολούθηση αυτών σε συνθήκες συνεχούς ροής, οι οποίες είναι πιο διαδεδομένες σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

3.1.2 Βιοαντιδραστήρας συνεχούς ροής πλήρους ανάμειξης (CSTB)

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων νιτροποίησης του συνθετικού λύματος, παρατηρείται ότι για όγκο ενός λίτρου, και χρόνο παραμονής έως και τρεις (3) ώρες έχουμε σημαντική απόδοση μετατροπής αμμωνιακών σε νιτρικά ιόντα. Για χρόνους παραμονής έως και έξι (6) ώρες, η κατανάλωση των αμμωνιακών είναι σχεδόν πλήρης. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με το ότι ο χρόνος διπλασιασμού των περισσότερων ετερότροφων μικροοργανισμών, οι οποίοι καταναλώνουν το οργανικό φορτίο (BOD) έχουν χρόνο διπλασιασμού τρεις (3) έως δέκα (10) ώρες, μπορούν να οδηγήσουν στο συμπέρασμα ότι δυνητικά είναι δυνατή η νιτροποίηση λύματος χαμηλού φορτίου αμμωνιακών με μικρή κατανάλωση BOD.

3.2 Νιτροποίηση φυσικού λύματος

Από τη νιτροποίηση συνθετικού λύματος (Standard Solution), τα αποτελέσματα ήταν ελπιδοφόρα όσον αφορά την νιτροποίηση φυσικού λύματος από μονάδα επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων.

Κατά τη νιτροποίηση φυσικού αποβλήτου σε βιοαντιδραστήρα συνεχούς ροής, καθώς και στα μεταβατικά στάδια από συνθετικό λύμα σε 100% συγκέντρωση φυσικού λύματος, παρατηρείται μία μείωση στην απόδοση των βιοκαταλυτών, όπως και ήταν αναμενόμενο, λόγω ανταγωνισμού των νιτροποιητών με ετερότροφους μικροοργανισμούς. Παρ' όλα αυτά, η απόδοση απομάκρυνσης, καθώς και η ειδική ενεργότητα των μικροοργανισμών ήταν ικανοποιητικά για χρόνους παραμονής έως και 1.6 ώρες στον βιοαντιδραστήρα, και για συγκεντρώσεις αμμωνιακών στην είσοδο του βιοαντιδραστήρα έως και 35 mg/l. Για χρόνο παραμονής μια ώρα, η απομάκρυνση των αμμωνιακών δεν ήταν επαρκής για συγκεντρώσεις αμμωνιακών εισόδου από 30 mg/l και πάνω. Τα αμμωνιακά που καταναλώνονται μετατρέπονται πλήρως σε νιτρικά.

Όσον αφορά στο COD, η συγκέντρωσή του μειώνεται στον απαιτούμενο χρόνο για την ολοκλήρωση της νιτροποίησης, παρόλα αυτά, ενώ η συγκέντρωσή του στην είσοδο είναι σχετικά χαμηλή, δεν γίνεται πλήρης κατανάλωση. Παρόλο που δεν επιτυγχάνεται το ιδανικό, δηλαδή μηδενική κατανάλωση οργανικού φορτίου, υπάρχει διατήρηση αυτού για χρήση στην απονιτροποίηση.

4 Συμπεράσματα-Προτάσεις

Το τελικό στάδιο του πειράματος, η νιτροποίηση πραγματικού υγρού αποβλήτου, έδειξε ότι οι εγκλωβισμένοι νιτροποιητές της Lentikats's λειτουργούν σε πολύ υψηλούς ρυθμούς, σε σχέση με τους ρυθμούς που παρατηρούνται στην διεργασία ενεργού ιλύος. Με αύξηση της συγκέντρωσης των βιοκαταλυτών, οι επιδόσεις του συστήματος μπορούν να αυξηθούν.

Όσον αφορά στη διατήρηση του οργανικού φορτίου κατά τη νιτροποίηση, το πείραμα που διεξήχθη έδειξε ότι η δυνατότητα αυτή υπάρχει, αλλά με τη συγκέντρωση βιοκαταλυτών και τους ρυθμούς παροχής στους οποίους δοκιμάστηκε αυτό δεν ήταν απόλυτα εφικτό. Πιο συγκεκριμένα, υπήρχε σημαντική κατανάλωση οργανικού φορτίου, παρόλα αυτά δεν ήταν πλήρης, όπως θα συνέβαινε σε νιτροποίηση αιωρούμενης βιομάζας (και άρα παρέμενε σημαντική ποσότητα BOD, για την κατάντη διεξαγωγή απονιτροποίησης).

