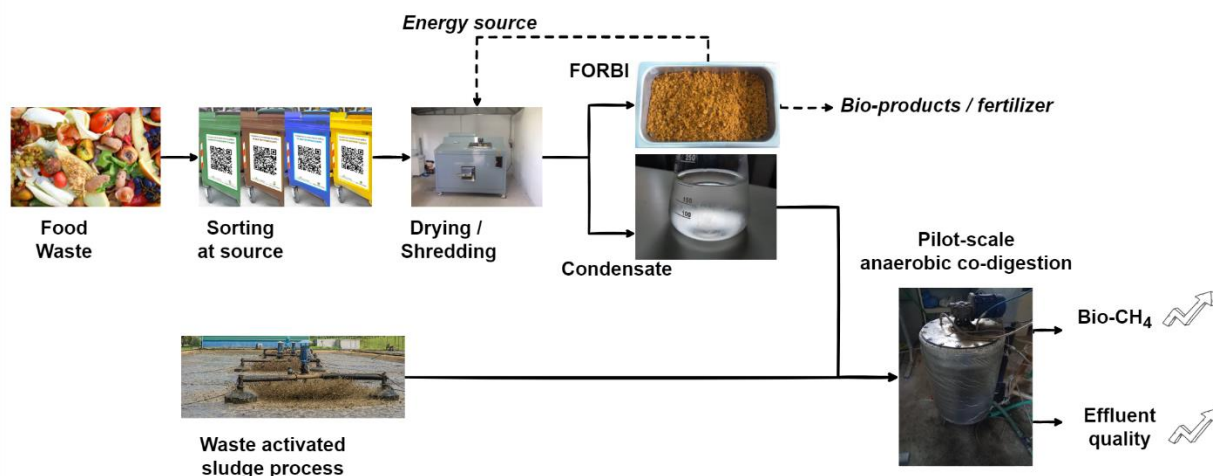


## WP6. Αναερόβια συνχώνευση (AcoD) ενεργού ιλύος από απόβλητα (WAS) με το συμπύκνωμα των οικιακών ζυμώσιμων αποβλήτων

### **D.6.1. Έκθεση με τον φυσικοχημικό χαρακτηρισμό του μείγματος WAS/συμπυκνώματος**

Η παρούσα μελέτη διερεύνησε τη σκοπιμότητα της αναερόβιας συν-χώνευσης (Anaerobic co-Digestion/AcoD) του συμπυκνώματος που προκύπτει από την ξήρανση των απορριμμάτων τροφίμων (Fermentable Municipal Solids Waste condensate/FMSW condensate), με Ενεργό Ιλύ (Waste Activated Sludge/WAS) σε έναν αντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας (100 L), συνεχούς λειτουργίας και πλήρους ανάδευσης (CSTR). Διαφορετικές παράμετροι αξιολογήθηκαν προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση της αναερόβιας συν-χώνευσης; η ισχύς του FMSW condensate (Condensate A: 13 gCOD/L και Condensate B: 4 gCOD/L) που προέκυψε από διαφορετικές πηγές συλλογής απορριμμάτων τροφίμων; η ογκομετρική αναλογία του FMSW condensate προς WAS (0-67% v/v) και ο Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (Hydraulic Retention Time/HRT) (20, 15 και 12 d). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε συμπύκνωμα στην τροφοδοσία από 0 σε 67 % v/v, ενισχύει την αφαίρεση οργανικού φορτίου (έως και 41% αυξημένη απομάκρυνση tCOD) και την παραγωγή βιοενέργειας (έως και 35% αυξημένη παραγωγή βιομεθανίου). Επιπλέον, στην περίπτωση του Condensate A, η μείωση HRT από 20 σε 15 d αύξησε την παραγωγή βιοενέργειας (έως και 19% αύξηση παραγωγής βιομεθανίου) ενώ η μείωση HRT από 20 σε 12 d στην περίπτωση του Condensate B δεν επηρέασε την απόδοση του αντιδραστήρα. Συνολικά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το FMSW condensate μπορεί να εισαχθεί με ασφάλεια σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις για αναερόβια συν-χώνευση, διατηρώντας παράλληλα μια πιο σταθερή λειτουργία και βελτιωμένη ποιότητα λυμάτων και παραγωγή βιοενέργειας σε σύγκριση με τη συμβατική αναερόβια χώνευση ενεργού ιλύος.



Σχήμα 97 Η περιγραφή της διεργασίας του εναλλακτικού σεναρίου της αναερόβιας συν-χώνευσης ενεργού ιλύος με το συμπυκνώματος που προκύπτει από την ξήρανση των απορριμμάτων τροφίμων.

### **Εισαγωγή**

Η παραγωγή απορριμμάτων έχει αυξηθεί ραγδαία λόγω της πληθυσμιακής αύξησης, της αστικοποίησης και της οικονομικής ανάπτυξης με σοβαρές κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Έτσι, ο σωστός χειρισμός των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) έχει γίνει μείζον ζήτημα (Gardiner et al., 2020, Yousefloo et al., 2020). Τα ΑΣΑ αποτελούνται κυρίως από χαρτί και χαρτόνι, οικιακά ζυμώσιμα απόβλητα (Household Fermentable Waste/HFW), πλαστικά, μέταλλα, υφάσματα και γυαλί (Abdel-Shafy et al., 2018). Τα οικιακά ζυμώσιμα απόβλητα αντιστοιχούν σε μία από τις μεγαλύτερες κατηγορίες ΑΣΑ ανεξάρτητα από οποιονδήποτε παράγοντα, αντιπροσωπεύοντας το 25-50% του συνόλου των ΑΣΑ που παράγονται (Abdel-Shafy et al., 2018, Paritosh et al. 2018, Lytras et al., 2020). Τα οικιακά ζυμώσιμα απόβλητα είναι μια πολύτιμη πρώτη ύλη, καθώς είναι πλούσια σε άνθρακα και άζωτο και επομένως αποτελεί εξαιρετικό υπόστρωμα για βιομετατροπή σε βιοπροϊόντα υψηλής αξίας (Chen et al., 2020, Ny et al., 2020). Επί του παρόντος, οι λιγότερο βιώσιμες επιλογές διαχείρισης των ΗΦW είναι η υγειονομική ταφή και η αποτέφρωση. Η υγειονομική ταφή οδηγεί σε ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα από στραγγίσματα, τα αέρια θερμοκηπίου και την δημιουργία οσμών, ενώ η αποτέφρωση είναι μια δαπανηρή και αναποτελεσματική διαδικασία, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία των οικιακών ζυμώσιμων αποβλήτων (έως 86%) και της προκαλούμενης ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αντίστοιχα (Lytras et al., 2020, Capson-Tojoet al., 2016). Προκειμένου να αξιοποιηθούν πλήρως τα οικιακά ζυμώσιμα απόβλητα και να ξεπεραστούν τα ζητήματα που προκύπτουν από τα τρέχοντα προγράμματα διαχείρισης απορριμμάτων τροφίμων (Food Waste/FW), το παρών εναλλακτικό σενάριο περιλαμβάνει τη διαλογή των οικιακών ζυμώσιμων αποβλήτων στην πηγή, η οποία στη συνέχεια οδηγείται σε έναν αντιδραστήρα τεμαχισμού/ξήρανσης για την ξήρανση του. Μετά την ξήρανση των οικιακών ζυμώσιμων αποβλήτων, παράγονται δύο φάσεις, το στερεό, που ονομάζεται Food Residue Biomass (FORBI) και το υγρό, που ονομάζεται FMSW condensate.

