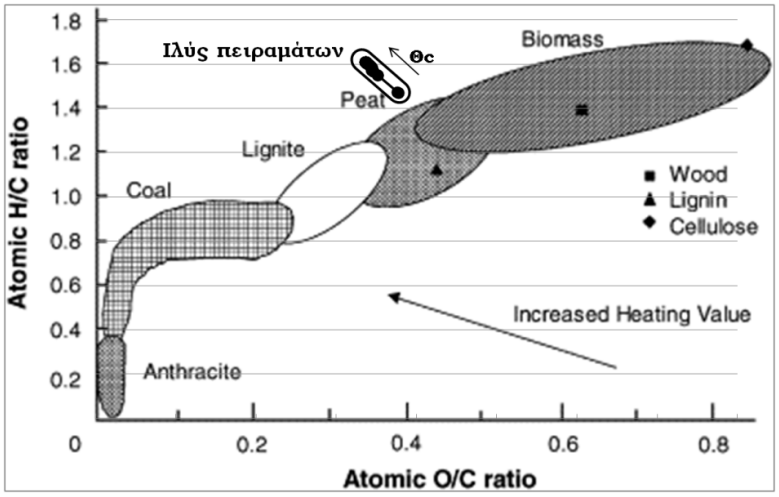
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ IV:

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΙΛΥΩΝ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΩΝ



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΙΜΙΛΙΟΥ ΣΤΑΜΑΤΟΓΛΟΥ

Χημικού Μηχανικού Ε.Μ.Π

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Α. ΒΛΥΣΙΔΗΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ IV:

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΙΛΥΩΝ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΙΜΙΛΙΟΥ ΣΤΑΜΑΤΟΓΛΟΥ

Χημικού Μηχανικού Ε.Μ.Π

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Α. ΒΛΥΣΙΔΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
2. Ε. ΚΟΥΚΙΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Α. ΜΟΥΤΣΑΤΣΟΥ, Καθ. Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Α. ΒΛΥΣΙΔΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
2. Ε. ΚΟΥΚΙΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Α. ΜΟΥΤΣΑΤΣΟΥ, Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Α. ΑΝΔΡΕΟΠΟΥΛΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Δ. ΚΕΚΟΣ Καθ. Ε.Μ.Π.
6. Ε. ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΥ, Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Μ. ΛΟΪΖΙΔΟΥ, Καθ. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012

«Η έγκριση διδακτορικής διατριβής υπό της Ανώτατης Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλοί αποδοχήν των γνωμών του συγγραφέως.»

(Ν. 5343/1932, Άρθρ. 202)

Αφιερώνεται σε αυτόν που ατενίζει στο μέλλον μαθαίνοντας από το παρελθόν.

…η επιστήμη , και ουσιαστικά ολόκληρος ο πολιτισμός, είναι μια σειρά από αυξητικές προόδους, που η καθεμιά τους οικοδομεί πάνω στα προηγούμενα

Hawking, S ‘Στους Ώμους Γιγάντων

,

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή αποτελεί μια ερευνητική προσπάθεια στο χώρο της αεριοποίησης ιλύων βιολογικών καθαρισμών, που σκοπό έχει την ενεργειακή αξιοποίηση του παραπροϊόντος της διεργασίας επεξεργασίας λυμάτων.

Η εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας του Τομέα IV της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Για τον σκοπό της έρευνας κατασκευάστηκαν και λειτούργησαν, μία εργαστηριακή μονάδα παραγωγής ιλύων συγκεκριμένων Θ_c και μία εργαστηριακό μονάδα αλλόθερμης αεριοποίησης διαλείποντος έργου.

Με την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλαν στην υλοποίηση της.

Θα ήθελα ιδιαίτερα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Απόστολο Βλυσίδη. Οι προτάσεις του για το αντικείμενο και την εξέλιξη της διατριβής, καθώς επίσης και οι υποδείξεις του για την ανάλυση και φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων ήταν οι καθοριστικοί παράγοντες που οδήγησαν στην ολοκλήρωση αυτής της διατριβής. Η διαρκής καθοδήγησή του πάνω σε γενικότερα ερευνητικά θέματα ήταν πολύτιμη. Τέλος θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την ευκαιρία που μου έδωσε να συμμετάσχω σε ερευνητικά προγράμματα, μέσα από τα οποία είχα την ευκαιρία να αποκομίσω επιπρόσθετη επιστημονική γνώση και εμπειρία.

Επίσης, ευχαριστώ και τα άλλα δυο μέλη της Επιτροπής μου, τον Καθηγητή κ. Ε. Κούκιο για τη συνεργασία και την Καθηγήτρια κ. Α. Μουτσάτσου για τις εποικοδομητικές υποδείξεις, σημειώνοντας δε πως η πόρτα του γραφείου της ήταν πάντα ανοικτή.

Στον Επίκουρο Καθηγητή Δ. Καρώνη οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για τη διάθεση του δυναμικού του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Καυσίμου και Λιπαντικών για την πραγματοποίηση μετρήσεων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τις Δρ Σ. Μάη και Δρ. Ε.Μ. Μπαραμπούτη για την αμέριστη συμπαράσταση και επιτυχή καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής μου.

Θα ήθελα, τέλος, να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και στους φίλους μου, που μου συμπαραστάθηκαν στις αρκετές δύσκολες στιγμές και αποφάσεις μου όλα αυτά τα χρόνια. Τους ευχαριστώ όλους από καρδιάς.

Περίληψη

Η αερόβια βιολογική διεργασία και δη η μέθοδος της ενεργού ιλύος αποτελεί την πλέον διαδομένη τεχνική επεξεργασίας οργανικών αποβλήτων. Κατά την τεχνική αυτή, ο αφομοιωμένος άνθρακας μετατρέπεται, εν μέρει σε διοξείδιο του άνθρακα και εν μέρει σε κυτταρική μάζα (βιολογική ιλύ), που αποτελεί το πιο βασικό παραπροϊόν αυτής της διαδικασίας. Η παραγωγή της βιολογικής ιλύος ανέρχεται σε 40-60% των αποδομούμενων οργανικών μορίων και θεωρείται δευτερογενής ρύπανση για την οποία πρέπει να δοθεί αποτελεσματική περιβαλλοντική διαχειριστική λύση ώστε η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου να θεωρηθεί ολοκληρωμένη.

Το κόστος της διαχείρισης των βιολογικών ιλύων με τις συνηθισμένες τεχνικές διαχείρισης (σταθεροποίηση, αναερόβια ή αερόβια χώνευση, εδαφική διάθεση, υγειονομική ταφή), πολλές φορές, είναι πολλαπλάσιο από το καθαυτού κόστος του βιολογικού καθαρισμού. Αυτό είναι εμφανές ιδιαίτερα στις μικρές μονάδες.

Οι σημερινές επιβληθείσες πολύ αυστηρές προδιαγραφές για την εδαφική διάθεση των λασπών απαιτούν προσεκτικότερη επιλογή των διεργασιών που θα εφαρμοστούν για την ολοκληρωμένη διαχείριση των βιολογικών ιλύων, ώστε αυτές να είναι τεχνικά εφαρμόσιμες και οικονομικά προσιτές.

Σήμερα οι βιολογικές λάσπες δεν θεωρούνται πλέον παραπροϊόντα προς απόρριψη αλλά βιομάζα, πηγή παραγωγής ενέργειας. Η πιο απλή μέθοδος, από τεχνική άποψη, και η πιο αποτελεσματική από περιβαλλοντική άποψη, αποτελεί η καύση της βιολογικής λάσπης. Η καύση αποτελεί προσφάτως μία ολοένα και περισσότερο εφαρμοζόμενη τεχνική. Μεγάλες μονάδες βιολογικών καθαρισμών την έχουν εντάξει πλέον στις τυπικές διεργασίες τους. Ο μέχρι σήμερα όμως απολογισμός της εφαρμογής της τεχνικής της καύσης στις βιολογικές λάσπες, έχει καταγράψει δύο σοβαρά μειονεκτήματα: (α) την αναγκαιότητα ξήρανσης των λασπών προ της καύσης τους και (β) την απαίτηση για χαμηλή περιεκτικότητα βαρέων μετάλλων στα προς επεξεργασία υγρά απόβλητα. Οι βιολογικές λάσπες όπως παράγονται από έναν βιολογικό καθαρισμό περιέχουν σημαντικές ποσότητες υγρασίας (70-95%) η εξάτμιση της οποίας απαιτεί όλη σχεδόν την προσδοκώμενη θερμική ενέργεια από την καύση των λασπών. Μία νέα, πολλά υποσχόμενη, τεχνική παραγωγής ενέργειας από βιομάζα και η οποία εντατικά διερευνάται διεθνώς ως προς την δυνατότητα εφαρμογής της στην ενεργειακή αξιοποίηση των λασπών που παράγονται από τους βιολογικούς καθαρισμούς είναι η πυρόλυση-αεριοποίησή τους. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής έναντι της απευθείας καύσης αποτελεί (α) το γεγονός ότι η περιεχόμενη υγρασία στη βιομάζα μπορεί να συμμετάσχει ως οξειδωτικός παράγοντας στη διαδικασία της πυρόλυσης έτσι ώστε η απόδοση της ενέργειας να είναι μεγαλύτερη, και (β) το γεγονός ότι οι διαδικασίες καθαρισμού των καυσίμων αερίων από τα βαρέα μέταλλα είναι απλούστερες και πιο αποδοτικές στην τεχνική της πυρόλυσης – αεριοποίησης, απ΄ότι στην καύση.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει αποφασιστικά την ενεργειακή απόδοση των βιολογικών λασπών με θερμικές τεχνικές (καύση, αεριοποίηση) είναι τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά τους και τα οποία μεταβάλλονται σημαντικά από τις λειτουργικές παραμέτρους ενός βιολογικού καθαρισμού. Ο αερόβιος βιολογικός καθαρισμός είναι ένα οικοσύστημα αποτελούμενο από μεικτούς πληθυσμούς μικροοργανισμών (βακτήρια-πρωτόζωα) που συνυπάρχουν και συνεργάζονται ή ανταγωνίζονται μεταξύ τους σε αυτό. Η ισορροπία που επιτυγχάνεται στο οικοσύστημα του βιολογικού καθαρισμού καθορίζεται από τα πρωτόζωα που επιβιώνουν σε αυτό και επομένως από την μέση ηλικία της βιολογικής λάσπης (Θc) που επιβάλλεται. Η παράμετρος αυτή είναι η πλέον καθοριστική τόσο για τον σχεδιασμό ενός βιολογικού καθαρισμού όσο και για την αποδοτική λειτουργία του διότι από αυτή εξαρτάται τόσο η οικοδόμηση όλου του οικοσυστήματος όσο και οι επιβεβλημένες ισορροπίες μεταξύ των διαφόρων κατηγοριών μικροοργανισμών. Ένα διαφορετικό Θc αντιστοιχεί σε διαφορετική σύνθεση πληθυσμών και επομένως σε διαφορετική ποσοτική και ποιοτική σύσταση της παραγόμενης βιολογικής λάσπης. Η επιβολή, με τον κατάλληλο σχεδιασμό, ενός συγκεκριμένου Θc σε έναν βιολογικό καθαρισμό, σήμερα, γίνεται με κριτήρια απαιτήσεων αφομοίωσης του οργανικού διαλυτού άνθρακα και αζώτου. Έτσι συνηθίζεται να εφαρμόζονται αναπτυγμένα οικοσυστήματα με μεγάλο Θc (Θc>15 days), δηλαδή συστήματα «παρατεταμένου αερισμού» όπως συνήθως ονομάζονται, τα οποία επιτυγχάνουν μεγάλες αποδόσεις αφομοίωσης άνθρακα και αζώτου με διαδικασίες νιτροποίησης-απονιτροποίησης. Τα συστήματα αυτά που έχουν επικρατήσει προσφέρουν σταθερότητα λειτουργίας αλλά απαιτούν μεγάλες εγκαταστάσεις (υψηλό πάγιο κόστος) καθώς και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας (υψηλό λειτουργικό κόστος) εξ΄ αιτίας των αναγκαίων μεγάλων ποσοτήτων παροχής οξυγόνου για να συντηρηθούν.

Όμως καμία έρευνα δεν έχει γίνει παγκοσμίως σχετικά με την «καθαρή» απαιτούμενη ενέργεια ενός ολοκληρωμένου βιολογικού καθαρισμού όπου η παραγόμενη περίσσεια βιολογικής λάσπης αξιοποιείται ενεργειακά με την χρήση θερμικών τεχνικών όπως είναι η καύση και η πυρόλυση-αεριοποίηση. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την επίδραση όλων των διαφορετικών οικοσυστημάτων, όπως μπορούν να εφαρμοστούν σε έναν βιολογικό καθαρισμό για την παραγωγή «καθαρής» ενέργειας μέσω της πυρόλυσης-αεριοποίησης των παραγόμενων βιολογικών λασπών.

Καταρχήν παρήχθησαν και μελετήθηκαν, ως προς τα ποιοτικά και ποσοτικά τους χαρακτηριστικά, βιολογικές λάσπες όλων των διακριτών τιμών Θc (από Θc=1d έως Θc=30d). Οι λάσπες αυτές επεξεργάστηκαν θερμικά σε μία αλλοθερμική πειραματική εργαστηριακή εγκατάσταση πυρόλυσης-αεριοποίησης διαλείποντος έργου και αναλύθηκαν ποιοτικά και ποσοτικά τα στερεά (απανθράκωμα-τέφρα), αέρια (CO_2, CO, H_2, CH_4) και υγρά (πίσσες) προϊόντα τόσο της πυρόλυσης όσο και της αεριοποίησης. Τα αποτελέσματα αξιοποιήθηκαν σε μοντέλα εκτίμησης της ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με το ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων λασπών και κατόπιν έγινε αναγωγή τους στη μάζα του εισερχόμενου οργανικού άνθρακα στον βιολογικό καθαρισμό ώστε να μπορούν να εξαχθούν συγκρίσιμα ποσοτικά συμπεράσματα ως προς

την ενεργειακή απόδοση σε σχέση με το επιβαλλόμενο Θc. Από την παραγόμενη ενέργεια λόγω θερμικής επεξεργασίας των λασπών αφαιρέθηκε η αντίστοιχη θεωρητικά καταναλισκόμενη ενέργεια λόγω αερισμού του βιολογικού καθαρισμού ώστε να προκύψει η «καθαρή» παραγόμενη ενέργεια. Τέλος τα ενεργειακά αποτελέσματα της πυρόλυσης-αεριοποίησης συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα που θα προέκυπταν με την καύση των λασπών ώστε να γίνει μια μεταξύ τους αξιολόγηση.

Κατά την έρευνα της παρούσης εργασίας διαπιστώθηκε ότι αυξανόμενου του Θ_c, σε έναν βιολογικό καθαρισμό, παράγονται λάσπες με υψηλότερό ποσοστό τέφρας από 7,6 (Θ_c=1d) έως 31,3 % (Θ_c=30d) και χαμηλότερης θερμογόνου δύναμης από 19,6 kJ/g_{db} (Θ_c=1d) έως 15 kJ/g_{db} (Θ_c=30d). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασε η σύσταση της ιλύος, καθώς, βάσει διαγράμματος Van Krevelen, την καθιστά μοναδική εν σχέση με όλα τα άλλα στερεά καύσιμα. Η απόδοση της αεριοποίησης, μετά από μια αρχική πτώση από 59% (Θ_c=1d) έως το 55% (Θ_c = 5d), κατόπιν αυξανόταν συνεχώς με την άνοδο του Θ_c φτάνοντας στα 61% για Θ_c = 30d. Όμως, η συνολικά παραγόμενη ενέργεια ανά γραμμάριο εισερχόμενου άνθρακα στο σύστημα του βιολογικού καθαρισμού συνεχώς ελαττωνόταν από 5,8 kJ/gC_{in} (Θ_c=1d) σε 3,7 kJ/gC_{in} (Θ_c=5d) και έκτοτε παρέμενε σταθερή για Θ_c >5d. Από την ολοκληρωμένη θεώρηση της ενεργειακής αξιοποίησης της ιλύος βάσει της κατανάλωσης ενέργειας του βιολογικού καθαρισμού και της παραγωγής ενέργειας από την αεριοποίηση παρατηρήθηκε θετικό ενεργειακό ισοζύγιο από Θ_c=1d (600 kWh/kgC_{in}) έως Θ_c=8d ενώ για μεγαλύτερα Θc το ενεργειακό ισοζύγιο παρέμενε ολοένα και πιο αρνητικό με την μικρότερη τιμή για Θ_c=30d όπου η «καθαρή» ενεργειακή απαίτηση ανήλθε σε 400kWh/kgC_{in}.

Το τελικό συμπέρασμα της παρούσας διατριβής είναι πως το συνδυασμένο σύστημα βιολογικού καθαρισμού και αεριοποίησης ιλύος είναι αποδοτικότερο σε χαμηλά Θ_c και η αεριοποίηση αποδεικνύεται ως η πιο κατάλληλη θερμική μέθοδος διαχείρισης και ενεργειακής εκμετάλλευσης της ιλύος.

Abstract

The process of the activated sludge is commonly used in the aerobic wastewater treatment plants. The initial BOD content of the influent is transformed into CO_2 and biological sludge, which is the main by-product of the process. The production of biological sludge reaches up to 40-60% of the organic matter consumed and is considered to be secondary pollution. The biological sludge should be disposed off effectively in order to complete the cycle of the treatment of wastewater.

The cost of the currently employed methods used for the disposal of the biological sludge (stabilization, aerobic or anaerobic digestion, landspreading, landfilling) exceeds the operating costs of the wastewater treatment plant. This is particularly the case with the small units.

The stringent rules currently applied concerning land spreading of biological sludge require careful consideration of the technical method implied for the sustainable treatment of the wastewater.

Today, biological sludge is no longer considered as a byproduct but biomass for energy utilization. The simplest and most effective and environmental friendly method of energy utilization is incineration, which is commonly applied, as large WWTPs have incorporated it. The two major disadvantages of sludge incineration are: (i) dried sludge feeding, (ii) low trace element concentration. The humidity of biological sludge produced by the WWTP amounts to 70-95%. In order to react the percentage required for incineration, the amount of energy consumed is almost equal to the energy obtained by the incineration itself. A new, most promising method for sludge energy utilization is gasification. The advantages of the said technique as compared to incineration are: (i) humidity is an oxidizing reactant leading to increased energy efficiencies (ii) the trace element capture is easy and efficient.

Another factor that influences decisively the energy efficiencies of the incineration and gasification of the sludge's qualitative and quantitative characteristics, which are affected by the operational parameters of the WWTP. The aerobic wastewater treatment is an ecosystem consisting of several species of microorganisms (bacteria, protozoa) which coexist and cooperate or compete with each other. The balance of the ecosystem is depends on the surviving protozoa and thus the sludge age imposed (Θc). The most crucial design parameter of the WWTP is the sludge age, Θc, which defines the system's efficiency, the evolution of the ecosystem and the balance between the various species of the microorganisms. A different Θc leads to a different composition of the evolved species and the sludge produced has different qualitative and quantitative characteristics. Nowadays, a Θc is imposed, with proper design, for the reduction of the carbon and nitrogen content of the wastewater to meet the effluent requirements. The common practice is to impose large Θc (Θc>15d), i.e. extended aeration systems, which incorporate nitrification – de-nitrification

in order to achieve high carbon and nitrogen reduction. These systems are stable but require large facilities (elevated capital cost) and have great electricity consumption (elevated operating costs) due to the high aeration requirements.

Up until now, no research is done on the total 'clean' energy consumption of a integrated WWTP with energy utilization of the waste activated sludge through pyrolysis-gasification. The present study the focuses on the impact of the various ecosystems, as can be determined in a WWTP, for the net energy production through the pyrolysis-gasification of waste activated sludge.

Waste activated sludge samples of every distinctive Θc (from Θc=1d to Θc=30d) were produced and studied both quantitatively and qualitatively. The sludge samples were fed to an allothermal bench scale batch gasifier and the solid residues (char), the gaseous products (CO_2, H_2, CO, CH_4) and the tar byproduct were both quantitatively and qualitatively analyzed. The results were evaluated with assessment models of the energy efficiency in comparison with the heating value of the sludge sample and were reduced based on the carbon mass content of the influent, in order to obtain comparable quantitative results on the energy efficiency and the imposed Θc. Net energy calculations were made by the deduction of the corresponding energy production to the energy consumption due to aeration demands. In the final stage the results obtained from the pyrolysis-gasification of the sludge were compared against the corresponding calculated net energy production of the sludge incineration.

The present study aims to the energy utilization of the biological sludge that is produced in aerobic wastewater treatment plants through gasification.. The fixed and operational costs are usually estimated on the basis of Θc.

Θc with the produced energy through gasification, two laboratory pilot plants were designed and operated, (i) an aerobic treatment plant, aiming to the production of biological sludge of any desired Θc and (ii) an allothermal bench scale batch gasifier. Sludge samples of Θc =1 , 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 30d were collected and proximate and ultimate analysis was performed. 5 g of this biological sludge of each Θc entered the laboratory gasification unit that was operated under steady conditions: final gasification temperature 820 ^{o}C, nitrogen flow rate 5 L/h and steam flow rate 8 mL/h. The gas products were determined quantitatively and qualitatively. The tar byproduct was measured gravimetrically.

From the results it was concluded that the sludge composition was strongly influenced by Θc. Furthermore, Θc strongly affected the energy production through the gasification of the sludge produced.

The increase of sludge age resulted to the increase of ash content and decrease pf the lower heating value of the sludge produced (7,6 – 31,3 % and 19,6 – 15 kL/g_{db} for Θ_c = 1d and 30d correspondingly). The sludge composition, according to the Van Krevelen diagram, placed the sludge

produced in an uncharted territory far from the common solid fuels. Gasification efficiency presented a decrease in early Θc, from 59% for Θc=1d down to 55% for Θc=5d following a slight but steady rate of increase which resulted in 61% efficiency at Θc=30d. On the contrary, the total energy produced per gram of carbon in the influent of the biological system was constantly reduced from 5.8 kJ/gC_{in} (Θ_c=1d) to 3,7 kJ/gC_{in} (Θ_c=5d) and remaining at the same level for higher Θc. The energy balance from the combination of the energy utilization of the sludge and the energy requirements of an WWTP was proved positive for Θ_c=1d (600kW/kgC_{in}) resulting to negative for Θ_c=30d where the net energy demand was 400kW/kgC_{in}.

The present study proves that the combined biological and thermal unit operates with higher energy efficiencies at lower Θc. Furthermore, gasification of the activated sludge is a most promising method for its utilization and disposal.

.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος i
Περίληψη ii
Abstract v
Εισαγωγή 1
Κεφάλαιο 1 Θεωρητικό Μέρος 6
1.1 Παραγωγή και Διαχείριση ιλύων 6
1.1.1 Ιλύς βιολογικών καθαρισμών 6
1.1.2 Ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά βιολογικών ιλύων 10
1.1.3 Επισκόπηση ευρωπαϊκής νομοθεσία 16
1.1.4 Τεχνικές ελάττωσης παραγόμενης ιλύος 19
1.1.5 Μέθοδοι διάθεσης ιλύων βιολογικών καθαρισμών 20
1.1.5.1 Γεωργική χρήση 21
1.1.5.2 Χρήση σε δασικές εκτάσεις 23
1.1.5.3 Αποκατάσταση εδαφών 24
1.1.5.4 Αναερόβια χώνευση 24
1.1.5.5 Υγειονομική ταφή 25
1.1.5.6 Κομποστοποίηση 27
1.1.5.7 Μέθοδοι ενεργειακής εκμετάλλευσης ιλύος 27
1.1.5.7 1 Καύση 28
1.1.5.7.2 Υγρή οξείδωση (WAO) 31
1.1.5.7.3 Πυρόλυση 32
1.1.5.7.4 Αεριοποίηση 36
1.1.6 Διάθεση βιολογικών ιλύων στην ευρωπαϊκή ένωση 37
1.1.7 Επιλογή αεριοποίησης ως μεθόδου διάθεσης και ενεργειακής εκμετάλλευσης ιλύος 40
1.2 Αεριοποίηση ιλύων βιολογικών καθαρισμών 45
1.2.1 Χημεία της αεριοποίησης 49
1.2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της αεριοποίησης 52
1.2.2 Το αέριο προϊόν αεριοποίησης ιλύων 52
1.2.3 Βαρέα μέταλλα 54
1.2.5 Εργαστηριακές μελέτες αεριοποίησης ιλύων 55
1.2.6 Πιλοτικές διατάξεις αεριοποίησης ιλύων 56
1.3 Συμπεράσματα 58
Κεφάλαιο 2 Πειραματική Διαδικασία 59
2.1 Σκοπός 59
2.2 Συσκευές και Μέθοδοι 61
2.2.1 Εργαστηριακή μονάδα παραγωγής ιλύων 61
2.2.2. Εργαστηριακή Μονάδα Αεριοποίησης 64
2.3 Μέθοδοι αναλύσεων 70

2.3.1 Μέθοδοι ανάλυσης εκροής 70
2.3.1.1 Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) 70
2.3.1.2. Προσδιορισμός Οργανικών Αιωρούμενων Στερεών (VSS) 70
2.3.2 Μέθοδοι ανάλυσης ιλύος 71
2.3.3 Μέθοδοι ανάλυσης προϊόντων αεριοποίησης 72
2.3.3.1 Μέθοδος μέτρησης πισσούχου παραπροϊόντος 72
2.3.3.2 Μέτρηση παροχής και σύστασης αερίου προϊόντος 72

2.4 Πειραματική μεθοδολογία 74

2.4.1 Διαδικασία παραγωγής και συλλογής ιλύων διαφόρων Θ_c 74
2.4.2 Διαδικασία αεριοποίησης 77
2.4.2.1 Πειραματικές συνθήκες 77
2.4.2.2 Πορεία πειράματος – συλλογή αποτελεσμάτων 78

Κεφάλαιο 3 Πειραματικά αποτελέσματα 80
3.1 Αριστοποίηση εργαστηριακού αντιδραστήρα αεριοποίησης 80

3.1.1 Πειραματική μεθοδολογία 80
3.1.2 Συμπεράσματα πειραμάτων αριστοποίησης 82
3.1.3 Πειράματα επιβεβαίωσης. 87

3.2 Αποτελέσματα παραλαβής ιλύων διαφόρων Θ_c 89
3.3 Αποτελέσματα ανάλυσης ιλύων 93
3.4 Αποτελέσματα αεριοποίησης ιλύων 94

Κεφάλαιο 4. Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων 97
4.1 Συσχέτιση σύστασης ιλύος και Θ_c 97
4.2 Συσχέτιση αποτελεσμάτων αεριοποίησης και Θ_c 103

4.2.1 Επεξεργασία πειραμάτων στις συνθήκες πυρόλυσης 103
4.2.3 Επεξεργασία πειραμάτων στις συνθήκες αεριοποίησης 106
4.2.4 Σύγκριση φάσης πυρόλυσης - αεριοποίησης 108

4.3 Ενεργειακή ανάλυση πυρόλυσης - αεριοποίησης 110
4.4 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αεριοποίηση ιλύος συγκεκριμένου Θ_c 112
4.5 Σύγκριση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την αεριοποίηση και την καύση ιλύος συγκεκριμένου Θ_c 115
4.6 Υπολογισμός ενεργειακών απαιτήσεων βιολογικών καθαρισμών 117

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα 122
Βιβλιογραφία 127
Παράρτημα Ι Πειράματα Αεριοποίησης
Παράρτημα ΙΙ Πειράματα Παραγωγής Ιλύος
Παράρτημα ΙΙΙ Μοντέλο Υπολογισμού Ενεργειακής Κατανάλωσης Βιολογικού Καθαρισμού

Εισαγωγή

Η αφύπνιση της περιβαλλοντικής συνείδησης του κοινωνικού συνόλου και κατ' επέκταση των κρατών έχει οδηγήσει, μεταξύ άλλων, και στη θέσπιση αυστηρότερων κανονισμών για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των απορριπτόμενων υδάτων (91/271/EEC). Η αύξηση της παραγόμενης ιλύος από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων, που στη πλειοψηφία τους χρησιμοποιούν συστήματα ενεργούς ιλύος είναι σημαντική. Η ποιοτική αναβάθμιση των απορριπτόμενων υδάτων μετακύλυσε το πρόβλημα στη διάθεση ενός υδαρούς και δύσχρηστου παραπροϊόντος, την ιλύ. Η ιλύς είναι το στερεό υπόλειμμα της επεξεργασίας λυμάτων, όπου διαχωρίζεται το υγρό και στερεό κλάσμα και είναι συνήθως υγρή ή ημι-στερεή, με συγκέντρωση στερεών περίπου 12% κατά βάρος (Metacalf, Eddy, 1991). Η μέση ημερήσια κατά κεφαλή παραγωγή ιλύος στην Ευρώπη ανέρχεται κατά μέσο όρο σε 90 γραμμάρια (Davis, 1996). Η ετήσια παραγωγή ιλύος στην Ευρώπη έχει αυξηθεί την δεκαετία 2000 – 2010 κατά 20% και αναμένεται περαιτέρω αύξηση κατά 15% την δεκαετία 2010 – 2020 (European Commission DG Environment, 2010). Η ποσότητα και η ποιότητα της παραγόμενης ιλύος επηρεάζονται κυρίως από το σχεδιασμό της επεξεργασίας των λυμάτων και το εισερχόμενο οργανικό φορτίο του λύματος (Fytili D et al, 2008). Η τελική διάθεση της ιλύος είναι μια δαπανηρή διεργασία, που αντιστοιχεί στο 25-65% του κόστους λειτουργίας της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων (Perez-Elvira, S.I. et al, 2006), με σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, που ακόμη και σήμερα δεν είναι επακριβώς καθορισμένες.

Οι αρχικές εκτιμήσεις της ευρωπαϊκής ένωσης για την διάθεση της ιλύος στο έδαφος (γεωργία, δασικές εκτάσεις, αποκατάσταση εδαφών) και για την υγειονομική ταφή αποδείχθηκαν εσφαλμένες, κυρίως λόγω των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων. Αρκετά Κράτη Μέλη έχουν αναθεωρήσει τη χρήση των μεθόδων αυτών. Η Κεντρική Επιτροπή της ευρωπαϊκής ένωσης δεν έχει αναθεωρήσει την Οδηγία περί διάθεσης των λασπών την τελευταία δεκαετία, με αποτέλεσμα την έλλειψη ενιαίας

στρατηγικής για την διαχείριση της παραγόμενης ιλύος.(European Commission DG Environment, 2010). Χωρίς μια αξιόπιστη μέθοδο για τη διάθεση της ιλύος η πραγματική έννοια της προστασίας των υδάτων θα αποτύχει. (91/271/EEC).

Το πρόβλημα της βιωσιμότητας των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων εντείνεται λόγω της αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας για τις ανάγκες αερισμού του αερόβιου βιοαντιδραστήρα και την έλλειψης αξιόπιστης μεθόδου διάθεσης της παραγόμενης ιλύος.

Η λύση για την επιτυχή διάθεση της ολοένα και αυξανόμενης ποσότητας της ιλύος καθώς και την πιθανή κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων είναι ο συγκερασμός των μεθόδων διάθεσης της ιλύος. Η συνεχής μετακίνηση του πληθυσμού προς τα αστικά κέντρα καθιστά την θερμική εκμετάλλευση της ιλύος εφικτή. Θα ήταν λογικό, επομένως, να συμπεράνουμε πως ένα σύγχρονο μοντέλο αξιοποίησης της ιλύος θα είχε ως καρδιά την θερμιδική εκμετάλλευσή της, με βέλτιστη διάθεση των παραπροϊόντων από την διεργασία.

Οι τεχνικές ενεργειακής εκμετάλλευσης της ιλύος είναι, η καύση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση. Η μέθοδος που θα επιλεχθεί θα πρέπει να ακολουθεί την διεργασία του βιολογικού καθαρισμού ως αναπόσπαστο κομμάτι, όντας περιβαλλοντικά φιλική και κοινωνικά αποδεκτή, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την βιωσιμότητα της συνδυασμένης λειτουργίας ενός συστήματος επεξεργασίας λυμάτων και ενεργειακής εκμετάλλευσης της περίσσειας ιλύος.

Η καύση παραμένει έως σήμερα η πιο ελκυστική μέθοδος διάθεσης βιολογικών ιλύων. Η καύση της ιλύος αρχικά στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του όγκου του προς διάθεση υλικού, εστιάζοντας κυρίως στην πλήρη αδρανοποίηση της ιλύος και όχι στην παραγωγή ενέργειας. Έτσι, με την καύση επιτυγχάνεται πλήρης διάσπαση όλων των τοξικών και βλαβερών οργανικών ουσιών που περιέχονται στην ιλύ και αποτρέπεται ο επανασχηματισμός τους (Vesilind & Ramsey 1996). Τα συστήματα καύσης με καύσιμο αποκλειστικά την ιλύ ή/και βοηθητικά καύσιμα εκκίνησης είναι τα πλέον διαδεδομένα, ακολουθούμενα από

συστήματα συν-καύσης με αστικά απορρίμματα (Murphy & McKeogh 2006, Lin & Ma, 2012) και γαιάνθρακες (Nadziakiewicz & Kozioł, 2003). Ωστόσο, η καύση της ιλύος δεν αποτελεί μια ολοκληρωμένη μέθοδο διάθεσης καθώς το 30% των στερεών παραμένουν ως τέφρα (Malerius & Werther 2003) με υψηλή περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα(Petersen & Werther, 2005). Οι αέριες εκπομπές, είναι η ιπτάμενη τέφρα και τα οργανικά υπολείμματα, όπως διοξίνες, βαρέα μέταλλα, VOCs, NOx, CO, SO_2 που ενδέχεται να επιφέρουν αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στα οικοσυστήματα. Τέλος, πολύ σημαντική παράμετρος για την υιοθέτηση της καύσης είναι η αυξημένη ανησυχία για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Johnson 1994).

Η πυρόλυση είναι μια θερμική επεξεργασία όπου το οργανικό κλάσμα της ιλύος αποδομείται απουσία οξυγόνου. Η πυρόλυση, σε σύγκριση με την καύση, θεωρείται φιλική προς το περιβάλλον, κυρίως λόγω των αέριων ρύπων, που είναι σημαντικά μικρότεροι (Menendez et al 2002). Το κύριο προϊόν της πυρόλυσης, ως αυτόνομης διεργασίας, είναι το εξαιρετικά δύσχρηστο, μέχρι στιγμής, βιο-έλαιο (Goyal, H. B. et al, 2006), και το στερεό οργανικό υπόλειμμα, στο οποίο και συγκεντρώνονται τα βαρέα μέταλλα (Park et al, 2008, Stammbach et al, 1989), καθιστώντας την ακατάλληλη για την διάθεση του μεγαλύτερου ποσοστού των παραγόμενων ιλύων.

Η αεριοποίηση είναι η θερμοχημική μετατροπή του οργανικού κλάσματος ενός 'καυσίμου' σε αέριο προϊόν, το οποίο αποτελείται κυρίως από H_2, CO, CO_2 και CH_4. Οι χρήσεις του αερίου προϊόντος ποικίλουν ανάλογα με τη σύστασή του (Higman & van der Burgt, 2003). Το αέριο προϊόν είναι φορέας αερίων ρυπαντών όπως H_2S, NH_3 και HCl (Pinto F, et al. 2008)., πισσών αλλά και ιπτάμενης τέφρας, η οποία περιέχει ποσοστό των βαρέων μετάλλων που ενδέχεται να εμπεριέχονται στην ιλύ. Οι πρώτοι ρυπαντές δεσμεύονται εύκολα ενώ η κινητικότητα των βαρέων μετάλλων εμφανίζεται μειωμένη με πολύ μικρή διάχυση των βαρέων μετάλλων στο αέριο προϊόν. (Saveyn et al, 2010, Bool & Helble, 1995, Colbert JW et al 1998, Martin RS et al, 1998, Reed G.P., 2001, Pinto

F, et al. 2008, Frandsen F, et al, 1994, Pinto F, et al, 2007). Επίσης, κατά τη χρήση του αερίου προϊόντος δεν παράγονται οργανικοί αέριοι ρυπαντές (π.χ. πολυχλωριωμένων διφαινυλίων PCBs)(Marrero T et al, 2003). Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του αερίου εξαρτώνται κυρίως από τη σύσταση της πρώτης ύλης αλλά και από την τεχνολογία αεριοποίησης.

Η αξιολόγηση των ανωτέρω τεχνικών οδήγησε στην εκτίμηση ότι οι θερμικές μέθοδοι και ιδιαίτερα η αεριοποίηση είναι σε θέση να διαχειριστούν το σύνολο της παραγόμενης ιλύος προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το κύριο πλεονέκτημα της εφαρμογής της τεχνικής της αεριοποίησης είναι η χρήση της εγγενούς υγρασίας της ιλύος, ελαχιστοποιώντας την σπατάλη ενέργειας για την ξήρανσή της.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει αποφασιστικά την ενεργειακή απόδοση των βιολογικών λασπών με αεριοποίηση είναι τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά τους και τα οποία μεταβάλλονται σημαντικά από τις λειτουργικές παραμέτρους ενός βιολογικού καθαρισμού. Η ισορροπία που επιτυγχάνεται στο οικοσύστημα του βιολογικού καθαρισμού καθορίζεται από την μέση ηλικία της βιολογικής λάσπης (Θc) που επιβάλλεται. Η παράμετρος αυτή είναι η πλέον καθοριστική τόσο για τον σχεδιασμό ενός βιολογικού καθαρισμού όσο και για την αποδοτική λειτουργία του. Ένα διαφορετικό Θc αντιστοιχεί σε διαφορετική σύνθεση πληθυσμών και επομένως σε διαφορετική ποσοτική και ποιοτική σύσταση της παραγόμενης βιολογικής λάσπης. Η επιβολή, με τον κατάλληλο σχεδιασμό, ενός συγκεκριμένου Θc σε έναν βιολογικό καθαρισμό, σήμερα, γίνεται με κριτήρια απαιτήσεων αφομοίωσης του οργανικού διαλυτού άνθρακα και αζώτου. Έτσι συνηθίζεται να εφαρμόζονται αναπτυγμένα οικοσυστήματα με μεγάλο Θc (Θc>15 days), δηλαδή συστήματα «παρατεταμένου αερισμού», τα οποία επιτυγχάνουν μεγάλες αποδόσεις αφομοίωσης άνθρακα και αζώτου. Τα συστήματα αυτά που έχουν επικρατήσει προσφέρουν σταθερότητα λειτουργίας αλλά απαιτούν μεγάλες εγκαταστάσεις (υψηλό πάγιο κόστος) καθώς και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας (υψηλό λειτουργικό κόστος) εξ'

αιτίας των αναγκαίων μεγάλων ποσοτήτων παροχής οξυγόνου για να συντηρηθούν.

Αντικείμενο της μελέτης αποτελεί η έντονη επίδραση του Θc τόσο την ενεργειακή κατανάλωση της επεξεργασίας λυμάτων όσο στην σύσταση της ιλύος. Καθώς, λοιπόν, η τελευταία επηρεάζει την απόδοση της αεριοποίησης, πρέπει να διερευνηθεί η επίδραση του Θ_c στην ολοκληρωμένη θεώρηση ενός συνδυασμένου συστήματος επεξεργασίας λυμάτων και αεριοποίησης της περίσσειας ιλύος προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος είναι η αναζήτηση του πιθανού σημείου θετικού ενεργειακού ισοζυγίου.

Κεφάλαιο 1 Θεωρητικό Μέρος

1.1 Παραγωγή και Διαχείριση ιλύων

Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον από την έντονη δραστηριότητα του ανθρώπου έχουν δώσει έναυσμα σε μια σειρά μελετών, προτάσεων και ενεργειών με στόχο την ορθή διαχείριση των παραπροϊόντων της ανθρώπινης ζωής. Η σύγχρονη αντίληψη των πραγμάτων επιτάσσει την χρήση μεθόδων δημιουργίας ολοκληρωτικών λύσεων σε πάγια προβλήματα τελικής διάθεσης παραπροϊόντων. Ο τελικός στόχος είναι η δημιουργία λύσεων φιλικών προς το περιβάλλον, διατηρώντας την εγγενή ισορροπία της φύσης, οι οποίες θα χαίρουν κοινωνικής αποδοχής, όντας οικονομοτεχνικά άρτιες.

Ένα από τα σημαντικότερα παραπροϊόντα της δραστηριότητας του ανθρώπου είναι η ιλύς, της οποίας η τελική διάθεση είναι μια αρκετά δαπανηρή διεργασία, με σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, που ακόμη και σήμερα δεν είναι επακριβώς καθορισμένες. Χωρίς μια αξιόπιστη μέθοδο για τη διάθεση της ιλύος η πραγματική έννοια της προστασίας των υδάτων θα αποτύχει. *Αειφόρος διαχείριση της ιλύος μπορεί να οριστεί ως μια μέθοδο που να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της αποτελεσματικής ανακύκλωσης των πόρων χωρίς προσθήκη επιβλαβών ουσιών για τον άνθρωπο ή το περιβάλλον* (91/271/EEC).

1.1.1 Ιλύς βιολογικών καθαρισμών

Η απορρύπανση των λυμάτων πραγματοποιείται με τη χρήση φυσικοχημικών ή/και βιολογικών διεργασιών. Οι βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας, και δη η μέθοδος της ενεργού ιλύος, χρησιμοποιούνται ευρέως. Η λειτουργία της μεθόδου της ενεργού ιλύος βασίζεται στην ανάπτυξη κατάλληλων καλλιεργειών από αερόβιους μικροοργανισμούς μέσα σε κατάλληλα διαμορφωμένους αεριζόμενους βιοαντιδραστήρες.

Η πλειοψηφία των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, είτε αστικών είτε βιομηχανικών, χρησιμοποιεί συστήματα ενεργού ιλύος. Η μέθοδος αυτή

είναι πολύ αποτελεσματική ως προς τον καθαρισμό του λύματος αλλά οδηγεί στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ιλύος και στην αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ιλύς είναι το στερεό υπόλειμμα της επεξεργασίας λυμάτων, όπου διαχωρίζεται το υγρό και στερεό κλάσμα. Το επεξεργασμένο υγρό εκρέει σε υδάτινους αποδέκτες, ενώ το στερεό συλλέγεται για περεταίρω επεξεργασία. Η ιλύς που παράγεται από την επεξεργασία των λυμάτων είναι συνήθως υγρή ή ημι-στερεή, με συγκέντρωση στερεών από 1,5% έως 12% κατά βάρος (Metacalf, Eddy, 1991). Η ποσότητα της παραγόμενης ιλύος επηρεάζεται κυρίως από το σχεδιασμό της επεξεργασίας των λυμάτων και το εισερχόμενο οργανικό φορτίο του λύματος (Fytili D et al, 2008)

Η απορρύπανση ενός υγρού αποβλήτου μπορεί να ακολουθήσει μία ή περισσότερες από τις παρακάτω διεργασίες (Metacalf, Eddy, 1991):

- Προεπεξεργασία
- Πρωτογενής επεξεργασία
- Δευτερογενή επεξεργασία
- Τριτογενή επεξεργασία

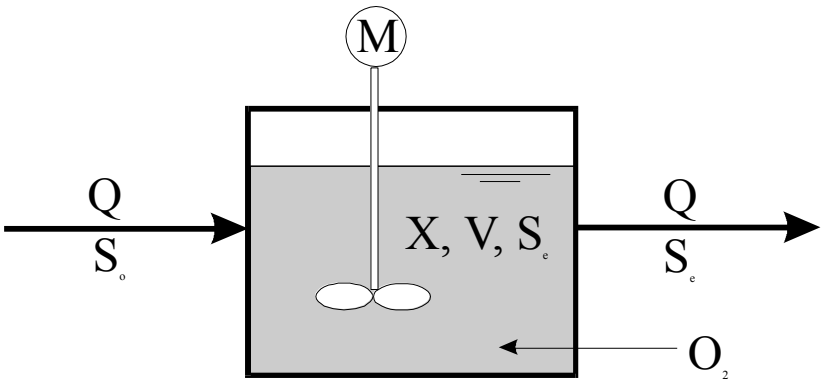
Κατά την *προεπεξεργασία* πραγματοποιείται εσχαρισμός, απομάκρυνση λιπών – ελαίων, άμμου και εξομάλυνση των διακυμάνσεων της παροχής και των ρυπαντικών φορτίων. Τα παραπροϊόντα της προεπεξεργασίας είναι κυρίως τα αδρομερή στερεά, τα λίπη και τα έλαια

Κατά την *πρωτογενή επεξεργασία* γίνεται απομάκρυνση των κολλοειδών διασπορών. Ταυτόχρονα απομακρύνεται και μέρος του BOD καθώς και μέρος των θρεπτικών συστατικών αζώτου και φωσφόρου. Επίσης επιτυγχάνεται και η εξουδετέρωση των αποβλήτων. Τα παραπροϊόντα της πρωτογενούς επεξεργασίας είναι μία πρωτογενής λάσπη η οποία πρέπει να παχυνθεί και να σταθεροποιηθεί.

Η *δευτερογενής επεξεργασία* αποτελεί την ουσιαστική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, καθότι περιλαμβάνει τεχνικές οξείδωσης και σταθεροποίησης τους με απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του

BOD και των θρεπτικών συστατικών. Το προς επεξεργασία λύμα οδηγείται στις δεξαμενές αερισμού. Εκεί, τα ετερότροφα βακτήρια αποδομούν το εισερχόμενο οργανικό φορτίο προς διοξείδιο του άνθρακα και κυτταρική μάζα (βιολογική ιλύ). Τα διαλυτά και κολλοειδή ρυπαντικά φορτία του αποβλήτου (εκπεφρασμένα ως BOD, ολικό άζωτο, ολικός φώσφορος κ.ά.) βιομετατρέπονται σε CO_2, N_2 και νέα κυτταρική μάζα.

Ένας βιοαντιδραστήρας αποδόμησης οργανικού φορτίου με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος, συνεχούς λειτουργίας απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1 Στον αντιδραστήρα αυτόν ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων στερεών Θc, συμπίπτει με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής του αποβλήτου Θ στον αντιδραστήρα:



Σχήμα 1.1: Αντιδραστήρας χωρίς επιστροφή της βιολογικής λάσπης

$$\Theta_C = \frac{\text{ποσότητα MLVSS στον αντιδραστήρα}}{\text{ποσότητα MLVSS ππο εξέρχονται σε μία ημέρα}} = \frac{X \cdot V}{Q \cdot X} = \frac{V}{Q} = \Theta \qquad (2)$$

όπου: Q = παροχή του υγρού αποβλήτου (m^3/d),

MLVSS = συγκέντρωση αιωρούμενων οργανικών στερεών (kg/m^3),

V = όγκος του βιοαντιδραστήρα (m^3),

S_o = συγκέντρωση του BOD_5 στην είσοδο (kg/m^3)

S_e = συγκέντρωση του BOD_5 στην έξοδο και εντός του αντιδραστήρα, εφ΄ όσον είναι πλήρους ανάμιξης, (kg/m^3).

Για την ολοκλήρωση των, όμως, των βιοαντιδράσεων αποικοδόμησης του BOD, ο απαιτούμενος κινητικός χρόνος (υδραυλικός) δεν ξεπερνά τις

δύο ημέρες. Επομένως, πραγματοποιείται ανακυκλοφορία της ιλύος, ώστε να αυξηθεί ο χρόνος παραμονής των στερεών. Επίσης, για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών, εκτός από τα θρεπτικά συστατικά που εμπεριέχονται στα λύματα (C, P, N), είναι απαραίτητη και η παροχή οξυγόνου. Η διάλυση του οξυγόνου γίνεται με ανάλογη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, της οποίας το ύψος εξαρτάται από κυρίως από το Θ_c (Giona & Annesini 1979).

Τέλος, κατά τη *τριτογενή επεξεργασία*, το επεξεργασμένο απόβλητο ραφινάρεται ώστε να μπορεί να διατεθεί στο περιβάλλον σύμφωνα με τις προβλεπόμενες από το Νόμο διατάξεις. Τα προϊόντα της τριτογενούς επεξεργασίας είναι κυρίως ανόργανες λάσπες.

Τυπική σύσταση ιλύος, ρυπαντών και ορίων εκπομπών για όλα τα Κράτη Μέλη μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία (European Commission DG Environment,2001, Erikkson J, 2001). Τυπικά χαρακτηριστικά της ιλύος παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Τυπικά χαρακτηριστικά ιλύος ανάλογα με τον βαθμό επεξεργασίας (European Commission DG Environment ,2010)

Κατηγορία ιλύος		**A**	**B_1**	**B_2**	**C**	**D**
Ξηρά Ουσία (DS)	[kg/m3]	12	9	7	10	30
Πτητική ουσία	[% DS]	65	67	77	72	50
Ph		6	7	7	6,5	7
C	[% VS]	51,5	52,5	53	51	49
H	[% VS]	7	6	6,7	7,4	7,7
O	[% VS]	35.5	33	33	33	35
N	[% VS]	4,5	7,5	6,3	7,1	6,2
C/N		11,4	7	8,7	7,2	7,9
P	[% VS]	2	2	2	2	2
Cl	[% VS]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
K	[% VS]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Al	[% VS]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Ca	[% VS]	10	10	10	10	10
Fe	[% VS]	2	2	2	2	2
Mg	[% VS]	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Λίπη	[% VS]	18	8	10	14	10
Πρωτεΐνες	[% VS]	24	36	34	30	18
Θερμική Ισχύς	[kWh/t DS]	4200	4100	4800	4600	3000

A: πρωτοβάθμια ιλύς, B_1: βιολογική ιλύς (χαμηλή φόρτιση > 0,2 BOD_5/kg MLSS), B_2: βιολογική ιλύς (χαμηλή φόρτιση < 0,2 BOD_5/kg MLSS), C: μικτή ιλύς (πρωτοβάθμια και βιολογική B_2), D: χωνευμένη ιλύς

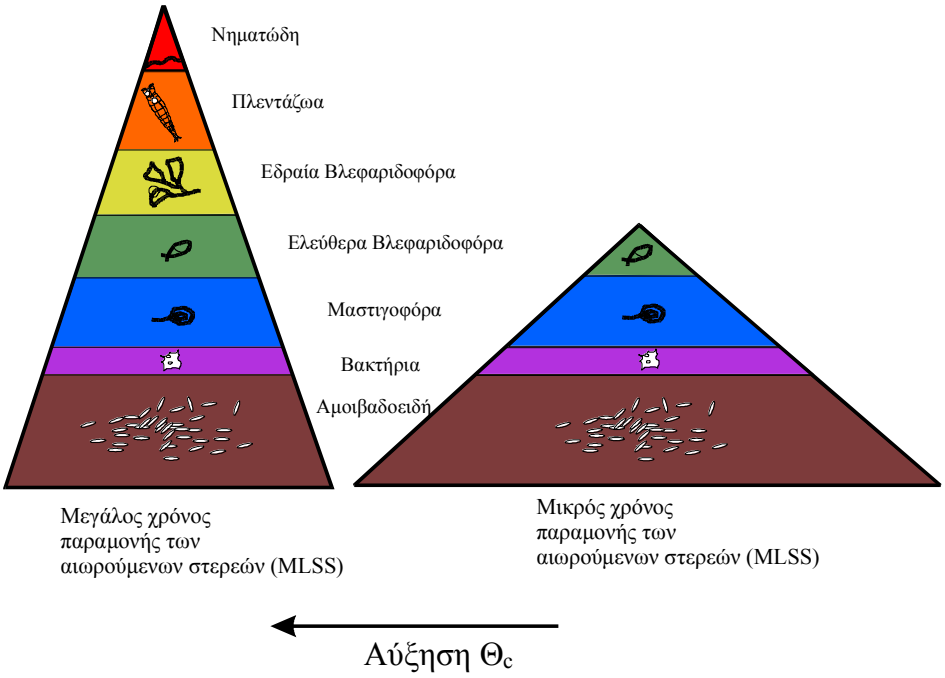
1.1.2 Ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά βιολογικών ιλύων

Η σύσταση της βιολογικής ιλύος εξαρτάται από το ρυπαντικό φορτίο και από το είδος της επεξεργασίας των λυμάτων.

Κατά τη δευτερογενή επεξεργασία των λυμάτων παράγεται η μεγαλύτερη ποσότητα βιολογικής ιλύος. Οι βιολογικές δράσεις αποδόμησης του οργανικού άνθρακα οδηγούν σε δημιουργία δευτερογενούς βιολογικής ιλύος η οποία αντιστοιχεί σε μεγάλο μέρος του εισερχόμενου με το λύμα BOD, φτάνοντας το 60% περίπου. Η σύσταση της ιλύος εξαρτάται από τη σύσταση του λύματος, καθώς σε αυτήν ενσωματώνονται και συσσωρεύονται τα χαρακτηριστικά του, και από το επιβαλλόμενο Θ_c.

Στις δεξαμενές αερισμού δημιουργείται ένα πλήρες οικοσύστημα που απαρτίζεται από ένα πλήθος κατηγοριών μικροοργανισμών, από τους πλέον απλούς, τα βακτήρια, έως τους πλέον σύνθετους, τα πρωτόζωα, οι οποίοι δρουν συνεργατικά ή ανταγωνιστικά μεταξύ τους. Η ηλικία της ιλύος (Θ_c) στην ουσία καθορίζει την βιοποικιλότητα του συστήματος (Saikaly & Oerther, 2004). Σε μικρούς χρόνους παραμονής Θ_c ευδοκιμούν τα βακτήρια, ο κύκλος ζωής των οποίων δεν ξεπερνά τα 20 – 30 λεπτά. Όσο αυξάνεται το Θ_c δημιουργούνται και ανώτερες μορφές ζωής. Παραδοσιακά, τα συστήματα ενεργού ιλύος σχεδιάζονται να λειτουργούν σε υψηλές τιμές Θ_c 30-40d, για τον λόγο ότι τα βακτήρια από μόνα τους, λόγω του μικρού κύκλου ζωής τους, μετατρέπονται σε δευτερογενές COD, ανεβάζοντας και την αντίστοιχη τιμή εξόδου του βιοαντιδραστήρα. Δομώντας, λοιπόν, ένα πληρέστερο οικοσύστημα, οι ανώτεροι μικροοργανισμοί τρέφονται με τα βακτήρια και αυξάνεται η απόδοση του συστήματος στην αφομοίωση του οργανικού φορτίου. Όμως, η αύξηση του Θ_c οδηγεί σε μεγαλύτερες απαιτήσεις οξυγόνου με άμεση συνέπεια την αύξηση κατανάλωσης ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας στα συστήματα ενεργού ιλύος για την ανάδευση και τον αερισμό μπορεί να φτάσει και το 70% της συνολικής κατανάλωσης (Bischof et al, 1996).

Η πυραμίδα ανάπτυξης των μικροοργανισμών (Εικόνα 1.1) του οικοσυστήματος της ενεργούς ιλύος, εξαρτάται από το χρόνο που επιτρέπει το σύστημα να παραμένουν οι μικροοργανισμοί σε αυτό, δηλαδή τον χρόνο παραμονή των αιωρούμενων στερεών - Θ_c, που αποτελεί και τη σημαντικότερη λειτουργική παράμετρο σχεδιασμού της διεργασίας της ενεργού ιλύος. Στην ουσία, το Θ_c προσδιορίζει την βιολογική πολυπλοκότητα του συστήματος. Δεδομένου ότι κάθε ομάδα μικροοργανισμών έχει και διαφορετική χημική σύσταση αλλά και ανόργανο περιεχόμενο, η επίδραση του Θ_c στην τελική σύσταση της ιλύος είναι μεγάλη. Στην βιβλιογραφία, όμως, δεν έχει γίνει σαφής καταγραφή της συσχέτισης της σύστασης της ιλύος και του Θ_c, παρά το γεγονός ύπαρξης μεγάλου όγκου βιβλιογραφίας των εμπεριεχομένων ειδών μικροοργανισμών. (Morgan, G, 2000, Ejsmont-Karabin J., et al, 2004, Jensen, T.C., et al, 2006, Lukomski, N. 2008, Koichi, A. , 2007, Gerardi, M.H., ,2006, Biology Directory (DG III), Akarsubasi, A.T., et al, 2009)



Εικόνα 1.1. Επίδραση του χρόνου παραμονής των αιωρούμενων στερεών Θc στο οικοσύστημα του βιολογικού καθαρισμού (Βλυσίδης, Α. 2004)

Η ιλύς περιέχει μεγάλο αριθμό πολύτιμων συστατικών, υψηλή θερμική αξία αλλά και ρυπαντές. Πολλά από τα χημικά συστατικά, συμπεριλαμβανομένων των θρεπτικών, είναι σημαντικά στον καθορισμό της τελικής διάθεσης της ιλύος αλλά και της περαιτέρω επεξεργασία της. Τα θρεπτικά είναι η οργανική ύλη, το άζωτο, ο φώσφορος και το κάλιο και σε μικρότερη κλίμακα το ασβέστιο, το θείο και το μαγνήσιο. Οι ρυπαντές είναι τα βαρέα μέταλλα, οι οργανικοί ρυπαντές και τα παθογόνα, που απαιτούν προσεκτική και ασφαλή διάθεση.

Λόγω των φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στα συστήματα ενεργού ιλύος, παρατηρείται συσσώρευση βαρέων μετάλλων, που περιέχονται στα υγρά απόβλητα καθώς και στην παραγόμενη ιλύ. Βαρέα μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος (Zn), ο χαλκός (Cu), το νικέλιο (Ni), το κάδμιο (Cd), ο μόλυβδος (Pb), ο υδράργυρος (Hg) και το χρώμιο (Cr) είναι τα κύρια στοιχεία που περιορίζουν τη χρήση της ιλύος στη γεωργία (Hsiau, 1998). Υπάρχουν τρεις κύριες πηγές βαρέων μετάλλων στην ιλύ των λυμάτων: τα αστικά λύματα, οι απορροές των δρόμων και τα βιομηχανικά απόβλητα. Η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων στην ιλύ ποικίλει και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την βιομηχανική συνιστώσα των ανεπεξέργαστων λυμάτων. Η εδαφική χρήση επηρεάζει τις ιδιότητες του εδάφους, τους μικροοργανισμούς, την ανάπτυξη των φυτών, την ζωική παραγωγή και ανεβαίνοντας την τροφική αλυσίδα, τον άνθρωπο. Επίσης, παρατηρείται συσσώρευση βαρέων μετάλλων στους υδάτινους αποδέκτες καθώς τα βαρέα μέταλλα παρασύρονται με τον φυσικό κύκλο του νερού. Ακόμα, κατά την καύση της ιλύος εκπέμπονται σημαντικές ποσότητες βαρέων μετάλλων στην ατμόσφαιρα. Έτσι, ο ανθρώπινος οργανισμός βάλλεται και από τις τρεις διόδους μόλυνσης. Η δυνητική συσσώρευση τους στους ιστούς του ανθρώπου μέσω της τροφικής αλυσίδας δημιουργήσει ανησυχίες (Krogmann U, 1999).

Η χημική μορφή των μετάλλων καθορίζει τόσο την κινητικότητά τους όσο και την οικοτοξικότητά τους (Zufiaurre R, et al. 1998, Su & Wong, 2003, Fuentes A, et al. 2004, Fuentes A, et al. 2004). Επομένως, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση τις εξέλιξης των χημικών μορφών των

βαρέων μετάλλων κατά τη διαχείριση και διάθεση της ιλύος, ώστε να προκύψουν δεδομένα βιο-διαθεσιμότητας και τοξικότητας για την επιλογή της βέλτιστης διαχείρισης (Forstner U., 1993, Alvarez & Mochon 2002.). Σε αρκετές μελέτες έχουν υπολογιστεί τόσο ποιοτικά όσο ποσοτικά η βιο-διαθεσιμότητα των βαρέων μετάλλων και η δυνιτική κινητικότητά τους στο έδοφος. (Tessier A, et al, 1979, Forstner & Salomons, 1980, Vieira J, et al. 1993, Hsiau & Lo, 1998, Alvarez AE, et al. 2002, Fuentes A, et al. 2004). Παρόλα αυτά, η επιστημονική κοινότητα δεν είναι πεπεισμένη για την ικανότητα καθολικής χρήσης των ευρημάτων των μελετών (Tessier A, et al, 1979, Forstner & Salomons 1980). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων είναι αρκετά δύσκολη, καθώς οι μετρήσεις επηρεάζονται από το αρχικό φορτίο και τις διάφορες επεξεργασίες της ιλύος πριν την τελική διάθεση (Lake DL, et al, 1984, Carlson & Morrison, 1992, Vieira J et al, 1993, Tack F, et al, 1996).

Τυπικές συγκεντρώσεις μετάλλων παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα1.2

Πίνακας 1.2 Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στην ιλύ

Μέταλλα	**Όρια 86/278/EEC**	**Ξηρή ιλύς (mg/kg)**	**Μέση τιμή**
As		1,1 - 230	10
Cd	20-40	1 - 3,41	10
Cr	-	10 – 990.000	500
Co		11,3 – 2.490	30
Cu	1.000-1.750	84 – 17.000	800
Fe		1.000 – 154.000	17.000
Pb	750-1.200	13 – 26.000	500
Mn		32-9.870	260
Hg	16-25	0,6-56	6
Mo		0,1-214	4
Ni	300-400	2-5.300	80
Se		1,7-17,2	5
Sn		2,6-329	14
Zn	2.500-4.000	101-49.000	1.700

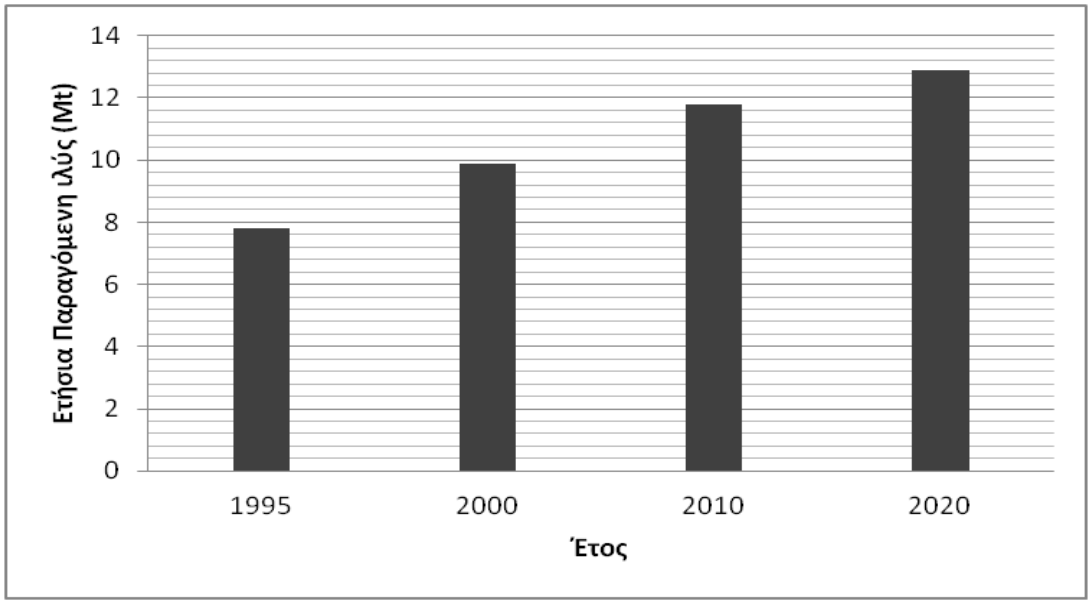
Πηγή: (Fytili, D et al, 2008)

Οι παραγόμενες ποσότητες ιλύος σε κάθε κράτος είναι άμεσα συνδεδεμένες με τον όγκο και τα χαρακτηριστικά των λυμάτων (Πίνακας 1.3).

Οι ακόλουθοι παράγοντες καθορίζουν την παραγωγή ιλύος, ήτοι:

- το μέγεθος του πληθυσμού,
- το ποσοστό του πληθυσμού που συνδέεται με το αποχετευτικό σύστημα
- το επίπεδο της επεξεργασίας των αστικών λυμάτων,
- το είδος της επεξεργασίας ιλύος που εφαρμόζεται,
- και το μέγεθος και τον αριθμό των βιομηχανιών που συνδέονται με το αποχετευτικό σύστημα.

Η συνολική παραγωγή ιλύος στην ΕΕ των 27 (Σχήμα 1.2) για το έτος 1995 ήταν 7,8 Mt σε ξηρή βάση. Η ποσότητα αυτή ανήλθε στους 9,9 Mt το 2000 για να φτάσει τους 11,8 Mt το 2010, με πρόβλεψη για 12,9 το 2020 (European Commission DG Environment, 2010). Οι παραπάνω ποσότητες πιθανόν να είναι υποτιμημένες, καθώς δεν είχαν κοινοποιήσει μέχρι σήμερα στοιχεία όλα τα κράτη μέλη της Επιτροπής.



Σχήμα 1.2 Συνολική παραγωγή ιλύος στη διευρυμένη Ευρωπαϊκή Ένωση

Πίνακας 1.3 Πληθυσμιακά στοιχεία επεξεργασίας αστικών λυμάτων

	Ποσοστό Πληθυσμού συνδεδεμένο με Ε.Ε.Λ. (%)		**Παραγωγή ιλύος από Ε.Ε.Λ. (kg/άτομο)**		**Πληθυσμός (x10⁶)**
	Έτος		**Έτος**		
F. Y. R.o.M.	2009	55	-	-	2,05
Αυστρία	2008	93	2008	30	8,3
Βέλγιο	2008	88	2008	13	9,5
Βουλγαρία	2009	70	2009	5	7,6
Γαλλία	2004	82	2008	17	64,4
Γερμανία	2007	96	2006	25	82,2
Δανία	1998	89	2009	20	5,5
Ελβετία	2005	97	2006	28	7,6
Ελλάδα	2009	87	2009	13	11,1
Εσθονία	2009	81	2009	16	1,3
Ιρλανδία	2005	95	2007	20	4,5
Ισλανδία	2005	90	2003	4	0,3
Ισπανία (*)	2006	23	2009	26	46,0
Ιταλία	2005	94	2005	18	59,6
Κροατία	-	-	-	-	4,4
Κύπρος	2005	30	2007	10	0,77
Λετονία	2007	71	2007	10	2,3
Λιθουανία	2009	62	2009	15	3,4
Λουξεμβούργο	2003	95	2008	26	0,48
Μάλτα	2009	98	2009	2	0,4
Μαυροβούνιο	-	-	-	-	0,6
Μεγάλη Βρετανία (*)	2006	25	2009	29	61
Νορβηγία	2007	83	-	-	4,7
Ολλανδία	2009	99	2008	22	16,5
Ουγγαρία	2006	65	2007	26	10
Πολωνία	2009	62	2009	15	38,1
Πορτογαλία	2008	78	2007	18	10,6
Ρουμανία	2009	43	2009	6	21,5
Σλοβακία	2007	58	2005	10	5,4
Σλοβενία	2009	63	2009	13	2,0
Σουηδία	2004	86	2009	23	9,2
Τουρκία	2008	73	-	-	71,5
Τσεχία	2008	81	2008	21	10,5
Φιλανδία	2002	81	2000	31	5,2

Πηγή: European Commission, EUROSTAT, Water Statistics, 2011
(*)European Commission DG Environment, 2010

1.1.3 Επισκόπηση ευρωπαϊκής νομοθεσία

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει σημειώσει πρόοδο στην αντιμετώπιση των αστικών λυμάτων, στοχεύοντας, παράλληλα, σε σημαντικότερη πρόοδο κατά τα επόμενα 15 χρόνια. Επί του παρόντος, οι πιο ευρέως διαθέσιμες επιλογές διάθεσης ιλύος στην Ε.Ε. είναι η αξιοποίηση της γεωργίας, οι χώροι υγειονομικής ταφής, η ανάκτηση της γης και την αποκατάσταση, την καύση και άλλες καινοτόμες μέθοδοι. Η επιλογή πραγματοποιείται σε τοπική βάση, σύμφωνα με τις τοπικές ή εθνικές, πολιτιστικές, ιστορικές, γεωγραφικές, νομικές, πολιτικές και οικονομικές συνθήκες. Ο βαθμός ευελιξίας ποικίλλει από χώρα σε χώρα. Σε κάθε περίπτωση, η επεξεργασία και η διάθεση της ιλύος θα πρέπει πάντα να θεωρείται ως αναπόσπαστο μέρος της επεξεργασίας των λυμάτων. Η πορεία της αντιμετώπισης του προβλήματος της διάθεσης της ιλύος απεικονίζεται στη σειρά θέσπισης Οδηγιών.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 2 δεκαετιών, η εξέλιξη της στρατηγικής επεξεργασίας λυμάτων χαρακτηρίζεται από μια συνεχή προσπάθεια για τη βελτίωση της ποιότητας των λυμάτων, ξεκινώντας από τον εκσυγχρονισμό των υφιστάμενων εγκαταστάσεων επεξεργασίας και συνεχίζοντας στο σχεδιασμό και την εφαρμογή νέων, πιο αποτελεσματικών μονάδων επεξεργασίας. Η προσπάθεια αυτή ενισχύθηκε με την επιβολή αυστηρότερων μέτρων σχετικών με την απόρριψη τοξικών ρύπων στο αποχετευτικό δίκτυο βιομηχανικών και αστικών λυμάτων.

Παράλληλα με τη βελτίωση της ποιότητας εκροής, παρατηρείται μια αυξανόμενη συνειδητοποίηση των προβλημάτων που συνδέονται με τη ιλύ που παράγεται κατά τη διαδικασία επεξεργασίας των λυμάτων. Συγκεκριμένα, τα προβλήματα που παρουσιάζονται είναι η συνεχής αύξηση της παραγωγής ιλύος, το υψηλό κόστος της επεξεργασίας της και οι πιθανοί κίνδυνοι που μπορεί να παρουσιαστούν τόσο για το περιβάλλον όσο και για την ανθρώπινη υγεία.

Οι ενέργειες αυτές έχουν οδηγήσει στην ευαισθητοποίηση των Κρατών Μελών σε ότι αφορά την προστασία του περιβάλλοντος με έμπρακτο τρόπο, όπως με τη δημιουργία βάσης δεδομένων συστάσεων και χρήσεων της ιλύος καθώς και ελεγκτικών μηχανισμών ορθής διάθεσης. Στόχος της Ε.Ε. είναι η αποτελεσματική διάθεση των λυμάτων και η εφαρμογή βιώσιμων τεχνολογιών, άριστων προς κάθε περίπτωση, με έμφαση στη μείωση των εκπομπών ρύπων.

Οι σημαντικότερες Οδηγίες που αφορούν στη διαχείριση αστικών λυμάτων και στοχεύουν στην αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων, παρατίθενται εν συντομία:

- Με την Οδηγία **76/431/EEC** : ένα πλαίσιο διαχείρισης απορριμμάτων με περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο.
- Με την Οδηγία **86/278/EEC** : καθορίζονται ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια για την τη χρήση ιλύος στη γεωργία και οριακές τιμές συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων και οι μέγιστες επιτρεπόμενες ετήσιες φορτίσεις.
- Η Οδηγία **1989/369/EC** στοχεύει στην πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλείται από τις νέες εγκαταστάσεις καύσης αστικών απορριμμάτων.
- Η Οδηγία πλαίσιο για τη διαχείριση των αποβλήτων **91/156/EEC** (με αναθεώρηση την 75/442/EEC) επισημοποιεί την ιεράρχηση της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων. Περιγράφεται και καθορίζεται πλήρως ο όρος «απόβλητο».
- Στο το Άρθρο 14 της Οδηγίας **91/271/EEC** περί Αστικών Λυμάτων, όπως τροποποιήθηκε από την 98/15/EC και τέθηκε σε ισχύ το 2005, δηλώνεται ότι *'η λάσπη που προέρχεται από του βιολογικό καθαρισμό αστικών λυμάτων θα πρέπει να επαναχρησιμοποιείται όπου αυτό είναι δυνατόν'* και υποχρεώνει τα Κράτη Μέλη να σταματήσουν την απόρριψή της στη θάλασσα με οποιονδήποτε τρόπο. <u>Απόρροια της εφαρμογής της Οδηγίας ήταν η δραματική αύξηση της παραγωγής ιλύος</u>.

- Με την Οδηγία **91/676/EEC** απαιτείται η αναγνώριση ευπαθών ζωνών για την προστασία των υδάτων από τη ρύπανση που προκαλείται από τη χρήση νιτρικών λιπασμάτων στη γεωργία και.
- Η οδηγία **1999/31/EC** περί υγειονομικής ταφής απορριμμάτων στοχεύει στη μείωση της ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων που οδηγούνται στους Χ.Υ.Τ.Α. και απαγορεύει την ταφή υγρών αλλά και μη επεξεργασμένων αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης και της ιλύος των βιολογικών καθαρισμών. Επίσης, η ιλύς που παράγεται κατά την επεξεργασία αστικών λυμάτων χαρακτηρίζεται ως μη επικίνδυνο απόβλητο το οποίο όμως πρέπει να υποβάλλεται σε έλεγχο πριν από τη διάθεση του.
- Η Οδηγία **2000/76/EC** έθεσε ως στόχο την μείωση των εκπομπών διοξινών κατά 90% στις μονάδες καύσης.
- Η Οδηγία **2003/33/ EC** όπου καθορίζονται κριτήρια και διαδικασίες αποδοχής των αποβλήτων στους χώρους ταφής.
- Με την Οδηγία **2006/118/EC** καθορίστηκαν κριτήρια και περιορισμοί χρήσης της ιλύος στο έδαφος, ώστε να περιοριστεί η διασπορά παθογόνων στα υπόγεια ύδατα.
- Με την Οδηγία **2008/105** ορίστηκαν αυστηρότερα μέτρα ποιότητας ιλύος.

Οι Οδηγίες που έχουν τη μεγαλύτερη βαρύτητα στη διαμόρφωση της υφιστάμενης κατάστασης στην ευρωπαϊκή ένωση είναι η 86/278/EEC και η 91/271/EEC. Η πρώτη Οδηγία ενθαρρύνει και κατευθύνει τα Κράτη Μέλη στη χρήση της ιλύος κυρίως στη γεωργία ενώ η δεύτερη θεσπίζει πιο αυστηρά κριτήρια ποιότητας για τον καθαρισμό των υδάτων οδηγώντας έτσι στην αύξηση της παραγωγής ιλύος. Καθώς το πρόβλημα της διάθεσης της ιλύος διογκωνόταν, οι Οδηγίες που ακολούθησαν όχι μόνο δεν έδωσαν λύση ή/και διαφορετική κατεύθυνση, αλλά περιόρισαν τις συνήθεις πρακτικές, όπως αυτής της υγειονομικής ταφής (1999/31/EC). Παράλληλα, παρατηρήθηκε μια ανομοιομορφία στην υιοθέτηση των Οδηγιών από τα Κράτη Μέλη, που οφειλόταν κυρίως στις

εσωτερικές διοικητικές τους δομές αλλά και στο τεχνολογικό επίπεδο που βρίσκονταν. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, έχοντας γνώση των παραπάνω, βρίσκεται στη διαδικασία επαναξιολόγησης της υφιστάμενης Οδηγίας για την ιλύ, που όμως δεν έχει πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα, παρά την έναρξη των διαδικασιών από το 2000. (European Commission DG Environment, 2010, Annon, 2000, European Commission DG Environment Part II, 2001)

1.1.4 Τεχνικές ελάττωσης παραγόμενης ιλύος

Το εύρος των πιθανών επιλογών αντιμετώπισης του προβλήματος παραγωγής ιλύος μπορεί να χωριστεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες (α) οι διαδικασίες που μπορούν να εφαρμοστούν σε νέες εγκαταστάσεις και (β) οι διαδικασίες που μπορούν να εφαρμοσθούν σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (Perez-Elvira, et al. 2006).

Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται νέες τεχνολογίες που στηρίζονται στην ελάττωση του συνόλου της ποσότητας της ιλύος που εξέρχεται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Στηρίζονται σε φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες, οι οποίες εφαρμόζονται παράλληλα με την πορεία απορρύπανσης του λύματος. Οι τεχνολογίες αυτές είναι η κυτταρική λύση, οι βιο-αντιδραστήρες με ταυτόχρονη χρήσης μεμβρανών (Ghyooy W & Verstraete W, 2000), η αναχαίτιση κυτταρικής αναπαραγωγής και η χρήση ανώτερων οργανισμών που τρέφονται από την ιλύ. Κατά την κυτταρική λύση η παραγόμενη ενεργή ιλύς καταστρέφεται και τροφοδοτείται στη δεξαμενή αερισμού. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται είναι οζονισμός (Egemen E, 2001), και η χλωρίωση (Saby S, 2002) της ενεργού ιλύος, ο συνδυασμός ήπιας θερμικής και χημικής επεξεργασίας (Canales A et al 1994, Rocher M et al 2001) και ο αερισμός με χρήση υψηλής καθαρότητας οξυγόνο (Abbassi B, et al 1999). Η αναχαίτιση κυτταρικής αναπαραγωγής (uncoupled metabolism) επιτυγχάνεται με χρήση χημικού παρεμποδιστή (Chen GH, et al 2002) ή σε οξικές – αναερόβιες δεξαμενές (Oxic – settling – anaerobic process) (Chen GH, et al 2003).

Στην δεύτερη κατηγορία εντάσσονται διεργασίες που ακολουθούν την υφιστάμενη διάταξη των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και στοχεύουν στην χρήση του συνόλου της παραγόμενης ιλύος. Μπορούν να διαχωριστούν σε δύο υποκατηγορίες: (α) προετοιμασία της ιλύος και (β) τελική διάθεση. Στην (α) υποκατηγορία συναντώνται φυσικές, χημικές, βιολογικές και συνδυασμένες τεχνικές προκατεργασίας της ιλύος με στόχο την αναερόβια χώνευσή της. Η (β) υποκατηγορία περιλαμβάνει τελικές λύσης αντιμετώπισης του προβλήματος, όπως η καύση, η υγρή οξείδωση (WAO), η υπερκρίσιμη υγρή οξείδωση (SCWO) και η πυρόλυση / αεριοποίηση.

Οι διεργασίες που εντάσσονται στην πρώτη κατηγορία και εφαρμόζονται στη πορεία επεξεργασίας του εισερχόμενου λύματος, ενώ παρουσιάζουν πληθώρα επιλογών, δεν είναι σε ευρεία εφαρμογή. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στη δυσκολία εισαγωγής καινοτομιών στην πραγματική αγορά, καθώς το χρονικό διάστημα από το στάδιο της έρευνας στην εφαρμογή είναι συχνά πολύ μεγάλο και το κόστος επένδυσης των νέων διαδικασιών είναι αρκετά υψηλό.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει διεργασίες που μπορούν κάλλιστα να εφαρμοστούν σε υφιστάμενη μονάδα. Περιλαμβάνουν απλές συσκευές που δεν αλλοιώνουν το αρχικό διάγραμμα ροής. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να βρουν ευρεία εφαρμογή (Perez-Elvira, et al. 2006). Η ταυτόχρονη απαίτηση μείωσης της καταναλισκόμενης ενέργειας και αύξησης του ποσοστού χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οδηγούν στην χρήση των μεθόδων που μπορούν να εκμεταλλευτούν την περιεχόμενη στην ιλύ θερμική ενέργεια.

1.1.5 Μέθοδοι διάθεσης ιλύων βιολογικών καθαρισμών

Οι παραδοσιακές μέθοδοι διάθεσης της περίσσειας ιλύος είναι:

1. Γεωργική χρήση (λίπασμα, εδαφοβελτιωτικό)
2. Κομποστοποίηση με άλλα οργανικά απόβλητα
3. Αναερόβια χώνευση

4. Καύση (συν –καύση, χρήση στην τσιμεντοβιομηχανία)
5. Υγειονομική ταφή
6. Άλλες μέθοδοι (υγρή οξείδωση, πυρόλυση, αεριοποίηση)

Σύντομη περιγραφή καθώς και αποτύπωση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της κάθε μεθόδου παρατίθενται παρακάτω.

1.1.5.1 Γεωργική χρήση

Η διάθεση της ιλύος στο έδαφος είναι μια μέθοδος ανακύκλωσης των συστατικών της ιλύος με γεωργική αξία. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται, έως σήμερα, ευρέως από τα Κράτη Μέλη. Όλα τα είδη της ιλύος (υγρή, ημι-στερεή, στερεή και ξηραμένη ιλύς) δύναται να εφαρμοστούν στο έδαφος. Η χρήση κάθε είδους εμπεριέχει πρακτικούς περιορισμούς στην αποθήκευση, μεταφορά και στη μέθοδο εφαρμογής. Η ιλύς χρησιμοποιούταν στη γεωργία αντικαθιστώντας, λιγότερο ή περισσότερο, τα βιομηχανικά λιπάσματα (Smith, 1996). Όμως, η διακινδύνευση της διασποράς εξαιρετικά παθογόνων μικροοργανισμών θέτει σε νέα βάσει την εφαρμογή της.

Η ιλύς αποτελεί πηγή οργανικής ύλης, βελτιώνοντας τις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες των εδαφών, και τη γονιμότητά τους (Metacalf & Eddy, 1991). Το άζωτο και ο φώσφορος είναι πολύ σημαντικά στοιχεία στην ανάπτυξη τω φυτών. Το άζωτο βρίσκεται στην ιλύ είτε χημικά δεσμευμένο σε οργανική μορφή είτε σε αμμωνιακή μορφή. Η θρεπτική αξία του αζώτου έγκειται στην ικανότητα των φυτών να το απορροφήσουν. Η περιεκτικότητα της ιλύος σε φώσφορο εξαρτάται από την μέθοδο επεξεργασίας των λυμάτων. (Αγγελάκης Α., 2005). Η οργανική ύλη που περιέχεται στην ιλύ ενισχύει τη δημιουργία δεσμών μεταξύ των κόκκων του εδάφους και βελτιώνει την δομή του και κατά συνέπεια την αντοχή του εδάφους σε διάβρωση. Όμως, η συγκέντρωση αζώτου, φωσφόρου και καλίου είναι μικρότερη, σε σχέση με τα βιομηχανικά λιπάσματα. Επίσης, τα θρεπτικά συστατικά είναι ενωμένα με το οργανικό κλάσμα και αφομοιώνονται από τα φυτά μόνο μετά την αποικοδόμηση του οργανικού κλάσματος από τους μικροοργανισμούς του εδάφους. Ακόμη, βρίσκονται

σε μορφή μη διαλυτή στο νερό και η ελευθέρωση τους είναι μια αργή διαδικασία.

Αρνητικές επιπτώσεις της εφαρμογής της ιλύος προκαλούνται από τη διάθεση ρυπαντών στο έδαφος, στον αέρα και στο νερό. Οι ρυπαντές αυτοί μπορούν να μεταφερθούν στον αέρα και στους υδάτινους αποδέκτες με αποτέλεσμα την εισαγωγή τους στην τροφική αλυσίδα (Van Den Berg, JJ, 1993). Τέλος οχλήσεις αλλά κυρίως διασπορά ποθογόνων μικροοργανισμών δύναται να προκύψουν στην περίπτωση εφαρμογής μη σταθεροποιημένης ιλύος.

Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία (ΚΥΑ 80568/4225/1991, Άρθρο 5), η γεωργική χρήση της ιλύος υπόκειται σε αρκετούς περιορισμούς. Για την διάθεση της ιλύος στην γεωργία θα πρέπει να εξασφαλίζεται η περιορισμένη εισαγωγή βαρέων μετάλλων στην αγροτική γη, η χαμηλή συγκέντρωση συνθετικών οργανικών ενώσεων στην ιλύ, ελάχιστη έως μηδενική έκθεση σε παθογενείς μικροοργανισμούς, η προστασία των υπογείων και επιφανειακών υδάτων από την διασπορά της ιλύος στην επιφάνεια και η αποφυγή δημιουργίας ενοχλητικών συνθηκών, όπως είναι τα οσμοαέρια. Νέα προσπάθεια ενίσχυσης και ενημέρωσης της εθνικής νομοθεσίας πραγματοποιείται από το Υπουργείο Π.Ε.Κ.Α. (Δημόσια διαβούλευση επί σχεδίου ΚΥΑ, 2012).

Τα βαρέα μέταλλα, που εν΄δεχεται να περιέχονται στην ιλύ (Πίνακας 1.2) όπως ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και το νικέλιο προκαλούν φυτοτοξικότητα. Ακόμη, το κάδμιο μπορεί να δημιουργήσει σημαντικούς κινδύνους στην δημόσια υγεία, αφού λόγω της μικρής προσροφητικότητάς του στο έδαφος είναι δυνατή η συσσώρευσή του στην φυτική μάζα, με αποτέλεσμα την είσοδό του στην τροφική αλυσίδα. Στην ΚΥΑ 80568/4225/91 καθορίζονται οι οριακές τιμές συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στο έδαφος και στην ιλύ, καθώς και οριακές τιμές στις στο τελικό προϊόν, μετά την κομποστοποίηση. Επισημαίνεται επίσης ότι, σύμφωνα με το τρίτο σχέδιο Αναθεώρησης της Οδηγίας 86/278/ΕC οι οριακές τιμές που καθορίζονται για τις παραπάνω παραμέτρους είναι σημαντικά μικρότερες από τις υφιστάμενες.

Η κύρια πηγή ρύπανσης των υπόγειων υδάτων είναι τα νιτρικά, που ενδέχεται να οδηγήσει σε ευτροφισμό (Van Den Berg, JJ, 1993).

Η βασική όχληση που μπορεί να προκληθεί κατά την διαχείριση και διάθεση της ιλύος αφορά τα εκλυόμενα οσμοαέρια. Αιτία των δυσοσμιών είναι η βιολογική δράση που λαμβάνει χώρα στη μάζα της μη σταθεροποιημένης ιλύος. Το πρόβλημα των οσμών εντείνεται κατά την αποθήκευση της ιλύος πριν τη χρήση της καθώς η εφαρμογή στη γεωργία είναι εποχική. Η μείωση της έκλυσης οσμών αντιμετωπίζεται με χρήση προηγμένης επεξεργασίας πριν τη διάθεση.

1.1.5.2 Χρήση σε δασικές εκτάσεις

Η χρήση της ιλύος σε δασικές εκτάσεις μοιάζει να είναι μία εναλλακτική της επαναχρησιμοποίησης στη γεωργία, ωστόσο υπάρχουν σημαντικές διαφορές, οι οποίες οφείλονται κυρίως στην ιδιαιτερότητα των ειδών που αναπτύσσονται σε κάθε περίπτωση.

Από οικονομική άποψη η μέθοδος αυτή είναι δελεαστική ιδιαίτερα σε διαθέσιμες εκτάσεις πλησίον της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων. Επισημαίνεται πάντως ότι είναι σχετικά μικρές οι ποσότητες της ιλύος που μπορούν να εφαρμοστούν.

Η εφαρμογή της ιλύος σε δασικές εκτάσεις δεν έχει διερευνηθεί στον ίδιο βαθμό με την επαναχρησιμοποίηση στη γεωργία και για τον λόγο αυτό περιορισμένες βιβλιογραφικές πληροφορίες είναι διαθέσιμες. Σε δασικές εκτάσεις, μετά την εφαρμογή ιλύος από την επεξεργασία των λυμάτων, έχει παρατηρηθεί βελτίωση της απόδοσης. Ωστόσο, τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τα είδη καθώς και από τις τοπικές συνθήκες. Ένα επιπλέον όφελος, είναι η βελτίωση της σύστασης του εδάφους (ειδικά σε Ca, Mg, S και λοιπά ιχνοστοιχεία), καθώς τα δασικά εδάφη είναι συχνά ιδιαίτερα φτωχά σε αυτά τα συστατικά. Μεγάλος ρυθμός εφαρμογής υγρής ιλύος μπορεί να δημιουργήσει πυκνό, χωρίς πόρους εδαφικό στρώμα με ανάπτυξη αναερόβιων συνθηκών, αποσυνθέτοντας το ανώτερο εδαφικό στρώμα και μειώνοντας τη μικροβιακή δραστηριότητα.

Οι εκπομπές στο έδαφος, τον αέρα και το νερό καθώς και οι λοιπές περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι παρόμοιες με αυτές που αφορούν την εφαρμογή της ιλύος στη γεωργία. Οι δασικές εκτάσεις είναι πολλές φορές όξινες, με αποτέλεσμα την αύξηση της κινητικότητας των μετάλλων. Σημειώνεται ότι οι κίνδυνοι είναι πολύ μικρότεροι, αφού τα δασικά προϊόντα αποτελούν ένα πολύ μικρό μέρος της ανθρώπινης διατροφής. Ωστόσο, τα βαρέα μέταλλα και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί των μη σταθεροποιημένων ιλύων ενδέχεται να μεταφερθούν σε διάφορα είδη θηραμάτων και σε κάποια βρώσιμα είδη μανιταριών. Επίσης έχουν αναφερθεί και κάποιες έμμεσες επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και στα ενδιαιτήματα.

1.1.5.3 Αποκατάσταση εδαφών

Η διάθεση της ιλύος για την αποκατάσταση εγκαταλελειμμένων εκτάσεων, όπως είναι τα λατομεία, αποσκοπεί στην προστασία των εκτάσεων αυτών από την διάβρωση και στον εμπλουτισμό τους με θρεπτικά και οργανική ύλη.

Η ιλύς μπορεί είτε να εφαρμοσθεί απ' ευθείας πριν την μίξη με το υφιστάμενο έδαφος είτε να γίνει μίξη με το χώμα πριν την εφαρμογή της. Η ποσότητα της ιλύος που συνήθως εφαρμόζεται στις περιπτώσεις αυτές είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν στην περίπτωση της γεωργικής χρήσης.

Οι κίνδυνοι από την διάθεση της ιλύος για την ανάκτηση εδαφών είναι μικρότεροι από αυτούς που αναμένονται στην περίπτωση χρήση της ιλύος στη γεωργία, αφού η εφαρμογή στο έδαφος δεν είναι συνδεδεμένη άμεσα με την τροφική αλυσίδα.

1.1.5.4 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση χρησιμοποιείται με επιτυχία τα τελευταία 80 χρόνια για τη σταθεροποίηση οργανικών λασπών. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε για τη σταθεροποίηση λασπών από την πρωτογενή

καθίζηση αστικών λυμάτων. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε σε χημικά επεξεργασμένες λάσπες μετά την αποφωσφόρωση, σε βιολογικές λάσπες που προέρχονταν από συστήματα ενεργούς ιλύος ή βιολογικά φίλτρα και σε μίγματα λασπών από επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων με ποικίλα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά (Βλυσίδης, 2004).

Σήμερα, η αναερόβια χώνευση εφαρμόζεται τόσο για την σταθεροποίηση οργανικών αποβλήτων όσο και για την παραγωγή ενέργειας από βιομάζα λόγω της παραγωγής του βιοαερίου με υψηλή περιεκτικότητα μεθανίου. Η χρήση του μεθανίου για παραγωγή ενέργειας αποδίδει πάνω από 90% της θερμιδικής αξίας των υποστρωμάτων που έχουν αποδομηθεί αναερόβια. Επιπλέον στους σύγχρονους αναερόβιους βιοαντιδραστήρες η ενεργειακή απαίτηση για μηχανική ανάδευση είναι πολύ περιορισμένη (Μάη 2004).

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία βιολογική διαδικασία αποδόμησης οργανικών υποστρωμάτων απουσία οξυγόνου. Ο κύριος σκοπός της είναι (α) η σταθεροποίηση του οργανικού υλικού, (β) η μείωση των οσμών, (γ) η μείωση της συγκέντρωσης των παθογόνων μικροοργανισμών και (δ) η ελαχιστοποίηση της μάζας του οργανικού υλικού που χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της βιολογικής μετατροπής του οργανικού υλικού σε μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) υπό αναερόβιες συνθήκες (απουσία οξυγόνου) (Metcalf & Eddy, 1991). Συντελείται από πλήθος αυστηρά ή μερικώς αναερόβιων ετερότροφων και αυτότροφων βακτηρίων τα οποία συνεργάζονται ή ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την εξασφάλιση της απαραίτητης ενέργειας που χρειάζονται για την δόμηση της κυτταρικής τους μάζας (Μπαραμπούτη ,2004)

1.1.5.5 Υγειονομική ταφή

Η υγειονομική ταφή της ιλύος είναι μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους διάθεσής της. Όμως, σύμφωνα με την Ε.Ε. κάθε Κράτος Μέλος καλείται να περιορίσει το ποσοστό της ιλύος που διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα Κρατών Μελών

αποτελούν η Σουηδία, όπου απαγορεύεται η απόθεση ιλύος σε χώρους υγειονομικής ταφής μετά το 2005, ενώ η Γαλλία και η Ολλανδία θεσπίζουν αυστηρότερες προδιαγραφές στην ποιότητα της ιλύος. Γενικά, η μέθοδος αυτή, σήμερα, αντιμετωπίζεται ως η έσχατη λύση και μάλιστα όταν η συγκέντρωση των ρυπαντών στην ιλύ είναι σε τέτοιο βαθμό ώστε καθιστά κάθε άλλη μέθοδο αδύνατη ή η διάθεση υπόκειται σε χωροταξικούς και κοινωνικούς περιορισμούς.

Με την προϋπόθεση του ορθού σχεδιασμού του χώρου υγειονομικής ταφής, δηλαδή στεγανότητα, ανακυκλοφορία στραγγιγμάτων, βέλτιστο χειρισμό βιοαερίου κλπ, η ιλύς δεν βλάπτει την λειτουργία του, αντίθετα είναι πολύ πιθανό να την διευκολύνει, αφού επιταχύνει τις βιολογικές διεργασίες σταθεροποίησής της και παρέχει την απαραίτητη υγρασία.

Κατά την ταφή ενδέχεται να προκληθεί μόλυνση του εδάφους, του αέρα και του υδατικού φορέα. Οι εκπομπές στον αέρα περιλαμβάνουν την απελευθέρωση βιοαερίου, όταν δεν πραγματοποιείται ανάκτηση του, και την παραγωγή σκόνης κατά την επικάλυψη των απορριμμάτων. Το κυριότερο συστατικό του βιοαερίου που ευθύνεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι το μεθάνιο. Σε κάποιες περιπτώσεις έχουν αναφερθεί και ίχνη Πτητικών Οργανικών (VOCs) σε μικρή, όμως, συγκέντρωση. Η ποσότητα των VOCs, που εκλύεται στην ατμόσφαιρα είναι μικρότερη όταν το βιοαέριο χρησιμοποιείται ή καίγεται με πιθανή παραγωγή διοξινών και φουρανίων.

Τα στραγγίσματα που παράγονται δύναται να διηθηθούν στο έδαφος, δημιουργώντας σοβαρές επιπτώσεις στην δημόσια υγεία και στα οικοσυστήματα. Τα στραγγίσματα περιλαμβάνουν πλήθος συστατικών όπως ιόντα (Ca^{2+}, K^{+}, Na^{+}, NH_4^{+}, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}, Cl^{-}), βαρέα μέταλλα, οργανικά συστατικά καθώς και μικροοργανισμούς. Το ποσοστό της διήθησης των ρυπαντών εξαρτάται από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των στραγγισμάτων, καθώς επίσης και από τα εδαφικά χαρακτηριστικά και τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν.

Ακόμα, κατά τη λειτουργία του χώρου υγειονομικής ταφής προκαλείται όχληση από θόρυβο και σκόνες, οσμές της ιλύος υπό αποικοδόμηση,

προσέκλυση ζωυφίων και τρωκτικών και διατάραξη της χλωρίδας και της πανίδας της περιοχής.

1.1.5.6 Κομποστοποίηση

Στις περισσότερες περιπτώσεις η ιλύς που παράγεται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων δεν είναι κατάλληλη για απευθείας αξιοποίηση και απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία της. Της διάθεσή της πρέπει να προηγείται διεργασία σταθεροποίησης και καταστροφής των παθογόνων μικροοργανισμών. Μία από τις πλέον ενδεδειγμένες μεθόδους επεξεργασίας της είναι η κομποστοποίηση. Κομποστοποίηση είναι η ελεγχόμενη βιοξείδωση οργανικών υλικών, σε αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες, από ετερότροφους μικροοργανισμούς προς κομπόστ, πλούσιου σε οργανική ουσία, με υψηλό περιεχόμενο χουμικών που χρησιμοποιείται κυρίως ως εδαφοβελτιωτικό. Στόχος της μεθόδου είναι η μετατροπή του αποβλήτου σε ένα σταθεροποιημένο προϊόν, απαλλαγμένο από παθογόνους μικροοργανισμούς. Το προϊόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως στη γεωργία αλλά και στην ανάπλαση τοπίων, στη προστασία εδαφών από τη διάβρωση και την ερημοποίηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην αναερόβια κομποστοποίηση παράγονται περισσότερες οσμές αλλά απελευθερώνεται λιγότερη ενέργεια, σε σύγκριση με την αερόβια, ανά βάρος αποσυντιθέμενης οργανικής ύλης (Haug 1993).