Σε έναν βιοαντιδραστήρα μεγαλύτερης συγκέντρωσης βιοκαταλυτών, θα μπορούσαμε να έχουμε μεγαλύτερη διατήρηση οργανικού φορτίου. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα απομάκρυνσης αζώτου σε κροκιδωμένα αστικά υγρά απόβλητα, χωρίς την ανάγκη προσθήκης οργανικού υποστρώματος (π.χ. μεθανόλης) στην κατάντη διεργασία της απονιτροποίησης.

Σε επόμενο στάδιο, προτείνεται να γίνουν δοκιμές με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις βιοκαταλυτών, με στόχο την πλήρη νιτροποίηση σε μικρούς χρόνους παραμονής. Στη συνέχεια μπορεί να δοκιμαστεί ένα πλήρες σύστημα απομάκρυνσης αζώτου (νιτροποίηση-απονιτροποίηση). Με χρήση είτε αιρούμενων απονιτροποιητών ενθυλακωμένων, από την εταιρία Lentikats's.

5 Βιβλιογραφία

Alžběta Boušková, J. M., Radek Stloukal, Josef Trögl, Věra Pilařová, Lucie Křiklavová, Tomáš Ledere (2011). "Three examples of nitrogen removal from industrial wastewater using Lentikats Biocatalyst." Desalination **280**(1-3): 191-169.

Anthonisen, A. C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B. (1976). "Inhibition of Nitrification by Amonia and Nitrous Acid." Journal W.P.C.F. **48**(5): 835-852.

AWWA, w. a. f. E. a. E. S., Inc (2002). "Nitrification." United States Environmental Protection Agency.

B.L. Mechalas, P. M. A., III, W.W. Matyskiela (1970). "A Study of Nitrification and Denitrification."

C. P. Leslie Grady, J., Glen T. Daigger, Nancy G. Love, Carlos D. M. Filipe (2011). Biological Wastewater Treatment, Third Edition, CRC Press.

C.P. Leslie Grady, J., Glen T. Daigger, Henry C. Lim (1999). Biological Wastewater Treatment: Second Edition, Revised and Explained, Marcel Dekker, Inc.

Capone, D. G. (2005). "Microbial Nitrogen Cycling." Manual of Environmental Microbiology.

George Tsobanoglous, F. L. B., H. David Stensel (2006). Wastewater Engineering, Treatment and Reuse (fourth edition), McGraw-Hill Companies Inc.

Knowles, G., Downing, A.L. and Barrett, M.J. (1965). "Determination of Kinetic Constants For Nitrifying Bacteria in Mixed Culture, with the Aid of an Electronic Computer." Journal of General Microbiology **38**: 263-278.

Knowles, R. (1982). "Denitrification." Microbiological Reviews **46**: 43-70.

Mitchell, R. (1992). Environmental Microbiology (Wiley Series in Ecological and Applied Microbiology), Wiley-Blackwell.

Osamu Ariga, K. I., Yoshiki Sano, Masanobu Nagura (1994). "Encapsulation of Biocatalyst with PVA Capsules." Journal of Fermentation and Bioengineering **78**(No. 1): 74-78.

Sediak, R. I. (1991). Phosphorus and Nitrogen Removal from Municipal Wastewater: Principles and Practice, Lewis Publishers, New York.

Udo Pagga, J. r. B., Uwe Strotmann (2006). "Inhibition of nitrification in laboratory tests and model wastewater treatment plants." Chemosphere **65**(1): 1-8.

V Mateju, S. C., J Krejci, T Janoch (1992). "Biological water denitrification—A review." Enzyme Microb. Technology **14**(March): 170-183.

Yamei Dong, Z. Z., Yongwei Jin, Zhirong Li, Jian Lu (2011). "Nitrification performance of nitrifying bacteria immobilized in waterborne Polyurethane at low ammonia nitrogen concentrations." Journal of Environmental Sciences **Volume 23**(Issue 3): Pages 366-371.

Λέκκας, Θ. (2005). Περιβαλλοντική Μηχανική 1: Διαχείριση Υδατικών Πόρων. Μυτιλήνη, ΚΟΣΜΟΣ ΠΕΜΕΡ.

Χατζικωνσταντίνου, Γ. (2001). "Νιτροπύηση Απονιτροποίηση σε Συστήματα Ενεργού Ιλύος."

Χρυσικόπουλος, Κ. (2013). Εισαγωγή στις Διεργασίες Καθαρισμού, Νερού και Λυμάτων, TZIOLAS PUBLICATIONS.

6 Δημοσιεύσεις

Protection and Restoration of the Environment XII, Σκιάθος, Ελλάδα, 29/6/2014 – 3/9/2014.

(Osamu Ariga 1994, AWWA 2002, Λέκκας 2005, Yamei Dong 2011, C. P. Leslie Grady 2011 , Χρυσικόπουλος 2013)