Το FORBI είναι ένα πολύτιμο ομοιογενές υλικό, πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί περαιτέρω για την παραγωγή βιοκαυσίμων και άλλων προϊόντων όπως αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου Waste4Think (Michalopoulos et al., 2020, Michalopoulos et al., 2018, Mathioudakis et al., 2021, Papanikola et al., 2019, Chatzikonstantinou et al., 2018, Tremouli et al., 2019, Tremouli et al., 2021a, Tremouli et al., 2021b). Επιπλέον, το παραγόμενο FMSW condensate είναι ένα πολύτιμο παραπροϊόν της διαδικασίας ξήρανσης των οικιακών ζυμώσιμων αποβλήτων. Συγκεκριμένα, αποτελείται από συμπυκνωμένους όξινους ατμούς υγρών αποβλήτων, πλούσιους σε οργανικό άνθρακα και χαμηλής περιεκτικότητας σε άζωτο, που χρήζουν επίσης περαιτέρω χειρισμού και εκμετάλλευσης στο πλαίσιο της στρατηγικής της κυκλικής οικονομίας.

Σε δημοτικό επίπεδο, οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων ενσωματώνουν την τεχνολογία Αναερόβιας Χώνευσης (ΑΧ) (Anaerobic Digestion/AD) για την επεξεργασία των λυμάτων της διεργασίας Ενεργού Ιλύος (Waste Activated Sludge/WAS). Η AD είναι μια πολύπλοκη μικροβιακή διαδικασία, κατά την οποία ο οργανικός άνθρακας μετατρέπεται στην πιο οξειδωμένη του κατάσταση (διοξειδίο του άνθρακα) και στην πιο ανηγμένη μορφή του (μεθάνιο) με τη μορφή βιοαερίου (Stamatelatos et al., 2011). Συνήθως, το παραγόμενο βιοαέριο καλύπτει τις απαιτήσεις θέρμανσης της ίδιας της AD, αν και το συνολικό ενεργειακό κόστος της Μονάδας Επεξεργασίας Λυμάτων δεν έχει αναλυθεί (Maragkaki et al., 2018). Συγκεκριμένα, μόνο το μικρό ποσοστό του 1,6–2,2% του συνολικού δυναμικού παραγωγής ενέργειας από την AD αξιοποιείται επί του παρόντος [20]. Συγκεκριμένα, κέντρα επεξεργασίας λυμάτων (ΚΕΛ) σε πολλές ελληνικές πόλεις, λειτουργούν τη δική τους AD, κυρίως για την επεξεργασία αποβλήτων ενεργοποιημένης ιλύος χωρίς να στοχεύουν στην επίτευξη της βέλτιστης παραγωγής βιοαερίου. Ειδικότερα, στην Ελλάδα, μόνο 18 ΚΕΛ ενσωματώνουν τη διαδικασία AD για την παραγωγή βιοαερίου (Maragkaki et al., 2018). Ο λόγος για αυτό είναι ότι οι διεργασίες της AD που χρησιμοποιούν μόνο μία πρώτη ύλη (λάσπη), έχουν σημαντικά μειονεκτήματα, όπως περιορισμένη παραγωγή μεθανίου, παρουσία βαρέων μετάλλων, κακή αφυδάτωση του χωνεμένου υλικού, έλλειψη ιχνοστοιχείων,

ανεπαρκή διαθεσιμότητα ορισμένων υποστρωμάτων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και αστάθεια του αντιδραστήρα (Pramanik et al., 2018). Συγκεκριμένα, η ενεργοποιημένη ύλη χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλή αναλογία άνθρακα προς άζωτο (C / N) και υψηλή ρυθμιστική χωρητικότητα (αλκαλικότητα), που περιορίζει την απόδοση και την παραγωγή βιοαερίου του αντιδραστήρα AD (Maragkaki et al., 2018).

Σε αυτό το πλαίσιο, η αναερόβια συν-χώνευση (AcoD) έχει προταθεί ως λύση, καθώς υπερτερεί της συμβατικής AD που επεξεργάζεται μόνο ένα υπόστρωμα, όσον αφορά την απόδοση και αναμένεται να παράγει περισσότερο βιοαέριο [20]. Κατά συνέπεια, η διαδικασία AcoD εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες δύο ή περισσότερων πρώτων υλών που είναι συμπληρωματικές, ενώ χρησιμοποιεί την ήδη υπάρχουσα υποδομή των εγκαταστάσεων, χωρίς πρόσθετες απαιτήσεις (Maragkaki et al., 2018).

Σύμφωνα με αυτή την άποψη, το FMSW condensate, λόγω της χημικής του σύστασης, θα μπορούσε να αποδειχθεί πολύτιμη πηγή άνθρακα και να λειτουργήσει ως συμπλήρωμα της πρώτης ύλης WAS, ενισχύοντας την παραγωγή βιοενέργειας. Στο πλαίσιο ενός καλά ανεπτυγμένου συστήματος διαχείρισης των οικιακών ζυμώσιμων αποβλήτων, το FMSW condensate μπορεί να μεταφερθεί και να αναμειχθεί με την περίσσεια WAS που παράγεται σε συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας, αξιοποιώντας περαιτέρω την υπάρχουσα ικανότητα αναερόβιας χώνευσης τους. Η AcoD των μιγμάτων FMSW condensate/WAS μπορεί ενδεχομένως να ενισχύσει το παραγόμενο βιοαέριο στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, αραιώνοντας το ρεύμα WAS και εισάγοντας υψηλότερη διαλυτό οργανικό φορτίο, το οποίο επιτρέπει ευνοϊκές συνθήκες για τη χώνευση, όπως υψηλότερος λόγος C / N και χαμηλότερος ρυθμός οργανικής φόρτωσης (Organic Loading Rate/OLR). Τα οφέλη του AcoD στην παραγωγή βιοαερίου έχουν μελετηθεί εκτενώς (Hagos et al., 2017, Tiong et al., 2021) ωστόσο η εισαγωγή ενός νέου υποστρώματος, όπως το FMSW condensate από την ξήρανση των οικιακών ζυμώσιμων αποβλήτων, μπορεί να επηρεάσει θετικά όχι μόνο την ίδια τη διαδικασία της AD, όσον αφορά την περιεκτικότητα σε βιομεθάνιο στο παραγόμενο βιοαέριο και την ποιότητα των υπολειμμάτων, αλλά και την μετέπειτα επεξεργασία τους.