Η κομποστοποίηση της ιλύος πραγματοποιείται, συνήθως, μαζί με το οργανικό μέρος των οικιακών απορριμμάτων, με αδρανή υλικά, φύλλα και κλαδιά δένδρων, πριονίδια κ.ά. (Zorpas et al 2001).

1.1.5.7 Μέθοδοι ενεργειακής εκμετάλλευσης ιλύος

Οι μέθοδοι ενεργειακής εκμετάλλευσης του θερμιδικού περιεχομένου της ιλύος είναι η καύσης, η υγρή οξείδωση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση. Κοινός παρανομαστής αυτών των διεργασιών είναι η σταθεροποίηση της ιλύος. Κατά την καύση και την υγρή οξείδωση πραγματοποιείται απευθείας ανάκτηση θερμότητας, ενώ στις διεργασίες

της πυρόλυσης και της αεριοποίησης το οργανικό κλάσμα της ιλύος μετατρέπεται σε αέρια ή/και υγρά προϊόντα, με στόχο την ενερρειακή αξιοποίησή τους.

Οι θερμικές μέθοδοι διάθεσης ιλύος στοχεύουν στην τελική διάθεσή της, δηλαδή τη μείωση του ρυπαντικού φορτίου, την μέγιστη δυνατή ελάττωση του όγκου της, τη μετατροπή της σε υλικά μη επιβλαβή για το περιβάλλον, αλλά και εύκολα διαθέσιμα, με ταυτόχρονη αξιοποίησης του θερμιδικού περιεχομένου της.

Τυπικές τιμές θερμογόνου δύναμης της ιλύος απεικονίζονται στον Πίνακα 1.4

Πίνακας 1.4 Τυπική θερμογόνος δύναμη ιλύος

Τύπος ιλύος	**Θερμογόνος Δύναμη (MJ/kg DS)**	
	Διακύμανση	Τυπική τιμή
Μη επεξεργασμένη ιλύς	23 – 29	25.5
Ενεργή ιλύ	16 – 23	21
Αναερόβια χωνεμένη ιλύ πρωτογενής ιλύ	9 – 13	11
Χημικά επεξεργασμένη πρωτογενή ιλύ	14 – 18	16
Ιλύ από βιολογικά φίλτρα	16 – 23	19.5

1.1.5.7 1 Καύση

Πρωταρχικός στόχος της καύσης της ιλύος είναι η ελαχιστοποίηση του όγκου του προς διάθεση υλικού, με πλήρη μετατροπή του σε ανόργανο αδρανές στερεό υπόλειμμα, το οποίο αντιστοιχεί στο 10% της παχυμένης και αφυδατωμένης ιλύος. Οι συνηθισμένες πρακτικές εστιάζουν στην πλήρη αδρανοποίηση της ιλύος και όχι στην παραγωγή ενέργειας. Με την καύση επιτυγχάνεται πλήρης διάσπαση όλων των τοξικών και βλαβερών οργανικών ουσιών που περιέχονται στην ιλύ και αποτρέπεται ο επανασχηματισμός τους (Vesilind & Ramsey 1996).

Η καύση παραμένει έως σήμερα η πιο ελκυστική μέθοδος διάθεσης των παραγόμενων ιλύων. Μάλιστα, η χρήση της ενισχύεται με την εφαρμογή των νομικών περιορισμών που διέπουν την υγειονομική ταφή και την

γεωργική χρήση (Malerius & Werther 2003). Η τεχνολογία της καύσης της ιλύος έχει βελτιωθεί αισθητά τα τελευταία χρόνια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι σύγχρονοι αποτεφρωτήρες ρευστοστερεάς κλίνης που γίνονται όλο και πιο ελκυστικοί τόσο λόγω της μείωσης του κόστους εγκατάστασης όσο και της ελαχιστοποίησης του κόστους λειτουργίας, πάντα σε σύγκριση με το συμβατικό τύπο των πολλαπλών εστιών (Minimi et al, 1997, Werther & Ogada 1999).

Η ιλύς που πρόκειται να οδηγηθεί σε μονάδες καύσης δεν είναι αναγκαίο να είναι σταθεροποιημένη και αρκεί η αφυδάτωσή της. Η ιλύς με συγκέντρωση στερεών μέχρι 30% δεν καίγεται παρά μόνο με τη βοήθεια πρόσθετων καυσίμων. Αντίθετα, με συγκέντρωση στερεών μεγαλύτερη από 35% και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ιλύος και την περίσσεια αέρα, η καύση μπορεί να είναι αυτογενής. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες καύσης είναι η ρευστοστερεά κλίνη, οι καυστήρες πολλών εστιών και οι ηλεκτρικοί φούρνοι .

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες καύσης εστιασμένες στην ιλύ. Τα συστήματα καύσης με καύσιμο αποκλειστικά την ιλύ ή/και βοηθητικά καύσιμα εκκίνησης είναι τα πλέον διαδεδομένα, ακολουθούμενα από συστήματα συν-καύσης με αστικά απορρίμματα (Murphy & McKeogh 2006, Lin & Ma, 2012) και γαιάνθρακες (Nadziakiewicz & Kozioł, 2003). Όσων αφορά την τεχνολογία καύσης, οι κλίβανοι πολλαπλών εστιών και οι αντιδραστήρες ρευστοστερεάς κλίνης είναι η πιο δημοφιλής, με τους τελευταίους να εφαρμόζεται ευρέως (Werther & Ogada 1999). Η κύρια διαφορά των δύο τύπων έγκειται στα χαρακτηριστικά τροφοδοσίας της ιλύος, καθώς οι κλίβανοι πολλαπλών εστιών καίνε συνήθως μηχανικά αφυδατωμένη (υγρή) ιλύ, ενώ οι ρευστοστερεές κλίνες μπορούν να κάψουν τόσο υγρή όσο ημι-ξηρά λάσπη, με υγρασία 35-59%.

Επίσης, έμφαση έχει δοθεί στη πλήρη κατανόηση των μηχανισμών καύσης ώστε να κατασκευάζονται πιο αποτελεσματικοί αντιδραστήρες, δεδομένου ότι η καύση της ιλύος παρουσιάζει εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά από αυτά του άνθρακα. Αυτό οφείλεται στα εγγενή

χαρακτηριστικά της ιλύος, όπως η υψηλή υγρασία, που φτάνει στο 80 %κ.β., το καύσιμο οργανικό μέρος (daf) που κυμαίνεται γύρω στο 50% κ.β. επί ξηρού, με το 90% κ.β. daf να είναι τα πτητικά και ο μόνιμος άνθρακας λιγότερο από το 10% (Hein & Bemtgen, 1998). Σημαντικό ρόλο έχει η κατανόηση των δράσεων που προηγούνται της καύσης, όπως η ξήρανση και η πυρόλυση. Επίσης, το υψηλό ποσοστό τέφρας καθώς και η περιεκτικότητά της σε βαρέα μέταλλα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη στον σχεδιασμό ενός κλιβάνου (Petersen & Werther, 2005).

Τα πλεονεκτήματα της καύσης της ιλύος συνοψίζονται στη μεγάλη μείωση του αρχικού προς διάθεση όγκου της, τη θερμική καταστροφή των τοξικών οργανικών ενώσεων, τη δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση της παραγωγής οσμών.

Ωστόσο, η καύση της ιλύος δεν αποτελεί μια ολοκληρωμένη μέθοδο διάθεσης καθώς το 30% των στερεών παραμένουν ως τέφρα (Malerius & Werther 2003). Η τέφρα διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής και σε ορισμένες περιπτώσεις, θεωρείται τοξική λόγω της περιεκτικότητάς της σε βαρέα μέταλλα (Elled A.L., et al 2007, Dajnak D., et al, 2003) Έρευνες έχουν δείξει πως τα βαρέα μέταλλα παρακρατούνται σε μεγάλο βαθμό στην τέφρα και δεν διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα όταν χρησιμοποιούνται αντιδραστήρες με μικρό χρόνο παραμονής στερεών, όπως είναι οι αντιδραστήρες ρευστοστερεάς κλίνης (Toledo et al, 2005). Οι εκπομπές στον αέρα, στο νερό αλλά και στο έδαφος εξαρτώνται από την τεχνολογία καύσης. Για την μείωση των εκπομπών απαραίτητη είναι η επεξεργασία της ιπτάμενης τέφρας και των υγρών αποβλήτων. Οι πιο σημαντικοί αέριοι ρυπαντές είναι η ιπτάμενη τέφρα και τα οργανικά υπολείμματα καύσης, όπως διοξίνες, βαρέα μέταλλα, VOCs, NOx, CO, SO_2 που ενδέχεται να επιφέρουν αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στα οικοσυστήματα, ενώ παράλληλα ενισχύουν φαινόμενα όπως η όξινη βροχή (NOx, SO_2). Τέλος, μία ακόμη, πολύ σημαντική παράμετρος για την υιοθέτηση της καύσης είναι η ανησυχία του κοινού σχετικά με τις πιθανές επιβλαβείς εκπομπές (Johnson 1994).

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως η ιλύς συμφέρει να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για την κάλυψη των θερμικών αναγκών βιομηχανιών, όπως συμβαίνει στα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου, αρκεί οι βιομηχανίες αυτές να μην βρίσκονται μακρύτερα των 45 χλμ από την εγκατάσταση ξήρανσης των λασπών (Vlyssides et al, 2007).

1.1.5.7.2 Υγρή οξείδωση (WAO)

Η υγρή ιλύς έρχεται σε επαφή με ένα οξειδωτικό αέριο, όπως είναι το οξυγόνο, σε υγρό περιβάλλον, σε θερμοκρασία 150 – 250°C και κάτω από υψηλή πίεση (από 70 έως 150 bar) (Debellefontaine & Foussard, 1999). Σε αυτές τις συνθήκες το οργανικό κλάσμα οξειδώνεται προς διοξείδιο του άνθρακα, νερό και άζωτο. Το εξερχόμενο υγρό ρεύμα περιέχει κυρίως ανόργανα συστατικά και μικρές συγκεντρώσεις οργανικών οξέων χαμηλού μοριακού βάρους. Η μέθοδος μπορεί να είναι ενεργειακά αυτόνομη εάν το οργανικό κλάσμα του εισερχόμενου ρεύματος έχει την απαιτούμενη οργανική περιεκτικότητα (Perez-Elvira, 2006). Από τα βαρέα μέταλλα στην αέρια φάση μεταφέρεται μόνο ο υδράργυρος, στη θερμοκρασία αντιδράσεως, ενώ τα υπόλοιπα βαρέα μέταλλα συγκρατούνται στην τέφρα.

Η μέθοδος της υγρής οξείδωσης δεν προαπαιτεί επεξεργασία της ιλύος, δεδομένου ότι η τροφοδοσία του αντιδραστήρα WAO πραγματοποιείται με υδαρή ιλύ, περιεκτικότητας 5% σε στερεά. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να επεξεργαστεί ιλύ με υψηλό ποσοστό μετάλλων. Επισημαίνεται ωστόσο ότι μετά την υγρή οξείδωση είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός των υγρών από ανόργανα στερεά. Η διάθεση των καταλοίπων από την οξείδωση μπορεί να αντιμετωπισθεί με τον ίδιο τρόπο όπως οι τέφρες από την καύση της ιλύος (Khan, Y et al 1999) .

Η μέθοδος δεν είναι αρκετά διαδεδομένη, και δεν υπάρχουν αξιόπιστα στοιχεία κόστους. Εντούτοις φαίνεται να είναι ανταγωνιστική σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων μέχρι ισοδύναμο πληθυσμό 200.000 κατοίκων. Η παλαιότερη μέθοδος οξείδωσης είναι η ZIMPRO,

που εφαρμόστηκε στην Ολλανδία τη δεκαετία του 60. Πρόσφατες έρευνες οδήγησαν στην χρήση καταλυτών όπου επιτυγχάνεται μείωση της απαιτούμενης πίεσης και θερμοκρασίας (Luck 1999). Τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η εφαρμογή της είναι το υψηλό ποσοστό μετατροπής του οργανικού αζώτου σε αμμωνία, προβλήματα διάβρωσης λόγω οξειδωτικών συνθηκών σε υψηλές πιέσεις καθώς επίσης το υψηλό απαιτούμενο πάγιο και λειτουργικό κόστος.

1.1.5.7.3 Πυρόλυση

Η πυρόλυση είναι η θερμική διάσπαση οργανικών υλικών σε υψηλή θερμοκρασία και σε αδρανή ατμόσφαιρα, προς παραγωγή πτητικών ουσιών και στερεού υπολείμματος (Dermibas & Arin, 2002). Η θερμοκρασία αντίδρασης κυμαίνεται από 300°C έως 900°C και η πίεση λειτουργίας εξαρτάται από τον τύπο του αντιδραστήρα που χρησιμοποιείται. Το κύριο προϊόν της πυρόλυσης είναι το βιο-έλαιο (Goyal, H. B. et al, 2006). Τα υπόλοιπα προϊόντα είναι ο μόνιμος άνθρακας και το μη συμπυκνώσιμο αέριο. Στα δύο ρευστά ρεύματα περιέχεται και υδρατμός, που προέρχεται από την αποδόμηση των πτητικών (Fytili & Zabaniotou A. 2008). Η πυρόλυση, σε σύγκριση με την καύση, θεωρείται φιλικότερη προς το περιβάλλον, κυρίως λόγο των αέριων ρύπων, που είναι σημαντικά μικρότεροι (Menendez et al 2002).

Η έρευνα της διεργασίας της πυρόλυσης εστιάζεται στην ανάγκη αριστοποίησης της καύσης (Font, R. et al, 2001). Αποτελεί το πρώτο στάδιο της θερμοχημικής αποδόμησης του οργανικού μέρους των καυσίμων προς πτητικές οργανικές ενώσεις με μικρότερο μοριακό βάρος και νερό. Η έρευνα πάνω στην πυρόλυση βιομάζας και αστικών απορριμμάτων είναι στο προσκήνιο λόγω της δυνατότητας μετατροπής των αποβλήτων σε εύχρηστη ενέργεια ή σε χημικά, με ταυτόχρονη διάθεσή τους (Bridgwater, A.V., et al, 1999, Fisher, T. et al, 2002, Malkow, T 2004, Minowa, T et al, 2005, Murphy & McKeogh, 2004).

Τα προϊόντα της πυρόλυσης μπορούν να ταξινομηθούν στα ακόλουθα κλάσματα: (α) αέριο προϊόν, (β) βιο-έλαιο και (γ) στερεό προϊόν. Όλα τα

προϊόντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βιοκαύσιμα (Kim & Parker, 2008). Το ποσοστό κατά βάρος αρχικής μάζας του καθενός εξαρτάται κυρίως από την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, τη σύσταση της πρώτης ύλης, τη θερμοκρασία αντίδρασης, την πίεση και το χρόνο παραμονής (Khiari et al, 2004)

Το *αέριο προϊόν* περιέχει CH_4, H_2, CO και CO_2 και μικρές συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων μικρού μοριακού βάρους. Η θερμογόνος δύναμή του κυμαίνεται μεταξύ 12.000 και 20.000 kJ/m^{-3} (Inguanzo et al, 2002), κυρίως λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε CH_4 (Montes-Moran et al, 1998). Η σύνθεση του αερίου προϊόντος εξαρτάται από τη σύσταση της πρώτης ύλης καθώς και από τη θερμοκρασία της πυρόλυσης.

Το *βιο-έλαιο* αποτελείται κυρίως από υδρογονάνθρακες, οργανικά οξέα καρβονυλικών ενώσεων υψηλού μοριακού βάρους, φαινόλες, αρωματικές ενώσεις, αλειφατικές αλκοόλες, οξικό οξύ και νερό. Η θερμογόνος δύναμή του κυμαίνεται μεταξύ 22.400 και 28.000 kJ/kg (Inguanzo et al, 2002) και είναι συγκρίσιμο με ορισμένα συμβατικά καύσιμα. Είναι ένα παχύρευστο, αδιαφανές και δύσοσμο υγρό, το οποίο σε θερμοκρασία δωματίου πολυμερίζεται. Αποτελεί πηγή χημικών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο ή, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, ως υγρό καύσιμο κινητήρων εσωτερικής καύσης (Shen & Zhang, 2003, Piskorz et al, 1986, Sato S, Lin et al, 2003, Shinogi & Kanri 2003).

Το *στερεό προϊόν (char)* αποτελείται κυρίως από μόνιμο άνθρακα και τέφρα. Σε σχέση με τα υπόλοιπα στερεά ανθρακικά κατάλοιπα έχει χαμηλή θερμογόνο δύναμη και υψηλή συγκέντρωση βαρέων μετάλλων που το καθιστούν ακατάλληλο για περαιτέρω αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου του (Werther & Ogada 1999). Μπορεί, όμως, να χρησιμοποιηθεί ως προσροφητικό μέσο, λόγω της πορώδους δομής του, κυρίως για όξινες ενώσεις όπως SO_2 ή SH_2 αλλά και άλλων ρύπων, όπως φαινόλες (Radovic et al, 1997) και κατόπιν να οδηγηθεί σε χώρους υγειονομικής ταφής (Karayildirim et al, 2006). Η ενεργή επιφάνεια του char αυξάνεται με την θερμοκρασία και τον χρόνο παραμονής.

(Inguanzo et al, 2002, Lu, 1995, Rumphorst & Ringel, 1994, Lu GQ, Low et al, 1995).

Οι ερευνητικές και εφαρμοσμένες διεργασίες πυρόλυσης βιολογικών ιλύων ποικίλουν ως προς την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και τις συνθήκες λειτουργίας. Αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε (α) θερμοζυγό (Urban & Antal, 1981, Conesa, J.A. et al, 1997, Thipkhunthod, P. et al, 2006, Karayildirim, T. et al, 2006, Jindarom, C. et al, 2007,) κυρίως για την διερεύνηση της κινητικής της πυρόλυσης, (β) σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες διαλείποντος ή ημι-διαλείποντος έργου, όπως φούρνοι μικροκυμάτων και ηλεκτρικές κάμινοι πυρόλυσης (Rumphorst & Ringel, 1994,Caballero, J.A. et al, 1996, Lutz H. et al, 2000, Inguanzo, M. et al, 2002, Dominguez, A.et al, 2003, Fullana, A. et al, 2003, Domínguez, A. Et al, 2005, Gascó, G. et al, 2005, Zhang, B. et al, 2011) για την εξέταση της απόδοσης της πυρόλυσης σε βιοέλαία ή ενεργό άνθρακα, (γ) σε κλασικές ρευστοστερεές κλίνες (Scott, S. A., 2007), (δ) σε διατάξεις επανακυκλοφορούν ρευστοστερεών κλινών (circulating fluidized beds) και (ε) σε αντιδραστήρες τύπου περιστροφικού κλιβάνου (Chun, Y.N. et al 2011). Ο χρόνος παραμονής της ιλύος και η ταχύτητα μετάδοσης της θερμότητας στον εκάστοτε αντιδραστήρα είναι μείζονος σημασίας για την κατανομή των κλασμάτων των προϊόντων. Η ταχεία πυρόλυση (flash pyrolysis) μεγιστοποιεί την παραγωγή του βιο-ελαίου ενώ η συμβατική εμφανίζει ενδιάμεση κατανομή στην παραγωγή των κλασμάτων.

Επίσης, σημαντική παράμετρος της απόδοσης της πυρόλυσης είναι και το ποσοστό υγρασίας στην τροφοδοσία καθώς επηρεάζει την μεταφορά θερμότητας στην κύρια μάζα της ιλύος. Η εξάτμιση της υγρασίας από τον κόκκο ιλύος οδηγεί στην δημιουργία ενεργών κέντρων ώστε να ενισχυθούν οι αντιδράσεις αερίων προϊόντων – στερεού υπολείμματος. Ο υδρατμός *δεν* επηρεάζει τη σύνθεση των προϊόντων, καθώς στις θερμοκρασίες της πυρόλυσης δεν αντιδρά με τα αέρια ή συμπυκνώσιμα προϊόντα (Menendez et al 2002, Park et al, 2008, Shen & Zhang 2003, Kaminsky & Kummer 1989, Bridle, 1982, Piskorz et al, 1986)

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα κατά την πυρόλυση της ιλύος είναι η κινητικότητα των βαρέων μετάλλων. Σύμφωνα με τους Stammbach et al (1989), οι οποίοι μελέτησαν την πυρόλυση ιλύος σε ρευστοστερεά κλίνη στους 500 – 600°C, τα βαρέα μέταλλα, όπως τα Cu, Cr, Pb και Zn παρέμειναν στο στερεό υπόλειμμα. Επίσης, τέθηκε άνω θερμοκρασιακό όριο στους 600 ^{o}C λόγω της πτητικότητας του Cd. Οι He et al (2010) διερεύνησαν την κινητικότητα των Cu, Cd, Pb και Zn στα προϊόντα της πυρόλυσης, σε διάφορες θερμοκρασίες. Αποτέλεσμα της μελέτης ήταν ότι η κινητικότητα των μετάλλων εμφανίζεται αρκετά περιορισμένη στο στερεό οργανικό κλάσμα έως μίας θερμοκρασίας. Ειδικότερα, το Cd μεταφέρεται στην αέρια φάση μετά τους 700 ^{o}C. Επίσης, τα Cu, Pd, Cd βρίσκονται δεσμευμένα στην οργανική μάζα και σε μορφή σουλφιδίων, ενώ ο Zn δεσμεύεται σε οξείδια των Fe και Mn. Έτσι, παρατηρείται μεν μειωμένη κινητικότητα των βαρέων μετάλλων στην αέρια φάση, παράγεται όμως ένα οργανικό στερεό υπόλειμμα, το οποίο και έχει αυξημένη συγκέντρωση στα μέταλλα αυτά.

Η πυρόλυση των βιολογικών ιλύων αποτελεί μια οικονομικά και περιβαλλοντικά αποδεκτή μέθοδο για την επωφελή αξιοποίηση της ιλύος (Luo et al, 2010, Menendez et al, 2004, Midilli et al, 2002, Kalinci et al, 2009). Επιπλέον, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της παρακράτησης των βαρέων μετάλλων (εκτός από του υδραργύρου και του καδμίου) στο τελικό υπόλειμμα (Park et al, 2008, Stammbach et al, 1989). Έτσι, ο κίνδυνος διάχυσης των βαρέων μετάλλων που περιέχονται στην τέφρα είναι ήσσονος σημασίας, σε αντίθεση με την τέφρα που προέρχεται από την καύση (Park ES et al, 2008, Caballero et al, 1997).

Τα πλεονεκτήματα της πυρόλυσης των ιλύων είναι (α) η μειωμένη εκπομπή αερίων ρύπων σε σχέση με την απευθείας καύση, (β) ότι δεν παρατηρείται δημιουργία φουρανίων λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας αντίδρασης, (γ) ότι τα περισσότερα από τα παραπροϊόντα της έχουν χρήση.

Τα μειονεκτήματα της πυρόλυσης των ιλύων είναι (α) πως το κύριο προϊόν, το βιο-έλαιο είναι εξαιρετικά δύσχρηστο, (β) το char βρίσκει

εφαρμογές, αλλά δεν είναι ανταγωνιστικές εν σχέση με το char που παράγεται από άλλες πηγές βιομάζας, (γ) η κινητικότητα των βαρέων μετάλλων στα προϊόντα της πυρόλυσης ενδέχεται να αναχαιτίσει τη χρήση τους και (δ) βρίσκεται σε αρχικό πειραματικό στάδιο (ε) ο σχεδιασμός μονάδων παραγωγής και ριαφιναρίας βιο-ελαίου βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν.

1.1.5.7.4 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση είναι μία μέθοδος μετατροπής του οργανικού μέρους της πρώτης ύλης σε αέριο προϊόν που πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσία οξειδωτικού μέσου (υπο –στοιχειομετρικού οξυγόνου ή υδρατμού ή μίγματος αυτών). Η θερμοκρασία αντίδρασης κυμαίνεται από 750 - 1600°C. Η κύρια διαφοροποίηση της αεριοποίησης από την πυρόλυση είναι η απαίτηση της παρουσίας περίσσειας υδρατμού, που οδηγεί στην πλήρη μετατροπή του περιεχομένου στην πρώτη ύλη άνθρακα σε καύσιμο αέριο, πλούσιο σε H_2 (Fytili & Zabaniotou, 2008). Η παρουσία αέρα/οξυγόνου οδηγεί στην παραγωγή αερίου προϊόντος με χαμηλή (4-6 MJ/nm^3) θερμογόνο δύναμη (αυτόθερμη αεριοποίηση) ενώ η παρουσία περίσσειας υδρατμού οδηγεί στην παραγωγή αερίου προϊόντος με μέση (10-15 MJ/nm^3) ή υψηλή (15-20 MJ/nm^3) θερμογόνο δύναμη (αλλόθερμη αεριοποίηση) (Stassen, H.E. 1995, Bridgewater & Evans, 1993).

Η αεριοποίηση έχει μελετηθεί εκτενώς με πρώτη ύλη τον άνθρακα και την βιομάζα, ενώ η έρευνα της αεριοποίησης της ιλύος είναι σε αρχικό στάδιο. Τα αρχικά αποτελέσματα των ερευνών είναι ενθαρρυντικά και για αυτόν τον λόγο είναι αναγκαία η συνέχιση της έρευνας.

Ο μεγάλος βαθμός απόδοσης σε ηλεκτρική ενέργεια η πολλαπλή χρήση του αερίου προϊόντος, αλλά και η δυνατότητα τροφοδοσίας ποικίλων πρώτων υλών, την καθιστά πολλά υποσχόμενη για την εξοικονόμηση φυσικών πόρων και την αξιοποίηση ποικίλων πηγών ενέργειας.

Πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση της αεριοποίησης ιλύων βιολογικών καθαρισμών πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο 1.1.2, ενώ απευθείας σύγκρισή της με την καύση παρατίθεται στον Πίνακα 1.7.

1.1.6 Διάθεση βιολογικών ιλύων στην ευρωπαϊκή ένωση

Η κύρια μέθοδος διάθεσης της ιλύος που προωθεί η Ε.Ε. είναι έως σήμερα η γεωργική χρήση. Τα Κράτη Μέλη δεν ακολουθούν, στο σύνολό τους, τη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Ορισμένα από αυτά έχουν απαγορεύσει τη διάθεση της ιλύος στο έδαφος είτε για γεωργική χρήση είτε για υγειονομική ταφή, υιοθετώντας τη καύση ως μέθοδο διάθεσης του συνόλου της παραγόμενης ιλύος.

Η καθυστέρηση αναθεώρησης της Οδηγίας για τη διάθεση της ιλύος για πάνω από μία δεκαετία, σε συνδυασμό με την είσοδο στην Ε.Ε. νέων κρατών, που βρίσκονται σε διαφορετική ταχύτητα με τον πυρήνα της, αλλά και η αδυναμία ορισμένων χωρών να ανταπεξέλθουν στις υφιστάμενες νόρμες, οδηγεί στην ανάγκη αναζήτησης νέων τεχνολογιών, σύμφωνων με τις σύγχρονες οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές αντιλήψεις και περιορισμούς του συνόλου των κρατών. (European Commission DG Environment, 2010).

Η παραδοσιακή διάκριση των μεθόδων διάθεσης της ιλύος στις χώρες της Ε.Ε. είναι:

1. Γεωργική χρήση (λίπασμα, εδαφοβελτιωτικό)
2. Κομποστοποίηση (και με άλλα οργανικά απόβλητα)
3. Καύση (συν –καύση, χρήση στην τσιμεντοβιομηχανία)
4. Υγειονομική ταφή
5. Άλλες μέθοδοι

Στον Πίνακα 1.5 παρατίθενται τα δεδομένα παραγωγής και διάθεσης ιλύος για κάθε κράτος για το έτος 2009 και πρόβλεψη για το έτος 2020. Η συλλογή των αντίστοιχων στοιχείων για τη διετία 2010 - 2011 έχει μόλις ξεκινήσει (Οικ. 141483/745). Οι μεγαλύτερες ετήσιες αυξήσεις παραγωγής ιλύος αναμένονται από τις χώρες που δεν έχουν εναρμονιστεί

πλήρως με την Οδηγία 86/278/EEC. Γενικά, δεν προβλέπεται μεγάλη διαφοροποίηση της υφιστάμενης κατάστασης. Ενδεικτικό είναι πως στην πρόβλεψη για το 2020, οι χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή ιλύος δεν εμφανίζουν διαφοροποίηση ως προς τις επιλεγόμενες μεθόδους, πλην της Ιταλίας και αφορά κυρίως την χρήση στη γεωργία. Γενικά, η γεωργική χρήση ιλύος θα παραμείνει η βασική μέθοδος διάθεσης, με την καύση να ακολουθεί. Μείωση εμφανίζει μόνο το ποσοστό της υγειονομικής ταφής, σύμφωνα με την προσπάθεια εναρμόνισης των κρατών με τη σχετική Οδηγία.

Από τα στοιχεία της EUROSTAT (Πίνακας 1.5) συμπεραίνεται ότι η κύρια μέθοδος διάθεσης της ιλύος είναι η ανακύκλωση στη γεωργία. Το ποσοστό της ιλύος που ανακυκλώνεται δεν έχει αλλάξει σημαντικά από το 1995, παραμένοντας περίπου στο 40 - 50%. Αντίθετα, πολλά Κράτη Μέλη, όπως η Σουηδία έχουν σταματήσει τη γεωργική χρήση και την υγειονομική ταφή, σε αναζήτηση νέων οδών, με βάση την θερμική εκμετάλλευση της ιλύος (M. Lundin et al, 2004). Αντίστοιχα στην Ολλανδία η ιλύς δεν χρησιμοποιείται στη γεωργία, ενώ αντίθετα, το Ηνωμένο Βασίλειο και ορισμένα άλλα Κράτη Μέλη έχουν αυξήσει το ποσοστό χρήσης της ιλύος στο έδαφος. Η πρόβλεψη μέχρι το 2020, για τις χώρες της ΕΕ των15, θα παραμείνει στο ίδιο επίπεδο ενώ η ΕΕ των 12 - όπου το ποσοστό είναι σήμερα μικρότερο - θα κυμανθεί σε αυτές τις τιμές, καθώς η εφαρμογή της Οδηγίας 1999/31/EC θα οδηγήσει στην διακοπή της διάθεσης της ιλύος σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Από τα παραπάνω προκύπτει η ανάγκη εξεύρεσης μιας νέας μεθόδου, που θα λύση το πρόβλημα της διάθεσης της ιλύος οριστικά. Η κύρια εναλλακτική λύση εμφανίζεται να είναι η θερμική επεξεργασία και δει η αεριοποίηση (Fytili, D et al, 2008, European Commission DG Environment, 2010).

Πίνακας 1.5 Ετήσια μέση και εκτιμώμενη κατά κεφαλή παραγωγή ιλύος και το ποσοστό χρήσης κάθε μεθόδου διάθεσης

	2009 (Eurostat)							**2020**(European Commission DG Environment, 2010)					
	Παραγωγή ιλύος Mtds/a	**Γεωργική Χρήση**	**Κομπο-στοποίη**	**Υγειονομική ταφή**	**Καύση**	**Άλλες μέθοδοι**	**διαθέσιμα δεδομένα**	**Παραγωγή ιλύος Mtds/a**	**Γεωργική Χρήση**	**Κομπο-στοποίη**	**Υγειονομική ταφή**	**Καύση**	**Άλλες μέθοδοι**
Αυστρία	*273*	16	22	8	36	17		*280*	5		1	85	10
Βέλγιο	*170*	14			53	33		*170*	9		1	10	
Βουλγαρία	*47*	56		44				*180*	60	7	10	10	3
Γαλλία	*1.600*	44	16	21	17	3		*1.600*	65		15	17	3
Γερμανία	*2.000*	27	19	1	53								
Δανία	*140*	50			45			*140*	50			45	
Ελβετία	*213*	9,5	1	0,5	89			*213*	9,5	1	0,5	89	
Ελλάδα	*260*			98		2		*260*	5		55	40	
Εσθονία	*33*		82	18				*33*					
Ιρλανδία	*135*	69		6		25		*135*	70		5	10	10
Ισπανία	*1.280*	83					17	*1.280*	83				17
Ιταλία	*1.500*	22	22	42	3	11		*1.500*	70	20		15	
Κύπρος	*8*	83					17	*16*	50		30	10	10
Λετονία	*25*	38	9,5			43	9,5	*50*	30		20	10	30
Λιθουανία	*80*	34	20	2			44	*80*	55		30	15	
Λουξεμβούργο	*10*	50	30		10		10	*10*	80			20	
Μάλτα	*10*			100				*10*	10		90		
Μεγάλη Βρετανία	*1.640*	69	1	5	16	9		*1.640*	69	1	5	16	9
Νορβηγία		48	19	10		8	15						
Ολλανδία	*560*				100			*560*				100	
Ουγγαρία	*175*	22	46	29		3		*200*	58	1	5	30	4
Πολωνία	*520*	22	4	15	2	58		*950*	26	5	18	10	41
Πορτογαλία	*420*	50			20	30		*420*	50			20	30
Ρουμανία	*165*		36			3	61	*520*	40	10	50		
Σλοβακία	*55*		67	24		9		*135*	50		5	40	
Σλοβενία	*40*			18,5	63	18,5		*50*	15		10	70	5
Σουηδία	*250*	9	34	11		10	36	*250*	15	40	1	10	34
Τσεχία	*260*	32	47	5		16		*260*	70	5	5	20	5
Φιλανδία	*155*	12	80	6		2		*155*	12	80	6		2

Πηγή: European Commission, EUROSTAT, Water Statistics, 2011, European Commission DG Environment, 2010

1.1.7 Επιλογή αεριοποίησης ως μεθόδου διάθεσης και ενεργειακής εκμετάλλευσης ιλύος

Η ιλύς από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων είναι ένας σοβαρά υποτιμημένος πόρος. Διαθέτει μεγάλο αριθμό πολύτιμων συστατικών και υψηλή θερμική αξία, που την κάνει κατάλληλη για ευρύ φάσμα χρήσεων. Όμως, η ιλύς είναι φορέας ανεπιθύμητων ρυπαντών, που απαιτούν προσεκτική διαχείριση και όχι ανεξέλεγκτη διάθεση. Για τον λόγο αυτό η διαχείριση της ιλύος τίθεται όλο και περισσότερο υπό στενό νομοθετικό έλεγχο.

Για την επιλογή του τρόπου διάθεσης των ιλύων των βιολογικών καθαρισμών θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω:

- το ενδιαφέρον των χρηστών για το τελικό προϊόν (κόμποστ, λίπασμα)
- τη διαθεσιμότητα των τελικών αποδεκτών (έδαφος, χώροι ταφής κτλ.)
- την ενεργειακή εκμετάλλευση
- τις απαιτούμενες δαπάνες για την επεξεργασία, διάθεση της ιλύος
- την κοινωνική αποδοχή

Τα κριτήρια επιλογής της βέλτιστης λύσης για την τελική διάθεση της ιλύος στηρίζονται σε τρεις βασικούς άξονες, τον περιβαλλοντικό, τον οικονομικό και τον κοινωνικό. Κάθε πιθανή λύση πρέπει να άπτεται όλων των προαναφερθέντων παραγόντων.

Όσον αφορά τα περιβαλλοντικά κριτήρια, θα πρέπει να εξετάζονται όλες οι επιπτώσεις για κάθε εναλλακτικό τρόπο διάθεσης. Έτσι, πρέπει να προσδιορίζονται:

- Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της ιλύος
- Η απαιτούμενη κατά περίπτωση επεξεργασία της για την άρση των αρνητικών επιπτώσεων
- Τα έργα και μέσα που είναι αναγκαία για την τυχόν αποθήκευση, μεταφορά κτλ. των παραπροϊόντων επεξεργασίας

Όσον αφορά τα οικονομικά κριτήρια, για κάθε εξεταζόμενο εναλλακτικό τρόπο διαχείρισης, πρέπει να προσδιορίζεται (α) το κόστος επένδυσης, (β) το λειτουργικό κόστος και (γ) τα τυχόν έσοδα από την επαναχρησιμοποίηση των παραπροϊόντων επεξεργασίας.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εξασφάλιση της κοινωνικής αποδοχής των προκριθεισών εναλλακτικών λύσεων είναι η λεπτομερής ενημέρωση του κοινού και των φορέων, με πλήρη αναφορά στις επιπτώσεις, στα μέτρα πρόληψης καθώς και στα δικαιώματα και τις υποχρεώσεις των εμπλεκομένων φορέων. (Κάρτσωνας, 2005)

Τα οφέλη και οι περιορισμοί των μεθόδων διάθεσης της ιλύος, όπως περιγράφηκαν στα παραπάνω κεφάλαια, απεικονίζονται εν συντομία στον Πίνακα 1.6

Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω, καμία από τις ήδη ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους δεν πληροί όλα τα προαναφερθέντα κριτήρια. Η λύση για την επιτυχή διάθεση της ολοένα και αυξανόμενης ποσότητας της ιλύος είναι ο επιτυχής και ορθά σχεδιασμένος συγκερασμός των παρακάτω χαρακτηριστικών κάθε μεθόδου. Έτσι, η διάθεση της σταθεροποιημένης ιλύος στο έδαφος μπορεί να συνεχιστεί, εφόσον πληροί τους αναθεωρημένους εν ισχύ νόμους.

Η συνεχής μετακίνηση του πληθυσμού προς τα αστικά κέντρα καθιστά την θερμική εκμετάλλευση της ιλύος και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εφικτή. Θα ήταν λογικό, επομένως, να συμπεράνουμε πως ένα σύγχρονο μοντέλο αξιοποίησης της ιλύος θα είχε ως καρδιά την θερμιδική εκμετάλλευσή της, με βέλτιστη διάθεση των παραπροϊόντων από την διεργασία.

Πίνακας 1.6 Τα οφέλη και οι περιορισμοί των μεθόδων διάθεσης της ιλύος

Μέθοδοι	Οφέλη	Περιορισμοί
Διάθεση ιλύος στο έδαφος • Γεωργία • Αναμόρφωση εδαφών • Σε δασικές εκτάσεις • Κομποστοποίηση	• Θρεπτικά συστατικά • Χαμηλό κόστος • Εφαρμοσμένες τεχνολογίες	• Διακινδύνευση εκδήλωσης επιδημιών • Ποιότητα • Περιβαλλοντικές επιπτώσεις • Ανταγωνισμός με άλλα καλύτερα προϊόντα
Διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής (μέχρι 2020) • Μονο – διάθεση • Συν - διάθεση	• Χαμηλό κόστος • Εφαρμοσμένη τεχνολογία • Αυξημένη ανάκτηση CH_4	• Αέριες εκπομπές • Υδάτινες απορροές – βαρέα μέταλλα • Επιβαρημένο παρελθόν • Απώλειες χρήσιμων συστατικών • Κατάληψη χώρου • Ανεκμετάλλευτο οργανικό κλάσμα
Υγρή οξείδωση	• Μικρή κατανάλωση ενέργειας • Μεγάλη αποδόμηση οργανικού • Ιλύς με μέταλλα • Καθόλου αέρια ρύπανση • Δέσμευση βαρέων μετάλλων	• Υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις • Πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης /λειτουργίας • Προβλήματα διάβρωσης • Παραγωγή αμμωνίας • Δεν ελαττώνονται σημαντικά τα στερεά
Αναερόβια χώνευση	• Εφαρμοσμένη τεχνολογία • Καταστροφή παθογόνων • Παραγωγή CH_4	• Μικρή ανάκτηση ενέργειας • Νέο λύμα για επεξεργασία • Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων • Παρωχημένη τεχνολογία
Χρήση ιλύος ως καύσιμο • Καύση • Καύσιμο σε βιομηχανίες	• 'Πράσινη' ενέργεια • Μεταφορικά κόστη • Συνεχούς λειτουργίας	• Κοινωνική αποδοχή • Κόστος διαχείρισης υπολειμμάτων • Εκπομπές αέριων ρύπων – βερέων μετάλλων • Διάθεση τέφρας
Πυρόλυση	• Δέσμευση βαρέων μετάλλων • Παραγωγή καυσίμων – χημικών • Ελαχιστοποίηση αέριων ρύπων	• Σε πρώιμο στάδιο – μη βιομηχανικό • Το κύριο προϊόν – βιοέλαιο δύσχρηστο -ακριβό • Το char δύσχρηστο
Αεριοποίηση	• Πλήρη ενεργειακή αξιοποίηση • Ελαχιστοποίηση αέριων ρύπων • Παραγωγή ενέργειας – καυσίμων • Συγκράτηση βαρέων μετάλλων	• Ερευνητικό στάδιο • Μεγάλο πάγιο κόστος • Απαιτεί μεγάλες εγκαταστάσεις • Κοινωνική αποδοχή

Οι θερμικές μέθοδοι εκμετάλλευσης της ιλύος είναι η πυρόλυση, η καύση και η αεριοποίηση.

Η πυρόλυση της ιλύος βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο. Στην ουσία, στόχος της έρευνας της πυρόλυσης είναι η βελτιστοποίηση των διεργασιών της καύσης και της αεριοποίησης, καθώς αποτελεί το αρχικό στάδιο θερμοχημικής αποδόμησης των οργανικών ενώσεων. Το κύριο προϊόν της πυρόλυσης, ως αυτόνομης διεργασίας, είναι το εξαιρετικά δύσχρηστο, μέχρι στιγμής, βιο-έλαιο, και το στερεό οργανικό υπόλειμμα, στο οποίο και συγκεντρώνονται τα βαρέα μέταλλα, καθιστώντας την ακατάλληλη για την διάθεση του μεγαλύτερου ποσοστού των παραγόμενων ιλύων.

Από την απευθείας σύγκριση των τεχνολογιών καύσης και αεριοποίησης, που παρατίθεται στον Πίνακα 1.7, υπερισχύει η αεριοποίηση ως τεχνολογία θερμικής εκμετάλλευσης της ιλύος.

Η αεριοποίηση έχει την ικανότητα να εκμεταλλεύεται την αυξημένη υγρασία της ιλύος, χωρίς να απαιτείται δαπάνη ενέργειας για την ξήρανσή της. Επίσης, οι αέριοι ρυπαντές είναι εύκολα δεσμεύσιμοι και η παραγόμενη τέφρα δεν χαρακτηρίζεται ως επικίνδυνο απόβλητο. Η δε απόδοση σε ηλεκτρική ενέργεια είναι υψηλότερη από αυτή της καύσης.

Πίνακας 1.7 Σύγκριση τεχνολογίας καύσης και αεριοποίησης

	Αεριοποίηση	**Καύση**
Σκοπός	Μετατροπή αποβλήτων και υπολειμμάτων σε ανώτερης αξίας προϊόντα (αέριο σύνθεσης, βιοέλαια κ.ά.)	Καταστροφή των αποβλήτων. Παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας
Οξειδωτικό μέσο	Αναγωγικές συνθήκες Θερμοχημική αναμόρφωση με υδρατμό είτε χωρίς οξυγόνο είτε με οξυγόνο κάτω της στοιχειομετρίας	Οξειδωτικές συνθήκες Πλήρης καύση με περίσσεια οξυγόνου – αέρα
Θερμοκρασία λειτουργίας	750 – 1500	800 – 1000
Πίεση λειτουργίας	Ατμοσφαιρική έως υψηλή	Ατμοσφαιρική
Σύσταση αερίου πριν τον καθαρισμό του	H_2, CO, CO_2, CH_4, H_2S, NH_3, και σωματίδια	CO_2, H_2O, SO_2, NO_X, και σωματίδια
Καθαρισμός αερίου	Καθαρισμός αερίου σύνθεσης σε κλειστό κύκλωμα σε υψηλή ή ατμοσφαιρική πίεση	Καθαρισμός απαερίων σε ατμοσφαιρική πίεση
	Το καθαρό αέριο σύνθεσης με ποικίλες χρήσεις	Ανάκτηση θερμότητας από τα απαέρια
	Μετατροπή του θείου σε ποσοστό 99 % σε υψηλής καθαρότητας στοιχειακού θείου ή θειικού οξέος	Δέσμευση του SO_2 και παραγωγή υπολείμματος που πρέπει να οδηγηθεί σε Χ.Υ.Τ.Υ.
	ΔΕΝ εμφανίζονται PCDD/PCDFs PAHs, SVOCs σε συγκεντρώσεις ppt	
Στερεό προϊόν / παραπροϊόν	Παραγωγή char ή τηγμένης και υαλοποιημένης σκωρίας	Ιπτάμενη τέφρα και υγρή σκωρία διατίθενται ως επικίνδυνα απόβλητα
	Σύμφωνα με την EPA U.S.A η τέφρα <u>ΔΕΝ</u> θεωρείται επικίνδυνο απόβλητο	Σύμφωνα με την EPA U.S.A η τέφρα θεωρείται επικίνδυνο απόβλητο
	Η αεριοποίηση μπορεί να συνδυαστεί με: 1. Combined Cycle (45%) 2. Fuel Cells (60%) 3. Fischer-Tropsch (65%)	Ανάλογα με το καύσιμο και την τεχνολογία (π.χ. υπερκρίσιμος κύκλος ατμού, CC) η απόδοση κυμαίνεται από 18 – 43%

Πηγές: Raghunathan, & Gullett, 1996, EPRI, 1998, Baker, D. C., 1994, Elled A.L., et al 2007, Marrero T et al, 2008, Pinto F, et al. 2008, Khan MR., 1989, Medcalf & Manahan, 1997, Medcalf et al, 1998, Zhou J, et al 2000, Drift A, et al 2001, Paterson, N. et al 2001, Tian FJ, et al 2002, Liu & Gibbs, 2003, Folgueras MB, et al 2004, Kuramochi H, et al 2005, Li W, et al 2005, Cao JP, et al 2010, Bool & Helble, 1995, Colbert JW et al 1998, Martin RS et al, 1998, Reed G.P., 2001, Frandsen F, et al, 1994, Pinto F, et al, 2007, Saveyn et al 2010, Dajnak D., et al, 2003

1.2 Αεριοποίηση ιλύων βιολογικών καθαρισμών

Αεριοποίηση ονομάζεται η θερμοχημική μετατροπή του οργανικού κλάσματος ενός καυσίμου σε αέριο προϊόν. Στην ουσία αποτελεί ένα μετασχηματισμό ποσοστού της θερμογόνου δύναμης της πρώτης ύλης σε αέριο προϊόν, το οποίο αποτελείται κυρίως από H_2, CO, CO_2 και CH_4. Οι πρώτες ύλες που αεριοποιούνται ή μπορούν να αεριοποιηθούν είναι το σύνολο των γαιανθράκων και η βιομάζα (Βάμβουκα, 2002, Minchener, AJ., 2005). Οι χρήσεις του αερίου προϊόντος ποικίλουν ανάλογα με τη σύστασή του. (McKendry, Part 2 2002,Higman & van der Burgt, 2003).

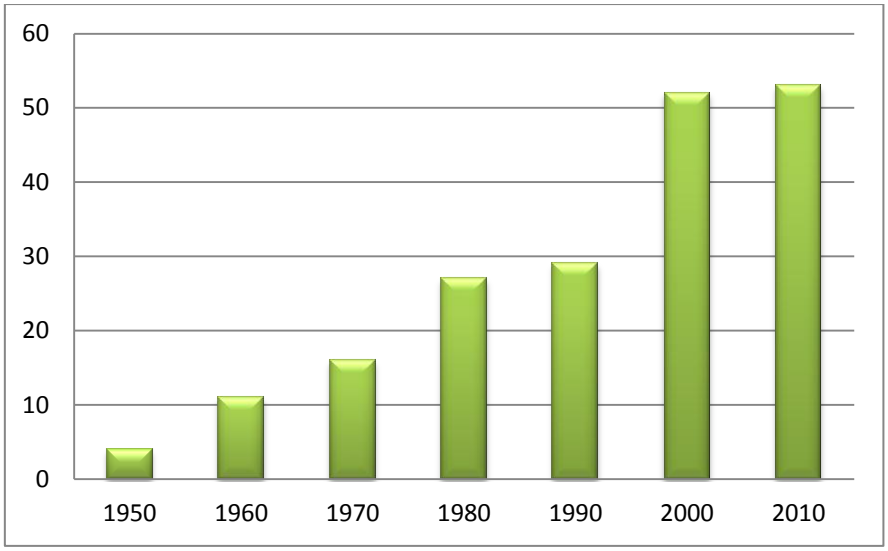
Η αεριοποίηση δεν είναι καινούρια μέθοδος εκμετάλλευσης στερεών καυσίμων. Η πρώτη αναφορά στην αεριοποίηση γίνεται στις αρχές του 17ου αιώνα, ενώ η πρώτη δήλωση ευρεσιτεχνίας γίνεται από τον Robert Gardner το 1788. Από το 1792 ξεκινά η χρήση του αερίου προϊόντος για θέρμανση και φωτισμό (Kirkels & Verbong, 2011). Ακολουθεί ο συνδυασμός αεριοποιητών και μηχανών εσωτερικής καύσης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις απαρχές του 19ου αιώνα, ενώ λίγο αργότερα κατασκευάζονται τα πρώτα αυτοκίνητα εφοδιασμένα με αεριοποιητή. Η κορύφωση της χρήσης της αεριοποίησης επήλθε στα χρόνια λίγο πριν και κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου. Στην Σουηδία είχαν τοποθετηθεί αεριοποιητές στο μεγαλύτερο μέρος του στόλου των αυτοκινήτων λόγω έλλειψης πετρελαίου. Στη Ναζιστική Γερμανία χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη τεχνολογία με σκοπό την στρατηγική απεξάρτησή της από το πετρέλαιο. Παράλληλα, η χρήση του αερίου επεκτάθηκε και στην παραγωγή χημικών αλλά και υγρών καυσίμων, τεχνολογίες που εφαρμόζονται μέχρι και τις μέρες μας. Μετά, όμως, η αφθονία του μαύρου χρυσού περιόρισε τη χρήση της αεριοποίησης. Η αεριοποίηση ήρθε πάλι στο προσκήνιο όταν εφαρμόστηκαν διάφορες πολιτικές απαγόρευσης εισαγωγής πετρελαίου, στις αρχές της δεκαετίας 1970, που είχαν ως αποτέλεσμα δραστικές αυξήσεις της τιμής του, καθώς και σοβαρές ελλείψεις φυσικού αερίου(Chandrakant, 1997, Higman & van der Burgt, 2003, Knoef, H. 2005). Στην χώρα μας η αεριοποίηση λιγνίτη έχει εφαρμοστεί για την

παραγωγή αμμωνίας στο εργοστάσιο της Α.Ε.Β.Α.Λ. στην Πτολεμαΐδα. Η μονάδα κατασκευάστηκε το 1963 και μέχρι το 1997 παρήγαγε αμμωνία από υδρογόνο προερχόμενο από την αεριοποίηση του λιγνίτη και άζωτο από την κλασμάτωση του αέρα. Η τεχνολογία των αεριοποιητών ήταν εμφυσούμενου νέφους και ο καθαρισμός του παραγόμενου αερίου οδηγούσε σε υδρογόνο μεγάλης καθαρότητας (Ανδρουτσόπουλος, Γ. 2004).

Σήμερα, η αεριοποίηση βρίσκει πληθώρα εφαρμογών και νέες μονάδες κατασκευάζονται ανά τον κόσμο. Αναφερόμενοι σε μονάδες ανά τον κόσμο, με εγκατεστημένη ισχύ από 100 MW_{el} και άνω, αριθμούνται σε 153 μέχρι το 2011, αριθμός που θα ανέλθει σε 191 μέχρι το 2016. Το μεγαλύτερο μέρος της εγκατεστημένης ισχύς των μονάδων αυτών αντιστοιχεί στην παραγωγή χημικών με τη μέθοδο Fischer Tropsch. Ακολουθεί η παραγωγή αμμωνίας, υδρογόνου και μεθανόλης. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ραγδαία αύξηση στην κατασκευή μονάδων αεριοποίησης για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Στοιχεία αντλημένα από World Gasification Database, US Department of Energy 2000, 2005, 2007).

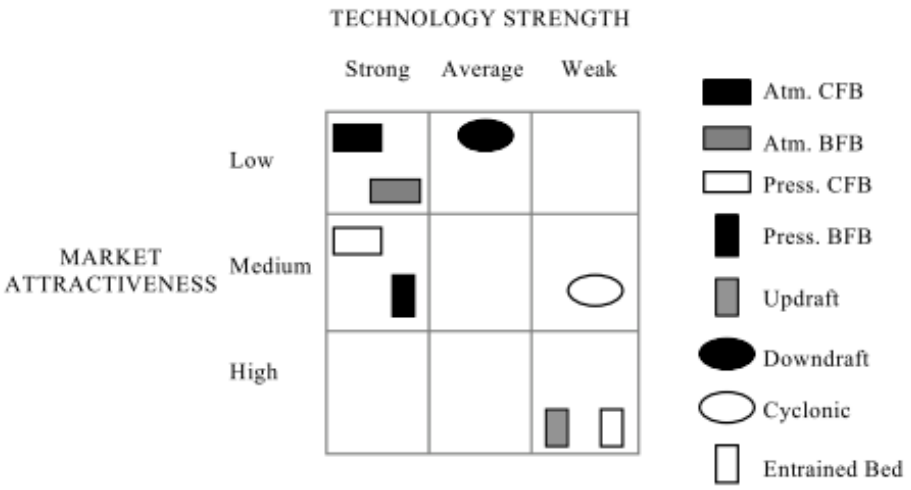
Στο παρακάτω Σχήμα 1.3 απεικονίζεται η κατασκευή μονάδων αεριοποίησης όλων των ειδών καυσίμων, σε όλο τον κόσμο από το 1954 έως και αυτές που κατασκευάζονται, των οποίων η εκκίνηση λειτουργίας αναμένεται έως το 2016. Σημειώνεται πως οι αριθμοί των εγκαταστάσεων για κάθε δεκαετία ΔΕΝ είναι αθροιστικοί ως προς τον αριθμό των προηγουμένων ετών. Το αυξητικό άλμα που παρουσιάζεται στις δεκαετίες 1990 και 2000 είναι ενδεικτικό της στροφής προς τη νέα αυτή τεχνολογία.

Από τις παραπάνω μονάδες, όμως, η χρήση βιομάζας ή/και απορριμμάτων ως πρώτης ύλης ανέρχεται συνολικά μόνο στις 11 μονάδες: 3 ανά δεκαετία 1980, 1990, 2000 και 2 κατά τη δεκαετία 2010.



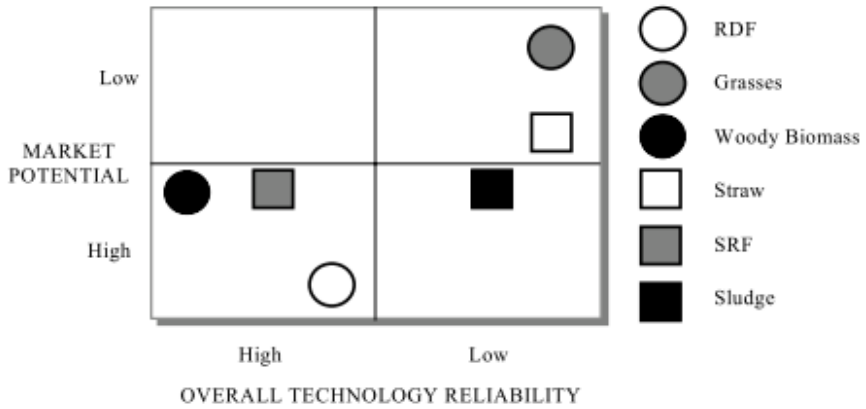
Σχήμα 1.3 Βιομηχανικές εγκαταστάσεις αεριοποίησης ανά δεκαετία

Σύμφωνα με την ανάλυση του κ. Μανιάτη (Maniatis, K., 2001) που αφορούσε τις τεχνολογίες και την αγορά της αεριοποίησης, υπάρχουν περίπου 50 κατασκευαστές συστημάτων αεριοποίησης. Όμως, οι λιγοστές πληροφορίες για το πάγιο κόστος μιας μονάδας, την απόδοσή της, τις εκπομπές ρύπων και τα λειτουργικά κόστη, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι κανένας κατασκευαστής δεν δίνει πλήρη εγγύηση για τις τεχνικές επιδόσεις των μονάδων, δεν τις καθιστούν ελκυστικές προς τους επενδυτές. Επίσης, η έλλειψη πραγματικής εμπειρίας από τη λειτουργία μονάδων αεριοποίησης σε συνδυασμό με την αποτυχία αρκετών πιλοτικών διατάξεων, δημιούργησε κλίμα δυσπιστίας στους επενδυτές. Η απεικόνιση της ανωτέρω κατάστασης (Εικόνα 1.2) βρίσκει το σημείο τομής της ελκυστικότητας για επένδυση και της τεχνολογίας κενό. Περισσότερη εφαρμοσμένη έρευνα ή/και βελτιωμένες πιλοτικές διατάξεις θα καλύψουν το κενό αυτό.



Εικόνα 1.2 Σχηματική απεικόνιση τρέχουσας κατάστασης επενδυτικού δυναμικού και τεχνολογίας αεριοποίησης (Maniatis, K., 2001).

Από την Εικόνα 1.3 γίνεται σαφές πως η μόνη πρώτη ύλη που είναι πλέον άμεσα διαθέσιμη και παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον, χωρίς να της αντιστοιχεί κάποια τεχνολογικά προηγμένη και εφαρμοσμένη μέθοδος αεριοποίησης είναι η ιλύς. Η χρήση της 'καθαρής' και άμεσα διαθέσιμης βιομάζας συνεχώς αυξάνεται, το ενδιαφέρον στρέφεται στην απόβλητη και υπολειμματική βιομάζα, που έχει πολλές φορές αρνητικό κόστος, όπως η ιλύς των βιολογικών καθαρισμών, τα αστικά απορρίμματα κ.ά. (Faaij A., 2007)



Εικόνα 1.3 Σύγκριση εφαρμοσμένων τεχνολογιών και διαθέσιμων πρώτων υλών

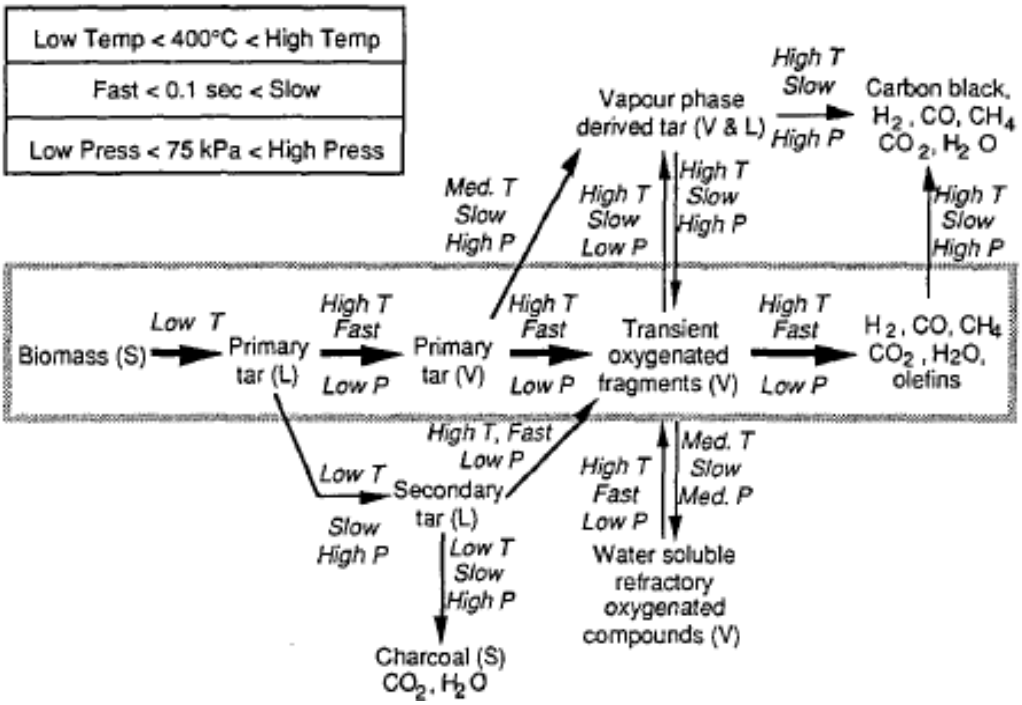
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται η μεγάλη σημασία της συνέχισης της έρευνας πάνω στην αεριοποίηση της ιλύος των βιολογικών καθαρισμών, ώστε να προκύψει άρτια μέθοδος αεριοποίησης, αποδοτική, περιβαλλοντικά φιλική, εμπορικά θελκτική και οικονομικά βιώσιμη.

1.2.1 Χημεία της αεριοποίησης

Η οργανική πρώτη ύλη που εισέρχεται σε έναν αεριοποιητή διέρχεται από τις ακόλουθες διαδοχικές φάσεις κατά την άνοδο της θερμοκρασίας (Gomez-Barea & Leckner, 2010, Bridgewater, A.V. 2003, Dogru M et al 2002).

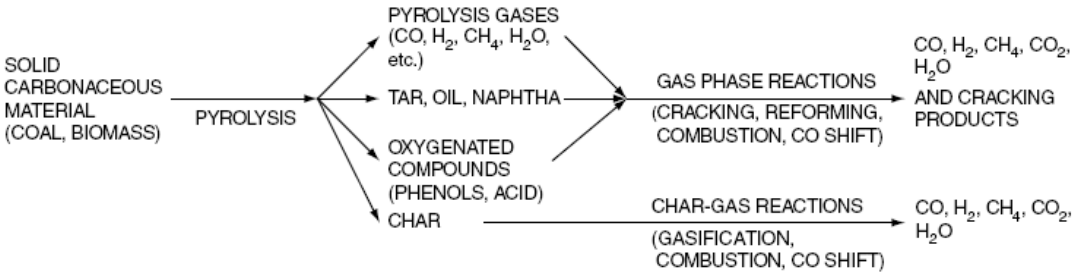
Ξήρανση – πυρόλυση – αεριοποίηση

Σαφής θερμοκρασιακός διαχωρισμός της φάσης της πυρόλυσης και της αεριοποίησης σε έναν αντιδραστήρα συνεχούς έργου είναι δύσκολο να γίνει. Στην ουσία από τη φάση της πυρόλυσης διέρχονται όλες οι οργανικές ενώσεις όταν η θερμοκρασία περνά του 250 ^{o}C. Τα προϊόντα της πυρόλυσης γίνονται αντιδρώντα της αεριοποίησης. Κατά τη φάση της πυρόλυσης τα βαρέα οργανικά κλάσματα του καυσίμου διασπούνται σε μικρότερες οργανικές ενώσεις που διαχωρίζονται σε: (α) συμπυκνώσιμα αέρια (πισσούχο προϊόν –tars), που αποτελούνται από οργανικές ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους, (β) σε μη συμπυκνώσιμα αέρια, όπως το H_2, CO, CO_2, CH_4 και ελαφρούς C_xH_y με λίγα άτομα άνθρακα, (γ) υδρατμό και (δ) εξανθράκωμα (char), το οποίο αποτελείται από τον άνθρακα που δεν έχει πυρολυθεί και το ανόργανο μέρος του καυσίμου. Στην Εικόνα 1.5 απεικονίζεται η παραγωγή των ενδιάμεσων προϊόντων της πυρόλυσης σε συνάρτηση με τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή της , τη πίεση και το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Η πυρόλυση, ως συνολική δράση, είναι θερμικά ουδέτερη. Απαιτούνται, όμως ποσότητες ενέργειας για την επίτευξη της θερμοκρασίας αντίδρασης.



Εικόνα 1.5 Επίδραση του ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας και της πίεσης στα προϊόντα της πυρόλυσης (Bridgewater, A.V. 1996)

Μετά τη διέλευση της φάσης της πυρόλυσης, τα ενδιάμεσα προϊόντα περνούν στη φάση της αεριοποίησης. Εκεί, τα βαρέα πτητικά οργανικά (tars) αντιδρούν με τα αέρια προϊόντα και με τον υδρατμό (Dogru M et al 2002) (Εικόνα 1.6).



Εικόνα 1.6 Πορεία αντιδράσεων πυρόλυσης αεριοποίησης (Reimert & Schaub 1989)

Η βασική αντίδραση της αεριοποίησης (αντίδραση υδραερίου), όπως προκύπτει από το άθροισμα όλων των παράλληλων αντιδράσεων είναι η παρακάτω, όπου ο στοιχειακός άνθρακας αντιδρά με τον υδρατμό (Mun et al. 2009, McKendry, Part 3 2002, Koroneos & Lykidou, 2011):

$$C_{(s)} + H_2O_{(g)} \rightarrow CO + H_2 \qquad +131 \text{ MJ/kmol}$$

Οι δευτερεύουσες αντιδράσεις στερεού – αερίου, που λαμβάνουν χώρα στην φάση της αεριοποίησης, είναι:

- Αεριοποίηση με διοξείδιο του άνθρακα (αντίδραση Boudouard)

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO \qquad +172 \text{ MJ/kmol}$$

- Αεριοποίηση με υδρογόνο (αναγωγική αεριοποίηση)

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4 \qquad -75 \text{ MJ/kmol}$$

Από τις αντιδράσεις αερίου – αερίου, οι σημαντικότερες είναι η αναμόρφωση του μεθανίου και η αντίδραση μετάπτωσης – Water-Gas Shift.

$$CH_4 + H_2O_{(g)} \rightarrow CO + H_2 \qquad + 206 \text{ MJ/kmol}$$

$$CO + H_2O_{(g)} \rightarrow CO_2 + H_2 \qquad - 41 \text{ MJ/kmol}$$

Επίσης, οι υδρογονάνθρακες με μικρό μοριακό βάρος αντιδρούν με τον υδρατμό, (Lamacz A, 2009)

$$C_xH_y + x\ H_2O_{(g)} \rightarrow xCO + (x+y/2)\ H_2$$

Από τις παραπάνω αντιδράσεις προκύπτει ότι ο υδρατμός παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση της σύστασης του αερίου προϊόντος. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες για τη διερεύνηση της επίδρασης του υδρατμού στα αποτελέσματα της αεριοποίησης. Σε γενικές γραμμές, η αύξηση της παροχής υδρατμού οδηγεί στην παραγωγή περισσότερου αερίου προϊόντος, με μεγαλύτερη περιεκτικότητα υδρογόνου (Schuster, G. et al, 2001, Pengmei L. et al, 2007, Qixiang X. et al,2011, Dupont, C., et al 2007).

Η αεριοποίηση είναι στο σύνολό της ενδόθερμη δράση. Η κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων της διεργασίας πραγματοποιείται με την

ενεργειακή εκμετάλλευση των υπολειμμάτων της αεριοποίησης, δηλαδή είτε με την καύση του υπολειμματικού char (αλλοθερμική αεριοποίηση), είτε με την απευθείας εισαγωγή αέρα ή οξυγόνου (αυτόθερμη αεριοποίηση). Αρκετές μελέτες έχουν εκπονηθεί για τη διερεύνηση της καύσης του char και συνήθως εστιάζονται στην ενεργότητά του (Nowicki, L et al, 2010, Scott, S. A. et al 2005, Umeki, K. et al, 2010, Gordillo & Belghit, 2011).

1.2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της αεριοποίησης

Οι σημαντικότεροι παράγοντες, για δεδομένη πρώτη ύλη, που επηρεάζουν την σύσταση και την ποιότητα του αερίου προϊόντος, την παραγωγή πισσών και τη περιεκτικότητα σε άνθρακα του char, είναι (α) ο χρόνος παραμονής των στερεών και του αερίου στον αντιδραστήρα, (β) το οξειδωτικό μέσο, που μπορεί να είναι αέρας ή οξυγόνο, υδρατμός ή μίγμα αυτών, που συνδυάζεται με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας στον αντιδραστήρα, (γ) ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας, (δ) η ύπαρξη καταλύτη μέσα στην κλίνη (Rezaiyan & Cheremisinoff 2005).

Οι επίδραση των παραπάνω παραμέτρων απεικονίζεται καλύτερα στις διαφοροποιήσεις των αποδόσεων των αεριοποιητών. Κάθε τύπος και είδος αεριοποιητή έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, τα οποία και επιδρούν ανάλογα στην απόδοση της αεριοποίησης. Οι τεχνολογίες, που έχουν χρησιμοποιηθεί στην αεριοποίηση της ιλύος, προέρχονται από τον χώρο των γαιανθράκων και της βιομάζας.

1.2.2 Το αέριο προϊόν αεριοποίησης ιλύων

Με την αεριοποίηση της ιλύος παράγεται ένα υψηλής ποιότητας αέριο καύσιμο (αέριο σύνθεσης/syngas) το οποίο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Hamilton, C.J., 2000).

Η κατάλληλη επιλογή της μεθόδου εκμετάλλευσης του αερίου προϊόντος έγκειται στη σύστασή του. Η θερμογόνος δύναμη του αερίου το καθιστά ικανό για περαιτέρω καύση. Η ποιότητα και η σύστασή του εξαρτόνται κυρίως από την εφαρμοσμένη τεχνολογία της αεριοποίησης. Το αέριο σύνθεσης μπορεί να οδηγηθεί σε ειδικούς κλιβάνους, σε μηχανές εσωτερικής καύσης (ICP), σε συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου – ατμοστρόβιλου (IGCC) και σε κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC). Όμως, η χρήση του αερίου σε κυψέλες καυσίμου ή για την παραγωγή υδρογόνου απαιτεί την αφαίρεση του πισσούχου παραπροϊόντος, που πραγματοποιείται, συνήθως, με ταυτόχρονη αναμόρφωση του αερίου προς υδρογόνο. Αυτό επιτυγχάνεται σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και παρουσία καταλυτών (Pinto F, et al. 2008). Γενικά, σε εφαρμογές με μικρή εγκατεστημένη ισχύ, προτιμούνται απλές λύσεις, όπως οι ICP, καθώς, παρά την αυξημένη απόδοση των συνδυασμένων κύκλων, είναι οικονομικά συμφέρουσες. Μάλιστα, κατά την καύση του αερίου προϊόντος καταστρέφεται κάθε οργανικό παραπροϊόν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο βαθμός καταστροφής των πολυχλωριωμένων διφαινυλίων PCBs φτάνει το 99,999% (Marrero T et al, 2003)

Οι εγγενής ρυπαντές της ιλύος θα μεταφερθούν στα προϊόντα της αεριοποίησης, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη καθαρισμού του αερίου προϊόντος. Στην περίπτωση εκμετάλλευσης της ιλύος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αεριοποίησής της πρέπει να διερευνηθεί η κινητικότητα των ρυπαντών στα προϊόντα της διεργασίας. Το αέριο προϊόν είναι φορέας αερίων ρυπαντών όπως H_2S, NH_3 και HCl, πισσών αλλά και ιπτάμενης τέφρας, η οποία περιέχει ποσοστό των βαρέων μετάλλων που ενδέχεται να εμπεριέχονται στην ιλύ. Ειδικότερα για την επιλογή της χρήσης του αερίου προϊόντος (ICP, IGCC, SOFC, κ.ά) αλλά και της διάθεσης του στερεού ανόργανου υπολείμματος είναι πολύ σημαντικό να καθοριστεί η ποιότητα του αερίου και η περιεκτικότητα των βαρέων μετάλλων στην τέφρα (Manara & Zabaniotou, 2012).

Το εμπεριεχόμενο άζωτο, το θείο και το χλώριο, λόγο των αναγωγικών συνθηκών της αεριοποίησης, μετατρέπονται σε H_2S, NH_3 και HCl (Pinto F, et al. 2008). Η παρουσία αυτών των ρυπαντών αποτελεί παρεμποδιστικό παράγοντα για το σύνολο των διαθέσιμων τεχνολογιών εκμετάλλευσης του αερίου σύνθεσης. Η μείωση της παραγωγής τους αποτελεί μέρος έρευνας του μηχανισμού δημιουργίας τους, με σκοπό τον έλεγχο παραγωγής τους και την απομάκρυνσή τους πριν την τελική εφαρμογή (Khan MR., 1989, Medcalf & Manahan, 1997, Medcalf et al, 1998, Zhou J, et al 2000, Drift A, et al 2001, Paterson, N. et al 2001, Tian FJ, et al 2002, Liu & Gibbs, 2003, Folgueras MB, et al 2004, Kuramochi H, et al 2005, Li W, et al 2005, Cao JP, et al 2010).

Το αέριο προϊόν περιέχει και συμπυκνώσιμους υδρογονάνθρακες, τις πίσσες. Οι πίσσες, που παράγονται κυρίως στη φάση της πυρόλυσης, ενδέχεται να προκαλέσουν επικαθίσεις και φραγμό στη γραμμή του αερίου, λόγω της συμπύκνωσής τους σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και του υψηλού ιξώδους τους. Επίσης, είναι περιοριστικός παράγοντας της περαιτέρω χρήσης του αερίου. Η χρήση καταλυτών, πλυντρίδων και η εν γένει βελτίωση των αεριοποιητών μπορεί να είναι το κλειδί στη λύση του προβλήματος. (Devi L et al, 2003, Han & Kim, 2008, Phuphuakrat TT. et al, 2010).

Οι έρευνες στην αεριοποίηση της βιομάζας και ειδικότερα στην αεριοποίηση της ιλύος στοχεύουν στην εύρεση της βέλτιστης μεθόδου, η οποία πρέπει να είναι οικονομικά βιώσιμη (Kirkels & Verbong, 2011).

1.2.3 Βαρέα μέταλλα

Η ιλύς των βιολογικών καθαρισμών ενδέχεται να περιέχει βαρέα μέταλλα (Πίνακας 1.2). Η διερεύνηση της κινητικότητας των βαρέων μετάλλων είναι πολύ σημαντική για την επιλογή της μεθόδου διάθεσης της ιλύος. Ποσοστό των μετάλλων ενδέχεται να μεταφερθεί στην αέρια φάση ή να παραμείνει στο ανόργανο πλέγμα της τέφρας σε μορφή αλάτων και οξειδίων, συγκρατώντας και μέρος του αζώτου, του θείου και του χλωρίου (Pinto F, et al. 2008, Frandsen F, et al, 1994, Pinto F, et al, 2007).

Σύμφωνα με τις έρευνες των Saveyn et al (2010) τα Cu, Pb και Zn παρέμειναν στο στερεό υπόλειμμα, ενώ τα Hg και Cd μετακινήθηκαν προς το πισσούχο παραπροϊόν και την ιπτάμενη τέφρα. Παρόμοια ευρήματα εμφανίζονται και σε άλλες έρευνες τόσο στην αεριοποίηση ιλύος όσο και άλλων καυσίμων – βιομάζα, γαιάνθρακας (Bool & Helble, 1995, Colbert JW et al 1998, Martin RS et al, 1998, Reed G.P., 2001).

Από τα παραπάνω προκύπτει πολύ μικρή διάχυση των βαρέων μετάλλων στο αέριο προϊόν. Τα βαρέα μέταλλα, είτε παραμένουν στο στερεό υπόλειμμα είτε συλλέγονται στην ιπτάμενη τέφρα. Η εν γένει ανάγκη καθαρισμού του παραγόμενου αερίου της αεριοποίησης είναι και η απάντηση της τεχνολογίας αυτής στο πρόβλημα της κινητικότητας των βαρέων μετάλλων. Η πτώση της θερμοκρασίας κατά την παρακράτηση της ιπτάμενης τέφρας οδηγεί σε εγκλωβισμό των μετάλλων. Έτσι, τα μέταλλα διασπείρονται στα κλάσματα της τέφρας, και δεσμεύονται στο σύνολό τους.

1.2.5 Εργαστηριακές μελέτες αεριοποίησης ιλύων

Αρκετοί ερευνητές έχουν αεριοποιήσει ιλύ σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες διαλείποντος έργου. Έχει διερευνηθεί η επίδραση της παροχής του υδρατμού, της θερμοκρασίας, του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας, στα προϊόντα της αεριοποίησης. Επίσης, έχει πραγματοποιηθεί ποιοτικός χαρακτηρισμός του πισσούχου παραπροϊόντος. Από τα πειράματα διαπιστώνεται πως η αεριοποίηση της ιλύος είναι αποδοτικότερη σε υψηλές θερμοκρασίες, πάνω από 800 ^{o}C. Η επίδραση του υδρατμού είναι θετική έως μιας τιμής. (Chun, Y.N et al, 2012, Dominguez, A. et al. 2008, Dominguez, A., et al 2006, Domínguez, A. et al, 2006, Ferrasse, J. H., et al, 2011, Seok-Pyo H., et al, 2011, Menéndez, J. Aet al, 2005, Menéndez, J. A., et al, 2004, Nipattummakul, N., et al, 2010, Nipattummakul, N., et al, 2010, Lech, N., et al, 2010, Gonzalez, O.I.,. et al, 2011, Bowser T.J. et al, 2005).

Επίσης, έχουν πραγματοποιηθέι έρευνες πάνω στην αεριοποίηση ιλύων με χρήση τεχνολογίας πλάσματος. Αν και η τεχνολογία βρίσκεται σε

πρώιμο στάδιο, μελέτες και αρχικά πειράματα δείχουν πως μια τέτοια διάταξη θα μπορούσε να είναι αποδοτική. (Balgaranova, J., 2003, Chun, Y.N., et al, 2012, Moustakas K, et al 2005, Kalinci, Y. et al 2011, Mountouris, A., et al 2008, Leal-Quiros,E. et al 2007)

1.2.6 Πιλοτικές διατάξεις αεριοποίησης ιλύων

Οι αντιδραστήρες συνεχούς έργου, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αεριοποίηση ιλύων βιολογικών καθαρισμών είναι:

- Σταθερής κλίνης ομορροής (Downdraft Gasifiers)
  Το παραχθέν αέριο προϊόν είχε θερμογόνο δύναμη περίπου 3 - 4 MJ/Nm^3, με συγκέντρωση σε πίσσες 7 - 8 g/Nm^3 και μέση σύσταση (%) 8 -11 H_2, 6 - 13 CO, 1.4 - 2 CH_4 , 11 - 15 CO_2 , και 62.7 N_2. (Midilli, A. et al, 2001, Dogru, M. et al, 2002, Pérez, J.F. et al, 2012)
- Σταθερής κλίνης αντιρροής (Updraft Gasifiers)
  Το παραχθέν αέριο προϊόν είχε θερμογόνο δύναμη περίπου 3 - 4 MJ/Nm^3, με το 30% του άνθρακα της ιλύος να καταλήγει σε πίσσες και μέση σύσταση (%) 4 H_2, 15 CO, 1.5 CH_4 , 15 CO_2 , και 59 N_2. (Seggiani, M. et al, 2012, Seggiani, M. et al, 2012 In Press)
- Ρευστοστερεάς κλίνης (Fluidized Bed - FB)
  Το παραχθέν αέριο προϊόν είχε θερμογόνο δύναμη περίπου 4.8 MJ/Nm^3, και μέση σύσταση (%)11-13 H_2, 14-24 CO, 2-4 CH_4 , 9-13 CO_2 , και 46 N_2. (Adegoroye, A. et al, 2004, Manyà, J.J. et al, 2005, Petersen, & Werther, 2005, Manyà, J.J. et al, 2006, Aznar, M. et al, 2008, Gross, B. et al, 2008, Aznar, M. et al, 2009, Mun, T et al, 2009, Wang & Yan, 2009, de Andrés, J. et al, 2011, Kang, S.W. et al, 2011, Judex, J. W. et al, 2012, Nilsson, S. et al, 2012, Nilsson, S. et al, 2012
- Ρευστοστερεά κλίνη με ανακυκλοφορία του μέσου ρευστοαιώρησης (Circulating Fluidized Beds CFB)

Το παραχθέν αέριο προϊόν είχε θερμογόνο δύναμη περίπου 11-14 MJ/Nm^3, και μέση σύσταση (%) 39 H_2, 16 CO, 8 CH_4 , 25 CO_2. (Petersen & Werther, 2005, Petersen & Werther, 2005, Saw, W et al, 2012, Schmid, J.C. et al 2012)

Αξίζει να σημειωθεί πως τα παραπάνω συστήματα, σχεδόν στο σύνολό τους, είναι πιλοτικές διατάξεις, με παροχή πρώτης ύλης 5-20 kg/h. Όλα τα συστήματα, πλην της CFB, είναι αυτόθερμα, καθώς η καύση του υπολειμματικού char πραγματοποιείται με απευθείας εισαγωγή αέρα στον αντιδραστήρα. Η παραγωγή πισσούχου παραπροϊόντος εμφανίζεται αρκετά αυξημένη σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους βιομάζας. Η τεχνολογία με τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και την καλύτερη ποιότητα αερίου ήταν η CFB.

1.3 Συμπεράσματα

Τα βιολογικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων που έχουν επικρατήσει προσφέρουν σταθερότητα λειτουργίας αλλά απαιτούν μεγάλες εγκαταστάσεις (υψηλό πάγιο κόστος) καθώς και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας (υψηλό λειτουργικό κόστος) εξ΄ αιτίας των αναγκαίων μεγάλων ποσοτήτων παροχής οξυγόνου για να συντηρηθούν .

Η σημαντικότερη σχεδιαστική παράμετρος ενός συστήματος ενεργού ιλύος, που ορίζει το ύψος της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και τη σύσταση της παραγόμενης ιλύος είναι το Θ_c.

Καμία έρευνα δεν έχει γίνει παγκοσμίως σχετικά με την «καθαρή» απαιτούμενη ενέργεια ενός ολοκληρωμένου βιολογικού καθαρισμού όπου η παραγόμενη περίσσεια βιολογικής λάσπης αξιοποιείται ενεργειακά με την χρήση θερμικών τεχνικών όπως είναι η καύση και η πυρόλυση-αεριοποίηση.

Επομένως, πρέπει να διερευνηθεί η επίδραση των στοιχείων που ορίζονται από το Θ_c, η σύσταση της ιλύος και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, στην ολοκληρωμένη θεώρηση ενός συνδυασμένου συστήματος επεξεργασίας λυμάτων και αεριοποίησης της περίσσειας ιλύος προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο την αναζήτηση του πιθανού σημείου θετικού ενεργειακού ισοζυγίου.

Κεφάλαιο 2 Πειραματική Διαδικασία

2.1 Σκοπός

Προσπάθεια της παρούσας εργασίας ήταν η συσχέτιση των λειτουργικών και σχεδιαστικών χαρακτηριστικών ενός αερόβιου βιολογικού καθαρισμού με την δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησης των παραγόμενων βιολογικών λασπών μέσω πυρόλυσης-αεριοποίησης τους με σκοπό την ενεργειακή αριστοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, Για την επίτευξη του στόχου αυτού σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε η έρευνα που περιγράφεται περιληπτικά στα παρακάτω πέντε στάδια:

Στάδιο 1: Κατασκευάστηκε ένας τυπικός εργαστηριακός αλλόθερμος αντιδραστήρας πυρόλυσης-αεριοποίησης βιομάζας διαλείποντος έργου με όλα τα συστήματα συλλογής και ανάλυσης πισσών και αερίων προϊόντων. Ο αντιδραστήρας αυτός αριστοποιήθηκε ως προς την τελική θερμοκρασία λειτουργίας του, τον ρυθμό φέροντος αερίου (N_2) καθώς και τον ρυθμό τροφοδοσίας του νερού. Για την αριστοποίηση του χρησιμοποιήθηκαν λάσπες από βιομηχανικούς αερόβιους βιολογικούς καθαρισμούς οι οποίοι λειτουργούσαν με καλή απόδοση.

Στάδιο 2: Κατασκευάστηκαν τέσσερις αερόβιοι βιοντιδραστήρες, όγκου 5 L ο κάθε ένας, συνεχούς λειτουργίας, πλήρους ανάδευσης, χωρίς επιστροφή βιολογικής λάσπης έτσι ώστε να μπορεί να επιβάλλεται η επιθυμητή ηλικία της λάσπης (Θc) ρυθμίζοντας την υδραυλική φόρτιση των βιοαντιδραστήρων. Στους βιοαντιδραστήρες αυτούς μπορούσε να υπολογιστεί το ισοζύγιο του άνθρακα μετρώντας συνεχώς το παραγόμενο CO_2 καθώς και τον άνθρακα της στερεάς (λάσπη) φάσης και της υγρής φάσης στην έξοδο του αντιδραστήρα. Η τροφοδοσία του αέρα παρέμενε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων και υπολογισμένη ώστε να είναι σε περίσσεια ώστε το οξυγόνο να μην αποτελεί παρεμποδιστικό παράγοντα ανάπτυξης των μικροοργανισμών.

Στάδιο 3: Οι βιοαντιδραστήρες αυτοί λειτούργησαν παράλληλα, για τρία περίπου χρόνια σε διάφορες υδραυλικές φορτίσεις (Θc) χρησιμοποιώντας

πάντοτε το ίδιο χημοστατικό θρεπτικό υπόστρωμα ώστε τα αποτελέσματα τους να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Και ενώ η υδραυλική φόρτιση μεταβάλλονταν ανάλογα με το επιθυμητό Θc που έπρεπε να επιβληθεί, η φόρτιση σε άνθρακα παρέμενε σταθερή (1.44 g C/L/d). Η έναρξη των πειραμάτων άρχισε από Θc=1d (μέγιστη υδραυλική φόρτιση 5 L/d) και όταν σταθεροποιούνταν το ισοζύγιο του άνθρακα δηλαδή επέρχονταν ισορροπία του οικοσυστήματος, τότε ελαττώνονταν η υδραυλική φόρτιση ώστε το οικοσύστημα να αναπτυχθεί στο αμέσως επόμενο Θc. Έτσι μελετήθηκαν τα οικοσυστήματα που αντιστοιχούσαν σε Θc=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28 και 30 days. Όταν σταθεροποιούνταν κάθε οικοσύστημα, οι βιοαντιδραστήρες συνέχιζαν να λειτουργούν στις ίδιες συνθήκες ώστε να συλλεχθεί η απαραίτητη ποσότητα βιολογικής λάσπης που αντιστοιχούσε στη συγκεκριμένη υδραυλική φόρτιση (Θc). Τα τέσσερα δείγματα για κάθε Θc αφού αναλύονταν ως προς την στοιχειομετρία τους (C, N, H, O, P και τέφρα), αναμιγνύονταν ανά δύο ώστε να προκύψουν δύο δείγματα για κάθε Θc και κατόπιν αποθηκεύονταν σε θερμοκρασία -18oC ώστε να προωθηθούν χωρίς αλλοιώσεις στην διαδικασία της πυρόλυσης-αεριοποίησης την κατάλληλη χρονική στιγμή.

Στάδιο 4: Τα αποθηκευμένα στη κατάψυξη δείγματα, όλα μαζί και με τυχαία σειρά επεξεργάστηκαν στη πειραματική συσκευή πυρόλυσης-αεριοποίησης του 1ου σταδίου καθώς και στις συνθήκες που προσδιορίστηκαν στο ίδιο στάδιο. Συλλέχθηκαν τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων της πυρόλυσης-αεριοποίησης που αντιστοιχούσαν σε κάθε Θc (δύο δείγματα).

Στάδιο 5: Τα αποτελέσματα των σταδίων 3 και 4 αξιολογήθηκαν με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων κατά πόσο η ηλικία της λάσπης ενός βιολογικού καθαρισμού επιδρά στην ενεργειακή αξιοποίηση τους μέσω της πυρόλυσης-αεριοποίησης.

2.2 Συσκευές και Μέθοδοι

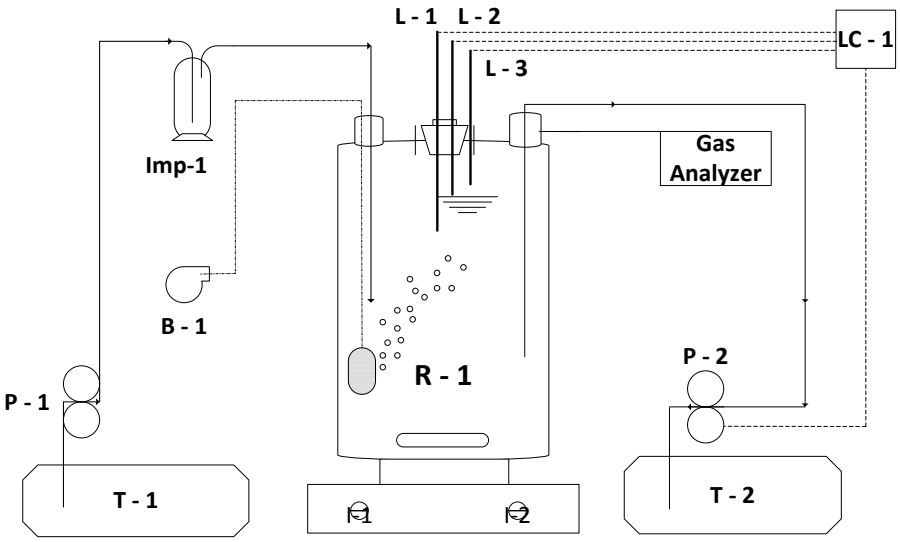
2.2.1 Εργαστηριακή μονάδα παραγωγής ιλύων

Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης του χρόνου παραμονής των στερεών στη σύσταση της παραγόμενης ιλύος. Η σύσταση της παραγόμενης ιλύος από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι σημαντικότεροι των οποίων είναι ο χρόνος παραμονής των οργανικών στερεών, MLVSS, (Θ_c) και η σύσταση του λύματος. Επιλέχθηκε η διερεύνηση της επίδρασης μόνο του Θ_c, διότι αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα σχεδιασμού ενός αερόβιου βιοαντιδραστήρα, καθώς ορίζει το μέγεθός του και την κατανάλωση ενέργειας. (Βλυσίδης, 2005).

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή του εργαστηριακού βιοαντιδραστήρα θα έπρεπε να επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση του εκάστοτε Θ_c καθώς και την εύκολη μετάβαση σε νέα τιμή. Επίσης, θα έπρεπε να πραγματοποιείται η απρόσκοπτη συλλογή της παραχθείσας ιλύος και η μέτρηση των φυσικοχημικών παραμέτρων της εκροής. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε εργαστηριακός αερόβιος βιοαντιδραστήρας συνεχούς λειτουργίας χωρίς ανακυκλοφορία ιλύος (Σχήμα 2.1, Εικόνα 2.1). Με αυτή τη διάταξη ο χρόνος παραμονής των στερεών στο αντιδραστήρα (Θ_c) ισούταν με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (θ), σύμφωνα με την Εξίσωση 3.1. Έτσι, ο καθορισμός τις εκάστοτε τιμής του Θ_c πραγματοποιούταν με την αλλαγή της παροχής τροφοδοσίας (Q). Για την εξασφάλιση της επαναληψημότητας των πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονη λειτουργία 4 όμοιων αντιδραστήρων, οι οποίοι λειτουργούσαν στις ίδιες συνθήκες.

(3.1)

όπου Θ_c : χρόνος παραμονής οργανικών αιωρούμενων στερεών (d)
θ : υδραυλικός χρόνος παραμονής (d)
Q : παροχή λύματος (L/d)
X : συγκέντρωση οργανικών αιωρούμενων στερεών – MLVSS (mg/L)
V : όγκος του βιοαντιδραστήρα (L)



R-1: αερόβιος αντιδραστήρας 5L
T-1: δοχείο αποθήκευσης λύματος 7L
P-1: περισταλτική αντλία τροφοδοσίας
P-2: περισταλτική αντλία εξόδου
T-2: δοχείο αποθήκευσης επεξεργασμένου λύματος 7L
B-1: φυσητήρας αέρα
LC-1: ελεγκτής στάθμης
L-1: ουδέτερο ηλεκτρόδιο στάθμης
L-2: ηλεκτρόδιο μέσης στάθμης
L-3: ηλεκτρόδιο ανώτερης στάθμης
Imp-1: πλυντρίδα κορεσμού υδρατμού
G A: μετρητής σύστασης αερίου

Σχήμα 2.1 Βιοαντιδραστήρας ενεργού ιλύος

Ο βιοαντιδραστήρας (R-1) ήταν υάλινος, ενεργού όγκου V = 5 L με συνεχή ανάδευση. Η τροφοδοσία του λύματος γινόταν από το δοχείο αποθήκευσης (T-1), όγκου 7 L, μέσω μίας πλήρως ρυθμιζόμενης περισταλτικής αντλίας (P-1). Η P-1 επιδεχόταν αλλαγή διαμέτρου σωλήνα αναρρόφησης, ώστε να επιτυγχάνονταν οι επιθυμητές παροχές Το λύμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν τεχνητό και παρασκευαζόταν καθημερινά, από κατάλληλη αραίωση πρότυπου λύματος, που φυλασσόταν στο ψυγείο. Η είσοδος αέρα στον αντιδραστήρα πραγματοποιούταν από έναν αεριστήρα (B-1) και έναν πορώδη διαχυτή. Ο αέρας διερχόταν από μία πλυντρίδα (Imp-1) με νερό, ώστε να ήταν κορεσμένος σε υδρατμό, για την αποφυγή εξάτμισης. Ο όγκος του αντιδραστήρα παρέμενε σταθερός μέσω του ελεγκτή στάθμης (LC-1) και της περισταλτικής αντλία (P-2). Ο LC-1 ήταν διαφορικός ελεγκτής στάθμης. Τροφοδοτούταν με σήμα από ηλεκτρόδια στάθμης L-1, L-2 και L-3. Το ηλεκτρόδιο L-1 βρισκόταν συνεχώς εμβαπτισμένο στο υγρό. Όταν η στάθμη του βιοαντιδραστήρα έφτανε στο ηλεκτρόδιο L-2, τότε ο ελεγκτής έδινε σήμα στην αντλία P-2. Η αντλία P-2 λειτουργούσε έως

ότου το ηλεκτρόδιο L-2 βρισκόταν εκτός υγρού, όπου και σταματούσε η λειτουργία της. Με αυτόν τον τρόπο, η στάθμη το αντιδραστήρα βρισκόταν συνεχώς μεταξύ των ηλεκτροδίων L-2 και L-3. Η διαφορά του ύψους τους ήταν 2 cm. Η συλλογή της εκροής γινόταν στο δοχείο T-2. Η εκροή οποία αποτελούνταν από το επεξεργασμένο λύμα και την παραχθείσα ιλύ. Συλλεγόταν καθημερινά το σύνολο της εκροής ώστε να μετρηθούν η συγκέντρωση του άνθρακα (TOC σε mg/L)και της ιλύος (VSS σε mg/L). Καθημερινή ήταν και η καταγραφή της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στο ρεύμα εξόδου του αέρα από τον αντιδραστήρα.

Εικόνα 2.1 Γενική εικόνα βιοαντιδραστήρα ενεργού ιλύος

2.2.1

2.2.2

2.2.3

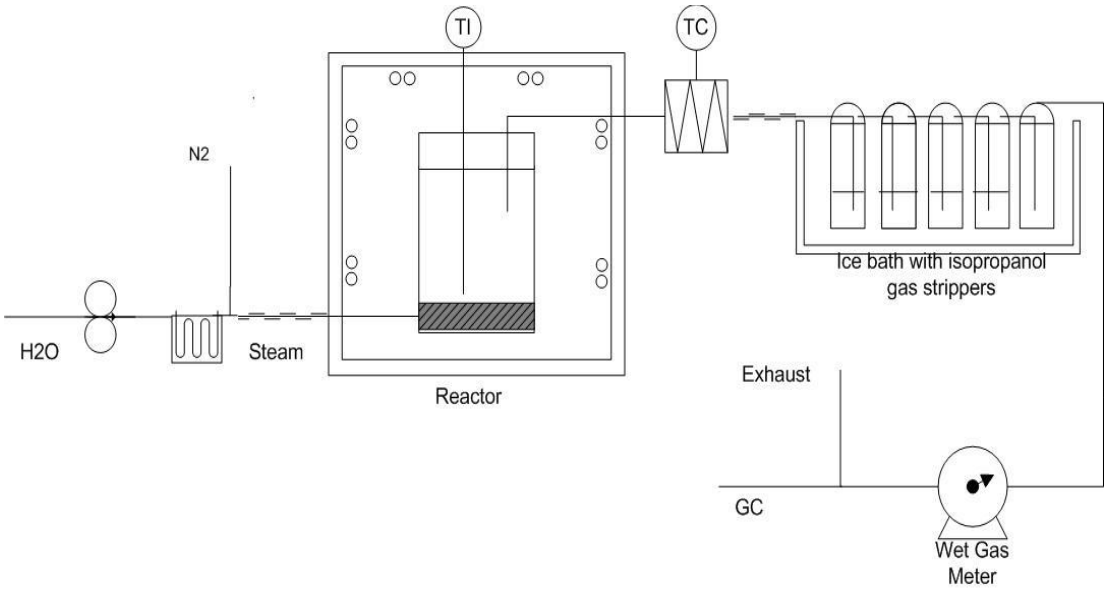
Εικόνα 2.2 Αντλία τροφοδοσίας, αεριστήρας και ηλεκτρόδια στάθμης

2.2.2. Εργαστηριακή Μονάδα Αεριοποίησης

Η βασική ιδέα για την έναρξη αυτής της εργασίας ήταν το γεγονός ότι δεν είχε εξεταστεί η επίδραση της σύστασης της ιλύος, για δεδομένο Θc, στα προϊόντα και υποπροϊόντα της αεριοποίησης. Η πειραματική διερεύνηση της αεριοποίησης της ιλύος περιοριζόταν στην συλλογή και αεριοποίηση ιλύων διαφόρων προελεύσεων, δίνοντας βάση μόνο στην εξέταση της αεριοποίησης. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετές περιπτώσεις αποτελεσματικής αεριοποίησης ιλύος (Midilli, Dogru et al. 2001; Gross, Eder et al. 2008; Mun, Kang et al. 2009; Nipattummakul, Ahmed et al. 2010; Zhang, Xiong et al. 2011). Στο σύνολο των ερευνών έχουν αναπτυχθεί αντιδραστήρες με αυξημένες αποδόσεις σε αέριο προϊόν και μειωμένα ποσοστά πισσούχου παραπροϊόντος. Στόχος του σχεδιασμού του συγκεκριμένου αντιδραστήρα δεν ήταν η βελτιστοποίηση της αεριοποίησης αλλά η εξέταση της επίδρασης του σύστασης της ιλύος. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ένας αλλόθερμος εργαστηριακός αντιδραστήρας διαλείποντος έργου ως προς το στερεό, με συνεχή τροφοδοσία υδρατμού σε περιβάλλον αζώτου. Η επιλογή της λειτουργίας έγινε με γνώμονα την απόδοση του συνόλου της ενέργειας που θα μπορούσε να παραχθεί από τη λειτουργία μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων σε δεδομένο $Θ_c$. Παρόμοιες διατάξεις χρησιμοποιούνται στην βιβλιογραφία (Domínguez, Menéndez et al. 2006; Nipattummakul, Ahmed et al. 2010; Zhang, Xiong et al. 2011) με στόχο την αρχική εξέταση μιας πιθανής πρώτης ύλης για την αεριοποίηση.

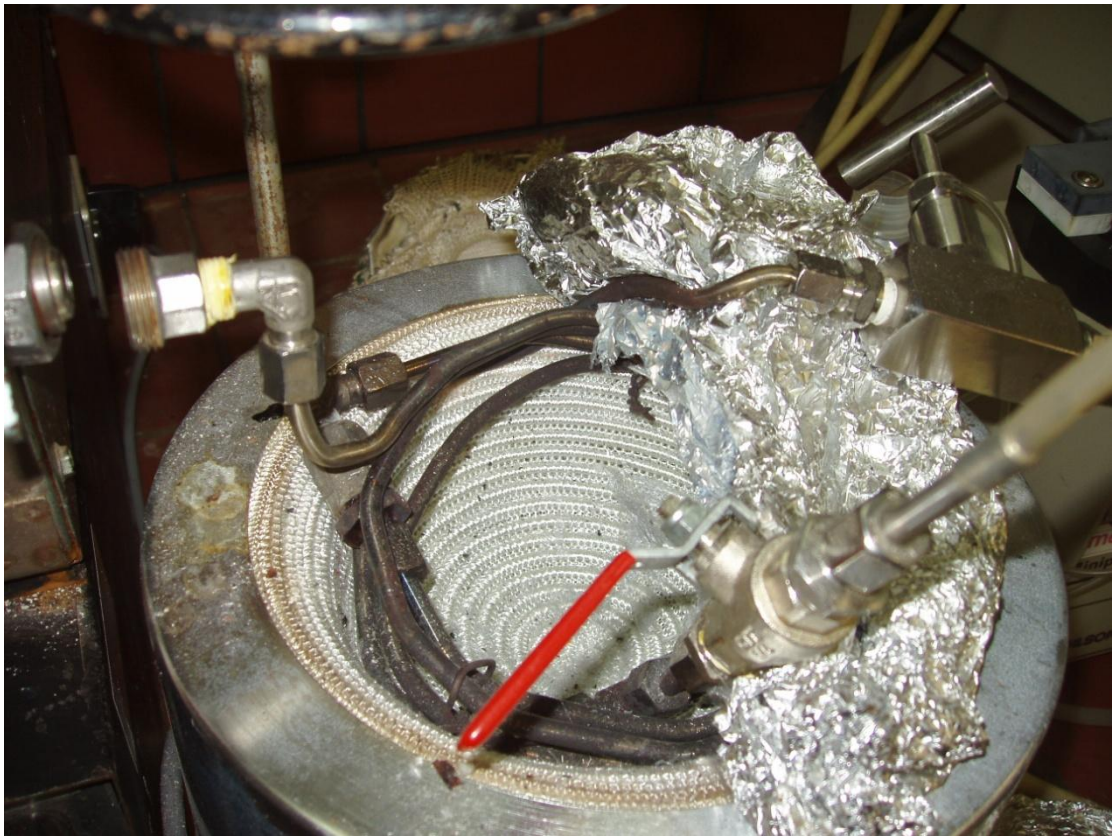
Η μονάδα αεριοποίησης απαρτιζόταν από τρία τμήματα, τη γραμμή εισόδου του φέροντος αερίου και του υδρατμού, τον αντιδραστήρα και την γραμμή εξόδου του αερίου προϊόντος (Εικόνα 2.1). Η καταγραφή των παραμέτρων του πειράματος πραγματοποιούταν μέσω PLC και καταγραφικού. Το διάγραμμα ροής της εγκατάστασης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.

Εικόνα 2.1 Γενική εικόνα διάταξης αεριοποίησης



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα ροής εργαστηριακού αντιδραστήρα αεριοποίησης

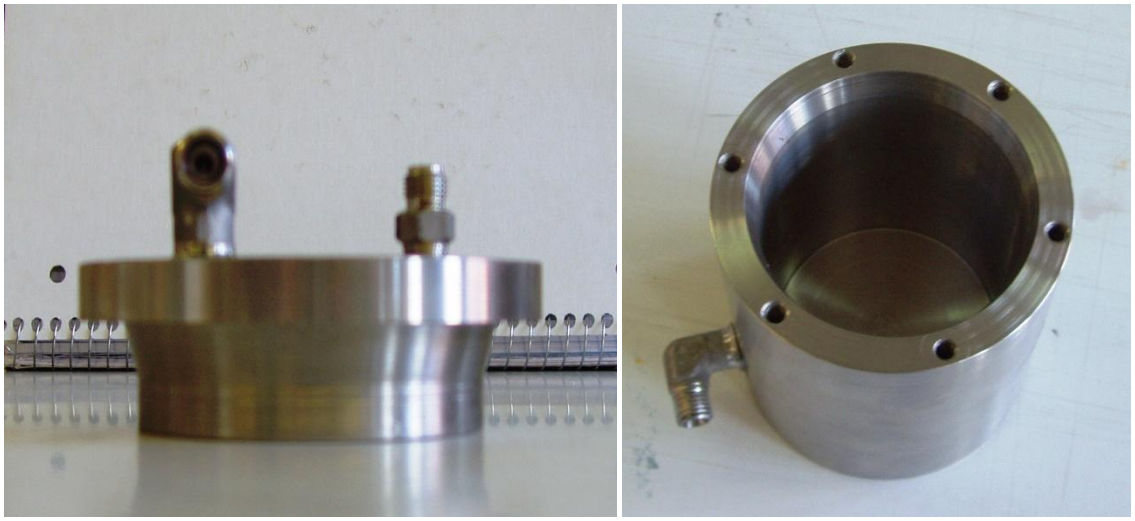
Η γραμμή εισόδου στον αντιδραστήρα αποτελούταν από την γραμμή παροχής αζώτου και την γραμμή παραγωγής και παροχής υδρατμού. Το άζωτο τροφοδοτούνταν από φιάλη πεπιεσμένου εργαστηριακού αζώτου με ρύθμιση πίεσης και παροχής. Η πίεση ρυθμιζόταν στην έξοδο της φιάλης και η παροχή από ένα ροόμετρο τύπου μπίλιας και βελονοειδή βάνα. Ο υδρατμός παραγόταν από έναν ατμοπαραγωγό που αποτελούταν από έναν θερμαντικό μανδύα, με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 500 ^{o}C, και μία σπείρα ανοξείδωτου σωλήνα τύπου 316, εσωτερικής διαμέτρου 4mm (Εικόνα 2.2). Η εισαγωγή του νερού πραγματοποιούταν με μία περισταλτική αντλία μεταβλητής παροχής (2 – 96 ml/h), ώστε να ρυθμίζεται η παροχή υδρατμού στον αντιδραστήρα. Από τον ίδιο θερμαντικό μανδύα περνούσε και το άζωτο.



Εικόνα 2.2 Ατμοπαραγωγός

Ο αντιδραστήρας είχε κυλινδρική διατομή με εσωτερική διάμετρο 8 cm και ύψος 10 cm και ήταν κατασκευασμένος από ανοξείδωτο ατσάλι τύπου 316 (Εικόνα 2.3). Ο τύπος ανοξείδωτου ατσαλιού 316 επιλέχθηκε καθώς είναι κατάλληλος για τις υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για τα πειράματα της αεριοποίησης και λόγω των αντιδιαβρωτικών ικανοτήτων σε οξειδωτικά αέρια (H_2S, H_2). Ήταν κατασκευασμένος από μια συμπαγή ράβδο ανοξείδωτου χάλυβα, ώστε να διασφαλιζόταν το απαραίτητο πάχος και να διαμορφωνόταν κατάλληλα η υποδοχή της φλάντζας. Η κεφαλή του αντιδραστήρα έφερε φλάντζα της οποίας η κατασκευή ήταν τέτοια που εξασφάλιζε την στεγάνωση του αντιδραστήρα χωρίς χρήση τσιμούχας. (Εικόνα 2.4). Πιο συγκεκριμένα, το κάτω μέρος της φλάντζας εισερχόταν του αντιδραστήρα σε θέση 'θηλυκό – αρσενικό' με φινίρισμα τραπεζοειδούς διατομής. Η κεφαλή έφερε θερμοστοιχείο τύπου K (Ni-Cr), το οποίο ήταν συνδεδεμένο με ηλεκτρολογικό πίνακα (PLC) για την καταγραφή της θερμοκρασίας στο κέντρο του αντιδραστήρα. Η είσοδος του αερίου ρεύματος γινόταν πλάγια, από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα. Εντός του αντιδραστήρα βρισκόταν συρμάτινο πλέγμα από ανοξείδωτο ατσάλι τύπου 316 όπου τοποθετούταν η ιλύς. Το πλέγμα έδραζε σε αποσπώμενο τρίποδο από ανοξείδωτο χάλυβα ιδίου τύπου, ώστε το σύνολο του υδρατμού να διερχόταν από τον όγκο της ιλύος. Επίσης, καθιστούσε τον καθαρισμό των επικαθίσεων εύκολο Η έξοδος του αερίου προϊόντος βρισκόταν στην κεφαλή του αντιδραστήρα και είχε διατομή 8mm. Ο αντιδραστήρας τοποθετούταν σε φούρνο μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας 1200 ^{o}C. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας του πειράματος γινόταν μέσω του διαφορικού – ολοκληρωτικού ρυθμιστή (PID) του φούρνου. Ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας ήταν ίδιος σε όλα τα πειράματα και ρυθμιζόταν από τον PID.

Εικόνα 2.3 Αντιδραστήρας αεριοποίησης



Εικόνα 2.4 Κεφαλή αντιδραστήρα αεριοποίησης

Το αέριο προϊόν διερχόταν διαδοχικά από το φίλτρο συγκράτησης βαρέων πισσών και της ιπτάμενης τέφρας, την συστοιχία των πλυντρίδων, τον μετρητή αερίου, τη γραμμή συλλογής δείγματος και τέλος οδηγούταν στον απαγωγό. Η διάταξη αυτή εξασφάλιζε τον καθαρισμό του αερίου, την ταυτόχρονη παρακράτηση του πισσούχου παραπροϊόντος και την

μέτρηση της παροχής και σύστασης του αερίου. Το φίλτρο παρακράτησης βαρέων συμπυκνώσιμων υδρογονανθράκων ήταν τύπου quartz και ήταν τοποθετημένο εντός θερμαντικού μανδύα με σταθερή θερμοκρασία 350°C για αποφυγή συμπυκνώσεων (Εικόνα 3.5) . Η ρύθμιση της θερμοκρασίας του επιτυγχανόταν μέσω του PLC. Η συστοιχία των πλυντρίδων αποτελούταν από 1 μεταλλική και 5 υάλινες πλυντρίδες χωρητικότητας 350 και 250 mL αντίστοιχα (Εικόνα 2.5). Ως διαλύτης χρησιμοποιήθηκε ισοπροπανόλη. Η συστοιχία ήταν τοποθετημένη σε λουτρό πάγου. Η διάταξη των πλυντρίδων ήταν σύμφωνη με τη βιβλιογραφία για την μεγιστοποίηση της παρακράτησης του πισσούχου παραπροϊόντος. Το σύνολο του πισσούχου παραπροϊόντος συλλεγόταν στις πλυντρίδες και μετρούταν σταθμικά (Oesch, L. et al. 1996; Hasler & Nussbaumer 2000; Knoef & Koele 2000; Moersch, S. et al. 2000; Simell, S. et al. 2000; van Paasen, K. et al. 2002). Το μη συμπυκνώσιμο αέριο προϊόν περνούσε, κατόπιν, από τον μετρητή αερίου (Wet Gas Meter –WGM, της εταιρείας Ritter, μοντέλο TG-1), που είναι συνδεδεμένος με το καταγραφικό και μέσω κατάλληλου λογισμικού μετρούταν και καταγραφόταν η στιγμιαία και η συνολική παροχή του αερίου. Στην έξοδο του WGM υπήρχε τριοδική βάνα για την συλλογή δειγμάτων αερίου ή την έξοδο του αερίου στον απαγωγό. Τα δείγματα του αερίου συλλέγονταν με χρήση δειγματοληπτικής σακούλας αερίου υλικού Tedlar® και χωρητικότητας 2 L. Το κάθε δείγμα οδηγούταν στον αέριο χρωματογράφο όπου μετρούταν η σύσταση του σε H_2, CO, CO_2, CH_4.

Εικόνα 2.5 Φίλτρο βαρέων πισσών και συστοιχία πλυντρίδων

2.3 Μέθοδοι αναλύσεων

2.3.1 Μέθοδοι ανάλυσης εκροής

2.3.1.1 Προσδιορισμός ολικού οργανικού άνθρακα (TOC)

Για τον προσδιορισμό του οργανικού και ανόργανου άνθρακα χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής micro N/C HT1300 Analytikjena συνδεδεμένος με το DC-80 Series. Το DC-80 Series είναι ένα αρθρωτό σύστημα ανάλυσης TOC, εργαστηριακής κλίμακας, που χρησιμοποιεί τη μέθοδο της υπερθειικής οξείδωση με υπεριώδη ακτινοβολία. Η υψηλή ευαισθησία του, σε συνδυασμό με το ευρύ γραμμικό φάσμα εφαρμογής του, επιτρέπει την άμεση ανάλυση ευρέως φάσματος δειγμάτων, από εξαιρετικά καθαρό νερό μέχρι και μεγάλου βαθμού μολυσμένα απόβλητα.

2.3.1.2. Προσδιορισμός Οργανικών Αιωρούμενων Στερεών (VSS)

Δείγμα 50 mL υγρού από την έξοδο του βιοαντιδραστήρα διηθούταν με προξηραμένο ειδικό φίλτρο, το οποίο κατά την καύση του δεν αφήνει στερεό υπόλειμμα (ash free). Το φίλτρο τοποθετούνταν στον εργαστηριακό φούρνο ξήρανσης για 24 h. Έπειτα, το φίλτρο με το δείγμα ιλύος ζυγιζόταν και κατόπιν τοποθετούνταν σε προζυγισμένη πυρίμαχη κάψα. Η κάψα μαζί με το δείγμα τοποθετούνταν σε φούρνο 550 ^{o}C για 2,5 h. Η άνοδος της θερμοκρασίας του φούρνου πραγματοποιούταν σταδιακά για την αποφυγή του κινδύνου απότομης ανάφλεξης του δείγματος. Κατόπιν, η κάψα τοποθετούνταν σε ξηραντήρα για να αποκτήσει θερμοκρασία δωματίου και ζυγιζόταν. Η διαφορά της μάζας της κάψας (Δm) δίνει τη μάζα των οργανικών.

Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης της ιλύος λαμβάνονταν από την παρακάτω σχέση:

$$VSS\ (mg/L) = \Delta m/V$$

Όπου V = όγκος δείγματος σε L

2.3.2 Μέθοδοι ανάλυσης ιλύος

Η ανάλυση και ο χαρακτηρισμός των δειγμάτων ιλύος που παράχθηκαν από τους αερόβιους αντιδραστήρες πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας έναν αριθμό από πρότυπες μεθόδους ASTM και πειραματικές τεχνικές που αναπτύχθηκαν εργαστηριακά βάσει των εν γένει περιορισμών και ιδιαιτεροτήτων των πειραμάτων.

Η ιλύς που συλλεγόταν από τους αερόβιους αντιδραστήρες τοποθετούταν σε εργαστηριακό φούρνο στους 105 ^{o}C για 24 ώρες. Το κάθε δείγμα, μετά την ξήρανσή του, λειοτριβόταν ώστε το μέγεθος των κόκκων του να μην υπερέβαινε τα 200 nm. Κατόπιν, ομογενοποιούταν και αναλύονταν ως προς τη περιεκτικότητά του σε τέφρα, πτητικά οργανικά (V.M.), μόνιμου άνθρακα (F.C.), άνθρακα, υδρογόνου, αζώτου, φωσφόρου, οξυγόνου καθώς και θερμογόνου δύναμης του συνόλου.

Οι χρησιμοποιούμενες πρότυπες μέθοδοι είναι οι ακόλουθες:

- Για τη μέτρηση του ποσοστού της υγρασίας και της τέφρας ακολουθήθηκε η πρότυπη κατά ASTM μέθοδος **D 1102-84** (Reapproved 1990)
- Για τη μέτρηση του ποσοστού των πτητικών ακολουθήθηκε η πρότυπη κατά ASTM μέθοδος **D 3175-89a** (Reapproved 1993)
- Για την στοιχειακή ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ο στοιχειακός αναλυτής EUROVECTOR EA 3000
- Η θερμογόνος δύναμη μετρήθηκε με τη πρότυπη κατά ASTM μέθοδος **D 5865-07a**
- Για τη μέτρηση του φωσφόρου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος **Std Methods 424e**. Ο φώσφορος της ιλύος βρισκόταν σε οργανικά ενωμένα φωσφορικά. Μετά τη μετατροπή της μορφής του φωσφόρου σε ευδιάλυτα ορθοφωσφορικά, πραγματοποιούταν χρωματομετρικός προσδιορισμός των ευδιάλυτων ορθοφωσφορικών.

2.3.3 Μέθοδοι ανάλυσης προϊόντων αεριοποίησης

2.3.3.1 Μέθοδος μέτρησης πισσούχου παραπροϊόντος

Η μέτρηση του πισσούχου παραπροϊόντος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρωτόκολλο δειγματοληψίας και ανάλυσης του πισσούχου παραπροϊόντος αεριοποίησης βιομάζας (van Paasen, Kiel et al. 2002).

Το παραγόμενο αέριο προϊόν περνούσε από μία συστοιχία πλυντρίδων με ισοπροπανόλη. Μετά το πέρας κάθε πειράματος αεριοποίησης, το περιεχόμενο των πλυντρίδων συλλεγόταν και τοποθετούταν σε προζυγισμένη σφαιρική φιάλη, η οποία συνδεόταν με περιστροφικό εξατμιστήρα, όπου λαμβάνονταν το ξηρό υπόλειμμα και το οποίο υπολογίζονταν σταθμικά. Η θερμοκρασία του υδατόλουτρου του περιστροφικού εξατμιστήρα, παρέμενε σταθερή στους 55 ^{o}C, η δε απόλυτη πίεση στο εσωτερικό της σφαιρικής φιάλης παρέμενε 150mbar. Οι υδρατμοί που παρέμεναν στο υπόλειμμα μετά την εξάτμιση της ισοπροπανόλης απομακρύνονταν με προσθήκη απόλυτης αιθυλικής αλκοόλης και επανα-εξάτμιση του προκύπτοντος αλκοολούχου διαλύματος.

2.3.3.2 Μέτρηση παροχής και σύστασης αερίου προϊόντος

Η παροχή του συνόλου του αερίου προϊόντος μετριόταν συνεχώς με τη χρήση ενός wet gas meter (Ritter TG 032) το οποίο ήταν συνδεδεμένο με το καταγραφικό.

Αέρια χρωματογραφία χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της σύστασης του παραγόμενου αερίου. Οι συνθήκες λειτουργίας του αέριου χρωματογράφου παρουσιάζεται στους ακόλουθους Πίνακες 2.1 και 2.2

Πίνακας 2.1 Συνθήκες λειτουργίας αέριου χρωματογράφου

Φέρον αέριο	Ar
Παγίδα υγρασίας	Helwett Packard (HP)
Παγίδα οξυγόνου	HP
Αέριος Χρωματογράφος	HP 5890A
Εισαγωγέας	Split-splitless για πακεταρισμένες στήλες
Χρωματογραφική στήλη	Hayesep 100/120mesh, 9m, 1/8α
Ανιχνευτής	Θερμικής Αγωγιμότητας TCD
Σύστημα παραλαβής ψηφιακών μετρήσεων	H/Y
Λογισμικό για την επεξεργασία των μετρήσεων	Clarity Lite
Θερμοκρασία εισαγωγέα	200°C
Θερμοκρασία ανιχνευτή	200°C
Θερμοπρογραμματισμός φούρνου	30°C για 5,1min, 10°C/min μέχρι τους 140°C και για 10min σταθερή
Ροή φέροντος αερίου στη στήλη	20mL·min^{-1}
Ροή φέροντος αερίου στον ανιχνευτή	30mL·min^{-1}

Πίνακας 2.2**:** Θερμοκρασίες-ροές αερίων χρωματογραφικού συστήματος

Θερμοκρασία εισαγωγέα	200°C
Θερμοκρασία ανιχνευτή	200°C
Θερμοπρογραμματισμός φούρνου	30°C για 5,1min, 10°C/min μέχρι τους 140°C και για 10min σταθερή
Ροή φέροντος αερίου στη στήλη	20mL·min^{-1}
Ροή φέροντος αερίου στον ανιχνευτή	30mL·min^{-1}

2.4 Πειραματική μεθοδολογία

2.4.1 Διαδικασία παραγωγής και συλλογής ιλύων διαφόρων Θ_c

Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν και λειτουργούσαν παράλληλα τέσσερις πανομοιότυποι βιοαντιδραστήρες. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις αντιδραστήρες, για στατιστικούς λόγους. Η λειτουργία του κάθε αντιδραστήρα περιγράφτηκε στο Κεφάλαιο 3.2. Οι βιοαντιδραστήρες ήταν συνεχούς λειτουργίας, πλήρους ανάδευσης, χωρίς συλλογή και ανακυκλοφορία ιλύος. Επομένως, ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων στερεών (Θ_c) ρυθμιζόταν από τον υδραυλικό χρόνο παραμονής. Για λόγους σύγκρισης των πειραμάτων σε διαφορετικές υδραυλικές φορτίσεις καθορίστηκε η οργανική φόρτιση (g C $_{εισόδου}$/L $_{αντιδραστήρα}$ /ημέρα) να παραμένει σταθερή και ίση με 60 mg C/L$_{αντιδραστήρα}$ /d. Επομένως, η επιθυμητή ηλικία λάσπης (Θ_c) επιτυγχάνονταν με κατάλληλη αραίωση ενός προπαρασκευασμένου διαλύματος σταθερής συγκέντρωσης άνθρακα των 2000 mg/L (μητρικό διάλυμα). Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η ηλικία λάσπης σε σχέση με την παροχή του υγρού και τη συγκέντρωση του άνθρακα. Για λόγους σταθερότητας του υποστρώματος, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα κατάλληλο χημοστατικό σταθερό υπόστρωμα, η σύσταση του οποίου παρατίθεται στον Πίνακα 2.4 και 2.5 και ελήφθη από τη βιβλιογραφία (Zhiqiang, C. et al, 2006, Kositzia, M. Et al, 2004)

Σε μια προκαθορισμένη (επιθυμητή) υδραυλική φόρτιση (δηλαδή Θ_c), ο κάθε αντιδραστήρας διατηρούταν για χρονικό διάστημα τέτοιο ώσπου να επιτυγχάνονταν σταθεροποίηση όλων των παραμέτρων εξόδου (ρυθμός παραγωγής CO_2, συγκέντρωση διαλυτού TOC, συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών VSS). Όταν διαπιστώνονταν η σταθερότητα λειτουργίας του κάθε αντιδραστήρα στο συγκεκριμένο Θ_c, τότε άρχιζε η συλλογή της λάσπης, η οποία απορρίπτονταν από την εξαγωγή του υγρού, μέχρις ότου συγκεντρωθεί η κατάλληλη ποσότητα για τις αναλύσεις και για τα πειράματα της αεριοποίησης (15 g ξηρής ιλύος).

Επομένως, η εξαγωγή του υγρού διηθούταν, ξεραινόταν και παρέμενε αποθηκευμένο, μέχρι να αξιοποιηθεί σε θερμοκρασία -18 ^{o}C

Πίνακας 2.3 Ογκομετρική παροχή και συγκέντρωση άνθρακα στην τροφοδοσία σε συνάρτηση με το Θ_c

Θc	**Q_i (mL/h)**	**S_i (mgC/L)**
1	208,3	60
2	104,2	120
3	69,4	180
4	52,1	240
5	41,7	300
6	34,7	360
7	29,8	420
8	26,0	480
9	23,1	540
10	20,8	600
11	18,9	660
12	17,4	720
14	14,9	840
16	13,0	960
18	11,6	1080
20	10,4	1200
24	8,7	1440
28	7,4	1680
30	6,9	1800

Πίνακας 2.4 Πρότυπο διάλυμα τροφοδοσίας

Ένωση		**Συγκέντρωση**
Μεθανόλη	(mg/L)	2000
NH_4Cl	(mg/L)	400
K_2HPO_4,	(mg/L)	53,2
KH_2PO_4	(mg/L)	53,2
$MgSO_4*7H_2O$	(mg/L)	66,6
$CaCl_2*2H_2O$	(mg/L)	80
Ιχνοστοιχεία	(mg/L)	2

Για τη συλλογή επαρκούς και αντιπροσωπευτικής ποσότητας ιλύος από κάθε Θ_c, πραγματοποιήθηκε μίξη της παραγόμενης ιλύος από τους αντιδραστήρες 1 & 2 και 3 & 4. Έτσι, μπορούσε να επιτευχθεί συλλογή επαρκούς και αντιπροσωπευτικής ποσότητας ιλύος, σε εύλογο χρονικό διάστημα (2 -2,5 μήνες για κάθε νέο Θ_c).

Πίνακας 2.5 Διάλυμα ιχνοστοιχείων

Ενώσεις	**Συγκεντρώσεις (mg/L)**
$FeSO_4$-7H_2O	20
$CuSO_4$-5H_2O	50
H_3BO_3,	50
$MnSO_4$-H_2O	50
$MnSO_4$-H_2O	10
Na_2MoO4-2H_2O	10
$ZnCl_2$-7H_2O	50

Για κάθε καινούριο Θ_c χρησιμοποιούταν η βιολογική λάσπη του προηγούμενου πειράματος και επειδή με την άνοδο του Θ_c αυξάνεται και η συγκέντρωση της λάσπης μέσα στον αντιδραστήρα, η σειρά των πειραμάτων διεξήχθη από το μικρότερο (1 ημέρα) προς το μεγαλύτερο (30 ημέρες). Επειδή στα μεγάλα Θ_c δεν παρατηρούνταν σημαντικές μεταβολές, αποφασίστηκε, για λόγους οικονομίας χρόνου, να μην ακολουθηθούν πειράματα μέτρησης Θ_c με βήμα αύξησης μίας ημέρες, αλλά με μεγαλύτερο εύρος βήματος. Επομένως, πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τα ακόλουθα Θ_c: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 30 d.

2.4.2 Διαδικασία αεριοποίησης

2.4.2.1 Πειραματικές συνθήκες

Η αεριοποίηση των ιλύων πραγματοποιούταν σε αντιδραστήρα αεριοποίησης διαλείποντος έργου. Χρησιμοποιήθηκε ένας τυπικός αλλόθερμος εργαστηριακό αντιδραστήρας, που η μόνη δυνατότητα διαφοροποίησης των αποδόσεων της αεριοποίησης, σε μια συγκεκριμένη βιομάζα, ήταν η θερμοκρασία αεριοποίησης, η παροχή του φέροντος αερίου και το ποσοστό υγρασίας.

Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων αεριοποίησης των διαφορετικών ιλύων, ο αντιδραστήρας διατηρούταν για όλα τα δείγματα ιλύων σε σταθερές συνθήκες, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.6. Οι συνθήκες αυτές προέκυψαν μετά από συστηματική έρευνα αριστοποίησης της λειτουργίας της συγκεκριμένης πειραματικής μονάδας χρησιμοποιώντας μία δεδομένη βιολογική λάσπη της οποίας η σύσταση παρατίθεται στον Πίνακα 3.1. Τα πειράματα αριστοποίησης είχαν σαν σκοπό να βρεθούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του αντιδραστήρα σε σχέση με τη θερμοκρασία, τη παροχή υδρατμού και την παροχή αζώτου.

Πίνακας 2.6 Μόνιμες συνθήκες λειτουργίας αεριοποιητή

Βάρος ξηρού δείγματος	5 g
Μέγιστη θερμοκρασία (set point φούρνου αντιδραστήρα)	820 ^{o}C
Παροχή υδρατμού	8 mL/h
Παροχή αζώτου	5 L
Θερμοκρασία μανδύα πισσούχου παραπροϊόντος	350 ^{o}C
Θερμοκρασία ατμοπαραγωγού	450 ^{o}C

2.4.2.2 Πορεία πειράματος – συλλογή αποτελεσμάτων

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν σε κάθε πείραμα είναι τα παρακάτω:

- Ξήρανση του δείγματος ιλύος.
- Καθαρισμός αντιδραστήρα, γραμμής αερίου προϊόντος.
  Ο καθαρισμός του αντιδραστήρα περιλαμβάνει αφαίρεση του πλέγματος τοποθέτησης του δείγματος και αφαίρεση υπολειμμάτων, καθαρισμός με ακετόνη της σωλήνας εξόδου του αερίου, για τον πλήρη καθαρισμό υπολειμμάτων πισσούχου παραπροϊόντος. Οι πλυντρίδες καθαρίζονται με ακετόνη. Ο καθαρισμός του ατμοπαραγωγού πραγματοποιείται κάθε 10 πειράματα και πραγματοποιείται με οξικό οξύ.
- Ζύγιση και Τοποθέτηση του δείγματος στον αντιδραστήρα
- Πλήρωση των πλυντρίδων με 25 mL ισοπροπανόλης και τοποθέτησής τους στο λουτρό πάγου.
- Σύνδεση γραμμής αερίου προϊόντος και παροχής αζώτου
- Έναρξη λειτουργίας PLC και καταγραφικού
- Έναρξη θέρμανσης του μανδύα του ατμοπαραγωγού
- Έναρξη θέρμανσης του μανδύα φίλτρου quartz
- Έναρξη παροχής αζώτου. Η παροχή του αζώτου ρυθμίζεται στα 5 L/h. Αφήνονταν να περάσουν 10 L αζώτου για την διασφάλιση απουσίας οξυγόνου στο σύστημα (purge).
- Έναρξη θέρμανσης φούρνου αντιδραστήρα και έναρξη πειράματος. Σε όλη τη διάρκεια του πειράματος καταγραφόταν συνεχώς η θερμοκρασία του αντιδραστήρα και παροχή του αερίου προϊόντος.
- Η έναρξη της παροχής υδρατμού πραγματοποιούνταν όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό ήταν πάνω από 105 ^{o}C για την αποφυγή συμπυκνώσεων.
- Δειγματοληψία του παραγόμενου αερίου πραγματοποιούταν σε τακτά χρονικά διαστήματα, μέσω των Tedlar bags. Ακολουθούσε ανάλυση του δείγματος στον αέριο χρωματογράφο ως προς τα αέρια H_2, CO, CO_2, CH_4.

- Το τέλος του περάματος οριζόταν με την παύση παραγωγής καυσίμου αερίου και με την μείωση του ποσοστού των αερίων.
- Συλλογή πισσούχου παραπροϊόντος και ανάλυσή του.

Μετά το πέρας κάθε πειράματος συλλέγονταν τα παρακάτω στοιχεία:

- Θερμοκρασία στο εσωτερικό του αντιδραστήρα
- Στιγμιαία παροχή και συνολικός όγκος αερίου προϊόντος
- Ανάλυσης της σύστασης των δειγμάτων αερίου
- Μέτρηση του πισσούχου παραπροϊόντος
- Ζύγιση στερεού υπολείμματος

Κεφάλαιο 3 Πειραματικά αποτελέσματα

3.1 Αριστοποίηση εργαστηριακού αντιδραστήρα αεριοποίησης

3.1.1 Πειραματική μεθοδολογία

Η αριστοποίηση της μονάδας της αεριοποίησης στόχευε στην εξεύρεση των παραμέτρων λειτουργίας που μεγιστοποιούσαν τη συνολική απόδοση της αεριοποίησης, για τη συγκεκριμένη διάταξη. Η πορεία της αριστοποίησης περιλάμβανε την εξέταση της διαθεσιμότητας της μονάδα, της ορθής λειτουργίας των επιμέρους στοιχείων της διάταξης, της επαναληψημότητας των πειραμάτων, των ορίων λειτουργίας του συνόλου της διάταξης και τον καθορισμό της πορείας του πειράματος για τη διασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Οι πειραματικοί παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η θερμοκρασία αντίδρασης, η παροχή υδρατμού και η παροχή του φέροντος αερίου. Ο ρυθμός ανόδου της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα, η χρήση καταλύτη, και η τροφοδοσία μίγματος αέρα – υδρατμού δεν εξετάστηκαν σαν μεταβλητές για την αριστοποίση της διεργασίας αεριοποίησης διότι, πρώτων δεν ήταν μέσα στις δυνατότητες ρύθμισης του συγκεκριμένου αεριοποιητή, δεδομένου το ότι αυτός κατασκευάστηκε από την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου και δεύτερον, ο σκοπός της όλης ερευνητικής εργασίας ήταν η συγκριτική ενεργειακή αξιοποίηση των διαφορετικών κατά Θ_c ιλύων μέσω της αεριοποίησης. Δηλαδή, στη συγκεκριμένη εργασία, υποθέσαμε ότι οποιοσδήποτε τύπος αεριοποιητή θα δώσει συγκριτικά ανάλογα αποτελέσματα.

Μετά το σχεδιασμό και την κατασκευή της μονάδας πραγματοποιήθηκαν πειράματα με μη εργαστηριακή ιλύ, που συλλέχθηκε από τη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων βιομηχανίας επεξεργασίας πατάτας (TASYFOODS Α.Ε.) και είχε την σύσταση που παρατίθεται στον Πίνακα 3.1. Αρχικά εξετάστηκε η ορθή λειτουργία του αντιδραστήρα. Κατόπιν, εξετάστηκε η απαιτούμενη ποσότητα του δείγματος ιλύος, για την οποία ο

αντιδραστήρας λειτουργούσε χωρίς υδραυλικά προβλήματα. Η συσκευή βρέθηκε να έχει άνω περιορισμό τα 10 g ξηρής ιλύος, κυρίως λόγο της αδυναμίας παρακράτησης του πισσούχου παραπροϊόντος και βέλτιστη τα 5 g, τιμή που επιλέχθηκε για όλα τα πειράματα.

Πίνακας 3.1 Σύσταση ιλύος πειραμάτων αριστοποίησης

Υγρασία	Τέφρα[α]	Πτητικά[α]	ΚΘΔ	Οργανικό κλάσμα[β] % κ.β.			
% κ.β.	% κ.β.	%κ.β.	kcal/kg	C	H	N	O[γ]
6,2	35,6	58,3	2900	47.9	8.2	13.2	30.7

α: ξηρής βάσης, β: ξηρής βάσης ελευθέρας τέφρας, γ: υπολογίζεται με διαφορά

Την ολοκλήρωση του ελέγχου της λειτουργίας της μονάδας ακολούθησε σειρά πειραμάτων βελτιστοποίησης των προαναφερόμενων παραμέτρων λειτουργίας. Οι τιμές παροχής υδρατμού που εξετάστηκαν ήταν 2, 4 ,8 και 16 mL/h, παροχή αζώτου 2 και 5 L/h και θερμοκρασία 820, 800, 780 και 750 ^{o}C. Πειράματα άνω των 820 ^{o}C αποκλείστηκαν διότι δημιουργήθηκαν προβλήματα στον αντιδραστήρα από την τήξη της τέφρας (Arvelakis, S et al, 2001). Οι τιμές των παραμέτρων αριστοποίησης παρατίθενται στον Πίνακα 3.2. Τα πειράματα που εκτελέστηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 3.3. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αριστοποίησης του αεριοποιητή παρατίθενται στον Πίνακα 3.4. Η επίδραση της παροχής αζώτου, δηλαδή του χρόνου παραμονής της αέριας φάσης στον αντιδραστήρα, μελετήθηκε μόνο στους 800 ^{o}C καθώς διαπιστώθηκε πως δεν παρουσίαζε καμία ουσιαστική επίδραση στην αεριοποίηση.

Κατά τη διάρκεια όλων των πειραμάτων αριστοποίησης διαπιστώθηκε ότι όλες οι πίσσες παράγονταν στη θερμοκρασιακή περιοχή των 450 – 650 ^{o}C, δηλαδή κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης. Επομένως, διαπιστώθηκε ότι μπορούσε, η όλη πειραματική διάταξη, να καταγράψει χωριστά την παραγωγή των προϊόντων της φάσης της πυρόλυσης από την φάση της αεριοποίησης.

Πίνακας 3.2 Τιμές παραμέτρων αριστοποίησης

Παράμετροι	**Τιμές**
Θερμοκρασία	850, 820, 800, 780, 750 ^{o}C
Παροχή υδρατμού	2, 4 ,8, 16 mL/h
Παροχή αζώτου	2, 5 L/h

Πίνακας 3.3 Πειράματα βελτιστοποίησης

Θερμοκρασία (^{o}C)	**Παροχή υδρατμού (mL/h)**				**Παροχή αζώτου (L/h)**	
	2	4	8	16	2	5
850	—	—	X	—	—	X
820	X	X	X	X		X
800	X	X	X	X	X	X
780	X	X	X	X		X
750	X	X	X	X	—	X

Στα πειράματα αριστοποίησης καταγράφηκαν : (α) ο ρυθμός παραγωγής του αερίου προϊόντος (Σχήμα 3.1-3.2), (β) η παραχθείσα ποσότητα του συνόλου των αερίων προϊόντων (Σχήμα 3.3-3.4, 3.5-3.6), (γ) της συνολικής παραχθείσας ποσότητας αερίου (Σχήμα 3.8), (δ) η θερμογόνος δύναμη του αερίου (Σχήμα 3.7) και τέλος (ε) η συνολική παραγωγή του πισσούχου παραπροϊόντος. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 3.4.

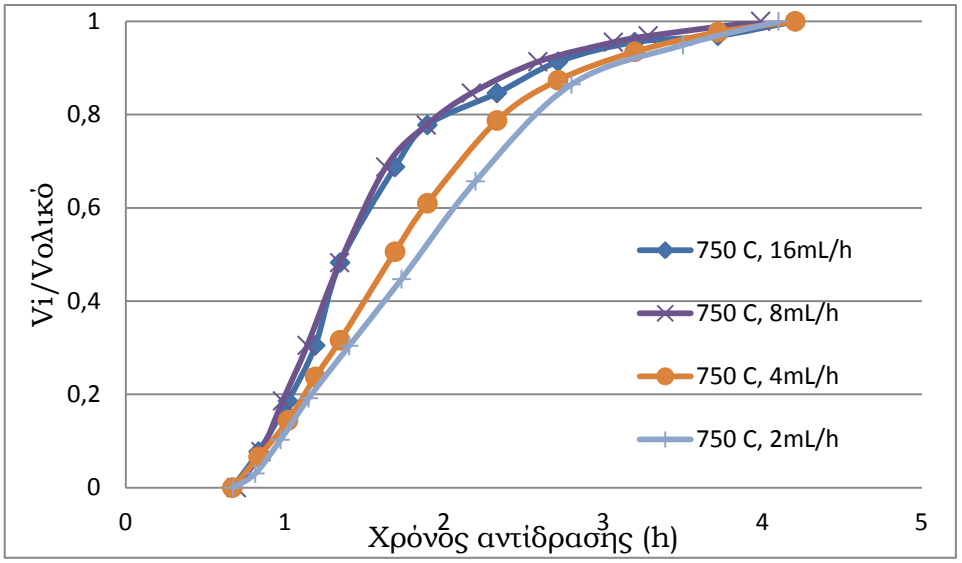
3.1.2 Συμπεράσματα πειραμάτων αριστοποίησης

Ο ρυθμός παραγωγής του αερίου προϊόντος αυξάνονταν αναλόγως με την αύξηση της θερμοκρασίας για σε οποιαδήποτε παροχή υδρατμού. Επομένως, άριστο σημείο ως προς τη θερμοκρασία θεωρήθηκε το μέγιστο δυνατό, δηλαδή οι 820 ^{o}C. Για οποιαδήποτε θερμοκρασία διαπιστώνεταιότι ο ρυθμός παραγωγής του αερίου μεγιστοποιείται όταν η παροχή των υδρατμών ήταν 8 mL/h (Σχήμα 3.1-3.2).

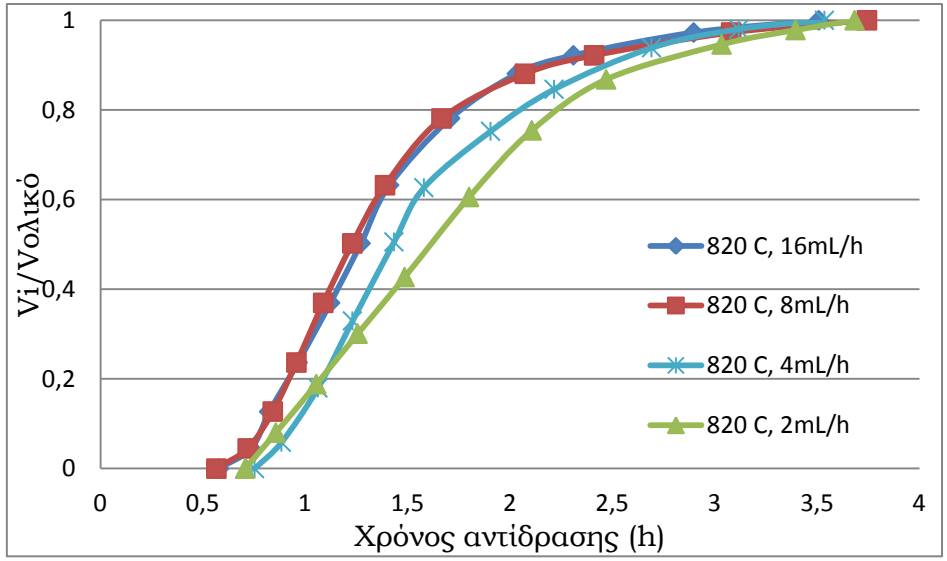
Πίνακας 3.4 Αποτελέσματα πειραμάτων βελτιστοποίησης

Μέγιστη θερμοκρασία °C	Παροχή Υδρατμού mL/h	Συνολική Παραγωγή Αερίου [α] L/daf	Πίσσες g/daf	ΚΘΔ αερίου kJ/daf	% ΚΘΔ in/out	Παραγωγή Αερίων 10^{-2} L/daf			
						H_2	CO	CH_4	CO_2
850	8	1,51	0,19	14,67	77,8	81,3	26,7	3,9	38,8
820	16	1,50	0,20	14,67	77,8	86,6	22,6	2	30,2
	8	1,59	0,19	15,91	84,4	96,8	26,7	2	39,6
	4	1,27	0,20	13,46	71,4	85,4	18,	1,9	21,4
	2	1,19	0,20	12,61	66,9	75,7	20,9	2,2	19,9
800	16	1,42	0,20	14,11	74,9	86,7	22,6	2	30,2
	8/5*	1,50	0,19	14,99	79,5	92,2	23,8	2,1	32,2
	8/2*	1,50	0,19	14,98	79,4	92,5	23,7	2	32,9
	4	1,29	0,20	13,67	72,5	81,3	24,9	1,8	20,7
	2	1,21	0,20	12,90	68,4	72,1	27,8	2,1	19,3
780	16	1,32	0,20	13,05	69,2	79,8	21,2	1,9	29,0
	8	1,39	0.19	13,86	73,5	84,8	22,4	2,0	30,2
	4	1,28	0.20	13,19	69,9	78,9	24,1	1,7	23,0
	2	1,22	0.20	12,79	67,9	69,9	29,2	2,2	20,3
750	16	1,30	0,21	12,58	66,7	78,1	15,7	2,8	33,3
	8	1,32	0,23	12,93	68,6	79,7	15,9	2,9	33,9
	4	1,28	0,23	12,73	67,5	77,	19,3	2,4	29,3
	2	1,23	0,23	11,71	62,1	66,5	29,3	1,7	25,2

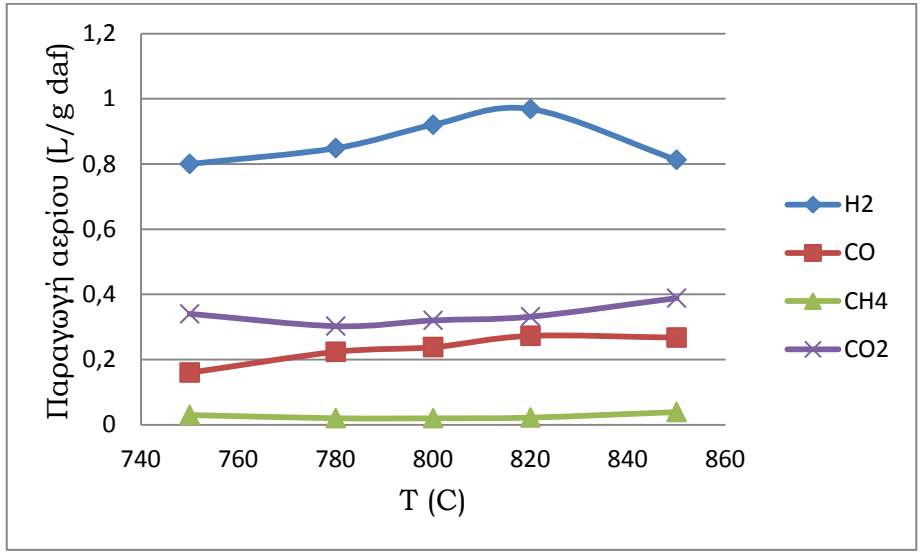
*: αφορά τα πειράματα με παροχή αζώτου 5 και 2 L/h αντίστοιχα



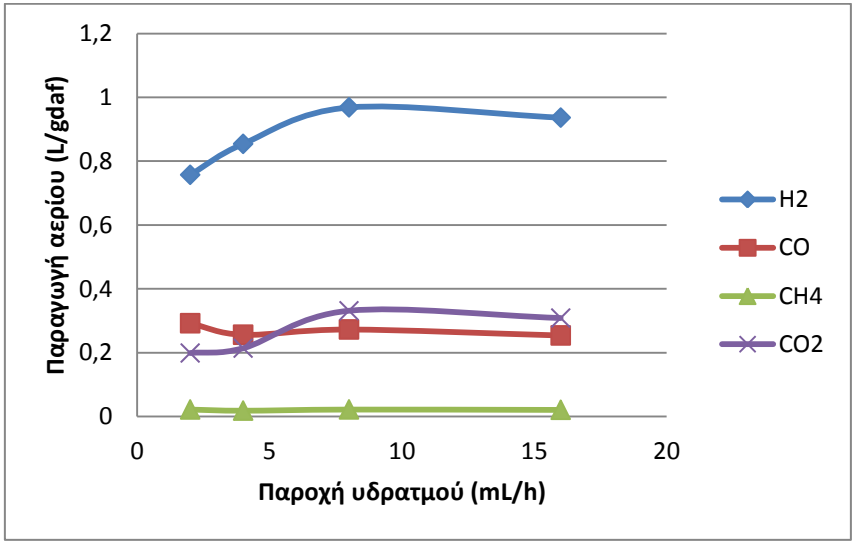
Σχήμα 3.1 Επίδραση παροχής υδρατμού στη ταχύτητα παραγωγής του αερίου προϊόντος στη θερμοκρασία των 750 °C



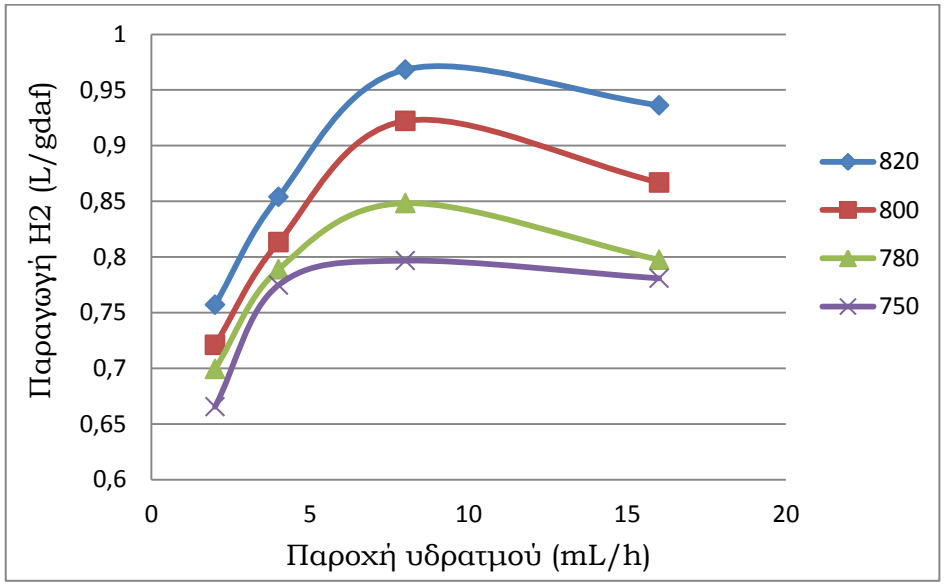
Σχήμα 3.2 Επίδραση παροχής υδρατμού στη ταχύτητα παραγωγής του αερίου προϊόντος στη θερμοκρασία των 820 °C



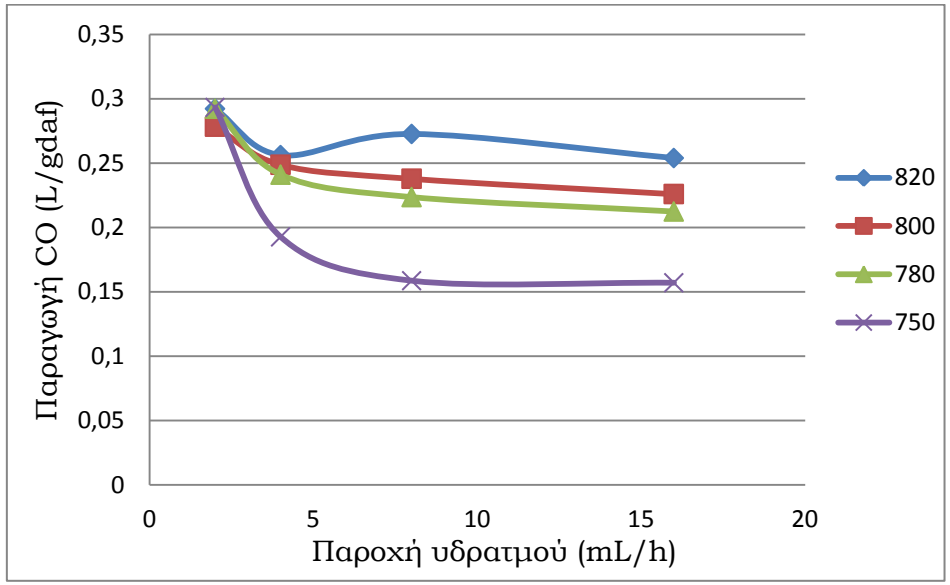
Σχήμα 3.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στη συνολική παραγωγή των αερίων προϊόντων H_2, CO, CO_2, CH_4 για δεδομένη παροχή υδρατμού (8 mL/h)



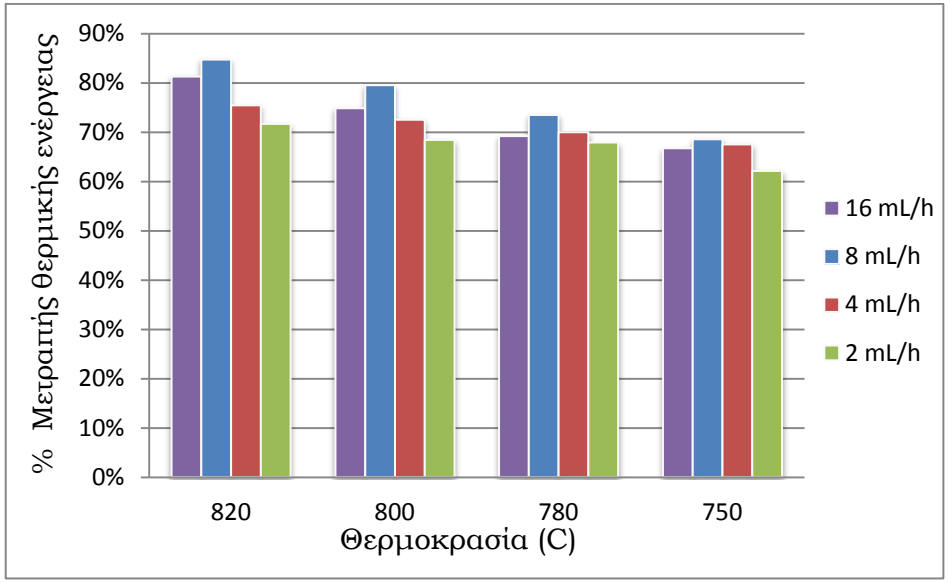
Σχήμα 3.4 Επίδραση της παροχής υδρατμού στη συνολική παραγωγή των αερίων προϊόντων H_2, CO, CO_2, CH_4 για δεδομένη θερμοκρασία (820°C)



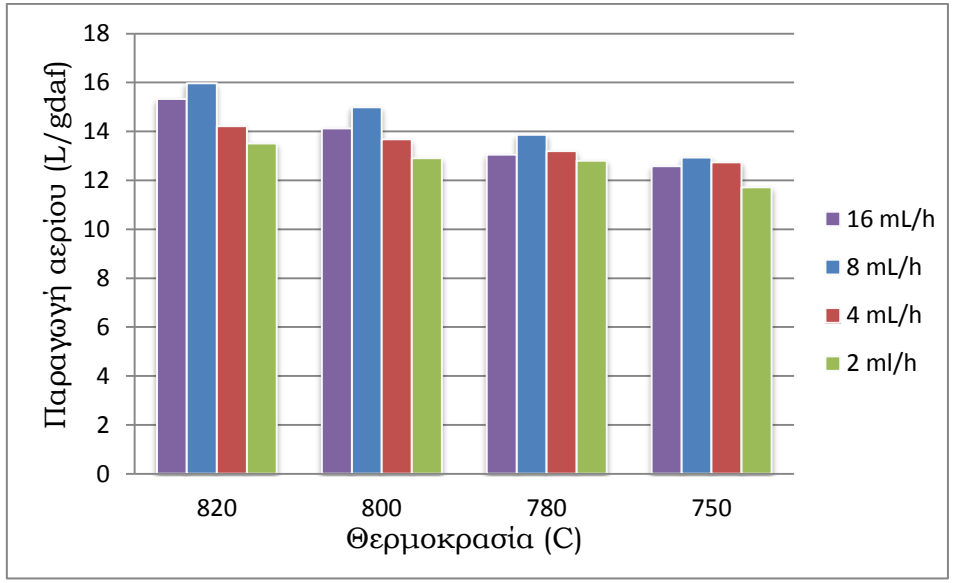
Σχήμα 3.5 Επίδραση της παροχής υδρατμού - θερμοκρασίας στην παραγωγή H_2



Σχήμα 3.6 Επίδραση της παροχής υδρατμού - θερμοκρασίας στην παραγωγή CO



Σχήμα 3.7 Επίδραση της παροχής υδρατμού - θερμοκρασίας στο ποσοστό μετατροπής της αρχικής θερμικής ενέργειας στο αέριο προϊόν



Σχήμα 3.8 Επίδραση της παροχής υδρατμού - θερμοκρασίας στη συνολική παραγωγή του αερίου προϊόντος

Η αύξηση της θερμοκρασίας και της παροχής υδρατμού οδήγησε στην παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας υδρογόνου, έως τους 820 ^{o}C και παροχής 8 mL/h (Σχήμα 3.5). Η παραγωγή του μονοξειδίου του άνθρακα αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά μειώθηκε με την αύξηση της παροχής του υδρατμού (Σχήμα 3.6). Αντίθετα του μονοξειδίου παρατηρήθηκε η παραγωγή του διοξειδίου του άνθρακα. Η παραγωγή μεθανίου δεν διαφοροποιήθηκε σημαντικά.

Η παραγωγή του πισσούχου παραπροϊόντος δεν επηρεάστηκε αισθητά ούτε από την αύξηση της θερμοκρασίας, ούτε από την αύξηση της παροχής υδρατμού, εξαιτίας της απουσίας άλλων οξειδωτικών αερίων στην θερμοκρασίας παραγωγής τους (300-500 ^{o}C).

Η μέγιστη παραγωγή αερίου (1,59 L/g daf) παρατηρήθηκε στις συνθήκες όπου μεγιστοποιήθηκε η παραγωγή του υδρογόνου (0,968 L/g daf) και η θερμογόνος δύναμη του αερίου (15,91 HHV/ g daf).

Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω, οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της μονάδας συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 3.5 Βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας εργαστηριακής μονάδας αεριοποίησης ιλύος

Βάρος ξηρού δείγματος	5 g
Μέγιστη θερμοκρασία (set point φούρνου αντιδραστήρα)	820 ^{o}C
Παροχή υδρατμού	8 mL/h
Παροχή αζώτου	5 L
Θερμοκρασία μανδύα πισσούχου παραπροϊόντος	350 ^{o}C
Θερμοκρασία ατμοπαραγωγού	450 ^{o}C

3.1.3 Πειράματα επιβεβαίωσης.

Για να διαπιστωθεί η επίδραση της σύστασης της λάσπης στην επιλογή του άριστου σημείου λειτουργίας της μονάδας αεριοποίησης, πραγματοποιήθηκαν παρόμοια πειράματα με χρήση διαφορετικής ιλύος που συλλέχθηκε από εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων βιομηχανίας εξευγενισμού βρώσιμων ελαίων (ΜΙΝΕΡΒΑ Α.Ε.), η σύσταση της οποίας παρατίθεται στον Πίνακα 3.6. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στη θερμοκρασία των 820 ^{o}C και σε παροχές υδρατμού 4, 8 16 mL/h. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται στον Πίνακα 3.7 και στο Σχήμα 3.9.

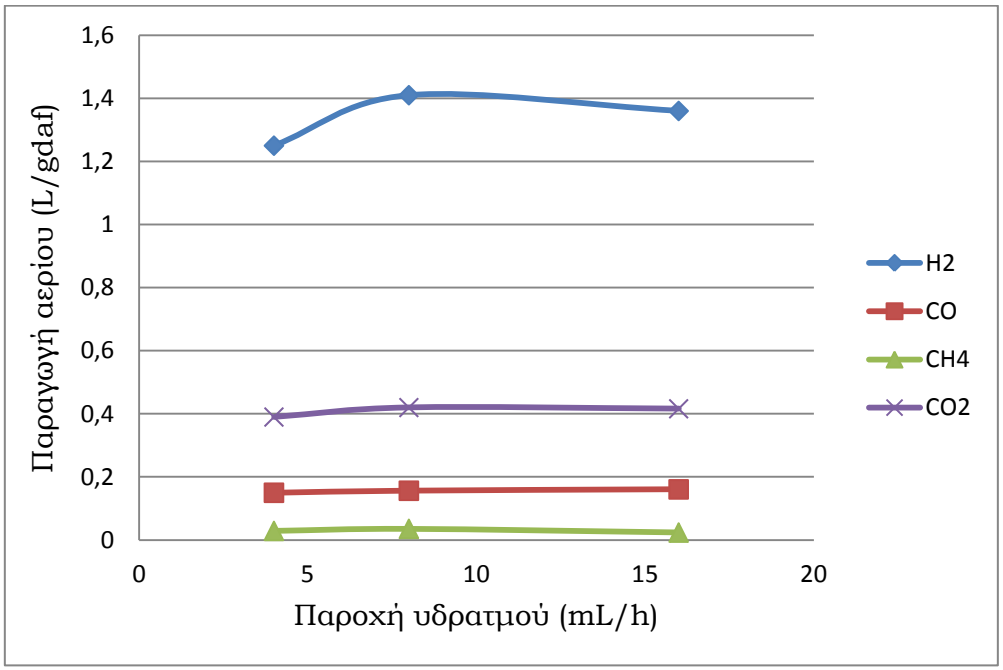
Πίνακας 3.6 Σύσταση ιλύος πειραμάτων επιβεβαίωσης αριστοποίησης

Υγρασία	Τέφρα[α]	Πτητικά[α]	ΚΘΔ	Οργανικό κλάσμα[β] % κ.β.			
% κ.β.	% κ.β.	%κ.β.	kcal/kg	C	H	N	O[γ]
6,2	51,7	42,1	2745	50,4	7,4	10,8	28,3

α: ξηρής βάσης, β: ξηρής βάσης ελευθέρας τέφρας, γ: υπολογίζεται με διαφορά

Πίνακας 3.7 Αποτελέσματα επιβεβαίωσης αριστοποίησης εργαστηριακής μονάδας αεριοποίησης ιλύος

Μέγιστη θερμοκρασία	Παροχή Υδρατμού	Παραγωγή Αερίου Προϊόντος	Πίσσες	ΚΘΔ αερίου	% ΚΘΔ	Παραγωγή Αερίων L/daf			
^{o}C	ml/h	L/daf	g/daf	kJ/daf	in/out	H_2	CO	CH_4	CO_2
820	16	1,96	0,27	19,77	83,1	1,36	0,16	0,02	0,42
	8	2,02	0,26	21,33	89,6	1,41	0,15	0,04	0,42
	4	1,8	0,27	18,45	77,5	1,25	0,15	0,03	0,39



Σχήμα 3.9 Επίδραση της παροχής υδρατμού στη συνολική παραγωγή αερίων προϊόντων H_2, CO, CO_2, CH_4 για δεδομένη θερμοκρασία (820°C)

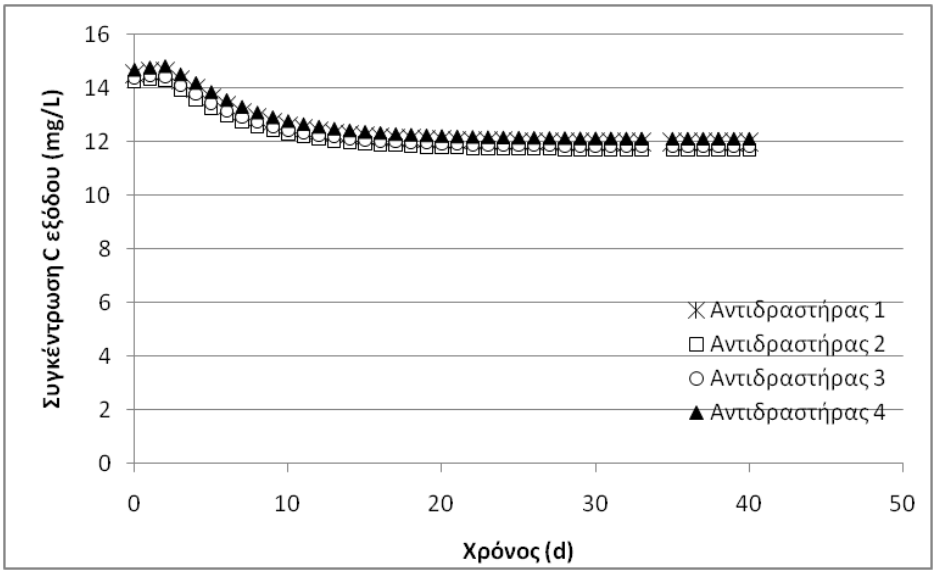
Από τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν παρόμοιες βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της συγκεκριμένης μονάδας.

3.2 Αποτελέσματα παραλαβής ιλύων διαφόρων Θ_c

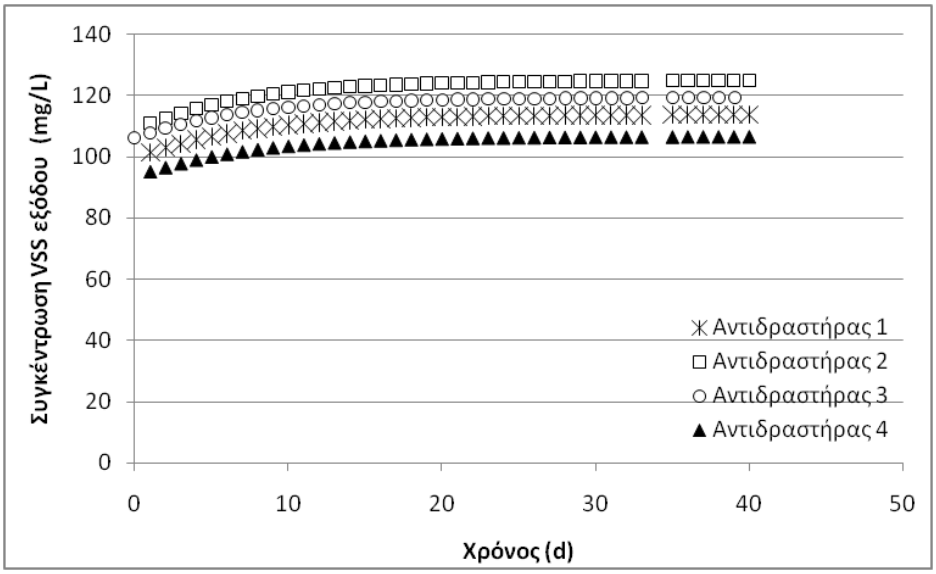
Στο παρόν Κεφάλαιο θα παρατεθούν, ως παράδειγμα, τα πειραματικά αποτελέσματα για Θ_c=7d. Τα πρωτογενή αποτελέσματα των υπολοίπων πειραμάτων παραλαβής ιλύος παρατίθενται πλήρως στο Παράρτημα ΙΙ.

Η επιβολή του νέου Θ_c πραγματοποιούταν ταυτόχρονα και στους τέσσερις βιοαντιδραστήρες. Οι βιοαντιδραστήρες λειτουργούσαν σε μόνιμες συνθήκες στο Θ_c = 6d. Μετά το πέρας της συλλογής της απαιτούμενης ιλύος στο Θ_c = 6d, γινόταν ρύθμιση του συστήματος για την έναρξη του νέου κύκλου λειτουργίας. Ως κύκλος λειτουργίας οριζόταν η επιβολή του νέου Θ_c, η επίτευξη μόνιμων συνθηκών και η συλλογή ιλύος. Η αρίθμηση των ημερών λειτουργίας του συστήματος στον εκάστοτε κύκλο αφορούσε την πρώτη μέρα από την επιβολή του νέου Θ_c, και άρχιζε από το 1.Οι αλλαγές των ρυθμίσεων του συστήματος περιορίζονταν στην ρύθμιση της περισταλτικής αντλίας τροφοδοσίας στη νέα ογκομετρική παροχή, που για το Θ_c = 7d ήταν 29,8 mL/h, και η παρασκευή της νέας τροφοδοσίας, που για το Θ_c = 7d είχε συγκέντρωση άνθρακα S_{in}=420mg/L.

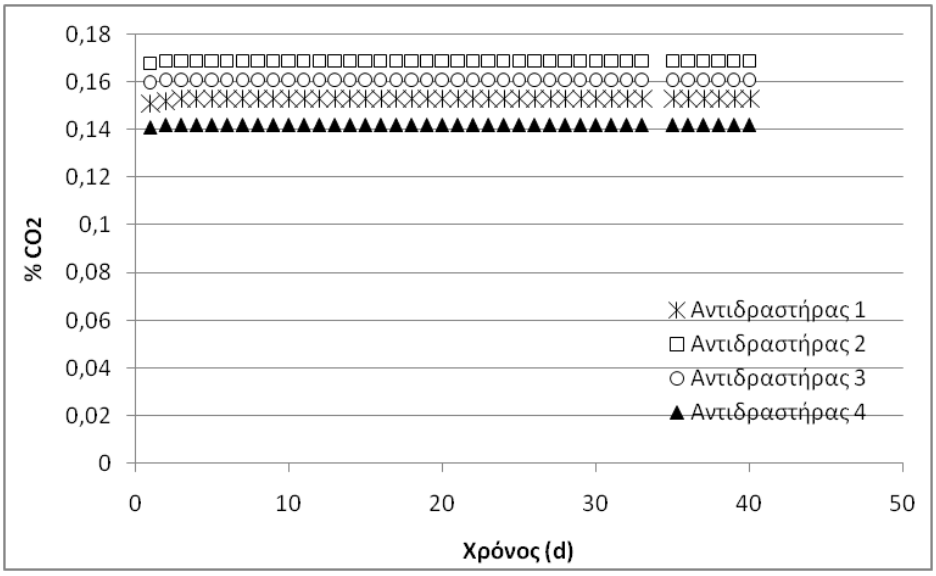
Στον παρακάτω Πίνακα 3.8 και στα Διαγράμματα 3.1 έως 3.3 παρατίθενται οι καθημερινές μέσες μετρήσεις των TOC, VSS και CO_2.



Διάγραμμα 3.1 Εξέλιξη της συγκέντρωσης του άνθρακα στην έξοδο των βιοαντιδραστήρων για Θ_c = 7d



Διάγραμμα 3.2 Εξέλιξη της συγκέντρωσης των οργανικών στερεών (VSS) στην έξοδο των βιοαντιδραστήρων για Θ_c = 7d



Διάγραμμα 3.3 Εξέλιξη της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στην έξοδο του αέρα των βιοαντιδραστήρων για Θ_c = 7d

Πίνακας 3.8 Καθημερινές μετρήσεις συγκέντρωσης άνθρακα (TOC), οργανικών στερεών (VSS) και διοξειδίου του άνθρακα (%CO_2) στους τέσσερις αντιδραστήρες για Θ_c = 7d

Θc 7

	Αντιδραστήρας Α			**Αντιδραστήρας Β**			**Αντιδραστήρας Γ**			**Αντιδραστήρας Δ**		
χρόνος (d)	**TOC (mg/L)**	**CO2 (%)**	**VSS (mg/L)**	**TOC (mg/L)**	**CO2 (%)**	**VSS (mg/L)**	**TOC (mg/L)**	**CO2 (%)**	**VSS (mg/L)**	**TOC (mg/L)**	**CO2 (%)**	**VSS (mg/L)**
1	14,6	0,151	101,38	14,3	0,168	110,87	14,5	0,16	106,12	14,8	0,141	95,09
2	14,6	0,152	102,83	14,3	0,169	112,50	14,5	0,161	107,66	14,8	0,142	96,42
3	14,3	0,153	104,26	14,0	0,169	114,11	14,1	0,161	109,18	14,5	0,142	97,75
4	14,0	0,153	105,52	13,6	0,169	115,54	13,8	0,161	110,52	14,2	0,142	98,89
5	13,6	0,153	106,64	13,3	0,169	116,80	13,4	0,161	111,71	13,9	0,142	99,92
6	13,3	0,153	107,62	13,0	0,169	117,90	13,2	0,161	112,75	13,6	0,142	100,82
7	13,1	0,153	108,48	12,8	0,169	118,86	12,9	0,161	113,66	13,3	0,142	101,60
8	12,9	0,153	109,21	12,6	0,169	119,68	12,7	0,161	114,44	13,1	0,142	102,28
9	12,7	0,153	109,85	12,4	0,169	120,39	12,6	0,161	115,11	12,9	0,142	102,87
10	12,6	0,153	110,40	12,3	0,169	121,00	12,4	0,161	115,69	12,8	0,142	103,38
11	12,5	0,153	110,87	12,2	0,169	121,53	12,3	0,161	116,19	12,7	0,142	103,81
12	12,4	0,153	111,28	12,1	0,169	121,98	12,3	0,161	116,62	12,6	0,142	104,19
13	12,3	0,153	111,63	12,0	0,169	122,38	12,2	0,161	116,99	12,5	0,142	104,51
14	12,3	0,153	111,93	12,0	0,169	122,71	12,1	0,161	117,31	12,4	0,142	104,79
15	12,2	0,153	112,19	11,9	0,169	123,00	12,1	0,161	117,58	12,4	0,142	105,03
16	12,2	0,153	112,41	11,9	0,169	123,25	12,0	0,161	117,82	12,3	0,142	105,24
17	12,1	0,153	112,61	11,9	0,169	123,47	12,0	0,161	118,03	12,3	0,142	105,42
18	12,1	0,153	112,77	11,8	0,169	123,65	12,0	0,161	118,20	12,3	0,142	105,57
19	12,1	0,153	112,92	11,8	0,169	123,81	12,0	0,161	118,35	12,3	0,142	105,70
20	12,1	0,153	113,04	11,8	0,169	123,95	11,9	0,161	118,48	12,2	0,142	105,82
21	12,0	0,153	113,15	11,8	0,169	124,07	11,9	0,161	118,60	12,2	0,142	105,92
22	12,0	0,153	113,24	11,8	0,169	124,17	11,9	0,161	118,69	12,2	0,142	106,00
23	12,0	0,153	113,32	11,8	0,169	124,26	11,9	0,161	118,78	12,2	0,142	106,07
24	12,0	0,153	113,39	11,8	0,169	124,34	11,9	0,161	118,85	12,2	0,142	106,14

25	12,0	0,153	113,45	11,7	0,169	124,40	11,9	0,161	118,91	12,2	0,142	106,19
26	12,0	0,153	113,50	11,7	0,169	124,46	11,9	0,161	118,97	12,2	0,142	106,24
27	12,0	0,153	113,54	11,7	0,169	124,51	11,9	0,161	119,01	12,2	0,142	106,28
28	12,0	0,153	113,58	11,7	0,169	124,55	11,9	0,161	119,05	12,2	0,142	106,31
29	12,0	0,153	113,61	11,7	0,169	124,59	11,9	0,161	119,09	12,2	0,142	106,34
30	12,0	0,153	113,64	11,7	0,169	124,62	11,9	0,161	119,12	12,1	0,142	106,37
31	12,0	0,153	113,66	11,7	0,169	124,65	11,8	0,161	119,14	12,1	0,142	106,39
32	12,0	0,153	113,68	11,7	0,169	124,67	11,8	0,161	119,17	12,1	0,142	106,41
33	12,0	0,153	113,70	11,7	0,169	124,69	11,8	0,161	119,19	12,1	0,142	106,43
35	12,0	0,153	113,73	11,7	0,169	124,72	11,8	0,161	119,22	12,1	0,142	106,45
36	12,0	0,153	113,74	11,7	0,169	124,74	11,8	0,161	119,23	12,1	0,142	106,46
37	12,0	0,153	113,75	11,7	0,169	124,75	11,8	0,161	119,24	12,1	0,142	106,47
38	12,0	0,153	113,76	11,7	0,169	124,76	11,8	0,161	119,25	12,1	0,142	106,48
39	12,0	0,153	113,77	11,7	0,169	124,77	11,8	0,161	119,26	12,1	0,142	106,49
40	12,0	0,153	113,78	11,7	0,169	124,77	11,8	0,161	119,26	12,1	0,142	106,50
41	12,0	0,153	113,78	11,7	0,169	124,78	11,8	0,161	119,27	12,1	0,142	106,50

3.3 Αποτελέσματα ανάλυσης ιλύων

Πίνακας 3.9 Ανάλυση παραχθέντων ιλύων

$Θ_c$		C %db	H %db	O %db	N %db	P %db	Τέφρα %db	daf %db	V.M. %db	F.C. %db	ΑΘΔ kJ/gdb
1	**M1**	48,75	5,98	24,48	9,69	1,58	7,60	92,40	85,2	7,2	19,62
	M2	48,66	5,96	24,49	9,74	1,60	7,60	92,40	85,0	7,4	19,59
2	**M1**	50,38	6,51	23,63	8,18	0,86	9,39	90,61	83,1	7,5	20,12
	M2	50,32	6,49	23,64	8,21	0,88	9,39	90,61	83,1	7,5	20,10
3	**M1**	50,06	6,53	23,12	7,73	0,69	11,03	88,97	81,8	7,1	19,95
	M2	50,03	6,53	23,12	7,74	0,70	11,03	88,97	81,9	7,1	19,94
4	**M1**	49,42	6,48	22,69	7,48	0,62	12,55	87,45	80,5	6,9	19,69
	M2	49,40	6,47	22,69	7,49	0,63	12,55	87,45	80,5	6,9	19,68
5	**M1**	49,77	6,64	22,42	7,67	0,70	11,95	88,05	81,5	6,5	19,64
	M2	49,76	6,64	22,42	7,67	0,69	11,96	88,04	81,5	6,5	19,64
6	**M1**	47,87	6,41	21,50	7,41	0,68	15,29	84,71	77,3	7,4	18,86
	M2	47,87	6,41	21,51	7,41	0,68	15,29	84,71	77,3	7,4	18,87
7	**M1**	47,15	6,32	21,16	7,33	0,69	16,52	83,48	75,1	8,4	18,56
	M2	47,15	6,32	21,17	7,33	0,69	16,52	83,48	75,0	8,5	18,57
8	**M1**	46,46	6,23	20,85	7,26	0,69	17,66	82,34	73,7	8,6	18,29
	M2	46,48	6,23	20,86	7,25	0,69	17,66	82,34	73,6	8,7	18,29
9	**M1**	45,82	6,14	20,57	7,19	0,70	18,74	81,26	72,4	8,8	18,03
	M2	45,84	6,15	20,57	7,18	0,69	18,74	81,26	72,3	8,9	18,04
10	**M1**	45,21	6,06	20,32	7,12	0,70	19,74	80,26	71,2	9,0	17,79
	M2	45,23	6,06	20,32	7,11	0,69	19,74	80,26	71,2	9,1	17,80
11	**M1**	44,64	5,98	20,08	7,06	0,70	20,68	79,32	70,2	9,1	17,56
	M2	44,66	5,99	20,08	7,05	0,70	20,69	79,31	70,1	9,2	17,57
12	**M1**	44,10	5,90	19,86	7,00	0,70	21,57	78,43	69,2	9,3	17,35
	M2	44,13	5,91	19,85	6,99	0,70	21,57	78,43	69,1	9,4	17,36
14	**M1**	43,15	5,77	19,47	6,90	0,71	23,13	76,87	67,5	9,4	16,9
	M2	43,18	5,78	19,47	6,89	0,70	23,14	76,86	67,4	9,5	16,99
16	**M1**	42,28	5,64	19,13	6,81	0,72	24,55	75,45	65,9	9,5	16,64
	M2	42,31	5,65	19,12	6,79	0,71	24,56	75,44	65,8	9,7	16,65
18	**M1**	41,50	5,53	18,82	6,73	0,72	25,82	74,18	64,5	9,7	16,34
	M2	41,53	5,54	18,81	6,71	0,71	25,83	74,17	64,3	9,9	16,35
20	**M1**	40,79	5,42	18,55	6,66	0,73	26,96	73,04	63,2	9,9	16,07
	M2	40,83	5,44	18,53	6,64	0,72	26,97	73,03	62,8	10,3	16,08
24	**M1**	39,68	5,26	18,13	6,56	0,74	28,73	71,27	61,0	10,3	15,64
	M2	39,73	5,28	18,11	6,53	0,73	28,75	71,25	60,9	10,3	15,66
28	**M1**	38,67	5,11	17,75	6,47	0,75	30,33	69,67	59,3	10,3	15,26
	M2	38,73	5,13	17,72	6,44	0,74	30,36	69,64	59,2	10,5	15,27
30	**M1**	38,10	5,03	17,53	6,41	0,76	31,25	68,75	58,3	10,5	15,04
	M2	38,17	5,04	17,51	6,38	0,74	31,26	68,74	58,0	10,7	15,06

M1, M2 : Μίγμα ιλύος από τους Αντιδραστήρες 1,2 και 3,4 Ash : τέφρα, db: επί ξηρής βάσης, daf : επί ξηρής βάσης ελεύθερο τέφρας (dry ash free), V.M. : πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Mater), F.C. : μόνιμος άνθρακας (Fixed Carbon), ΑΘΔ: ανωτέρα θερμογόνος δύναμη

3.4 Αποτελέσματα αεριοποίησης ιλύων

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αεριοποίησης ιλύων συγκεκριμένου Θ_c, παρατίθενται στο Παράρτημα Ι. Στο παρόν Κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα ενός εκ των πειραμάτων και ο συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων (Πίνακας 3.10).

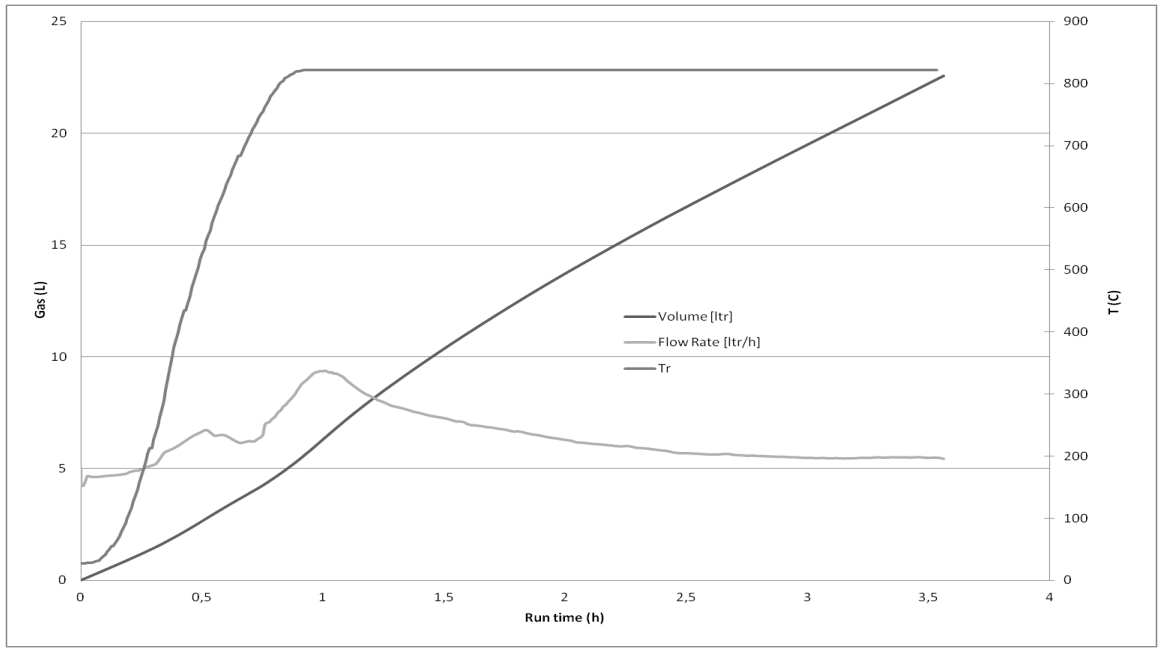
Τα πειράματα της αεριοποίησης των παραχθέντων ιλύων διεξήχθηκαν όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3.2. Κατά την πορεία των πειραμάτων γινόταν καταγραφή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, της στιγμιαίας παροχής αερίου προϊόντος καθώς και συνολικός όγκος του, πραγματοποιούταν ανάλυση της σύστασης των δειγμάτων αερίου και μετά το πέρας του πειράματος, μετρούταν το πισσούχο παραπροϊόν και το στερεό υπόλειμμα.

Οι ποσότητες ιλύος που συλλέγονταν από τους τέσσερις αντιδραστήρες για ένα συγκεκριμένο Θ_c αναμιγνύονταν ανά δύο (Μ-1 και Μ-2 μίγματα), πάντοτε με την ίδια σειρά, και τα δύο μίγματα χρησιμοποιούνταν σε χωριστά πειράματα στον αεριοποιητή. Έτσι, για κάθε Θ_c, συλλέχθηκαν δύο σειρές χωριστών πειραμάτων αεριοποίησης.

Για τη δημιουργία ολοκληρωμένης εικόνας των πειραματικών δεδομένων ενός πλήρους κύκλου πειραμάτων αεριοποίησης ιλύος παρατίθενται τα αποτελέσματα αεριοποίησης του ενός εκ των δύο μιγμάτων (Μ-1) της ιλύος με Θ_c=7d.

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη της παραγωγής του αερίου και η άνοδος της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα. Πρέπει να σημειωθεί πως στις μετρήσεις του αερίου προϊόντος περιλαμβάνεται και το φέρον αέριο (άζωτο).

Στον Πίνακα 3.11 παρατίθενται οι συστάσεις των δειγμάτων αερίου προϊόντος, το πισσούχο παραπροϊόν και το στερεό υπόλειμμα. Τα είδη αερίων που μετρήθηκαν ήταν τα υδρογόνο, οξυγόνο, άζωτο, μονοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.



Σχήμα 3.9 Χρονική εξέλιξη πειράματος. Καμπύλη θερμοκρασίας (T_r), στιγμιαίας παραγωγής αερίου προϊόντος (Flow Rate), συνολικού όγκου αερίου (Volume).

Πίνακας 3.10 Σύσταση δειγμάτων αερίου προϊόντος

Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,2	8,5	19,2	29,8	30,5	25,6	19,9	17,2	14,2	3,2	2,1
N	94,4	73,4	66,8	55,1	57,8	64,7	72,5	76,5	81,2	94,6	96,8
O	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0,5	2,8	2,3	3,9	3,1	2,8	2,5	2,1	1,5	0,8	0,2
CH4	0,9	3,2	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	3,9	12,1	10,9	11,2	8,6	6,9	5,1	4,2	3,1	1,4	0,9
Πίσσες (g)	0,905					Στερεό υπόλειμμα (g)			0,826		

Πίνακας 3.11 Συνολικά αποτελέσματα αεριοποίησης ιλύων συγκεκριμένων Θ_c

		Αέριο Προϊόν (L)	**H_2 (L)**	**CO (L)**	**CO_2 (L)**	**CH_4 (L)**	**Πίσσες (g)**	**Στερεό Υπόλειμμα (g)**
1	**M1**	6,16	3,60	0,47	1,94	0,15	0,999	0,380
	M2	6,19	3,60	0,47	1,96	0,15	0,997	0,380
2	**M1**	5,53	3,49	0,46	1,43	0,14	1,036	0,469
	M2	5,54	3,49	0,46	1,44	0,14	1,034	0,469
3	**M1**	5,37	3,43	0,45	1,34	0,14	1,020	0,552
	M2	5,37	3,43	0,45	1,35	0,14	1,020	0,552
4	**M1**	5,26	3,38	0,44	1,30	0,14	0,997	0,628
	M2	5,26	3,38	0,44	1,30	0,14	0,996	0,628
5	**M1**	5,31	3,46	0,45	1,27	0,14	0,996	0,598
	M2	5,31	3,46	0,45	1,27	0,14	0,996	0,598
6	**M1**	5,13	3,35	0,43	1,21	0,14	0,929	0,764
	M2	5,13	3,35	0,43	1,21	0,14	0,930	0,764
7	**M1**	5,07	3,32	0,42	1,20	0,13	0,905	0,826
	M2	5,07	3,31	0,42	1,20	0,13	0,905	0,826
8	**M1**	5,01	3,28	0,42	1,18	0,13	0,882	0,883
	M2	5,01	3,28	0,42	1,18	0,13	0,883	0,883
9	**M1**	4,95	3,24	0,41	1,17	0,13	0,862	0,937
	M2	4,95	3,24	0,41	1,17	0,13	0,862	0,937
10	**M1**	4,90	3,21	0,41	1,15	0,13	0,843	0,987
	M2	4,90	3,21	0,41	1,15	0,13	0,843	0,987
11	**M1**	4,85	3,18	0,40	1,14	0,13	0,825	1,034
	M2	4,85	3,18	0,40	1,14	0,13	0,826	1,034
12	**M1**	4,81	3,15	0,40	1,13	0,13	0,809	1,079
	M2	4,80	3,15	0,40	1,13	0,13	0,810	1,079
14	**M1**	4,73	3,09	0,39	1,12	0,13	0,781	1,157
	M2	4,72	3,09	0,39	1,11	0,13	0,782	1,157
16	**M1**	4,66	3,05	0,38	1,10	0,13	0,757	1,228
	M2	4,65	3,05	0,38	1,10	0,13	0,757	1,228
18	**M1**	4,59	3,00	0,38	1,09	0,12	0,735	1,291
	M2	4,59	3,00	0,38	1,08	0,12	0,736	1,292
20	**M1**	4,54	2,97	0,37	1,08	0,12	0,716	1,348
	M2	4,53	2,97	0,37	1,07	0,12	0,717	1,349
24	**M1**	4,46	2,91	0,36	1,06	0,12	0,688	1,437
	M2	4,45	2,91	0,36	1,06	0,12	0,689	1,437
28	**M1**	4,38	2,86	0,36	1,05	0,12	0,664	1,517
	M2	4,37	2,86	0,36	1,04	0,12	0,665	1,518
30	**M1**	4,34	2,83	0,35	1,04	0,12	0,651	1,563
	M2	4,33	2,83	0,35	1,04	0,12	0,652	1,563

Αέριο προϊόν: αναφέρεται στα προϊόντα της αεριοποίησης (H_2, CO, CO_2, CH_4)
Πίσσες: το πισσούχο παραπροϊόν

Κεφάλαιο 4. Επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων

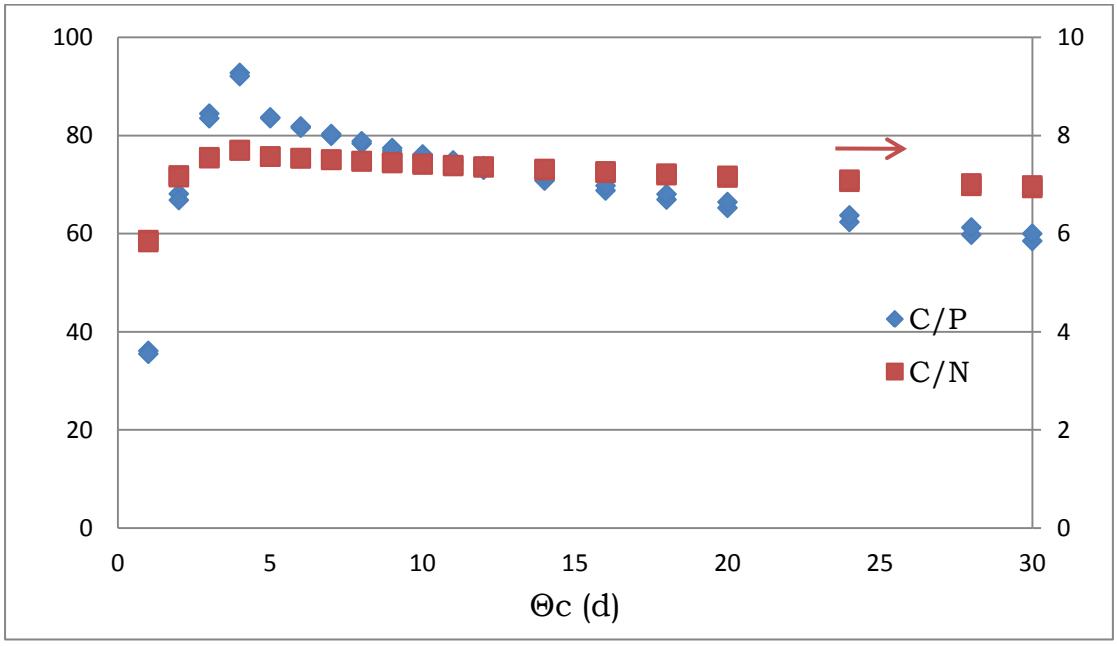
4.1 Συσχέτιση σύστασης ιλύος και Θ_c

Πίνακας 4.1 Μοριακός τύπος και σύσταση παραχθείσας ιλύος

Θ_c		C	H	O	N	P	C % daf	H % daf	O % daf	N % daf
1	**M1**	5	7,36	1,88	0,85	0,14	52,76	6,48	26,49	10,49
	M2	5	7,35	1,89	0,86	0,14	52,67	6,45	26,51	10,54
2	**M1**	5	7,75	1,76	0,70	0,07	55,60	7,18	26,08	9,03
	M2	5	7,74	1,76	0,70	0,07	55,54	7,16	26,09	9,06
3	**M1**	5	7,83	1,73	0,66	0,06	56,26	7,34	25,98	8,69
	M2	5	7,83	1,73	0,66	0,06	56,23	7,34	25,99	8,70
4	**M1**	5	7,86	1,72	0,65	0,05	56,51	7,41	25,95	8,56
	M2	5	7,86	1,72	0,65	0,05	56,49	7,40	25,95	8,57
5	**M1**	5	8,01	1,69	0,66	0,06	56,52	7,55	25,47	8,72
	M2	5	8,01	1,69	0,66	0,06	56,53	7,55	25,47	8,71
6	**M1**	5	8,03	1,68	0,66	0,06	56,51	7,57	25,38	8,75
	M2	5	8,03	1,69	0,66	0,06	56,51	7,56	25,39	8,75
7	**M1**	5	8,04	1,68	0,67	0,06	56,47	7,57	25,35	8,78
	M2	5	8,04	1,68	0,67	0,06	56,48	7,57	25,35	8,78
8	**M1**	5	8,05	1,68	0,67	0,06	56,43	7,57	25,33	8,81
	M2	5	8,05	1,68	0,67	0,06	56,45	7,57	25,33	8,81
9	**M1**	5	8,04	1,68	0,67	0,07	56,38	7,56	25,32	8,84
	M2	5	8,05	1,68	0,67	0,06	56,40	7,56	25,32	8,83
10	**M1**	5	8,04	1,69	0,68	0,07	56,33	7,55	25,31	8,87
	M2	5	8,04	1,68	0,67	0,07	56,36	7,56	25,31	8,86
11	**M1**	5	8,04	1,69	0,68	0,07	56,28	7,54	25,32	8,90
	M2	5	8,04	1,69	0,68	0,07	56,31	7,55	25,31	8,89
12	**M1**	5	8,03	1,69	0,68	0,07	56,23	7,53	25,32	8,93
	M2	5	8,04	1,69	0,68	0,07	56,27	7,54	25,32	8,91
14	**M1**	5	8,02	1,69	0,69	0,07	56,13	7,50	25,33	8,98
	M2	5	8,03	1,69	0,68	0,07	56,18	7,51	25,33	8,96
16	**M1**	5	8,01	1,70	0,69	0,07	56,04	7,48	25,35	9,03
	M2	5	8,01	1,69	0,69	0,07	56,09	7,49	25,34	9,00
18	**M1**	5	7,99	1,70	0,70	0,07	55,94	7,45	25,37	9,08
	M2	5	8,00	1,70	0,69	0,07	56,00	7,47	25,36	9,05
20	**M1**	5	7,98	1,70	0,70	0,08	55,85	7,43	25,39	9,12
	M2	5	7,99	1,70	0,70	0,08	55,91	7,45	25,38	9,09
24	**M1**	5	7,95	1,71	0,71	0,08	55,68	7,38	25,43	9,21
	M2	5	7,97	1,71	0,70	0,08	55,76	7,40	25,41	9,17
28	**M1**	5	7,93	1,72	0,72	0,08	55,51	7,33	25,47	9,29
	M2	5	7,94	1,72	0,71	0,08	55,61	7,36	25,45	9,24
30	**M1**	5	7,91	1,73	0,72	0,09	55,42	7,31	25,49	9,33
	M2	5	7,93	1,72	0,72	0,08	55,52	7,34	25,47	9,28

Ο μοριακός τύπος που παρατίθεται στον Πίνακα 4.1 υπολογίστηκε με βάσει 5 άτομα άνθρακα, οπότε και προέκυψαν οι μοριακοί τύποι $C_5H_xO_yN_zP_k$. Από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει πως κατά την εξέλιξη του οικοσυστήματος παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης του αζώτου και του φωσφόρου στην ιλύ.