Σε αυτό το πλαίσιο, στόχος αυτής της μελέτης είναι η ανάλυση της φυσικο-χημικής σύστασης του μίγματος FMSW condensate/WAS, να εξετάσει την απόδοση της αναερόβιας συν-χώνευσης σύστασης του μίγματος FMSW condensate/WAS σε πιλοτικής κλίμακας CSTR και να αξιολογήσει το εναλλακτικό αυτό σενάριο από σκοπιάς διαχείρισης αποβλήτων και παραγωγής βιο-ενέργειας. Αυτά επιτυγχάνονται με την αξιολόγηση των ακόλουθων παραμέτρων; την επίδραση που έχει η πρώτη ύλη FW, που συλλέγεται από έναν δήμο και ένα εστιατόριο, στην προκύπτουσα ισχύ συμπυκνώματος (4 gCOD / L και 13 gCOD / L), την επίδραση των διαφορετικών ογκομετρικών αναλογιών συμπυκνώματος προς WAS (0-67% v / v συμπύκνωμα στην τροφοδοσία) και την επίδραση διαφορετικών HRTs (12, 15 και 20 d), στη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα. Επιπλέον, μελετάται η επίδραση της αναερόβιας συν-χώνευσης σύστασης του μίγματος FMSW condensate/WAS, όσον αφορά την παραγωγή βιο-ενέργειας (παραγωγή βιοαερίου και περιεκτικότητα σε μεθάνιο) και τη βελτίωσή της συγκριτικά με τη συμβατική AD του WAS.

## **Υλικά και μέθοδοι**

### **Βιοαντιδραστήρας**

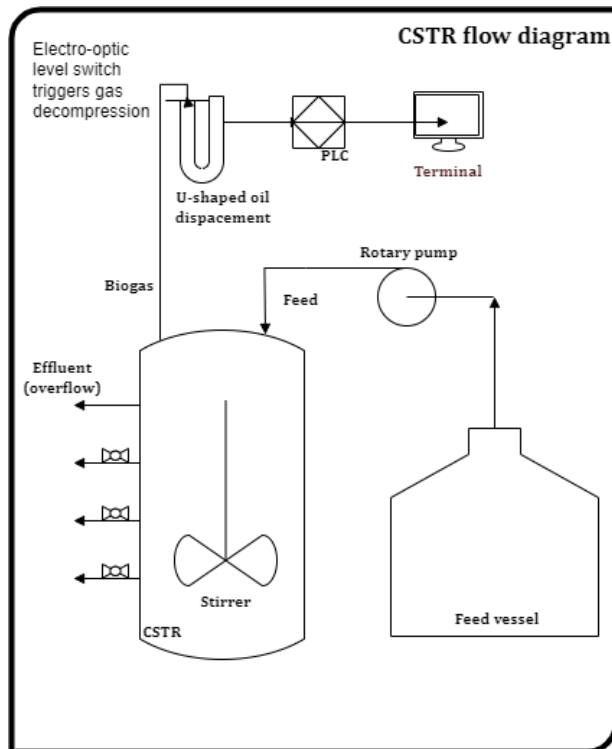
Τα πειράματα της αναερόβιας συν-χώνευσης του συμπυκνώματος με WAS διεξήχθησαν σε αναερόβιο βιοαντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας 100 L από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο βιοαντιδραστήρας ήταν ένας

κυλινδρικός CSTR, ο οποίος διατηρήθηκε σε σταθερή θερμοκρασία 35 °C (μεσόφιλες συνθήκες), μέσω ανακυκλοφορίας νερού στο εξωτερικό στρώμα του αντιδραστήρα. Αυτός ο τύπος αντιδραστήρα επιλέχθηκε δεδομένου ότι η υπάρχουσα υποδομή στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον παρόμοια χωνευτήρια. Η τροφοδοσία του μίγματος FMSW condensate/WAS διατηρήθηκε σε δεξαμενή αποθήκευσης 100 L, σε σταθερή θερμοκρασία 4 °C. Η τροφοδοσία τροφοδοτήθηκε μέσω μιας ρυθμιζόμενης περισταλτικής αντλίας (Injecta FX).



Σχήμα 98 Ο βιοαντιδραστήρας πιλοτικής κλίμακας που χρησιμοποιήθηκε για την αναερόβια συν-χώνευση του μίγματος FMSW condensate/WAS.

Ο βιοαντιδραστήρας, όπως φαίνεται στο σχήμα 98, ήταν εξοπλισμένος με 4 σημεία δειγματοληψίας σε ομοιόμορφες αποστάσεις από κάτω προς τα πάνω, και ως εκ τούτου τα χωνευμένα υπολύματα απομακρύνθηκαν μέσω υπερχειλίσης από την άνω έξοδο του βιοαντιδραστήρα, ακριβώς πάνω από το σημείο όγκου των 100 L (το ανώτερο σημείο δειγματοληψίας του αντιδραστήρα). Τα απόβλητα συλλέχθηκαν σε ξεχωριστή δεξαμενή, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Λαμβάνονταν δείγματα από την εκροή σε καθημερινή βάση και αποθηκεύονταν σε σταθερή θερμοκρασία 4 °C. Η δεξαμενή αποβλήτων απορρίπτονταν καθημερινά και χρησίμευε ως συλλέκτης λυμάτων για τη δειγματοληψία της επόμενης ημέρας. Το παραγόμενο βιοαέριο μετρήθηκε χρησιμοποιώντας μια τεχνική μετατόπισης λαδιού σχήματος U, εξοπλισμένη με διακόπτη ηλεκτρο-οπτικής στάθμης που ενεργοποιεί την αποσυμπίεση αερίου, που καταγράφηκε σε PLC συνδεδεμένο σε τερματικό. Το διάγραμμα ροής του CSTR φαίνεται στην Σχήμα 99.



Σχήμα 99. Σχηματική απεικόνιση του διαγράμματος ροής του βιοαντιδραστήρα και του εξοπλισμού.

### Έναρξη λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα

Η αναερόβια λάσπη και η ενεργοποιημένη ιλύς (WAS) ελήφθησαν από τη Δημοτική Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Λυκόβρυσης, στην Αττική, Ελλάδα. Η αναερόβια ιλύς χρησιμοποιήθηκε ως εμβόλιο για τον αντιδραστήρα AD κατά την εκκίνηση. Η εκκίνηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας 20% v/v αναερόβια ιλύ ως εμβόλιο και 80% v/v WAS ως τροφοδοσία. Ο Πίνακας 45 δείχνει τα χαρακτηριστικά του WAS και της αναερόβιας λάσπης που χρησιμοποιείται για την εκκίνηση του αντιδραστήρα.

Πίνακας 45 Ο φυσικο-χημικός χαρακτηρισμός της αναερόβιας λάσπης και της ενεργούς ιλύος που χρησιμοποιήθηκαν για τον εμβολιασμό και την έναρξη λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.

Παράμετρος	Αναερόβια λάσπη	WAS
pH	7.2	6.8
Ολική αλκαλικότητα (g CaCO <sub>3</sub> / L)	11	4
Ολικά στερεά (TS) (g / L)	48	14
Πτητικά στερεά (VS) (g / L)	23	10

Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) (g / L)	47	22
Πτητικά αιωρούμενα στερεά (VSS) (g / L)	22	15
sCOD (g <sub>O2</sub> / L)	0.2	1.5
tCOD (g <sub>O2</sub> / L)	26.4	32
Ακετικό οξύ (mg / L)	0	110
Προπιονικό οξύ (mg / L)	0	75
Ισο-βουτυρικό οξύ (mg / L)	0	21
Βουτυρικό οξύ (mg / L)	0	15
Ισο-βαλερικό οξύ (mg / L)	0	10
Βαλερικό οξύ (mg / L)	0	2
Εθανόλη (mg / L)	0	180
Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl (TKN) (g / L)	1.1	1.3
Ολικός σωματιδιακός άνθρακας (g / L)	4.5	8.5

Κατά την περίοδο του εμβολιασμού, ο βιοαντιδραστήρας λειτούργησε σε συνθήκες διαλλείποντος έργου, προκειμένου να δημιουργηθούν αναερόβιες συνθήκες και σταθερή λειτουργία. Μετά από 20 d λειτουργίας, η εκκίνηση θεωρήθηκε ολοκληρωμένη, καθώς το απόβλητο έφτασε σε σταθερή τιμή sCOD < 0,1 gO<sub>2</sub> / L και ο βιοαντιδραστήρας έφτασε σε ένα σταθερό ποσοστό CH<sub>4</sub> (60-65%). Μετά την περίοδο εγκλιματισμού, ο βιοαντιδραστήρας λειτούργησε σε συνεχή λειτουργία (CSTR) χρησιμοποιώντας ως τροφοδοσία το μίγμα FMSW condensate/WAS, σε διαφορετικές αναλογίες.

#### **Το υγρό κλάσμα των αποβλήτων τροφίμων (FMSW condensate)**

Κατά τα πρότυπα του Πακέτου Εργασίας 2 (WP 2), η ξήρανση και ο τεμαχισμός του FW πραγματοποιήθηκε στον εμπορικά διαθέσιμο τεμαχιστή/ξηραντήρα Dryer-shredder GAIA GC-300. Σε κάθε κύκλο λειτουργίας χρησιμοποιήθηκαν 120 kg FW, παράγοντας περίπου 40 kg FORBI με 10% υγρασία και 80 kg FMSW condensate. Τα απόβλητα τροφίμων τοποθετήθηκαν μέσα στο θάλαμο του τεμαχιστή/ξηραντήρα και η θερμοκρασία του θαλάμου αυξήθηκε στους 175 °C χρησιμοποιώντας ηλεκτρική αντίσταση. Η θερμοκρασία διατηρήθηκε στους 175 °C για 10 ώρες μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία ξήρανσης. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας οι ατμοί που παρήχθησαν από τον θάλαμο περνούσαν μέσω ενός συμπυκνωτή, δημιουργώντας το υγρό συμπύκνωμα [6].

Τα FMSW condensates που εξετάστηκαν, παρήχθη ακολουθώντας τη διαδικασία ξήρανσης/τεμαχισμού δύο διαφορετικών πηγών FW. Η πρώτη πηγή FW προήλθε από το Δήμο Χαλανδρίου στην Αττική, ο οποίος αποτελούσε το Condensate A. Αυτό διαχωρίστηκε στην πηγή από τους καταναλωτές, παραλήφθηκε από ειδικευμένο προσωπικό και συγκεντρώθηκε σε μεγάλες ποσότητες πριν οδηγηθεί στο τεμαχιστή/ξηραντήρα. Τα συλλεχθέντα FW περιείχαν κυρίως απορρίμματα κουζίνας, συμπεριλαμβανομένων φρούτων, λαχανικών και μαγειρεμένων τροφίμων. Στην περίπτωση αυτή, η πρώτη ύλη αποτελείτο από ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα διαφορετικών απορριμμάτων τροφίμων καθώς και από μεγάλο αριθμό συμμετεχόντων, αποτελούμενο από περισσότερους από 1000 κατοίκους, γεγονός που την καθιστά πολύτιμο δείγμα για μεγάλης κλίμακας προσομοίωση της αναερόβιας συν-χώνευσης του μίγματος FMSW condensate/WAS (Lytras et al., 2020).

Η δεύτερη πηγή FW ήταν το εστιατόριο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, το οποίο οδήγησε στη δημιουργία του Condensate B. Αυτό το FW συλλέγονταν καθημερινά από υπολειπόμενες και ακρησιμοποίητες ποσότητες φαγητού από το εστιατόριο και στη συνέχεια οδηγούνταν απευθείας στο τεμαχιστή/ξηραντήρα. Το συμπύκνωμα B αποτελείται κυρίως από περιορισμένη ποικιλία FW, καθώς τα FW που συλλέγονται προέρχονται από συστατικά που χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένα καθημερινά μενού.

### Λειτουργία βιοαντιδραστήρα

Η λειτουργία του βιοαντιδραστήρα αποτελούνταν από οκτώ πειραματικές φάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 46. Αυτές διαχωρίζονται με 3 παραμέτρους, συγκεκριμένα, το ποσοστό FMSW condensate στην τροφοδοσία (από 20% έως 67% v / v), το HRT (από 12 d έως 20 d) και τη χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη FW (που οδηγεί στην παραγωγή του Condensate A ή B). Η πρώτη φάση λειτουργίας αποτελείται από την εκκίνηση του βιοαντιδραστήρα, κατά την οποία ο αντιδραστήρας λειτούργησε σε συνθήκες διαλλείποντος έργου για 20 ημέρες. Οι φάσεις λειτουργίας 2-4 αντιστοιχούν στη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα χρησιμοποιώντας το Condensate A, σε HRT 20 d και μεταβλητή περιεκτικότητα Condensate A στην τροφοδοσία (20%, 33% και 67% v/v, αντίστοιχα). Η φάση λειτουργίας 5 αντιστοιχεί στη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα χρησιμοποιώντας το Condensate A, στην ίδια περιεκτικότητα σε Condensate στην τροφοδοσία με τη φάση 4 (67% v/v) αλλά σε χαμηλότερο HRT (15 ημέρες, αντί για 20 ημέρες). Οι φάσεις λειτουργίας 6 και 7 αντιστοιχούν στη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα με το Condensate B, στην ίδια περιεκτικότητα σε Condensate με τη φάση 2 (20% v/v) και με μεταβλητή HRT (20 d και 12 d, αντίστοιχα). Τέλος, η φάση λειτουργίας 8 αντιστοιχεί στη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα χρησιμοποιώντας αποκλειστικά WAS, για να χρησιμοποιηθεί ως σύγκριση της συμβατικής AD με την αναερόβια συν-χώνευσης του μίγματος FMSW condensate/WAS.