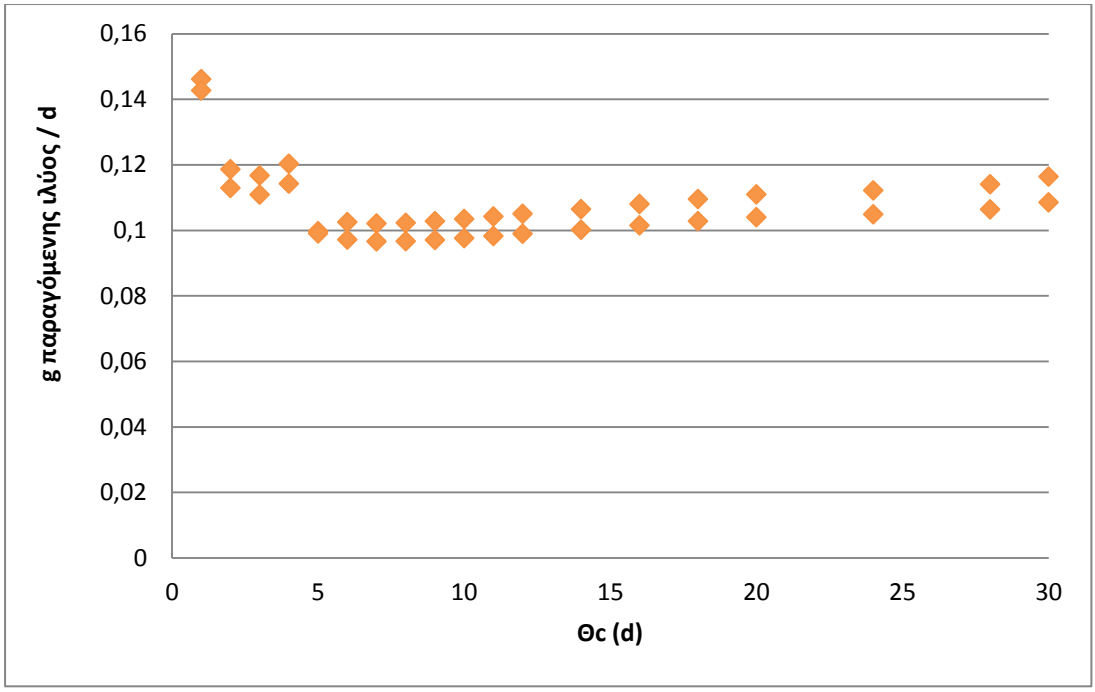
Η αύξηση του Θ_c έχει έντονη επιρροή στη σύσταση της παραγόμενης ιλύος. Η εξέλιξη του οικοσυστήματος σε πιο 'οργανωμένη' δομή απεικονίζεται στη διαφοροποίηση των συστατικών της ιλύος (Stamatoglou et al, 2011). Στις αρχικές τιμές του Θ_c, επικρατούν τα βακτήρια, των οποίων ο μέσος μοριακός τους τύπος είναι $C_5H_7O_2NP_{0,2}$. Σε ανώτερες τιμές του Θ_c εμφανίζονται πρωτόζωα, τα οποία είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερα από τα βακτήρια και έχουν εσωτερικά όργανα που επιτρέπουν ζωτικές λειτουργίες αντίστοιχες με αυτές των πολυκύτταρων ζώων (www.engitech.com/asm.htm). Μερικά από αυτά είναι οι αμοιβάδες, τα μαστιγοφόρα, τα κινητά και εδραία βλεφαριδοφόρα, τα πλεντάζωα και τα νηματώδη πρωτόζωα. Ο μέσος μοριακός τους τύπος είναι $C_7H_{14}O_3N$ (Βλυσίδης, 2004). Βεβαίως, κάθε ομάδα πρωτόζωων έχει και διαφορετικό μοριακό τύπο, με αποτέλεσμα την διαφοροποίηση που παρατηρείται στα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 4.1 Εξέλιξη του ατομικού λόγου C/P και C/N

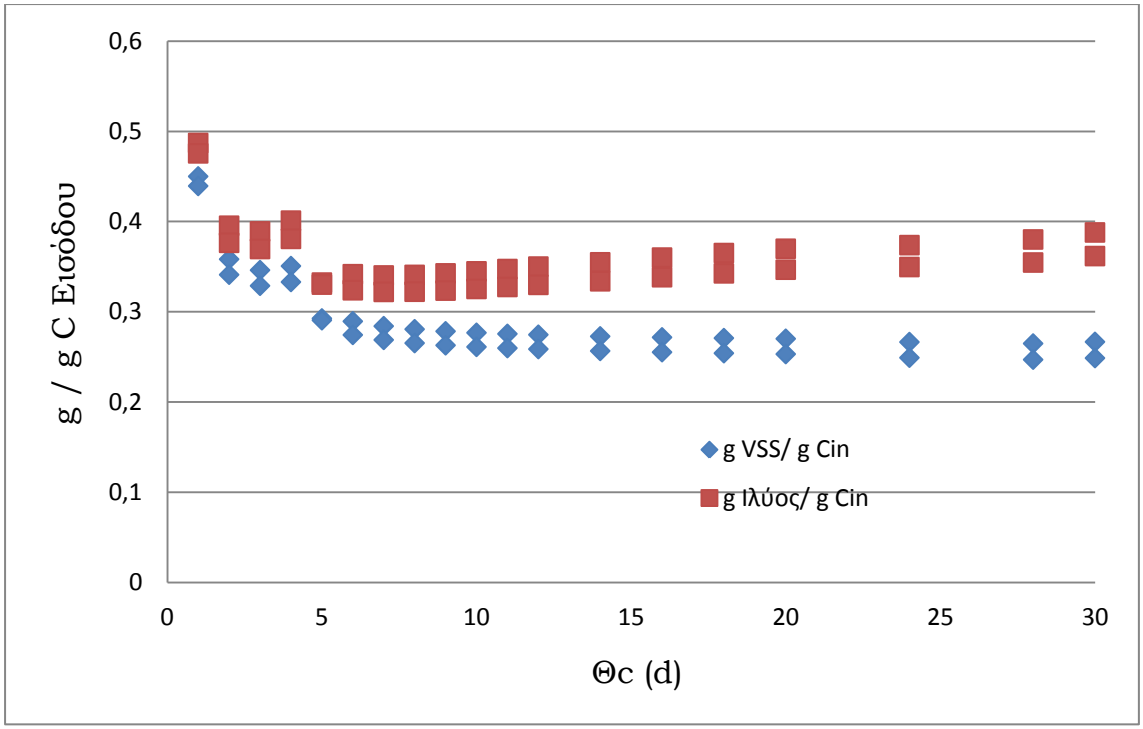
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Elser et al, 2000), η μετάβαση ενός οικοσυστήματος σε πιο οργανωμένη δομή, σηματοδοτείται από τον μειωμένο ρυθμό παραγωγής της ιλύος (Σχήμα 4.2) αλλά και από την μείωση των ατομικών λόγων C/P και C/N. Για την εξέταση της εξέλιξης του οικοσυστήματος κατασκευάστηκε το διάγραμμα των λόγων C/P και C/N (Σχήμα 5.1). Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει η επαλήθευση της βιβλιογραφίας, καθώς αναχαιτίζεται η αρχική αύξηση των λόγων σε υψηλότερες τιμές Θ_c, για να σταθεροποιηθούν σε ακόμα μεγαλύτερες τιμές.

Η ημερήσια παραγωγή ιλύος, που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2 υπολογίστηκε από την συγκέντρωση των VSS εξόδου των αντιδραστήρων, την παροχή λύματος και το ποσοστό τέφρας.



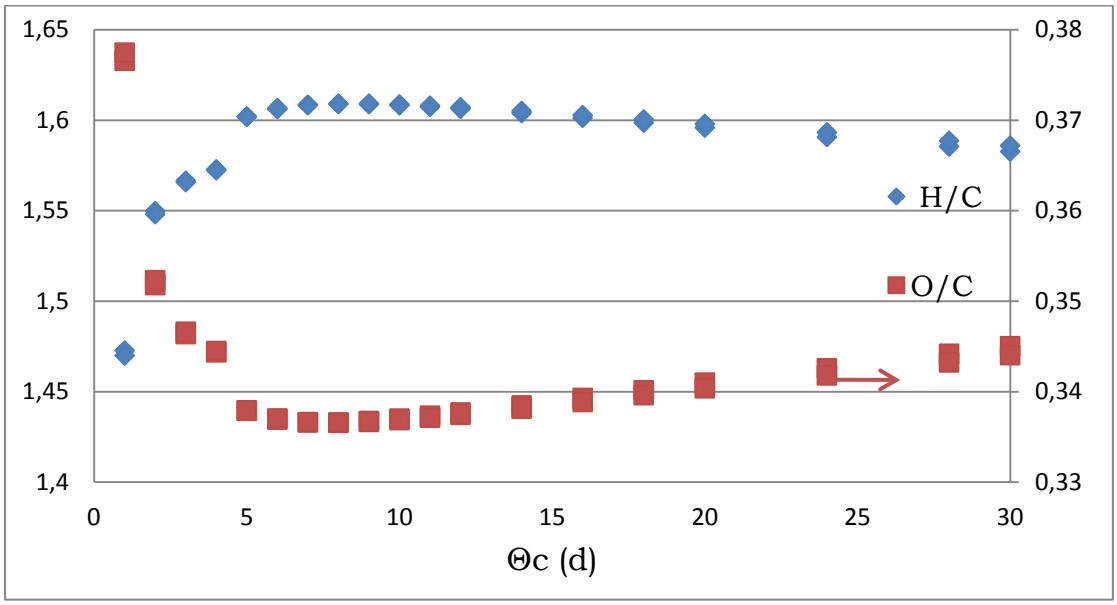
Σχήμα 4.2 Ημερήσια παραγωγή ιλύος σε συνάρτηση με το Θ_c

Η ημερήσια παραγόμενη ιλύς εκφράστηκε ανά γραμμάριο τροφοδοτούμενου άνθρακα και ως προς το οργανικό κλάσμα (VSS) στο Σχήμα 4.3



Σχήμα 4.3 Παραγωγή ιλύος σε συνάρτηση με το Θ_c

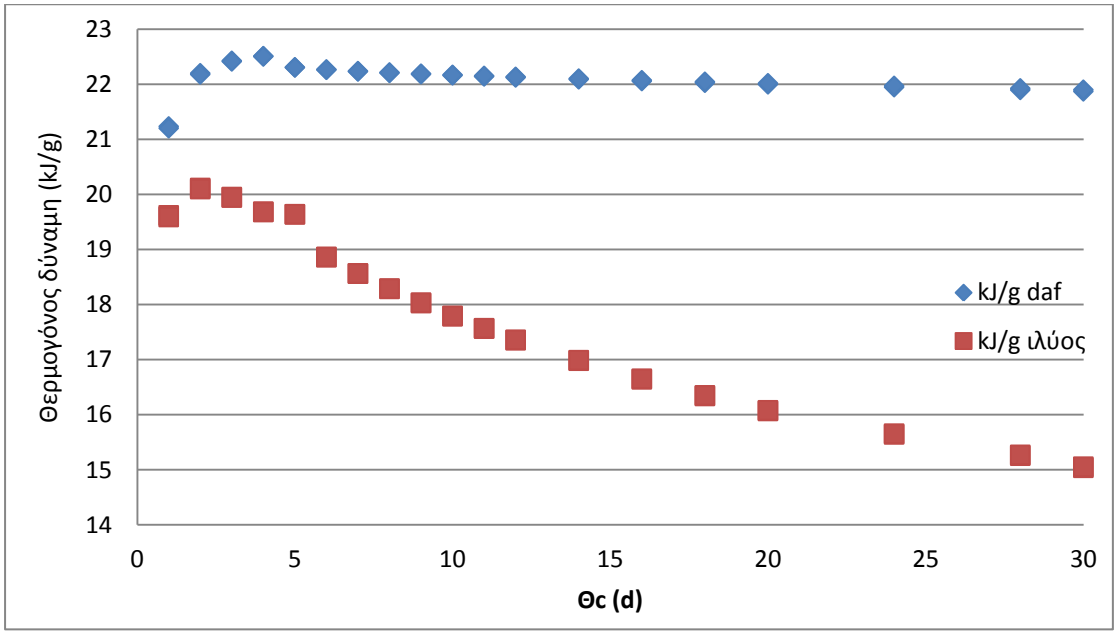
Μετά την περιγραφή και καταγραφή των βιολογικών φαινομένων που επεξηγούν τη διαμόρφωση της σύσταση της παραχθείσας ιλύος, η ιλύς πρέπει να χαρακτηριστεί και ως καύσιμο. Μία από τις σημαντικότερες μεθόδους περιγραφής ενός καυσίμου είναι οι ατομικοί λόγοι H/C και O/C, ώστε να γίνει δυνατή η οριοθέτηση του καυσίμου σε ένα διάγραμμα Van Krevelen.



Σχήμα 4.4 Εξέλιξη του ατομικού λόγου H/C και O/C

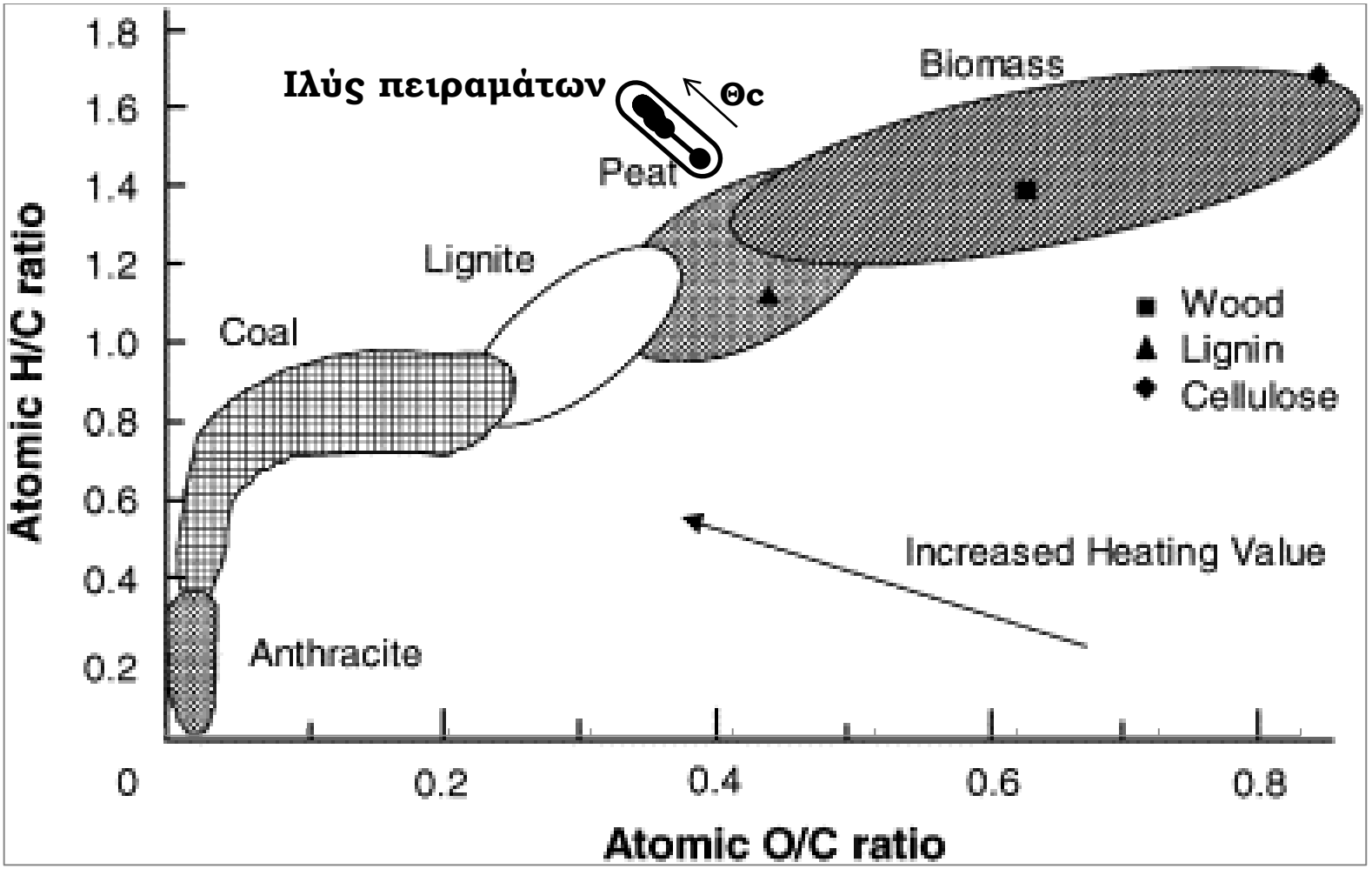
Από το Σχήμα 4.4 προκύπτει πως η αύξηση του Θ_c οδηγεί σε αύξηση της τιμής του λόγου H/C, έως σταθεροποίησής του, σε αντίθεση με τον αντίστοιχο λόγο O/C.

Η θερμογόνος δύναμη της ιλύος (Σχήμα 4.5), εκφρασμένη ως προς το οργανικό κλάσμα (daf), ακολουθεί τις τάσεις του λόγου H/C.



Σχήμα 4.5 Θερμογόνος δύναμη ιλύος

Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται η περιοχή των λόγων H/C και O/C στο διάγραμμα Van Krevelen. Η παραχθείσα ιλύς εκτός των συνηθισμένων γεωμετρικών τόπων των ήδη χρησιμοποιούμενων καυσίμων. Μάλιστα, απομακρύνεται περεταίρω με την αύξηση του Θ_c.



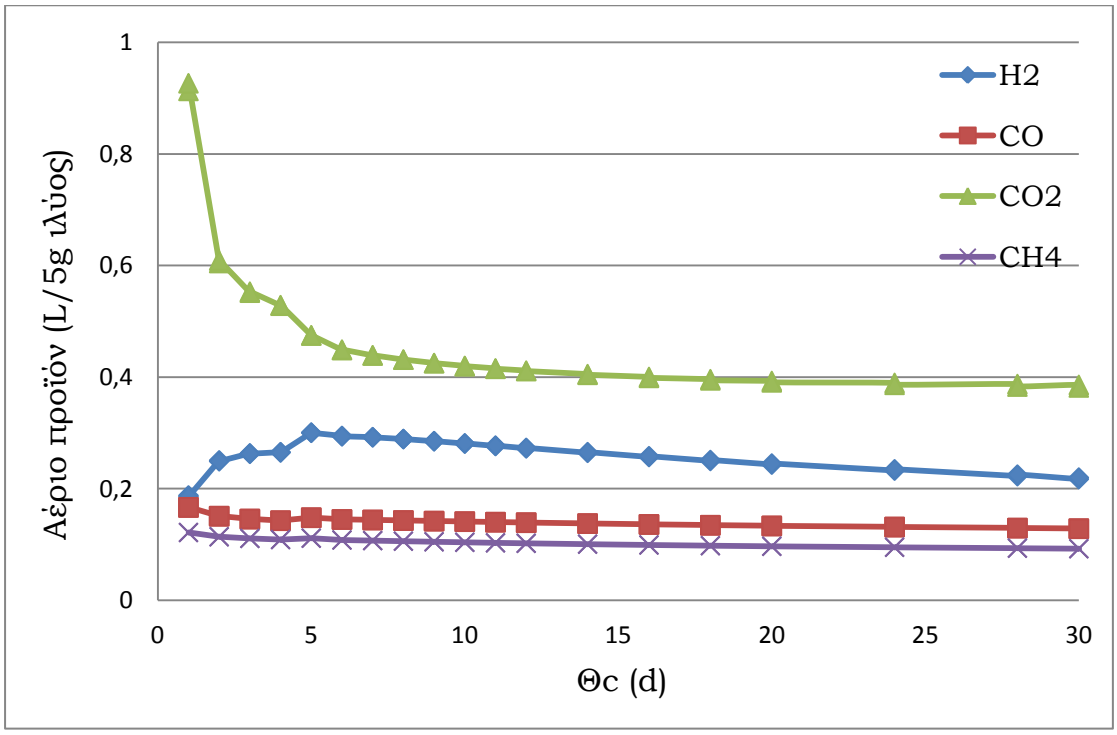
Σχήμα 4.6 Απεικόνιση της παραχθείσας ιλύος στο διάγραμμα Van Krevelen

4.2 Συσχέτιση αποτελεσμάτων αεριοποίησης και Θ_c

Όπως περιγράφτηκε στο Κεφάλαιο 2.2, κατά την πραγματοποίηση των πειραμάτων αεριοποίησης ήταν δυνατή η καταγραφή τόσο της φάσης της πυρόλυσης όσο της αεριοποίησης. έτσι, στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται τόσο η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της πυρόλυσης όσο και της αεριοποίησης.

4.2.1 Επεξεργασία πειραμάτων στις συνθήκες πυρόλυσης

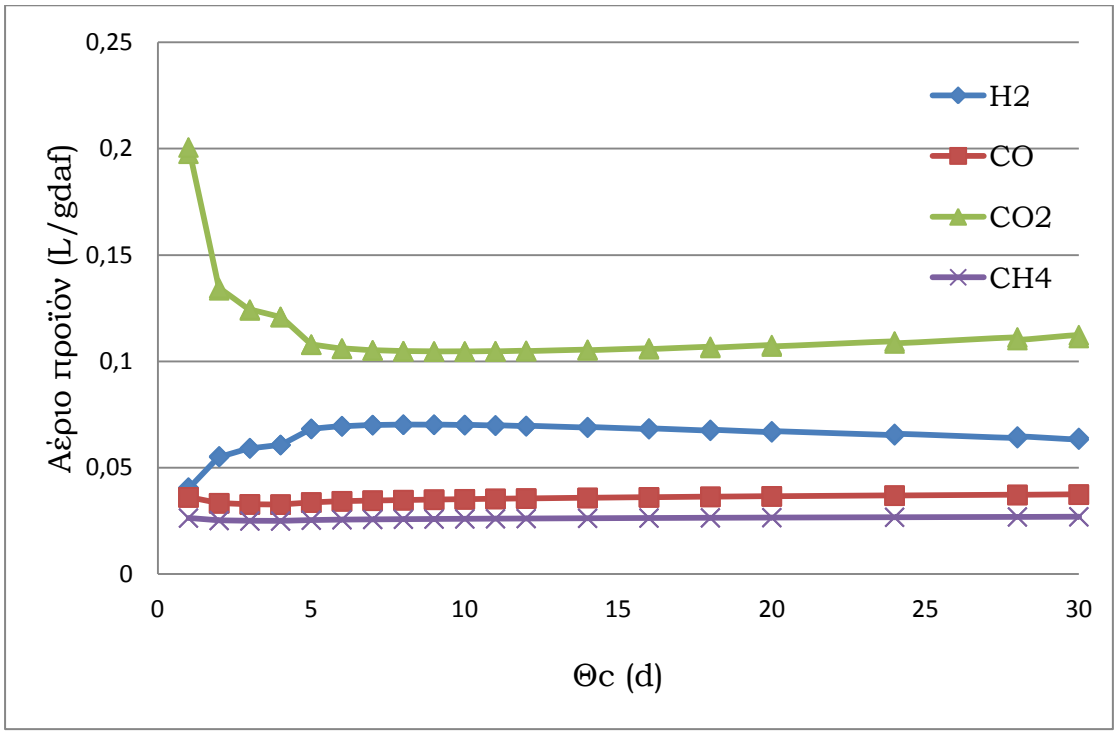
Από την καταγραφή της πορείας του πειράματος, το παραχθέν αέριο προϊόν στη φάση της πυρόλυσης παρατίθεται στο Σχήμα 4.7, ενώ στο Σχήμα 4.8 παρατίθεται η παραγωγή του εν λόγο αερίου ανηγμένη ανά γραμμάριο daf.



Σχήμα 4.7 Αέρια προϊόντα πυρόλυσης παραχθείσας ιλύος

Από τα σχήματα συμπεραίνεται πως το αέριο με τη μεγαλύτερη παραγωγή είναι το διοξείδιο του άνθρακα, ακολουθούμενο από το

υδρογόνο, το μονοξείδιο και τέλος το μεθάνιο. Χαρακτηριστικό των πειραμάτων είναι η τάση ελάττωσης της παραγωγής των αερίων με την αύξηση του Θ_c. Η μέγιστη παραγωγή υδρογόνου παρατηρείται στις αρχικές τιμές του Θ_c, όπου συμπίπτει με την ελάχιστη παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα.



Σχήμα 4.8 Αέρια προϊόντα πυρόλυσης παραχθείσας ιλύος εκφρασμένα ανά γραμμάριο οργανικής ύλης (daf)

Κατά τη φάση της πυρόλυσης, εκτός από το αέριο προϊόν και το πισσούχο παραπροϊόν, παράγεται και το εξανθράκωμα (char). Για τον υπολογισμό του εξανθρακώματος καταστρώθηκε ισοζύγιο μάζας για την φάση της πυρόλυσης.

Τα αποτελέσματα, εκφρασμένα ως ποσοστό μετατροπής της ιλύος στα προϊόντα της πυρόλυσης, παρατίθενται στο Σχήμα 4.9

Ισοζύγιο μάζας ιλύος στη φάση της πυρόλυσης:

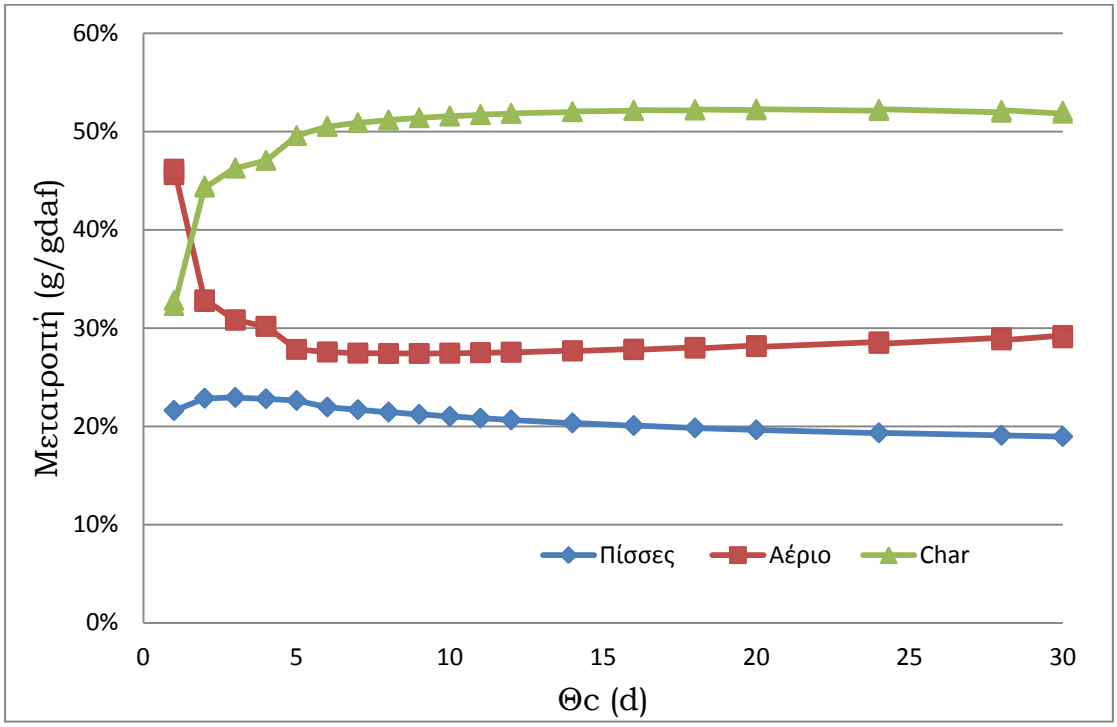
$$m_{\text{ιλύος}} = m_{\text{πισσών}} + m_{\text{αερίου}} + m_{\text{char}}$$

όπου: $m_{ιλύος}$ = μάζα ιλύος (g/daf), που αντιστοιχούσε στην αρχική ποσότητα ιλύος

$m_{πισσών}$ = μάζα πισσούχου παραπροϊόντος (g / daf), που μετρήθηκε γραβιμετρικά στο τέλος του πειράματος

$m_{αερίου} = m_{υδρογόνου} + m_{μονοξειδίου} + m_{διοξειδίου} + m_{μεθανίου} =$

$= (V_{H2}*MB_{H2} + V_{CO}*MB_{CO} + V_{CO2}*MB_{CO2} + V_{CH4}*MB_{CH4})/22.4$

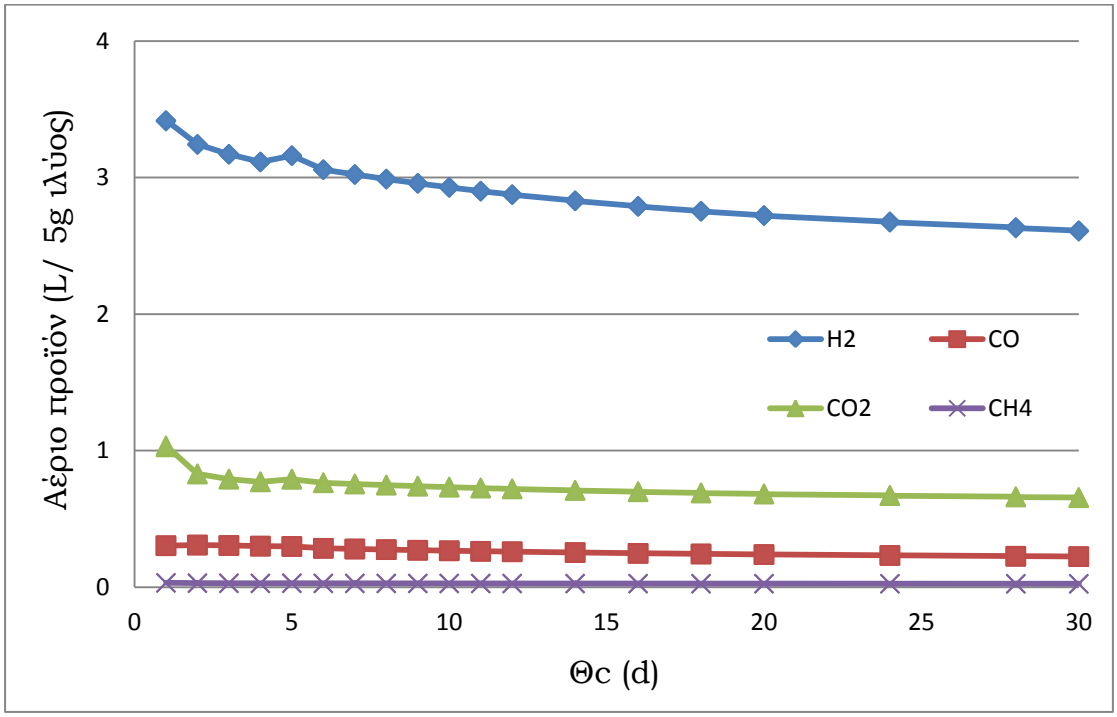


Σχήμα 4.9 Ποσοστό μετατροπής του οργανικού κλάσματος σε πισσούχο παραπροϊόν, αέριο προϊόν και εξανθρακώματος (char) κατά την πυρόλυση

Από το παραπάνω Σχήμα, προκύπτει πως κατά την αύξηση του Θc το ποσοστό της ιλύος που μετατρέπεται σε πισσούχο παραπροϊόν μειώνεται, ενώ η παραγωγή εξανθρακώματος αυξάνεται, με ταυτόχρονη μείωση της παραγωγής αερίου προϊόντος.

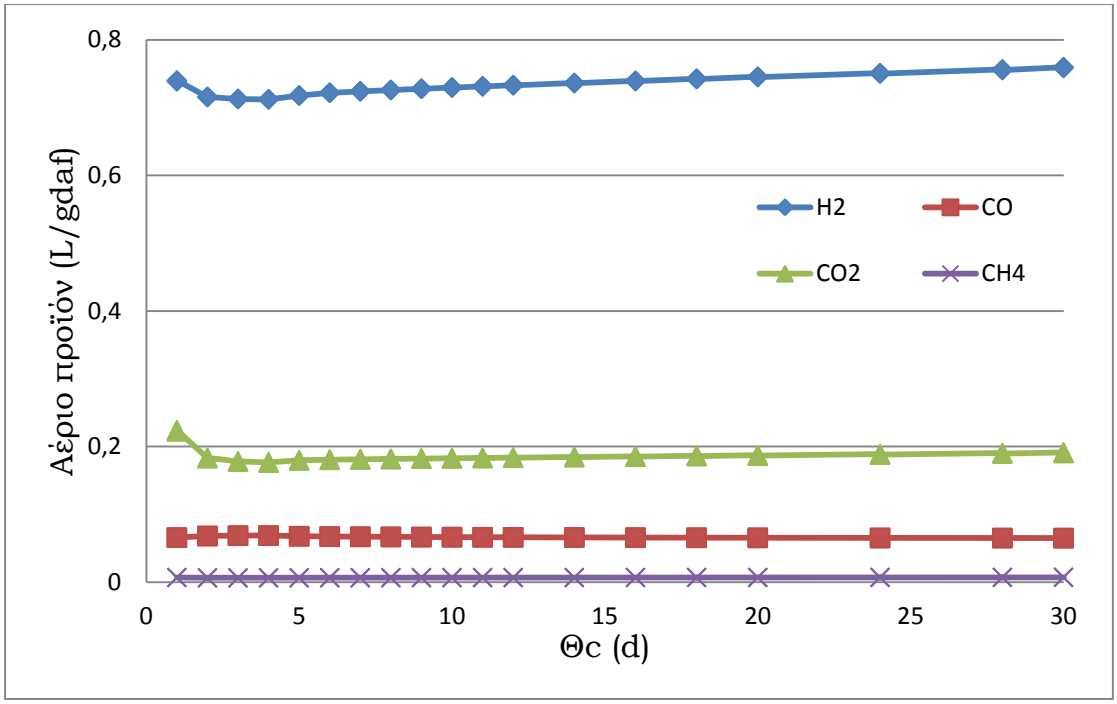
4.2.3 Επεξεργασία πειραμάτων στις συνθήκες αεριοποίησης

Αντίστοιχα με την φάση της πυρόλυσης, στα Σχήματα 4.10 και 4.11 απεικονίζεται η παραγωγή των αερίων προϊόντων της αεριοποίησης, τόσο όπως προέκυψαν από το εκάστοτε πείραμα όσο και ανηγμένα ανά daf.



Σχήμα 4.10 Αέρια προϊόντα αεριοποίησης παραχθείσας ιλύος

Από τα σχήματα συμπεραίνεται ότι η το κύριο είδος αερίου είναι το υδρογόνο, ακολουθούμενο από το διοξείδιο και το μονοξείδιο του άνθρακα. Η παραγωγή του μεθανίου ήταν σχεδόν μηδενική. Η κατανομή των αερίων προϊόντων συνάδει με τις πειραματικές συνθήκες, καθώς η περίσσεια υδρατμού ενίσχυε την αντίδραση μετάπτωσης (Water–Gas-Shift) προς παραγωγή H_2 και CO_2 με κατανάλωση CO. Το μεθάνιο αναμορφωνόταν εν τη γενέσει του, ενώ η μετρούμενη ποσότητα παρατηρούνταν πάντα στα αρχικά δείγματα και σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

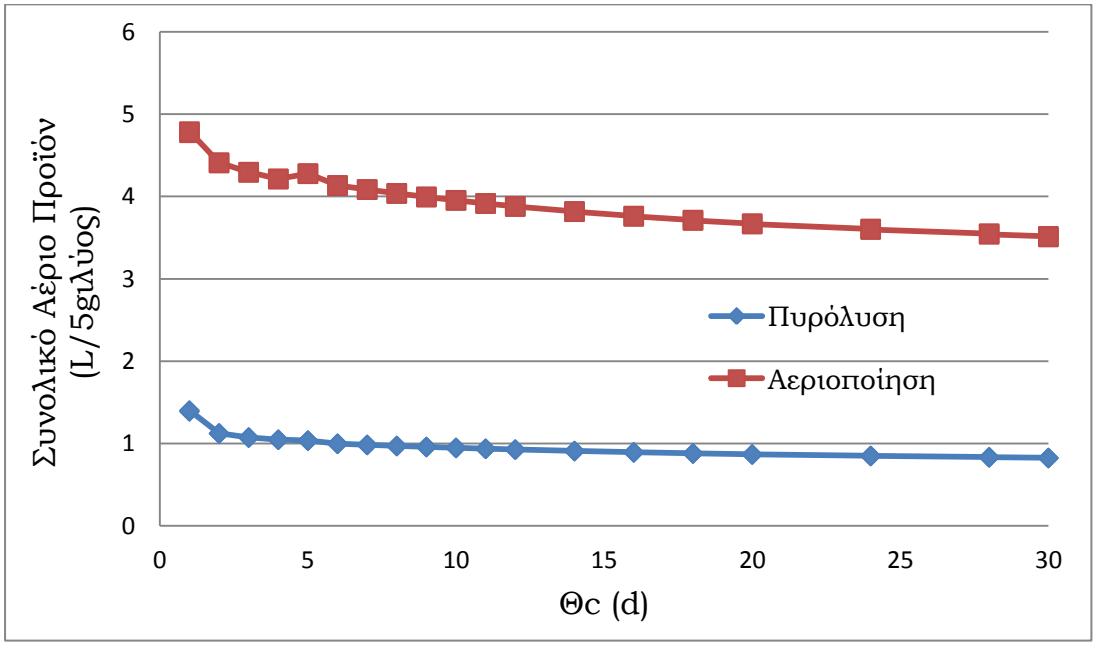


Σχήμα 4.11 Αέρια προϊόντα αεριοποίησης παραχθείσας ιλύος εκφρασμένα ανά γραμμάριο οργανικής ύλης (g/daf)

Η αναντιστοιχία των παραπάνω σχημάτων έγκειται στη σύσταση της παραχθείσας ιλύος. Σαν απόλυτο νούμερο, η επίδραση του ποσοστού της τέφρας είναι καταλυτική. Όμως, η βιολογία της παραχθείσας ιλύος δύναται να παίζει σημαντικό ρόλο στην αυξημένη παραγωγή υδρογόνου. Το γεγονός αυτό μπορεί να ερμηνευτεί από την αυξημένη πολυπλοκότητα της σύστασης του οργανικού κλάσματος της ιλύος. Καθώς το οικοσύστημα οικοδομείται με ανώτερους και πολυπλοκότερους μικροοργανισμούς, αυξάνεται και το μέσο μοριακό βάρος των οργανικών ενώσεων, οδηγώντας περισσότερο άνθρακα στη φάση της αεριοποίησης, αυξάνοντας την παραγωγή του υδρογόνου.

4.2.4 Σύγκριση φάσης πυρόλυσης - αεριοποίησης

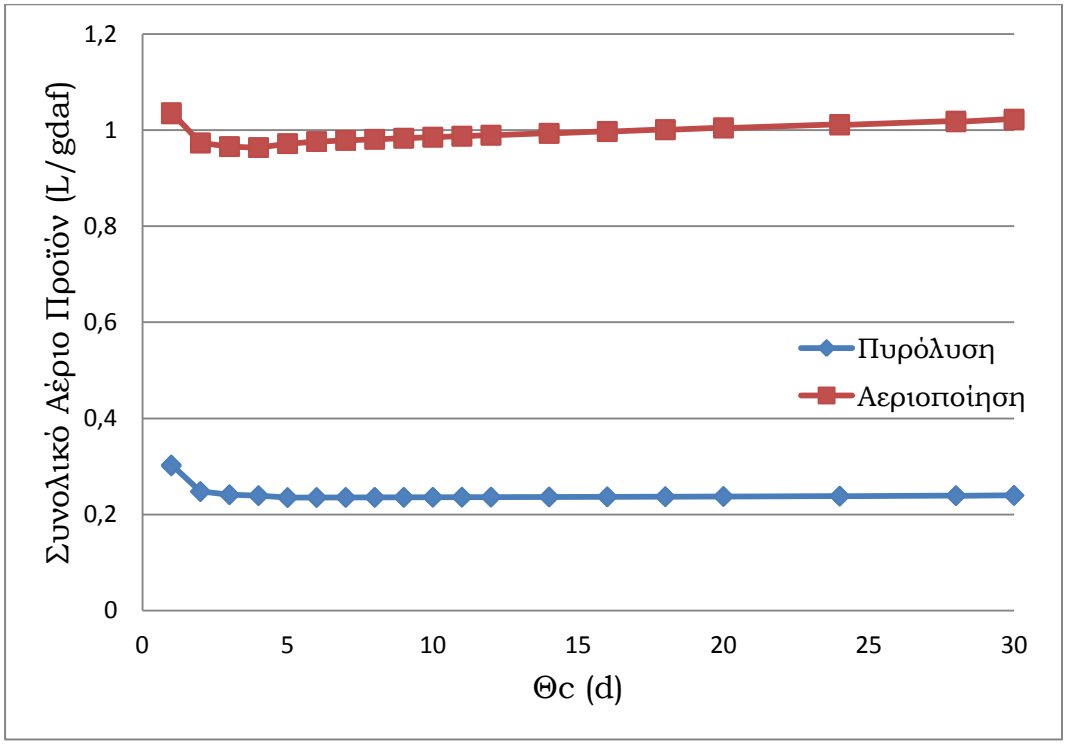
Συγκρίνοντας τις δύο φάσεις, όσων αφορά την παραγωγή του αερίου προκύπτουν αντίστοιχα τα Σχήματα 4.12 και 4.13. Σε αντιστοιχία των παραπάνω σχημάτων, το πρώτο αφορά την παραγωγή του συνολικού αερίου προϊόντος του εκάστοτε πειράματος και το δεύτερο το συνολικό παραχθέν αέριο, ανηγμένο ανά γραμμάριο daf.



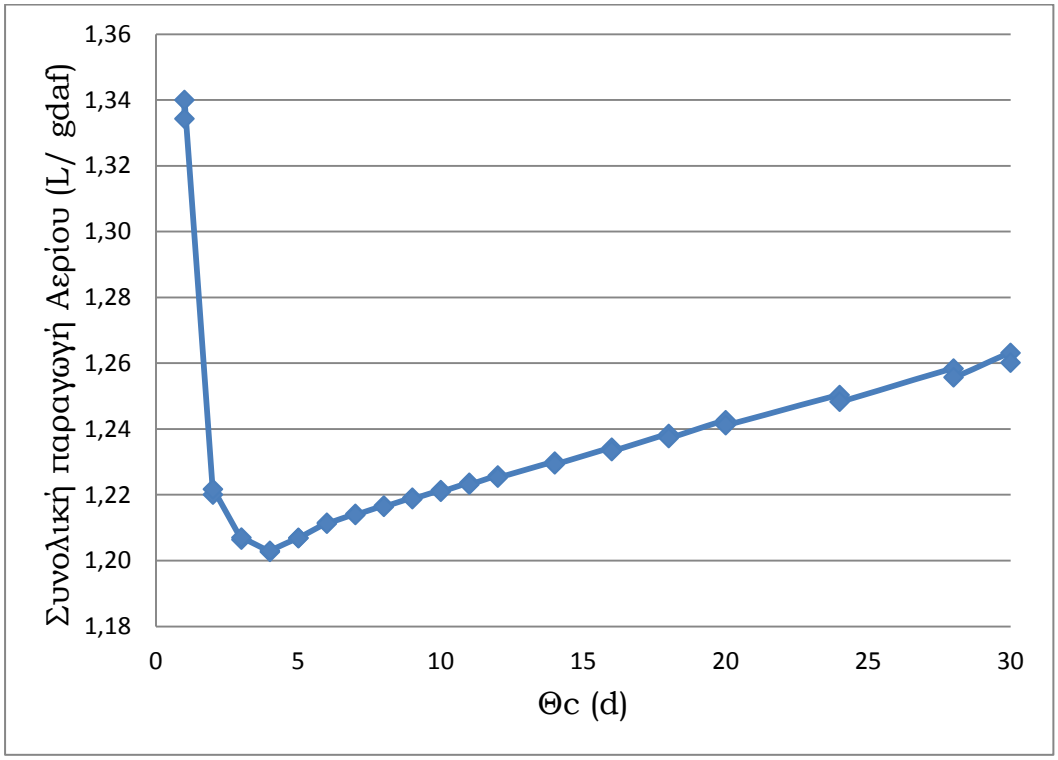
Σχήμα 4.12 Συγκριτικό διάγραμμα παραγωγής αερίου προϊόντος κατά την πυρόλυση και την αεριοποίηση

Από το Σχήμα 4.12 παρατηρείται σταδιακή πτώση της παραγωγής του αερίου σε συνάρτηση με το Θ_c, που οφείλεται στη μείωση του ποσοστού του οργανικού κλάσματος στην παραχθείσα ιλύ, με αντίστοιχη αύξηση του ποσοστού της τέφρας.

Στο Σχήμα 4.13 παρατηρείται μια σταθεροποίηση της παραγωγής αερίου προϊόντος στη φάση της πυρόλυσης και αύξησης της παραγωγής αερίου ανά γραμμάριο daf, στην φάση της αεριοποίησης σε συνάρτηση με το Θ_c, σε πλήρη αντιστοιχία με το Σχήμα 4.14. Έτσι, διαπιστώνεται πως το σημαντικότερο αέριο είναι το υδρογόνο, το οποίο και ορίζει τις τάσεις εξέλιξης του αερίου προϊόντος σε συνάρτηση με το Θ_c.



Σχήμα 4.13 Συγκριτικό διάγραμμα παραγωγής αερίου προϊόντος κατά την πυρόλυση και την αεριοποίηση ανά γραμμάριο οργανικής ύλης (daf)

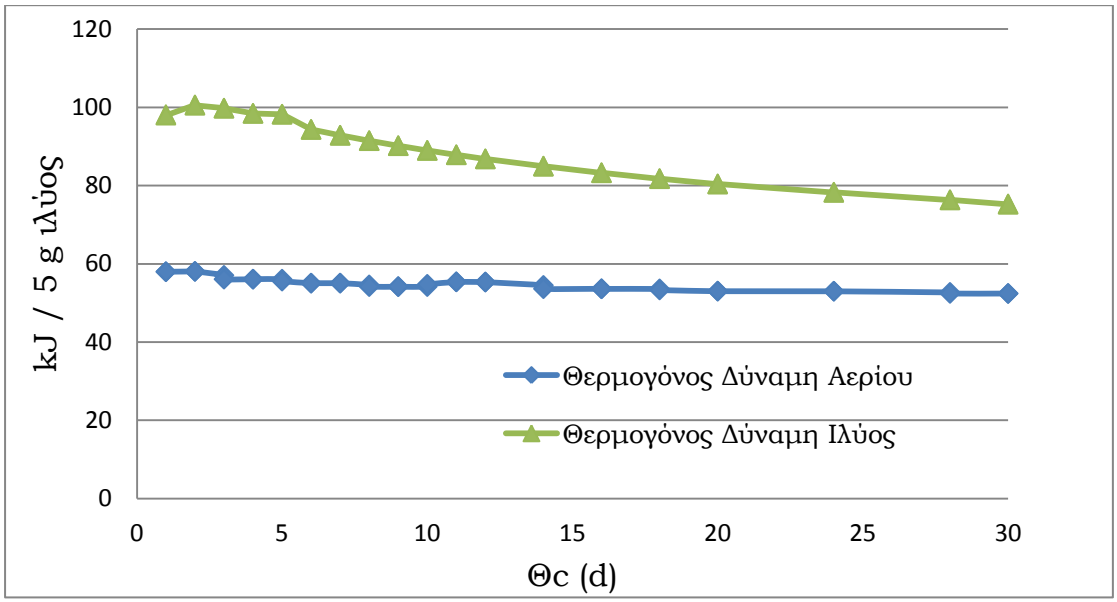


Σχήμα 4.14 Συνολική παραγωγή αερίου προϊόντος πυρόλυσης – αεριοποίησης ανά γραμμάριο οργανικής ύλης (daf)

4.3 Ενεργειακή ανάλυση πυρόλυσης - αεριοποίησης

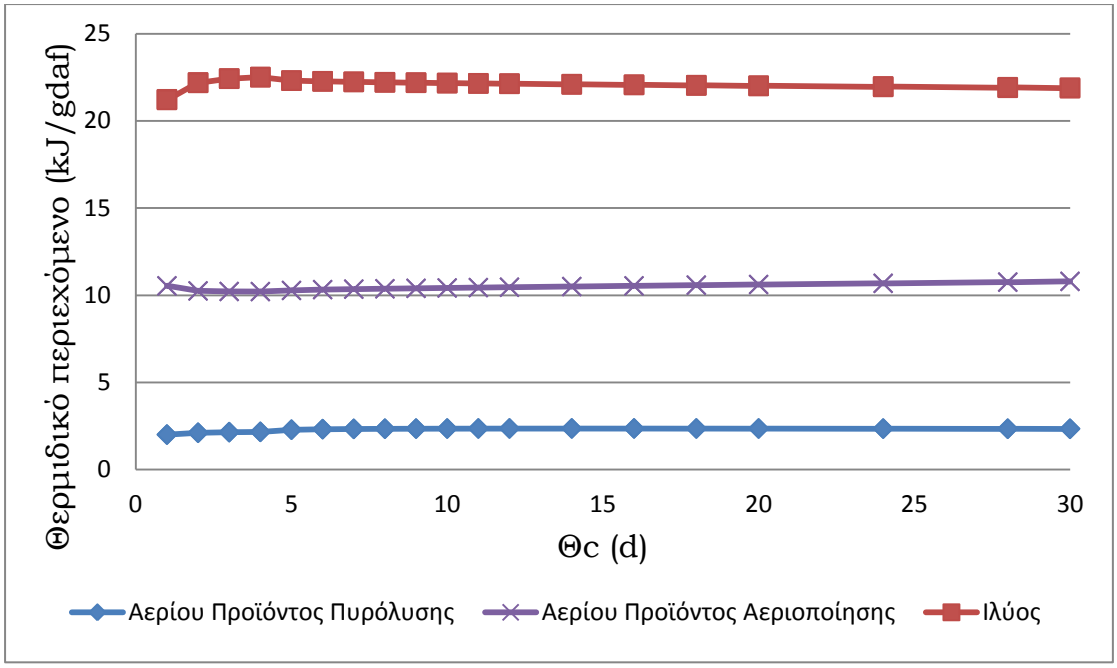
Στόχος της ενεργειακής ανάλυσης των αποτελεσμάτων της πυρόλυσης και αεριοποίησης της παραχθείσας ιλύος είναι η διερεύνηση του ποσοστού της μετατροπής της θερμογόνου δύναμης της ιλύος στο αέριο προϊόν. Το αέριο προϊόν αποτελεί και τον τελικό στόχο της θερμικής διεργασίας, καθώς είναι το τελικό και πλήρως ενεργειακά εκμεταλλεύσιμο προϊόν.

Στο Σχήμα 4.14 απεικονίζεται η περιεχόμενη στην ιλύ θερμογόνος δύναμη και η θερμογόνος δύναμη του αερίου προϊόντος στις συνθήκες πειράματος, για το εκάστοτε Θ_c. Κατά την αύξηση του Θ_c, ενώ η εισερχόμενη στο σύστημα θερμογόνος δύναμη ελαττώνεται, η εξερχόμενη παραμένει σταθερή.



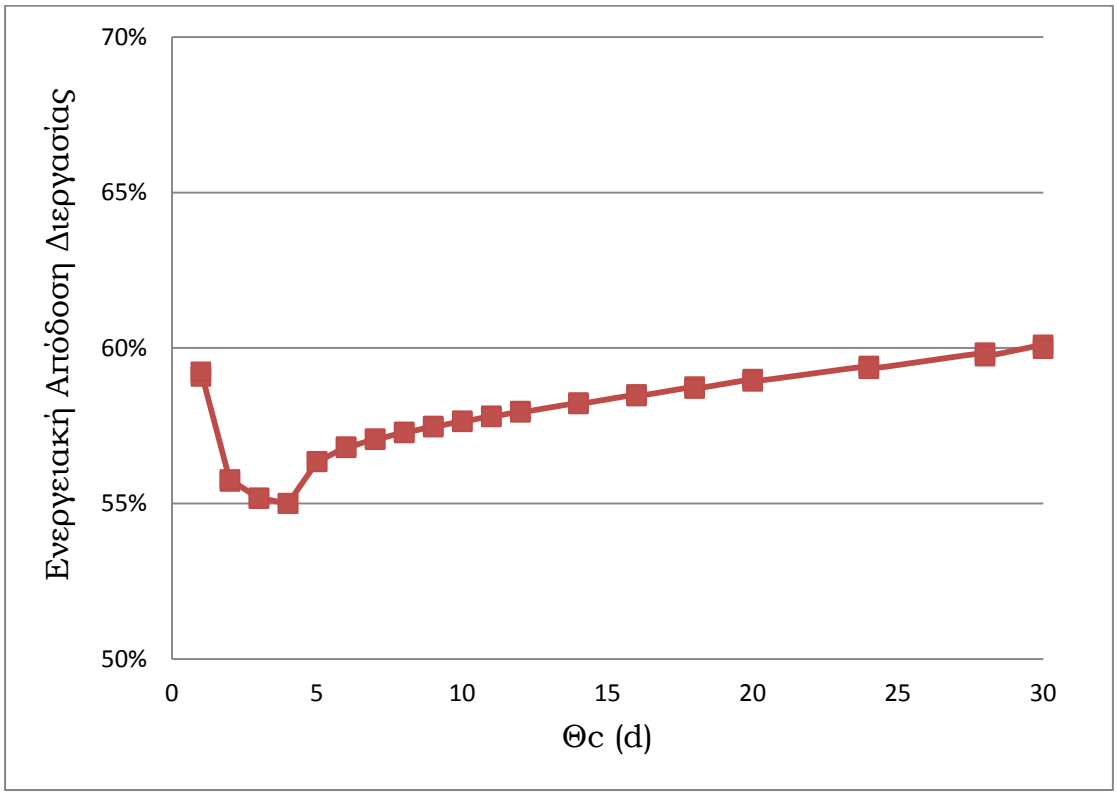
Σχήμα 4.14 Θερμογόνος δύναμη ιλύος και αερίου προϊόντος στις συνθήκες πειράματος

Η κατανομή της θερμογόνου δύναμης στο αέριο προϊόν παρατίθεται στο Σχήμα 4.15, όπου απεικονίζεται η ανηγμένη ανά γραμμάριο daf θερμογόνος δύναμη του αερίου της πυρόλυσης και της αεριοποίησης. Η τάση των διαγραμμάτων ακολουθεί τα αντίστοιχα της παραγωγής του αερίου προϊόντος.



Σχήμα 4.15 Θερμιδικό περιεχόμενο ιλύος και αερίου προϊόντος πυρόλυσης και αεριοποίησης

Τέλος, υπολογίστηκε το ποσοστό της μετατροπής της θερμογόνου της ιλύος στο αέριο προϊόν, όπου προέκυψε το Σχήμα 4.16



Σχήμα 4.16 Ποσοστό μετατροπής της θερμογόνου δύναμης της ιλύος σε αέριο προϊόν.

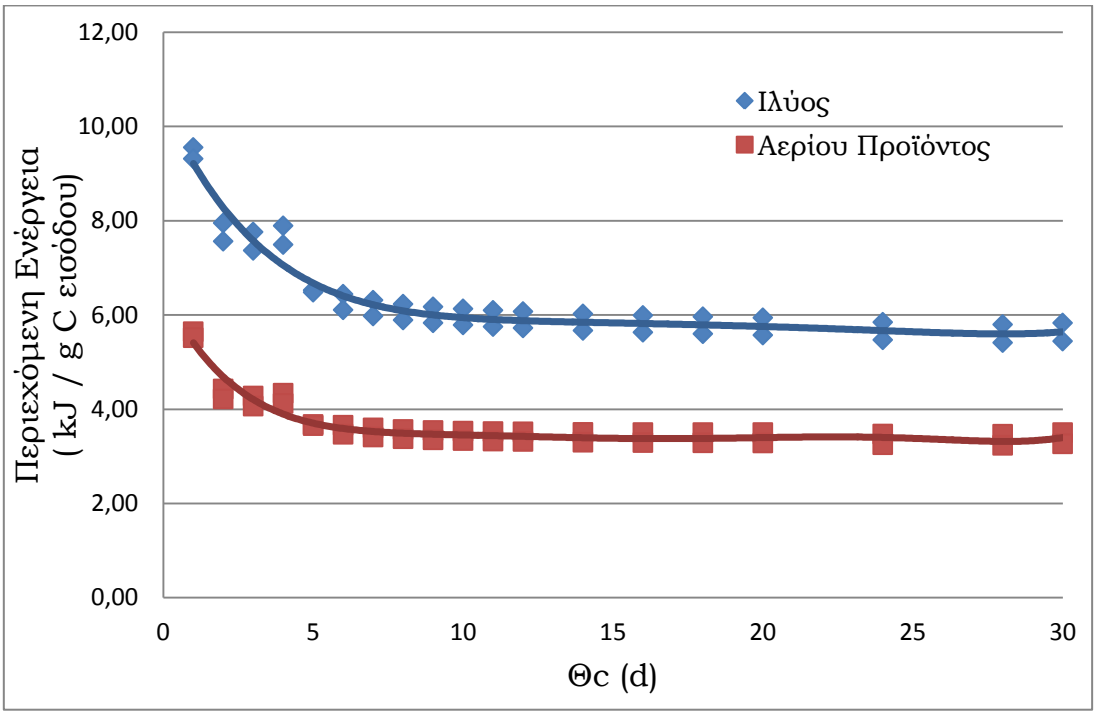
Το συμπέρασμα που προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα είναι πως η αεριοποίηση της ιλύος είναι αποδοτική σε όλο το φάσμα των Θ_c, με υψηλές αποδόσεις που κυμαίνονται από 55,2 έως 61,4%. Η απόδοση της θερμικής διεργασίας είναι υψηλότερη με την αύξηση του Θ_c. Έτσι, η νεαρή ιλύς είναι αποδοτικότερη στη φάση της πυρόλυσης, ενώ η γερασμένη ιλύς είναι αποδοτικότερη στη φάση της αεριοποίησης.

4.4 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αεριοποίηση ιλύος συγκεκριμένου Θ_c

Όπως προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα, η αεριοποίηση είναι μια αποτελεσματική μέθοδος ενεργειακής αξιοποίησης της παραγόμενης ιλύος από μονάδες βιολογικού καθαρισμού, που επεξεργάζονται τα λύματα με τη μέθοδο της ενεργούς ιλύος.

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποίησαν υπολογισμοί για τη διερεύνηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το αέριο προϊόν της αεριοποίησης. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είχε στόχο την παραγωγή γενικών συμπερασμάτων για την δυνατότητα ηλεκτροπαραγωγής από την αεριοποίηση της περίσσειας της ιλύος από τα βιολογικά συστήματα. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με βάση το εισερχόμενο προς επεξεργασία οργανικό φορτίο, από το οποίο προέκυψε περίσσεια ιλύος, σύμφωνα με το Θ_c λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα, η οποία και αεριοποιήθηκε προς παραγωγή αερίου προϊόντος. Έτσι, το θερμιδικό περιεχόμενο του αερίου συνδέθηκε άρρηκτα με την ποιότητα του προς επεξεργασία λύματος.

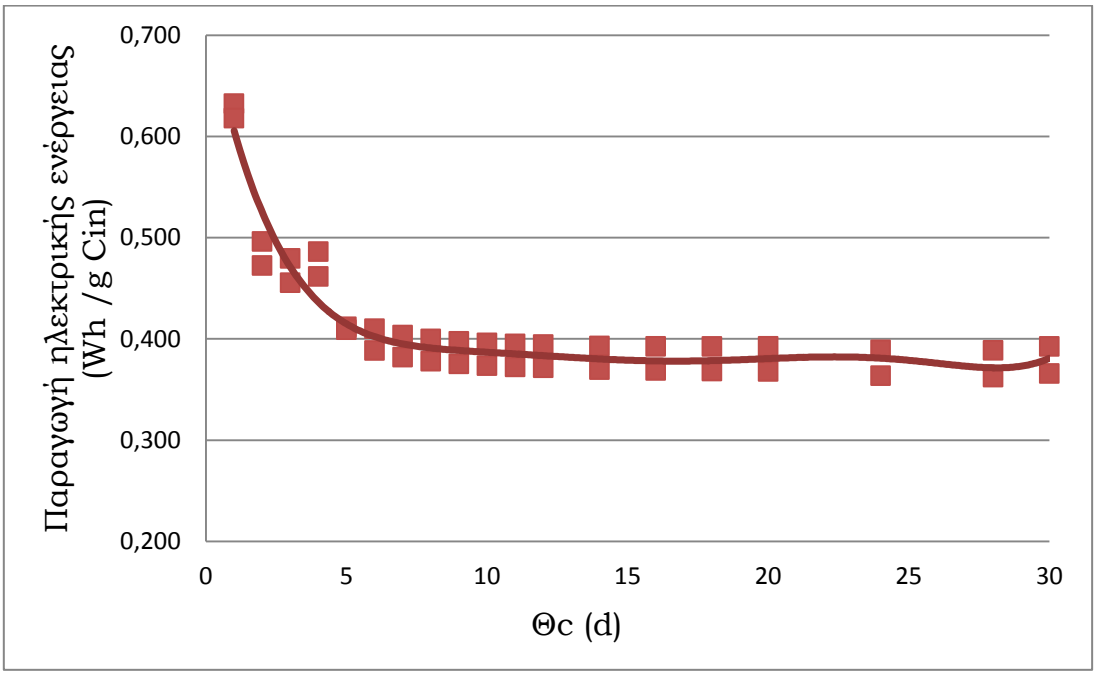
Στο παρακάτω Σχήμα 4.17 απεικονίζεται η περιεχόμενη στην ιλύ και το αέριο προϊόν ενέργεια. Οι τιμές του Σχήματος προέκυψαν ως εξής:



Σχήμα 4.17 Περιεχόμενη ενέργεια ανά g εισαγόμενου άνθρακα

Κατόπιν, υπολογίστηκε το δυναμικό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε Wh, λαμβάνοντας υπόψη μια μέση απόδοση του αερίου σε ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιήθηκε τιμή μέσης απόδοσης εμπορικού ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους με μηχανή εσωτερικής καύσης, μικρής δυναμικότητας, όπως των ειδικά τροποποιημένων γεννητριών (CHP) για αέριο σύνθεσης της εταιρείας Jenbacher® τύπου 2, (www.clarke-energy.com/gas-type/synthesis-gas-syngas/) ή παρόμοιες, που ανέρχεται σε 37 - 40% και έχουν εφαρμοστεί σε διάφορες πιλοτικές διατάξεις μικρού και μεγάλου μεγέθους (Brandin et al, 2011, CH2MHILL, 2007, Galvão et al. 2011). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 4.18.

Η συνολική απόδοση του συστήματος σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που υπολογίστηκε από το γινόμενο του ποσοστού μετατροπής της θερμογόνου δύναμης της ιλύος σε αέριο προϊόν επί του βαθμού απόδοσης της CHP (Higman & van der Burgt, 2003), κυμαινόταν από 22 – 24 %, που είναι αντίστοιχη της βιβλιογραφίας για μικρού μεγέθους συστήματα (McCahey, 2003, Groß et al, 2008). Μάλιστα οι αναφερόμενες αποδόσεις αντιστοιχούν στο σύνολο της διεργασίας, από την απαραίτητη προεπεξεργασία της ιλύος έως το ηλεκτρικό δίκτυο, καλύπτοντας όλες τις ενεργειακές απαιτήσεις του συνόλου των διεργασιών. Έτσι, η συνολική απόδοση του συστήματος ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι άμεσα συγκρίσιμη με μικρού μεγέθους εφαρμογές, που αποτελούσε και στόχο της συγκεκριμένης μελέτης.

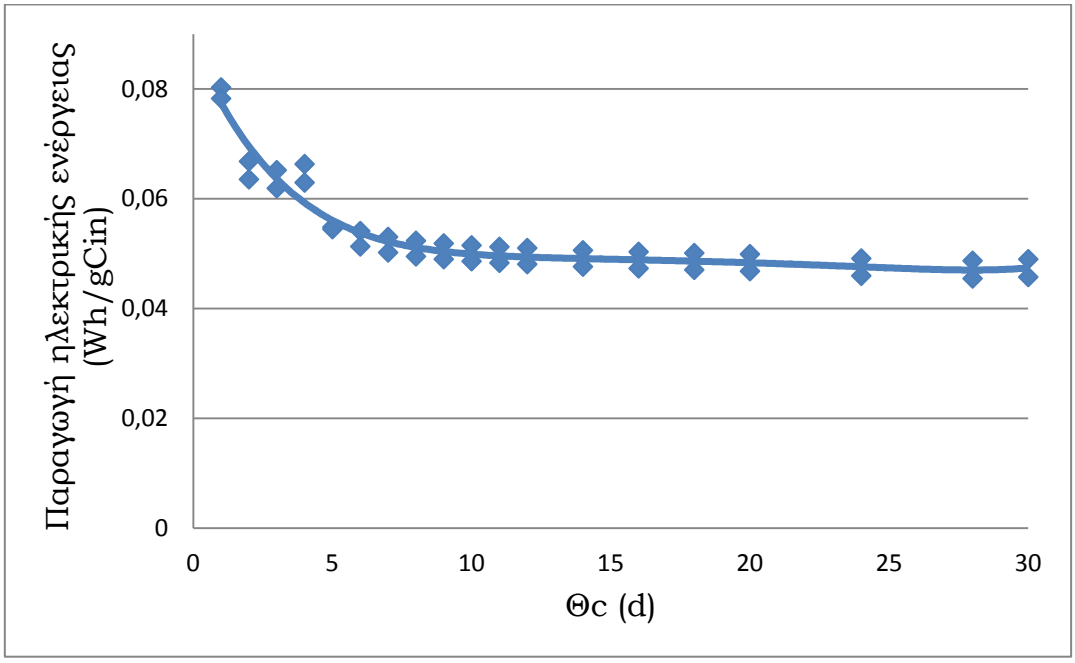


Σχήμα 4.18 Δυνητική Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το αέριο προϊόν

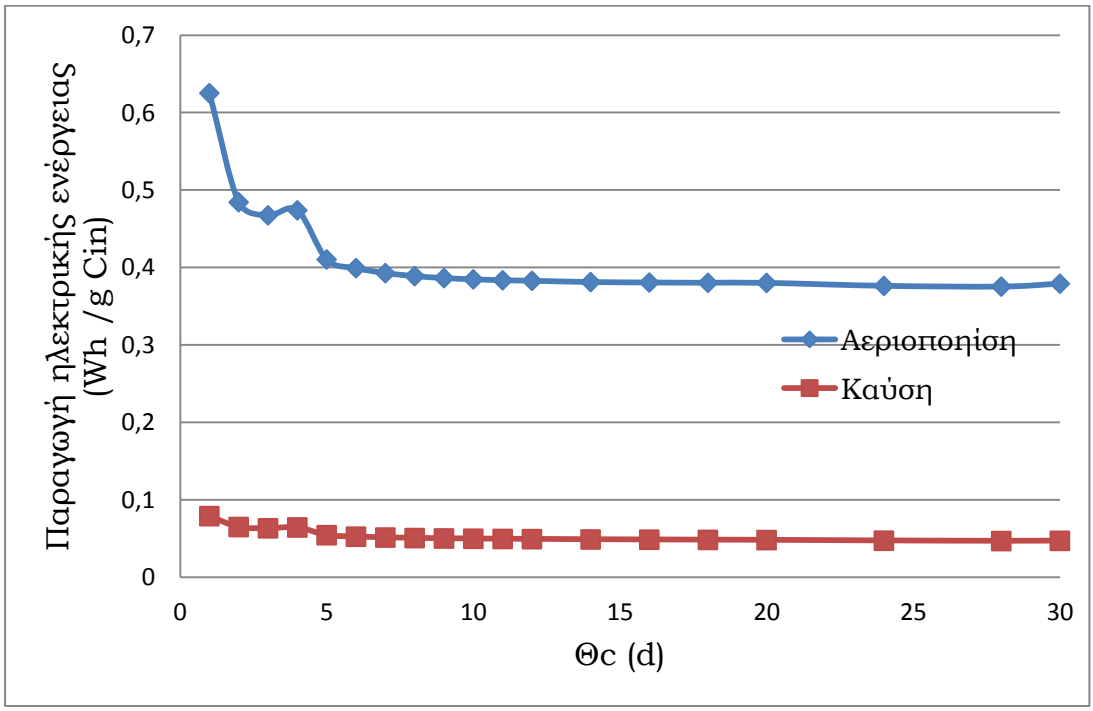
4.5 Σύγκριση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την αεριοποίηση και την καύση ιλύος συγκεκριμένου Θ_c

Η καύση αποτελεί παγκόσμια, την πιο διαδεδομένη θερμική μέθοδο διάθεσης ιλύος. Βρίσκεται σε πλήρως εφαρμοσμένο βιομηχανικό στάδιο, με πληθώρα παραδειγμάτων εφαρμογής (Werther & Ogada, 1999). Πρωταρχικός σκοπός ήταν η τελική διάθεση του υδαρούς παραπροϊόντος και όχι η ενεργειακή εκμετάλλευσή του για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην πορεία, όμως, το συνεχώς αυξανόμενο κόστος των πρόσθετων καυσίμων αλλά και οι απαιτήσεις για ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, οδήγησε στην αναζωπύρωση των ερευνών. Οι παρούσες έρευνες πάνω στην καύση της ιλύος επικεντρώνονται στην ελαχιστοποίηση των παραγόμενων αερίων ρύπων και στη χρήση όλο και λιγότερων πρόσθετων καυσίμων, στοχεύοντας στην ενεργειακή αυτονομία των μονάδων (Murakami et al, 2009). Έρευνες δείχνουν πως στις μικρές και μεσαίες μονάδες η παραγωγή ενέργειας επαρκεί οριακά για την κάλυψη των ενεργειακών και δεν φτάνει για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Horttanainen et al (2010), υπολόγισαν πως από 28800 t/y ιλύος, περιεκτικότητας 25% σε στερεά δύναται να παραχθούν μόλις 400 kW ηλεκτρικής ενέργειας, προσδίδοντας στο σύστημα απόδοση της τάξη του 8%. Αντίστοιχα, οι McKendry (2002) και Kaupp προσδίδουν ηλεκτρική απόδοση 20% με χρήση βιομάζα ως πρώτη ύλη, μέγιστης υγρασίας 50% κ.β. Ο υπολογισμός του δυναμικού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ενδεχόμενη καύση ιλύος συγκεκριμένου Θ_c που παράχθηκε στην παρούσα μελέτη, έγινε με βάση απόδοση της θερμογόνου δύναμης της παραχθείσας ιλύος σε ηλεκτρική ενέργεια 10%, οπότε και προέκυψε το παρακάτω Σχήμα 4.19 .

Στο Σχήμα 4.20 απεικονίζεται η σύγκριση της εκτιμώμενης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την αεριοποίηση και την καύση ιλύος συγκεκριμένου Θ_c.



Σχήμα 4.19 Εκτιμώμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την *καύση* ιλύος συγκεκριμένου Θ_c



Σχήμα 4.20 Εκτιμώμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αεριοποίηση και την καύση ιλύος συγκεκριμένου Θ_c

4.6 Υπολογισμός ενεργειακών απαιτήσεων βιολογικών καθαρισμών

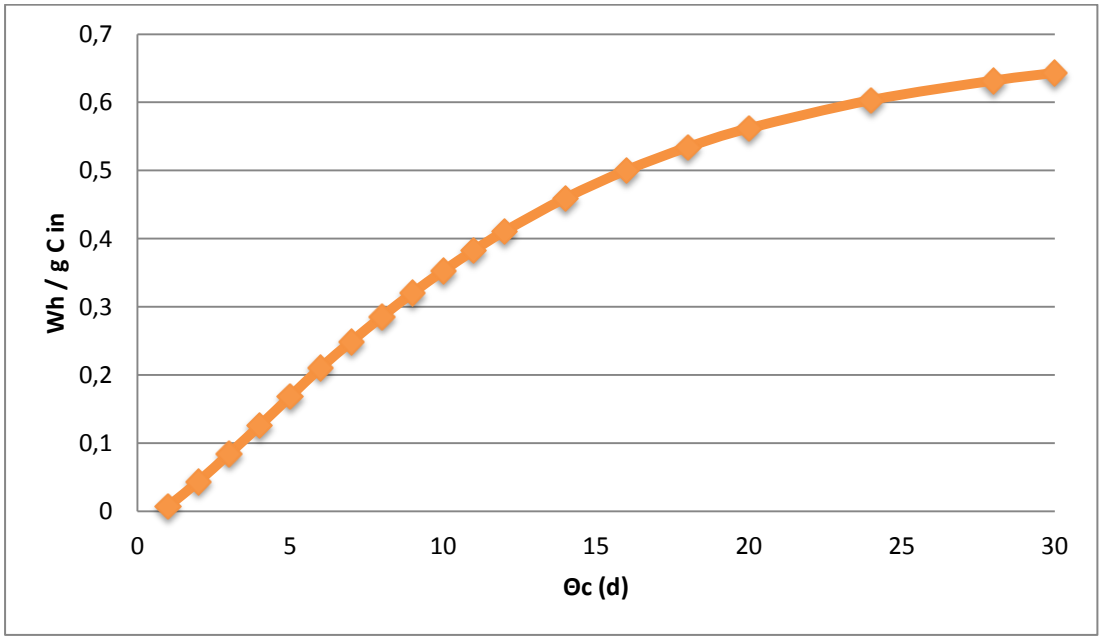
Η πειραματική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε οδήγησε στην παραγωγή αντιπροσωπευτικής ιλύος, καθώς το συνθετικό λύμα που χρησιμοποιήθηκε προσομοίωνε τη σύνθεση του αστικού. Σε συνδυασμό με τα πειράματα της αεριοποίησης που ακολούθησαν κατέστη δυνατή η διερεύνηση της πιθανότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς τα συστήματα βιολογικών καθαρισμών έχουν αυξημένες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται το ενδεχόμενο χρήσης της παραχθείσας, από την αεριοποίηση της περίσσειας της ιλύος, ηλεκτρικής ενέργειας για τη πιθανή κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός βιολογικού καθαρισμού.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα συστήματα ενεργού ιλύος είναι αρκετά αποδοτικά στην αφομοίωση του οργανικού φορτίου, αλλά έχουν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις. Οι απαιτήσεις αυτές πηγάζουν, κυρίως, από τον απαραίτητο για τους μικροοργανισμούς, αερισμό. Για τη διάλυση επαρκούς ποσότητας οξυγόνου στην υγρή φάση των βιοαντιδραστήρων χρησιμοποιούνται συστήματα αερισμού που αυξάνουν τη διεπιφάνεια υγρού-αέρα. Τα κύρια είδη συστημάτων αερισμού λειτουργούν είτε με τη διάχυση αέρα στη μάζα των υγρών είτε με τη μηχανική ανάδευση των αποβλήτων. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις φέρουν επιφανειακά μηχανικά συστήματα αερισμού (Tsagarakis, 1999). Όμως, για τη λειτουργία τους καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια, η οποία αποτελεί περίπου το 60 – 80% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της εγκατάστασης. Το μέγεθος της ενεργειακής κατανάλωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ο πιο σημαντικός από τους οποίους είναι το Θ_c (Γεωργακάκης, 1998, Βλυσίδης, 2005).

Επομένως, επιλέχθηκε να διερευνηθεί το ενδεχόμενο κάλυψης των ενεργειακών απαιτήσεων μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων με τη μέθοδο της ενεργούς ιλύος από την αεριοποίηση της παραγόμενης ιλύος, αλλά και η σύγκρισή της με την απευθείας καύση.

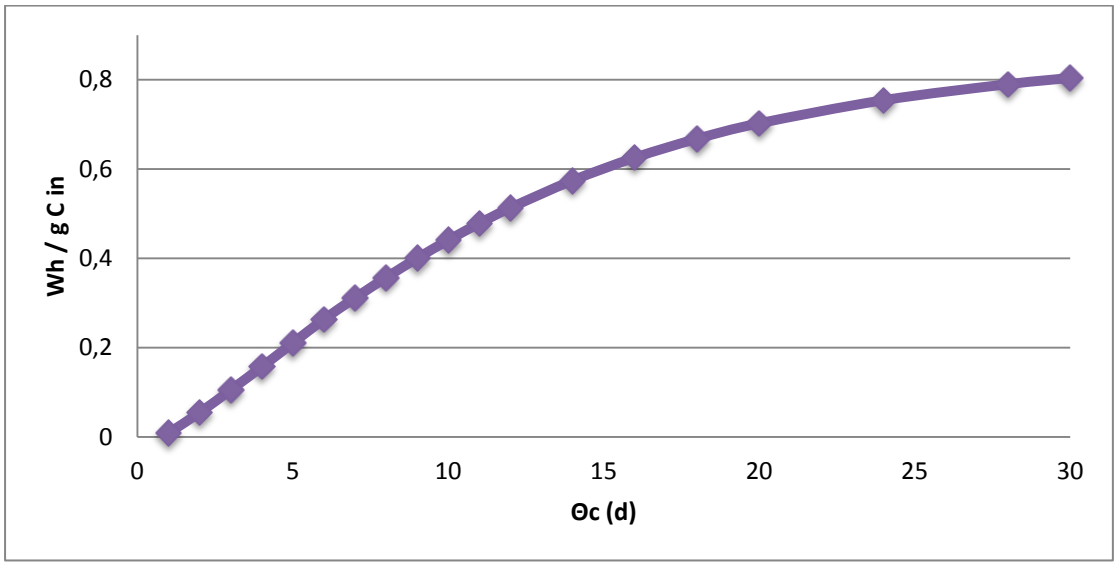
Η διερεύνηση επικεντρώθηκε στην επίδραση του Θ_c τόσο στις ενεργειακές απαιτήσεις της εγκατάστασης, όσο και στην απόδοση της αεριοποίησης και της καύσης. Όσων αφορά την απόδοση της αεριοποίησης και της καύσης χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καταστρώθηκε ένα μοντέλου υπολογισμού της σε συνάρτηση με το Θ_c, (Παναγιωτοπούλου, 2011) το οποίο και παρατίθεται στο Παράρτημα ΙΙΙ.

Το θεωρητικό μοντέλο υπολογισμού της ενεργειακής κατανάλωσης στηρίχθηκε σε μοντέλο σχεδιασμού ολοκληρωμένης εγκατάστασης βιολογικής επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Στο μοντέλο συμπεριλήφθησαν οι βιολογικές δράσεις της αφομοίωσης του BOD, της νιτροποίησης και απονιτροποίησης. Το σύστημα αερισμού που επιλέχθηκε ήταν του αργόστροφου επιφανειακού αεριστήρα. Τα χαρακτηριστικά του λύματος που επιλέχθηκαν αποτελούσαν μέσες τιμές τυπικού αστικού λύματος. Η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας του αερισμού απεικονίζεται στο Σχήμα 4.21



Σχήμα 4.21 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος αερισμού, ανηγμένη ανά γραμμάριο άνθρακα του λύματος.

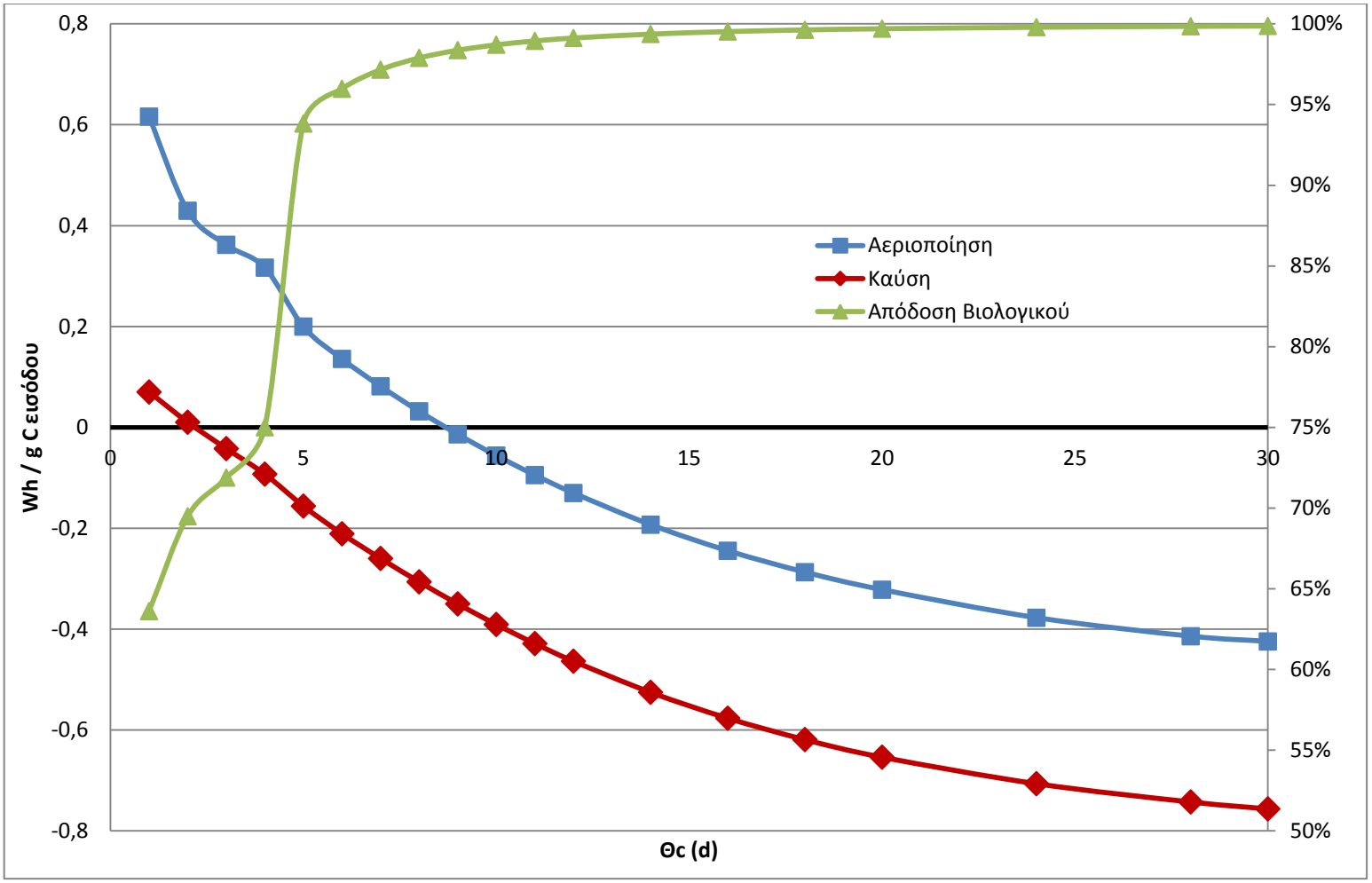
Θεωρώντας πως ο αερισμός αντιστοιχεί στο 70% του συνόλου της κατανάλωσης ενέργειας της εγκατάστασης, τότε προκύπτει το Σχήμα 4.22



Σχήμα 4.22 Συνολική κατανάλωση ενέργειας στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων

Κατόπιν, υπολογίστηκε η καθαρή παραγόμενη ενέργεια από την αεριοποίηση και από την καύση, που προέκυψε από την αφαίρεση της δυνητικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προς την συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 4.23). Στο ίδιο σχήμα παρατέθηκε και το ποσοστό της βιομετατροπής του εισερχόμενου άνθρακα.

Από το παρακάτω σχήμα προκύπτουν αρκετά συμπεράσματα. Αρχικά, η καύση, της ιλύος δεν μπορεί να καλύψει καθόλου τις ενεργειακές ανάγκες του βιολογικού καθαρισμού. Αντίθετα, η αεριοποίηση της ιλύος καλύπτει όλες τις ενεργειακές απαιτήσεις μέχρι και το Θ_c = 9d. Σε αυτή τη τιμή του Θ_c, το ποσοστό αφομοίωσης του άνθρακα είναι 98,4%. Πέραν αυτής της τιμής, το ποσοστό αφομοίωσης δεν αυξάνεται, καθώς ο βιολογικός καθαρισμός έχει φτάσει τη μέγιστη απόδοσή του. Έτσι, ανεβαίνοντας σε τιμές Θ_c, καταναλώνονται μεγαλύτερα ποσό ενέργειας, χωρίς αντίστοιχη αύξηση της απόδοσης.



Σχήμα 4.23 Καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση και αεριοποίηση της περίσσειας ιλύος και απόδοση του βιολογικού, σε συνάρτηση με το Θ_c

Στη περιοχή τιμών Θ_c = 6 – 8d, η ενέργεια που παράγεται από την αεριοποίηση υπερκαλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος. Ταυτόχρονα, το ποσοστό αφομοίωση του άνθρακα είναι πάνω από 96%. Έτσι, ένα συνδυασμένο σύστημα βιολογικού καθαρισμού με την αεριοποίηση της περίσσειας της ιλύος θα μπορούσε να είναι όχι μόνο ενεργειακή βιώσιμο, αλλά και επικερδές. Σχετική μελέτη ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Στη παρούσα διατριβή μελετήθηκε η επίδραση της ηλικίας της λάσπης στην ενεργειακή απόδοση της θερμικής επεξεργασίας της μέσω της πυρόλυσης – αεριοποίησης. Από τα πειραματικά αποτελέσματα αλλά και από την επεξεργασία αυτών, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- **Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά** της βιολογικής ιλύος που παράγεται σε μία μονάδα αερόβιας αποδόμησης του άνθρακα εξαρτώνται σημαντικά από την ηλικία της λάσπης.
    - Ως προς τα ποσοτικά χαρακτηριστικά: όσο αυξάνεται η ηλικία της λάσπης (Θ_c) παρατηρείται μία συνεχής ελάττωση του οργανικού περιεχομένου της βιολογικής λάσπης, ενώ της συνολικής παραγόμενης βιολογικής λάσπης, παρατηρείται αρχικά μία ελάττωση και στη συνέχεια μία αύξηση, με σημείο καμπής την ηλικία των 5 ημερών, τόσο της ολικής παραγόμενης μάζας όσο και του οργανικού περιεχομένου της βιομάζας παρατηρείται μία απότομη ελάττωση μέχρι την ηλικία των 5 ημερών, περίπου. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ότι μετά τις 5 ημέρες τον πρωτεύοντα ρόλο στο οικοσύστημα της βιολογικής αποδόμησης αναλαμβάνουν οι ευκαριωτικοί μικροοργανισμοί. Αυτό εξηγεί και την περεταίρω αργή μεταβολή της παραγωγής της λάσπης, καθότι το σύστημα γίνεται πιο αργόρυθμο
    - Ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά: παρατηρείται μία απότομη αύξηση λόγου H/C (Σχήμα 4.4) στην σύσταση της λάσπης μέχρι περίπου Θ_c =5d που ακολουθεί μία αργή ελάττωση, ενώ ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει – σχεδόν συμμετρικά - στο λόγο O/C (Σχήμα 4.4). Ο λόγος της μεταβολής της συμπεριφοράς της λάσπης στο σημείο καμπής Θ_c=5d είναι ο ίδιος που περιγράφτηκε ως άνω. Παρόμοια καμπύλη με το λόγο H/C σε συνάρτηση με το Θ_c παρατηρείται και για τους λόγους C/P και C/N (Σχήμα 4.1). Δηλαδή, το σύστημα, με την αύξηση του Θ_c οδηγείται, μετά το Θ_c=5d, σε συνεχή ελάττωση της συσσώρευσης φωσφόρου, αζώτου και

υδρογόνου, ενώ παράλληλα παρατηρείται αυξητική τάση συσσώρευσης άνθρακα και οξυγόνου. Επίσης, παρατηρείται συνεχής ελάττωση του οργανικού περιεχομένου της λάσπης όσο αυξάνεται το Θ_c (Πίνακας 4.2)

- Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της λάσπης επιδρούν αποφασιστικά στο θερμιδικό περιεχόμενό της, όπου βλέπουμε στο Σχήμα 4.5 μία ελάττωση από περίπου 20 kJ/g_{db} για Θ_c=2d σε 15 kJ/g_{db} σε Θ_c=30d. Βέβαια, η πτώση αυτή οφείλεται στην αύξηση του ποσοστού της περιεχόμενης τέφρας της λάσπης. Με την αναγωγή της θερμιδικής αξίας στο οργανικό περιεχόμενο της λάσπης (Σχήμα 4.5) η πτώση αυτή φαίνεται πολύ μικρότερη, περίπου 5% .
- Η σύσταση της ιλύος, όπως προέκυψε από την παρούσα εργασία, βάσει διαγράμματος Van Krevelen (Σχήμα 4.6), την καθιστά μοναδική εν σχέση με όλα τα άλλα στερεά καύσιμα. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώνει την πρωτοτυπία της παρούσας εργασίας ως προς την ενεργειακή αξιοποίηση των βιολογικών λασπών μέσω πυρόλυσης – αεριοποίησης.

- **Απόδοση πυρόλυσης – αεριοποίησης**.
  - Πυρόλυση: Το Θ_c έχει σημαντική επίδραση στα ποσοστά μετατροπής της οργανικής ύλης της ιλύος σε εξανθράκωμα, αέριο προϊόν και πισσούχο παραπροϊόν (Σχήμα 4.9). Σημειώνεται ότι, η απόδοση της πυρόλυσης αυξάνεται όσο ελαττώνεται το πισσούχο παραπροϊόν και όσο αυξάνεται η παραγωγή του εξανθρακώματος. Παρατηρείται ότι το εξανθράκωμα, ως ποσοστό της αρχικής οργανικής πρώτης ύλης, αυξάνεται από 30 %, για Θ_c =1 d σε 50% για Θ_c=7d , όπου η αύξηση του Θ_c πλέον, δεν το επηρεάζει. Παράλληλα, η παραγωγή του πισσούχου παραπροϊόντος, αυξάνεται από 21% σε 24% μέχρι περίπου Θ_c=7d και μετά αρχίζει μια συνεχή ελάττωσή του μέχρι 19% για Θ_c=30d. Επίσης, η σύσταση του αερίου προϊόντος μεταβάλλεται σημαντικά από Θ_c=1d μέχρι Θ_c=7d όπου κατόπιν σχεδόν σταθεροποιείται (H_2 =

30%, CO = 15%, CO_2 = 44% και CH_4 = 11%). Η μεγαλύτερη μεταβολή μέχρι Θ_c=7d παρατηρείται στο CO_2 το οποίο ελαττώνεται από 65% (Θ_c=1d) στα 44% (Θ_c=7d) και του H_2, το οποίο αυξάνεται από 13,5 % (Θ_c=1d) στα 30% (Θ_c=7d)

- Αεριοποίηση : Το Θ_c έχει σημαντική επίδραση στα ποσοστά μετατροπής της οργανικής ύλης της ιλύος σε αέριο προϊόν (Σχήμα 4.11). Σημειώνεται ότι, η απόδοση της αεριοποίησης αυξάνεται όσο αυξάνεται η παραγωγή του υδρογόνου. Παρατηρείται ότι η παραγωγή H_2 ανηγμένη ανά γραμμάριο οργανικού περιεχομένου ιλύος αυξάνεται από 710 mL/gdaf , για Θ_c =3 d σε 760 mL/gdaf για Θ_c=30d. Παρατηρείται πτώση μόνο από το Θ_c = 1d και έως του Θ_c =3d. Αντίστοιχη τάση παρατηρείται και για το CO_2, όπου μειώνεται η παραγωγή του από 220 mL/gdaf για Θ_c=1d σε 180 mL/gdaf για Θ_c=3d, για να αυξηθεί πολύ σταδιακά σε 190 mL/gdaf για Θ_c=30d Παράλληλα, η παραγωγή του CO και CH_4 δεν επηρεάζεται με την αύξηση του Θ_c, παραμένοντας πρακτικά σταθερή στα 66 και 7 mL/gdaf αντίστοιχα. Επίσης, η σύσταση του αερίου προϊόντος μεταβάλλεται σημαντικά από Θ_c=1d μέχρι Θ_c=3d όπου κατόπιν σχεδόν σταθεροποιείται (H_2 = 74%, CO = 7%, CO_2 = 18,5% και CH_4 = 5%).
- Σύνολο πυρόλυσης αεριοποίησης: Η συνολική παραγωγή του αερίου προϊόντος (Σχήμα 4.14), εξαρτάται σημαντικά από την ηλικία της λάσπης. Παρατηρείται μια απότομη μεταβολή από 1,34 L/gdaf (Θ_c=1 d) σε 1,2 L/gdaf (Θ_c=4d) και κατόπιν σταδιακή αύξηση έως 1,26 L/gdaf για Θ_c=30d.

  Ανάλογη μεταβολή παρατηρείται στην ενεργειακή απόδοση της πυρόλυσης-αεριοποίησης (Σχήμα 4.16). Έτσι, παρατηρείται μία ελάττωση της απόδοσης από 58% (Θ_c=1 d) σε 55% (Θ_c=4d) και κατόπιν σταδιακή αύξηση έως 61% για Θ_c=30d. Δηλαδή, αυξανομένου του Θ_c έχουμε ολοένα και μεγαλύτερη ενεργειακή αξιοποίηση του θερμιδικού περιεχομένου της ιλύος σε μία διεργασία πυρόλυσης - αεριοποίησης.

- **Ενεργειακή απόδοση της πυρόλυσης – αεριοποίησης λασπών**: Η ολοκληρωμένη ενεργειακή αξιοποίηση της ιλύος μέσω της διεργασίας πυρόλυσης – αεριοποίησης παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 4.17, όπου παρατηρούμε ότι η παραγόμενη ενέργεια ανά γραμμάριο εισερχόμενου άνθρακα στο σύστημα του βιολογικού καθαρισμού συνεχώς ελαττώνεται από 5,8 kJ/gC_{in} (Θ_c=1d) σε 3,7 kJ/gC_{in} (Θ_c=5d) και έκτοτε η παραγόμενη ενέργεια δεν επηρεάζεται από την ηλικία της λάσπης. Τα αποτελέσματα αυτά ανατρέπουν φαινομενικά τα συμπεράσματα της ενεργειακής αξιοποίησης του θερμιδικού περιεχομένου της ιλύος. Το φαινόμενο αυτό ερμηνεύεται με το ότι το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 4.16) δεν λαμβάνεται υπόψη (α) η παραγωγή της λάσπης και (β) η περιεκτικότητα ανόργανων ανά μονάδα εισαγόμενου άνθρακα στο σύστημα

- **Ολοκληρωμένη θεώρηση ενεργειακής αξιοποίησης ενός βιολογικού καθαρισμού μέσω πυρόλυσης – αεριοποίησης:** Μια ολοκληρωμένη θεώρηση της ενεργειακής αξιοποίησης της ιλύος πρέπει να περιλαμβάνει την κατανάλωση ενέργειας του βιολογικού καθαρισμού καθώς και την παραγωγή ενέργειας από την αξιοποίηση της περίσσειας ιλύος. Και οι δύο αυτοί συντελεστές εξαρτώνται σημαντικά από το Θ_c. Η κατανάλωση ενέργειας ανά γραμμάριο εισαγόμενου άνθρακα σε ένα βιολογικό καθαρισμό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.22, όπου μεταβάλλεται από 0,05 Wh/gC_{in} (Θ_c=1 d) σε 0,8 Wh/gC_{in} (Θ_c=30 d). Συνδυάζοντας με την παραγόμενη ενέργεια στην πυρόλυση – αεριοποίηση η καθαρή παραγόμενη ενέργεια σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα βιολογικού καθαρισμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.23, όπου παρατηρείται ένα θετικό ενεργειακό ισοζύγιο για Θ_c=1 d έως Θ_c=8 d και ένα αρνητικό ενεργειακό ισοζύγιο για Θ_c=8 d έως Θ_c=30d. Έτσι, για Θ_c=1 d παράγεται συνολικά καθαρή ενέργεια ισοδύναμη με 600kW/kgC_{in} ενώ για Θ_c=30 d απαιτείται μια συνολική κατανάλωση ενέργειας της τάξης των 400kW/kgC_{in}. Στο διάγραμμα αυτό γίνεται και μία εκτίμηση της παραγόμενης

ενέργειας, βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων (Horttanainen, M. et al 2010, McKendry, P. 2002) την αντίστοιχη συνολική παραγόμενη ενέργεια από την καύση της ιλύος. Στη περίπτωση αυτή φαίνεται ότι σχεδόν για κανένα Θ_c δεν προκύπτει θετικό ενεργειακό ισοζύγιο.

Ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημα της αεριοποίησης έναντι της καύσης, όπως απέδειξε αυτή η εργασία είναι το γεγονός πως η λάσπη αεριοποιείται απευθείας από την αφυδάτωση, δηλαδή, με υγρασία 70%, ενώ αντίστοιχα για την καύση της απαιτείται ξήρανση. Έτσι, ενώ η υγρασία της λάσπης αποτελεί απαραίτητο συστατικό της αεριοποίησης, και μάλιστα λαμβάνοντας επιπλέον καύσιμο υδρογόνο από την διάσπαση του νερού, στην απευθείας καύση, η οποιαδήποτε υγρασία αποτελεί ποσοστό αφαίμαξης της ολικά παραγόμενης ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο και η απευθείας καύση δεν έχει θετικό ενεργειακό.

Το τελικό συμπέρασμα των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας συνοψίζεται (α) στο ότι, από ενεργειακή άποψη συμφέρει, σε αντίθεση με την επικρατούσα άποψη, η λειτουργία των βιολογικών καθαρισμών σε όσο το δυνατόν μικρότερο Θ_c και (β) φαίνεται ότι η ενεργειακή αξιοποίηση των λασπών μέσω πυρόλυσης – αεριοποίησης έχει περισσότερα πλεονεκτήματα από την απευθείας καύση τους

Απαιτήσεις περεταίρω έρευνας

Στη παρούσα μελέτη τα πειράματα της αεριοποίησης πραγματοποιήθηκαν σε έναν εργαστηριακό αντιδραστήρα. Πιστεύουμε πως περεταίρω έρευνα χρήζει ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός νέου αεριοποιητή, ικανού να βελτιστοποιήσει την μείωση της παραγωγής του πισσούχου παραπροϊόντος κατά τη φάση της πυρόλυσης και να μεγιστοποιήσει την εκμετάλλευση της περιεχόμενης στην ιλύ υγρασία.

Βιβλιογραφία

Abbassi B, Dusllstein S & Ra¨biger N (1999) " Minimization of excess sludge production by increase of oxygen concentration in activated sludge flocs: Experimental and theoretical approach." *Water Resources*. 34(1), 139–146

Adegoroye, A. Paterson, N. Li, X. Morgan, T. Herod, A. A. Dugwell, D. R. (2004) 'The characterisation of tars produced during the gasification of sewage sludge in a spouted bed reactor' *Fuel* 83 (14-15) : 1949-1960

Akarsubasi, A.T., Eyice, O., Miskin, I, Head, I.M., Curtis, T.P. (2009) 'Effect of sludge age on the bacterial diversity of bench scale sequencing batch reactors' *Environmental Scienc and Technology* 43:2950-2956

Alvarez AE, Mochon CM, (2002) 'Sanchez JJ, Rodriguez TM. Heavy metalextractable forms in sludge from wastewater treatment plants.' *Chemosphere* 47:765–75.

Anon (2000) Working document on Sludge. 3'rd Draft. EU Commission, Brussels, 27 April, 2000

APHA Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association; Washington, D.C., 1985.

Arvelakis, S., Vourliotis, P., Kakaras, E.. Koukios, E.G. (2001) 'Effect of leaching on the ash behavior of wheat straw and olive residue during fluidized bed combustion', Biomass and Bioenergy 20 : 459–470

Aznar, M. Manya, J.J., Garcia, G., Sanchez, L.J., Murillo, M.B. (2008) 'Influence of Freeboard Temperature, Fluidization Velocity, and Particle Size on Tar Production and Composition during the Air Gasification of Sewage Sludge' *Energy & Fuels* 22: 2840-2850

Aznar, M., San Anselmo, M., Manya, J.J., Murillo, M.B. (2009) 'Experimental Study Examining the Evolution of Nitrogen Compounds during the Gasification of Dried Sewage Sludge' *Energy and Fuels* 23: 3236-3245

Baker, D. C., (1994) 'Projected Emissions of Hazardous Air Pollutants from a Shell Gasification Process – Combined-Cycle Power Plant,' Fuel, Volume 73, (7),

Balgaranova, J. (2003) 'Plasma chemical gasification of sewage sludge' *Waste Management and Research* 21(1):38-41

Biology Directory (DG III) Commission of the European Communities, 'Weight, size, and chemical composition of some freshwater zooplankters: Daphnia hyalina' Publication No. 614

Bischof, F., Hofken, M., Durst, F. (1996) "Design and construction of aeriation systems for optimum operation of large wastewater treatment plants", *Water Science and Technology,* 33 (12):189-198

Bodo Groß, B., Eder, C., Grziwa, P, Kimmerle, K. (2008) 'Energy recovery from sewage sludge by means of fluidised bed gasification', Waste Management 28 : 1819–1826

Bool LE, Helble JJ.(1995) 'A laboratory study of the partitioning of trace elements during pulverized coal combustion.' *Energy & Fuel* 9:880–7.

Bowser, T.J., Weckler, P.R., PAtil, K.N., Mireles DeWitt, C.A. (2005) 'Design and testing of a low-cost, pilot-scale batch gasifier for food processing byproducts' *Applied Engineering in Agriculture* 21 (5) : 901-906

Brandin, J., Tunér, M., Odenbrand, I. (2011) 'Small Scale Gasification: Gas Engine CHP for Biofuels', Swedish Energy Agency Report, Lund University

Bridgewater, A.V. (1996), Thermal biomass conversion and utilization – Biomass information system', European Commission, Directore – General XII, Science, Research and Development

Bridgewater, A.V. (2003) 'Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass',Chemical Engineering Journal, 91 :87-102.

Bridgewater, A.V. , Evans, G.D. (1993) 'An assessment of thermochemical conversion systems for processing biomass and refuse' *ETSU, report B/T1/00207/REP, UK*

Bridgwater A.V., Meier, D., Radlein, D., (1999) 'An overview of fast pyrolysis of biomass' *Organic Geochemistry* 30 : 1479–1493

Bridle, T.R. (1982) " Sludge derived oil: wastewater treatment implications." *Environmental Technology Letters*, 3:151–6.

Caballero JA, Front R, Marcilla A, Conesa JA. (1997) "Characterization of sewage sludges by primary and secondary pyrolysis." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,* 40–41:433–50.

Canales A, Pareilleux A, Rolls JL, Goma G & Huyard A (1994) "Decreased sludge production strategy for domestic wastewater treatment." *Water Science and Technology* 30: 96–106

Cao JP, Li LY, Morishita K, Xiao XB, Zhao XY, Wei XY, Takarada, T. (2010) 'Nitrogen transformations during fast pyrolysis of sewage sludge.' *Fuel; in press*, available on line 26 August 2010.

Carlson CE, Morrison GM. (1992) 'Fractionation and toxicity of metals in sewage sludge.' *Environmental Technology* 13:751–9.

CH2MHILL, 'Biomass-to-Energy Technology Evaluation, Final Report, prepared for City of San José Environmental Services Department', CH2MHILL, 1737 North First Street Suite 300, San Jose, CA 95112, delivered on December 2007, (www.sjrecycles.org/PDFs/Biomass-to-Energy_Final_Report_12-07.pdf)

Chandrakant, T. (1997), "Biomass Gasigication. Technology and Utilization", ARTES Institute, University of Flensburg Flensburg, Germany, http://cturare.tripod.com/bio.htm

Chen GH, An KJ, Saby S, Brois E & Djafer M (2003) "Possible cause of excess reduction in an oxic-settling-anaerobic activated sludge process (OSA process)." *Water Resourses*. 37(16), 3855–3866

Chen GH, Mo HK & Liu Y (2002) "Utilisation of metabolic uncoupler 3,3¢,4¢,5-tetrachlorosalicylanilide (TCS) to reduce sludge growth in activated sludge culture." *Water Resourses*. 36(8),2277–2283

Chun, Y.N, Mun, S.L., Kunio Y. (2012) "Characteristics of the Product from Steam Activation of Sewage Sludge." Journal of Industrial and Engineering Chemistry 18, no. 2): 839-47.

Chun, Y.N., Kim, S.C., Yoshikawa, K. (2011) 'Pyrolysis gasification of dried sewage sludge in a combined screw and rotary kiln gasifier' *Applied Energy* 88(4): 1105-1112

Chun, Y.N., Kim, S.C., Yoshikawa, K. (2012) 'System development and analysis for producing high quality gas and activated sludge char' *Journal of Mechanical Science and Technology* 26(1): 241-250

Chun, Y.N., Kim, S.C., Yoshikawa, K. (2012) 'System development and analysis for producing high quality gas and activated sludge char' *Journal of Mechanical Science and Technology* 26(1):241-250

Colbert JW, Martin RS, Manahan SE, Morris JS. (1998) 'The study of the distribution of arsenic, mercury, thorium, protactinium, uranium and neptunium under thechemchar gasification process using radionuclide tracers.' *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 230:61–70.

Commission of European Communities (2003). Council decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC (2003/33/EC)

Commission of European Communities. (1986). Council Directive 86/278/EEC of 4 July 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture.

Commission of European Communities. (1991). Council Directive 91/156/EEC of March 1991 amending Directive 75/442/EEC on waste.

Commission of European Communities. (1999). Council Directive 99/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.

Commission of the European Communities. Council Directive 91/271/EEC of 21 March 1991 concerning urban waste-water treatment (amended by 98/15/EC of 27 February 1998).

Conesa, J.A., Marcilla, A., Moral, R., Caselles, J.M., Perez-Espinosa, A. (1997) 'Evolution of gases in the primary pyrolysis of different sewage sludges' *Thermochimica Acta* 313 : 63-73

Dajnak D., Clark K.D., Lockwood F.C., Reed G. (2003) 'The prediction of mercury retention in ash from pulverized combustion of coal and sewage sludge' *Fuel 82* : 1901–1909

Davis, R.D. (1996). "The impact of EU and UK enviromental pressures on the future of sludge treatment and dispodal." *Journal CIWEM* 10:65-9

De Andrés, J.M., Narros, A., Rodríguez, M.E. (2011) 'Air-steam gasification of sewage sludge in a bubbling bed reactor: Effect of alumina as a primary catalyst' *Fuel Processing Technology* 92(3): 433-440

De Andrés, J.M., Narros, A., Rodríguez, M.E., Encarnación, M. (2011) 'Behaviour of dolomite, olivine and alumina as primary catalysts in air–steam gasification of sewage sludge' *Fuel* 90(2): 521-527

Debellefontaine H., Foussard, J.N. (1999) 'Wet air oxidation for the treatment of industrial wastes. Chemical aspects, reactor design and industrial applications in Europe' *Waste Management* 20(1):15-25

Demirbas, A., Arin, G. (2002). 'An overview of biomass pyrolysis' Energy Sources A 28:245−252

Devi L, Ptasinski KJ, Janssen FJJG. (2003) 'A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes.' *Biomass and Bioenergy* 24:125–40.

Dogru M, Midilli A, Howarth CR.(2002) 'Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis'. Fuel Process Technology,75:55–82

Domínguez, A., J. A. Menéndez, et al. (2006). "Hydrogen rich fuel gas production from the pyrolysis of wet sewage sludge at high temperature." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77(2): 127-132.

Dominguez, A., J. A. Menendez, M. Inguanzo, and J. J. Pis. (2006) "Production of Bio-Fuels by High Temperature Pyrolysis of Sewage Sludge Using Conventional and Microwave Heating.". Bioresour Technol 97, no. 10: 1185-93.

Domínguez, A., Menéndez, J. A., Inguanzo, M., Pis, J. J. (2005) 'Investigations into the characteristics of oils produced from microwave pyrolysis of sewage sludge' Fuel *Processing Technology* 86 (9): 1007-1020

Dominguez, A., Menendez, J., Inguanzo, M., Bernad, P., Pis, J (2003) 'Gas chromatographic–mass spectrometric study of the oil fractions produced by microwave-assisted pyrolysis of different sewage sludge' *Journal of Chromatography A* 1012 (2): 193-206

Dominguez, A., Y. Fernandez, B. Fidalgo, J. J. Pis, and J. A. Menendez. (2008) "Bio-Syngas Production with Low Concentrations of Co2 and Ch4 from Microwave-Induced Pyrolysis of Wet and Dried Sewage Sludge." [In eng]. Chemosphere 70, no. 3 : 397-403.

Drift A, van der Doorn J, Vermeulen JW. (2001) 'Ten residual biomass fuels for circulating fluidized bed gasification.' Biomass & Bioenergy 20:45–56.

Dupont, C., Boissonnet, G., Seiler, J.M., Gauthier, P., Schweich, D. (2007) *Fuel* 86(1-2): 32-40

Egemen E, Corpening J & Nirmalakhandan N (2001) "Evaluation of an ozonation system for reduced waste sludge generation. " *Water Science and Technology*. 44(2–3), 445–452

Ejsmont-Karabin J., Gorelysheva, Z., Kalinowska, K., WeGlenska, T., (2004) 'Role of zooplankton (ciliata, rotifera and Crustacea) in phosphorus removal from cycling: Lakes of the river Jorka watershed (Masuria Lakeland, Poland)' *Polish Journal of Ecology* 52 (3) :375-284

Elled A.L., Amand L.E., Leckner B., Andersson B.A. (2007) 'The fate of trace elements in fluidised bed combustionof sewage sludge and wood' *Fuel* 86 : 843–852

EPRI, (1998) 'Summary Report: Trace Substance Emissions from a Coal-Fired Gasification Plant', U.S. Department of Energy.

Erikkson J. (2001) "Concentrations of 61 trace elements in sewage sludge, farmyard manure, mineral fertiliser, precipitation and in oil and crops" Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences

European Commission (1999), Workshop on Problems Around Sludge, Stresa Italy, 18-19/11/99

European Commission DG Environment, (2001) " Disposal and recycling routs for sewage sludge. Part II Regulatory report." October 2001

European Commission DG Environment, (2010) " Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Final Report. Part III: Project Interim Reports." Study Contract DG ENV.G.4/ETU/2008/0076r

European Commission, EUROSTAT, Water Statistics (2011), http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Water_statistics#Further_Eurostat_information

Faaij A. (2007) 'Potential contribution of bioenergy to the world's future energy demand.' *IEA Bioenergy; ExCo*: 2007:02.

Ferrasse, J. H., C. Dumas, and N. Roche. (2011) "Experimental Results and Model for N-Gas Compound Production in Pure Steam Gasification for Wastewater Sewage Sludge." Chemical Engineering & Technology 34, no. 1: 103-10.

Fisher, T., Hajaligol, M., Waymack, B, Kellogg, D. (2002) 'Pyrolysis behavior and kinetics of biomass derived materials' *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 62 : 331–349

Folgueras MB, Dıaz MR, Xiberta J. (2004) 'Pyrolysis of blends of different types of sewage sludge with one bituminous coal.' *Energy* 30:1079–91

Font, R., Fullana, A., Conesa, J.A., Llavador, F., (2001) 'Analysis of the pyrolysis and combustion of different sewage sludges by TG' *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 58–59 : 927–941

Forstner U, Salomons W. (1980) 'Trace metal analyses on polluted sediments. Part I:evaluation of environmental impact.' *Environmental Technology Letters* 1:506–17.

Forstner U. (1993) 'Metal speciation – general concepts and applications.' *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 51:5–23.

Frandsen F, Dam-Johansen K, Rasmussen P. (1994) 'Trace elements from combustion and gasification of coal – an equilibrium approach.' *Progress in Energy and Combustion* 20:115–38.

Fuentes A, LIorens ML, Saez J, Soler A, Aguilar MI, Ortuno JF, et al. (2004) 'Phytotoxicity and heavy metals speciation of stabilised sewage sludges.' *Journal of Hazardous Materials* 108:161–9.

Fuentes A, Llorins M, Sáez J, Soler A, Aguilar MI, Ortuno JF, et al. (2004) 'Simple and sequential extractions of heavy metals from different sewage sludges.' *Chemosphere* 64:1039–47.

Fullana, A., A. Conesa, J.A., Font, R., Martin-Gullon, I. (2003) 'Pyrolysis of sewage sludge: nitrogenated compounds and pretreatment effects' *Journal of Analitical and Applied Pyrolysis* 68/69:561-575

Fytili, D., Zabaniotou A. (2008) "Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12: 116-140

Galvão, J.R., Leitão, S.A., Silva, S.M., Gaio, T.M. (2011) 'Cogeneration supply by bio-energy for a sustainable hotel building management system', Fuel Processing Technology 92: 284–289

Gascó, G., Blanco, C. G., Guerrero, F., Méndez Lázaro, A. M. (2005) 'The influence of organic matter on sewage sludge pyrolysis' *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 74(1-2): 413-420

Gerardi, M.H., (2006) 'Wastewater Bacteria' John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey

Ghyooy W & Verstraete W (2000) " Reduced sludge production in a two-stage membrane-assisted bioreactor." *Water Resources*. 34:205–215

Giona, A.R., Annesini, M.C. (1979) 'Oxygen uptake in activated sludge process' *Water Pollution Control Federation Journal* 51(5) :1009-1015

Gomez-Barea, A., Leckner, B. (2010) 'Modeling of biomass gasification in fluidized bed', Progress in Energy and Combustion Science 36 : 444–509

Gonzalez, O.I.,. Perez Pastor, R. M,. Sanchez Hervas. J. M (2011) "Assessment Uncertainty Associated to the Analysis of Tar from Gasification of Sewage Sludge." Talanta 87 : 60-6.

Gordillo, E. D., Belghit, A. (2011) 'A two phase model of high temperature steam-only gasification of biomass char in bubbling fluidized bed reactors using nuclear heat' International Journal of Hydrogen Energy 36(1): 374-381

Goyal, H. B., Diptendu, S.,Saxena, R. C. (2006), 'Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review.' *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2): 504-517

Gross, B., Eder, C., Grziwa, P., Horst, J., Kimmerle, K. (2008) 'Energy recovery from sewage sludge by means of fluidised bed gasification' *Waste Management* 28 (10) : 1819-26

Hamiltom CJ. (2000) 'Gasification as an innovative method of sewage sludge disposal.' Water and Environment Journal 14:89–93.

Han J, Kim H. (2008) 'The reduction and control technology of tar during biomass gasification /pyrolysis: an overview.; *Renewable Sustainable Energy Reviews* 12:397–416.

Hasler, P. and T. Nussbaumer (2000). "Sampling and analysis of particles and tars from biomass gasifiers." *Biomass and Bioenergy* 18: 61-66.

He YD, Zhai YB, Li CT, Yang F, Chen L, Fan XP (2010) 'The fate of Cu, Zn, Pb andCd during the pyrolysis of sewage sludge at different temperatures.' *Environmental Technology* 31:567–74.

Hein KRG, Bemtgen JM, (1998) "EU clean technology-co-combustion of coal and biomass", *Fuel Process Technology,* 54:159–69.

Higman, C., van der Burgt, M., (2003) 'Gasification', Elsevier Science (USA)

Horttanainen, M. Kaikko, J. Bergman, R. Pasila-Lehtinen, M. Nerg, J. (2010) 'Performance Analysis of Power Generating Sludge Combustion Plant and Comparison against Other Sludge Treatment Technologies', Applied Thermal Engineering, 30 (2-3): 110 - 118

Hsiau P, Lo S. (1998) 'Extractabilities of heavy metals in chemically-fixed sewage sludges.' *Journal of Hazardous Materials* 58:73–82.

Inguanzo M, Domvnguez A, Menındez JA, Blanco CG, Pis JJ. (2002) "On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid,

liquid and gas fractions." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 63:209–22.

Jensen, T.C., Anderson, T.R, Daufresne, M., Hessen, D.G., (2006) 'Does excess carbon affect respiration of the rotifer Brachionus calyciflorus Pallas?' *Freshwater Biology* 51:2320–2333

Jindarom, C., Meeyoo, V., Rirksomboon, T., Rangsunvigit, P. (2007) 'Thermochemical decomposition of sewage sludge in CO2 and N2 atmosphere' *Chemosphere* 67(8): 1477-84

Johnson JE. (1994) "Formation and reduction of nitrogen oxides in fluidised bed combustion." *Fuel* 73(9):1398–415.

Judex, J. W., Gaiffi, M., Burgbacher, H. C. (2012) 'Gasification of dried sewage sludge: status of the demonstration and the pilot plant' *Waste Management* 32(4): 719-23

Kalinci Y, Hepbasli A, Dincer I. (2009) "Biomass-based hydrogen production: a review and analysis." *International Journal of Hydrogen Energy,* 34:8799–817.

Kalinci, Y. Hepbasli, A., Dincer, I (2011) 'Exergoeconomic analysis of hydrogen production from plasma gasification of sewage sludge using specific exergy cost method' *International Journal of Hydrogen Energy* 36(17) 11408-11417

Kaminsky W, Kummer AB. (1989) "Fluidized bed pyrolysis of digested sewage sludge." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 16:27–35.

Kang, S.W, Dong, J.In, Kim, J.M., Lee, W.C., Hwang, W.G. (2011) 'Gasification and its emission characteristics for dried sewage sludge utilizing a fluidized bed gasifier' *Journal of Material Cycles and Waste Management* 13(3): 180-185

Karagiannidis, A. Samaras, P. Kasampalis, T. Perkoulidis, G. Ziogas, P. Zorpas, A. (2011) 'Evaluation of sewage sludge production and utilization in Greece in the frame of integrated energy recovery', Desalination and Water Treatment, 33: 185-193

Karayildirim T, Yanik J, Yuksel M, Bockhorn H. (2006) "Characterisation of products from pyrolysis of waste sludges." *Fuel*, 85:1498–508.

Khan MR. (1989) 'Prediction of sulfur distribution in products during low temperaturecoal pyrolysis and gasification.' *Fuel* 68:1439–9.

Khan, Y., Anderson, G.K., Elliott, D.J. (1999) 'Wet oxidation of activated sludge' *Water Research* 33(7):1681-1687

Khiari B, Marias F, Zagrouba F, Vaxelaire J. (2004) "Analytical study of the pyrolysis process in a wastewater treatment pilot station." *Desalination*, 167:39–47.

Kim, Y.. Parker, W. (2008) 'A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil' *Bioresource Technology* 99(5) : 1409-16

Kirkels, A.F., Verbong, G.P.J. (2011) 'Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview' *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 : 471–481

Knoef H, editor. (2005) 'Handbook biomass gasification.' *Enschede: BTG Biomass Technology Group*.

Knoef, H. A. M. and H. J. Koele (2000). "Survey of tar measurement protocols." *Biomass and Bioenergy* 18: 55-59.

Koichi, A. (2007) 'Length-weight relationships and chemical content of the planktonic copepods in the Cananeia Lagoon estuarine system, Sao Paulo, Brazil' *Plankton biology & ecology* 48(2):121-127

Koroneos, C., Lykidou, S., (2011) 'Equilibrium modeling for a downdraft biomass gasifier for cotton stalks biomass in comparison with experimental data' Journal of Chemical Engineering Materials Science, 4 (2) : 61-68

Kositzia, M., Pouliosa, I., Malatob, S., Caceresb, J., (2004) 'Campos, A. Solar photocatalytic treatment of synthetic municipal wastewater' *Water Research* 38 : 1147–1154

Krogmann U, Boyles LS, Bamka WJ, Chaiprapat S, Martel CJ, (1999). "Biosolids and sludge management." *Water Environment Resourses* 71(5):692–714.

Kuramochi H, Wu W, Kawamoto K. (2005) 'Prediction of the behaviors of H 2 and HClduring gasification of selected residual biomass fuels by equilibrium calculation.' *Fuel* 84:377–87.

Lake DL, Kirk PWW, Lester JN. (1984) 'Fractionation, characterization, and speciation of heavy metals in sewage sludge and sludge amended-soils: a review. *Journal of Environmental Quality* 13:175–83.

Lamacz A, Krzton A, Musi A, Da Costa P. (2009) 'Reforming of model gasification tar compounds'. Catalysis Letters,128:40–8.

Leal-Quiros, E., Villafafie, C.R. (2007) 'An Assessment of the Power Generated With Plasma Processing of Sludge From Wastewater Treatment Plants' *Plasma Science, IEEE Transactions* 35(6):1622-1627

Lech, N., Antecka A., Bedyk, T., Stolarek, P., Ledakowicz, S. (2010) "The Kinetics of Gasification of Char Derived from Sewage Sludge." Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 104, no. 2: 693-700.

Li W, Lu H, Chen H, Li B. (2005) 'The volatilization behavior of clorine in coalduring its pyrolysis and CO 2 -gasification in a fluidized bed reactor.' *Fuel* 84:1874–8.

Lin H, Ma, X., (2012) "Simulation of co-incineration of sewage sludge with municipal solid waste in a grate furnace incinerator " *Waste Management* 32(3): 561-567

Liu H, Gibbs BM. (2003) 'Modeling NH_3 and HCN emissions from biomass circulatingfluidized bed gasifiers.' *Fuel* 82:1591–604.

Lu GQ, Low JCF, Liu CY, Lua AC. (1995) "Surface area development of sewage sludge during pyrolysis." *Fuel,* 74:344–8.

Luck F., (1999) "Wet air oxidation: past, present and future" *Catalysis Today* 53 : 81-91

Lukomski, N. (2008) 'Carbon, Nitrogen and Phosphorus Stoichiometry of a Mixotrophic protist' Thesis , The University of Texas at Arlington

Lundin M., Olofsson M., Pettersson G.J., Zetterlund, H. (2004) "Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options." *Resources, Conservation and Recycling* 41: 255–278

Luo SY, Xiao B, Hu ZQ, Liu SM. (2010) "Effect of particle size on pyrolysis of singlecomponent municipal solid waste in fixed bed reactor." *International Journal of Hydrogen Energy,* 35:93–7.

Lutz H., Romeiro, G.A., Damasceno, R.N., Kutubuddin, M., Bayer E., (2000) 'Low temperature conversion of some Brazilian municipal and industrial sludges' *Bioresource Technology* 74: 103-107

Malerius O, Werther J (2003) "Modelling the adsorption of mercury in the flue gas of sewage sludge incineration" *Chemical Engineering Journal,* 96:197–205.

Malkow, T (2004) 'Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal' *Waste Management* 24(1): 53-79

Manara, P., Zabaniotou, A (2012), "Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 2566– 2582

Maniatis K. (2001) 'Progress in biomass gasification: an overview'. *In: Bridgwater AV, editor. Progress in thermochemical biomass conversion.* Oxford: Blackwell;. p. 1–32.

Manyà, J.J. Sa´nchez, L.J. Gonzalo, A. Arauzo, J. (2005) 'Air Gasification of Dried Sewage Sludge in a Fluidized Bed Effect of the Operating Conditions and In-Bed Use of Alumina' *Energy & Fuels* 19: 629-636

Manyà, J.J. Sánchez, J.L. Ábrego, J., Gonzalo, A., Arauzo, J. (2006) 'Influence of gas residence time and air ratio on the air gasification of dried sewage sludge in a bubbling fluidised bed' *Fuel* 85 (14-15): 2027-2033

Marrero T, McAuley B, Sutterlin W, Morris S, Manahan S. (2003) 'Fate of heavy metals and radioactive metals in gasification of sewage sludge.' *Waste Management* 24:193–8

Martin RS, Manahan SE, Morris JS. (1998) 'Fates of radioactive arsenic, cesium, strontium and organo-chlorine during the gasification of mixed wastes in the presence of organic matter. *Chemosphere* 37:531–40.

McCahey, S. (2003) 'Thermal Tratment of Sewage Sludge for CHP Applications', FP5 Project ENK5-CT2000-00050, University of Ulster, *European Workshop on Thermal Treatment of Sewage Sludge for CHP Applications*

McKendry, P. (2002), 'Energy production from biomass (part 2): conversion technologies', *Bioresource Technology*, 83 : 47-54

Medcalf BD, Manahan SE, Larsen DW. (1998) 'Gasification as an alternative method or the destruction of sulfur containing waste (ChemChar process).' *Waste Management* 18:197–201.

Medcalf DB, Manahan SE. (1997) 'Fate of nitrogen in nitrogen-containing compounds during cocurrent flow gasification (ChemChar process).' *Environmental Science & Technology* 31:194–7.

Menendez JA, Domvnguez A, Inguanzo M, Pis JJ.(2004) "Microwave pyrolysis of sewage sludge: analysis of the gas fraction." *Journal of Analitical and Applied Pyrolysis*, 71:657–67.

Menendez JA, Inguanzo M, Pis JJ. (2002) "Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge. " *Water Research* 36:3261–4.

Menéndez, J. A., A. Domınguez, M. Inguanzo, and J. J. Pis. (2004) "Microwave Pyrolysis of Sewage Sludge: Analysis of the Gas Fraction." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 71, no. 2: 657-67.

Menéndez, J. A., A. Domínguez, M. Inguanzo, and J. J. Pis. (2005) "Microwave-Induced Drying, Pyrolysis and Gasification (Mwdpg) of Sewage Sludge: Vitrification of the Solid Residue." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 74, no. 1-2: 406-12.

Metacalf, Eddy, editors. (1991). "Wastewater enfineering - treatment, disposal and reuse." 3rd ed. New York, USA: McGraw Hill

Metcalf & Eddy. Μηχανική υγρών αποβλήτων, Επεξεργασία & Επαναχρησιμοποίηση. Τζιόλα, 2006.

Midilli A, Dogru M, Akay G, Howarth CR. (2002) "Hydrogen production from sewage sludge via a fixed bed gasifier product gas." *International Journal of Hydrogen Energy,* 27:1035–41.

Midilli, A. Dogru, M., Howarth, C.R., Ling, M.J., Ayhan, T. (2001) 'Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier' *Energy Conversion and Management* 42: 157-172

Midilli, A., Dogru M., Howarth CR, Ling, M.J., Ayhan, T. (2001). "Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier." *Energy Conversion and Management* 42: 157-172.

Minchener, A.J., (2005) 'Coal gasification for advanced power generation', *Fuel*, 84 (17) : 2222-2235

Minimi G, Bartolo, Zuccarello RDi, Lotito V, Spinosa L, Di Pinto AC. (1997) "A design model of sewage sludge incineration plants with energy recovery". *Water Science and Technology*, 36:211–8.

Minowa, T., Kojima, T., Matsuoka, Y. (2005) 'Study for utilization of municipal residues as bioenergy resource in Japan' *Biomass and Bioenergy* 29(5): 360-366

Moersch, O., H. Spliethoff, et al. (2000). "Tar quantification with a new online analyzing method." *Biomass and Bioenergy* 18: 79-86.

Montes-Moran MA, Menendez JA, Fuente E, Suarez D. (1998) "Contribution of the basal planes to carbon basicity: an ab initio study of the H3O+–_ interaction in cluster models." *Journal of Physical Chemistry* B, 102:5595–601.

Morgan, G (2000) 'Study of the Otsego Lake zooplankton community prior to walleye (Stizostedion vitreum) stocking, summer, 2000' SUNY Oneonta Biological Field Station at Cooperstown

Mountouris, A., Voutsas, E., Tassios, D. (2008) 'Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization' *Energy Conversion and Management* 49(8):2264-2271

Moustakas K, Fatta D, Malamis S, Haralambous K, Loizidou M. (2005) 'Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment.' *Journal of Hazardous Material*s 123(1-3) 120-126.

Mueller, James A., Boyle, William C. και Pöpel, Johannes H. Aeration: Principles and Practice. Washington, D.C. : CRC PRESS, 2002.

Mun T-Y, Kang B-S, Kim J-S. (2009). "Production of a Producer Gas with High Heating Values and Less Tar from Dried Sewage Sludge through Air Gasification Using a Two-Stage Gasifier and Activated Carbon." *Energy & Fuels* 23: 3268-3276.

Murakami, T., Suzuki, Y., Nagasawa, H., Yamamoto, T., Koseki, T., Hirose, H., Okamoto, S. (2009) 'Combustion characteristics of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery' Fuel Processing Technology 90: 778-783

Murphy, J. D., McKeogh, E. (2004) 'Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste' *Renewable Energy* 29(7): 1043-1057

Murphy, J.D., McKeogh, E, (2006) "The benefits of intergrated tratment of wastes for the production of energy", *Energy*, 31 : 294-310

Nadziakiewicz, J., Kozioł, M., (2003) "Co-combustion of sludge with coal", *Applied Energy*, 75: 239-248

Nilsson, S., Gómez-Barea, A., Cano, D.F. (2012) 'Gasification reactivity of char from dried sewage sludge in a fluidized bed' *Fuel* 92(1): 346-353

Nilsson, S., Gómez-Barea, A., Cano, D.F. Ollero, P (2012) 'Gasification of biomass and waste in a staged fluidized bed gasifier: Modeling and comparison with one-stage units' *Fuel* 97 : 730-740

Nipattummakul N, Ahmed II, Kerdsuwan S, Gupta AK. (2010). "Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification." *International Journal of Hydrogen Energy* 35(21): 11738-11745.

Nipattummakul, N., Islam I. A., Somrat K., Ashwani K.G (2010) "High Temperature Steam Gasification of Wastewater Sludge." Applied Energy 87, no. 12: 3729-34.

Nowicki, L, Antecka, A. Bedyk, T., Stolarek, P., Ledakowicz, S. (2010) 'The kinetics of gasification of char derived from sewage sludge' *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 104(2): 693-700

Oesch, P., E. Lepptimtiki, et al. (1996). "Sampling and characterization of high-molecular-weight polyaromatic tar compounds formed in the pressurized fluidized-bed gasification of biomass " *Fue*l 72(12): 1406-1412.

Park ES, Kang BS, Kim JS. (2008) "Recovery of oils with high calorific value and low contaminant content by pyrolysis of digested and dried sewage sludge containing polymer flocculants." *Energy and Fuels*, 22:1335–40.

Paterson, N., Zhuo, Y., Dugwell, D. R., Kandiyoti, R. (2001) 'Investigation of Ammonia Formation during Gasification in an Air-Blown Spouted Bed Reactor Design and Initial Tests' *Energy & Fuels* 16: 127-135

Pengmei L., Zhenhong Y. , Longlong M., Chuangzhi W., Yong C., Jingxu Z (2007) 'Hydrogen-rich gas production from biomass air and oxygen/steam gasification in a downdraft gasifier' *Renewable Energy* 32(13): 2173-2185

Pérez, J.F., Melgar, A., Benjumea, P.N., (2012) 'Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study' *Fuel* 96: 487-496

Perez-Elvira, S.I., Nieto Diez P., Fdz-Polanco F. (2006) "Sludge minimization technologies." *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 5 : 375–398

Petersen, I. Werther, J. (2005) 'Experimental investigation and modeling of gasification of sewage sludge in the circulating fluidized bed' *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 44(7): 717-736

Petersen, I. Werther, J. (2005) 'Three-dimensional modeling of a circulating fluidized bed gasifier for sewage sludge' *Chemical Engineering Science* 60 (16): 4469-4484

Phuphuakrat TT, Nipattummakul N, Namioka T, Kerdsuwan S, YoshikawaK. (2010) 'Characterization of tar content in the syngas produced in a down-draft type fixed bed gasification system from dried sewage sludge.' *Fuel* 89:2278–84.

Pinto F, Andre RN, Lopes H, Dias M, Gulyurtlu I, Cabrita I. (2008) 'Effect of experimental conditions on gas quality and solids produced by sewage sludge cogasification. 2. Sewage sludge mixed with biomass.' *Energy Fuel* 22:2314–25.

Pinto F, Lopes H, Andre RN, Dias M, Gulyurtlu I, Cabrita I. (2007) 'Effect of experimentalconditions on gas quality and solids produced by sewage sludge cogasifica-tion. 1. Sewage sludge mixed with coal.' *Energy & Fuel* 21:2737–45.

Piskorz J, Scott DS, Westerberg IB. (1986) "Flash pyrolysis of sewage sludge." *Industrial & Engineering Chemical Process Design and Development*, 25:265–70.

Qixiang X., Shusheng P., Tana L. (2011) 'Reaction kinetics and producer gas compositions of steam gasification of coal and biomass blend chars, part 1: Experimental investigation' *Chemical Engineering Science* 66(10): 2141-2148

Radovic LR, Silva IF, Ume JI, Menendez JA, Leon y Leon CA, Scaroni AW. (1997) "An experimental and theoretical study of the absorption of aromatics possessing electron-withdrawing and electron-donating functional groups by chemically modified activated carbons." *Carbon*, 35:1339–49.

Raghunathan, K. and Gullett, B. K.,(1996) 'Role of Sulfur in Reducing PCDD and PCDF Formation', Environmental Science and Technology, Vol. 30.(6):1827-1834.

Reed G.P., ErguÈdenler A., Grace J.R.,. Watkinson A.P, Herod A.A., Dugwell D., Kandiyoti R. (2001) 'Control of gasifier mercury emissions in a hot gas filter: the effect of temperature' *Fuel* 80 : 623-634

Reimert, R. and Schaub, G. (1989) 'Gas Production.' In Ullman's Encylopedia of Industrial Chemistry, 5th ed., vol. A12. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, p. 215.

Rezaiyan J., Cheremisinoff N.P. (2005) 'Gasification Technologies. A Primer for Engineers and Scientists' Taylor & Francis Group

Rocher M, Roux G, Goma G, Begue AP, Louvel L & Rols JL (2001) "Excess sludge reduction in activated sludge reduction in activated sludge processes by integrating biomass alkaline heat treatment." *Water Science and Technology* 44(2–3): 437–444

Rumphorst MP, Ringel HD. (1994) "Pyrolysis of sewage sludge and use of pyrolysis coke." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 28:137-55.

Saby S, Djafer M & Chen GH (2002) "Feasibility of using a chlorination step to reduce excess sludge in activated sludge process." *Water Resourses*. 36 (3): 656–666

Saikaly, P.E., Oerther, D.B. (2004) 'Bacterial Competition in activated sludge: Tehoretical analysis of varying solids retantion time on diversity' *Microbial Ecology,* 48(2):274-284

Sato S, Lin SY, Suzuki Y, Hatano H. (2003) "Hydrogen production from heavy oil in the presence of calcium hydroxide." *Fuel*,82:561–7.

Saveyn H, Ferrasse JH, Hernandez AB, Rose J, Meeren PV, Roche N. (2010) 'The distribution of heavy metals following sewage sludge gasification.' *In: 2nd Europeanconference on sludge management ECSM.*

Saw, W., McKinnon, H., Gilmour, I., Pang, S. (2012) 'Production of hydrogen-rich syngas from steam gasification of blend of biosolids and wood using a dual fluidised bed gasifier' *Fuel* 93 : 473-478

Schmid, J.C., Wolfesberger, U., Koppatz, S., Pfeifer, C., Hofbauer, H. (2012) 'Variation of feedstock in a dual fluidized bed steam gasifier-influence on product gas, tar content, and composition' *Environmental Progress & Sustainable Energy* 31(2): 205-215

Schuster, G., Loffler, G., Weigl, K., Hofbauer, H., (2001) 'Biomass steam gasification – an extensive parametric modeling study' *Bioresource Technology* 77: 71-79

Scott, S. A., Davidson, J. F., Dennis, J. S., Fennell, P. S., Hayhurst, A. N. (2005) 'The rate of gasification by CO2 of chars from waste' *Proceedings of the Combustion Institute* 30(2): 2151-2159

Scott, S. A., Davidson, J. F., Dennis, J. S., Hayhurst, A. N. (2007) 'The devolatilisation of particles of a complex fuel (dried sewage sludge) in a fluidised bed' *Chemical Engineering Science* 62(1-2): 584-598

Seggiani, M. Puccini, M. Raggio, G. Vitolo, S. (2012) 'Effect of sewage sludge content on gas quality and solid residues produced by cogasification in an updraft gasifier.' *Waste Management* Article in Press , http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.018

Seggiani, M. Vitolo, S. Puccini, M. Bellini, A. (2012) 'Cogasification of sewage sludge in an updraft gasifier' *Fuel* 93: 486-491

Seok-Pyo H., Dong, J.I., Yeo, S.K., Park, I.H., Chung, M.S., Kim, D.I., Park. Y.K. (2011) "Reduction of Tar Using Cheap Catalysts During Sewage Sludge Gasification." Journal of Material Cycles and Waste Management 13, no. 3: 186-89.

Shao JA, Yan R, Chen HP, Wang BW, Lee DH, Liang DT. (2008) 'Pyrolysis characteristics and kinetics of sewage sludge by thermogravimetry Fourier transform infrared analysis'. Energy & Fuel, 22:38–45.

Shen L, Zhang DK. (2003) "An experimental study of oil recovery from sewage sludge by low-temperature pyrolysis in a fluidized-bed." *Fuel*, 82:465–72.

Shinogi Y, Kanri Y. (2003) "Pyrolysis of plant, animal and human waste: physical and chemical characterization of pyrolytic products." *Bioresource Technology*, 90:241–7.

Simell, P., P. Stahlberg, et al. (2000). "Provisional protocol for the sampling and anlaysis of tar and particulates in the gas from large-scale biomass gasifiers. Version 1998." *Biomass and Bioenergy* 18: 19-38.

Smith, S. (1996). "Agricultural recycling of sewage sludge and the Environment" ,Cab International.

Stammbach MR, Kraaz B, l Hagenbucher R, Richarz W. (1989) "Pyrolysis of sewage sludge in a fluidised bed." *Energy and Fuels*, 3:255–9.

Stassen, H.E. (1995) 'Small scale biomass gasifiers for heat and power: A global review' *Energy Series, World Bank Technical Paper,* no. WTP 296

Su DC, Wong JWC. (2003) 'Chemical speciation and phytoavailability of Zn, Cu, Ni and Cd in soil amended with fly ash-stabilized sewage sludge.' *Environmental International* 29:895–900.[114]

Tack F, Vossius H, Verloo M. (1996) 'A comparison between sediment metal fractions, obtained from sequential extraction and estimated from single extraction.' *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 63:61–6

Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. (1979) 'Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals.' *Analytical Chemistry* 51:844–51.

Thipkhunthod, P. Meeyoo, V., Rangsunvigit, P., Kitiyanan, B., Rirksomboon, T. Siemanond, K. (2006) 'Pyrolytic characteristics of sewage sludge' *Chemosphere* 64(6): 955-62

Tian FJ, Li BQ, Chen Y, Li CZ. (2002) 'Formation of NOx precursors during the pyrolysis of coal and biomass. Part V. Pyrolysis of sewage sludge.' *Fuel* 81:2203–8.

Toledo, J.M., Corella, J., Corella L.M., (2005) "The partitioning of heavy metals in incineration of sludges and waste in a bubbling fluidized bed 2. Interpretation of results with a conceptual model ", Journal og Hazardous Materials, B126: 158-168

U.S. Department of Energy (DoE), (2005) National Energy Technology Laboratory (NETL). 'Gasification, current industry perspective, robust growth forecast'. World Survey Results 2004. NETL;. 2005

U.S. Department of Energy (DoE), (2000) National Energy Technology Laboratory (NETL). 'Gasification, worldwide use and acceptance.' SFA Pacific; 2000

U.S. Department of Energy (DoE), (2007) National Energy Technology Laboratory (NETL). 'Gasification world database 2007, current industry status.' Robust Growth Forecast. : NETL; 2007.

U.S. Department of Energy (DoE), (2007) National Energy Technology Laboratory (NETL). 'Gasification – Gasification database' [Exces XLS file]. NETL, the ENERGYlab. [Online] September 2007. http://www.netl.doe.gov/technologies/coal-power/ gasification /database/database.html.

Umeki, K., Roh, S. A., Min, T. J., Namioka, T., Yoshikawa, K. (2010) 'A simple expression for the apparent reaction rate of large wood char gasification with steam' *Bioresource Technology* 101(11): 4187-92

Urban, D. L., Antal, M. J. (1981) 'A study of the kinetics of sewage sludge pyrolysis using DSC and TGA' Tecnhical Report, Biofuels Information Center, Department of Mechanical Engineering, Aerospace Engineering, Princeton Univercity

Van Den Berg, J.J. (1993). "Effects of sewage sludge disposal" *Land Degradation & Rehabilitation* 4: 407-413

van Paasen, S. V. B., J. H. A. Kiel, et al. (2002). "Guideline of Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases " Final report documenting the Guideline, R&D work and dissemination

Vesilind PA, Ramsey TB (1996). Effect of drying temperature on the fuel value of wastewater sludge. *Wastewater Management and Research,* 14: 189–196.

Vieira J, Silve H, Domingues H, Mesquita M. (1993) 'Sequential extraction of copperand zinc from sewage sludge. Use of organic solvents.' *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 51:109–12.

Vlyssides A., Mai S., Barampouti E.M., Moutsatsou A. (2007) "Thermal processing of sewage sludge from Psittalia Greece ", *3rd International Symposium Sustainability in Cement and Concrete, 21-23 May 2007, Istanbul, Turkey*

Wang, Y., Yan, L. (2009) 'CFD based combustion model for sewage sludge gasification in a fluidized bed' *Frontiers of Chemical Engineering in China* 3(2): 138-145

Werther J, Ogada T. (1999) "Sewage sludge combustion". *Progress in Energy and Combustion Science*, 25:55–116.

Yan, F., Luo, S. Y.,Hu, Z. Q., Xiao, B., Cheng, G. (2010), 'Hydrogen-rich gas production by steam gasification of char from biomass fast pyrolysis in a fixed-bed reactor: influence of temperature and steam on hydrogen yield and syngas composition' *Bioresource Technology* 101 (14): 5633-7

Zhang, B., S. Xiong, et al. (2011). "Mechanism of wet sewage sludge pyrolysis in a tubular furnace." *International Journal of Hydrogen Energy* 36(1): 355-363.

Zhiqiang C., Wen, Q., Wang, J., Li, F. (2006) 'Simultaneous removal of carbon and nitrogen from municipal-type synthetic wastewater using net-like rotating biological contactor (NRBC)' *Process Biochemistry* 41:2468–2472,

Zhou J, Masutani SM, Ishimura DM, Turn SQ, Kinoshita CM. (2000) 'Release of fuel-bound nitrogen during biomass gasification.' *Industrial & Engineering Chemistry Research* 39:626–34.

Zorpas, A. A., Kapetanios, E., Zorpas, A. G., Karlis, P. Vlyssides, A., Haralambous, I. and Loizidou, M. (2000) "Compost produced from organic fraction of municipal solid waste, primary stabilized sewage sludge and natural zeolite", *Journal of Hazardous Materials*, B77: 149-159

Zufiaurre R, Olivar A, Chamorro P, Nerin C, Callizo A. (1998) 'Speciation of metals in sewage sludge for agricultural uses.' *Analyst* 123:255–9.[113]

Αγγελάκης Α. κ.α. 'Εναλλακτικοί Τρόποι Διαχείρισης των Παραπροϊόντων από Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Αστικών Λυμάτων', ΤΕΕ, 2005

Ανδρουτσόπουλος, Γ. (2004) 'Παραγωγή Υδρογόνου από Στερεά Καύσιμα (Αεριοποίηση)' Σεμινάριο κατάρτισης: «Παραγωγή Υδρογόνου από Συμβατικά Καύσιμα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Πάτρα 3-11 Μαΐου 2004

Βάμβουκα Δ. (2002) 'Αντιρυπογόνος Χρήσις Γαιανθράκων - Τεχνολογίες Αξιοποίησης Γαιανθράκων Χαμηλής Τάξης', Εκδόσεις ΙΩΝ.

Βλυσίδης, Α. (2004) "Αναερόβια χώνευση βιολογικών λασπών" Εσωτερικές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Βλυσίδης, Α. (2004) "Σχεδιασμός βιολογικών Καθαρισμών" Εσωτερικές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Βλυσίδης, Α. (2009) 'Συστήματα αερισμού σε μονάδες βιολογικών καθαρισμών' . Εσωτερικές Εκδόσεις ΕΜΠ.

Δημόσια διαβούλευση επί σχεδίου ΚΥΑ με θέμα «Μέτρα, όροι και διαδικασίες για τη χρησιμοποίηση της ιλύος που προέρχεται από επεξεργασία οικιακών και αστικών λυμάτων καθώς και ορισμένων υγρών αποβλήτων, σε συμμόρφωση προς τις διατάξεις της οδηγίας 86/278/ΕΟΚ του Συμβουλίου των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων. Αντικατάσταση της 80568/4225/1991 (Β΄641) κοινής Υπουργικής απόφασης http://www.opengov.gr/minenv/?p=3354 (16-01-2012)

Κάρτσωνας, Ν., (2005) "Εναλλακτικοί Τρόποι Διαχείρισης Παραπροϊόντων Επεξεργασίας από Μικρές Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων", *ΤΕΕ, Καρδίτσα 14-15/10/05*

Μάη, Σ. (2006) 'Επίδραση ιόντων δισθενούς σιδήρου στην λειτουργία ενός αναερόβιου χωνευτήρα τύπου UASB αναερόβιας χώνευσης υγρών βιομηχανικών αποβλήτων' *Διδακτορική Διατριβή*

Μπαραμπούτη, Ε.Μ. (2006) 'Αξιοποίηση του CO_2 του βιοαερίου, με προσθήκη cao, στην λειτουργιά ενός αναερόβιου χωνευτήρα τύπου UASB' *Διδακτορική Διατριβή*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

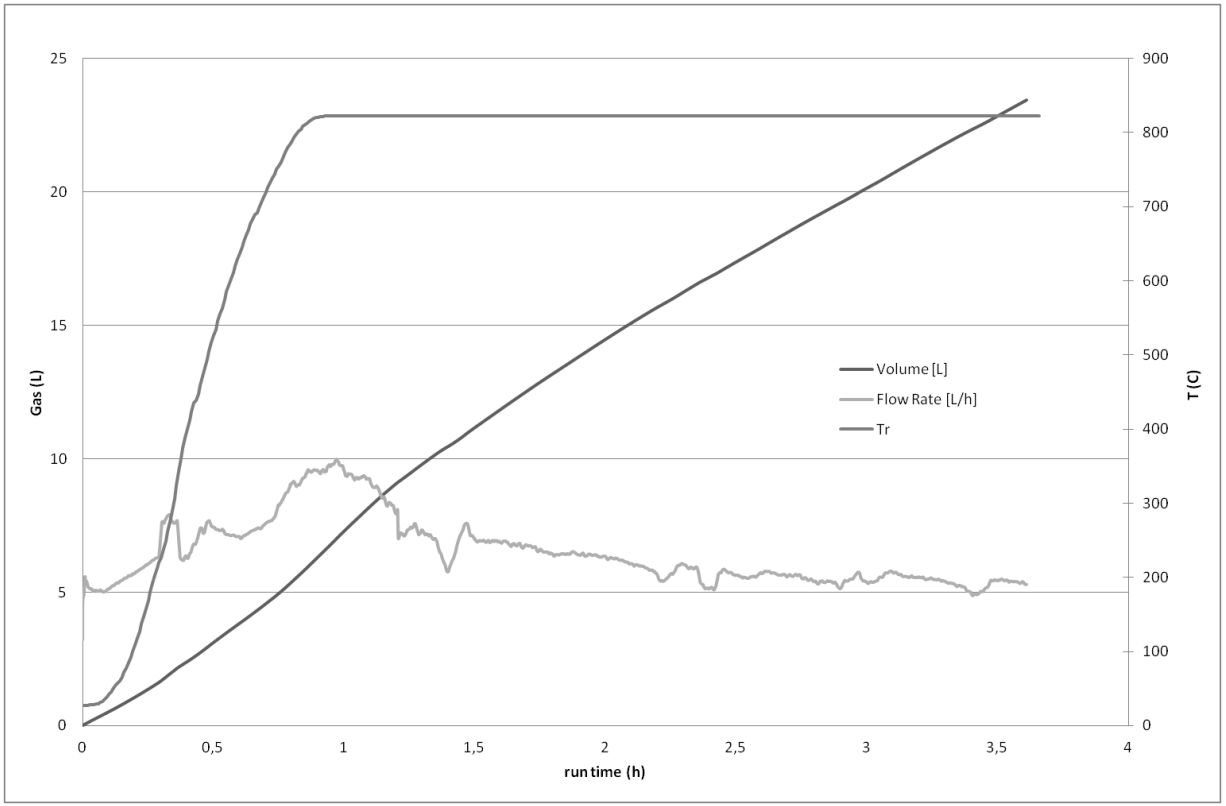
Σε αυτό το Παράρτημα παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραμάτων αεριοποίησης των ιλύων που παρήχθησαν από τους εργαστηριακούς βιοαντιδραστήρες για τα δεδομένα Θc.

Για κάθε Θc πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα αεριοποίησης, για τα δύο μίγματα ιλύων που προέκυψαν – M-1, M-2.

Σε κάθε πείραμα Θc=X, M-i, παρατίθενται:

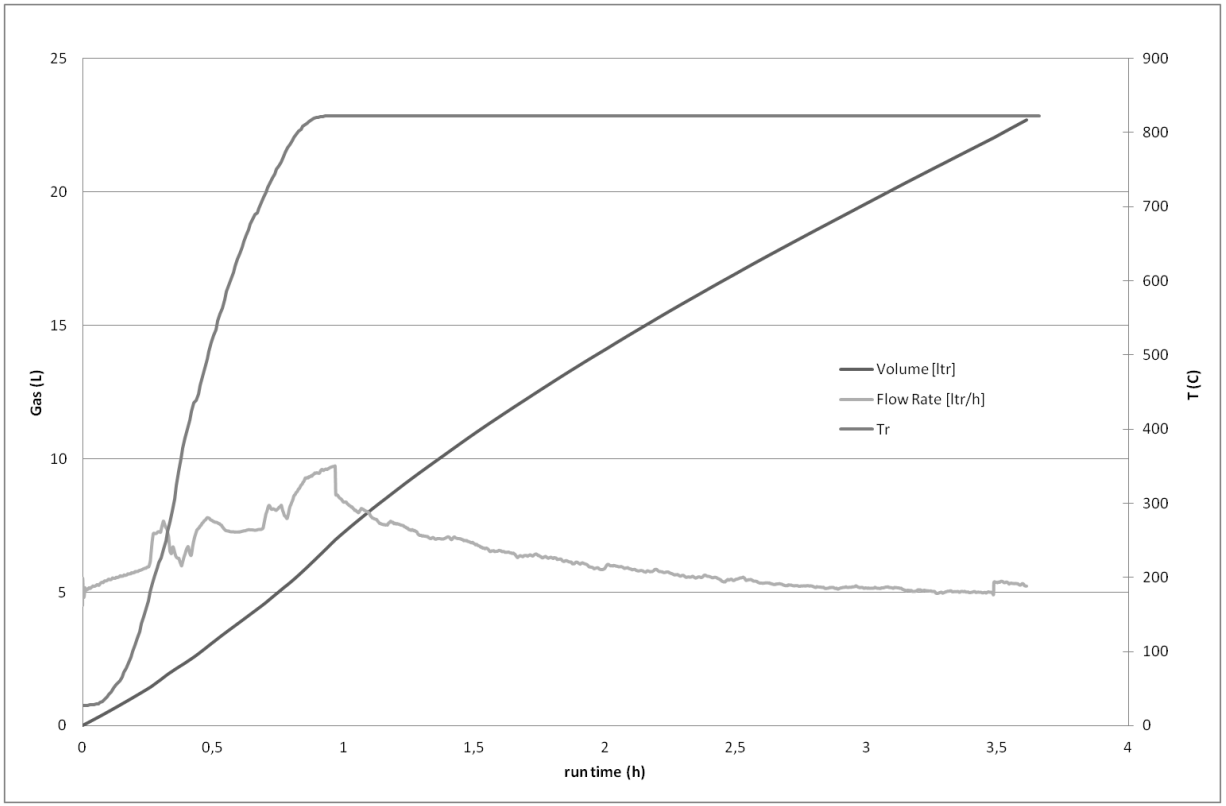
1. το διάγραμμα της χρονικής εξέλιξης του πειράματος, όπου διακρίνεται η καμπύλη θερμοκρασίας (T_r), η καμπύλη στιγμιαίας παραγωγής αερίου προϊόντος (Flow Rate) και η καμπύλη του συνολικού όγκου αερίου (Volume).
2. Ο πίνακας με την ανάλυση της σύστασης των αερίων δειγμάτων

Πείραμα ιλύος Θc1-M1



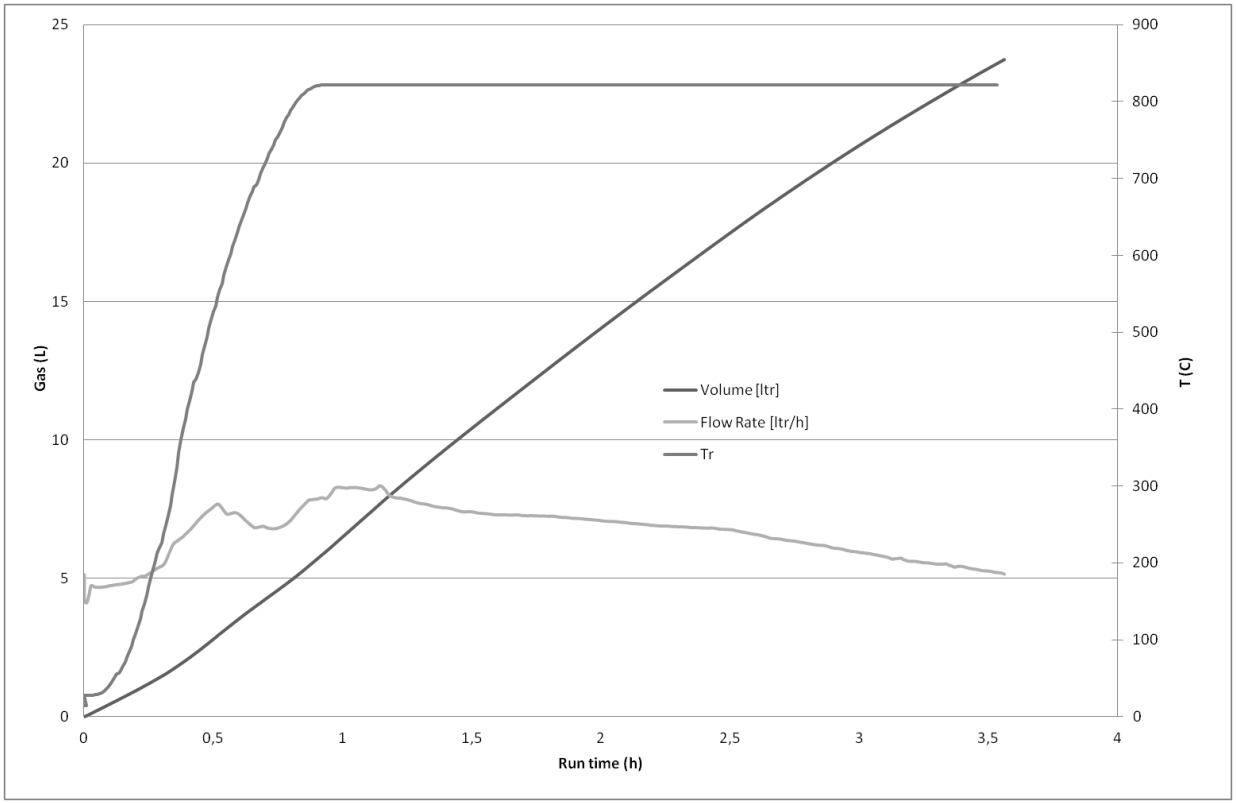
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,4	8	13,1	27,9	28,4	24,5	21,2	17,2	14,2	8,9	2,5
N	93,6	68,1	67,3	52,4	56,9	63,2	67,3	74,2	80,1	86,4	96,2
O	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CO	0,5	2,7	2,2	4,5	3,2	2,7	2,6	2,1	1,4	1,2	0,2
CH4	1,2	3,7	1,1	0,6	0,3	0	0	0	0	0	
CO2	0,4	8	13,1	27,9	28,4	24,5	21,2	17,2	14,2	8,9	2,5
Πίσσες (g)	0,999				Στερεό υπόλειμμα (g)					0,38	

Πείραμα ιλύος Θc1-M2



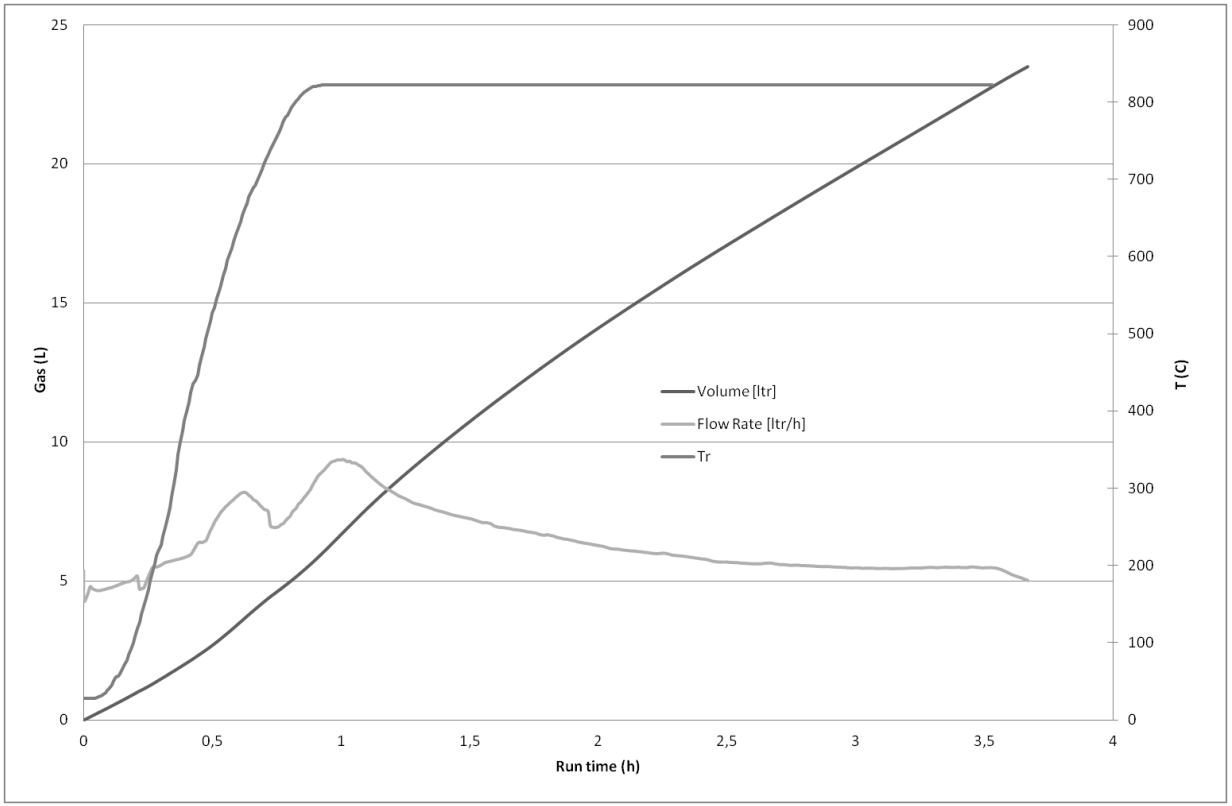
Αέρια (%κ.ό)											
H2	0,5	8,9	13,8	27,9	28,5	24,9	20,6	17,9	14,9	8,3	2,4
N	93,4	67,9	65,9	52,8	56,2	62,4	68,3	73,2	78,8	87,5	96,2
O	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0,5	2,4	2,6	4,1	3,4	2,6	2,4	2,1	1,4	0,9	0,3
CH4	1,3	3,9	1,8	0,4	0,1	0	0	0	0	0	0
CO2	4,2	16,9	15,9	14,8	11,8	10,1	8,7	6,8	4,9	3,3	1,1
Πίσσες (g)	0,997				Στερεό υπόλειμμα (g)						0,38

Πείραμα ιλύος Θc2-M1



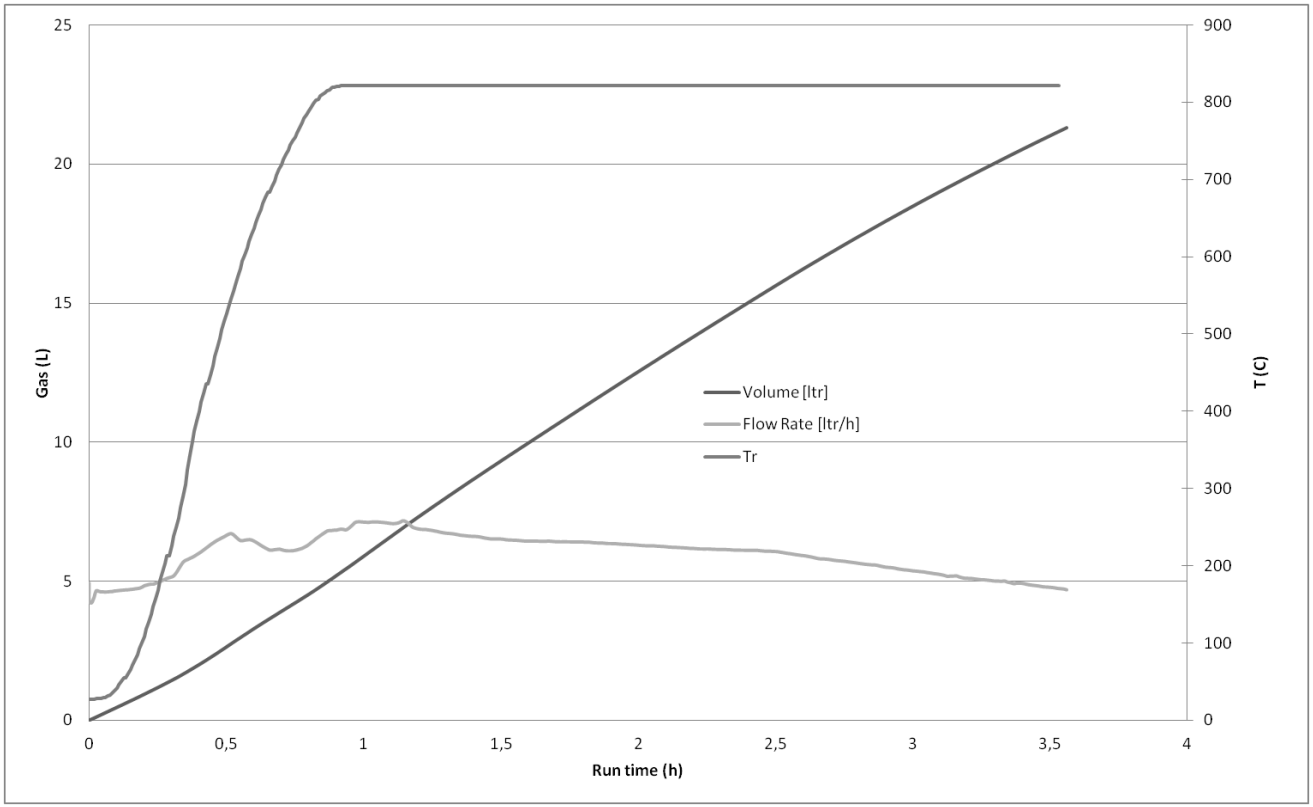
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,3	27,9	30,8	31,9	27,9	19,2	13,1	9,3	6,2	4,9	1,8
N	77,9	54,7	52,1	53,2	61,4	73,6	82,2	87	91,3	93,7	97,3
O	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CO	3	3,9	4,8	3,9	3,1	1,6	1,2	0,8	0,4	0,3	0,3
CH4	2,4	2,6	1,1	0,2	0	0	0	0	0		
CO2	13,5	10,9	11,2	10,8	7,6	5,6	3,5	2,9	2,1	1,1	0,6
Πίσσες (g)	1,036				Στερεό υπόλειμμα (g)			0,469			

Πείραμα ιλύος Θc2-M2



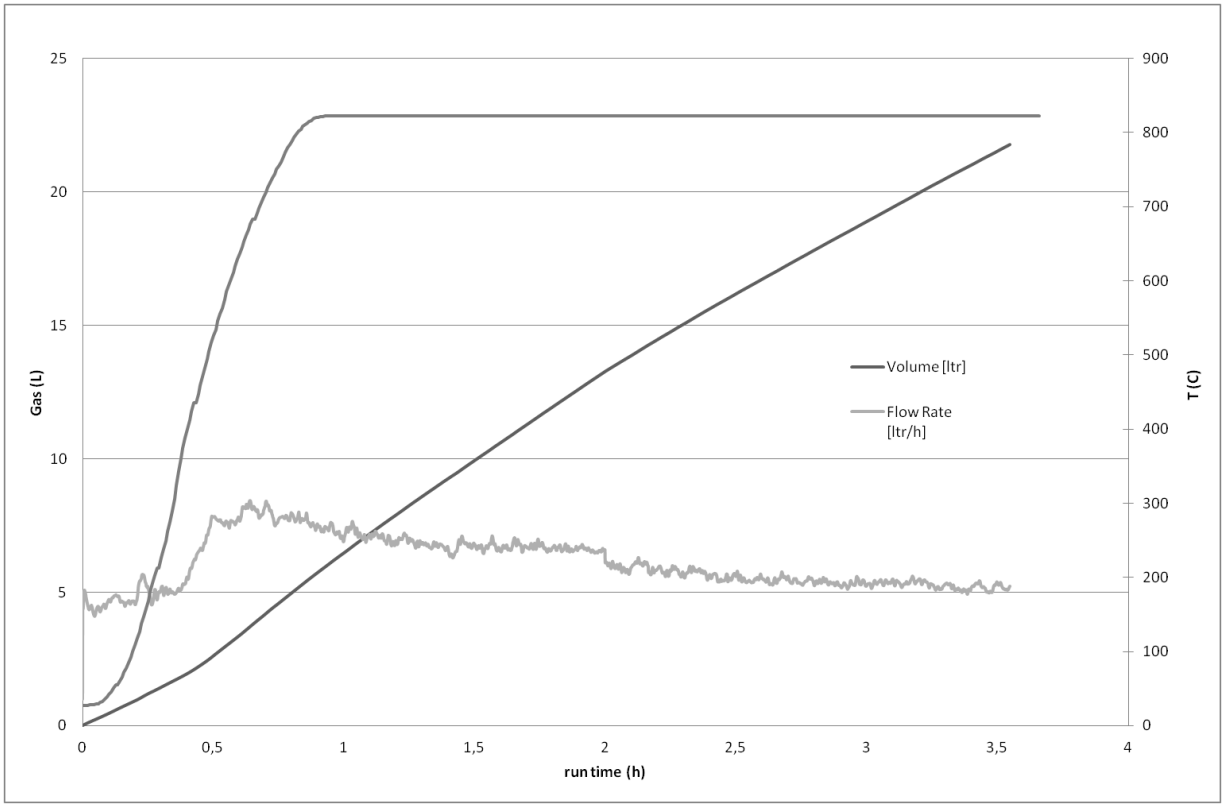
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,4	27,8	30,8	31,7	27	19,4	12,9	9,5	6,1	5,1	1,9
N	78	54,6	52,3	54,1	62,4	74,1	82,6	87,2	91,6	93,5	97,2
O	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CO	3	3,9	4,6	3,9	2,8	1,3	1,1	0,6	0,5	0,5	0,3
CH4	2,1	2,8	0,8	0,3	0	0	0	0	0		
CO2	13,5	10,9	11,5	10	7,8	5,2	3,4	2,7	1,8	0,9	0,6
Πίσσες (g)	1,034				Στερεό υπόλειμμα (g)				0,469		

Πείραμα ιλύος Θc3-M1



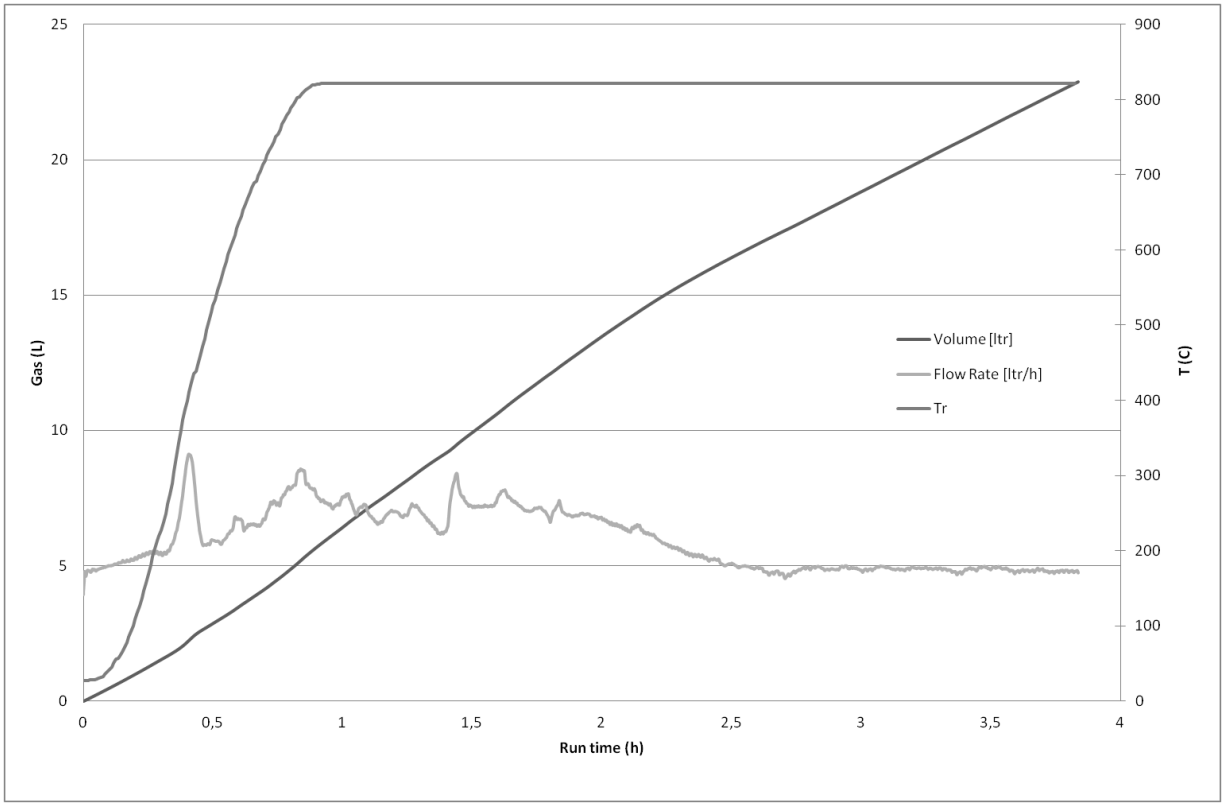
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,3	28,1	30,8	31,9	28,6	20,2	15,6	10,3	7,8	5,9	3,3
N	81,8	52,3	50,7	52,5	59,2	71	78,8	86,1	89,8	92,8	95,9
O	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	3	4,1	5,6	4,2	3,6	2,1	1,3	0,7	0,3	0,2	0,2
CH4	2,4	2,6	1,1	0,2	0	0	0	0	0	0	0
CO2	9,6	12,9	11,8	11,2	8,6	6,7	4,3	2,9	2,1	1,1	0,6
Πίσσες (g)	1,02				Στερεό υπόλειμμα (g)			0,551			

Πείραμα ιλύος Θc3-M2



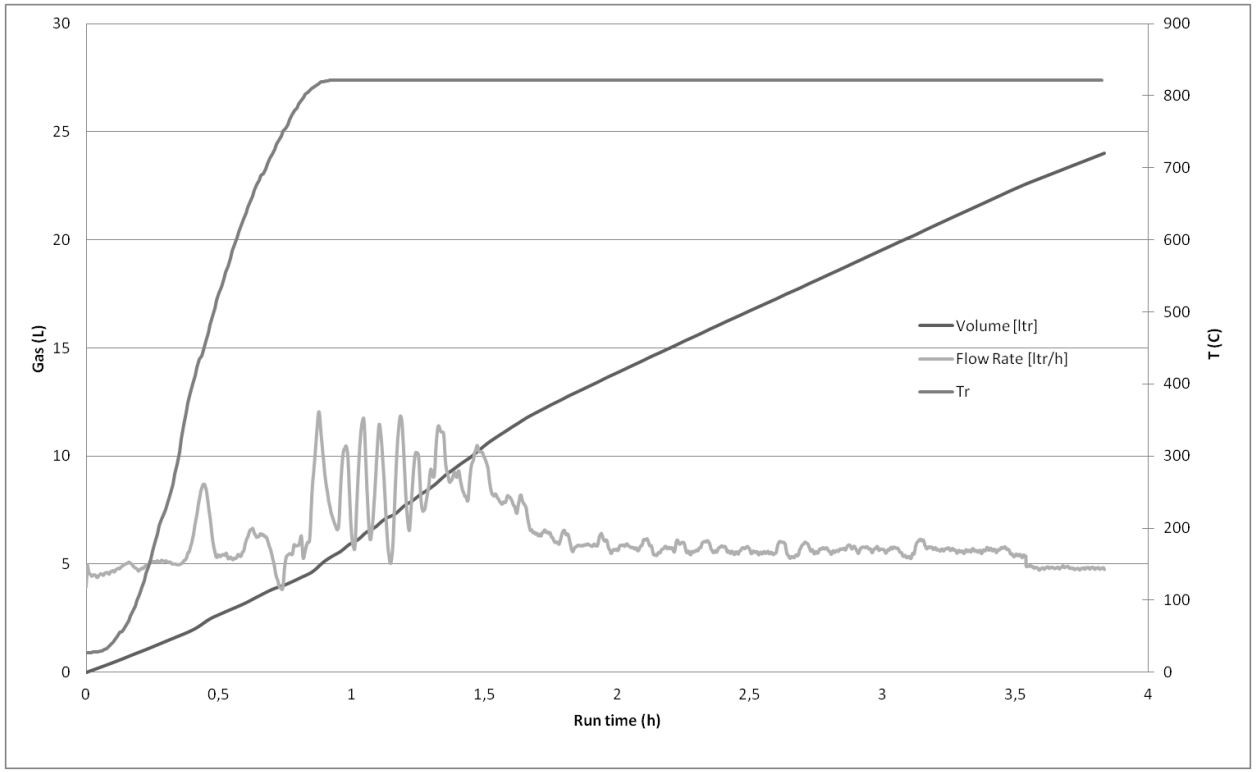
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,7	9,6	26,5	28,8	26,1	19,9	18,1	15,1	9,1	3,2	0,7
N	93,8	77,8	55,9	56,5	62,1	69,5	72,9	77,5	87,6	94,6	93,8
O	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7
CO	0,5	1,9	4,5	4,3	3,6	2,9	2,6	2	1,1	0,7	0,5
CH4	0	2,1	1,9	0,5	0	0	0	0	0	0	0
CO2	4,3	8,6	11,2	9,9	8,2	7,7	6,4	5,4	2,2	1,5	4,3
Πίσσες (g)	1,019				Στερεό υπόλειμμα (g)				0,552		

Πείραμα ιλύος Θc4-M1



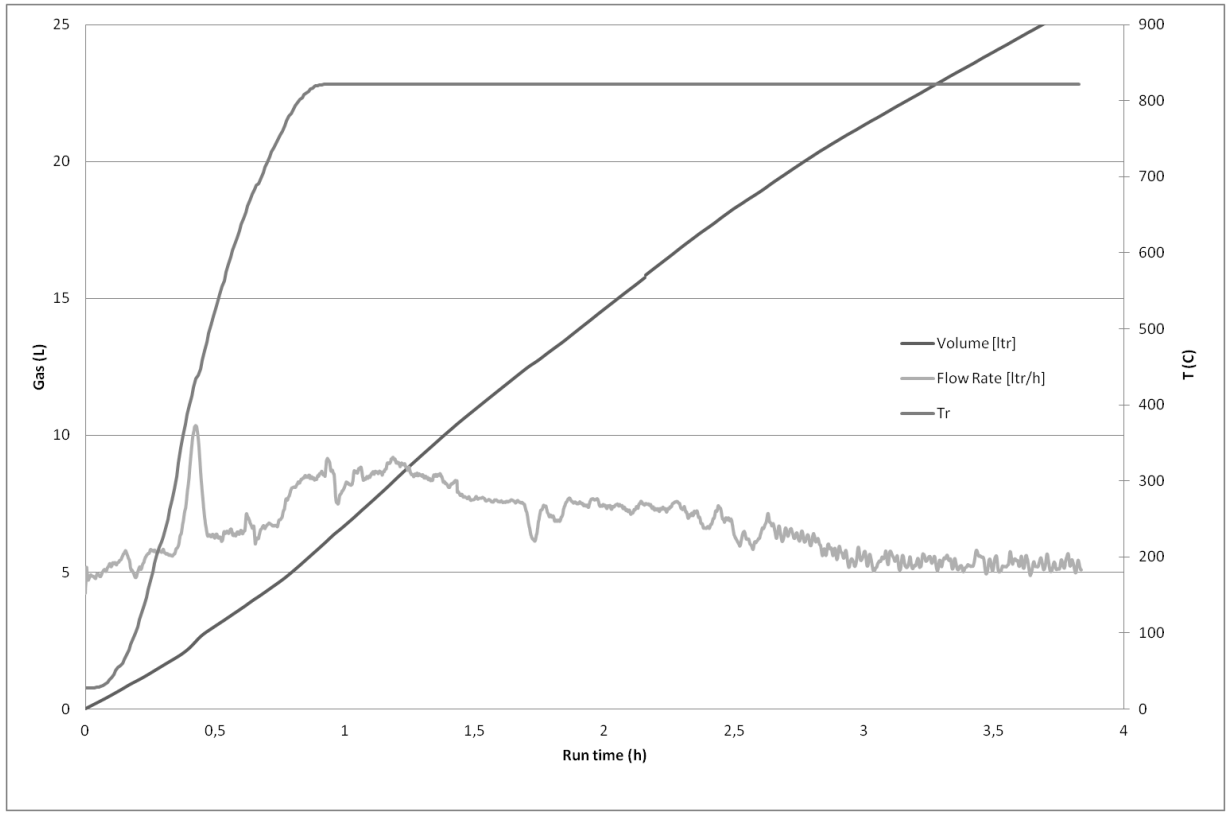
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,2	14,7	28,2	30,1	27,3	18,3	16,2	12,5	9,8	5,5	2,3
N	92,2	60,5	52,3	55,1	59,9	72,4	77,9	82,9	87,4	92,6	96,8
O	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	2	3,4	4,2	3,8	3,4	2,5	1,1	0,7	0,4	0,3	0
CH4	0	3,2	2	0,8	0,7	0	0	0	0	0	0
CO2	4,8	18,2	13,3	10,2	8,7	6,8	4,8	3,9	2,4	1,6	0,9
Πίσσες (g)	0,997				Στερεό υπόλειμμα (g)				0,628		

Πείραμα ιλύος Θc4-M2



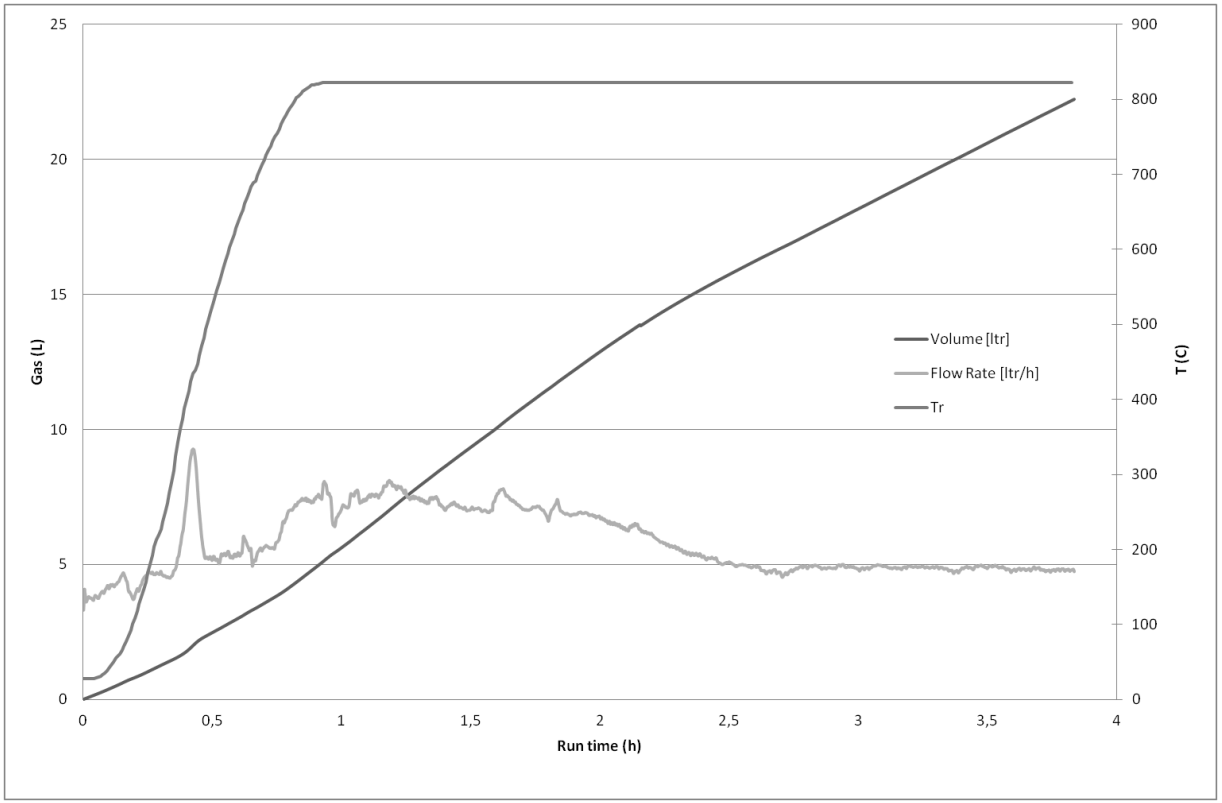
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,3	12,6	26,9	29,6	24,6	15,9	13,7	10,2	7,1	5,1	1,9
N	92,1	63	55	56,6	65,1	75,8	80,4	85,2	90,1	93	97,2
O	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	2	3,1	3,9	3,1	2,9	2,5	1,1	0,7	0,4	0,3	0
CH4	0	3,1	1,9	0,8	0,7	0	0	0	0	0	0
CO2	4,8	18,2	12,3	9,9	6,7	5,8	4,8	3,9	2,4	1,6	0,9
Πίσσες (g)	0,996				Στερεό υπόλειμμα (g)					0,628	

Πείραμα ιλύος Θc5-M1



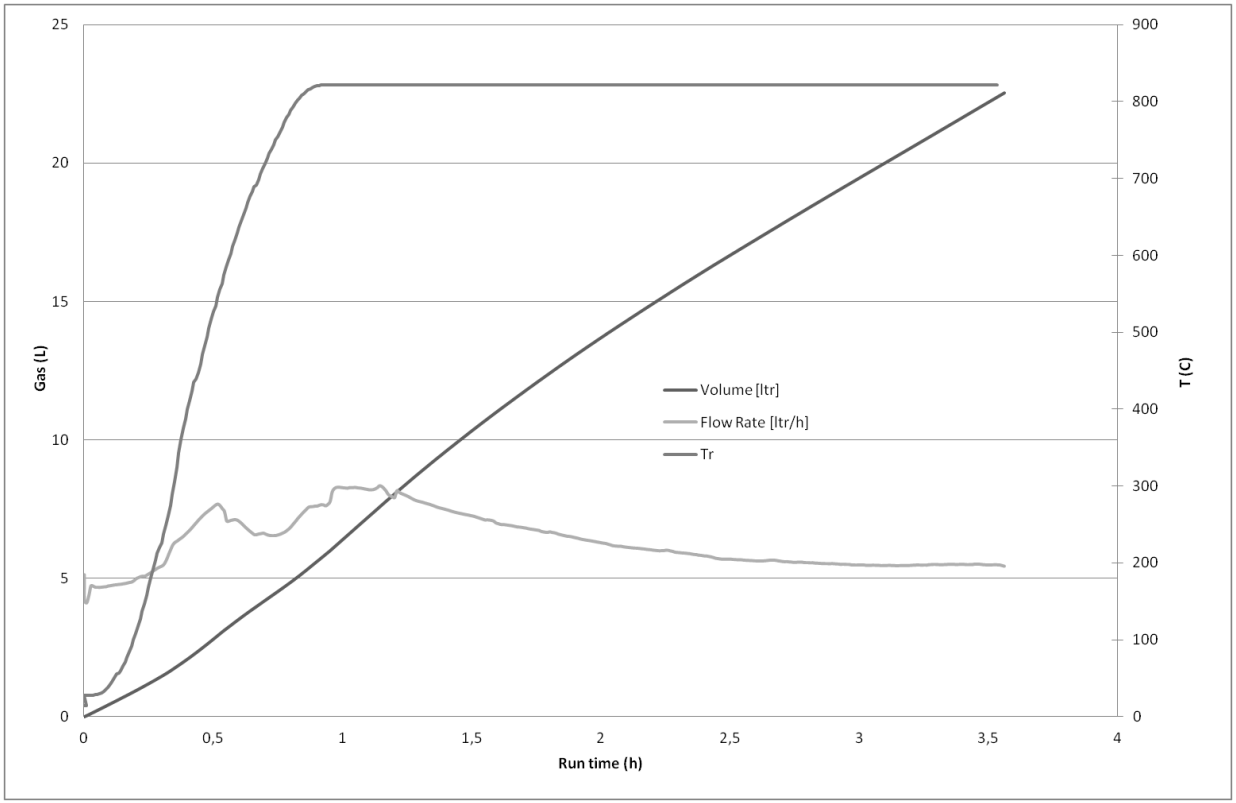
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,6	13,2	28,1	31,1	25,8	16,1	15,3	11,1	8,2	5,5	2,1
N	92,6	65	54,5	56,5	64,4	76,1	78,3	84,3	89,3	92,4	97
O	0,6	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	1,9	3,6	4,5	3,2	2,9	2,6	1,9	1,2	0,6	0,5	0,1
CH4	0,5	2,9	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	3,8	15,2	12,1	9,2	6,9	5,2	4,5	3,4	1,9	1,6	0,8
Πίσσες (g)	0,995				Στερεό υπόλειμμα (g)			0,597			

Πείραμα ιλύος Θc5-M2



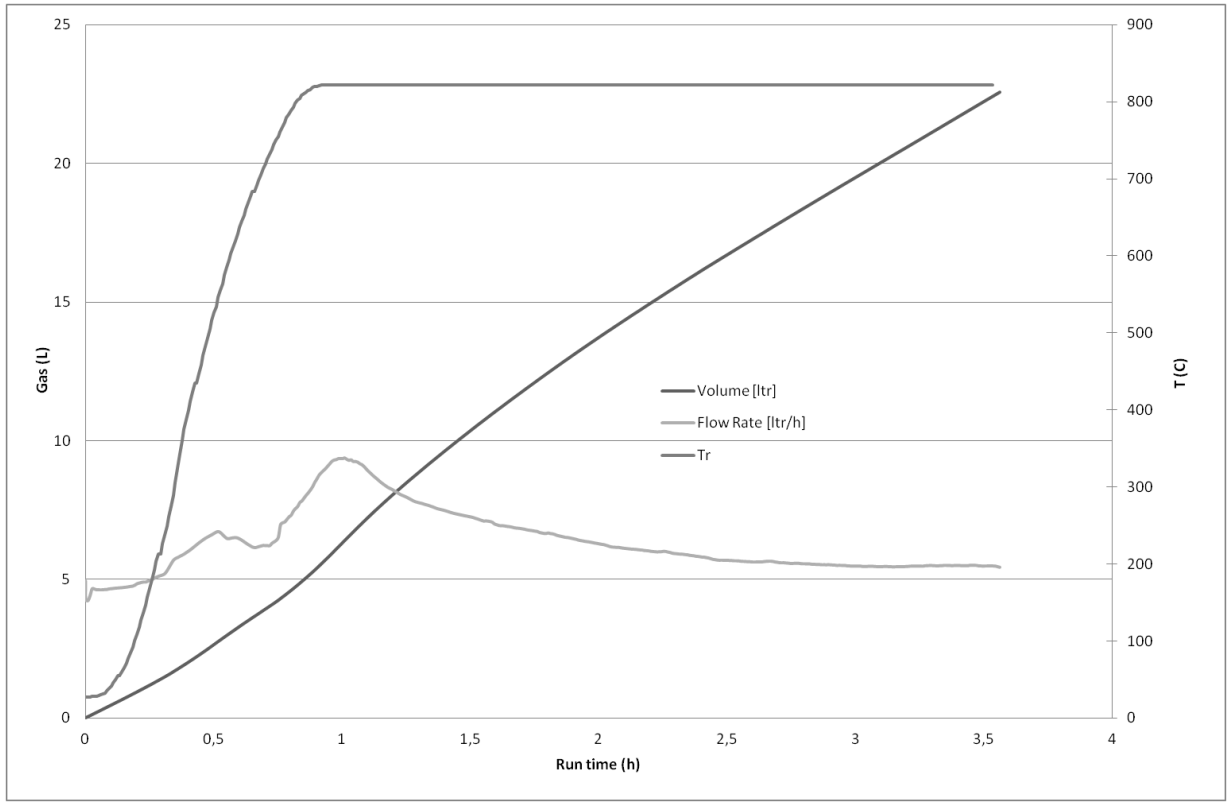
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,5	18,5	28,9	31,5	30,9	28,2	19,3	15,5	8,6	6,3	2,5
N	92,4	56,2	50,4	53,1	56,9	62,5	74,3	79,7	88,4	91,8	96,7
O	0,1	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	2,2	3,1	3,9	3,1	2,9	2,5	1,1	0,7	0,4	0,3	0
CH4	0	3,1	1,9	0,8	0,7	0	0	0	0	0	0
CO2	4,8	18,9	14,9	11,5	8,6	6,8	5,3	4,1	2,6	1,6	0,8
Πίσσες (g)	0,995				Στερεό υπόλειμμα (g)			0,598			