Πίνακας 46 Οι πειραματικές φάσεις λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.

Πειραματική φάση λειτουργίας	FMSW condensate	Περιεκτικότητα του condensate στην τροφοδοσία (% v / v)	HRT (d)	Χρόνος λειτουργίας (x HRT)	OLR ( $g_{CODin} / L_{reactor} / d$ )
------------------------------	-----------------	--	------------	-------------------------------	--

1	-	Εγκλιματισμός	Διαλλείποντος έργου	20 d	-
2	A	20	20	3	1
3	A	33	20	3	0.9
4	A	67	20	4	0.8
5	A	67	15	3	1
6	B	20	20	3	1.2
7	B	20	12	3	2
8	-	0	20	4	1.5

Το συμπύκνωμα που παράγεται σε κάθε περίπτωση, έχει πλήρη απουσία στερεών. Επομένως, η αύξηση της περιεκτικότητας σε Condensate A στην τροφοδοσία (από 20% v / v σε 67% v / v) οδηγεί σε μείωση του OLR σε σταθερό HRT (από 1,5 gtCOD / L / d έως 0,8 gtCOD / L / d) , αντίστοιχα, ενώ η ενσωμάτωση του Condensate B στην τροφοδοσία (20% v/v) οδηγεί σε μείωση του OLR σε σταθερό HRT (από 1,5 gtCOD / L / d σε 1,2 gtCOD / L / d), αντίστοιχα.

### Αναλυτικές μέθοδοι

Ο CSTR παρακολούθηθηκε μέσω συχνών μετρήσεων σύμφωνα με τα Standard Methods (APHA/AWWA/WEF, 2012). Οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον χαρακτηρισμό της μικτής πρώτης ύλης και των χωνευμένων λυμάτων του βιοαντιδραστήρα περιελάμβαναν pH (με ψηφιακό όργανο WTW INOLAB PH720), αλκαλικότητα, ολικά και πτητικά στερεά (TS, VS, TSS, VSS), μετρήσεις ολικού και διαλυτού Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο-ΧΑΟ (Chemical Oxygen Demand/COD). Ο διαλυτός οργανικός άνθρακας (SOC) και το διαλυτό ολικό άζωτο (TN) μετρήθηκαν με Shimadzu TOC-L (total organic carbon analyzer) και Shimadzu TNM-L (total nitrogen measuring unit). Η συνολική περιεκτικότητα σε άνθρακα μετρήθηκε μέσω Shimadzu SSM-5000A (solid sample module). Το ολικό άζωτο Kjeldahl (TKN) μετρήθηκε χρησιμοποιώντας αναλυτικά όργανα Buchi Kjel-Flex K-360 και Buchi speed digester K-425. Τα πτητικά λιπαρά οξέα (VFAs) ποσοτικοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας 1 ml δείγματος οξινισμένου με 30  $\mu$ L 20%  $H_2SO_4$  και αναλύθηκαν μέσω GC-FID (SHIMADZU GC-2010 plus). Η αιθανόλη, το γαλακτικό οξύ, η γλυκόζη και η φρουκτόζη επιτηρούνταν συχνά χρησιμοποιώντας HPLC (Agilent Technologies 1260 Infinity II). Η παραγωγή βιοαερίου μετρήθηκε μέσω μιας τεχνικής εκτόπισης λαδιού και η περιεκτικότητα σε μεθάνιο ποσοτικοποιήθηκε χρησιμοποιώντας GC-TCD (SHIMADZU GC-2014). Το GC-TCD χρησιμοποίησε He ως το φέρον αέριο, με συνολική ροή 25 ml/min. Η στήλη (CARBOXEN 1000) έχει μήκος 5 m και εσωτερική διάμετρο 2,1 mm και το προφίλ θερμοκρασίας έχει ρυθμιστεί από 40-185 °C (μέγιστη θερμοκρασία στήλης 225 °C).



## Υπολογιστική ανάλυση κινητικών διεργασιών αναερόβιας χώνευσης

Η μοντελοποίηση χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο για την κατανόηση των περίπλοκων διεργασιών που συνεπάγονται οι διαδικασίες επεξεργασίας αποβλήτων, προκειμένου να σχεδιαστούν και να ελεγχθούν τελικά. Το Μοντέλο Anaerobic Digestion Model No. 1, που αναπτύχθηκε από τη Διεθνή Ένωση Νερού (International Water Association-IWA), θεωρείται ως το πιο αποδεκτό και ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο για την AD (Chen et al., 2016, Ozgun et al., 2019). Το ADM1 περιλαμβάνει τα 5 στάδια της AD (αποδόμηση, υδρόλυση, οξεογένεση, οξυγένεση και μεθανογένεση) μαζί με τη δράση των βιολογικών ενζύμων σε κάθε στάδιο. Οι διαδικασίες που προσομοιώνονται στο μοντέλο χωρίζονται σε βιοχημικές και φυσικοχημικές. Οι βιοχημικές διεργασίες καταλύονται από ένζυμα που δρουν ενδοκυτταρικά ή εξωκυτταρικά και θεωρούνται μη αναστρέψιμα. Αντίθετα, οι φυσικοχημικές διεργασίες περιλαμβάνουν ανταλλαγή ιόντων (ισοζύγιο οξέος-βάσεις) και φαινόμενα μεταφοράς υγρού-αερίου (ισορροπία φάσης υγρού-αερίου) και λαμβάνονται ως αναστρέψιμες αντιδράσεις (Batstone et al., 2003).

Η μοντελοποίηση της λειτουργίας του CSTR έγινε με χρήση του λογισμικού Aquasim 2.0 και του μαθηματικού μοντέλου ADM1. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα, ένα για να εξάγει τις κινητικές σταθερές των διεργασιών της αναερόβιας συν-χώνευσης του Condensate A με WAS και ένα άλλο για να αξιοποιήσει τις κινητικές σταθερές που προέκυψαν, για να εξεταστεί η προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου στην αναερόβια συν-χώνευση του Condensate B με WAS. Το μοντέλο ADM1 αναπτύχθηκε και προσαρμόστηκε στα πειραματικά δεδομένα του βιοαντιδραστήρα κατά τη διάρκεια όλων των φάσεων λειτουργίας χρησιμοποιώντας το Condensate A, σε συνεχή λειτουργία. Αυτό το προσαρμοσμένο μοντέλο μπορεί επομένως να χρησιμεύσει ως οδηγός της ποσοτικής διαφοράς που έχει η επίδραση της εισαγωγής προς αναερόβια συν-χώνευση ενός νέου υποστρώματος, όπως το FMSW condensate, στις κινητικές τύπου Monod και πρώτης τάξης της AD, που περιλαμβάνουν κατανάλωση υποστρώματος, διαχωρισμό στοιχείων, υδρόλυση και θάνατο από βιομάζα.