Πείραμα ιλύος Θc6-M1



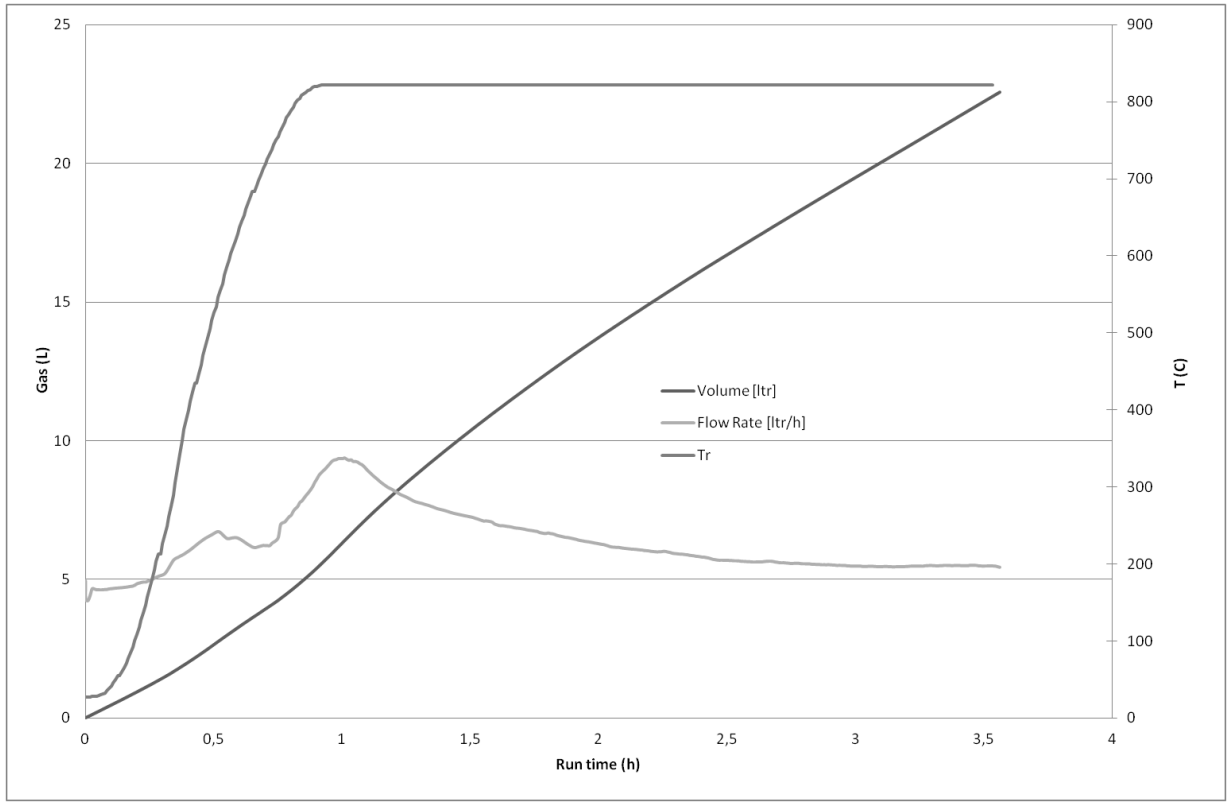
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,2	27,6	31,9	31,8	27,8	21,3	15,6	8,8	6,2	4,9	2,1
N	87,3	53,9	47,7	53,4	61,6	72,3	79,8	87,9	91,5	93,7	97
O	0,9	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	2,5	3,9	4,6	3,9	2,8	1,3	1,1	0,6	0,5	0,5	0,3
CH4	0,6	3,4	1,1	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	6,5	11,1	14,6	10,9	7,8	5,1	3,5	2,7	1,8	0,9	0,6
Πίσσες (g)	0,929				Στερεό υπόλειμμα (g)			0,764			

Πείραμα ιλύος Θc6-M2



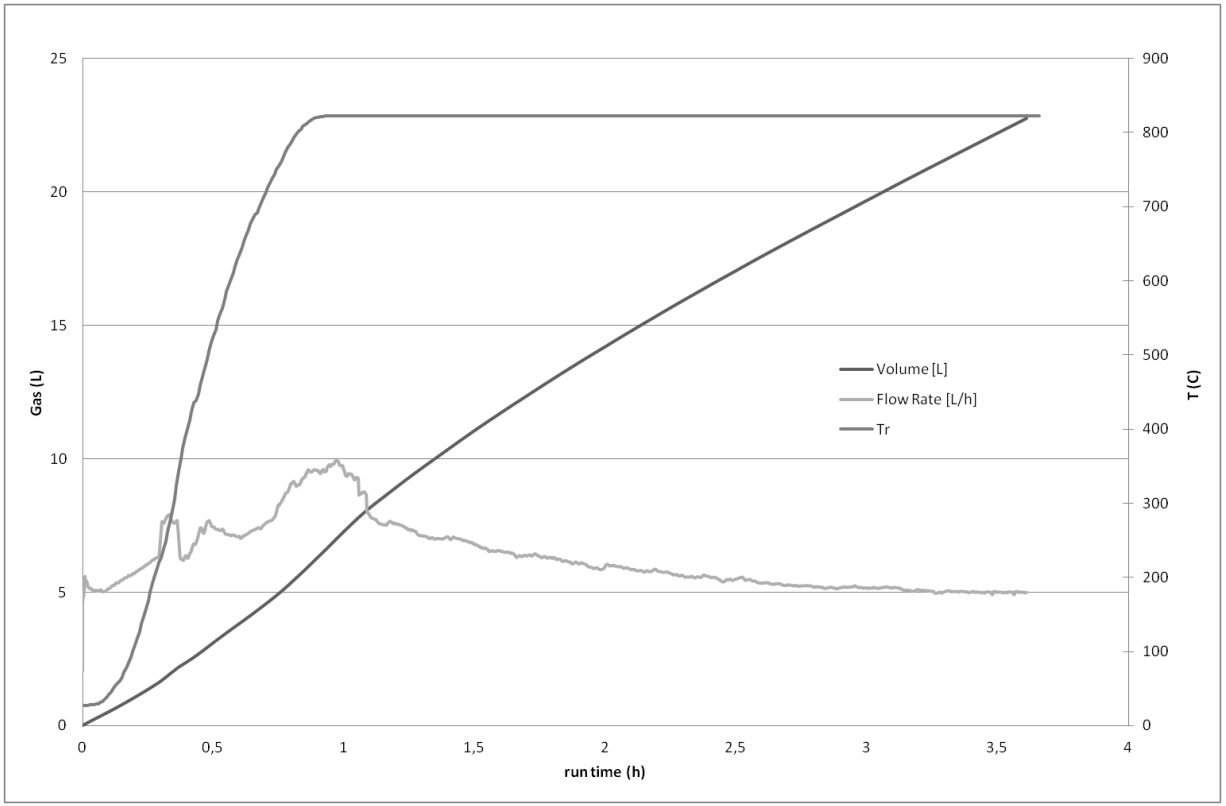
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,3	28,1	30,9	31,9	28,6	20,3	14,1	10,2	7,6	5,3	2,1
N	82,9	54,5	52,8	53,7	60,7	73,2	81,4	86,7	89,8	93,3	97,1
O	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	3,1	3,9	4,3	3,8	3,1	1,6	1,2	0,8	0,4	0,3	0,3
CH4	2,2	2,7	0,9	0,2	0	0	0	0	0	0	0
CO2	8,6	10,8	11,1	10,4	7,6	4,9	3,3	2,3	2,2	1,1	0,5
Πίσσες (g)	0,929				Στερεό υπόλειμμα (g)				0,764		

Πείραμα ιλύος Θc7-M1



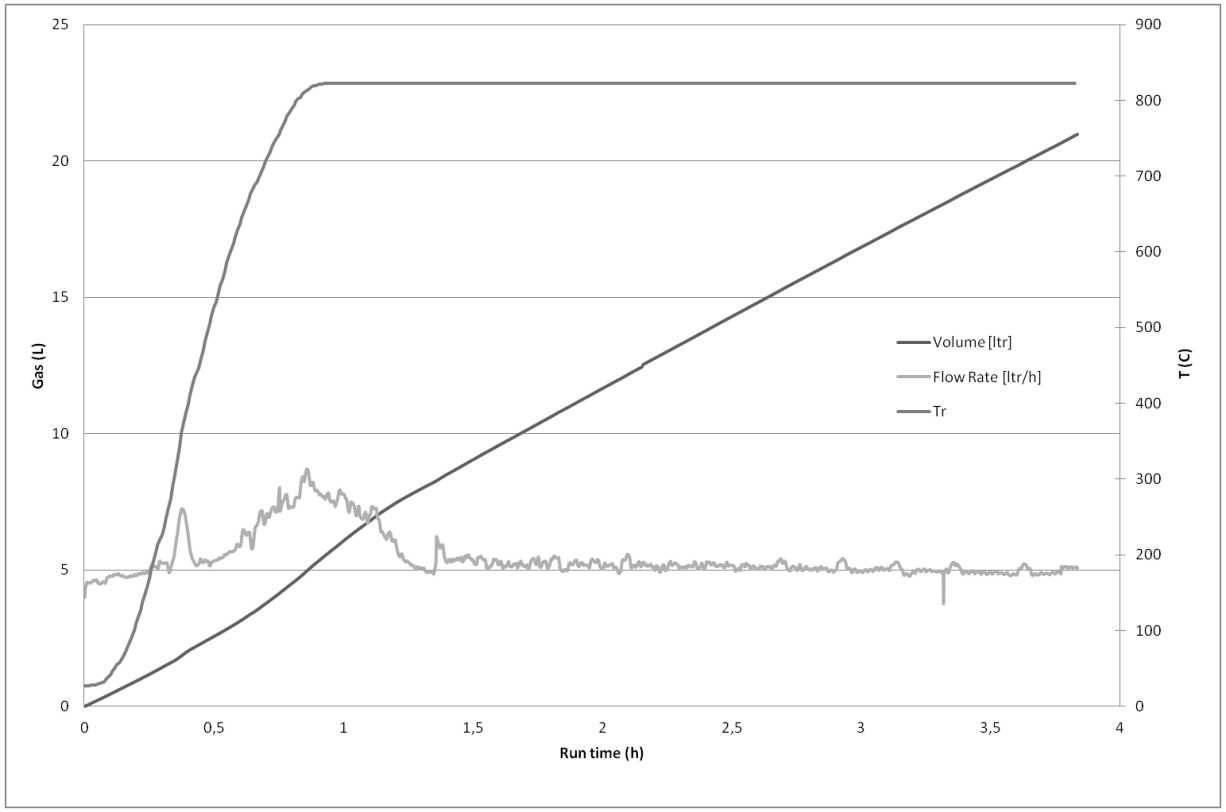
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,2	8,5	19,2	29,8	30,5	25,6	19,9	17,2	14,2	3,2	2,1
N	94,4	73,4	66,8	55,1	57,8	64,7	72,5	76,5	81,2	94,6	96,8
O	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0,5	2,8	2,3	3,9	3,1	2,8	2,5	2,1	1,5	0,8	0,2
CH4	0,9	3,2	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	3,9	12,1	10,9	11,2	8,6	6,9	5,1	4,2	3,1	1,4	0,9
Πίσσες (g)	0,905					Στερεό υπόλειμμα (g)			0,826		

Πείραμα ιλύος Θc7-M2



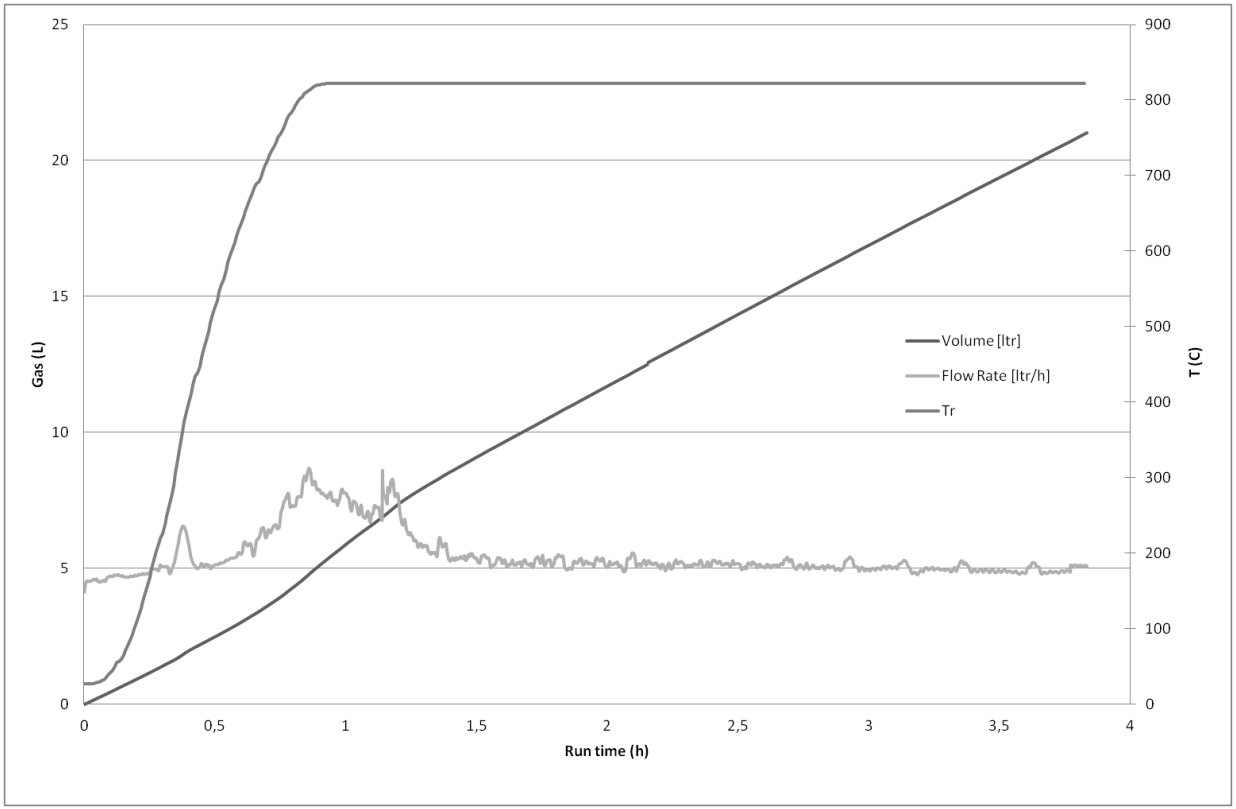
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,3	8,1	18,9	28,1	29,7	24,8	19,2	16,8	13,5	2,9	1,9
N	94,5	74,7	67,4	57,4	58,8	66,4	73,2	77,1	82	94,8	97
O	0,1	0,1	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0
CO	0,6	2,7	2,2	3,6	3,1	2,7	2,6	2,2	1,4	0,8	0,2
CH4	0,9	3,2	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	3,6	11,2	10,7	10,9	8,4	6,1	4,9	3,9	3,1	1,5	0,9
Πίσσες (g)	0.905				Στερεό υπόλειμμα (g)					0.826	

Πείραμα ιλύος Θc8-M1



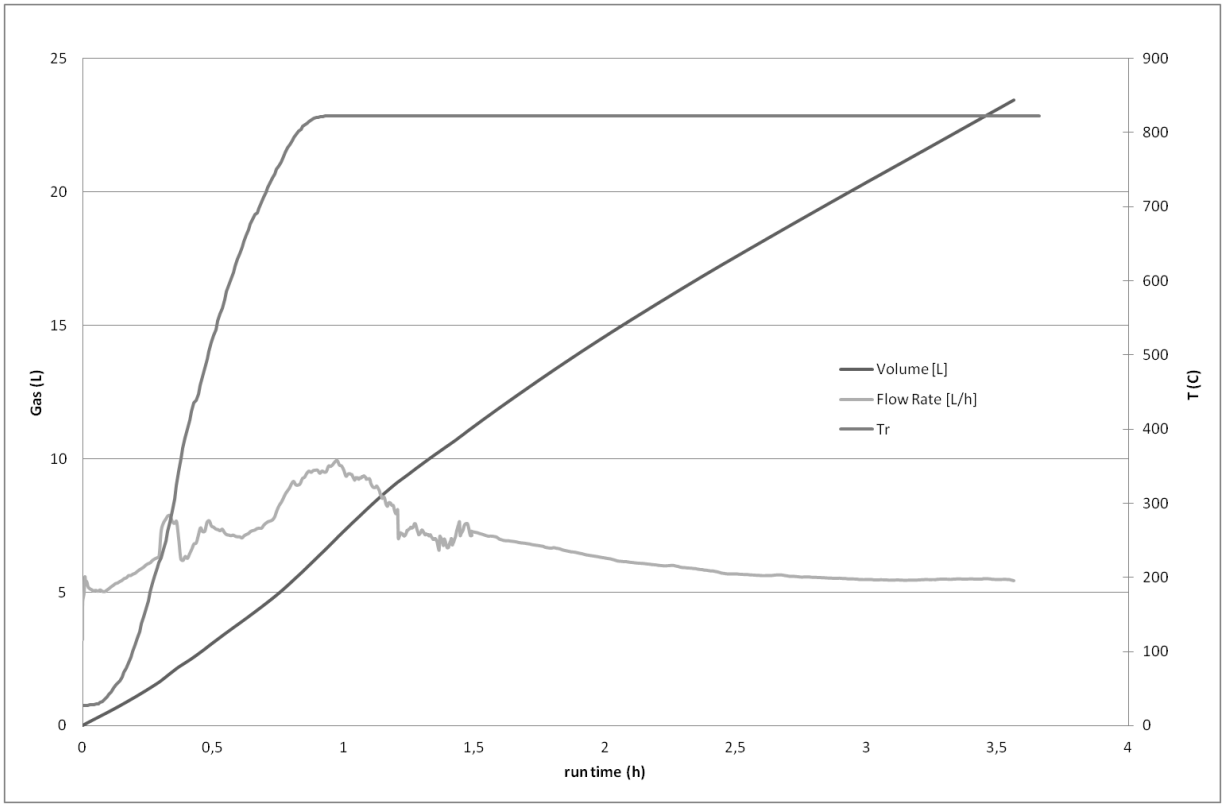
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	1,1	18,6	29,9	32,3	31,9	29,6	22,8	18,6	10,2	7,1	2,9
N	90,4	55,8	48,5	51,9	56,5	61,1	69,2	75,3	86,3	90,5	95,8
O	0,8	0,2	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0
CO	2,1	4,1	4,2	3,9	3,3	3,1	2,6	1,9	1,1	0,8	0,2
CH4	0,8	3,1	2,1	0,8	0	0	0	0	0	0	0
CO2	4,8	18,2	15,3	11,1	8,3	6,2	5,3	4,2	2,4	1,6	1,1
Πίσσες (g)	0.882				Στερεό υπόλειμμα (g)				0.883		

Πείραμα ιλύος Θc8-M2



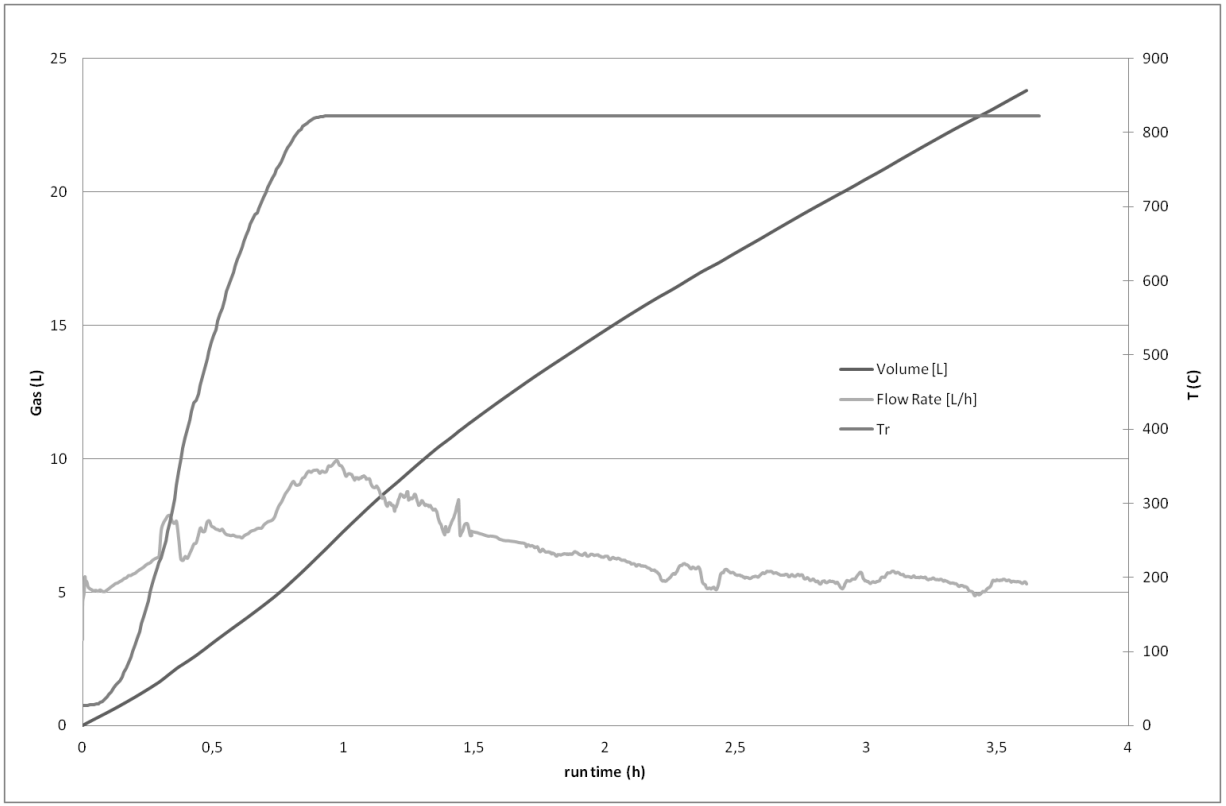
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	1,2	18,5	29,8	32,3	31,8	29,5	22,9	18,4	10,4	7,2	2,6
N	90,1	55,9	48,6	52	56,4	61,1	69,1	75,7	86,2	90,5	96,2
O	0,8	0,2	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0
CO	2,2	4,2	4,1	3,8	3,4	3,1	2,5	1,8	1,2	0,9	0,3
CH4	0,8	3,1	2,1	0,8	0	0	0	0	0	0	0
CO2	4,9	18,1	15,4	11,1	8,4	6,3	5,4	4,1	2,2	1,4	0,9
Πίσσες (g)	0.882				Στερεό υπόλειμμα (g)				0.883		

Πείραμα ιλύος Θc9-M1



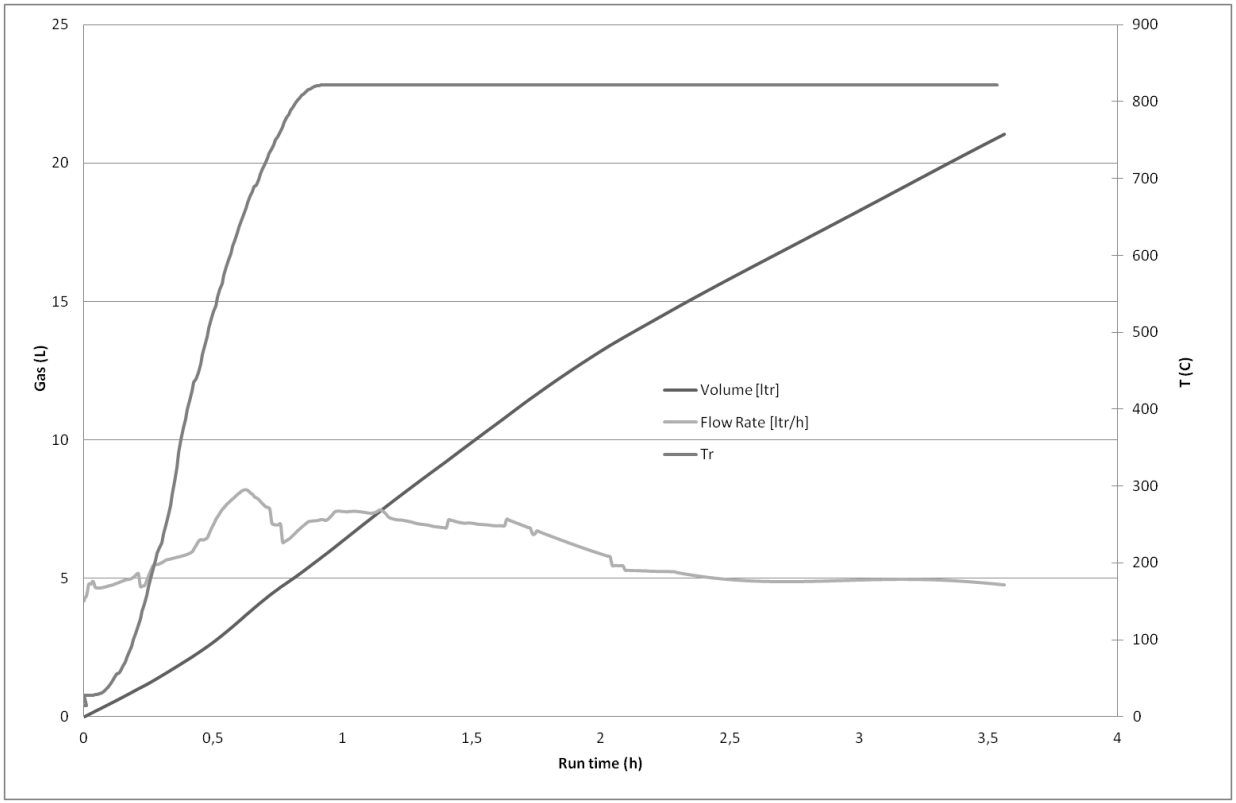
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,2	9,1	15,8	31,3	30,1	26,2	20,3	17,6	11,2	3,2	1,6
N	97,2	76,1	70,2	54,4	58,7	64,3	71,8	76,1	84,4	94,9	98
O	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0,6	1,3	1,9	3,9	3,7	2,9	2,6	2,2	1,5	0,8	0,1
CH4	0	3,4	0,9	0,5	0,3	0	0	0	0	0	0
CO2	1,9	10,1	11,2	9,9	7,2	6,6	5,3	4,1	2,9	1,1	0,3
Πίσσες (g)	0.861				Στερεό υπόλειμμα (g)				0,937		

Πείραμα ιλύος Θc9-M2



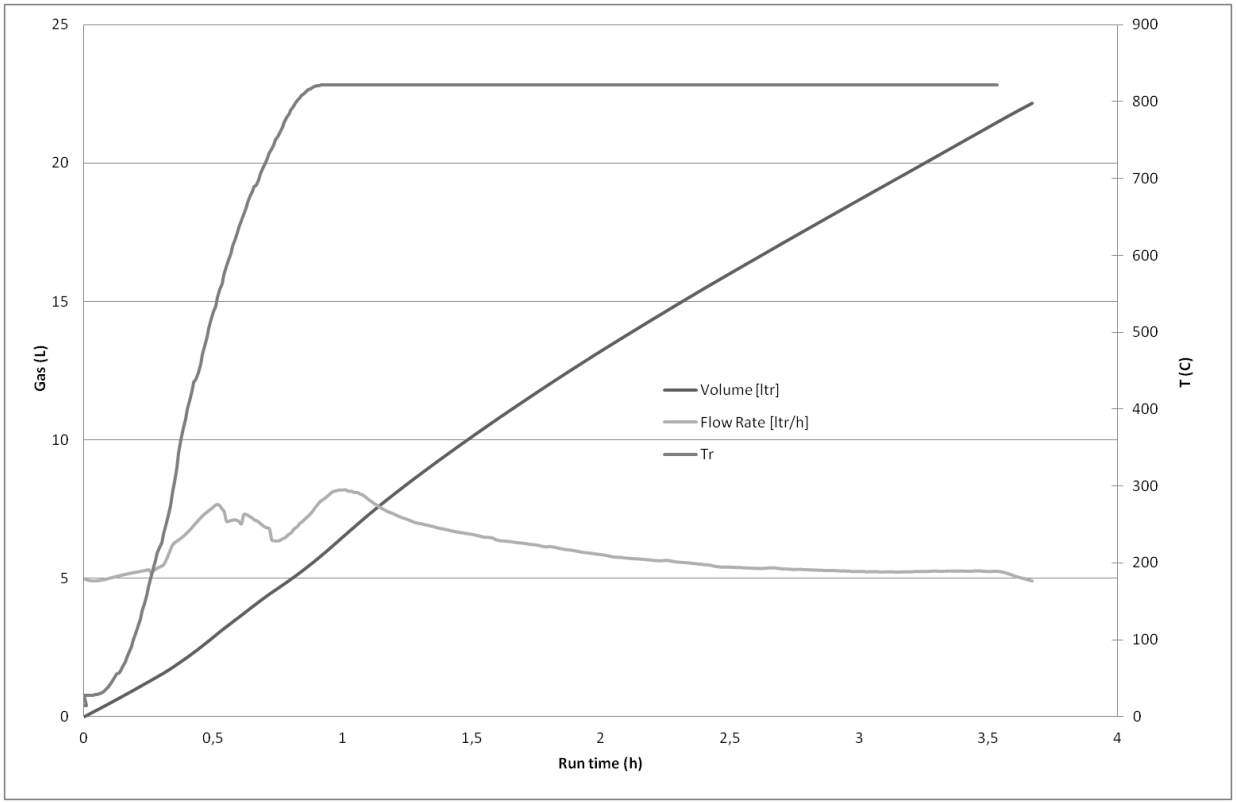
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	1,9	10,9	17,9	31,2	30,7	25,8	21,4	16,9	10,9	3,3	1,5
N	95,3	74,6	69,1	55,5	58	65,2	70,8	77,1	85	95	98,1
O	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0,6	1,3	1,9	3,9	3,7	2,9	2,6	2,2	1,5	0,8	0,1
CH4	0	3,4	0,9	0,5	0,3	0	0	0	0	0	0
CO2	2,1	9,8	10,2	8,9	7,3	6,1	5,2	3,8	2,6	0,9	0,3
Πίσσες (g)	0.861				Στερεό υπόλειμμα (g)				0,937		

Πείραμα ιλύος Θc10-M1



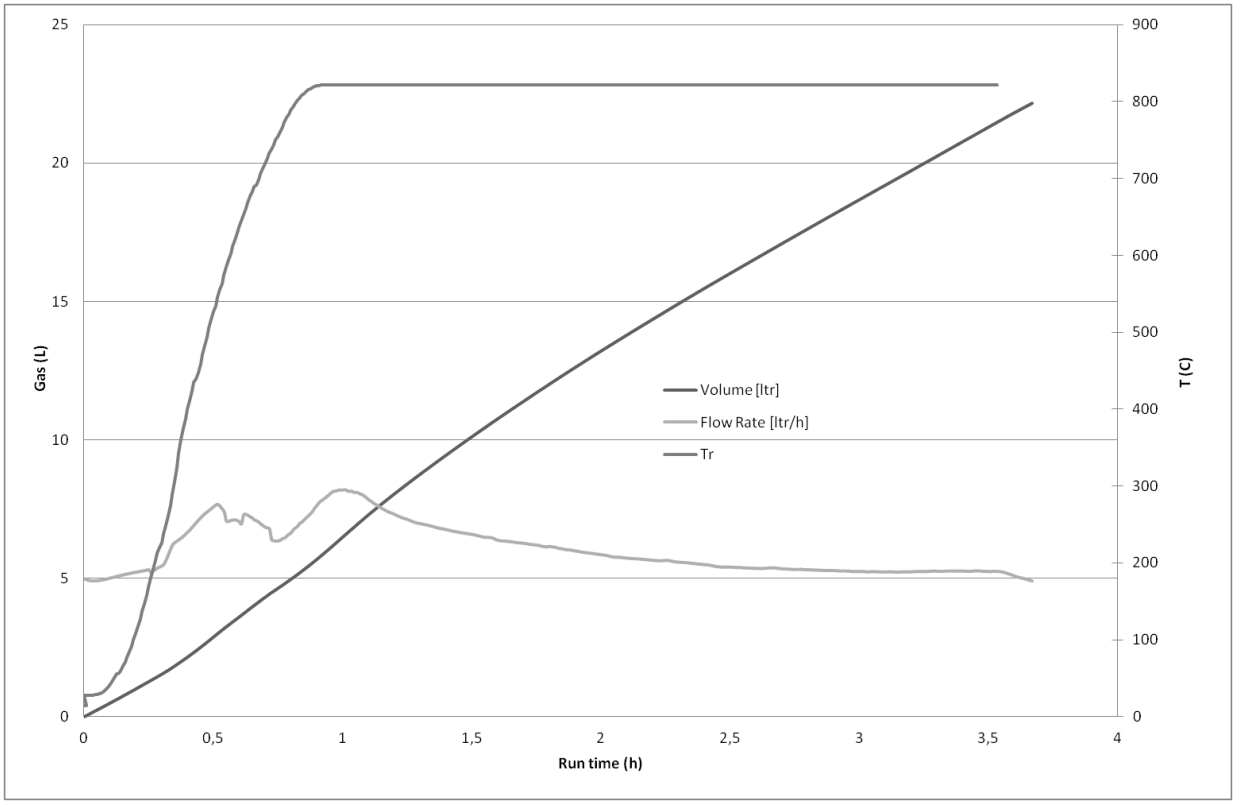
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,1	28,3	31,6	31,9	29,3	23,6	16,3	10,2	8,4	5,1	1,9
N	83,5	54	51,7	54	59,7	69,7	79	86,3	89,2	93,6	97,2
O	0,9	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	2,9	3,7	4,5	3,8	2,9	1,4	1,2	0,9	0,6	0,5	0,3
CH4	2,3	3,1	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	8,3	10,8	11,7	10,3	8,1	5,3	3,5	2,6	1,8	0,8	0,6
Πίσσες (g)	0.843				Στερεό υπόλειμμα (g)					0.987	

Πείραμα ιλύος Θc10-M2



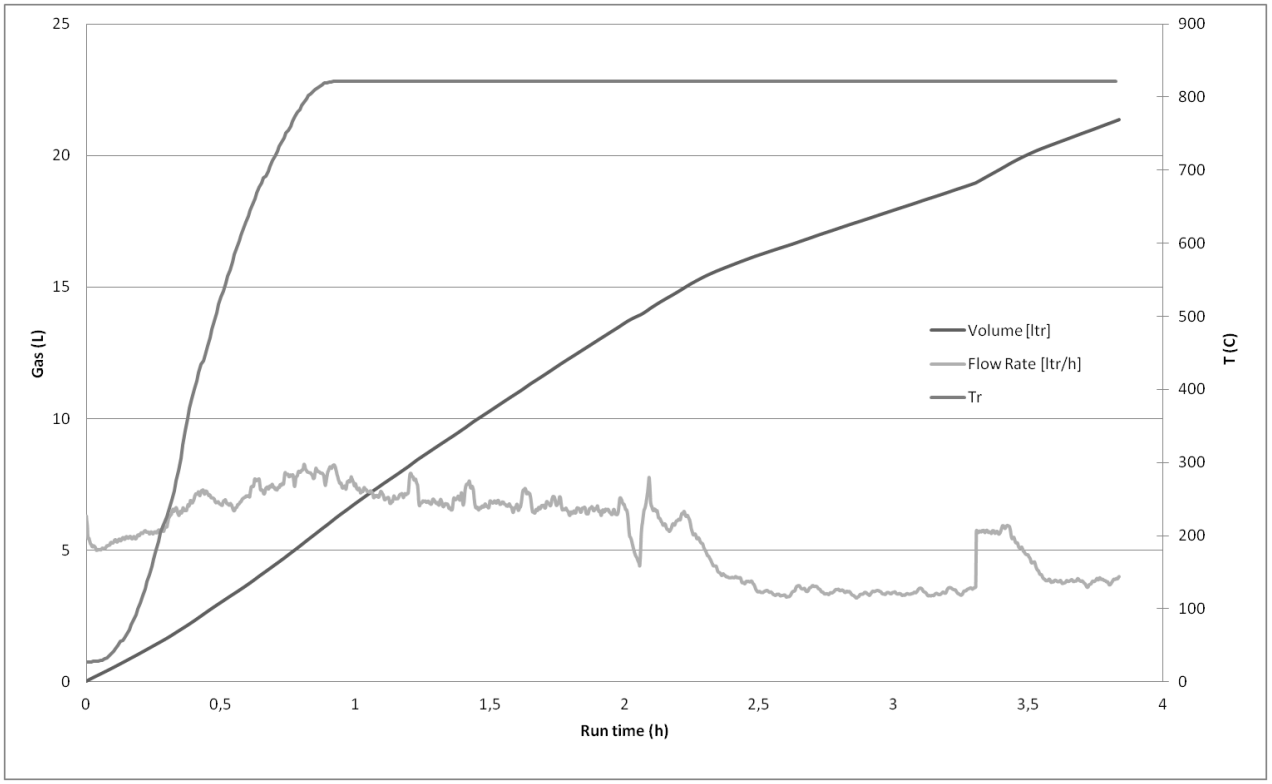
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,1	28,2	31,5	31,8	29,4	23,7	16,4	10,6	8,3	5,2	1,6
N	83,5	53,6	52	54,3	59,6	69,3	78,7	85,8	89,2	93,5	97,5
O	0,8	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	2,8	3,8	4,4	3,7	2,8	1,6	1,3	0,9	0,6	0,5	0,3
CH4	2,4	3,2	0,6	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	8,4	11,1	11,4	10,2	8,2	5,4	3,6	2,7	1,9	0,8	0,6
Πίσσες (g)	0.843				Στερεό υπόλειμμα (g)				0.987		

Πείραμα ιλύος Θc11-M1



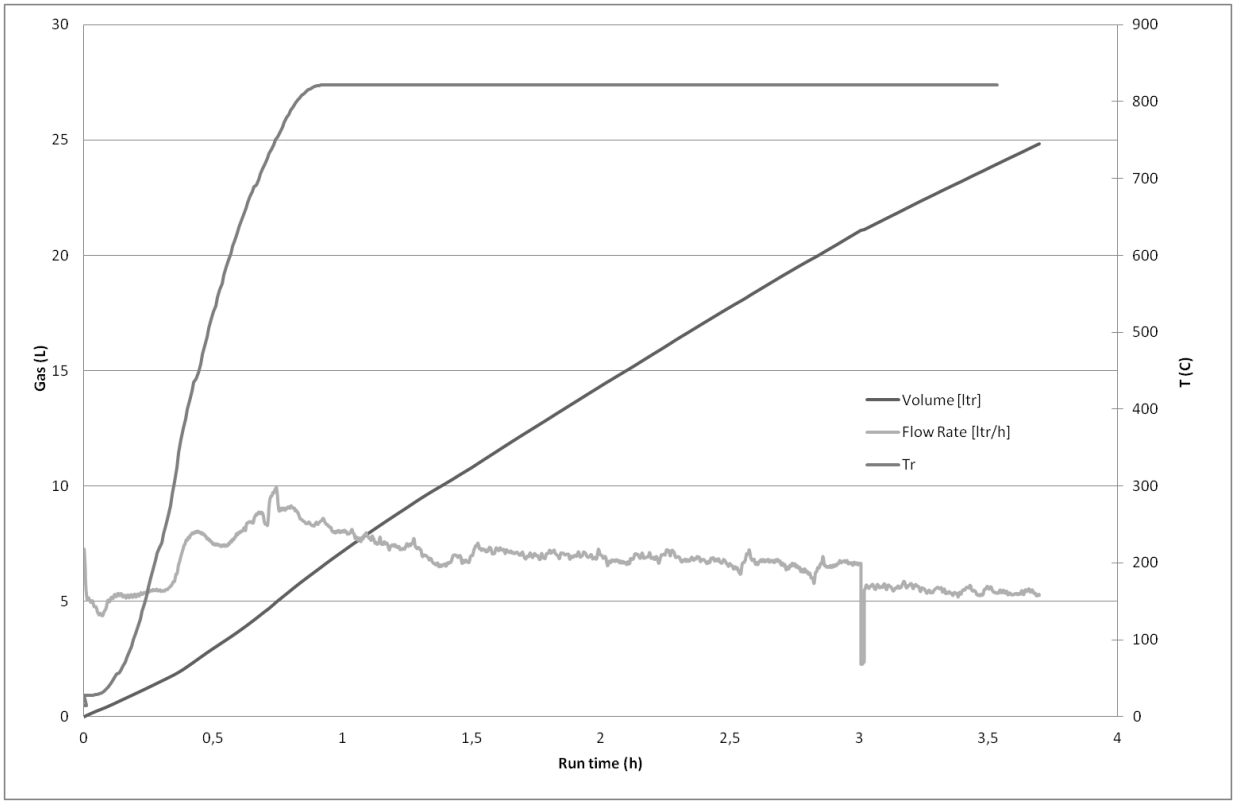
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,4	28,1	31,1	32,1	28,9	21,3	14,5	8,5	6,2	4,9	1,9
N	82	54,3	54	54,3	59,8	72,1	81	88,1	91,4	93,7	97,2
O	0,9	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	2,9	3,8	4,5	4,1	2,7	1,4	1,1	0,7	0,6	0,5	0,3
CH4	2,6	2,8	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	9,2	10,9	10,1	9,5	8,6	5,2	3,4	2,7	1,8	0,9	0,6
Πίσσες (g)	0.825				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.034		

Πείραμα ιλύος Θc11-M2



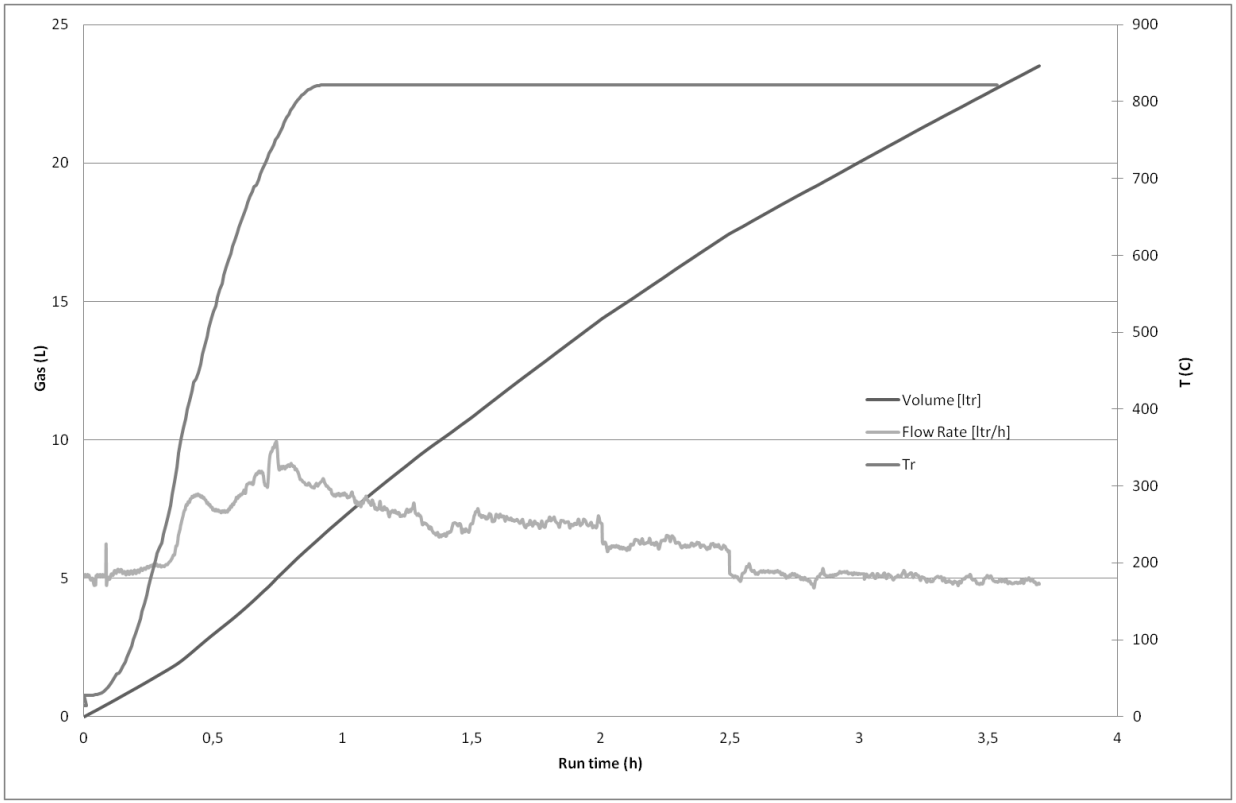
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,4	19,6	31,5	31,8	29,7	21,8	19,6	15,3	9,1	6,2	2,4
N	86,8	57,7	50,9	53,9	59,5	69,7	73,8	79,4	87,2	92,1	96,4
O	0,8	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0
CO	2,3	4,6	4,1	3,8	3,1	2,6	1,7	1,1	0,8	0,5	0,3
CH4	3,1	1,9	0,8	0,1	0	0	0	0	0	0	0
CO2	4,6	16,2	12,7	10,4	7,7	5,8	4,9	4,2	2,9	1,2	0,9
Πίσσες (g)	0.825				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.034		

Πείραμα ιλύος Θc12-M1



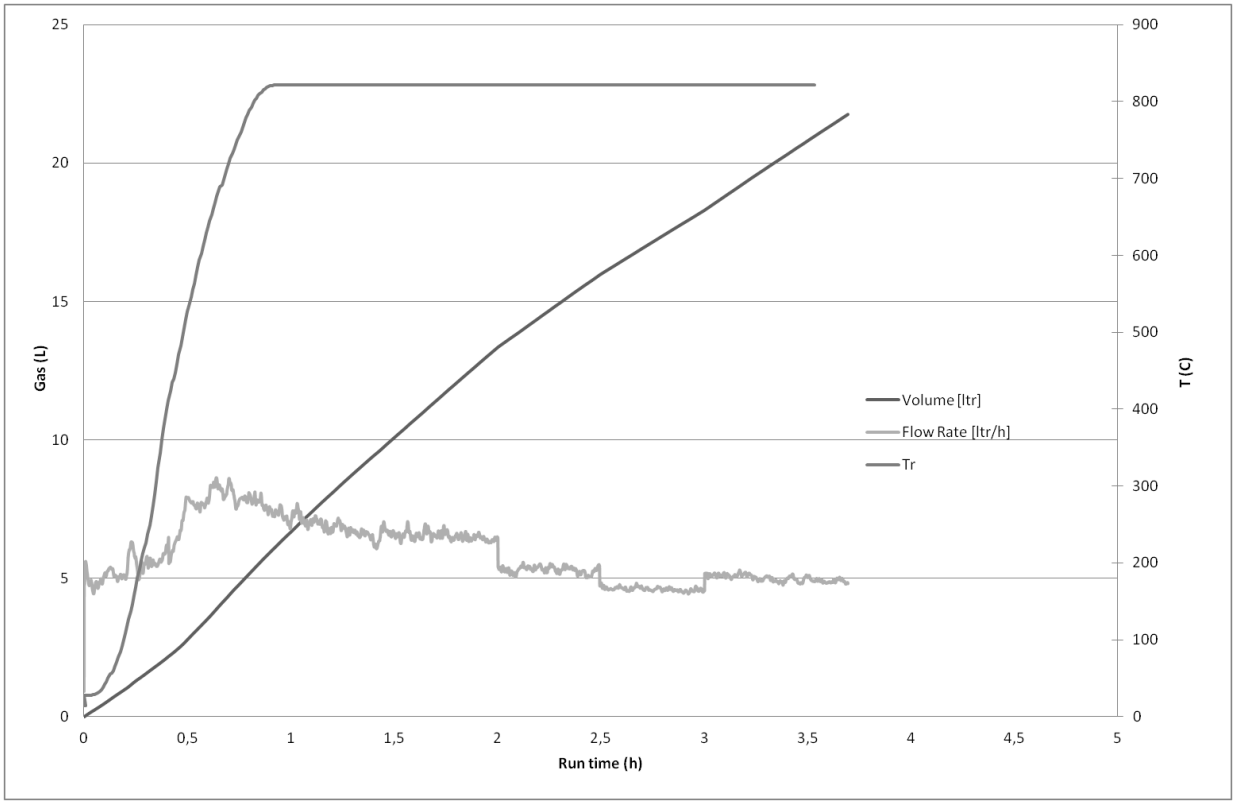
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	1,9	13,2	23,2	27,1	23,9	16,3	12,8	8,5	5,8	4,9	1,1
N	88,3	72,3	63	61,9	67,7	77,2	83	88,7	92,6	93,8	98,1
O	0,9	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	1,9	2,8	3,3	2,9	2,1	1,7	1,1	0,6	0,5	0,5	0,3
CH4	1,9	3,4	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	5,1	8,2	9,6	8,1	6,3	4,8	3,1	2,2	1,1	0,8	0,5
Πίσσες (g)	0.809				Στερεό υπόλειμμα (g)			1.079			

Πείραμα ιλύος Θc12-M2



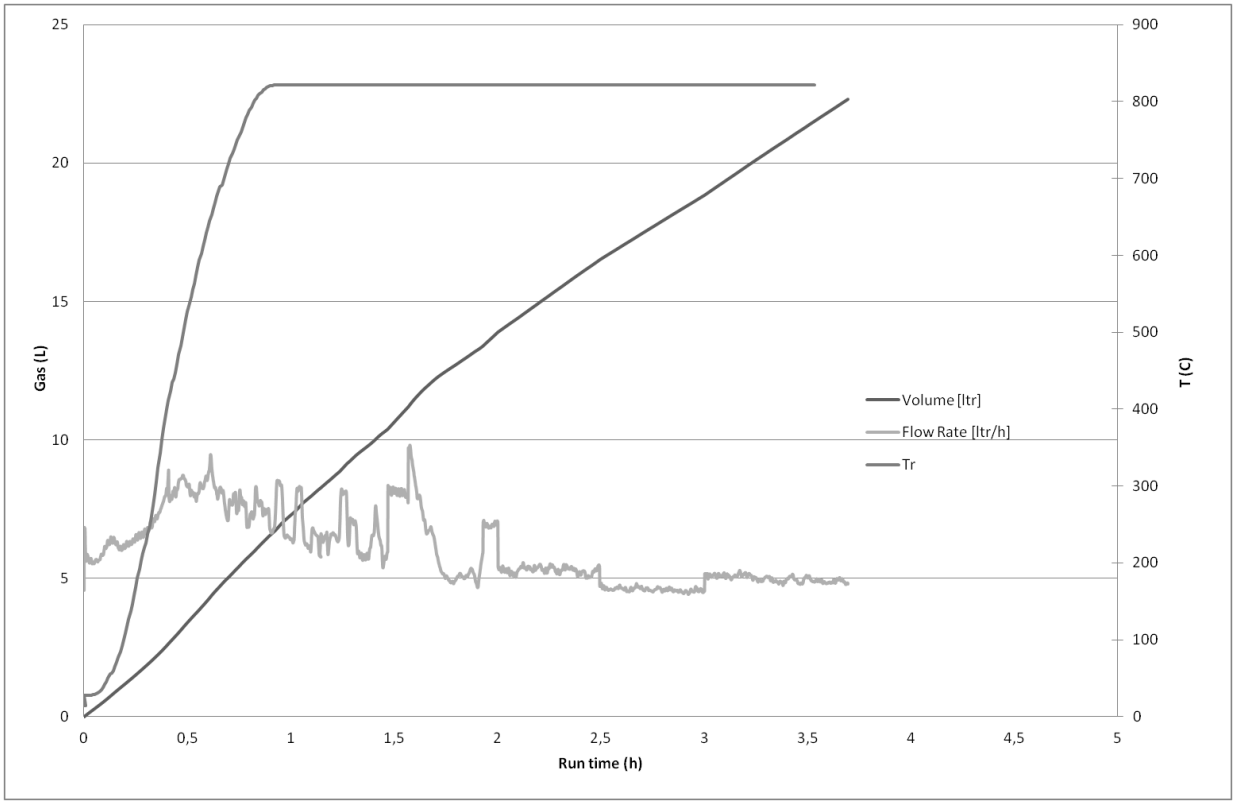
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	1,8	12,9	23,1	26,8	23,6	17,1	10,8	6,5	4,8	4,2	1,3
N	89	73	64,3	62,8	68,5	76,4	85	90,7	93,3	94,5	97,9
O	0,8	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	1,8	2,6	2,9	2,7	2,1	1,6	1,1	0,7	0,6	0,5	0,3
CH4	1,8	3,5	1,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0
CO2	4,8	7,9	8,6	7,6	5,8	4,9	3,1	2,1	1,3	0,8	0,5
Πίσσες (g)	0.810				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.079		

Πείραμα ιλύος Θc14-M1



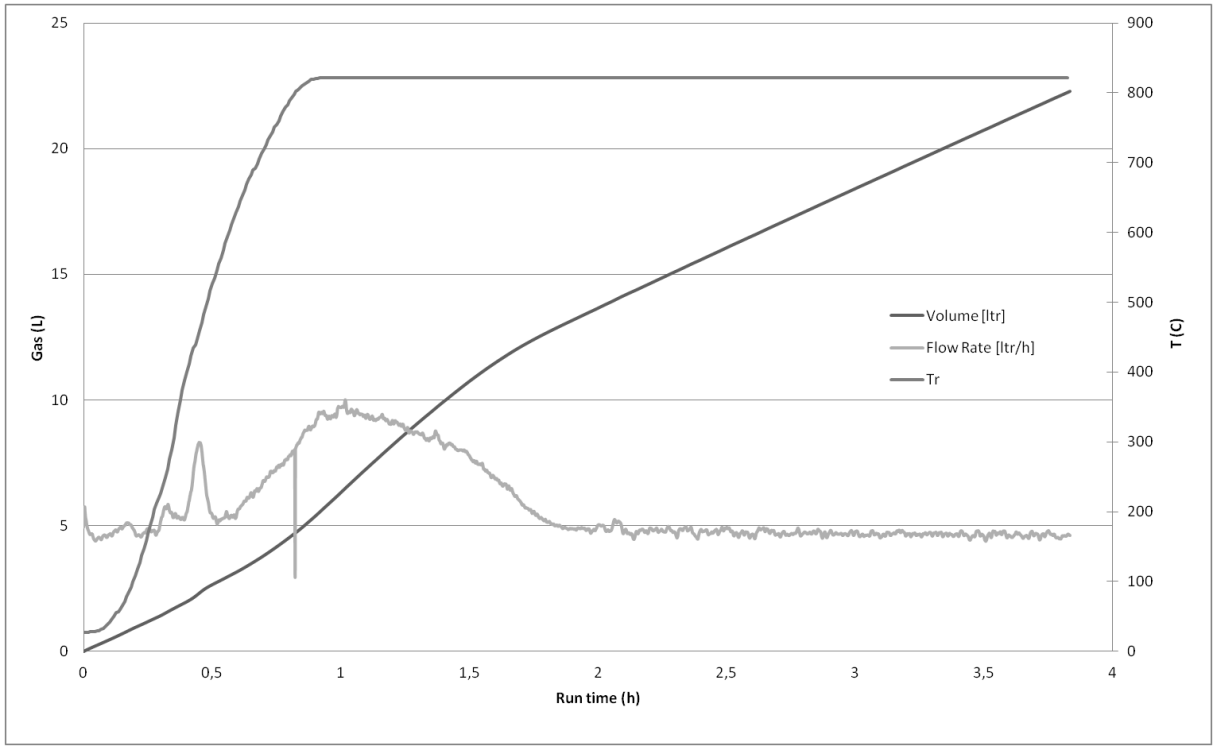
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,1	28,3	30,8	27,1	25,2	18,9	11,1	7,2	5,3	2,1	0,9
N	88,6	56,3	54,2	60,9	65,1	74,1	84,2	89,2	92,6	96,6	98,4
O	0,8	0,2	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0
CO	1,9	2,8	3,9	3,6	2,4	1,9	1,2	0,7	0,5	0,5	0,1
CH4	2,1	2,8	0,8	0,3	0	0	0	0	0	0	0
CO2	4,5	9,6	10,3	8,1	7,3	5,1	3,5	2,8	1,6	0,8	0,6
Πίσσες (g)	0.781				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.156		

Πείραμα ιλύος Θc14-M2



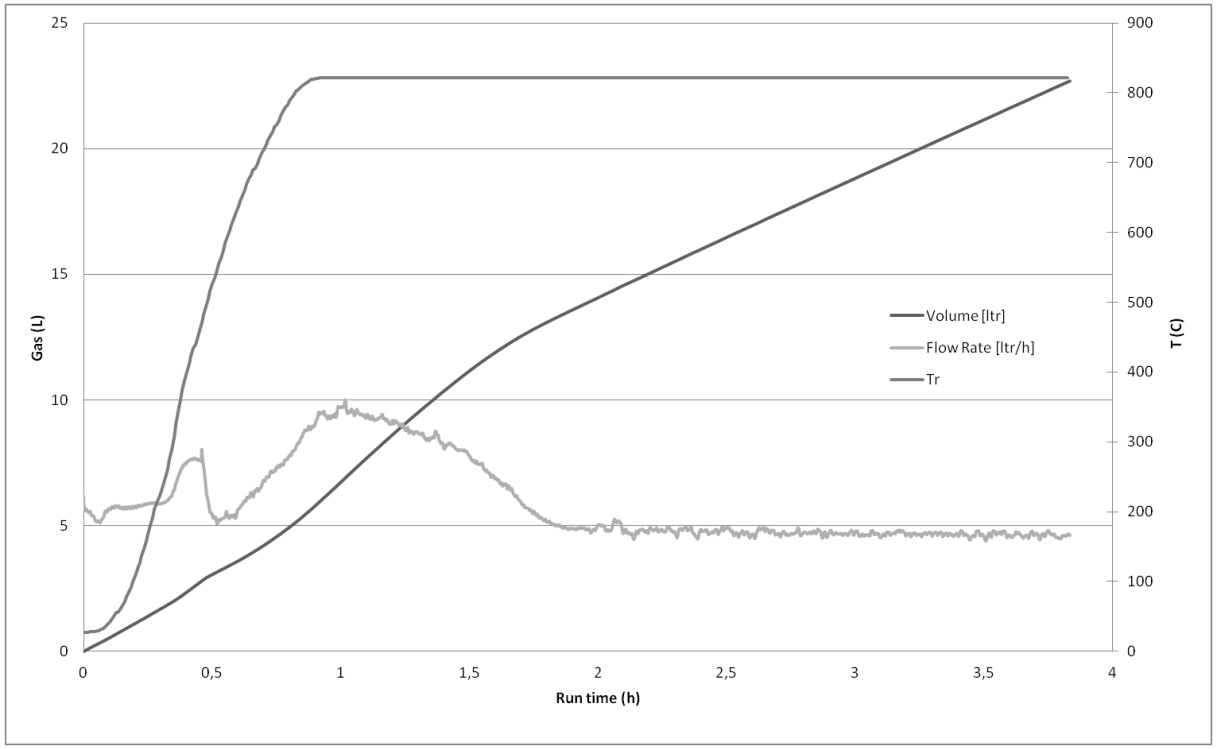
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	4,7	27,4	31,8	27,4	25,1	18,9	11,6	7,1	5,1	2,8	1,1
N	85,5	56,3	53,6	61,2	65,1	74,5	83,5	89,1	92,5	95,8	98,1
O	0,8	0,2	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0
CO	1,8	2,9	3,8	3,5	2,6	1,8	1,3	0,8	0,6	0,5	0,1
CH4	2,8	3,1	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	4,4	10,1	10,4	7,9	7,2	4,8	3,6	2,9	1,8	0,9	0,7
Πίσσες (g)	0.782				Στερεό υπόλειμμα (g)					1.157	

Πείραμα ιλύος Θc16-M1



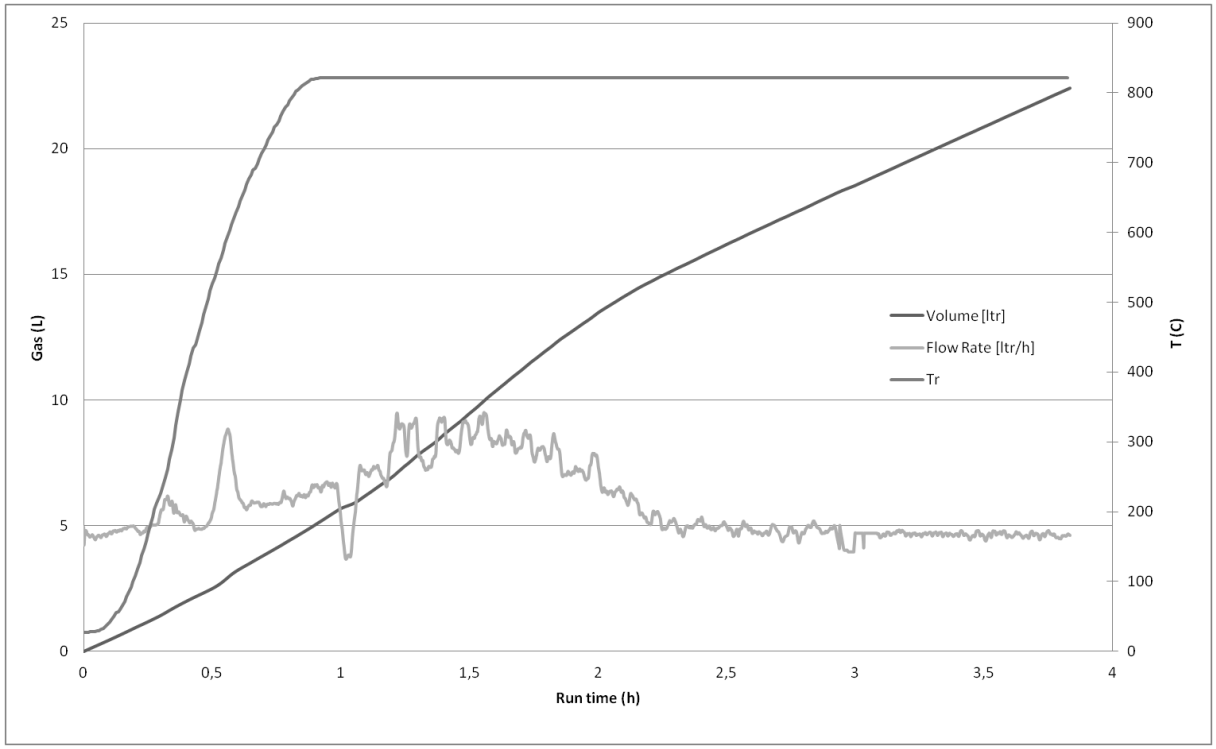
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,3	17,4	29,1	31,3	29,6	18,4	15,5	10,8	7,6	5,1	1,9
N	93,5	66,2	52,5	54,3	60,3	73,9	77,8	84,9	88,7	92,4	96,5
O	0,9	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,2
CO	2,1	3,2	4,1	3,4	2,6	2,1	1,8	1,1	0,9	0,6	0,3
CH4	0	3,1	1,9	0,8	0,7	0	0	0	0	0	0
CO2	3,2	10,1	12,4	10,1	6,8	5,6	4,9	3,2	2,8	1,9	1,1
Πίσσες (g)	0.756				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.227		

Πείραμα ιλύος Θc16-M2



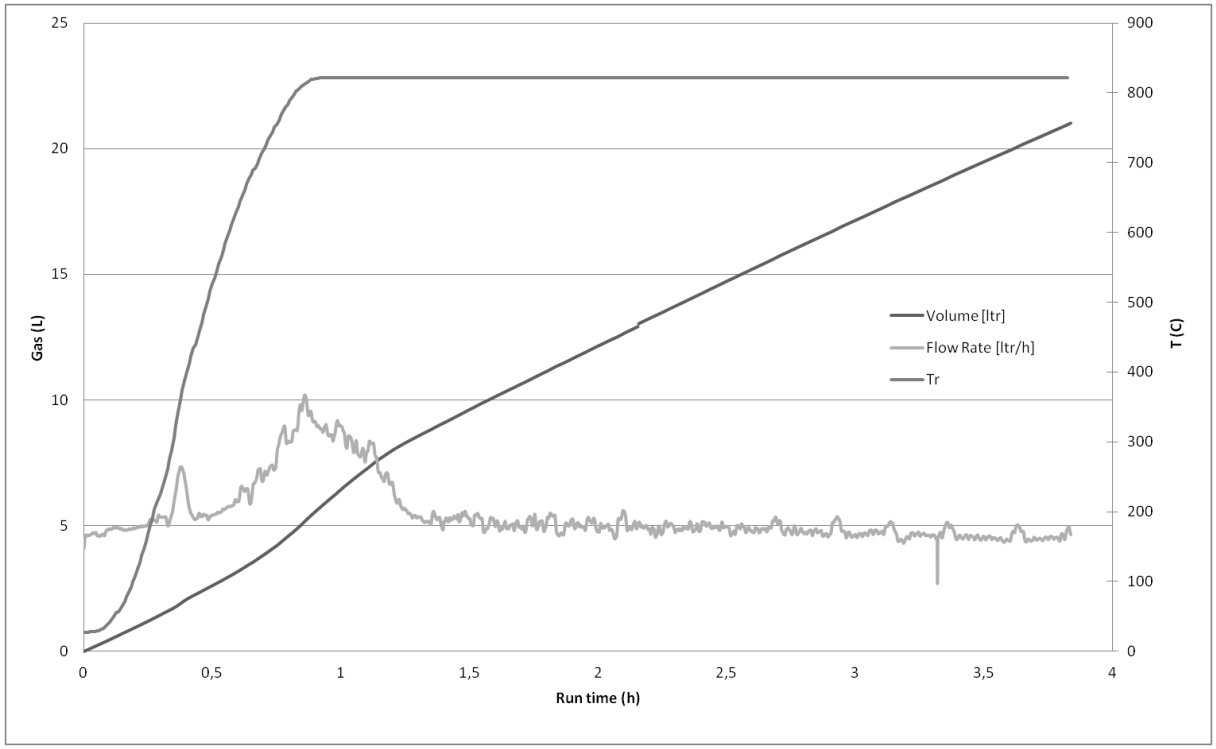
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,4	17,2	28,9	31,1	28,1	18,3	15,4	10,9	7,7	4,9	1,8
N	92,5	66	53,3	55,5	62,6	74,1	78,4	85,1	88,7	92,6	96,7
O	0,8	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	1,9	3,1	4,1	3,2	2,4	2,2	1,4	0,9	0,9	0,7	0,3
CH4	1,1	3,4	1,6	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	3,3	10,2	12,1	10,2	6,9	5,4	4,8	3,1	2,7	1,8	1,2
Πίσσες (g)	0.757				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.228		

Πείραμα ιλύος Θc18-M1



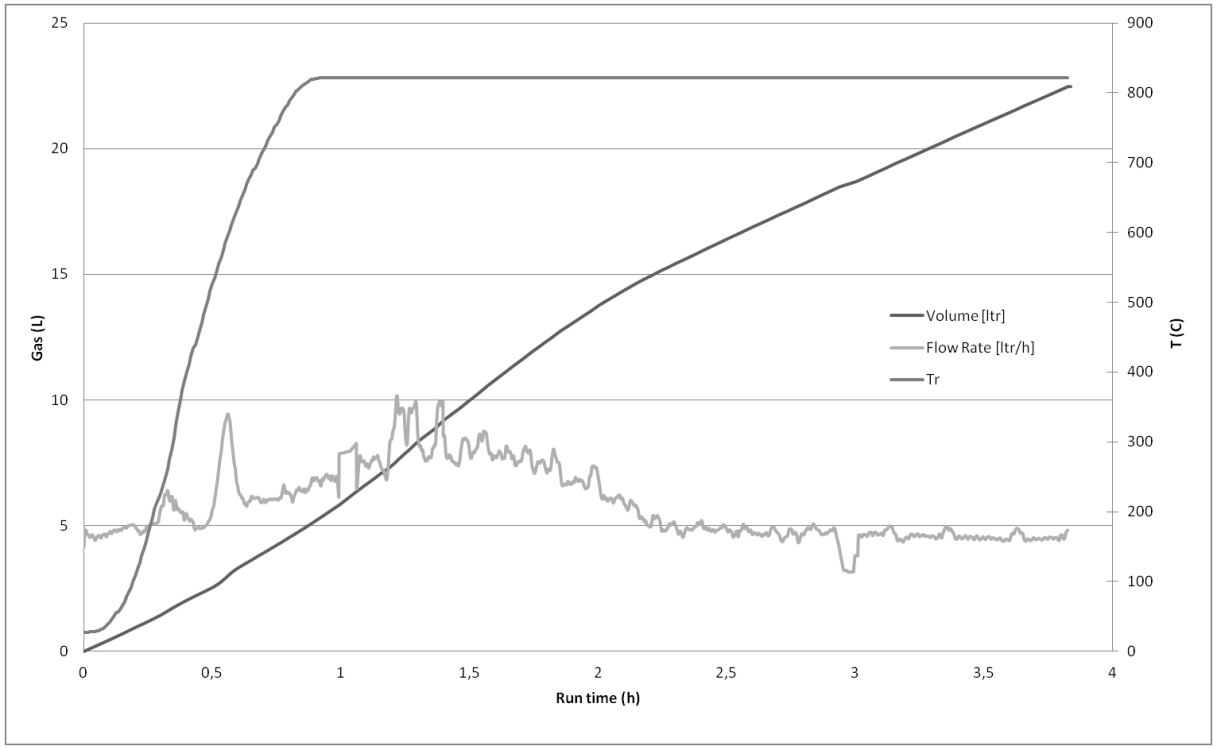
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,3	15,4	30,1	31,4	26,3	20,1	16,4	10,8	8,1	5,9	2,2
N	94	64,5	52,4	54,6	62,9	71	76,1	84	88,7	91,7	96,6
O	0,8	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0,1	0
CO	2,1	3,4	3,8	3,4	2,9	2,7	2,1	1,1	0,6	0,3	0,1
CH4	0	3,1	1,9	0,8	0,7	0	0	0	0	0	0
CO2	2,8	13,6	11,8	9,8	7,1	6,2	5,4	4,1	2,6	2	1,1
Πίσσες (g)	0.735				Στερεό υπόλειμμα (g)					1.291	

Πείραμα ιλύος Θc18-M2



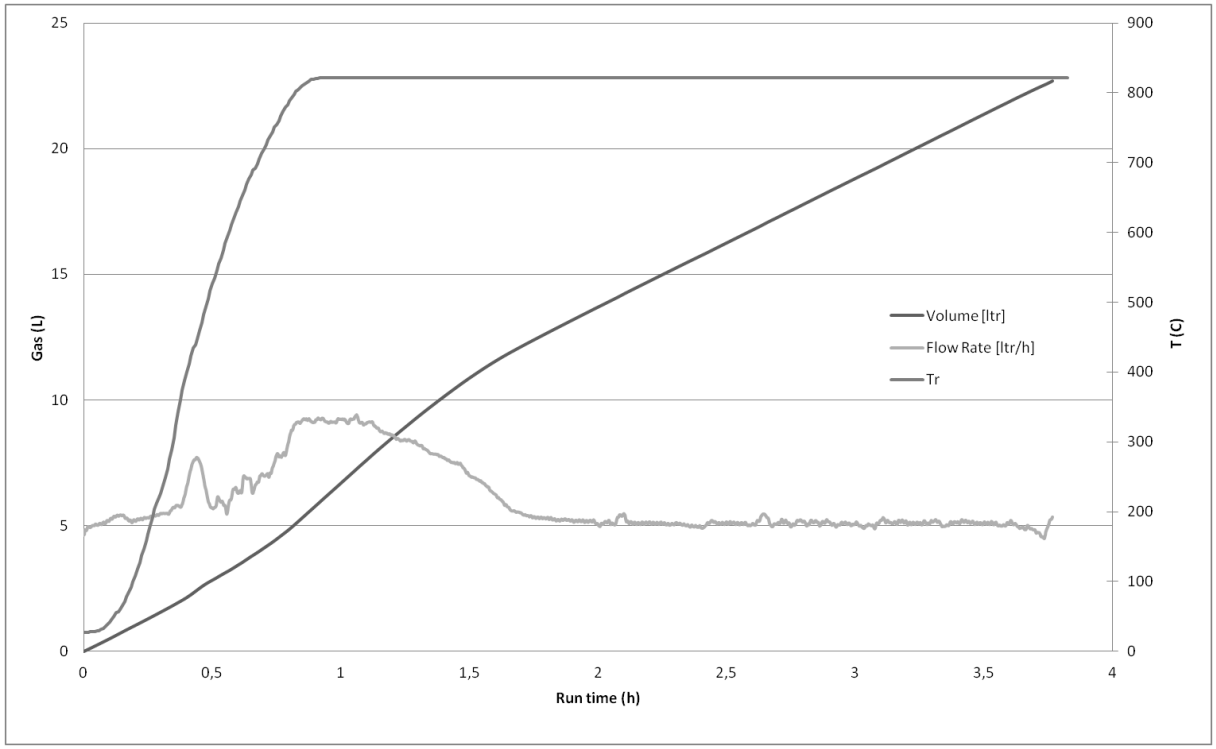
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,4	16,3	30,6	31,5	31,1	26,4	18,3	12,8	9,3	6,4	2,9
N	94	62,7	51,2	53,9	57,2	64,4	74,1	81,7	87,4	91,1	96
O	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	2,2	3,6	4,2	3,5	3,1	2,6	1,9	1,4	0,9	0,6	0,3
CH4	0	3,1	1,9	0,8	0,7	0	0	0	0	0	0
CO2	2,7	14,3	12,1	10,3	7,9	6,6	5,7	4,1	2,4	1,9	0,8
Πίσσες (g)	0.736				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.292		

Πείραμα ιλύος Θc20-M1



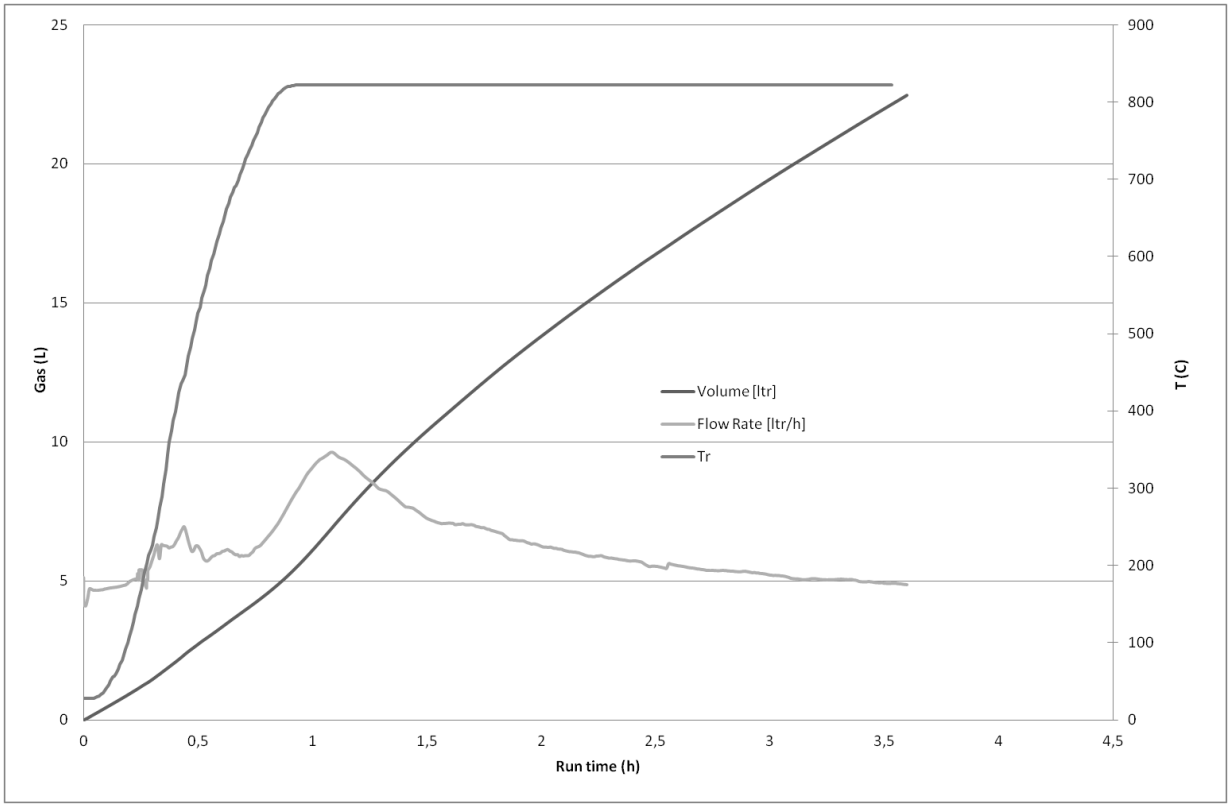
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,9	8,3	31,8	32,3	30,9	18,4	13,3	10,6	8,1	4,6	2,1
N	93,8	73,1	49,4	53,8	58,6	73,3	80	85	89	93,4	96,8
O	0,6	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0
CO	1,9	3,1	4,3	3,3	2,9	2,6	1,5	0,6	0,5	0,3	0,3
CH4	0	3,1	1,9	0,8	0,7	0	0	0	0	0	0
CO2	2,8	12,3	12,6	9,8	6,9	5,7	5,2	3,8	2,3	1,7	0,8
Πίσσες (g)	0.716				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.348		

Πείραμα ιλύος Θc20-M2



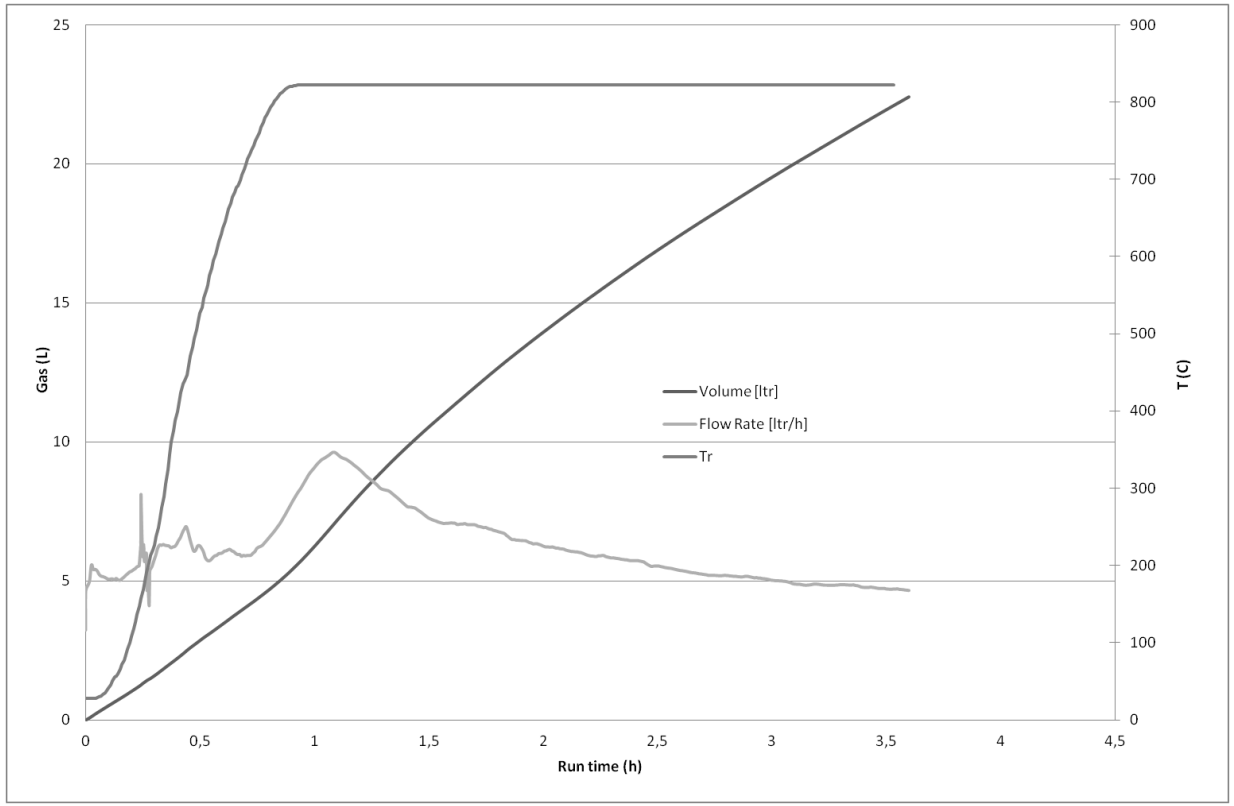
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	0,8	8,2	31,6	32,1	31,1	18,3	13,1	10,4	8,1	4,7	1,9
N	94,5	73,6	51,6	53,5	59,8	73,6	80,1	85	88,9	93,4	97,2
O	0,5	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0
CO	1,8	3,2	4,1	3,1	2,9	2,7	1,6	0,7	0,6	0,3	0,1
CH4	0,1	3,1	0,6	1,9	0	0	0	0	0	0	0
CO2	2,3	11,9	12,1	9,4	6,2	5,4	5,1	3,9	2,4	1,6	0,8
Πίσσες (g)	0.717				Στερεό υπόλειμμα (g)			1.348			

Πείραμα ιλύος Θc24-M1



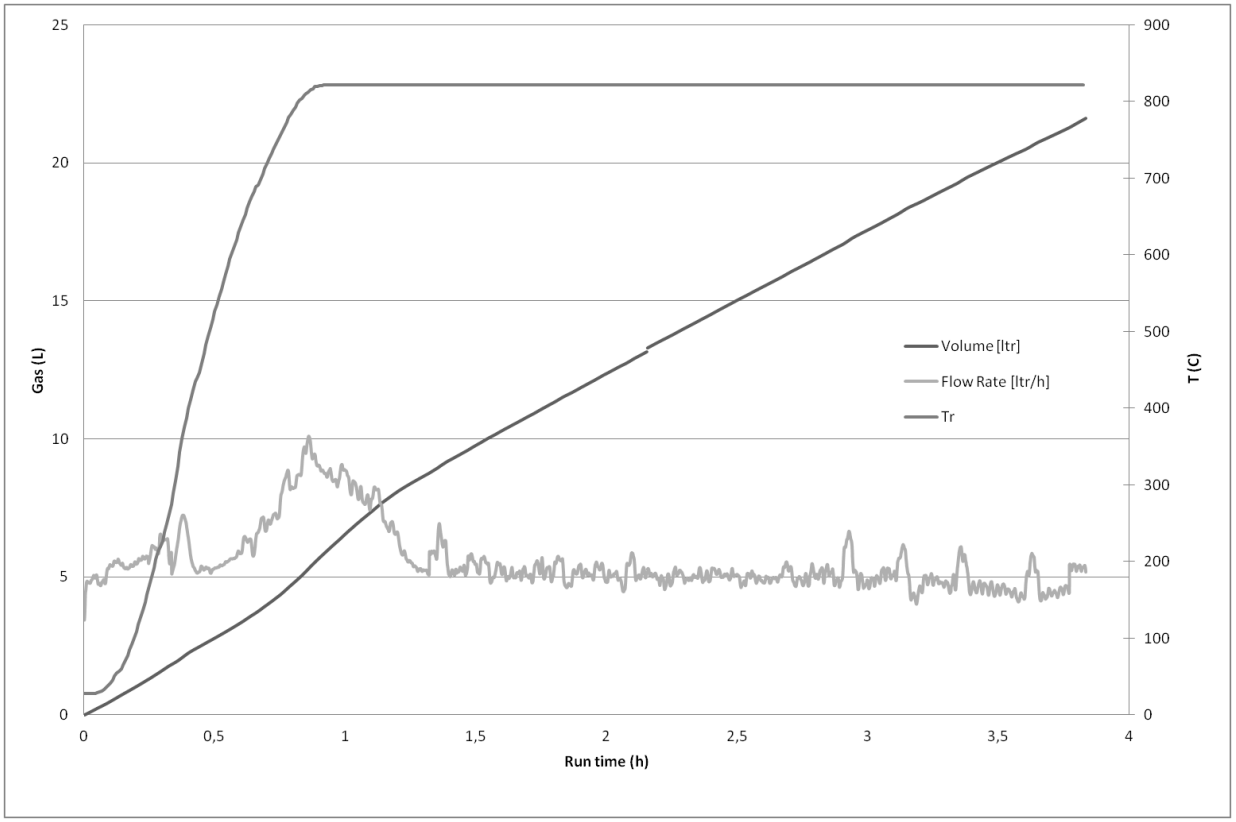
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,4	18,6	24,3	25,1	22,6	14,3	10,9	7,4	5,9	2,6	1,9
N	87,2	70,1	63,8	65,3	69,4	80,1	84,8	89,2	91,8	96	97,2
O	1,1	0	0	0,2	0	0	0	0,1	0	0	0
CO	1,9	2,1	3,3	2,2	1,9	1,2	1,1	0,6	0,5	0,5	0,3
CH4	2,2	2,9	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0
CO2	5,2	6,3	7,8	7,2	6,1	4,4	3,2	2,7	1,8	0,9	0,6
Πίσσες (g)	0.688				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.436		

Πείραμα ιλύος Θc24-M2



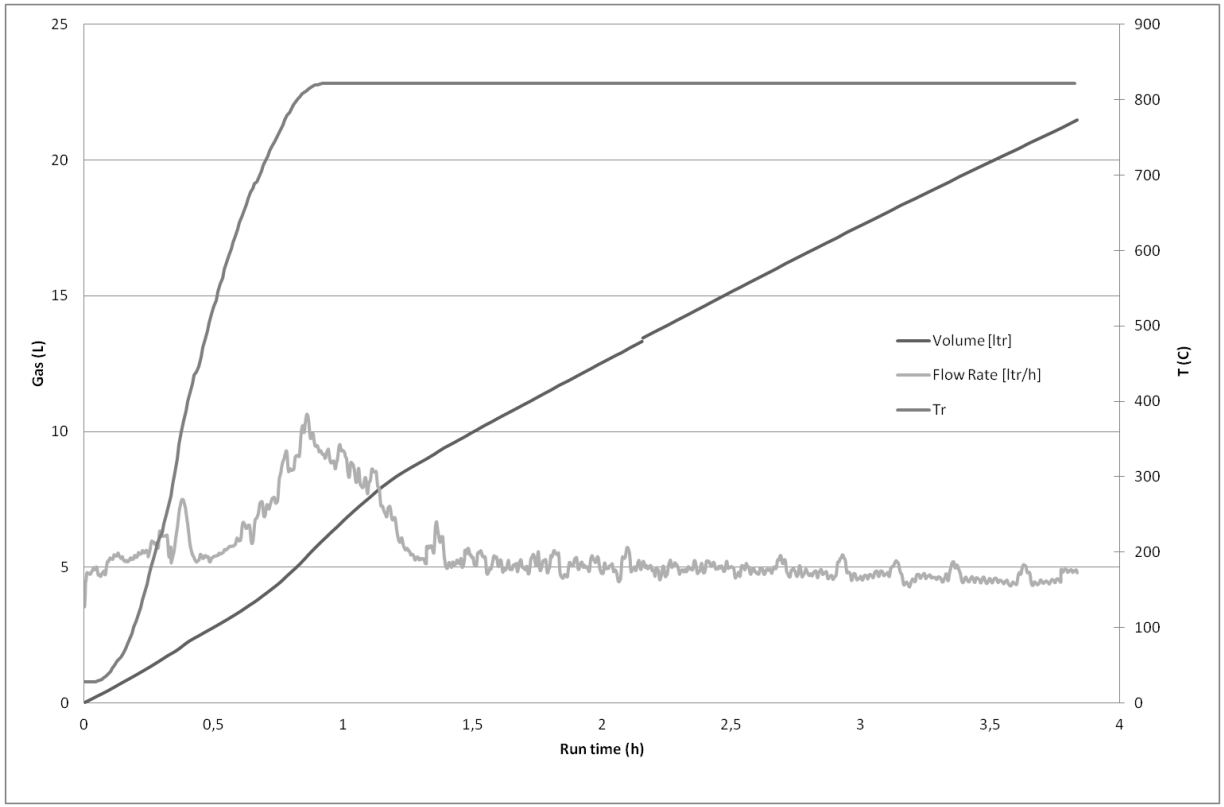
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	2,3	18,5	24,2	25,3	22,7	14,1	10,6	7,1	5,4	2,5	1,8
N	87,8	69,8	64,1	65,2	69,7	80,3	85,2	89,3	92,3	96,1	97,3
O	0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	1,8	2,2	3,1	2,3	1,4	1,3	0,9	0,7	0,6	0,5	0,2
CH4	2,1	3,1	0,9	0,1	0	0	0	0	0	0	0
CO2	5,1	6,4	7,7	7,1	6,2	4,3	3,3	2,9	1,7	0,9	0,7
Πίσσες (g)	0.689				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.437		

Πείραμα ιλύος Θc28-M1



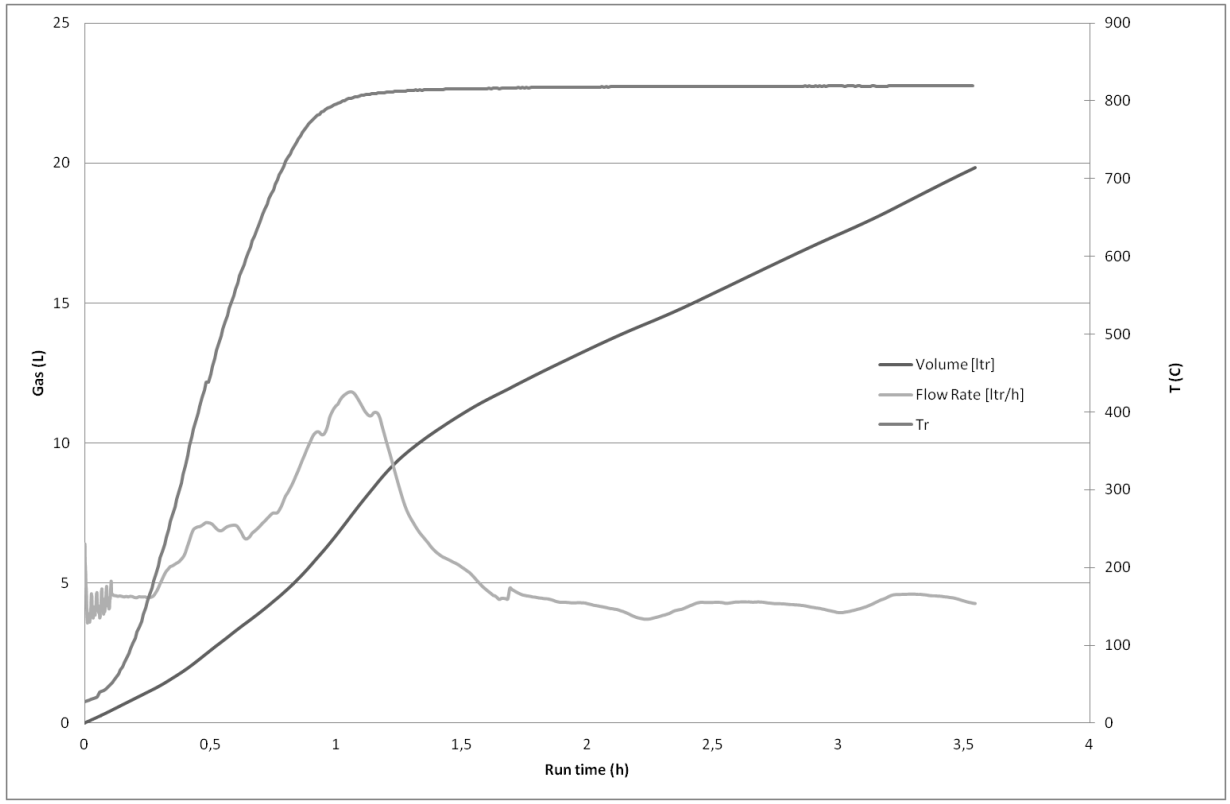
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	1,1	29,3	33,1	31,6	28,9	15,9	13,8	9,9	6,9	4,8	1,8
N	92,8	52,4	46,9	53,4	60,3	75,3	80	84,8	89,5	93,3	97,3
O	0,8	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0
CO	2,1	3,6	5,3	3,6	2,8	2,3	1,1	0,7	0,4	0,3	0
CH4	1,1	3,1	1,9	0,3	0	0	0	0	0	0	0
CO2	2,1	11,6	12,8	11,1	7,9	6,5	5,1	4,6	3,2	1,6	0,9
Πίσσες (g)	0.664				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.517		

Πείραμα ιλύος Θc28-M2



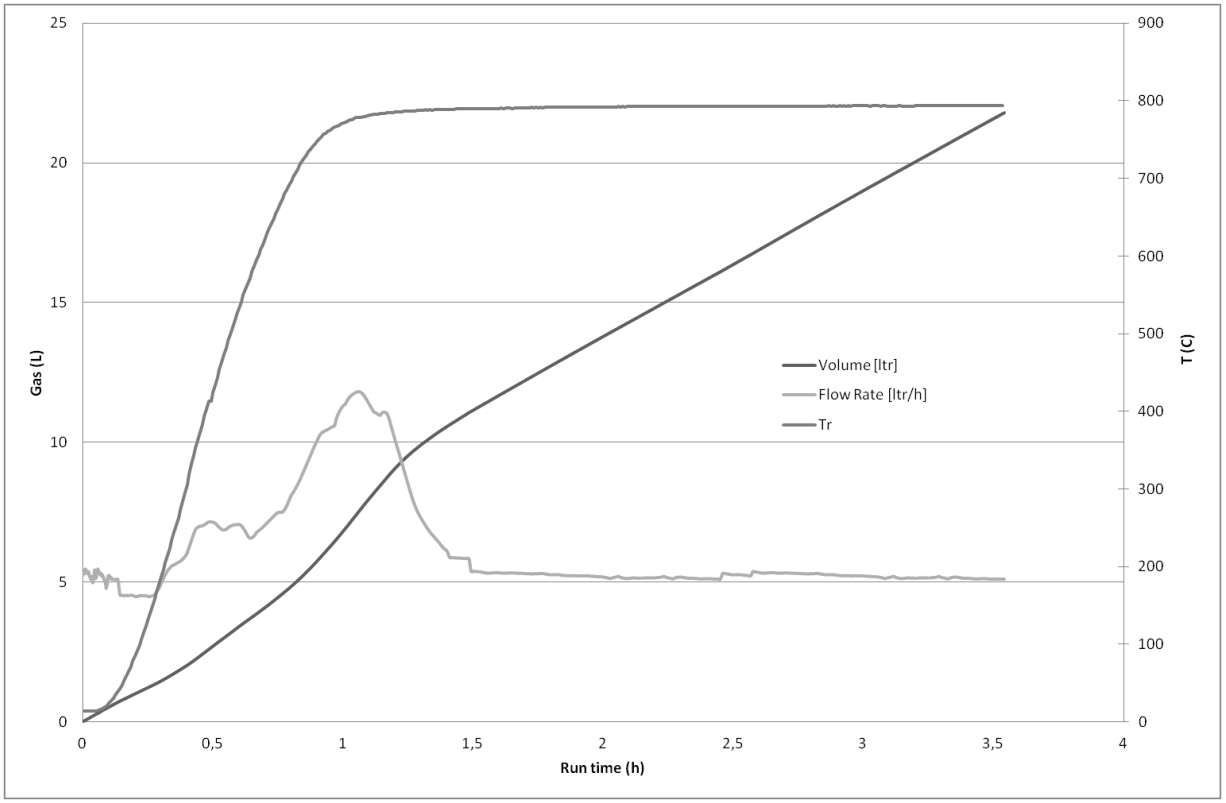
Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	1,1	29,4	33,2	31,5	29,1	16,3	14,2	10,3	7,4	5,8	1,9
N	93,2	52,1	47,2	53,5	60,5	75,4	79,6	84,8	89	92,3	96,7
O	0,7	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
CO	1,9	3,7	5,2	3,7	2,6	2,1	1,1	0,6	0,4	0,3	0,4
CH4	1,2	3,2	1,8	0,1	0	0	0	0	0	0	0
CO2	1,9	11,5	12,6	11,2	7,8	6,2	5,1	4,3	3,2	1,6	0,9
Πίσσες (g)	0.664				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.518		

Πείραμα ιλύος Θc30-M1



Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	7,5	35,9	42,3	37,3	18,3	6,4	4,2	2.1	1,1	0,9	0,5
N	66,3	43,6	30,2	47,2	76,9	90,2	93,8	96,8	98	98,5	99,2
O	0.9	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
CO	2,3	4,3	11,8	3,6	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1,9	1,4	0,5	0,3	0	0	0	0	0	0	0
CO2	21,1	13,9	15,2	11,6	4,8	2	1,4	1,1	0,9	0,6	0,2
Πίσσες (g)	0.650				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.563		

Πείραμα ιλύος Θc30-M2



Αέρια (%κ.ό)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H2	7,5	35,9	42,3	37,3	18,3	6,4	4,2	2.1	1,2	0,8	0,5
N	64,8	43,6	30,2	47,2	76,9	90,2	93,8	96,9	97,8	98,6	99,2
O	2,5	0,8	0	0	0	1,4	0,7	0	0	0	0,1
CO	2,3	4,3	11,8	3,6	0	0	0	0	0	0	0
CH4	1,9	1,4	0,5	0,3	0	0	0	0	0	0	0
CO2	21,1	13,9	15,2	11,6	4,8	2	1,4	1,0	0,9	0,6	0,2
Πίσσες (g)	0.651				Στερεό υπόλειμμα (g)				1.563		

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΛΥΟΣ

Σε αυτό το Παράρτημα παρατίθενται τα αποτελέσματα των ημερήσιων μετρήσεων των χαρακτηριστικών της εξόδου των τεσσάρων βιοαντιδραστήρων.

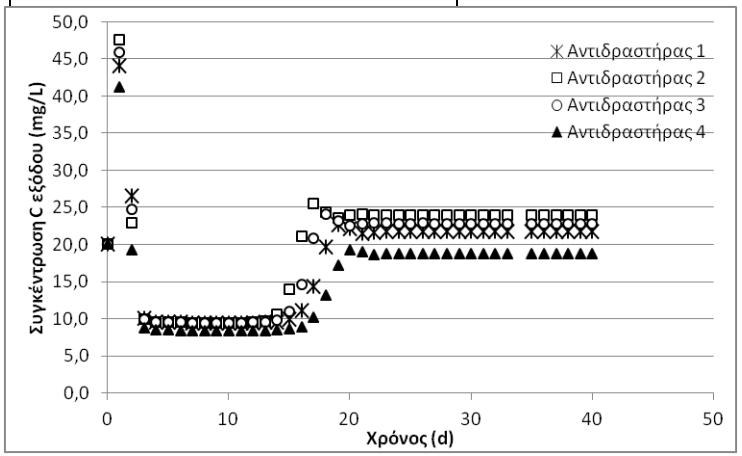
Η επιβολή εκάστοτε νέου Θ_c πραγματοποιούταν ταυτόχρονα και στους τέσσερις βιοαντιδραστήρες. Οι βιοαντιδραστήρες λειτουργούσαν σε μόνιμες συνθήκες στο προηγούμενο Μετά το πέρας της συλλογής της απαιτούμενης ιλύος στο προηγούμενο Θc, γινόταν ρύθμιση του συστήματος για την έναρξη του νέου κύκλου λειτουργίας. Ως κύκλος λειτουργίας οριζόταν η επιβολή του νέου Θ_c, η επίτευξη μόνιμων συνθηκών και η συλλογή ιλύος. Η αρίθμηση των ημερών λειτουργίας του συστήματος στον εκάστοτε κύκλο αφορούσε την πρώτη μέρα από την επιβολή του νέου Θ_c, και άρχιζε από το 1.

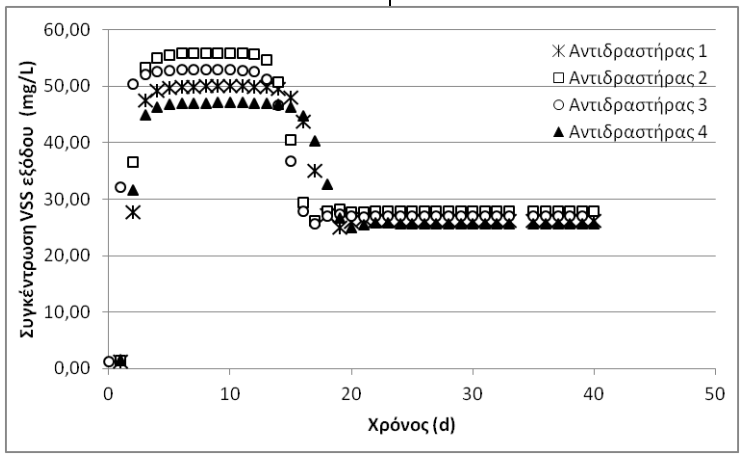
Στους παρακάτω Πίνακας και παρατίθενται οι καθημερινές μέσες μετρήσεις των TOC, VSS και CO_2 τα Διαγράμματα αποτελούν την γραφική απεικόνιση των μετρήσεων αυτών

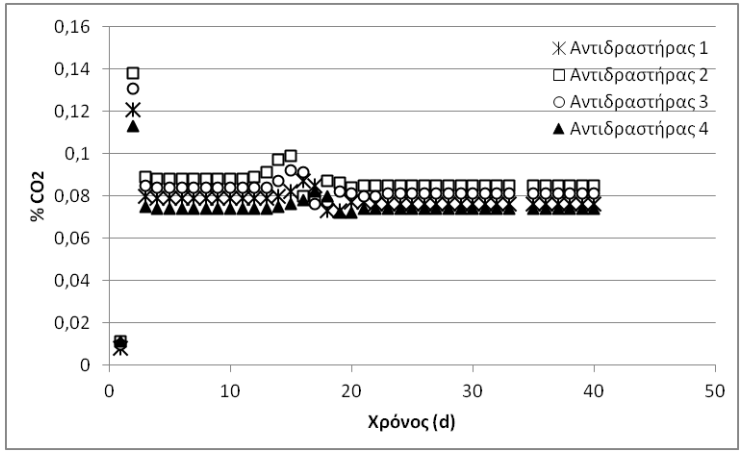
Θc 1

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	44,1	0,008	1,23	47,6	0,011	1,51	45,9	0,01	1,36	41,2	0,011	1,57
2	26,6	0,121	27,80	22,9	0,138	36,63	24,8	0,131	32,19	19,3	0,113	31,58
3	10,1	0,08	47,51	9,9	0,089	53,28	10,0	0,085	50,41	8,8	0,075	44,97
4	9,6	0,079	49,18	9,6	0,088	55,01	9,6	0,084	52,10	8,5	0,074	46,35
5	9,5	0,079	49,71	9,5	0,088	55,61	9,5	0,084	52,66	8,5	0,074	46,82
6	9,5	0,079	49,90	9,5	0,088	55,82	9,5	0,084	52,86	8,4	0,074	47,00
7	9,5	0,079	49,97	9,5	0,088	55,90	9,5	0,084	52,94	8,4	0,074	47,06
8	9,5	0,079	50,00	9,5	0,088	55,93	9,5	0,084	52,96	8,4	0,074	47,08
9	9,5	0,079	50,01	9,5	0,088	55,94	9,5	0,084	52,97	8,4	0,074	47,09
10	9,5	0,079	50,01	9,5	0,088	55,93	9,5	0,084	52,97	8,4	0,074	47,09
11	9,5	0,079	50,00	9,5	0,088	55,89	9,5	0,084	52,96	8,4	0,074	47,09
12	9,5	0,079	49,98	9,5	0,089	55,67	9,5	0,084	52,88	8,4	0,074	47,08
13	9,5	0,079	49,87	9,7	0,091	54,70	9,6	0,084	52,56	8,4	0,074	47,03
14	9,6	0,08	49,49	10,6	0,097	50,83	9,8	0,087	51,25	8,5	0,075	46,88
15	9,9	0,082	48,08	14,0	0,099	40,49	11,0	0,092	46,73	8,6	0,076	46,37
16	11,1	0,087	43,73	21,1	0,08	29,38	14,6	0,091	36,81	9,0	0,078	44,70
17	14,4	0,085	35,06	25,5	0,079	26,14	20,9	0,076	27,84	10,2	0,082	40,26
18	19,7	0,073	27,29	24,4	0,087	27,84	24,1	0,077	25,62	13,1	0,08	32,75
19	22,7	0,073	25,02	23,5	0,086	28,29	23,2	0,082	27,01	17,3	0,072	26,72
20	22,1	0,077	26,00	23,9	0,084	27,77	22,5	0,081	27,37	19,3	0,072	25,02
21	21,5	0,077	26,48	24,1	0,085	27,73	22,8	0,08	26,99	19,0	0,074	25,58
22	21,6	0,076	26,23	24,0	0,085	27,85	22,9	0,08	26,93	18,7	0,074	25,87
23	21,8	0,076	26,12	24,0	0,085	27,84	22,9	0,081	27,01	18,7	0,074	25,77
24	21,8	0,076	26,17	24,0	0,085	27,81	22,8	0,081	27,02	18,8	0,074	25,71
25	21,7	0,076	26,20	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,72
26	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,83	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
27	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
28	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
29	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73

30	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
31	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
32	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
33	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
35	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
36	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
37	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
38	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
39	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73
40	21,7	0,076	26,18	24,0	0,085	27,82	22,9	0,081	27,00	18,8	0,074	25,73



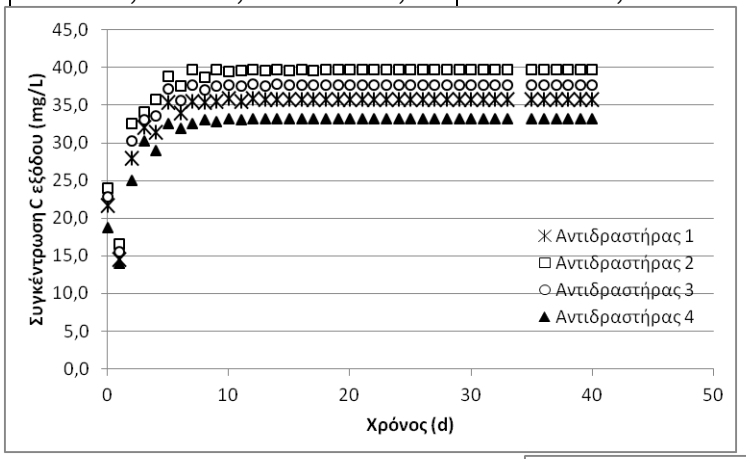


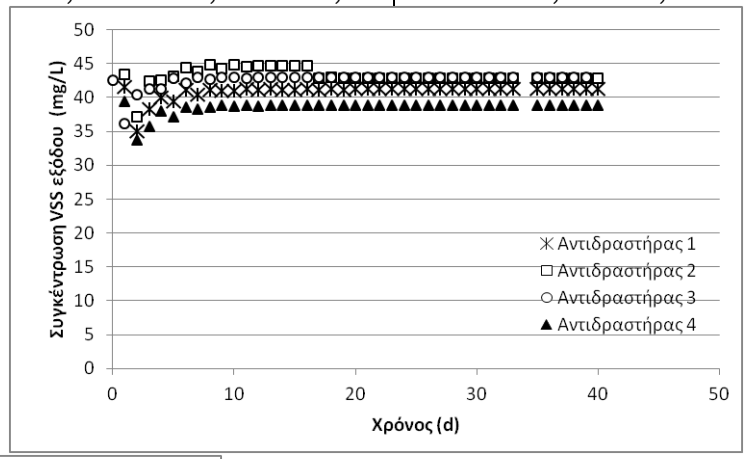


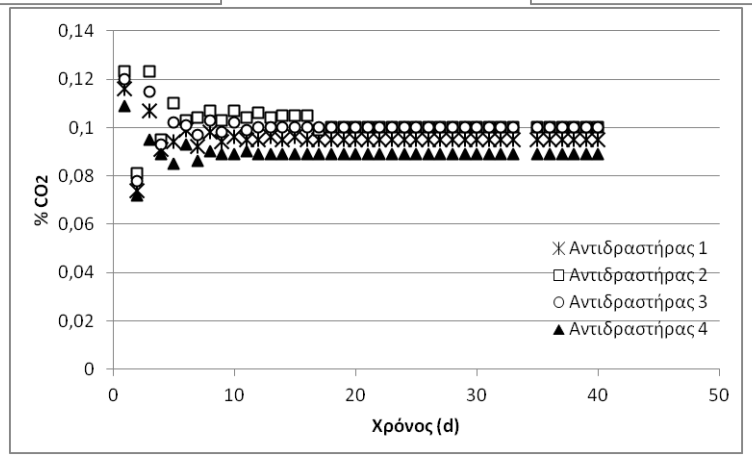
Θc 2

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	14,5	0,116	41,64	16,6	0,123	43,49	15,6	0,12	42,56	14,0	0,109	39,39
2	28,0	0,074	35,07	32,6	0,081	37,22	30,3	0,078	36,12	25,0	0,072	33,82
3	32,1	0,107	38,36	34,1	0,123	42,50	33,1	0,115	40,45	30,3	0,095	35,70
4	31,4	0,091	39,99	35,8	0,095	42,58	33,5	0,093	41,30	29,0	0,089	38,03
5	35,3	0,094	39,42	38,8	0,11	43,21	37,2	0,102	41,27	32,5	0,085	37,19
6	34,0	0,099	41,12	37,6	0,103	44,41	35,7	0,101	42,82	31,9	0,093	38,62
7	35,5	0,092	40,48	39,8	0,104	43,86	37,7	0,097	42,12	32,6	0,086	38,38
8	35,4	0,098	41,12	38,7	0,107	44,82	37,0	0,103	43,01	33,1	0,09	38,58
9	35,4	0,094	41,07	39,8	0,103	44,34	37,6	0,098	42,69	32,8	0,089	38,83
10	35,8	0,096	41,07	39,4	0,107	44,79	37,6	0,102	42,93	33,3	0,089	38,68
11	35,6	0,095	41,25	39,6	0,104	44,62	37,5	0,099	42,96	33,1	0,09	38,88
12	35,8	0,095	41,12	39,7	0,106	44,73	37,8	0,1	42,91	33,2	0,089	38,81
13	35,7	0,096	41,25	39,6	0,104	44,75	37,6	0,1	43,03	33,2	0,089	38,84
14	35,8	0,095	41,19	39,7	0,105	44,71	37,8	0,1	42,94	33,2	0,089	38,87
15	35,8	0,096	41,22	39,6	0,105	44,78	37,7	0,1	43,01	33,2	0,089	38,84
16	35,8	0,095	41,23	39,7	0,105	44,72	37,7	0,1	42,97	33,2	0,089	38,87
17	35,8	0,095	41,22	39,7	0,099	42,85	37,7	0,1	43,00	33,2	0,089	38,86
18	35,8	0,095	41,24	39,7	0,1	42,95	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
19	35,8	0,095	41,22	39,7	0,1	42,90	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,87
20	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,90	37,7	0,1	43,00	33,2	0,089	38,86
21	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,93	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,87
22	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,90	37,7	0,1	43,00	33,2	0,089	38,86
23	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,93	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
24	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
25	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
26	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,92	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
27	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
28	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,92	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
29	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86

30	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
31	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
32	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
33	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
35	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
36	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
37	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
38	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
39	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86
40	35,8	0,095	41,23	39,7	0,1	42,91	37,7	0,1	42,99	33,2	0,089	38,86



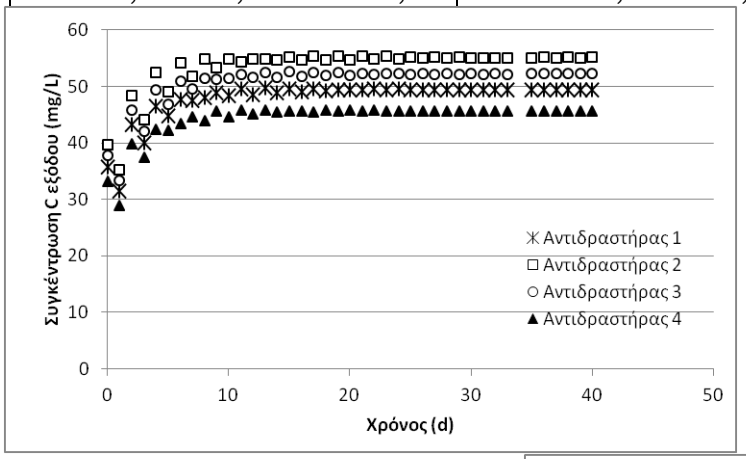


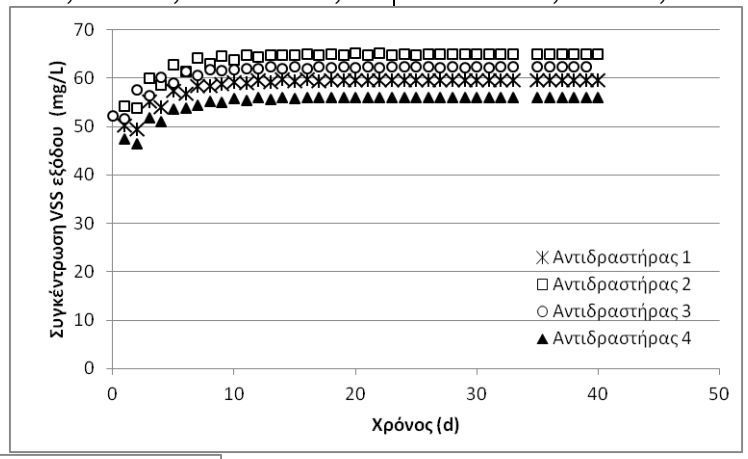


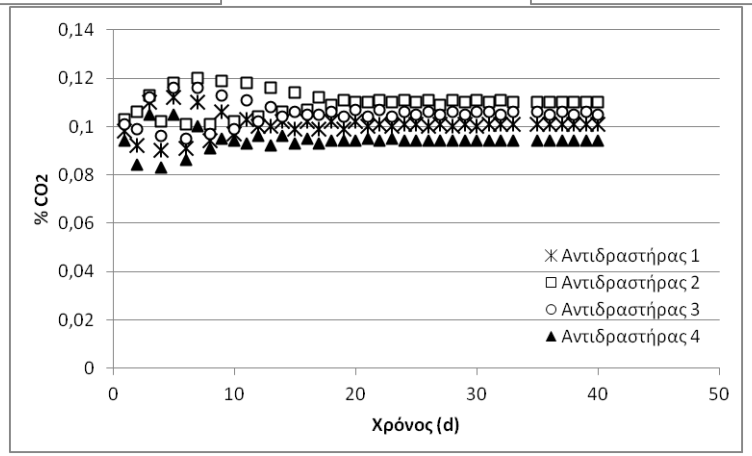
Θc 3

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	Αντιδραστήρας Α CO2 (%)	Αντιδραστήρας Α VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	Αντιδραστήρας Β CO2 (%)	Αντιδραστήρας Β VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ CO2 (%)	Αντιδραστήρας Γ VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ CO2 (%)	Αντιδραστήρας Δ VSS (mg/L)
1	31,4	0,098	50,21	35,2	0,103	54,31	33,3	0,101	52,26	29,0	0,094	47,44
2	43,2	0,092	49,39	48,3	0,106	53,79	45,8	0,099	51,58	39,8	0,084	46,49
3	39,9	0,11	55,23	44,1	0,113	60,06	42,0	0,112	57,68	37,4	0,105	51,88
4	46,4	0,09	54,11	52,5	0,102	58,70	49,5	0,096	56,39	42,4	0,083	51,12
5	44,8	0,112	57,47	49,0	0,118	62,88	46,8	0,116	60,22	42,2	0,105	53,71
6	47,6	0,091	56,81	54,2	0,101	61,40	50,9	0,095	59,09	43,4	0,086	53,75
7	47,6	0,11	58,40	51,7	0,12	64,16	49,6	0,116	61,31	44,6	0,1	54,52
8	48,1	0,094	58,34	54,8	0,101	62,95	51,4	0,097	60,65	44,0	0,091	55,16
9	49,0	0,106	58,79	53,4	0,119	64,68	51,2	0,113	61,73	45,6	0,095	55,00
10	48,3	0,097	59,17	54,9	0,102	63,86	51,5	0,099	61,55	44,5	0,094	55,79
11	49,6	0,103	59,01	54,3	0,118	64,83	52,1	0,111	61,88	45,8	0,093	55,38
12	48,6	0,1	59,57	54,8	0,104	64,42	51,5	0,102	62,06	45,1	0,096	56,00
13	49,7	0,1	59,18	54,9	0,116	64,85	52,5	0,108	61,94	45,7	0,092	55,68
14	48,8	0,102	59,71	54,7	0,106	64,75	51,6	0,104	62,32	45,5	0,096	56,01
15	49,6	0,099	59,33	55,2	0,114	64,82	52,6	0,106	62,00	45,6	0,093	55,90
16	49,1	0,102	59,72	54,7	0,107	64,94	51,7	0,105	62,42	45,7	0,095	55,98
17	49,5	0,099	59,46	55,4	0,112	64,80	52,5	0,105	62,06	45,5	0,093	56,03
18	49,3	0,102	59,68	54,7	0,109	65,05	51,9	0,106	62,44	45,8	0,094	55,97
19	49,4	0,099	59,57	55,4	0,111	64,80	52,4	0,104	62,13	45,6	0,094	56,08
20	49,4	0,102	59,63	54,7	0,11	65,09	52,0	0,107	62,41	45,8	0,094	55,98
21	49,3	0,1	59,63	55,4	0,11	64,81	52,3	0,104	62,20	45,6	0,095	56,09
22	49,5	0,101	59,61	54,8	0,111	65,09	52,1	0,107	62,37	45,7	0,094	56,01
23	49,3	0,1	59,67	55,3	0,11	64,84	52,3	0,104	62,26	45,7	0,095	56,07
24	49,5	0,101	59,60	54,9	0,111	65,08	52,2	0,106	62,34	45,7	0,094	56,04
25	49,3	0,101	59,67	55,2	0,11	64,87	52,2	0,105	62,30	45,7	0,094	56,05
26	49,5	0,1	59,61	54,9	0,111	65,05	52,3	0,106	62,31	45,7	0,094	56,06
27	49,3	0,101	59,67	55,2	0,109	64,90	52,2	0,105	62,32	45,7	0,094	56,04
28	49,4	0,1	59,62	55,0	0,111	65,02	52,3	0,106	62,29	45,7	0,094	56,06
29	49,4	0,101	59,66	55,1	0,11	64,93	52,2	0,105	62,34	45,7	0,094	56,04
30	49,4	0,1	59,63	55,1	0,111	65,00	52,3	0,106	62,29	45,7	0,094	56,06

31	49,4	0,101	59,65	55,1	0,11	64,95	52,2	0,106	62,34	45,7	0,094	56,05
32	49,4	0,101	59,64	55,1	0,111	64,98	52,3	0,105	62,29	45,7	0,094	56,06
33	49,4	0,101	59,64	55,1	0,11	64,97	52,2	0,106	62,33	45,7	0,094	56,05
35	49,4	0,101	59,64	55,1	0,11	64,98	52,2	0,106	62,33	45,7	0,094	56,06
36	49,4	0,101	59,65	55,1	0,11	64,96	52,2	0,105	62,30	45,7	0,094	56,05
37	49,4	0,101	59,64	55,1	0,11	64,98	52,2	0,106	62,32	45,7	0,094	56,06
38	49,4	0,101	59,65	55,1	0,11	64,96	52,2	0,105	62,31	45,7	0,094	56,05
39	49,4	0,101	59,64	55,1	0,11	64,98	52,2	0,106	62,32	45,7	0,094	56,06
40	49,4	0,101	59,65	55,1	0,11	64,96	52,2	0,105	62,31	45,7	0,094	56,05





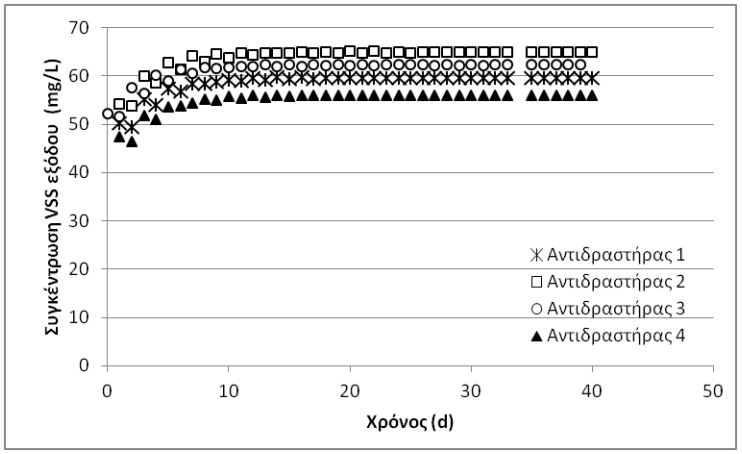


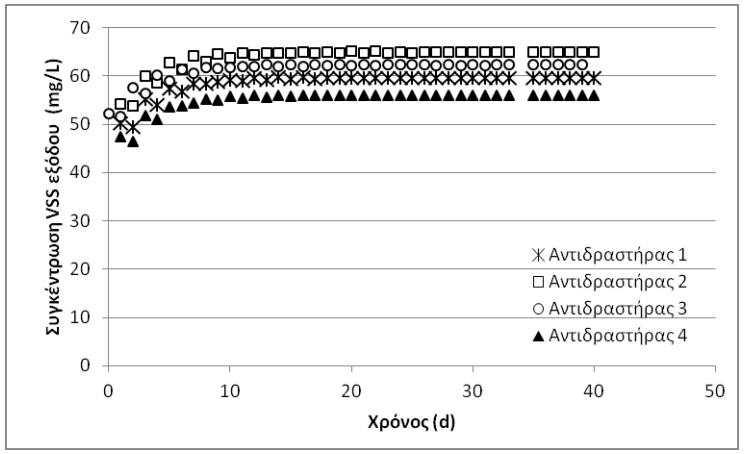
Θc 4

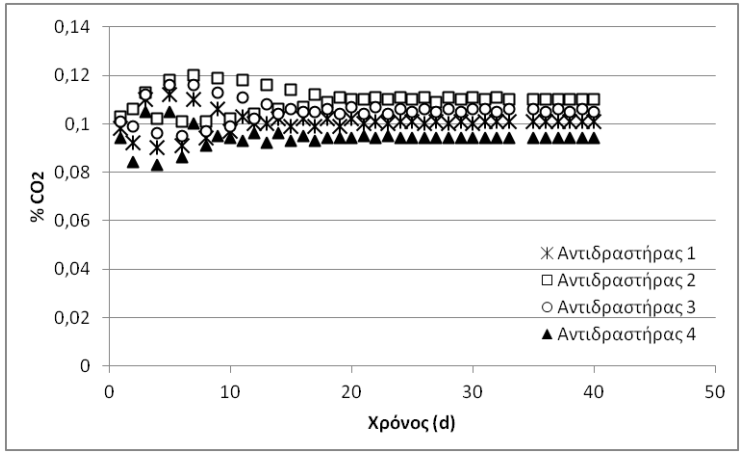
Αντιδραστήρας Α **Αντιδραστήρας Β** **Αντιδραστήρας Γ** **Αντιδραστήρας Δ**

χρόνος (d)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	40,0	0,087	68,98	45,1	0,089	74,96	42,5	0,088	71,98	36,68	0,085	64,94
2	54,2	0,11	67,37	60,6	0,131	73,61	57,4	0,12	70,48	49,93	0,098	63,22
3	46,2	0,095	74,09	52,3	0,091	80,31	49,2	0,093	77,24	42,54	0,096	69,79
4	57,2	0,107	71,98	64,1	0,132	78,73	60,7	0,119	75,32	52,39	0,093	67,62
5	50,0	0,101	77,18	56,6	0,093	83,59	53,2	0,097	80,45	46,31	0,103	72,60
6	58,8	0,104	74,81	66,1	0,132	81,84	62,6	0,117	78,25	53,61	0,09	70,40
7	52,4	0,105	79,02	59,2	0,095	85,58	55,6	0,101	82,40	48,86	0,108	74,16
8	59,7	0,101	76,59	67,2	0,132	83,74	63,6	0,115	80,05	54,07	0,089	72,20
9	54,0	0,109	80,07	60,8	0,097	86,77	57,1	0,104	83,57	50,64	0,11	74,97
10	60,0	0,1	77,73	67,7	0,131	84,93	64,1	0,113	81,18	54,12	0,088	73,41
11	55,1	0,111	80,65	61,8	0,098	87,48	58,1	0,106	84,25	51,91	0,11	75,35
12	60,0	0,099	78,50	68,0	0,13	85,68	64,3	0,112	81,91	53,98	0,089	74,24
13	55,9	0,113	80,93	62,4	0,1	87,89	58,7	0,108	84,64	52,82	0,109	75,49
14	59,8	0,098	79,03	68,0	0,129	86,17	64,3	0,11	82,39	53,77	0,09	74,81
15	56,5	0,113	81,03	62,9	0,101	88,11	59,2	0,11	84,84	53,44	0,107	75,51
16	59,6	0,098	79,41	68,0	0,128	86,50	64,2	0,109	82,72	53,59	0,092	75,20
17	57,0	0,114	81,04	63,2	0,102	88,23	59,6	0,111	84,93	53,85	0,105	75,48
18	59,4	0,098	79,69	67,9	0,128	86,73	64,0	0,109	82,96	53,45	0,094	75,47
19	57,4	0,114	80,99	63,5	0,103	88,28	59,9	0,112	84,95	54,09	0,104	75,46
20	59,2	0,098	79,91	67,7	0,127	86,89	63,8	0,108	83,13	53,37	0,096	75,64
21	57,7	0,113	80,92	63,7	0,104	88,29	60,2	0,113	84,94	54,21	0,102	75,44
22	59,0	0,099	80,08	67,6	0,126	87,01	63,7	0,108	83,27	53,35	0,097	75,74
23	58,0	0,113	80,84	63,9	0,105	88,28	60,4	0,113	84,90	54,25	0,101	75,43
24	58,8	0,1	80,21	67,4	0,126	87,11	63,5	0,107	83,39	53,38	0,098	75,79
25	58,2	0,112	80,76	64,1	0,105	88,26	60,6	0,114	84,84	54,23	0,099	75,45
26	58,6	0,1	80,32	67,3	0,125	87,19	63,3	0,107	83,48	53,44	0,099	75,81
27	58,4	0,111	80,69	64,2	0,106	88,22	60,8	0,114	84,79	54,17	0,099	75,47
28	58,5	0,101	80,40	67,2	0,124	87,25	63,2	0,107	83,57	53,51	0,1	75,80
29	58,5	0,11	80,63	64,3	0,107	88,19	61,0	0,114	84,73	54,10	0,098	75,50
30	58,4	0,102	80,47	67,0	0,124	87,31	63,0	0,107	83,64	53,59	0,1	75,78
31	58,6	0,109	80,58	64,4	0,107	88,16	61,1	0,114	84,67	54,03	0,098	75,54

32	58,4	0,103	80,52	66,9	0,124	87,36	62,9	0,107	83,70	53,67	0,1	75,75
33	58,6	0,099	76,33	64,5	0,108	88,12	61,2	0,114	84,62	53,96	0,098	75,57
35	58,7	0,099	76,40	64,6	0,108	88,09	61,3	0,114	84,57	53,90	0,098	75,60
36	58,3	0,101	76,34	66,7	0,123	87,45	62,7	0,107	83,81	53,79	0,1	75,70
37	58,7	0,1	76,45	64,7	0,109	88,06	61,4	0,114	84,52	53,86	0,098	75,63
38	58,3	0,1	76,31	66,6	0,122	87,48	62,6	0,107	83,86	53,83	0,1	75,68
39	58,7	0,101	76,47	64,8	0,109	88,03	61,5	0,114	84,48	53,82	0,098	75,65
40	58,3	0,099	76,31	66,5	0,122	87,51	62,5	0,108	83,90	53,86	0,1	75,66
41	58,7	0,101	76,45	64,9	0,11	88,01	61,6	0,114	84,44	53,80	0,099	75,66
42	58,3	0,099	76,34	66,4	0,121	87,54	62,4	0,108	83,94	53,87	0,1	75,65
43	58,7	0,101	76,41	65,0	0,11	87,98	61,7	0,114	84,40	53,79	0,099	75,67
44	58,3	0,099	76,39	66,4	0,121	87,57	62,4	0,108	83,97	53,88	0,099	75,65
45	58,7	0,101	76,36	65,0	0,11	87,96	61,7	0,113	84,37	53,79	0,099	75,68
46	58,3	0,1	76,43	66,3	0,121	87,59	62,3	0,108	84,00	53,88	0,099	75,64
47	58,6	0,1	76,33	65,1	0,111	87,94	61,8	0,113	84,34	53,79	0,099	75,68
48	58,3	0,1	76,45	66,2	0,12	87,61	62,3	0,108	84,03	53,88	0,099	75,64
49	58,6	0,1	76,33	65,1	0,111	87,92	61,8	0,113	84,32	53,80	0,099	75,68
50	58,3	0,101	76,44	66,2	0,12	87,63	62,2	0,109	84,05	53,87	0,099	75,64
51	58,6	0,099	76,35	65,2	0,111	87,91	61,9	0,113	84,30	53,80	0,099	75,68
52	58,4	0,101	76,40	66,1	0,12	87,65	62,2	0,109	84,07	53,86	0,099	75,65
53	58,6	0,1	76,39	65,2	0,112	87,89	61,9	0,113	84,28	53,81	0,099	75,67


Συγκέντρωση VSS εξόδου (mg/L)
Χρόνος (d)
Αντιδραστήρας 1
Αντιδραστήρας 2
Αντιδραστήρας 3
Αντιδραστήρας 4

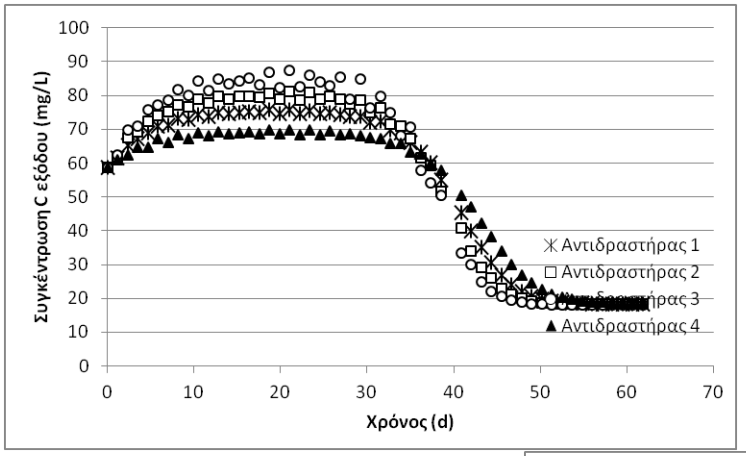

Συγκέντρωση VSS εξόδου (mg/L)
Χρόνος (d)
Αντιδραστήρας 1
Αντιδραστήρας 2
Αντιδραστήρας 3
Αντιδραστήρας 4

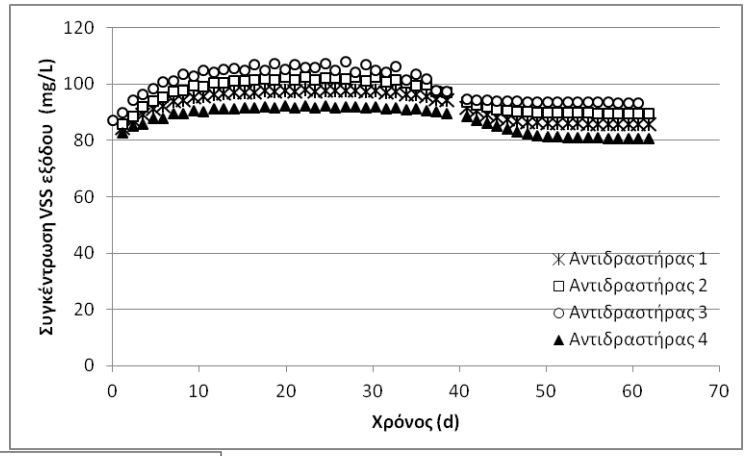

% CO2
Χρόνος (d)
Αντιδραστήρας 1
Αντιδραστήρας 2
Αντιδραστήρας 3
Αντιδραστήρας 4

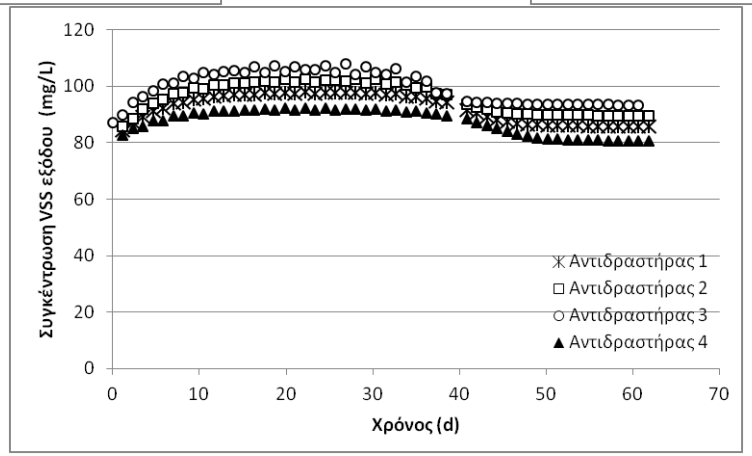
Θc 5

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	61,6	0,102	84,41	61,9	0,11	85,76	62,3	0,118	87,13	60,9	0,091	82,66
2	65,1	0,108	87,11	67,4	0,111	88,58	69,7	0,114	90,04	62,3	0,105	85,09
4	67,3	0,101	89,32	69,2	0,106	91,86	71,0	0,109	94,34	64,8	0,093	85,90
5	69,0	0,108	91,30	72,4	0,114	93,85	75,7	0,123	96,46	64,6	0,103	87,94
6	70,9	0,102	92,38	74,0	0,104	95,53	77,3	0,104	98,50	67,2	0,095	88,00
7	71,3	0,107	93,93	75,1	0,115	97,27	78,5	0,125	100,78	66,1	0,1	89,65
8	73,1	0,103	94,34	77,1	0,105	97,78	81,7	0,106	100,99	68,4	0,098	89,41
9	72,8	0,105	95,53	76,7	0,113	99,41	80,1	0,12	103,45	67,2	0,097	90,62
11	74,3	0,106	95,65	79,0	0,108	99,27	84,2	0,113	102,70	69,0	0,101	90,40
12	73,9	0,103	96,44	77,8	0,109	100,62	81,5	0,111	104,80	68,0	0,095	91,14
13	74,9	0,108	96,56	79,8	0,113	100,38	85,0	0,122	104,20	69,1	0,103	91,13
14	74,7	0,102	96,93	78,8	0,105	101,19	83,3	0,103	105,20	68,7	0,094	91,37
15	75,0	0,109	97,22	79,9	0,116	101,28	84,3	0,129	105,64	69,0	0,104	91,66
16	75,3	0,102	97,18	79,8	0,103	101,36	85,3	0,101	105,08	69,3	0,093	91,47
18	74,9	0,109	97,66	79,5	0,117	102,00	83,1	0,128	106,80	68,7	0,104	92,02
19	75,7	0,103	97,32	80,7	0,104	101,38	86,9	0,105	104,91	69,7	0,095	91,51
20	74,8	0,107	97,91	79,0	0,115	102,44	82,2	0,118	107,32	68,5	0,102	92,23
21	75,8	0,105	97,43	81,1	0,108	101,43	87,3	0,117	105,10	69,9	0,097	91,56
22	74,7	0,105	97,98	78,7	0,11	102,54	82,6	0,105	107,03	68,4	0,1	92,29
23	75,6	0,107	97,57	80,8	0,114	101,64	86,0	0,133	105,92	69,8	0,099	91,64
25	74,6	0,103	97,88	78,8	0,105	102,30	83,9	0,096	106,11	68,3	0,098	92,22
26	75,0	0,11	97,72	79,6	0,12	102,02	82,8	0,141	107,14	69,4	0,102	91,74
27	74,4	0,103	97,66	78,9	0,103	101,79	85,3	0,098	104,95	68,2	0,096	92,04
28	73,9	0,112	97,82	77,6	0,123	102,38	79,0	0,133	107,87	68,6	0,104	91,85
29	73,8	0,105	97,35	78,5	0,107	101,19	85,0	0,116	104,19	68,0	0,096	91,78
30	72,2	0,112	97,74	74,9	0,121	102,35	76,3	0,113	107,04	67,5	0,106	91,89
32	72,3	0,11	96,97	76,3	0,119	100,72	79,9	0,15	104,76	67,3	0,098	91,43
33	69,7	0,113	97,30	71,6	0,116	101,49	74,8	0,102	104,37	65,8	0,107	91,75
34	69,0	0,118	96,53	70,8	0,135	100,53	68,2	0,166	106,20	65,7	0,102	91,00

35	66,0	0,115	96,31	67,3	0,119	99,60	70,6	0,13	101,34	63,3	0,108	91,31
36	63,3	0,127	95,84	61,6	0,144	99,93	57,7	0,132	103,43	62,8	0,11	90,45
37	60,2	0,124	94,74	59,3	0,141	97,52	54,2	0,19	101,99	59,7	0,11	90,39
39	55,0	0,134	94,35	51,5	0,139	97,07	50,4	0,146	97,69	57,7	0,118	89,69
41	45,4	0,139	91,69	40,9	0,154	93,64	33,5	0,183	97,41	50,6	0,126	88,40
42	39,8	0,148	90,66	34,0	0,154	92,79	30,1	0,167	94,69	47,2	0,126	87,05
43	35,2	0,148	89,14	29,2	0,161	91,93	24,9	0,162	94,49	42,2	0,13	86,26
44	30,5	0,148	88,14	25,9	0,158	90,82	22,1	0,166	94,42	38,1	0,135	85,13
46	26,7	0,149	87,43	22,9	0,156	90,46	20,6	0,164	93,99	34,0	0,135	83,94
47	24,0	0,148	86,82	21,1	0,156	90,27	19,4	0,162	93,93	30,0	0,137	83,18
48	22,0	0,147	86,51	19,9	0,155	90,10	18,8	0,162	93,89	27,0	0,137	82,39
49	20,6	0,147	86,33	19,2	0,154	90,02	18,5	0,162	93,81	24,5	0,136	81,84
50	19,7	0,146	86,20	18,8	0,154	89,95	18,3	0,161	93,75	22,5	0,136	81,52
51	19,2	0,146	86,12	18,5	0,153	89,89	18,2	0,161	93,69	21,2	0,136	81,27
53	18,8	0,145	86,05	18,4	0,153	89,83	18,2	0,161	93,64	20,3	0,135	81,13
54	18,6	0,145	86,00	18,3	0,153	89,79	18,2	0,161	93,60	19,6	0,135	81,02
55	18,5	0,145	85,95	18,3	0,153	89,75	18,2	0,161	93,57	19,2	0,135	80,95
56	18,5	0,145	85,91	18,3	0,153	89,71	18,2	0,161	93,54	19,0	0,135	80,89
57	18,5	0,145	85,87	18,3	0,153	89,69	18,2	0,161	93,52	18,8	0,134	80,84
58	18,4	0,145	85,85	18,3	0,153	89,66	18,2	0,161	93,50	18,7	0,134	80,80
60	18,4	0,145	85,83	18,3	0,153	89,65	18,2	0,161	93,48	18,7	0,134	80,76
61	18,4	0,145	85,81	18,3	0,153	89,63	18,2	0,161	93,47	18,7	0,134	80,74
62	18,4	0,145	85,79	18,3	0,153	89,62	18,2	0,161	93,46	18,6	0,134	80,72


Συγκέντρωση C εξόδου (mg/L)
Χρόνος (d)
Αντιδραστήρας 1
Αντιδραστήρας 2
Αντιδραστήρας 3
Αντιδραστήρας 4

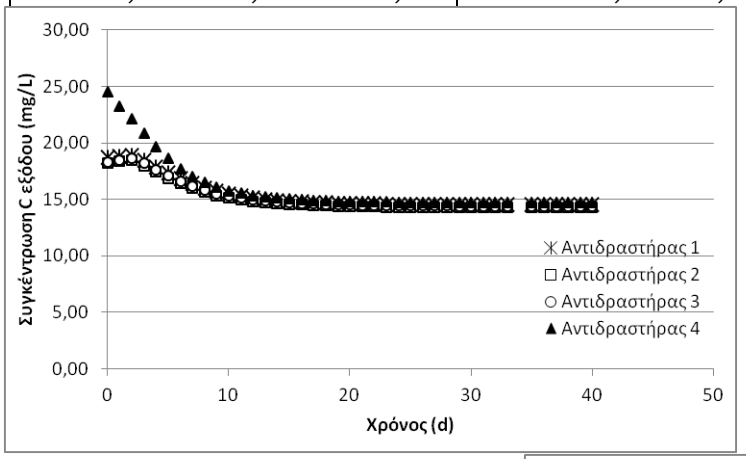

Συγκέντρωση VSS εξόδου (mg/L)
Χρόνος (d)
Αντιδραστήρας 1
Αντιδραστήρας 2
Αντιδραστήρας 3
Αντιδραστήρας 4

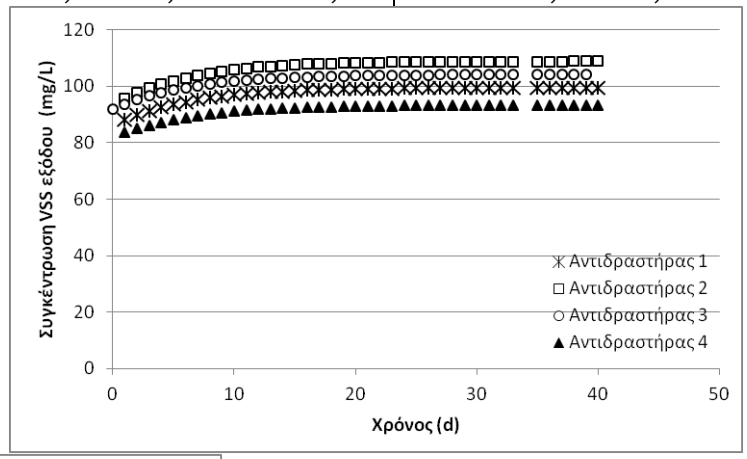

Συγκέντρωση VSS εξόδου (mg/L)
Χρόνος (d)
Αντιδραστήρας 1
Αντιδραστήρας 2
Αντιδραστήρας 3
Αντιδραστήρας 4

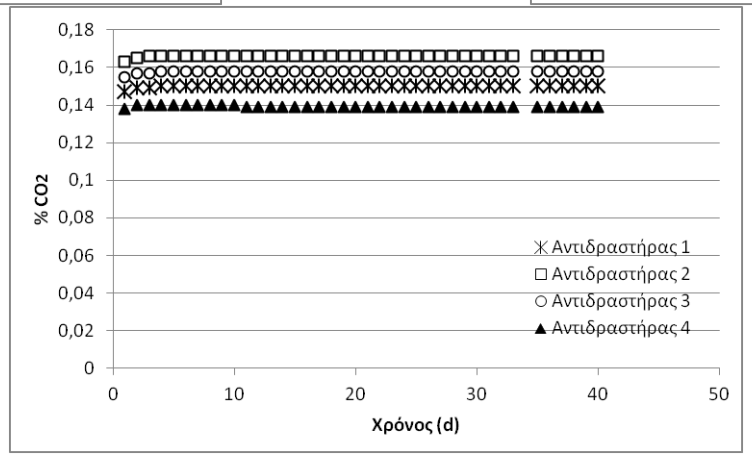
Θc 6

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	18,8	0,147	88,21	18,4	0,163	95,85	18,5	0,155	92,01	23,2	0,138	83,74
2	18,9	0,149	89,81	18,4	0,165	97,67	18,6	0,157	93,71	22,2	0,14	85,06
3	18,4	0,149	91,26	18,0	0,166	99,31	18,2	0,157	95,26	20,8	0,14	86,25
4	17,9	0,15	92,49	17,4	0,166	100,74	17,7	0,158	96,59	19,6	0,14	87,27
5	17,3	0,15	93,54	16,9	0,166	101,97	17,1	0,158	97,73	18,6	0,14	88,16
6	16,8	0,15	94,46	16,4	0,166	103,03	16,6	0,158	98,73	17,7	0,14	88,95
7	16,4	0,15	95,25	16,0	0,166	103,94	16,2	0,158	99,58	17,0	0,14	89,63
8	16,0	0,15	95,92	15,6	0,166	104,72	15,8	0,158	100,30	16,5	0,14	90,22
9	15,7	0,15	96,49	15,3	0,166	105,38	15,5	0,158	100,92	16,1	0,14	90,72
10	15,5	0,15	96,98	15,1	0,166	105,93	15,3	0,158	101,44	15,8	0,14	91,14
11	15,3	0,15	97,38	15,0	0,166	106,40	15,1	0,158	101,88	15,5	0,139	91,50
12	15,1	0,15	97,73	14,8	0,166	106,79	15,0	0,158	102,25	15,3	0,139	91,80
13	15,0	0,15	98,01	14,7	0,166	107,12	14,9	0,158	102,56	15,2	0,139	92,04
14	14,9	0,15	98,25	14,6	0,166	107,40	14,8	0,158	102,82	15,1	0,139	92,25
15	14,8	0,15	98,46	14,6	0,166	107,63	14,7	0,158	103,03	15,0	0,139	92,43
16	14,8	0,15	98,63	14,5	0,166	107,83	14,6	0,158	103,22	15,0	0,139	92,57
17	14,7	0,15	98,77	14,5	0,166	107,99	14,6	0,158	103,37	14,9	0,139	92,70
18	14,7	0,15	98,89	14,4	0,166	108,13	14,6	0,158	103,50	14,9	0,139	92,80
19	14,7	0,15	98,99	14,4	0,166	108,24	14,5	0,158	103,61	14,8	0,139	92,88
20	14,6	0,15	99,08	14,4	0,166	108,34	14,5	0,158	103,70	14,8	0,139	92,96
21	14,6	0,15	99,15	14,3	0,166	108,42	14,5	0,158	103,78	14,8	0,139	93,02
22	14,6	0,15	99,21	14,3	0,166	108,49	14,5	0,158	103,84	14,8	0,139	93,07
23	14,6	0,15	99,26	14,3	0,166	108,55	14,5	0,158	103,90	14,8	0,139	93,11
24	14,6	0,15	99,30	14,3	0,166	108,60	14,4	0,158	103,94	14,7	0,139	93,15
25	14,6	0,15	99,34	14,3	0,166	108,64	14,4	0,158	103,98	14,7	0,139	93,18
26	14,6	0,15	99,37	14,3	0,166	108,68	14,4	0,158	104,01	14,7	0,139	93,20
27	14,6	0,15	99,39	14,3	0,166	108,70	14,4	0,158	104,04	14,7	0,139	93,23
28	14,5	0,15	99,41	14,3	0,166	108,73	14,4	0,158	104,06	14,7	0,139	93,24
29	14,5	0,15	99,43	14,3	0,166	108,75	14,4	0,158	104,08	14,7	0,139	93,26

30	14,5	0,15	99,45	14,3	0,166	108,77	14,4	0,158	104,10	14,7	0,139	93,27
31	14,5	0,15	99,46	14,3	0,166	108,78	14,4	0,158	104,11	14,7	0,139	93,28
32	14,5	0,15	99,47	14,3	0,166	108,79	14,4	0,158	104,12	14,7	0,139	93,29
33	14,5	0,15	99,48	14,3	0,166	108,81	14,4	0,158	104,13	14,7	0,139	93,30
35	14,5	0,15	99,49	14,3	0,166	108,82	14,4	0,158	104,15	14,7	0,139	93,31
36	14,5	0,15	99,50	14,3	0,166	108,83	14,4	0,158	104,16	14,7	0,139	93,32
37	14,5	0,15	99,50	14,3	0,166	108,83	14,4	0,158	104,16	14,7	0,139	93,32
38	14,5	0,15	99,51	14,3	0,166	108,84	14,4	0,158	104,16	14,7	0,139	93,32
39	14,5	0,15	99,51	14,3	0,166	108,84	14,4	0,158	104,17	14,7	0,139	93,33
40	14,5	0,15	99,51	14,3	0,166	108,84	14,4	0,158	104,17	14,7	0,139	93,33



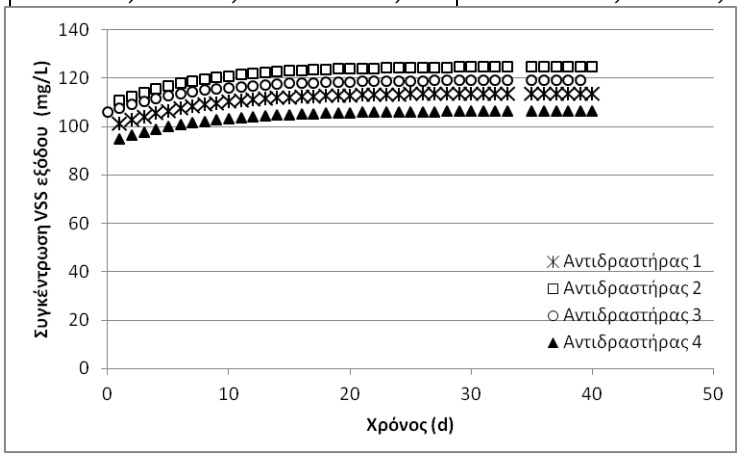


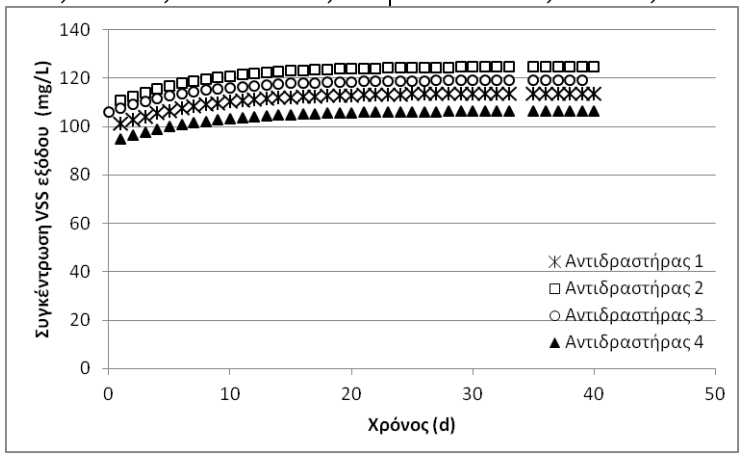


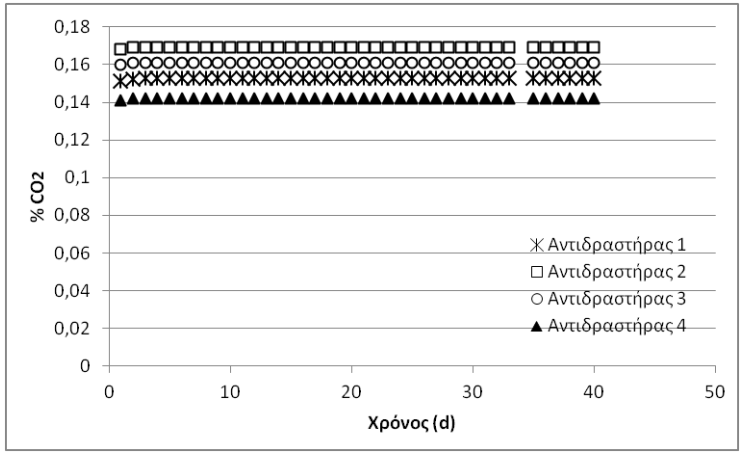
Θc 7

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	14,6	0,151	101,38	14,3	0,168	110,87	14,5	0,16	106,12	14,8	0,141	95,09
2	14,6	0,152	102,83	14,3	0,169	112,50	14,5	0,161	107,66	14,8	0,142	96,42
3	14,3	0,153	104,26	14,0	0,169	114,11	14,1	0,161	109,18	14,5	0,142	97,75
4	14,0	0,153	105,52	13,6	0,169	115,54	13,8	0,161	110,52	14,2	0,142	98,89
5	13,6	0,153	106,64	13,3	0,169	116,80	13,4	0,161	111,71	13,9	0,142	99,92
6	13,3	0,153	107,62	13,0	0,169	117,90	13,2	0,161	112,75	13,6	0,142	100,82
7	13,1	0,153	108,48	12,8	0,169	118,86	12,9	0,161	113,66	13,3	0,142	101,60
8	12,9	0,153	109,21	12,6	0,169	119,68	12,7	0,161	114,44	13,1	0,142	102,28
9	12,7	0,153	109,85	12,4	0,169	120,39	12,6	0,161	115,11	12,9	0,142	102,87
10	12,6	0,153	110,40	12,3	0,169	121,00	12,4	0,161	115,69	12,8	0,142	103,38
11	12,5	0,153	110,87	12,2	0,169	121,53	12,3	0,161	116,19	12,7	0,142	103,81
12	12,4	0,153	111,28	12,1	0,169	121,98	12,3	0,161	116,62	12,6	0,142	104,19
13	12,3	0,153	111,63	12,0	0,169	122,38	12,2	0,161	116,99	12,5	0,142	104,51
14	12,3	0,153	111,93	12,0	0,169	122,71	12,1	0,161	117,31	12,4	0,142	104,79
15	12,2	0,153	112,19	11,9	0,169	123,00	12,1	0,161	117,58	12,4	0,142	105,03
16	12,2	0,153	112,41	11,9	0,169	123,25	12,0	0,161	117,82	12,3	0,142	105,24
17	12,1	0,153	112,61	11,9	0,169	123,47	12,0	0,161	118,03	12,3	0,142	105,42
18	12,1	0,153	112,77	11,8	0,169	123,65	12,0	0,161	118,20	12,3	0,142	105,57
19	12,1	0,153	112,92	11,8	0,169	123,81	12,0	0,161	118,35	12,3	0,142	105,70
20	12,1	0,153	113,04	11,8	0,169	123,95	11,9	0,161	118,48	12,2	0,142	105,82
21	12,0	0,153	113,15	11,8	0,169	124,07	11,9	0,161	118,60	12,2	0,142	105,92
22	12,0	0,153	113,24	11,8	0,169	124,17	11,9	0,161	118,69	12,2	0,142	106,00
23	12,0	0,153	113,32	11,8	0,169	124,26	11,9	0,161	118,78	12,2	0,142	106,07
24	12,0	0,153	113,39	11,8	0,169	124,34	11,9	0,161	118,85	12,2	0,142	106,14
25	12,0	0,153	113,45	11,7	0,169	124,40	11,9	0,161	118,91	12,2	0,142	106,19
26	12,0	0,153	113,50	11,7	0,169	124,46	11,9	0,161	118,97	12,2	0,142	106,24
27	12,0	0,153	113,54	11,7	0,169	124,51	11,9	0,161	119,01	12,2	0,142	106,28
28	12,0	0,153	113,58	11,7	0,169	124,55	11,9	0,161	119,05	12,2	0,142	106,31
29	12,0	0,153	113,61	11,7	0,169	124,59	11,9	0,161	119,09	12,2	0,142	106,34
30	12,0	0,153	113,64	11,7	0,169	124,62	11,9	0,161	119,12	12,1	0,142	106,37

31	12,0	0,153	113,66	11,7	0,169	124,65	11,8	0,161	119,14	12,1	0,142	106,39
32	12,0	0,153	113,68	11,7	0,169	124,67	11,8	0,161	119,17	12,1	0,142	106,41
33	12,0	0,153	113,70	11,7	0,169	124,69	11,8	0,161	119,19	12,1	0,142	106,43
35	12,0	0,153	113,73	11,7	0,169	124,72	11,8	0,161	119,22	12,1	0,142	106,45
36	12,0	0,153	113,74	11,7	0,169	124,74	11,8	0,161	119,23	12,1	0,142	106,46
37	12,0	0,153	113,75	11,7	0,169	124,75	11,8	0,161	119,24	12,1	0,142	106,47
38	12,0	0,153	113,76	11,7	0,169	124,76	11,8	0,161	119,25	12,1	0,142	106,48
39	12,0	0,153	113,77	11,7	0,169	124,77	11,8	0,161	119,26	12,1	0,142	106,49
40	12,0	0,153	113,78	11,7	0,169	124,77	11,8	0,161	119,26	12,1	0,142	106,50



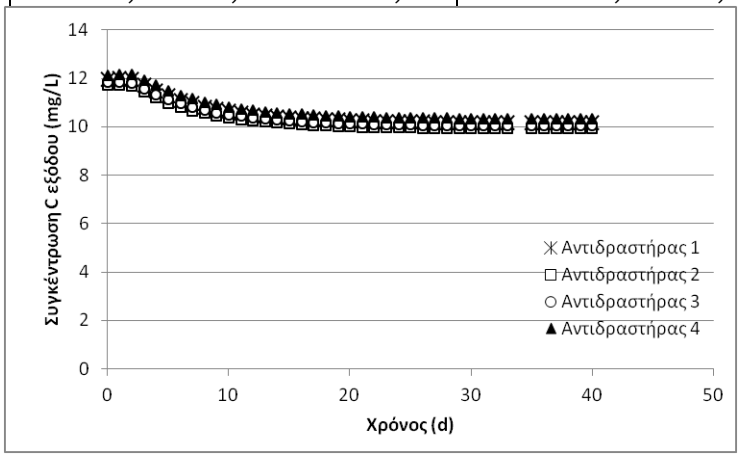


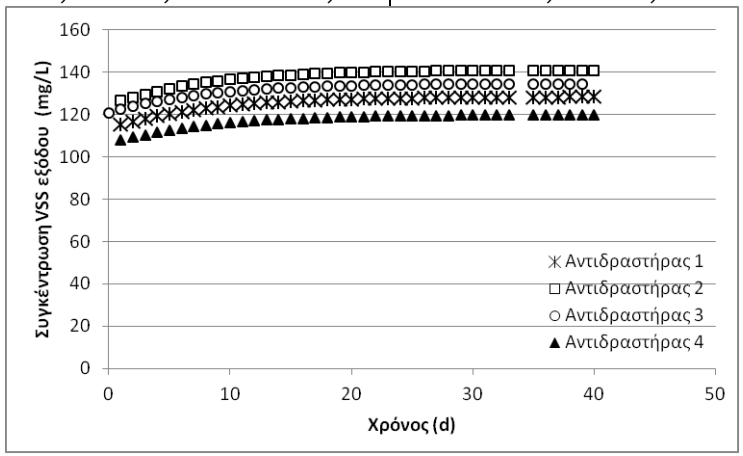


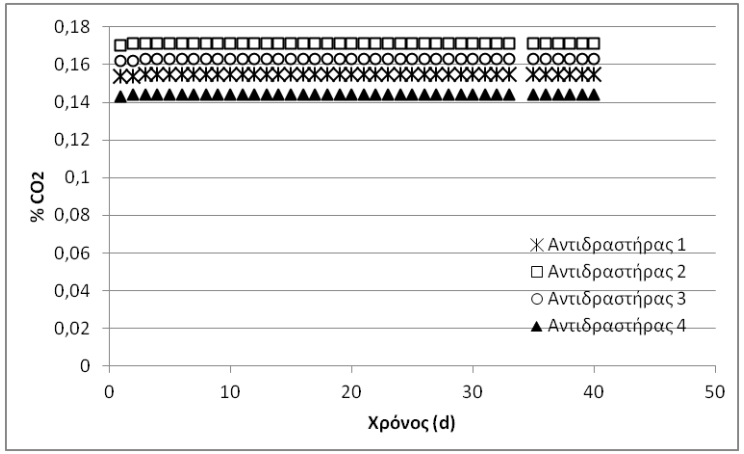
Θc 8

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	12,0	0,154	115,43	11,7	0,17	126,58	11,9	0,162	120,99	12,2	0,143	108,05
2	12,0	0,154	116,74	11,7	0,171	128,06	11,8	0,162	122,39	12,2	0,144	109,25
3	11,7	0,155	118,12	11,4	0,171	129,62	11,6	0,163	123,85	11,9	0,144	110,52
4	11,5	0,155	119,35	11,2	0,171	131,01	11,3	0,163	125,16	11,7	0,144	111,64
5	11,3	0,155	120,45	11,0	0,171	132,24	11,1	0,163	126,33	11,5	0,144	112,66
6	11,1	0,155	121,42	10,8	0,171	133,32	11,0	0,163	127,36	11,3	0,144	113,55
7	10,9	0,155	122,28	10,7	0,171	134,27	10,8	0,163	128,26	11,1	0,144	114,34
8	10,8	0,155	123,03	10,5	0,171	135,11	10,7	0,163	129,05	11,0	0,144	115,04
9	10,7	0,155	123,68	10,5	0,171	135,84	10,6	0,163	129,75	10,9	0,144	115,64
10	10,6	0,155	124,26	10,4	0,171	136,48	10,5	0,163	130,36	10,8	0,144	116,18
11	10,6	0,155	124,76	10,3	0,171	137,05	10,4	0,163	130,89	10,7	0,144	116,64
12	10,5	0,155	125,21	10,2	0,171	137,54	10,4	0,163	131,36	10,7	0,144	117,05
13	10,5	0,155	125,60	10,2	0,171	137,97	10,3	0,163	131,77	10,6	0,144	117,41
14	10,4	0,155	125,94	10,2	0,171	138,35	10,3	0,163	132,13	10,6	0,144	117,73
15	10,4	0,155	126,24	10,1	0,171	138,69	10,2	0,163	132,45	10,5	0,144	118,01
16	10,3	0,155	126,50	10,1	0,171	138,98	10,2	0,163	132,72	10,5	0,144	118,25
17	10,3	0,155	126,73	10,1	0,171	139,24	10,2	0,163	132,97	10,5	0,144	118,46
18	10,3	0,155	126,93	10,0	0,171	139,46	10,2	0,163	133,18	10,5	0,144	118,65
19	10,3	0,155	127,11	10,0	0,171	139,66	10,1	0,163	133,37	10,4	0,144	118,81
20	10,3	0,155	127,27	10,0	0,171	139,84	10,1	0,163	133,53	10,4	0,144	118,96
21	10,2	0,155	127,40	10,0	0,171	139,99	10,1	0,163	133,68	10,4	0,144	119,08
22	10,2	0,155	127,52	10,0	0,171	140,12	10,1	0,163	133,81	10,4	0,144	119,19
23	10,2	0,155	127,63	10,0	0,171	140,24	10,1	0,163	133,92	10,4	0,144	119,29
24	10,2	0,155	127,72	10,0	0,171	140,35	10,1	0,163	134,02	10,4	0,144	119,38
25	10,2	0,155	127,80	10,0	0,171	140,44	10,1	0,163	134,10	10,4	0,144	119,45
26	10,2	0,155	127,88	9,9	0,171	140,52	10,1	0,163	134,18	10,4	0,144	119,52
27	10,2	0,155	127,94	9,9	0,171	140,59	10,1	0,163	134,25	10,4	0,144	119,58
28	10,2	0,155	127,99	9,9	0,171	140,65	10,1	0,163	134,31	10,4	0,144	119,63
29	10,2	0,155	128,04	9,9	0,171	140,70	10,1	0,163	134,36	10,3	0,144	119,67
30	10,2	0,155	128,09	9,9	0,171	140,75	10,1	0,163	134,40	10,3	0,144	119,71

31	10,2	0,155	128,12	9,9	0,171	140,79	10,1	0,163	134,44	10,3	0,144	119,75
32	10,2	0,155	128,16	9,9	0,171	140,83	10,0	0,163	134,48	10,3	0,144	119,78
33	10,2	0,155	128,19	9,9	0,171	140,86	10,0	0,163	134,51	10,3	0,144	119,81
35	10,2	0,155	128,23	9,9	0,171	140,92	10,0	0,163	134,56	10,3	0,144	119,85
36	10,2	0,155	128,25	9,9	0,171	140,94	10,0	0,163	134,58	10,3	0,144	119,87
37	10,2	0,155	128,27	9,9	0,171	140,96	10,0	0,163	134,60	10,3	0,144	119,88
38	10,2	0,155	128,29	9,9	0,171	140,98	10,0	0,163	134,61	10,3	0,144	119,90
39	10,2	0,155	128,30	9,9	0,171	140,99	10,0	0,163	134,63	10,3	0,144	119,91
40	10,2	0,155	128,31	9,9	0,171	141,00	10,0	0,163	134,64	10,3	0,144	119,92



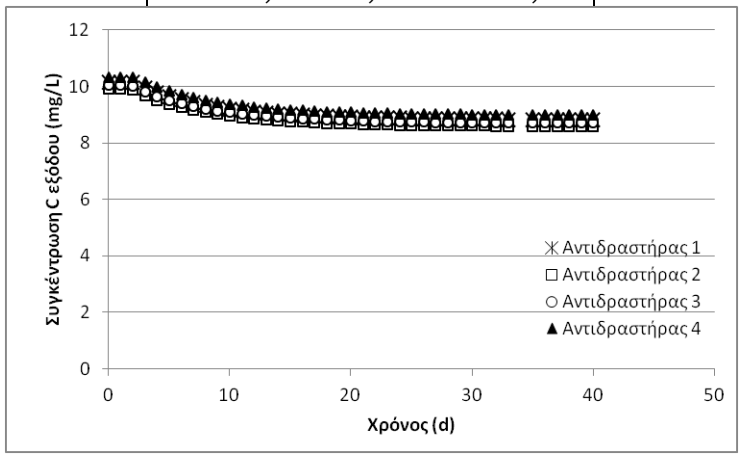


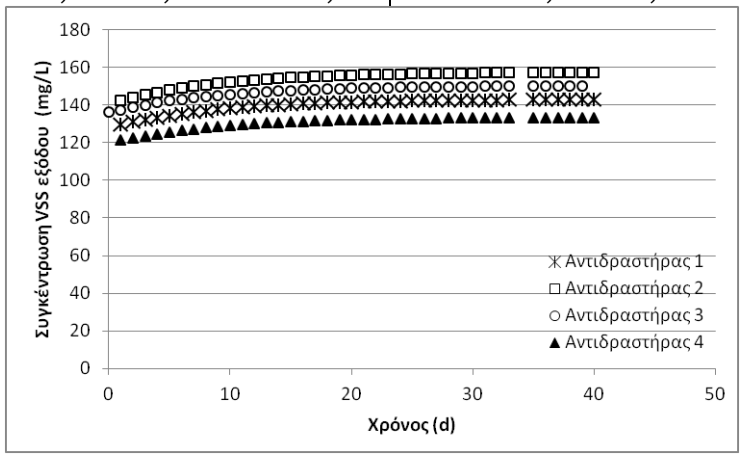


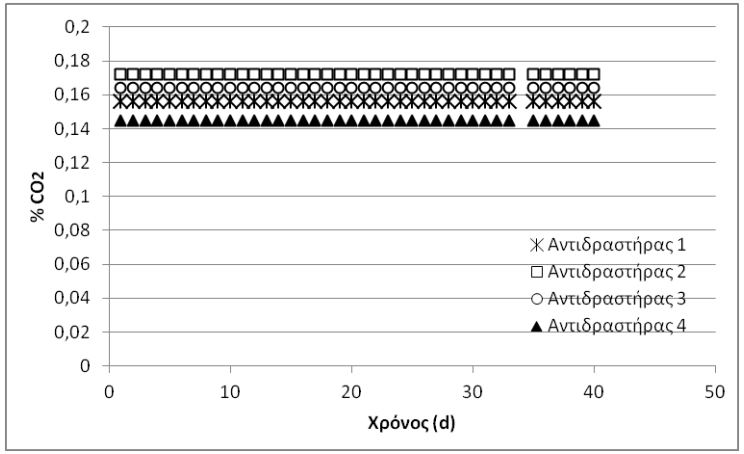
Θc 9

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	10,2	0,156	129,82	9,9	0,172	142,66	10,0	0,164	136,23	10,3	0,145	121,34
2	10,1	0,156	131,03	9,9	0,172	144,03	10,0	0,164	137,51	10,3	0,145	122,45
3	10,0	0,156	132,35	9,7	0,172	145,52	9,8	0,164	138,91	10,1	0,145	123,65
4	9,8	0,156	133,54	9,5	0,172	146,86	9,6	0,164	140,18	10,0	0,145	124,74
5	9,6	0,156	134,60	9,4	0,172	148,04	9,5	0,164	141,30	9,8	0,145	125,72
6	9,5	0,156	135,54	9,3	0,172	149,08	9,4	0,164	142,29	9,7	0,145	126,59
7	9,4	0,156	136,37	9,2	0,172	150,02	9,3	0,164	143,18	9,6	0,145	127,36
8	9,3	0,156	137,12	9,1	0,172	150,85	9,2	0,164	143,96	9,5	0,145	128,05
9	9,3	0,156	137,78	9,0	0,172	151,59	9,1	0,164	144,66	9,4	0,145	128,66
10	9,2	0,156	138,37	9,0	0,172	152,24	9,1	0,164	145,29	9,4	0,145	129,21
11	9,2	0,156	138,89	8,9	0,172	152,83	9,0	0,164	145,84	9,3	0,145	129,69
12	9,1	0,156	139,36	8,9	0,172	153,35	9,0	0,164	146,33	9,3	0,145	130,13
13	9,1	0,156	139,78	8,8	0,172	153,81	8,9	0,164	146,77	9,2	0,145	130,51
14	9,0	0,156	140,14	8,8	0,172	154,23	8,9	0,164	147,16	9,2	0,145	130,85
15	9,0	0,156	140,47	8,8	0,172	154,59	8,9	0,164	147,51	9,2	0,145	131,15
16	9,0	0,156	140,77	8,7	0,172	154,92	8,9	0,164	147,82	9,1	0,145	131,43
17	9,0	0,156	141,03	8,7	0,172	155,21	8,8	0,164	148,10	9,1	0,145	131,67
18	8,9	0,156	141,26	8,7	0,172	155,47	8,8	0,164	148,34	9,1	0,145	131,88
19	8,9	0,156	141,47	8,7	0,172	155,70	8,8	0,164	148,56	9,1	0,145	132,07
20	8,9	0,156	141,65	8,7	0,172	155,91	8,8	0,164	148,76	9,1	0,145	132,24
21	8,9	0,156	141,81	8,7	0,172	156,09	8,8	0,164	148,93	9,1	0,145	132,39
22	8,9	0,156	141,96	8,6	0,172	156,25	8,8	0,164	149,08	9,1	0,145	132,53
23	8,9	0,156	142,09	8,6	0,172	156,40	8,8	0,164	149,22	9,0	0,145	132,65
24	8,9	0,156	142,21	8,6	0,172	156,53	8,8	0,164	149,34	9,0	0,145	132,76
25	8,9	0,156	142,31	8,6	0,172	156,64	8,7	0,164	149,45	9,0	0,145	132,85
26	8,9	0,156	142,40	8,6	0,172	156,75	8,7	0,164	149,55	9,0	0,145	132,94
27	8,9	0,156	142,48	8,6	0,172	156,84	8,7	0,164	149,64	9,0	0,145	133,01
28	8,9	0,156	142,56	8,6	0,172	156,92	8,7	0,164	149,72	9,0	0,145	133,08
29	8,8	0,156	142,62	8,6	0,172	156,99	8,7	0,164	149,78	9,0	0,145	133,14
30	8,8	0,156	142,68	8,6	0,172	157,06	8,7	0,164	149,85	9,0	0,145	133,19

31	8,8	0,156	142,73	8,6	0,172	157,12	8,7	0,164	149,90	9,0	0,145	133,24
32	8,8	0,156	142,78	8,6	0,172	157,17	8,7	0,164	149,95	9,0	0,145	133,28
33	8,8	0,156	142,82	8,6	0,172	157,21	8,7	0,164	149,99	9,0	0,145	133,32
35	8,8	0,156	142,89	8,6	0,172	157,29	8,7	0,164	150,07	9,0	0,145	133,39
36	8,8	0,156	142,92	8,6	0,172	157,32	8,7	0,164	150,10	9,0	0,145	133,41
37	8,8	0,156	142,95	8,6	0,172	157,35	8,7	0,164	150,13	9,0	0,145	133,44
38	8,8	0,156	142,97	8,6	0,172	157,38	8,7	0,164	150,15	9,0	0,145	133,46
39	8,8	0,156	142,99	8,6	0,172	157,40	8,7	0,164	150,17	9,0	0,145	133,48
40	8,8	0,156	143,01	8,6	0,172	157,42	8,7	0,164	150,19	9,0	0,145	133,50



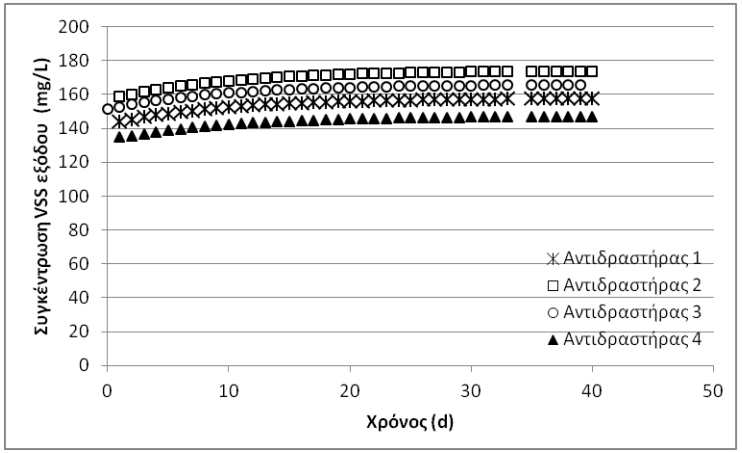


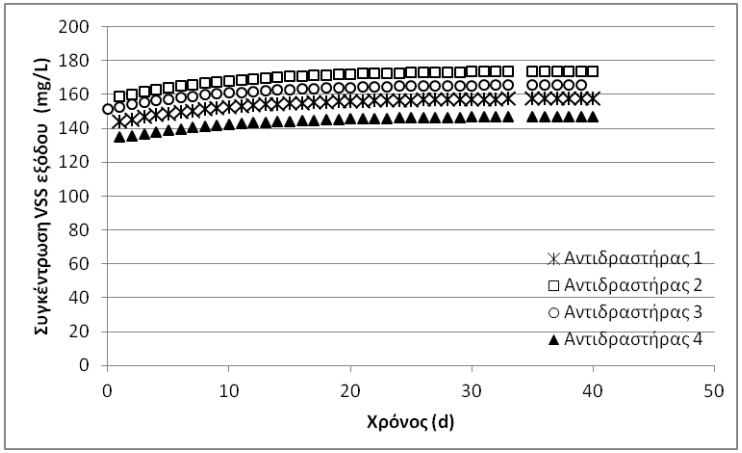


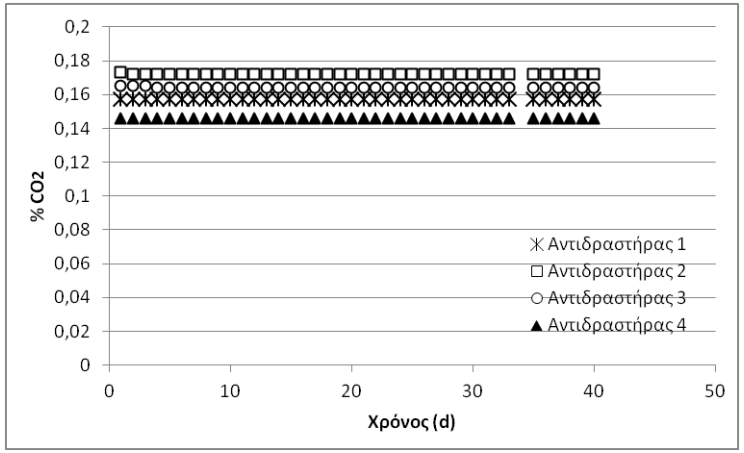
Θc 10

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	8,8	0,157	144,43	8,6	0,173	158,99	8,7	0,165	151,69	9,0	0,146	134,83
2	8,8	0,157	145,55	8,5	0,172	160,26	8,7	0,165	152,88	9,0	0,146	135,85
3	8,7	0,157	146,80	8,4	0,172	161,68	8,5	0,165	154,21	8,8	0,146	136,99
4	8,5	0,157	147,95	8,3	0,172	162,97	8,4	0,164	155,44	8,7	0,146	138,05
5	8,4	0,157	148,96	8,2	0,172	164,09	8,3	0,164	156,50	8,6	0,146	138,98
6	8,3	0,157	149,86	8,1	0,172	165,09	8,2	0,164	157,45	8,5	0,146	139,82
7	8,3	0,157	150,67	8,0	0,172	166,00	8,2	0,164	158,31	8,4	0,146	140,57
8	8,2	0,157	151,41	8,0	0,172	166,82	8,1	0,164	159,09	8,4	0,146	141,25
9	8,2	0,157	152,07	7,9	0,172	167,56	8,0	0,164	159,79	8,3	0,146	141,86
10	8,1	0,157	152,66	7,9	0,172	168,22	8,0	0,164	160,41	8,3	0,146	142,41
11	8,1	0,157	153,20	7,8	0,172	168,82	8,0	0,164	160,98	8,2	0,146	142,90
12	8,0	0,157	153,68	7,8	0,172	169,36	7,9	0,164	161,49	8,2	0,146	143,34
13	8,0	0,157	154,11	7,8	0,172	169,84	7,9	0,164	161,95	8,2	0,146	143,74
14	8,0	0,157	154,50	7,7	0,172	170,27	7,9	0,164	162,36	8,1	0,146	144,10
15	8,0	0,157	154,85	7,7	0,172	170,67	7,8	0,164	162,73	8,1	0,146	144,43
16	7,9	0,157	155,16	7,7	0,172	171,02	7,8	0,164	163,06	8,1	0,146	144,72
17	7,9	0,157	155,45	7,7	0,172	171,34	7,8	0,164	163,36	8,1	0,146	144,98
18	7,9	0,157	155,70	7,7	0,172	171,62	7,8	0,164	163,64	8,1	0,146	145,22
19	7,9	0,157	155,94	7,6	0,172	171,88	7,8	0,164	163,88	8,1	0,146	145,43
20	7,9	0,157	156,14	7,6	0,172	172,11	7,8	0,164	164,10	8,0	0,146	145,62
21	7,9	0,157	156,33	7,6	0,172	172,32	7,7	0,164	164,30	8,0	0,146	145,79
22	7,9	0,157	156,50	7,6	0,172	172,51	7,7	0,164	164,48	8,0	0,146	145,95
23	7,9	0,157	156,65	7,6	0,172	172,68	7,7	0,164	164,64	8,0	0,146	146,09
24	7,8	0,157	156,79	7,6	0,172	172,83	7,7	0,164	164,78	8,0	0,146	146,22
25	7,8	0,157	156,91	7,6	0,172	172,97	7,7	0,164	164,91	8,0	0,146	146,33
26	7,8	0,157	157,02	7,6	0,172	173,10	7,7	0,164	165,03	8,0	0,146	146,43
27	7,8	0,157	157,12	7,6	0,172	173,21	7,7	0,164	165,14	8,0	0,146	146,53
28	7,8	0,157	157,21	7,6	0,172	173,31	7,7	0,164	165,23	8,0	0,146	146,61
29	7,8	0,157	157,29	7,6	0,172	173,40	7,7	0,164	165,32	8,0	0,146	146,68
30	7,8	0,157	157,37	7,6	0,172	173,48	7,7	0,164	165,40	8,0	0,146	146,75

31	7,8	0,157	157,43	7,6	0,172	173,56	7,7	0,164	165,47	8,0	0,146	146,81
32	7,8	0,157	157,49	7,6	0,172	173,62	7,7	0,164	165,53	8,0	0,146	146,87
33	7,8	0,157	157,55	7,6	0,172	173,68	7,7	0,164	165,59	8,0	0,146	146,92
35	7,8	0,157	157,64	7,6	0,172	173,79	7,7	0,164	165,68	8,0	0,146	147,00
36	7,8	0,157	157,68	7,6	0,172	173,83	7,7	0,164	165,73	8,0	0,146	147,04
37	7,8	0,157	157,71	7,6	0,172	173,87	7,7	0,164	165,76	8,0	0,146	147,07
38	7,8	0,157	157,75	7,6	0,172	173,91	7,7	0,164	165,80	8,0	0,146	147,10
39	7,8	0,157	157,78	7,6	0,172	173,94	7,7	0,164	165,83	8,0	0,146	147,13
40	7,8	0,157	157,80	7,6	0,172	173,97	7,7	0,164	165,86	8,0	0,146	147,15



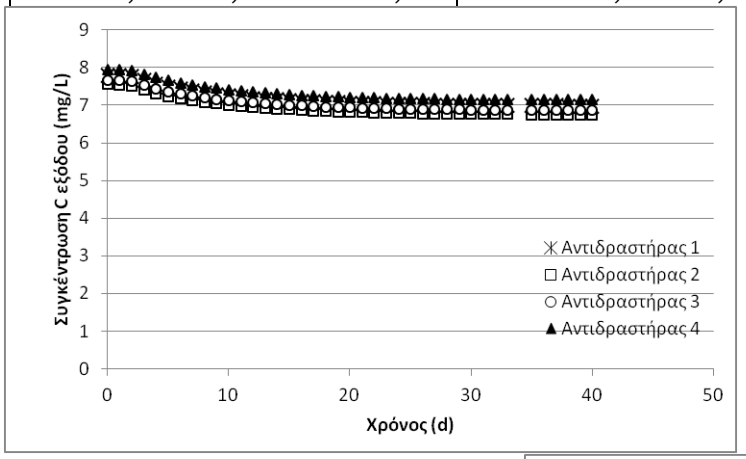


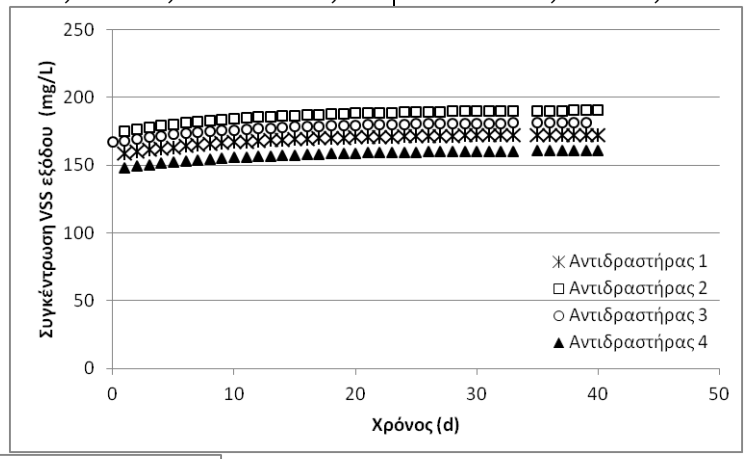


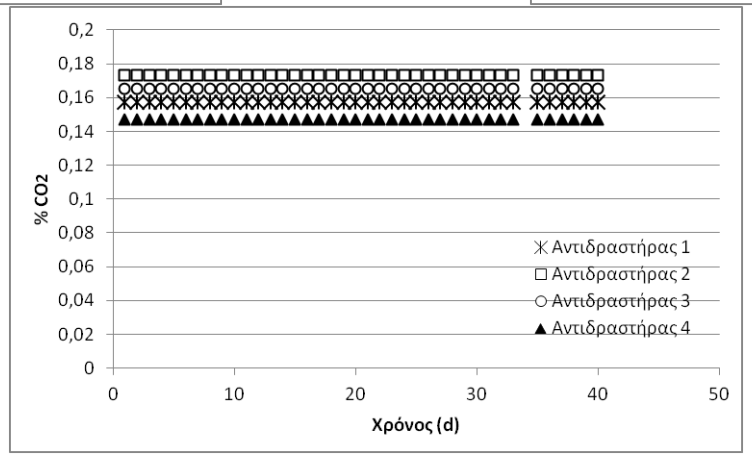
Θc 11

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	7,8	0,157	159,18	7,5	0,173	175,49	7,7	0,165	167,30	7,9	0,147	148,43
2	7,8	0,157	160,23	7,5	0,173	176,67	7,6	0,165	168,42	7,9	0,147	149,39
3	7,7	0,157	161,41	7,4	0,173	178,02	7,5	0,165	169,68	7,8	0,147	150,47
4	7,6	0,157	162,52	7,3	0,173	179,27	7,4	0,165	170,86	7,7	0,147	151,49
5	7,5	0,157	163,47	7,2	0,173	180,33	7,4	0,165	171,87	7,7	0,147	152,38
6	7,4	0,157	164,33	7,2	0,173	181,29	7,3	0,165	172,78	7,6	0,147	153,17
7	7,4	0,157	165,12	7,1	0,173	182,17	7,3	0,165	173,61	7,5	0,147	153,90
8	7,3	0,157	165,84	7,1	0,173	182,98	7,2	0,165	174,38	7,5	0,147	154,57
9	7,3	0,157	166,50	7,0	0,173	183,71	7,2	0,165	175,07	7,4	0,147	155,17
10	7,2	0,157	167,09	7,0	0,173	184,37	7,1	0,165	175,69	7,4	0,147	155,72
11	7,2	0,157	167,63	7,0	0,173	184,97	7,1	0,165	176,26	7,4	0,147	156,21
12	7,2	0,157	168,11	6,9	0,173	185,52	7,1	0,165	176,78	7,4	0,147	156,66
13	7,2	0,157	168,56	6,9	0,173	186,02	7,0	0,165	177,25	7,3	0,147	157,07
14	7,1	0,157	168,96	6,9	0,173	186,47	7,0	0,165	177,68	7,3	0,147	157,45
15	7,1	0,157	169,33	6,9	0,173	186,88	7,0	0,165	178,07	7,3	0,147	157,78
16	7,1	0,157	169,66	6,9	0,173	187,25	7,0	0,165	178,42	7,3	0,147	158,09
17	7,1	0,157	169,96	6,9	0,173	187,59	7,0	0,165	178,74	7,3	0,147	158,37
18	7,1	0,157	170,24	6,8	0,173	187,90	7,0	0,165	179,03	7,2	0,147	158,62
19	7,1	0,157	170,49	6,8	0,173	188,18	6,9	0,165	179,30	7,2	0,147	158,86
20	7,1	0,157	170,72	6,8	0,173	188,43	6,9	0,165	179,54	7,2	0,147	159,06
21	7,0	0,157	170,92	6,8	0,173	188,66	6,9	0,165	179,76	7,2	0,147	159,26
22	7,0	0,157	171,11	6,8	0,173	188,87	6,9	0,165	179,95	7,2	0,147	159,43
23	7,0	0,157	171,28	6,8	0,173	189,06	6,9	0,165	180,13	7,2	0,147	159,59
24	7,0	0,157	171,44	6,8	0,173	189,24	6,9	0,165	180,30	7,2	0,147	159,73
25	7,0	0,157	171,58	6,8	0,173	189,40	6,9	0,165	180,45	7,2	0,147	159,86
26	7,0	0,157	171,71	6,8	0,173	189,54	6,9	0,165	180,59	7,2	0,147	159,98
27	7,0	0,157	171,82	6,8	0,173	189,67	6,9	0,165	180,71	7,2	0,147	160,09
28	7,0	0,157	171,93	6,8	0,173	189,79	6,9	0,165	180,82	7,2	0,147	160,18
29	7,0	0,157	172,03	6,8	0,173	189,90	6,9	0,165	180,92	7,2	0,147	160,27
30	7,0	0,157	172,11	6,8	0,173	190,00	6,9	0,165	181,02	7,2	0,147	160,35

31	7,0	0,157	172,19	6,8	0,173	190,09	6,9	0,165	181,10	7,2	0,147	160,43
32	7,0	0,157	172,27	6,8	0,173	190,17	6,9	0,165	181,18	7,2	0,147	160,50
33	7,0	0,157	172,33	6,8	0,173	190,24	6,9	0,165	181,25	7,2	0,147	160,56
35	7,0	0,157	172,45	6,8	0,173	190,37	6,9	0,165	181,37	7,1	0,147	160,66
36	7,0	0,157	172,50	6,8	0,173	190,43	6,9	0,165	181,43	7,1	0,147	160,71
37	7,0	0,157	172,54	6,8	0,173	190,48	6,9	0,165	181,47	7,1	0,147	160,75
38	7,0	0,157	172,59	6,7	0,173	190,53	6,9	0,165	181,52	7,1	0,147	160,79
39	7,0	0,157	172,62	6,7	0,173	190,57	6,9	0,165	181,56	7,1	0,147	160,82
40	7,0	0,157	172,66	6,7	0,173	190,61	6,9	0,165	181,59	7,1	0,147	160,86



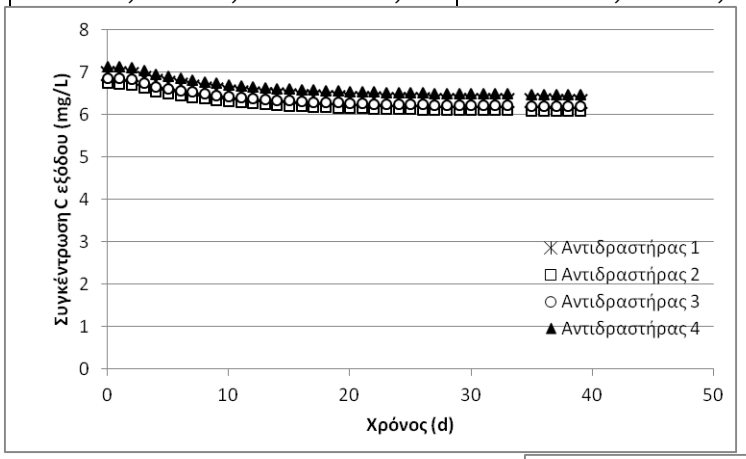


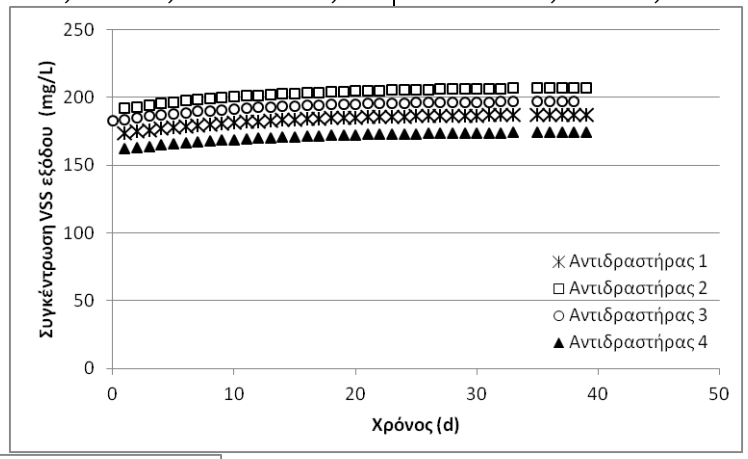


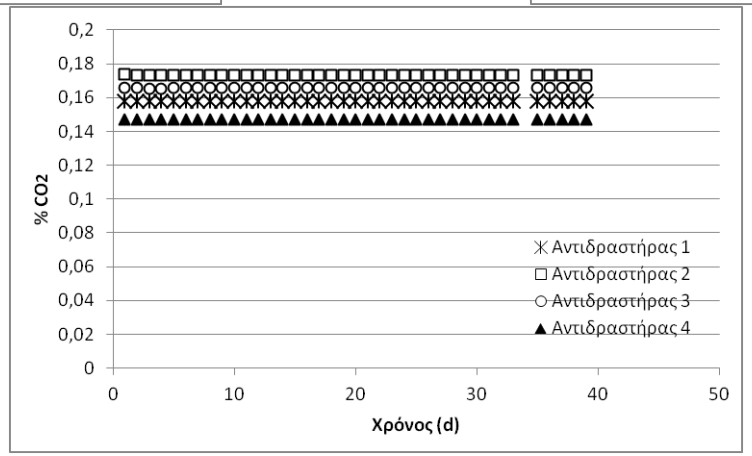
Θc 12

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	7,0	0,158	174,01	6,7	0,174	192,11	6,8	0,166	183,02	7,1	0,147	162,12
2	6,9	0,158	175,00	6,7	0,173	193,22	6,8	0,166	184,07	7,1	0,147	163,02
3	6,9	0,158	176,12	6,6	0,173	194,50	6,7	0,165	185,27	7,0	0,147	164,04
4	6,8	0,158	177,19	6,5	0,173	195,71	6,7	0,165	186,41	7,0	0,147	165,02
5	6,7	0,158	178,10	6,5	0,173	196,72	6,6	0,166	187,37	6,9	0,147	165,87
6	6,7	0,158	178,92	6,5	0,173	197,63	6,6	0,166	188,23	6,9	0,147	166,62
7	6,6	0,158	179,68	6,4	0,173	198,49	6,5	0,166	189,04	6,8	0,147	167,33
8	6,6	0,158	180,39	6,4	0,173	199,29	6,5	0,166	189,79	6,8	0,147	167,98
9	6,6	0,158	181,03	6,3	0,173	200,01	6,5	0,166	190,47	6,7	0,147	168,57
10	6,5	0,158	181,62	6,3	0,173	200,66	6,4	0,166	191,09	6,7	0,147	169,11
11	6,5	0,158	182,15	6,3	0,173	201,26	6,4	0,166	191,66	6,7	0,147	169,61
12	6,5	0,158	182,65	6,3	0,173	201,81	6,4	0,166	192,18	6,7	0,147	170,06
13	6,5	0,158	183,10	6,2	0,173	202,32	6,4	0,166	192,66	6,6	0,147	170,48
14	6,5	0,158	183,51	6,2	0,173	202,78	6,3	0,166	193,10	6,6	0,147	170,86
15	6,4	0,158	183,89	6,2	0,173	203,20	6,3	0,166	193,50	6,6	0,147	171,20
16	6,4	0,158	184,23	6,2	0,173	203,59	6,3	0,166	193,87	6,6	0,147	171,52
17	6,4	0,158	184,55	6,2	0,173	203,95	6,3	0,166	194,20	6,6	0,147	171,81
18	6,4	0,158	184,84	6,2	0,173	204,27	6,3	0,166	194,51	6,6	0,147	172,08
19	6,4	0,158	185,10	6,2	0,173	204,57	6,3	0,166	194,79	6,6	0,147	172,33
20	6,4	0,158	185,35	6,2	0,173	204,84	6,3	0,166	195,05	6,5	0,147	172,55
21	6,4	0,158	185,57	6,1	0,173	205,09	6,3	0,166	195,28	6,5	0,147	172,76
22	6,4	0,158	185,77	6,1	0,173	205,32	6,3	0,166	195,50	6,5	0,147	172,94
23	6,4	0,158	185,96	6,1	0,173	205,53	6,2	0,166	195,70	6,5	0,147	173,12
24	6,4	0,158	186,13	6,1	0,173	205,72	6,2	0,166	195,88	6,5	0,147	173,28
25	6,4	0,158	186,29	6,1	0,173	205,90	6,2	0,166	196,05	6,5	0,147	173,42
26	6,3	0,158	186,43	6,1	0,173	206,06	6,2	0,166	196,20	6,5	0,147	173,55
27	6,3	0,158	186,57	6,1	0,173	206,21	6,2	0,166	196,34	6,5	0,147	173,67
28	6,3	0,158	186,69	6,1	0,173	206,34	6,2	0,166	196,47	6,5	0,147	173,79
29	6,3	0,158	186,80	6,1	0,173	206,47	6,2	0,166	196,59	6,5	0,147	173,89
30	6,3	0,158	186,90	6,1	0,173	206,58	6,2	0,166	196,69	6,5	0,147	173,98