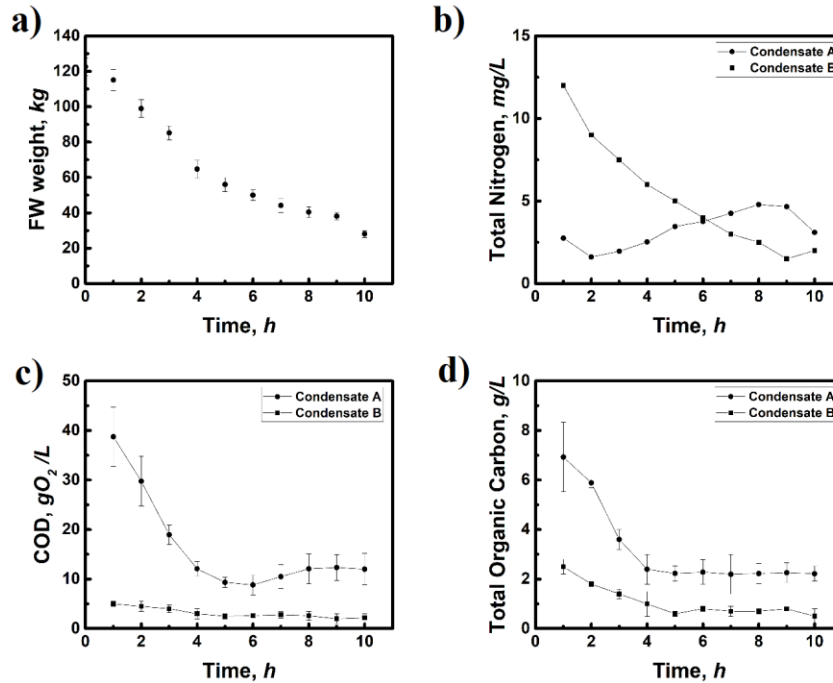
Το μοντέλο περιέχει 26 μεταβλητές, οι οποίες απαιτούνται για τον πλήρη ορισμό του συστήματος σε ένα δεδομένο σημείο. Από αυτές, 12 αναφέρονται σε διαλυτά συστατικά: μονοσακχαρίτες, αμινοξέα, λιπαρά οξέα μακράς αλυσίδας, ολικά VFAs, υδρογόνο, μεθάνιο, ανόργανος άνθρακας (διαλυμένο CO<sub>2</sub>), ανόργανο άζωτο (διαλυμένη αμμωνία) και διαλυτά αδρανή. Επιπλέον, 5 μεταβλητές αναφέρονται σε αιωρούμενα σωματίδια στον αντιδραστήρα: σύνθετα σωματίδια, υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια και σωματιδιακά αδρανή. Επιπλέον 2 μεταβλητές χρησιμεύουν για την περιγραφή της ισορροπίας οξέος-βάσεις του συστήματος που περιγράφηκε: συγκεντρώσεις ανιόντων και κατιόντων. Τέλος, 7 σημαντικές μεταβλητές για το μοντέλο είναι αυτές της βιομάζας: Συγκεκριμένα, για κάθε διαλυτό υπόστρωμα (LCFAs, αμινοξέα, σάκχαρα, βαλερικό οξύ, βουτυρικό οξύ, προπιονικό οξύ, οξικό οξύ και υδρογόνο), το μοντέλο λαμβάνει επίσης υπόψη έναν τύπο βιομάζας που το μεταβολίζει (εκτός από βουτυρικό και βαλερικό οξύ, τα οποία είναι θεωρείται ότι μεταβολίζεται από τους ίδιους μικροοργανισμούς, καθώς και το μεθάνιο, που είναι το τελικό προϊόν) (Manjusha et al., 2016). Οι ενδοκυτταρικές βιοχημικές αντιδράσεις που περιλαμβάνουν κατανάλωση υποστρώματος ακολουθούν κινητικές τύπου Monod. Αντίθετα, η διάσπαση στοιχείων, η υδρόλυση (εξωκυτταρικές αντιδράσεις) και ο θάνατος της βιομάζας αντιπροσωπεύονται από κινητικές πρώτης τάξης. Η νεκρή βιομάζα συγκρατείται στο σύστημα και είναι ένα σύνθετο σωματιδιακό υλικό, το οποίο λειτουργεί ως υπόστρωμα που σταδιακά αποικοδομείται. Οι ανασταλτικές επιδράσεις που εμφανίζονται στο μοντέλο ADM1 περιλαμβάνουν το pH (επηρεάζει τη δράση και την ανάπτυξη όλων των μικροοργανισμών), το υδρογόνο (επηρεάζει τα οξικά βακτήρια) και την ελεύθερη αμμωνία (επηρεάζει τα ακετοκλαστικά βακτήρια) (Batstone et al., 2003).

Η μοντελοποίηση του CSTR βασίστηκε στην ισορροπία άνθρακα και αζώτου μεταξύ της αποσύνθεσης στερεών και της παραγωγής βιοαερίου. Κατά την προσομοίωση, τα πειραματικά δεδομένα που

εισήχθησαν στο μοντέλο για τον αντιδραστήρα ήταν ο όγκος του αντιδραστήρα, η παραγωγικότητα του βιοαερίου και του μεθανίου, το pH και οι συγκεντρώσεις των tCOD, sCOD, TS, VS, TSS, VSS, VFAs. Για την τροφοδοσία δόθηκαν η παροχή της και οι συγκεντρώσεις των tCOD, sCOD,. Έπειτα, ακολούθησε η προσαρμογή του μοντέλου σε αυτές τις πειραματικές μεταβλητές και κατόπιν υπολογισμών προέκυψε η τελική εξαγωγή των κινητικών σταθερών της αναερόβιας συν-χώνευσης στον αντιδραστήρα. Οι σταθερές διάσπασης της βιομάζας θεωρήθηκαν ίσες με  $0,02 \text{ d}^{-1}$  για όλους τους τύπους μικροοργανισμών και ο επιπλέον χρόνος κατακράτησης των σταθερών στους αντιδραστήρες (SRT-HRT) θεωρείται ίσος με 1,5 d και στους δύο αντιδραστήρες. Το μοντέλο ADM1 εξάγει τις κινητικές παραμέτρους για τις βιοχημικές διεργασίες της αναερόβιας συν-χώνευσης του Condensate A με WAS. Στην περίπτωση του ελέγχου της προγνωστικής ιδιότητας του μοντέλου στην αναερόβια συν-χώνευση του Condensate B με WAS, καθώς και στην τυπική AD του WAS, δίνεται έμφαση στην προσαρμογή των υπολογιστικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα.

## Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός του μείγματος WAS/συμπυκνώματος.

Στο Σχήμα 100 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της ξηρής μάζας πρώτης ύλης FW, την περιεκτικότητα σε TN, τη συγκέντρωση tCOD και SOC των δύο τύπων Condensate (A και B), κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης.



Σχήμα 100 Οι διακυμάνσεις α) της ξηρής μάζας κάθε πρώτης ύλης FW, b) του ολικού διαλυτού αζώτου σε κάθε είδος FMSW Condensate, c) της συγκέντρωσης tCOD σε κάθε είδος FMSW Condensate και d) της συγκέντρωσης ολικού διαλυτού οργανικού άνθρακα σε κάθε είδος FMSW Condensate, καθόλη τη διάρκεια της διεργασίας ξήρανσης/τεμαχισμού.

Όπως φαίνεται από στο Σχήμα 100, ο χρόνος ξήρανσης (10 ώρες) δεν επηρεάστηκε από τον τύπο της πρώτης ύλης FW ενώ ο ρυθμός ξήρανσης παρέμεινε σχετικά σταθερός για το Condensate A και B, αντίστοιχα. Επιπλέον, μπορούν να παρατηρηθούν μικρές διακυμάνσεις στην περιεκτικότητα σε TN των συμπυκνωμάτων, η οποία ωστόσο παρέμεινε σε χαμηλές τιμές <15 mg/L (Εικόνα 4β). Η φύση των ιχνών αζώτου που υπάρχουν σε κάθε FMSW condensate αποδίδεται στο διαλυτό οργανικό άζωτο. Επιπλέον, τα σχήματα 4c και d δείχνουν ότι το Condensate A έχει περισσότερο οργανικό φορτίο (έως 40 gCOD / L και έως 7 gC / L κατά την πρώτη ώρα ξήρανσης και 10 gCOD / L και 2 gC / L μέχρι το τέλος της ξήρανσης διαδικασία) συγκριτικά με το Condensate B (έως 5 gCOD / L και έως 2,5 gC / L κατά την πρώτη ώρα ξήρανσης και 2 gCOD / L και 0,5 gC / L μέχρι το τέλος της διαδικασίας ξήρανσης).

Στο τέλος κάθε παρτίδας ξήρανσης, το FORBI αντιπροσώπευε περίπου 30 kg ενώ όλο το παραγόμενο FMSW condensate (περίπου 80 L) αναμειγνύονταν. Τα τελικά χαρακτηριστικά των Condensates A και B παρουσιάζονται στον Πίνακα 47.

Πίνακας 47. Ο φυσικο-χημικός χαρακτηρισμός των Condensates A και B, που προέκυψαν από απορρίματα τροφίμων που συλλέχθηκαν από μια δημοτική κοινότητα μεγάλης κλίμακας και από ένα εστιατόριο πανεπιστημίου μικρής κλίμακας, αντίστοιχα όπως προέκτης αναερόβιας λάσπης και της ενεργούς ιλύος που χρησιμοποιήθηκαν για τον εμβολιασμό και την έναρξη ειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.

Παράμετρος	Condensate A	Condensate B
pH	3.3	3.7
Ολικά στερεά (TS) (g / L)	0.01	0.01
Πτητικά στερεά (VS) (g / L)	0	0
Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) (g / L)	0.05	0.05
Πτητικά αιωρούμενα στερεά (VSS) (g / L)	0	0
sCOD (g <sub>o2</sub> / L)	13	4
tCOD (g <sub>o2</sub> / L)	13	4
Ακετικό οξύ (mg / L)	1340	740
Προπιονικό οξύ (mg / L)	780	220
Ισο-βουτυρικό οξύ (mg / L)	80	10
Βουτυρικό οξύ (mg / L)	200	150
Ισο-βαλερικό οξύ (mg / L)	24	5
Βαλερικό οξύ (mg / L)	5	2
Εθανόλη (mg / L)	2100	1100
Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl (TKN) (g / L)	10	10
Ολικός σωματιδιακός άνθρακας (g / L)	3	1

Στη συνέχεια, κάθε FMSW condensate αναμειγνυόταν με WAS, στο κατάλληλο ογκομετρικό λόγο, ώστε να αποτελέσει την τροφοδοσία κάθε κύκλου λειτουργίας 1-8. Ο Πίνακας 4 δείχνει το φυσικο-χημικό

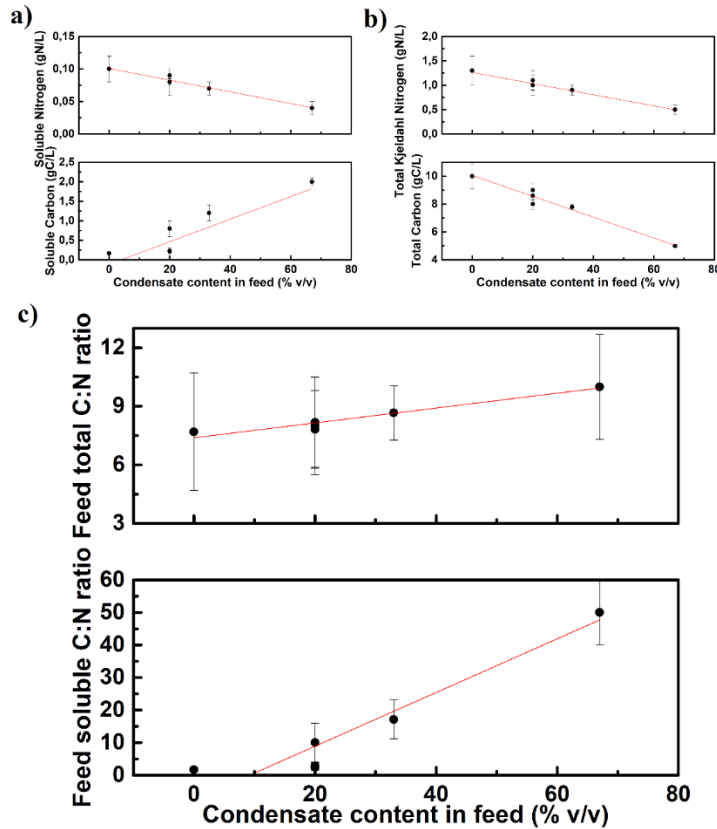
χαρακτηρισμό της μικτής τροφοδοσίας FMSW condensate/WAS, για κάθε φάση λειτουργίας 1-8. Από τον Πίνακα 47 μπορεί να παρατηρηθεί ότι αλλαγές σε διάφορους παραμέτρους κατά την αναερόβια συν-χώνευση του μίγματος FMSW condensate/WAS, το pH της εκάστοτε τροφοδοσίας δεν απόκλινε πολύ από το 7. Ο λόγος για αυτό είναι η υψηλή ρθμιστική και χωριτική ικανότητα του WAS. Επιπλέον, η αύξηση της περιεκτικότητας σε FMSW condensate, από 0% έως και 67%, επέφερε την μείωση της αλκαλικότητας της τροφοδοσίας, από 4 g CaCO<sub>3</sub>/L έως και 1.8 CaCO<sub>3</sub>/L, καθώς και την μείωση όλων των στερεών (ολικών, πτητικών, ολικών αιωρούμενων και πτητικών ειωρούμενων) του ρεύματος εισόδου. Στον αντίποδα, η συγκέντρωση του διαλυτού οργανικού φορτίου αυξήθηκε, από 0.5 g<sub>COD</sub>/L έως και 7.5 g<sub>COD</sub>/L, με την αύξηση της περιεκτικότητας του μίγματος σε FMSW condensate. Αντίστοιχες μεταβολές με αυτή του διαλυτού COD, παρατηρούνται και σε όλα τα οργανικά μόρια (πτητικά λιπαρά οξέα, εθανόλη).