31	6,3	0,158	186,99	6,1	0,173	206,69	6,2	0,166	196,79	6,5	0,147	174,07
32	6,3	0,158	187,08	6,1	0,173	206,78	6,2	0,166	196,88	6,5	0,147	174,15
33	6,3	0,158	187,16	6,1	0,173	206,87	6,2	0,166	196,97	6,5	0,147	174,22
35	6,3	0,158	187,29	6,1	0,173	207,03	6,2	0,166	197,11	6,5	0,147	174,35
36	6,3	0,158	187,36	6,1	0,173	207,10	6,2	0,166	197,18	6,5	0,147	174,40
37	6,3	0,158	187,41	6,1	0,173	207,16	6,2	0,166	197,24	6,5	0,147	174,45
38	6,3	0,158	187,46	6,1	0,173	207,21	6,2	0,166	197,29	6,5	0,147	174,50
39	6,3	0,158	187,51	6,1	0,173	207,27	6,2	0,166	197,34	6,5	0,147	174,54
40	6,3	0,158	187,55	6,1	0,173	207,32	6,2	0,166	197,39	6,5	0,147	174,58



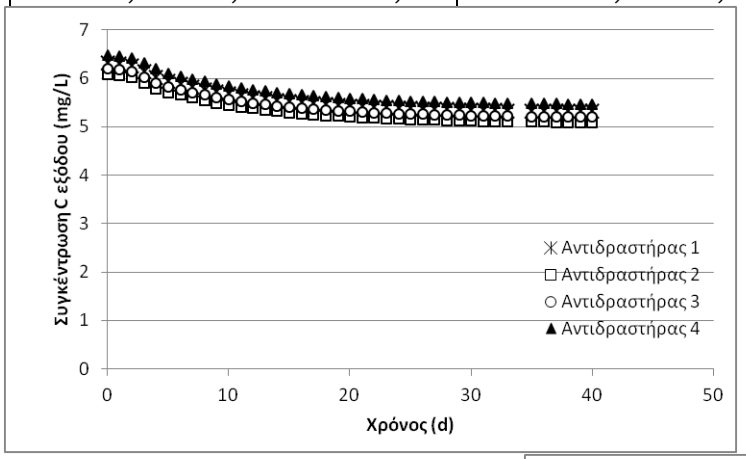


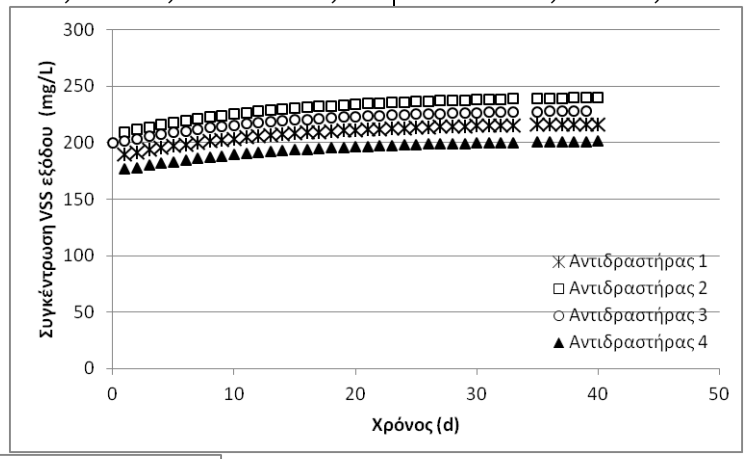


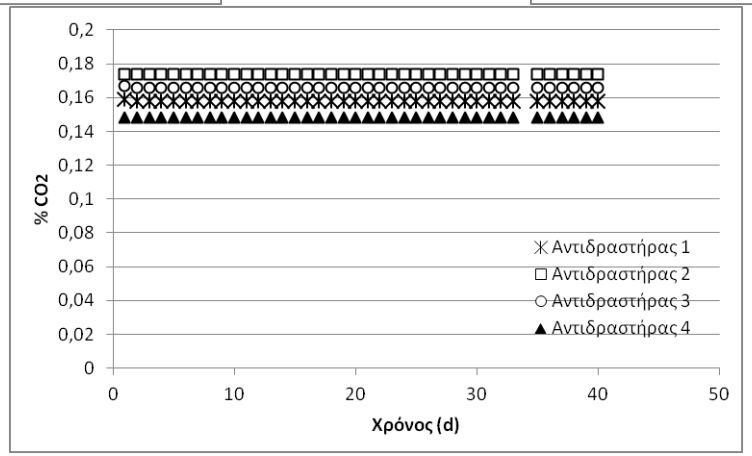
Θc 14

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	6,3	0,159	189,93	6,1	0,174	209,79	6,2	0,167	199,74	6,5	0,148	176,66
2	6,3	0,158	191,65	6,0	0,174	211,75	6,1	0,166	201,58	6,4	0,148	178,24
3	6,1	0,158	193,63	5,9	0,174	214,03	6,0	0,166	203,72	6,3	0,148	180,05
4	6,0	0,158	195,57	5,8	0,174	216,24	5,9	0,166	205,79	6,2	0,148	181,83
5	5,9	0,158	197,22	5,7	0,174	218,08	5,8	0,166	207,54	6,1	0,148	183,37
6	5,9	0,158	198,69	5,7	0,174	219,72	5,8	0,166	209,10	6,0	0,148	184,75
7	5,8	0,158	200,10	5,6	0,174	221,31	5,7	0,166	210,60	6,0	0,148	186,05
8	5,8	0,158	201,44	5,5	0,174	222,84	5,7	0,166	212,04	5,9	0,148	187,28
9	5,7	0,158	202,67	5,5	0,174	224,23	5,6	0,166	213,35	5,9	0,148	188,41
10	5,7	0,158	203,79	5,4	0,174	225,48	5,6	0,166	214,54	5,8	0,148	189,45
11	5,6	0,158	204,82	5,4	0,174	226,66	5,5	0,166	215,64	5,8	0,148	190,41
12	5,6	0,158	205,80	5,4	0,174	227,76	5,5	0,166	216,68	5,8	0,148	191,31
13	5,6	0,158	206,70	5,3	0,174	228,78	5,5	0,166	217,64	5,7	0,148	192,14
14	5,5	0,158	207,53	5,3	0,174	229,72	5,4	0,166	218,53	5,7	0,148	192,91
15	5,5	0,158	208,30	5,3	0,174	230,58	5,4	0,166	219,35	5,7	0,148	193,62
16	5,5	0,158	209,01	5,3	0,174	231,39	5,4	0,166	220,11	5,7	0,148	194,28
17	5,5	0,158	209,67	5,3	0,174	232,14	5,4	0,166	220,82	5,6	0,148	194,90
18	5,5	0,158	210,29	5,2	0,174	232,84	5,3	0,166	221,47	5,6	0,148	195,46
19	5,4	0,158	210,85	5,2	0,174	233,48	5,3	0,166	222,08	5,6	0,148	195,99
20	5,4	0,158	211,38	5,2	0,174	234,07	5,3	0,166	222,64	5,6	0,148	196,48
21	5,4	0,158	211,87	5,2	0,174	234,63	5,3	0,166	223,16	5,6	0,148	196,93
22	5,4	0,158	212,32	5,2	0,174	235,14	5,3	0,166	223,65	5,6	0,148	197,35
23	5,4	0,158	212,74	5,2	0,174	235,62	5,3	0,166	224,10	5,6	0,148	197,74
24	5,4	0,158	213,13	5,2	0,174	236,06	5,3	0,166	224,51	5,5	0,148	198,10
25	5,4	0,158	213,50	5,1	0,174	236,47	5,3	0,166	224,90	5,5	0,148	198,43
26	5,4	0,158	213,83	5,1	0,174	236,85	5,3	0,166	225,26	5,5	0,148	198,74
27	5,4	0,158	214,14	5,1	0,174	237,20	5,2	0,166	225,59	5,5	0,148	199,03
28	5,4	0,158	214,43	5,1	0,174	237,53	5,2	0,166	225,90	5,5	0,148	199,30
29	5,4	0,158	214,70	5,1	0,174	237,83	5,2	0,166	226,18	5,5	0,148	199,55
30	5,3	0,158	214,95	5,1	0,174	238,11	5,2	0,166	226,45	5,5	0,148	199,77

31	5,3	0,158	215,18	5,1	0,174	238,37	5,2	0,166	226,70	5,5	0,148	199,99
32	5,3	0,158	215,39	5,1	0,174	238,61	5,2	0,166	226,92	5,5	0,148	200,19
33	5,3	0,158	215,59	5,1	0,174	238,84	5,2	0,166	227,14	5,5	0,148	200,37
35	5,3	0,158	215,95	5,1	0,174	239,24	5,2	0,166	227,52	5,5	0,148	200,70
36	5,3	0,158	216,10	5,1	0,174	239,42	5,2	0,166	227,68	5,5	0,148	200,84
37	5,3	0,158	216,25	5,1	0,174	239,59	5,2	0,166	227,84	5,5	0,148	200,98
38	5,3	0,158	216,39	5,1	0,174	239,74	5,2	0,166	227,99	5,5	0,148	201,11
39	5,3	0,158	216,52	5,1	0,174	239,89	5,2	0,166	228,12	5,5	0,148	201,23
40	5,3	0,158	216,63	5,1	0,174	240,02	5,2	0,166	228,25	5,5	0,148	201,33



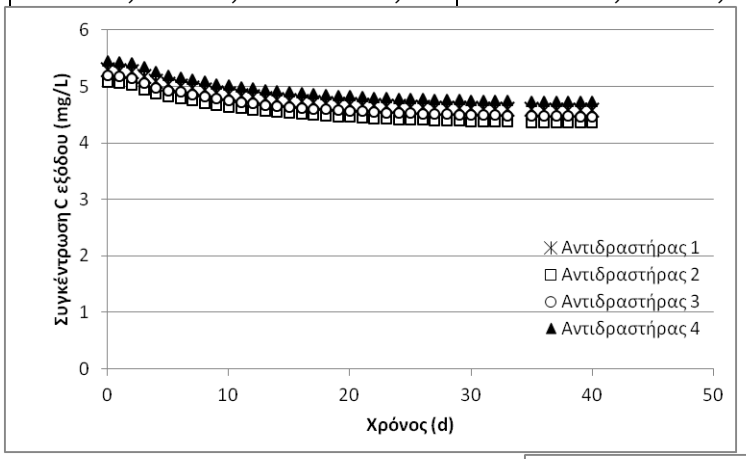


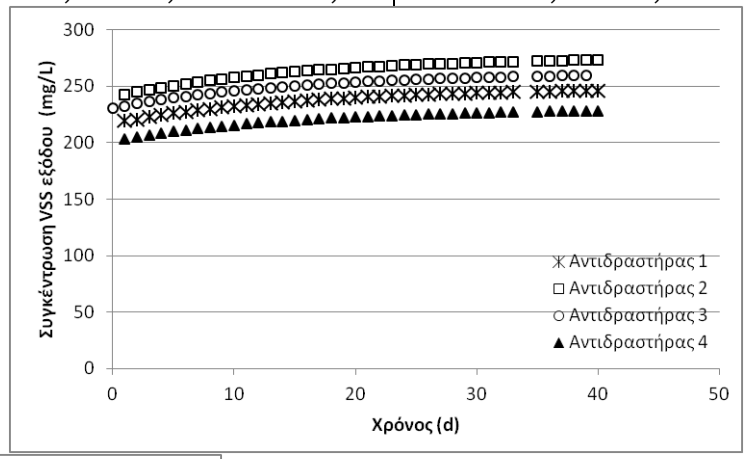


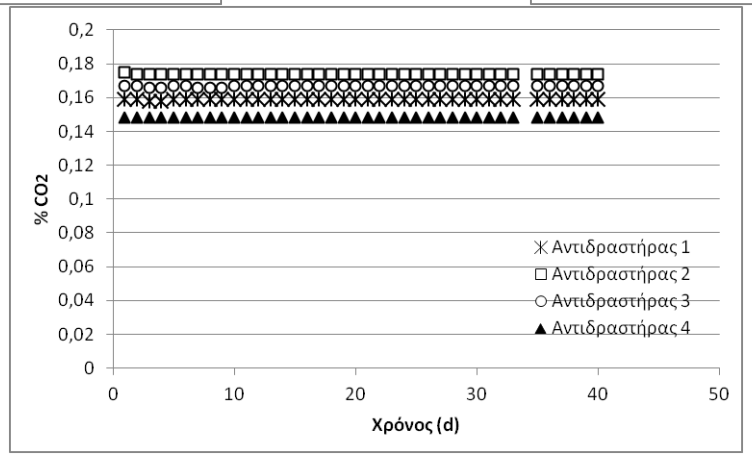
Θc 16

χρόνος	Αντιδραστήρας Α			Αντιδραστήρας Β			Αντιδραστήρας Γ			Αντιδραστήρας Δ		
(d)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	5,3	0,159	219,30	5,1	0,175	243,00	5,2	0,167	231,08	5,4	0,148	203,81
2	5,3	0,159	220,88	5,0	0,174	244,81	5,1	0,167	232,77	5,4	0,148	205,25
3	5,2	0,158	222,71	4,9	0,174	246,91	5,1	0,166	234,73	5,3	0,148	206,91
4	5,1	0,158	224,54	4,9	0,174	248,99	5,0	0,166	236,68	5,3	0,148	208,58
5	5,0	0,159	226,10	4,8	0,174	250,72	4,9	0,167	238,33	5,2	0,148	210,02
6	5,0	0,159	227,45	4,8	0,174	252,22	4,9	0,167	239,75	5,2	0,148	211,28
7	5,0	0,159	228,76	4,7	0,174	253,70	4,9	0,166	241,15	5,1	0,148	212,49
8	4,9	0,159	230,06	4,7	0,174	255,19	4,8	0,166	242,54	5,1	0,148	213,67
9	4,9	0,159	231,27	4,7	0,174	256,56	4,8	0,166	243,83	5,0	0,148	214,77
10	4,9	0,159	232,36	4,6	0,174	257,78	4,7	0,167	244,98	5,0	0,148	215,78
11	4,8	0,159	233,37	4,6	0,174	258,91	4,7	0,167	246,05	5,0	0,148	216,71
12	4,8	0,159	234,33	4,6	0,174	260,00	4,7	0,167	247,07	5,0	0,148	217,59
13	4,8	0,159	235,24	4,6	0,174	261,04	4,7	0,167	248,05	4,9	0,148	218,42
14	4,8	0,159	236,08	4,5	0,174	261,99	4,7	0,167	248,95	4,9	0,148	219,20
15	4,7	0,159	236,86	4,5	0,174	262,87	4,6	0,167	249,77	4,9	0,148	219,92
16	4,7	0,159	237,60	4,5	0,174	263,69	4,6	0,167	250,55	4,9	0,148	220,59
17	4,7	0,159	238,29	4,5	0,174	264,47	4,6	0,167	251,29	4,9	0,148	221,22
18	4,7	0,159	238,93	4,5	0,174	265,21	4,6	0,167	251,98	4,9	0,148	221,81
19	4,7	0,159	239,53	4,5	0,174	265,89	4,6	0,167	252,62	4,8	0,148	222,37
20	4,7	0,159	240,10	4,5	0,174	266,52	4,6	0,167	253,21	4,8	0,148	222,88
21	4,7	0,159	240,62	4,4	0,174	267,11	4,6	0,167	253,77	4,8	0,148	223,37
22	4,7	0,159	241,12	4,4	0,174	267,67	4,5	0,167	254,30	4,8	0,148	223,82
23	4,6	0,159	241,58	4,4	0,174	268,20	4,5	0,167	254,79	4,8	0,148	224,24
24	4,6	0,159	242,01	4,4	0,174	268,68	4,5	0,167	255,25	4,8	0,148	224,64
25	4,6	0,159	242,41	4,4	0,174	269,14	4,5	0,167	255,68	4,8	0,148	225,01
26	4,6	0,159	242,79	4,4	0,174	269,57	4,5	0,167	256,08	4,8	0,148	225,36
27	4,6	0,159	243,14	4,4	0,174	269,97	4,5	0,167	256,46	4,8	0,148	225,68
28	4,6	0,159	243,48	4,4	0,174	270,34	4,5	0,167	256,81	4,8	0,148	225,98
29	4,6	0,159	243,79	4,4	0,174	270,69	4,5	0,167	257,14	4,8	0,148	226,27
30	4,6	0,159	244,08	4,4	0,174	271,02	4,5	0,167	257,45	4,8	0,148	226,54

31	4,6	0,159	244,35	4,4	0,174	271,33	4,5	0,167	257,74	4,8	0,148	226,78
32	4,6	0,159	244,60	4,4	0,174	271,61	4,5	0,167	258,01	4,7	0,148	227,02
33	4,6	0,159	244,84	4,4	0,174	271,88	4,5	0,167	258,26	4,7	0,148	227,24
35	4,6	0,159	245,27	4,4	0,174	272,37	4,5	0,167	258,72	4,7	0,148	227,63
36	4,6	0,159	245,47	4,4	0,174	272,59	4,5	0,167	258,93	4,7	0,148	227,81
37	4,6	0,159	245,65	4,4	0,174	272,80	4,5	0,167	259,13	4,7	0,148	227,98
38	4,6	0,159	245,82	4,4	0,174	273,00	4,5	0,167	259,31	4,7	0,148	228,14
39	4,6	0,159	245,98	4,4	0,174	273,18	4,5	0,167	259,48	4,7	0,148	228,29
40	4,6	0,159	246,14	4,4	0,174	273,35	4,5	0,167	259,64	4,7	0,148	228,43



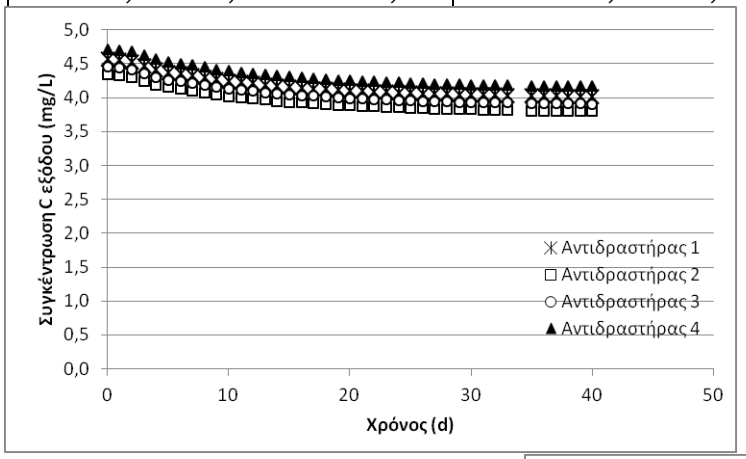


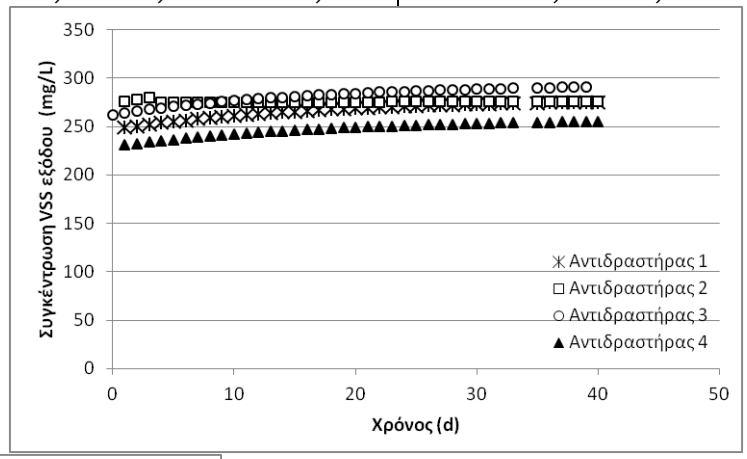


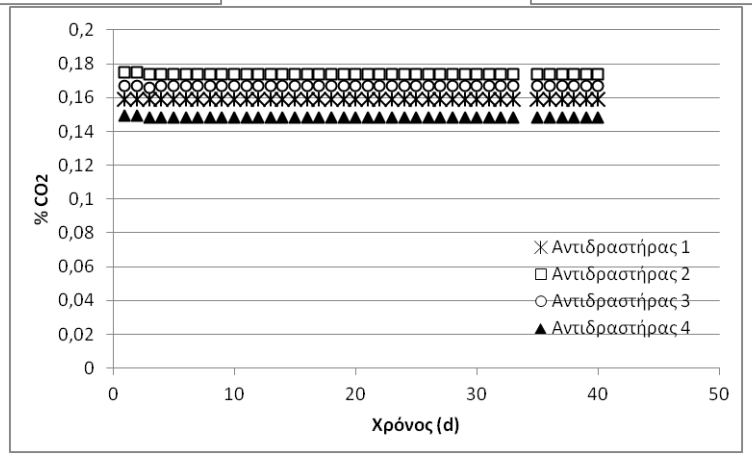
Θc 18

χρόνος	Αντιδραστήρας Α			Αντιδραστήρας Β			Αντιδραστήρας Γ			Αντιδραστήρας Δ		
(d)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	4,6	0,159	248,98	4,3	0,175	276,5	4,4	0,167	262,654	4,7	0,149	231,05
2	4,5	0,159	250,44	4,3	0,175	278,2	4,4	0,167	264,217	4,7	0,149	232,38
3	4,5	0,159	252,12	4,2	0,174	280,1	4,4	0,166	266,027	4,6	0,148	233,90
4	4,4	0,159	253,84	4,2	0,174	275,0	4,3	0,167	267,863	4,6	0,148	235,46
5	4,4	0,159	255,31	4,2	0,174	275,1	4,3	0,167	269,426	4,5	0,148	236,82
6	4,4	0,159	256,56	4,1	0,174	275,2	4,2	0,167	270,743	4,5	0,148	237,98
7	4,3	0,159	257,77	4,1	0,174	275,2	4,2	0,167	272,027	4,5	0,148	239,10
8	4,3	0,159	259,01	4,1	0,174	275,2	4,2	0,167	273,357	4,5	0,148	240,22
9	4,3	0,159	260,19	4,0	0,174	275,3	4,2	0,167	274,632	4,4	0,148	241,29
10	4,2	0,159	261,26	4,0	0,174	275,3	4,1	0,167	275,759	4,4	0,148	242,27
11	4,2	0,159	262,22	4,0	0,174	275,4	4,1	0,167	276,774	4,4	0,148	243,16
12	4,2	0,159	263,15	4,0	0,174	275,4	4,1	0,167	277,758	4,4	0,148	244,01
13	4,2	0,159	264,05	4,0	0,174	275,4	4,1	0,167	278,73	4,3	0,148	244,83
14	4,2	0,159	264,90	4,0	0,174	275,5	4,1	0,167	279,645	4,3	0,148	245,61
15	4,2	0,159	265,68	3,9	0,174	275,5	4,0	0,167	280,476	4,3	0,148	246,33
16	4,1	0,159	266,41	3,9	0,174	275,5	4,0	0,167	281,245	4,3	0,148	247,00
17	4,1	0,159	267,11	3,9	0,174	275,5	4,0	0,167	281,983	4,3	0,148	247,63
18	4,1	0,159	267,77	3,9	0,174	275,6	4,0	0,167	282,696	4,3	0,148	248,24
19	4,1	0,159	268,39	3,9	0,174	275,6	4,0	0,167	283,365	4,3	0,148	248,81
20	4,1	0,159	268,97	3,9	0,174	275,6	4,0	0,167	283,981	4,3	0,148	249,34
21	4,1	0,159	269,52	3,9	0,174	275,6	4,0	0,167	284,558	4,2	0,148	249,84
22	4,1	0,159	270,03	3,9	0,174	275,6	4,0	0,167	285,109	4,2	0,148	250,31
23	4,1	0,159	270,52	3,9	0,174	275,7	4,0	0,167	285,634	4,2	0,148	250,76
24	4,1	0,159	270,99	3,9	0,174	275,7	4,0	0,167	286,127	4,2	0,148	251,18
25	4,1	0,159	271,42	3,8	0,174	275,7	4,0	0,167	286,586	4,2	0,148	251,58
26	4,1	0,159	271,82	3,8	0,174	275,7	4,0	0,167	287,018	4,2	0,148	251,95
27	4,1	0,159	272,21	3,8	0,174	275,7	3,9	0,167	287,428	4,2	0,148	252,30
28	4,1	0,159	272,57	3,8	0,174	275,7	3,9	0,167	287,817	4,2	0,148	252,63
29	4,0	0,159	272,91	3,8	0,174	275,7	3,9	0,167	288,182	4,2	0,148	252,95
30	4,0	0,159	273,24	3,8	0,174	275,7	3,9	0,167	288,525	4,2	0,148	253,24

31	4,0	0,159	273,54	3,8	0,174	275,8	3,9	0,167	288,847	4,2	0,148	253,52
32	4,0	0,159	273,83	3,8	0,174	275,8	3,9	0,167	289,153	4,2	0,148	253,78
33	4,0	0,159	274,10	3,8	0,174	275,8	3,9	0,167	289,442	4,2	0,148	254,03
35	4,0	0,159	274,59	3,8	0,174	275,8	3,9	0,167	289,969	4,2	0,148	254,48
36	4,0	0,159	274,82	3,8	0,174	275,8	3,9	0,167	290,21	4,2	0,148	254,69
37	4,0	0,159	275,03	3,8	0,174	275,8	3,9	0,167	290,439	4,2	0,148	254,88
38	4,0	0,159	275,23	3,8	0,174	275,8	3,9	0,167	290,654	4,2	0,148	255,07
39	4,0	0,159	275,42	3,8	0,174	275,8	3,9	0,167	290,857	4,2	0,148	255,24
40	4,0	0,159	275,60	3,8	0,174	275,8	3,9	0,167	291,048	4,2	0,148	255,41



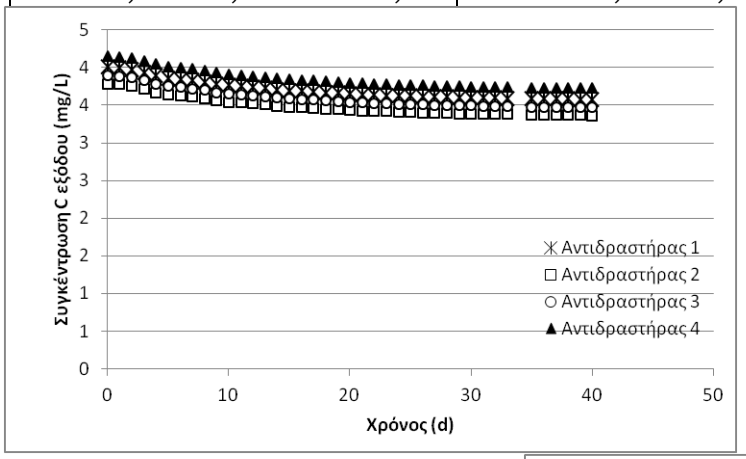


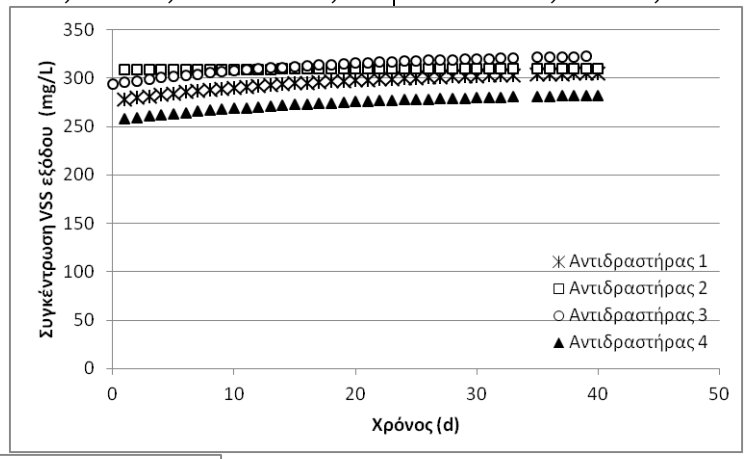


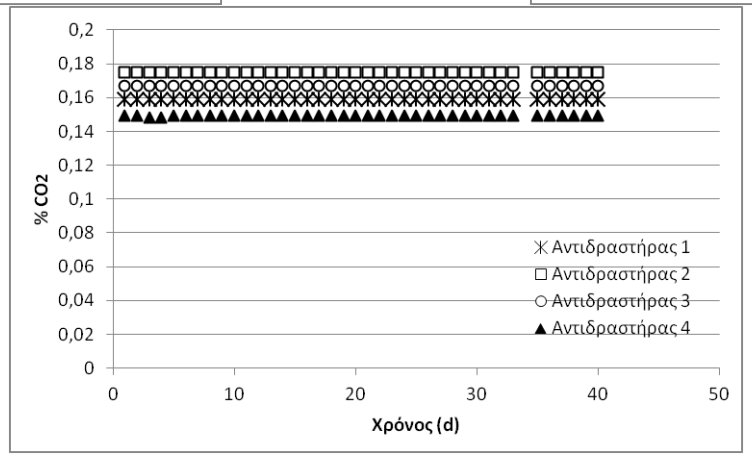
Θc 20

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	4,0	0,159	278,63	3,8	0,175	308,67	3,9	0,167	294,27	4,1	0,149	258,19
2	4,0	0,159	279,99	3,8	0,175	308,76	3,9	0,167	295,73	4,1	0,149	259,43
3	3,9	0,159	281,56	3,7	0,175	308,84	3,8	0,167	297,41	4,1	0,148	260,84
4	3,9	0,159	283,17	3,7	0,175	308,91	3,8	0,167	299,15	4,0	0,148	262,30
5	3,9	0,159	284,58	3,6	0,175	308,99	3,8	0,167	300,65	4,0	0,149	263,59
6	3,8	0,159	285,75	3,6	0,175	309,06	3,7	0,167	301,88	4,0	0,149	264,68
7	3,8	0,159	286,87	3,6	0,175	309,12	3,7	0,167	303,06	4,0	0,149	265,72
8	3,8	0,159	288,04	3,6	0,175	309,18	3,7	0,167	304,32	4,0	0,149	266,78
9	3,8	0,159	289,21	3,6	0,175	309,24	3,7	0,167	305,59	3,9	0,149	267,82
10	3,8	0,159	290,25	3,5	0,175	309,29	3,7	0,167	306,71	3,9	0,149	268,78
11	3,8	0,159	291,18	3,5	0,175	309,34	3,6	0,167	307,68	3,9	0,149	269,64
12	3,7	0,159	292,06	3,5	0,175	309,39	3,6	0,167	308,61	3,9	0,149	270,45
13	3,7	0,159	292,94	3,5	0,175	309,44	3,6	0,167	309,56	3,9	0,149	271,25
14	3,7	0,159	293,80	3,5	0,175	309,48	3,6	0,167	310,49	3,9	0,149	272,03
15	3,7	0,159	294,59	3,5	0,175	309,52	3,6	0,167	311,34	3,8	0,149	272,75
16	3,7	0,159	295,31	3,5	0,175	309,56	3,6	0,167	312,10	3,8	0,149	273,41
17	3,7	0,159	295,99	3,5	0,175	309,60	3,6	0,167	312,82	3,8	0,149	274,04
18	3,7	0,159	296,66	3,5	0,175	309,63	3,6	0,167	313,53	3,8	0,149	274,65
19	3,7	0,159	297,30	3,4	0,175	309,66	3,6	0,167	314,23	3,8	0,149	275,23
20	3,7	0,159	297,90	3,4	0,175	309,69	3,5	0,167	314,88	3,8	0,149	275,77
21	3,6	0,159	298,46	3,4	0,175	309,72	3,5	0,167	315,46	3,8	0,149	276,28
22	3,6	0,159	298,98	3,4	0,175	309,75	3,5	0,167	316,02	3,8	0,149	276,77
23	3,6	0,159	299,49	3,4	0,175	309,78	3,5	0,167	316,56	3,8	0,149	277,23
24	3,6	0,159	299,98	3,4	0,175	309,80	3,5	0,167	317,09	3,8	0,149	277,67
25	3,6	0,159	300,44	3,4	0,175	309,82	3,5	0,167	317,58	3,8	0,149	278,09
26	3,6	0,159	300,86	3,4	0,175	309,85	3,5	0,167	318,03	3,8	0,149	278,48
27	3,6	0,159	301,27	3,4	0,175	309,87	3,5	0,167	318,46	3,8	0,149	278,85
28	3,6	0,159	301,65	3,4	0,175	309,89	3,5	0,167	318,87	3,8	0,149	279,20
29	3,6	0,159	302,02	3,4	0,175	309,91	3,5	0,167	319,27	3,8	0,149	279,54
30	3,6	0,159	302,37	3,4	0,175	309,92	3,5	0,167	319,65	3,7	0,149	279,86

31	3,6	0,159	302,70	3,4	0,175	309,94	3,5	0,167	320,00	3,7	0,149	280,16
32	3,6	0,159	303,01	3,4	0,175	309,96	3,5	0,167	320,33	3,7	0,149	280,44
33	3,6	0,159	303,31	3,4	0,175	309,97	3,5	0,167	320,64	3,7	0,149	280,71
35	3,6	0,159	303,86	3,4	0,175	310,00	3,5	0,167	321,23	3,7	0,149	281,21
36	3,6	0,159	304,11	3,4	0,175	310,01	3,5	0,167	321,50	3,7	0,149	281,44
37	3,6	0,159	304,35	3,4	0,175	310,02	3,5	0,167	321,76	3,7	0,149	281,66
38	3,6	0,159	304,58	3,4	0,175	310,03	3,5	0,167	322,00	3,7	0,149	281,87
39	3,6	0,159	304,79	3,4	0,175	310,04	3,5	0,167	322,23	3,7	0,149	282,06
40	3,6	0,159	305,00	3,4	0,175	310,05	3,5	0,167	322,45	3,7	0,149	282,25



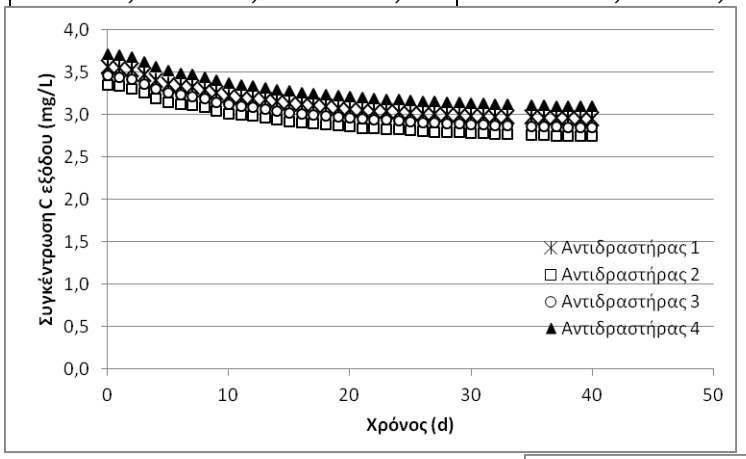


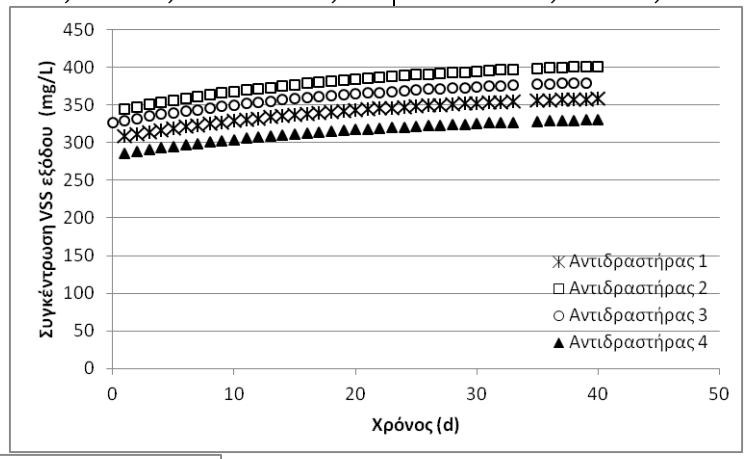


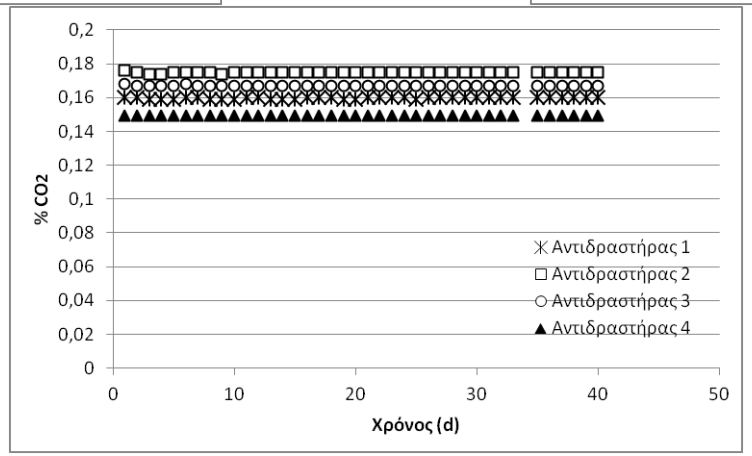
Θc 24

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	3,6	0,16	309,24	3,3	0,176	345,07	3,4	0,168	326,97	3,7	0,149	286,15
2	3,5	0,16	311,52	3,3	0,175	347,69	3,4	0,167	329,41	3,7	0,149	288,21
3	3,5	0,159	314,14	3,3	0,174	350,74	3,4	0,167	332,24	3,6	0,149	290,57
4	3,4	0,159	316,91	3,2	0,174	353,97	3,3	0,167	335,23	3,6	0,149	293,07
5	3,4	0,159	319,37	3,1	0,175	356,80	3,3	0,167	337,87	3,5	0,149	295,31
6	3,3	0,16	321,40	3,1	0,175	359,07	3,2	0,168	340,02	3,5	0,149	297,19
7	3,3	0,16	323,28	3,1	0,175	361,14	3,2	0,167	342,00	3,5	0,149	298,93
8	3,3	0,159	325,29	3,1	0,175	363,44	3,2	0,167	344,15	3,4	0,149	300,75
9	3,3	0,159	327,39	3,0	0,174	365,93	3,1	0,167	346,44	3,4	0,149	302,63
10	3,2	0,159	329,35	3,0	0,175	368,26	3,1	0,167	348,57	3,4	0,149	304,39
11	3,2	0,16	331,04	3,0	0,175	370,18	3,1	0,167	350,38	3,4	0,149	305,94
12	3,2	0,16	332,57	3,0	0,175	371,84	3,1	0,167	351,97	3,3	0,149	307,37
13	3,2	0,159	334,12	3,0	0,175	373,56	3,1	0,167	353,61	3,3	0,149	308,79
14	3,2	0,159	335,74	2,9	0,175	375,45	3,0	0,167	355,36	3,3	0,149	310,24
15	3,1	0,159	337,29	2,9	0,175	377,34	3,0	0,167	357,07	3,3	0,149	311,62
16	3,1	0,16	338,68	2,9	0,175	378,98	3,0	0,167	358,58	3,3	0,149	312,88
17	3,1	0,16	339,93	2,9	0,175	380,34	3,0	0,167	359,88	3,3	0,149	314,04
18	3,1	0,16	341,14	2,9	0,175	381,64	3,0	0,167	361,15	3,2	0,149	315,17
19	3,1	0,159	342,38	2,9	0,175	383,06	3,0	0,167	362,48	3,2	0,149	316,29
20	3,1	0,159	343,61	2,9	0,175	384,55	3,0	0,167	363,83	3,2	0,149	317,38
21	3,1	0,16	344,74	2,8	0,175	385,93	2,9	0,167	365,07	3,2	0,149	318,39
22	3,0	0,16	345,76	2,8	0,175	387,09	2,9	0,167	366,15	3,2	0,149	319,33
23	3,0	0,16	346,72	2,8	0,175	388,10	2,9	0,167	367,15	3,2	0,149	320,23
24	3,0	0,16	347,68	2,8	0,175	389,15	2,9	0,167	368,17	3,2	0,149	321,10
25	3,0	0,159	348,65	2,8	0,175	390,29	2,9	0,167	369,22	3,2	0,149	321,96
26	3,0	0,16	349,56	2,8	0,175	391,43	2,9	0,167	370,23	3,2	0,149	322,77
27	3,0	0,16	350,39	2,8	0,175	392,43	2,9	0,167	371,13	3,2	0,149	323,53
28	3,0	0,16	351,16	2,8	0,175	393,26	2,9	0,167	371,93	3,1	0,149	324,25
29	3,0	0,16	351,92	2,8	0,175	394,04	2,9	0,167	372,71	3,1	0,149	324,94
30	3,0	0,16	352,67	2,8	0,175	394,89	2,9	0,167	373,52	3,1	0,149	325,62

31	3,0	0,16	353,40	2,8	0,175	395,80	2,9	0,167	374,33	3,1	0,149	326,27
32	3,0	0,16	354,08	2,8	0,175	396,65	2,9	0,167	375,08	3,1	0,149	326,88
33	3,0	0,16	354,70	2,8	0,175	397,36	2,9	0,167	375,74	3,1	0,149	327,45
35	3,0	0,16	355,89	2,8	0,175	398,60	2,9	0,167	376,98	3,1	0,149	328,54
36	3,0	0,16	356,47	2,8	0,175	399,29	2,9	0,167	377,61	3,1	0,149	329,06
37	3,0	0,16	357,01	2,8	0,175	399,99	2,9	0,167	378,22	3,1	0,149	329,55
38	3,0	0,16	357,52	2,7	0,175	400,61	2,9	0,167	378,77	3,1	0,149	330,01
39	3,0	0,16	358,00	2,7	0,175	401,12	2,9	0,167	379,27	3,1	0,149	330,46
40	3,0	0,16	358,46	2,7	0,175	401,59	2,8	0,167	379,75	3,1	0,149	330,88



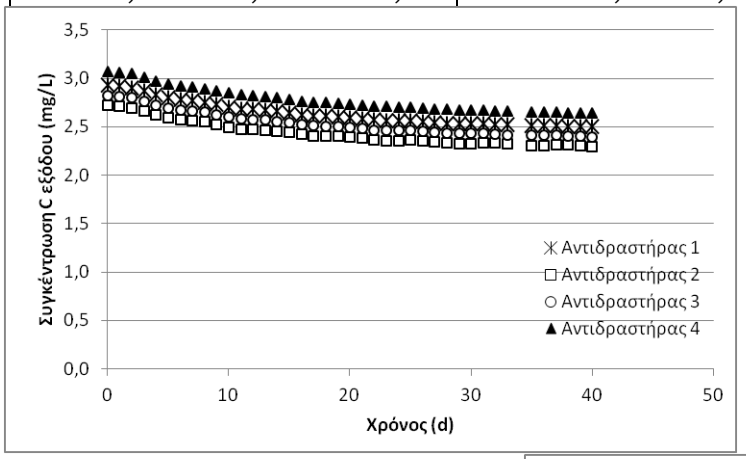


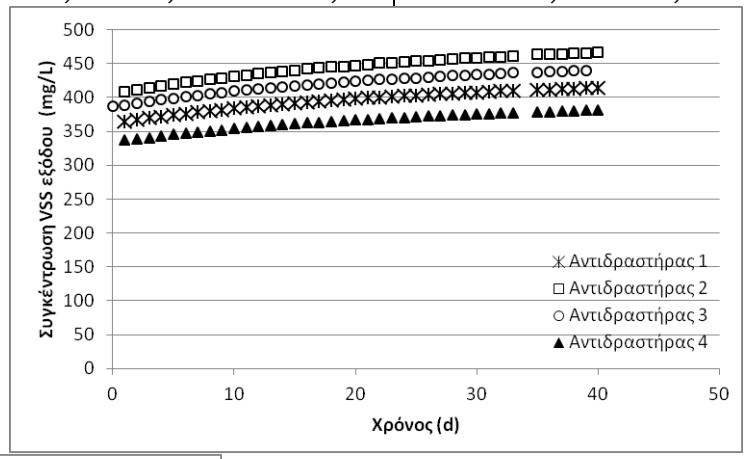


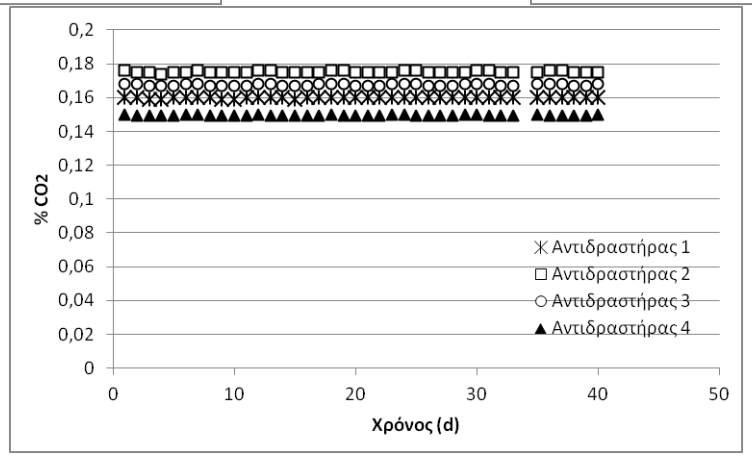
Θc 28

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
1	2,9	0,16	365,21	2,7	0,176	409,38	2,8	0,168	386,99	3,1	0,15	337,02
2	2,9	0,16	367,34	2,7	0,175	411,85	2,8	0,168	389,28	3,0	0,149	338,94
3	2,9	0,159	369,76	2,7	0,175	414,67	2,8	0,167	391,90	3,0	0,149	341,11
4	2,8	0,159	372,35	2,6	0,174	417,69	2,7	0,167	394,71	3,0	0,149	343,43
5	2,8	0,16	374,73	2,6	0,175	420,48	2,7	0,167	397,29	2,9	0,149	345,57
6	2,8	0,16	376,69	2,6	0,175	422,75	2,7	0,168	399,39	2,9	0,15	347,36
7	2,8	0,16	378,41	2,6	0,176	424,66	2,7	0,168	401,20	2,9	0,15	348,96
8	2,8	0,16	380,21	2,5	0,175	426,67	2,7	0,167	403,10	2,9	0,149	350,61
9	2,7	0,159	382,21	2,5	0,175	428,99	2,6	0,167	405,27	2,9	0,149	352,40
10	2,7	0,159	384,22	2,5	0,175	431,43	2,6	0,167	407,49	2,8	0,149	354,17
11	2,7	0,16	385,99	2,5	0,175	433,58	2,6	0,167	409,43	2,8	0,149	355,74
12	2,7	0,16	387,47	2,5	0,176	435,27	2,6	0,168	411,00	2,8	0,15	357,11
13	2,7	0,16	388,84	2,5	0,176	436,73	2,6	0,168	412,42	2,8	0,149	358,41
14	2,7	0,16	390,33	2,5	0,175	438,34	2,6	0,167	413,98	2,8	0,149	359,78
15	2,6	0,159	391,94	2,4	0,175	440,24	2,5	0,167	415,75	2,8	0,149	361,20
16	2,6	0,16	393,50	2,4	0,175	442,20	2,5	0,167	417,49	2,8	0,149	362,54
17	2,6	0,16	394,83	2,4	0,175	443,88	2,5	0,168	418,97	2,8	0,149	363,73
18	2,6	0,16	395,96	2,4	0,176	445,14	2,5	0,168	420,16	2,8	0,15	364,80
19	2,6	0,16	397,08	2,4	0,176	446,24	2,5	0,168	421,27	2,7	0,149	365,86
20	2,6	0,16	398,29	2,4	0,175	447,52	2,5	0,167	422,55	2,7	0,149	366,97
21	2,6	0,16	399,58	2,4	0,175	449,08	2,5	0,167	423,98	2,7	0,149	368,08
22	2,6	0,16	400,77	2,4	0,175	450,68	2,5	0,167	425,35	2,7	0,149	369,11
23	2,6	0,16	401,79	2,4	0,175	451,99	2,5	0,168	426,48	2,7	0,15	370,02
24	2,6	0,16	402,67	2,4	0,176	452,94	2,5	0,168	427,38	2,7	0,15	370,88
25	2,6	0,16	403,57	2,4	0,176	453,75	2,5	0,168	428,26	2,7	0,149	371,74
26	2,6	0,16	404,56	2,4	0,175	454,75	2,5	0,167	429,29	2,7	0,149	372,63
27	2,5	0,16	405,58	2,3	0,175	456,03	2,4	0,167	430,45	2,7	0,149	373,49
28	2,5	0,16	406,50	2,3	0,175	457,36	2,4	0,167	431,54	2,7	0,149	374,28
29	2,5	0,16	407,28	2,3	0,175	458,40	2,4	0,168	432,41	2,7	0,15	375,00
30	2,5	0,16	407,97	2,3	0,176	459,10	2,4	0,168	433,09	2,7	0,15	375,68

31	2,5	0,16	408,70	2,3	0,176	459,67	2,4	0,168	433,78	2,7	0,149	376,38
32	2,5	0,16	409,50	2,3	0,175	460,46	2,4	0,167	434,62	2,7	0,149	377,08
33	2,5	0,16	410,31	2,3	0,175	461,52	2,4	0,167	435,57	2,7	0,149	377,75
35	2,5	0,16	411,62	2,3	0,175	463,47	2,4	0,168	437,09	2,7	0,15	378,93
36	2,5	0,16	412,18	2,3	0,176	463,98	2,4	0,168	437,61	2,7	0,149	379,48
37	2,5	0,16	412,77	2,3	0,176	464,37	2,4	0,168	438,15	2,6	0,149	380,04
38	2,5	0,16	413,41	2,3	0,175	464,97	2,4	0,167	438,84	2,6	0,149	380,60
39	2,5	0,16	414,05	2,3	0,175	465,86	2,4	0,167	439,61	2,6	0,149	381,13
40	2,5	0,16	414,60	2,3	0,175	466,80	2,4	0,168	440,30	2,6	0,15	381,61



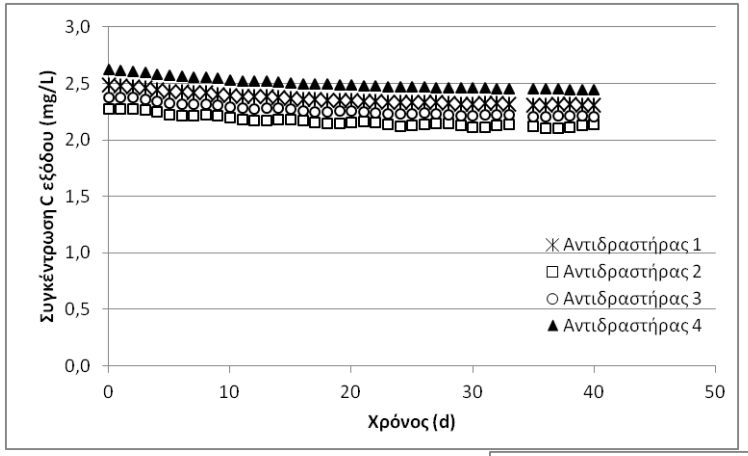


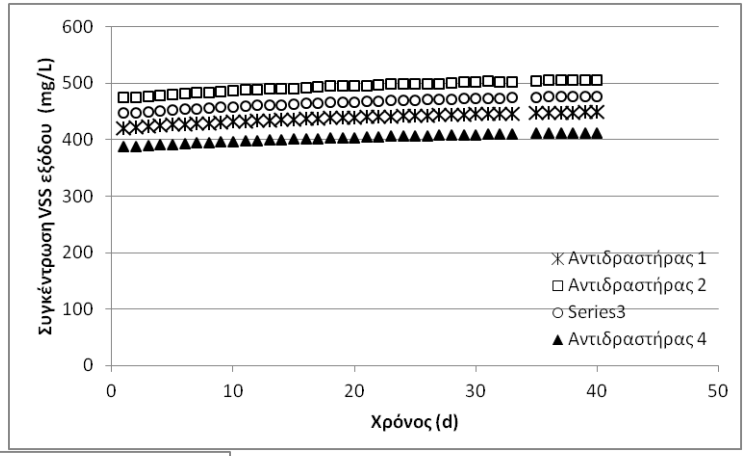


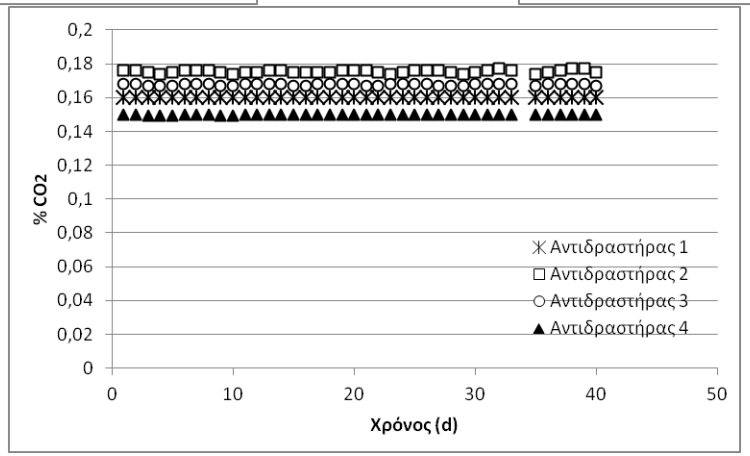
Θc 30

χρόνος (d)	Αντιδραστήρας Α TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Β TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Γ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)	Αντιδραστήρας Δ TOC (mg/L)	CO2 (%)	VSS (mg/L)
2	2,5	0,16	422,39	2,3	0,176	475,46	2,4	0,168	448,50	2,6	0,15	388,72
3	2,5	0,16	423,75	2,3	0,175	476,91	2,4	0,167	450,01	2,6	0,149	389,91
4	2,4	0,16	425,19	2,2	0,174	478,80	2,3	0,167	451,68	2,6	0,149	391,16
5	2,4	0,16	426,50	2,2	0,175	480,71	2,3	0,167	453,18	2,6	0,149	392,33
6	2,4	0,16	427,57	2,2	0,176	482,14	2,3	0,168	454,31	2,6	0,15	393,33
7	2,4	0,16	428,50	2,2	0,176	482,99	2,3	0,168	455,20	2,6	0,15	394,22
8	2,4	0,16	429,47	2,2	0,176	483,69	2,3	0,168	456,14	2,6	0,15	395,11
9	2,4	0,16	430,58	2,2	0,175	484,75	2,3	0,167	457,36	2,5	0,149	396,07
10	2,4	0,16	431,73	2,2	0,174	486,31	2,3	0,167	458,73	2,5	0,149	397,06
11	2,4	0,16	432,77	2,2	0,175	487,99	2,3	0,168	459,97	2,5	0,15	397,98
12	2,4	0,16	433,61	2,2	0,175	489,24	2,3	0,168	460,87	2,5	0,15	398,76
13	2,4	0,16	434,34	2,2	0,176	489,87	2,3	0,168	461,52	2,5	0,15	399,47
14	2,4	0,16	435,11	2,2	0,176	490,25	2,3	0,168	462,22	2,5	0,15	400,19
15	2,4	0,16	436,00	2,2	0,175	490,96	2,3	0,167	463,19	2,5	0,15	400,97
16	2,4	0,16	436,94	2,2	0,175	492,23	2,3	0,167	464,34	2,5	0,15	401,76
17	2,4	0,16	437,77	2,2	0,175	493,74	2,3	0,168	465,38	2,5	0,15	402,47
18	2,4	0,16	438,43	2,1	0,175	494,89	2,2	0,168	466,10	2,5	0,15	403,09
19	2,4	0,16	438,99	2,1	0,176	495,39	2,3	0,168	466,57	2,5	0,15	403,66
20	2,4	0,16	439,60	2,2	0,176	495,51	2,3	0,168	467,08	2,5	0,15	404,24
21	2,3	0,16	440,33	2,2	0,176	495,88	2,2	0,167	467,85	2,5	0,15	404,87
22	2,3	0,16	441,09	2,2	0,175	496,87	2,2	0,167	468,81	2,5	0,15	405,50
23	2,3	0,16	441,76	2,1	0,174	498,24	2,2	0,168	469,70	2,5	0,15	406,06
24	2,3	0,16	442,27	2,1	0,175	499,37	2,2	0,168	470,29	2,5	0,15	406,55
25	2,3	0,16	442,71	2,1	0,176	499,81	2,2	0,168	470,62	2,5	0,15	407,01
26	2,3	0,16	443,20	2,1	0,176	499,73	2,2	0,168	470,97	2,5	0,15	407,49
27	2,3	0,16	443,78	2,1	0,176	499,79	2,2	0,167	471,56	2,5	0,15	407,99
28	2,3	0,16	444,41	2,1	0,175	500,49	2,2	0,167	472,37	2,5	0,15	408,49
29	2,3	0,16	444,95	2,1	0,174	501,73	2,2	0,167	473,15	2,5	0,15	408,94
30	2,3	0,16	445,36	2,1	0,175	502,87	2,2	0,168	473,65	2,5	0,15	409,33
31	2,3	0,16	445,70	2,1	0,176	503,33	2,2	0,168	473,88	2,5	0,15	409,70

32	2,3	0,16	446,08	2,1	0,177	503,12	2,2	0,168	474,09	2,5	0,15	410,09
33	2,3	0,16	446,55	2,1	0,176	502,88	2,2	0,168	474,54	2,5	0,15	410,50
35	2,3	0,16	447,50	2,1	0,174	504,36	2,2	0,167	475,92	2,4	0,15	411,25
36	2,3	0,16	447,83	2,1	0,175	505,54	2,2	0,168	476,36	2,4	0,15	411,56
37	2,3	0,16	448,09	2,1	0,176	506,08	2,2	0,168	476,51	2,4	0,15	411,86
38	2,3	0,16	448,38	2,1	0,177	505,81	2,2	0,168	476,61	2,4	0,15	412,18
39	2,3	0,16	448,77	2,1	0,177	505,30	2,2	0,168	476,92	2,4	0,15	412,51
40	2,3	0,16	449,19	2,1	0,175	505,36	2,2	0,167	477,50	2,4	0,15	412,83



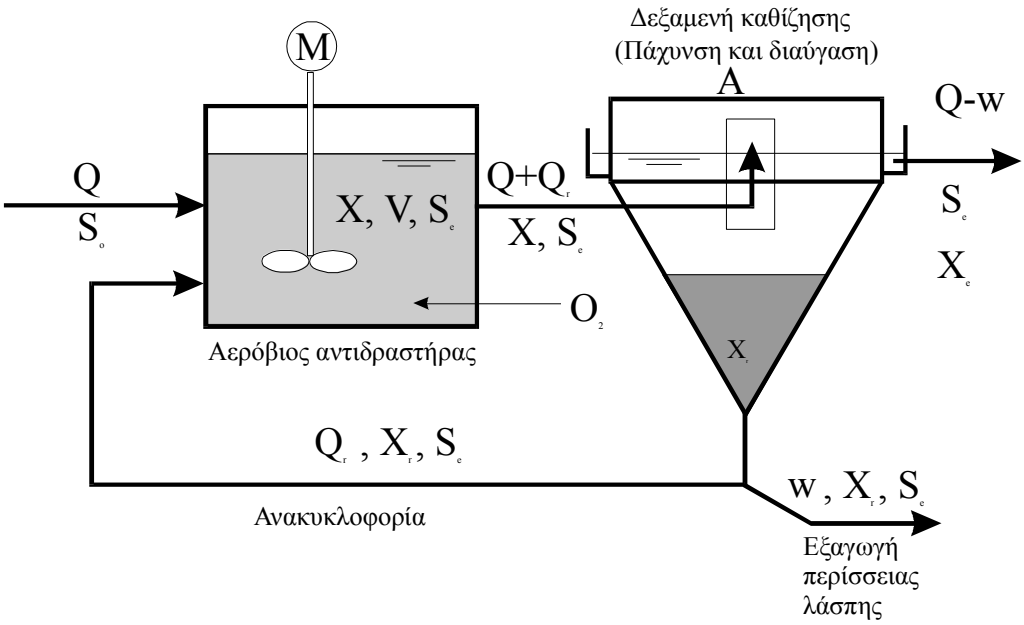




ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ Μοντέλο υπολογισμού της επίδρασης του $Θ_c$ στην ενεργειακή κατανάλωση των βιολογικών καθαρισμών

Για την εύρεση της ενεργειακής κατανάλωσης του αργόστροφου επιφανειακού αεριστήρα σε σχέση με την ηλικία της λάσπης αρχικά έγιναν οι εξής παραδοχές για το σύστημα της ενεργού ιλύος που εξετάζεται:

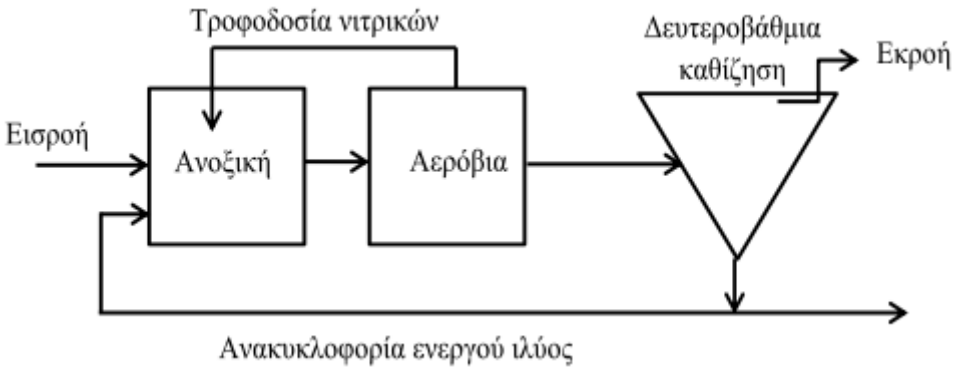
- Ο αερόβιος αντιδραστήρας είναι ιδανικής ροής πλήρους ανάμιξης. Χρησιμοποιήθηκε η διάταξη του παρακάτω σχήματος



Σχήμα 1. Διάταξη αερόβιου αντιδραστήρα

- Η παροχή των αστικών λυμάτων είναι σταθερής ροής και δεν λαμβάνονται υπόψη οι ωριαίες και εποχιακές διακυμάνσεις της.
- Τα ολικά αιωρούμενα στερεά εισόδου (MLVSS) είναι αμελητέα
  Xo =0 mg/L
- Οι συγκεντρώσεις εισόδου BOD και TKN επιλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία και αφορούν τυπικές τιμές για τα αστικά λύματα
  So =350 mg/L και TKNo =56 mg/L
- Η ανακύκλωση της βιολογικής ιλύος γίνεται από τη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης.
- Η συγκέντρωση των MLVSS στον αερόβιο αντιδραστήρα θεωρείται ομοιογενής και ίση με **3500 mg/**L.
- Η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στον αντιδραστήρα είναι
  DO=2 mg/L.

- Για την απομάκρυνση του αζώτου χρησιμοποιείται προ-ανοξική-αερόβια διεργασία όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 1. Διάγραμμα προ-ανοξικής-αερόβιας διεργασίας

- Οι τιμές των βιοκινητικών συντελεστών και η τιμή του pH επιλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία και αφορούν τυπικές τιμές για τα αστικά λύματα.
- Το βάθος της αερόβιας δεξαμενής είναι **3,2 m**.
- Η εγκατάσταση θεωρείται ότι βρίσκεται στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας , **Eo=0m**
- Η συγκέντρωση του **νιτρικού αζώτου** στην έξοδο θεωρείται ίση με **7mg/l**

Για δεδομένη συγκέντρωση BOD εισόδου, θερμοκρασία περιβάλλοντος, παροχή λυμάτων και συγκέντρωση MLVSS στον αερόβιο αντιδραστήρα, υπολογίζεται για ηλικία λάσπης από 1-30 ημέρες, σύμφωνα με το παρακάτω κινητικό μοντέλο.

Σύμφωνα με το κινητικό μοντέλο νιτροποίησης, που περιγράφεται παρακάτω, υπολογίστηκε η συγκέντρωση αμμωνιακών εκροής, η οποία περιορίστηκε στο διάστημα $0 \leq NH\ 4e\ -N \leq 5$ mg/l. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η συγκέντρωση των αυτότροφων βακτηρίων XN σύμφωνα Υπολογίστηκε η ποσότητα του αζώτου που δεσμεύεται στην συνολική κυτταρική μάζα και εφαρμόστηκε ισοζύγιο αζώτου σε όλο το σύστημα για τον υπολογισμό της ποσότητα του αζώτου που απονιτροποιείται. Στη

συνέχεια, υπολογίστηκε το BOD που απομακρύνεται στην απονιτροποίηση και αφαιρέθηκε από το αρχικό BOD εισόδου.

Υπολογίστηκαν οι απαιτήσεις σε οξυγόνο, με τις απαραίτητες διορθώσεις ως προς τις συνθήκες θερμοκρασίας και τη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου του αερόβιου αντιδραστήρα, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο απαιτούμενος ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου. Κατόπιν, υπολογίστηκε η απορροφούμενη ισχύς του αργόστροφου επιφανειακού αεριστήρα και έγινε αναγωγή της ως προς kg παραγόμενης κυτταρικής μάζας και ανά kg απομακρυνόμενου BOD.

Κινητικό Μοντέλο Αφομοίωσης BOD

Στον αερόβιο βιοαντιδραστήρα η αφομοίωση του BOD ακολουθεί την πορεία του παρακάτω Σχήματος 2

Όπου: μ= dx/dt ειδικός ρυθμός αύξησης της βιομάζας (h^{-1})

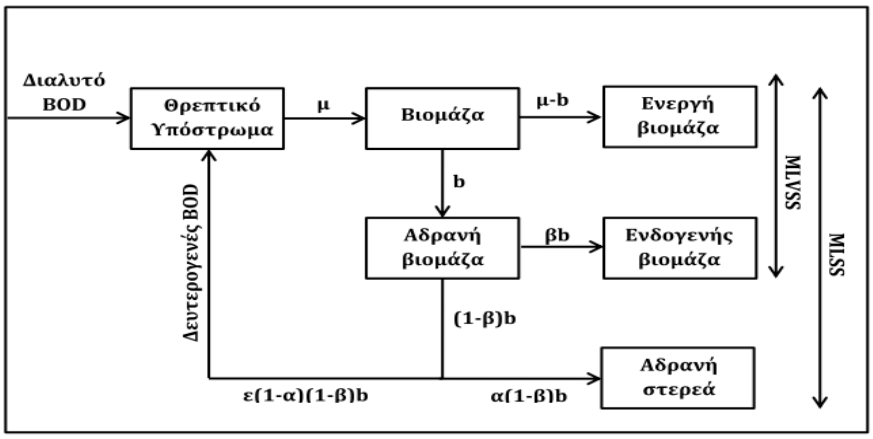
b= ειδικός ρυθμός θανάτου των μικροοργανισμών (h^{-1})

Η σχέση παραγωγής βιομάζας και κατανάλωσης BOD δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = Y * \sigma,$$

Όπου Y^*= πραγματικός συντελεστής παραγωγής κυτταρικής μάζας

Και $\sigma = dS / X^*dt$



Διάγραμμα 2 Πορεία αφομοίωσης BOD

Εξαιτίας του θανάτου των μικροοργανισμών (β), η καθαρή παραγωγή ζωντανών μικροοργανισμών (μ_n) δίνεται από την σχέση:

$$\mu_n = \mu - \beta$$

Μέρος της βιομάζας, λόγω του φαινομένου του θανάτου, μετατρέπεται σε αδρανή βιομάζα, της οποίας ένα ποσοστό μετατρέπεται σε αδρανή στερεά $a(1-\beta)b$ που δεν επιδέχονται περαιτέρω βιοαποικοδόμηση, ένα άλλο ποσοστό παραμένει νεκρή οργανική βιομάζα που επιδέχεται περαιτέρω βιοαποικοδόμηση (ενδογενής βιομάζα) βb και το υπόλοιπο $(1-a)(1-\beta)b$ μετατρέπεται σε διαλυτό υπόστρωμα (δευτερογενές BOD) με ένα συντελεστή συσχέτισης ε

Για τα αστικά λύματα ισχύει: $a=0,41-0,010345*\Theta_c$, $\beta=0,2$ και $\varepsilon=0,98$

Επομένως, ο φαινομενικός ρυθμός αφομοίωσης του BOD δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_n = \sigma - \varepsilon\,(1-a)(1-\beta)b$$

Η ενεργής βιομάζα και η ενδογενής βιομάζα επειδή είναι δύσκολο να μετρηθούν εκφράζονται σε MLVSS δηλαδή ως οργανικά πτητικά στερεά των ολικών αιωρούμενων στερεών (MLSS). Με παραδοχή της υπόθεσης ότι ο λόγος των μικροοργανισμών ως προς τα MLVSS παραμένει σταθερός. Αν ορίσουμε λοιπόν ως:

$$\eta = \text{ενεργή βιομάζα/ MLVSS}$$

τότε,

ορίζοντας $\mu_n' = \mu_n$ με βάση τα MLVSS και

$\sigma_n' = \sigma_n$ με βάση τα MLVSS τότε:

$$\mu_n' = (\mu - (1-\beta)b)n = \mu - b = \mu_n$$

$$\sigma_n' = \eta\,\sigma_n$$

Αυτό αποδεικνύει πως ο ρυθμός παραγωγής κυτταρικής μάζας δεν εξαρτώνται από το αν μετράται με βάση την οργανική βιομάζα ή τα ολικά αιωρούμενα στερεά (MLVSS), σε αντίθεση με τον ρυθμό αφομοίωσης του

BOD. Επομένως, ο φαινομενικός συντελεστής παραγωγής κυτταρικής μάζας δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\quad}{\quad}, \quad \mu\varepsilon$$

$$Y_o = 0{,}3675 + 0{,}0235T$$

$$C = 5{,}1(10^{10})e^{-8790/(T+273)}$$

Ο ρυθμός θανάτου b δίνεται από τη λύση της δευτεροβάθμιας εξίσωσης:

$$a_1 b^2 + a_2 b + a_3 = 0$$

με

$$a_1 = \beta(4{\mu_n}^2 + C^2)$$

$$a_2 = \mu_n(4{\mu_n}^2 + C^2) - \varepsilon(1-\alpha)(1-\beta)Y\mu_n(2\mu_n + C)^2 - 4{\mu_n}^2\beta C$$

$$a_3 = -4{\mu_n}^3 C$$

Σε βιοαντιδραστήρες όπου ο περιοριστικός παράγοντας είναι το υπόστρωμα, εφαρμόζεται με επιτυχία το τροποποιημένο μοντέλο Monod, το μοντέλο του Lawrence-Mac Carty . Κατά το τροποποιημένο αυτό μοντέλο ισχύει:

$$\sigma = \frac{k_{max}S}{k_s + S}$$

Όπου: k max =μέγιστος αριθμός αφομοίωσης του BOD (kg/kg-d)

K s =συντελεστής κορεσμού (mg/L)

S= συγκέντρωση υποστρώματος (kg/m^3)

Όταν *ks=S* τότε *σ= kmax /2*. Η σταθερά κορεσμού ορίζεται ως η συγκέντρωση του υποστρώματος κατά την οποία ο ειδικός ρυθμός αφομοίωσης του υποστρώματος ελαττώνεται στο μισό του μέγιστου ρυθμού του. Τα *kmax* και *ks* εξαρτώνται από την θερμοκρασία και το είδος του αποβλήτου.

$$k_{max} = 1{,}076(10^{12})24e^{-8166/(T+273)}$$

$$k_s = 7{,}8(10^{10})e^{-5420/(T+273)}$$

Αφού

$$\Theta_c = \frac{1}{(\mu - b)} = \frac{1}{\mu_n}$$

Τότε:

$$n = \frac{\mu_n}{\mu_n + \beta b \Theta_C}$$

$$Y = Y_o e^{-2\frac{C}{\frac{2}{\Theta_C}+C}}$$

$$Y^* = Y \frac{1 + b\Theta_C}{1 + (\beta + \varepsilon(1-\alpha)(1-\beta)Y) b\Theta_C}$$

$$a_1 = \beta(4 + C^2\Theta_C^2)$$

$$a_2 = \frac{4 + C^2\theta_C^2}{\theta_C} - \varepsilon(1-\alpha)(1-\beta)Y\frac{(2+C\Theta_C)^2}{\theta_C} - 4\beta C$$

$$a_3 = -4C/\Theta_C$$

Η ηλικία της λάσπης για δεδομένη συγκέντρωση εξαγωγής BOD δίνεται από τον τύπο:

$$\Theta_{CC} = \left(\frac{Y_C k_{max,C} S_e}{k_{S,C} + S_e} - b_C\right)^{-1}$$

Η συγκέντρωση του BOD στην έξοδο είναι: $S_e = \frac{k_{S,C}(1 + b_C\theta_{CC})}{\theta_{CC}(Y_C k_{max,C} - b_C) - 1}$

Η οριακή ηλικία λάσπης ως προς τη βιοαποικοδόμηση του BOD δίνεται από την εξίσωση

$$lim\Theta_{CC} = \frac{1}{Y_C k_{max,C} - b_C}$$

Η συγκέντρωση ετερότροφων βακτηρίων είναι: $X_C = \frac{Y_C(S_o - S_e)}{1 + b_c\theta_{CC}}\frac{\theta_{CC}}{\theta}$

Η συγκέντρωση της πυκνωμένης λάσπης είναι $X_{rC} = \frac{X_C}{r}\left[1 + r - \frac{\theta}{\theta_{CC}}\right]$

Η παραγωγή περίσσειας λάσπης $P_{XC} = \frac{Y_C Q(S_o - S_e)}{1 + b_C\theta_{CC}}$

Κινητικό Μοντέλο Νιτροποίησης

Ο περιοριστικός παράγοντας στην βιοοξείδωση των αμμωνιακών σε νιτρικά είναι η συγκέντρωση των νιτροβακτηρίων για αυτό το κινητικό μοντέλο Monod θεωρείται ικανοποιητικό.

Η παραγωγή κυτταρικής μάζας περιγράφεται από τον εξής τύπο:

Η οξείδωση αμμωνιακών σε νιτρικά:

Όπου: X_N=συγκέντρωση των νιτροβακτηρίων, mg/l

μ_{maxN}=μέγιστος ρυθμός παραγωγής κυτταρικής βιομάζας νιτροβακτηρίων, h^{-1}

NH_4=συγκέντρωση των αμμωνιακών στον αερόβιο αντιδραστήρα, mg/l (η συγκέντρωση αυτή συμπίπτει με την επιθυμητή συγκέντρωση αμμωνιακών στην έξοδο)

b_N=ρυθμός θανάτου νιτροβακτηρίων, h-1

K_{sN}=συντελεστής κορεσμού νιτροβακτηρίων, mg/l

Y*=θεωρητικός συντελεστής παραγωγής κυτταρικής βιομάζας, mgr/mgr

Ο ρυθμός οξείδωσης των αμμωνιακών προκύπτει σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις ως εξής:

όπου KN=ρυθμός οξείδωσης αμμωνιακών, kg NH4/kg νιτροβακτηρίων

Ο θεωρητικός συντελεστής παραγωγής κυτταρικής μάζας για τα νιτροβακτήρια, που προκύπτει από την στοιχειακή ανάλυση των αντιδράεων είναι Y*=0,147. Παρόλα αυτά η τελική του τιμή εξαρτάται από το ποσοστό των αμμωνιακών που οξειδώνονται για παραγωγή ενέργειας και το ποσοστό που καταναλώνεται για σύνθεση κυτταρικής

μάζας. Τα ποσοστά αυτά εξαρτώνται από την ηλικία της λάσπης, Θc, και το ρυθμό θανάτου b_N. Συγκεκριμένα δίνεται από την εξίσωση:

Ο ρυθμός θανάτου εξαρτάται από την θερμοκρασία και δίνεται από την εξίσωση:

Ο συντελεστής κορεσμού εξαρτάται επίσης από την θερμοκρασία σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

Nitrosomonas (για T<25 ^oC):

Nitrobacter (για T>25 ^oC):

Ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής κυτταρικής μάζας των νιτροβακτηρίων εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το διαλυμένο οξυγόνο και το pH, με τις ακόλουθες σχέσεις:

Nitrosomonas (για T<25 ^oC):

Nitrobacter (για T>25 ^oC):

Όπου:

Επειδή οι βιοαντιδράσεις είναι έντονα οξειδωτικές, το διαλυμένο οξυγόνο επιδρά σημαντικά στο ρυθμό οξείδωσης των αμμωνιακών. Επομένως, ο μ_N πρεπει να πολλαπλαστιαστεί με τον παραπάνω συντελεστή f_{DO} ο οποίος ορίζεται ως:

Όπου: kDO= η σταθερά κορεσμού για το οξυγόνο σε mg/l που έχει τιμή περίπου 0,5-1 mg O2/lt και δείχνει ότι η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου πρέπει να είναι να είναι τουλάχιστον 2-3 mg/lt για να αποφύγουμε μείωση της ταχύτητας εξαιτίας έλλειψης οξυγόνου. Χαμηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου (<1-1,5 mg/lt) οδηγούν σε παρεμποδισμένη νιτροποίηση ιδίως υπό συνθήκες έντονα κυμαινόμενων φορτίων αζώτου. Ο συντελεστής κορεσμού εξαρτάται από τη θερμοκρασία με την ακόλουθη σχέση:

Η βέλτιστη τιμή του pH για νιτροποίηση κυμαίνεται μεταξύ 7,2 και 9,0 ενώ σε τιμές pH κάτω του 6 και πάνω από 10 επέρχεται πλήρης αδρανοποίηση στα νιτροποιητικά βακτήρια. Η οξείδωση των οργανικών υλικών παράγει CO_2 το οποίο τείνει να μειώσει το pH. Η μείωση αυτή εξουδετερώνεται από τη ρυθμιστική ικανότητα του συστήματος εφόσον υπάρχει η απαιτούμενη αλκαλικότητα (τουλάχιστον 50 mg/l $CaCO_3$).

Ο συντελεστής διόρθωσης ως προς το pH δίνεται από την παρακάτω σχέση η οποία ισχύει για 6,5<pH<8,2:

Παρόμοια με τις γενικές εξισώσεις επίλυσης ενεργού ιλύος, εφαρμόστηκε το ισοζύγιο για τη μάζα των νιτροβακτηρίων σε όλο το σύστημα της ενεργού ιλύος:

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση ορισμού της ηλικίας της λάσπης και θεωώντας ότι τα MLVSS στην έξοδο είναι αμελητέα (Xe=0) είναι:

Το ισοζύγιο των αμμωνιακών γύρω από τον αερόβιο αντιδραστήρα:

Ο συνδυασμός των παραπάνω εξισώσεων δίνει την εξίσωση:

Η συγκέντρωση αυτή των αμμωνιακών είναι η ελάχιστη που μπορεί να επιτευχθεί με δεδομένο χρόνο παραμονής των στερεών, εφόσον εφαρμόζεται ο κατάλληλος υδραυλικός χρόνος παραμονής.

Η συγκέντρωση των νιτροβακτηρίων X_N στον αερόβιο αντιδραστήρα δίνεται από την σχέση:

Η διεργασία της νιτροποίησης διενεργείται παράλληλα και ταυτόχρονα με την βιοοξείδωση του BOD. Τα νιτροβακτήρια είναι ετερότροφοι οργανισμοί και επομένως για τη δόμηση της κυτταρικής τους μάζας προσλαμβάνουν τον απαραίτητο άνθρακα από το CO2 που παράγεται κατά την βιοαποικοδόμηση του BOD. Επομένως, η συγκέντρωση των νιτροβακτηρίων εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ετερότροφων βακτηρίων που βοιαποικοδομούν το BOD σύμφωνα με την εξίσωση:

Ο ελάχιστος χρόνος παραμονής όπως υπολογίστηκε στη βιοοξείδωση του BOD, προκύπτει αντίστοιχα για τη νιτροποίηση σύμφωνα με τον τύπο:

Το μ_N αντιστοιχεί στη μέγιστη παραγωγή κυτταρικής μάζας νιτροβακτηρίων στη δεδομένη θερμοκρασία, συγκέντρωση οξυγόνου και pH.

Κινητικό Μοντέλο Απονιτροποίησης

Η αναγωγή των νιτρικών σε αέριο άζωτο πραγματοποιείται από επαμφοτερίζοντες μικροοργανισμούς που πραγματοποιούν την οξείδωση του BOD. Οι μικροοργανισμοί αυτοί, προσπαθώντας να εξασφαλίσουν το απαραίτητο για αυτούς οξυγόνο, αναγκάζονται να ανάγουν τα νιτρικά σε άζωτο. Κατά την αναγωγή αυτή απαιτείται η συμμετοχή οργανικού άνθρακα, ο οποίος μετατρέπεται σε CO_2. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος απονιτροποίησης είναι η προαπονιτροποίηση, όπου ως πηγή άνθρακα χρησιμοποιείται το BOD του αποβλήτου. Με αυτόν τον τρόπο παρατηρείται σημαντική απομείωση του BOD χωρίς σχεδόν καθόλου παραγωγή κυτταρικής μάζας, διότι όλο το υπόστρωμα καταναλώνεται για τις βιοαντιδράσεις ενέργειας. Η συγκέντρωση των νιτρικών στον βιοαντιδραστήρα απονιτροποίησης πρέπει να είναι πολύ μικρή, επομένως ο περιοριστικός παράγοντας στις βιοαντιδράσεις απονιτροποίησης είναι η συγκέντρωση του υποστρώματος. Το μοντέλο που εκφράζει την κινητική είναι το τροποποιημένο μοντέλο Monod σύμφωνα με την σχέση που δίνει τον ρυθμό αναγωγής των νιτρικών:

Όπου kd=ρυθμός αναγωγής νιτρικών, kg NO_3/kg μικροοργανισμών –d

K_{dmax}=μέγιστος ρυθμός αναγωγής νιτρικών, d^{-1}

K_{sd}=σταθερά κορεσμού, mg/lt

Το k_{dmax} εξαρτάται από το είδος του οργανικού υποστρώματος, τη θερμοκρασία και το pH. Η σχέση που συνδέει το k_{dmax} και την θερμοκρασία είναι η εξής:

Όπου k_{dmax} είναι ο μέγιστος ρυθμός αναγωγής των NO_3 στους 20 ^oC, ο οποίος για τα ανεπεξέργαστα αστικά λύματα είναι 0,25 gr NO_3/gr SSV-d.

Ο συντλεστής Φ είναι ίσος με 1,06 για Θc<6 days, 1,1 για 6<Θc<10 και 1,12 για Θc>10 μέρες. Για συγκεντρώσεις NO_3>2 mg/l ισχύει $k_d=k_{dmax}$.

Η ποσότητα των νιτρικών που ανάγονται σε αέριο άζωτο προκύπτει από το ισοζύγιο του αζώτου σύμφωνα με την εξίσωση:

Όπου Np=η ποσότητα του αζώτου που ενσωματώνεται στην παραγόμενη κυτταρική μάζα και χρησιμοποιώντας τον μοριακό τύπο των μικροοργανισμών $C_5H_7O_2N$ ισούται με:

Η συνολική ποσότητα των μικροοργανισμών που απαιτούνται για την αναγωγή των νιτρικών σε άζωτο δίνεται από την παρακάτων εξίσωση:

Ο κινητικός όγκος της δεξαμενής απονιτροποίησης δίνεται από τη σχέση:

Η συνολική απαιτούμενη ανακυκλοφορία των νιτρικών από την δεξαμενή αερισμού δίνεται από την εξίσωση

$$R = \frac{N_2 + QNO_{3e}}{QNO_{3e}} 100$$

Το R είναι το ποσοστό της παροχής Q που επιστρέφει από την δεξαμενή αερισμού. Εάν R>200% τότε R=200.

Η παροχή αναρροής δίνεται από τον τύπο:

$$Q_R = \frac{RQ}{100} - Q_r$$

Η συγκέντρωση των απονιτροποιητικών MLVSS (X D) είναι:

$$X_D = \frac{Q_R X + Q_r X_r}{Q_R + Q_r + Q}$$

Επειδή, ένα μέρος του BOD χρησιμοποιείται από τις αναγωγικές αντιδράσεις, η συγκέντρωση του BOD στη δεξαμενή αερισμού είναι μικρότερη της αρχικής και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

Η συγκέντρωση οξυγόνου της δεξαμενής απονιτροποίησης που επιτυγχάνεται με την ανάμιξη των ροών Q, Q_R και Q_r είναι:

$$DO_D = \frac{DO * Q_R}{Q + Q_R + Q_r}$$

Για να είναι αποτελεσματική η απονιτροποίηση πρέπει η συγκέντρωση DO_D να είναι μικρότερη από 0,5 mg/L. Αν κατά τον υπολογισμό του δώσει μεγαλύτερη συγκέντρωση πρέπει το υπόλοιπο να αφομοιωθεί από την ενδογενή αναπνοή των μικροοργανισμών. Ο ρυθμός αφομοίωσης είναι 0,07 kg O 2 /kg MLVSS-d. Άρα, ο απαραίτητος υδραυλικός όγκος της δεξαμενής απονιτροποίησης για να μειωθεί η συγκέντρωση του οξυγόνου δίνεται από τη σχέση:

$$V_{D2} = \frac{DO_D - 0.1}{0.07 X_D}(Q + Q_R + Q_r)$$

Από τους όγκους V_{D1} και V_{D2} επιλέγεται ο μεγαλύτερος ως ο τελικός όγκος της δεξαμενής απονιτροποίησης

<u>Απαιτήσεις σε οξυγόνο</u>

Το απαιτούμενο οξυγόνο για τη βιολογική επεξεργασία είναι απαραίτητο στοιχείο για τον υπολογισμό της ισχύος του συστήματος αερισμού και επιπλέον αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα λειτουργικών δαπανών της εγκατάστασης. Η παροχή του οξυγόνου πρέπει να είναι αρκετή ώστε να οξειδωθούν οι οργανικές ουσίες, για την ενδογενή αναπνοή των

οργανισμών, για τη οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά και για τη διατήρηση της βιολογικής μάζας σε αιώρηση μέσα στον αντιδραστήρα.

Η συνολική απαίτηση σε οξυγόνο ενός συστήματος ενεργής ιλύος δίνεται από την εξίσωση:

$$(O_2) = \frac{\alpha' QS_r + \beta bxXV + \gamma Q(NH_{4r})}{1000}$$

όπου: (O_2) = kg καταναλισκομένου οξυγόνου / ημέρα

α΄ = συντελεστής βιοοξείδωσης του BOD, kg O_2 / kg BOD_r

$S_r = (S_o - S_e)$, mg/l βιοαποικοδομούμενο BOD

β΄ = συντελεστής αυτοοξείδωσης, kg O_2/ kg οξειδούμενων MLVSS

b΄ = ρυθμός αυτοοξείδωσης των MLVSS, $days^{-1}$

x = ποσοστό των MLVSS που μπορεί να βιοαποικοδομηθεί

X = συγκέντρωση MLVSS στην δεξαμενή αερισμού, mg/l

V = όγκος δεξαμενής αερισμού, m^3

γ = συντελεστής οξείδωσης των αμμωνιακών, kg O_2 / kg NH_{4r}

(NH_{4r}) = συγκέντρωση αμμωνιακών που οξειδώνονται, mg/l

Το ποσοστό των MLVSS που μπορεί να βιοαποικοδομηθεί (x) δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$x = \frac{Y_C[S_r] + b_C X_C V - \sqrt{(Y_C[S_r] + b_C X_C V)^2 - (4 b_C X_C V)(0.77 Y_C[S_r])}}{2 b_C X_C V}$$

Ο συντελεστής (α΄) εξαρτάται από το είδος του αποβλήτου, τη θερμοκρασία λειτουργίας του αερόβιου αντιδραστήρα και το χρόνο παραμονής των στερεών Θ_c.

Για τα αστικά λύματα, τιμές του α΄ συναρτήσει της θερμοκρασίας και του Θ_c υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$\alpha'(10^oC)=0,574059+0,05779(\Theta_c)-0,00157939(\Theta_c)^2 +1,51555\ (10^{-5})\ (\Theta_c)^3$

$\alpha'(20^oC)=0,694678+0,05108(\Theta_c)-0,00138636(\Theta_c)^2 +1,31805\ (10^{-5})\ (\Theta_c)^3$

$\alpha'(30^oC)=0,830657+0,04006(\Theta_c -0,00098197(\Theta_c)^2 +8,57164\ (10^{-6})\ (\Theta_c)^3$

Οι άλλοι συντελεστές της εξίσωσης είναι περίπου σταθεροί για όλα τα απόβλητα και οι μέσες τιμές τους είναι:

β' = 1,4 kg O_2 / kg καταστρεφομένων μικροοργανισμών

b' = 0,071 $days^{-1}$

γ = 4,6 kg O_2 / kg οξειδούμενου αμμωνιακού αζώτου

Το αποτέλεσμα της κατανάλωσης του οξυγόνου πρέπει να διορθωθεί ως προς το υψόμετρο που βρίσκεται η εγκατάσταση, ως προς τη θερμοκρασία λειτουργίας και ως προς τις συνθήκες κορεσμού της υγρής φάσης σε οξυγόνο, σύμφωνα με την εξίσωση :

$$(O_2)_o = \frac{(O_2)}{\frac{\beta'' E\, C_t - C_r}{C_r}\, \alpha'' 1{,}024^{(T-20)}} \qquad (122)$$

όπου: $(O_2)_o$ = η πραγματική κατανάλωση οξυγόνου, kg O_2 / day

(O_2) = η κατανάλωση οξυγόνου, kg O_2/day

$\beta'' = 0{,}943545\ (\Theta_c)^{0{,}009892}$

ο λόγος των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου στο απόβλητο δια του διαλυμένου οξυγόνου στο καθαρό νερό, στην ίδια θερμοκρασία.

$\alpha'' = 0{,}789282\ (\Theta_c)^{0{,}051671}$

ο λόγος της ταχύτητας μεταφοράς οξυγόνου από την αέρια φάση στο υγρό απόβλητο προς την ταχύτητα μεταφοράς του οξυγόνου από την αέρια φάση σε καθαρό νερό.

E = 0,995598 – 0,000032

συντελεστής υψομέτρου και εξαρτάται από το υψόμετρο που βρίσκεται η εγκατάσταση του βιολογικού καθαρισμού. Υποθέτουμε ότι στο επίπεδο της θάλασσας ισχύει E = 1.

C_t (mg/l) = $13{,}71734\ e^{-0{,}018578T}$

η συγκέντρωση του οξυγόνου σε κεκορεσμένο με οξυγόνο νερό στη θερμοκρασία σχεδιασμού του βιολογικού καθαρισμού, mg/l.

C_r = η συγκέντρωση του οξυγόνου στον αερόβιο αντιδραστήρα, mg/l. Μία συνηθισμένη τιμή του C_r είναι 2mg/l.

T = θερμοκρασία λειτουργίας, °C

Το αποτέλεσμα της παραπάνω εξίσωσης πρέπει να πολλαπλασιαστεί και με έναν συντελεστή ασφαλείας 1,15:

$$(O_2)_{\text{τελικό}} = 1{,}15\ (O_2)_o$$

Τέλος, πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου (k_La) που πρέπει να επιτευχθεί, ώστε να μπορέσει η ποσότητα του οξυγόνου που τελικά υπολογίσαμε, να μεταφερθεί (διαχυθεί) από την αέρια φάση στην υγρή φάση. Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$k_La = \frac{(O_2)_{\text{τελικό}}\ 1000}{24\,V\,C_t\,E\,\beta''}$$

όπου: k_La = συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου, h^{-1}

a = ειδική επιφάνεια = A/V , m^{-1}

V = όγκος βιοαντιδραστήρα, m^3

A = επιφάνεια επαφής αερίου – υγρού, m^2

kL = συντελεστής αντίστασης μεταφοράς οξυγόνου στην υγρή στοιβάδα της διεπιφάνειας, m/h

<u>Υπολογισμός Κατανάλωσης Ενέργειας Αργόστροφου Επιφανειακού Αεριστήρα</u>

Οι αργόστροφοι επιφανειακοί αεριστήρες χρησιμοποιούν φυγόκεντρα πτερύγια. Τα πτερύγια μπορούν να έχουν σχήμα επίπεδου δίσκου με παραλληλόγραμμα πτερύγια ή ελαφρώς κυρτά πτερύγια προσαρτημένα στην περιφέρεια της κάτω επιφάνειας του δίσκου. Άλλες διατάξεις περιλαμβάνουν ανεστραμμένα κωνικά σχήματα με κατακόρυφα πτερύγια τοποθετημένα στο πάνω ή κάτω μέρος του κώνου ή και στις δυο πλευρές.

Τυπικά οι αργόστροφοι αεριστήρες λειτουργούν σε ταχύτητες από 20-100 rpm. Οι αργόστροφοι επιφανειακοί αεριστήρες παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλες αντλητικές ικανότητες. Αρχικά χρησιμοποιούνταν σε

πλήρους ανάμιξης δεξαμενές συμβατικών και ταχύρυθμων συστημάτων ενεργού ιλύος. Πλέον, χρησιμοποιούνται σε όλες τις διεργασίες της ενεργού ιλύος για μεγάλο εύρος ροών καθώς επίσης σε αεριζόμενες λίμνες, συστήματα αερόβιας χώνευσης και οξειδωτικούς τάφρους.

Η ενεργειακή απόδοση των επιφανειακών αργόστροφων αεριστήρων είναι από 1,9 έως 2,2 kg O_2 /kWh απορροφούμενης ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από τυπικές συνθήκες της δεξαμενής αερισμού (Mueller et al, 2002). Για την διατήρηση των συνθηκών πλήρους ανάμιξης απαιτούνται 20-40 kW/m^3 όγκου δεξαμενής αερισμού, ανάλογα με τον τύπο και το σχεδιασμό του αεριστήρα, τη φύση και τη συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών, τη θερμοκρασία και τη γεωμετρία της δεξαμενής (Metcalf & Eddy, 2006)

Κατά τον σχεδιασμό των αργόστροφων επιφανειακών αεριστήρων υπολογίζεται η απαραίτητη ισχύ τους, η οποία είναι συνάρτηση της επιφάνειας και του βάθους της δεξαμενής αερισμού και του απαιτούμενου συντελεστή μεταφοράς οξυγόνου (Βλυσίδης, 2009).

Η επίλυση του παρακάτω αλγορίθμου δίνει την απαιτούμενη ισχύ των επιφανειακών αεριστήρων

$$Y_1 = -6{,}2726 + 17{,}82 * \ln(D)$$
$$Y_2 = 189{,}7378 - 16{,}68388 * \ln(S)$$
$$Y_4 = 24{,}5866 + 10{,}7927 * \ln(k_L a)$$
$$X_1 = 8{,}5$$
$$X_2 = 18{,}8$$
$$X_3 = 55$$
$$X_4 = 80{,}7$$
$$X_5 = 91{,}4$$
$$Y_3 = Y_1 + (X_3 - X_1) * (Y_2 - Y_1)/(X_2 - X_1)$$
$$Y_5 = Y_4 + (Y_4 - Y_3) * (X_5 - X_4)/(X_4 - X_3)$$
$$SFT = 5{,}5125 * EXP(0{,}070529 * Y_5)$$

Όπου: D= βάθος δεξαμενής αερισμού, ft
S= εμβαδόν επιφάνειας δεξαμενής, scf
k_{La} = συντελεστής μεταφοράς οξυγόνου, h^{-1}
SFT= αξονική ισχύς, hp