Πίνακας 48: Ο φυσικο-χημικός χαρακτηρισμός των μιγμάτων FMSW condensate/WAS, κατά τη διάρκεια κάθε πειραματικής φάσης λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.

	Πειραματική φάση λειτουργίας							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>pH</b>	-	6.5	6.2	6	6	7.4	7.4	7
<b>Ολική αλκαλικότητα (g CaCO<sub>3</sub>/L)</b>	-	3	2	1.8	1.8	2.8	2.8	4
<b>Ολικά στερεά (TS) (g / L)</b>	-	15.2	13.7	3.9	5.2	19.9	21.3	24.6
<b>Πτητικά στερεά (VS) (g / L)</b>	-	11.1	9.9	2.7	3.8	14.1	16.7	18
<b>Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) (g / L)</b>	-	13.4	12.2	2.7	4.5	18.9	20.8	25.3
<b>Πτητικά αιωρούμενα στερεά (VSS) (g / L)</b>	-	9.8	8.8	2.1	3.6	12.6	15.1	18.5
<b>sCOD (g/L)</b>	-	3,5	5,3	6,3	7.5	0.52	0.6	0.61
<b>tCOD (g/L)</b>	-	20.3	17.1	15.8	15.3	21.7	25.3	32
<b>Ακετικό οξύ (mg / L)</b>	-	114	820	1100	1100	125.2	186.2	110
<b>Προπιονικό οξύ (mg / L)</b>	-	35.9	36.8	58.2	58.2	2.8	7.8	75

<b>Ισο-βουτυρικό οξύ (mg / L)</b>	-	24.3	25.4	29.4	29.4	44.4	49.8	21
<b>Βουτυρικό οξύ (mg / L)</b>	-	37.6	29.5	39.5	39.5	17.4	16.6	15
<b>Ισο-βαλερικό οξύ (mg / L)</b>	-	5.5	7.4	12.1	12.1	4.3	4.3	10
<b>Βαλερικό οξύ (mg / L)</b>	-	0	0	1.1	1.1	14.7	18.4	2
<b>Εθανόλη (mg / L)</b>	-	490	610	717	717	470	510	180
<b>Ολικό άζωτο κατά Kjeldahl (TKN) (mg / L)</b>	-	860	710	540	560	900	1100	1250

Ο δείχνει πώς η προσθήκη FMSW condensate μεταβάλλει τη διαλυτή και ολική περιεκτικότητα σε άζωτο και άνθρακα της μικτής τροφοδοσίας, καθώς και την προκύπτουσα αναλογία διαλυτών και ολικών λόγων C/N.



Σχήμα 101. Τα χαρακτηριστικά της μικτής τροφοδοσίας FMSW condensate/WAS για a) τον διαλυτό άνθρακα (κάτω) και το διαλυτό άζωτο (πάνω), b) τον σωματιδιακό άνθρακα (κάτω) και το άζωτο κατά Kjeldahl (πάνω) και c) τον διαλυτό (κάτω) και τον ολικό (πάνω) λόγο C/N, σε σχέση με την περιεκτικότητα της τροφοδοσίας σε FMSW condensate.

Στο παραπάνω Σχήμα 101α παρουσιάζεται το περιεχόμενο TN (πάνω) και SOC (κάτω) της μικτής τροφοδοσίας FMSW condensate/WAS. Όπως φαίνεται, μια αύξηση της περιεκτικότητας σε συμπύκνωμα από 0 έως 67% v/v έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της περιεκτικότητας σε TN, από 0,1 mg/L σε 0,03 mg/L, συνοδευόμενη από αύξηση της περιεκτικότητας σε SOC, από 0,2 g / L έως 2 g / L. Το Σχήμα 101b απεικονίζει την αντίστοιχη περιεκτικότητα TKN (πάνω) και TC (κάτω) της μικτής τροφοδοσίας FMSW condensate/WAS. Ομοίως, η συγκέντρωση TKN μειώνεται, από 1,4 g / L σε 0,5 g / L, λόγω της έλλειψης ολικής περιεκτικότητας σε άζωτο στο FMSW condensate, ωστόσο η συγκέντρωση TC μειώνεται επίσης, από 10 σε 5 g / L. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η συνολική περιεκτικότητα σε σωματιδιακό άνθρακα του WAS (8,5 gC / L) είναι υψηλότερη από αυτή του FMSW condensate (1-3 gC / L). Αυτά οδηγούν σε μια εκτιμώμενη αναλογία C/N στην τροφοδοσία, η οποία φαίνεται στην Σχήμα 101c. Συγκεκριμένα, η αύξηση της περιεκτικότητας σε FMSW condensate από 0 σε 67% v/v στην τροφοδοσία του αντιδραστήρα, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση τόσο της αναλογίας διαλυτών C/N από 2 σε 50 (Σχήμα 101c κάτω) όσο και της συνολικής αναλογίας C/N από 7 σε 10 (Σχήμα 101c πάνω). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 101c, η αναλογία διαλυτών C/N μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την περιεκτικότητα σε FMSW condensate στην μικτή τροφοδοσία, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερες συνθήκες λειτουργίας για τη διεξαγωγή αναερόβιας συν-χώνευσης (Shahbaz et al., 2020, Wang et al., 2014). Επιπλέον, η ολική αναλογία C/N επηρεάζεται λιγότερο από την είσοδο του συμπυκνώματος, ωστόσο αυξάνεται επίσης με

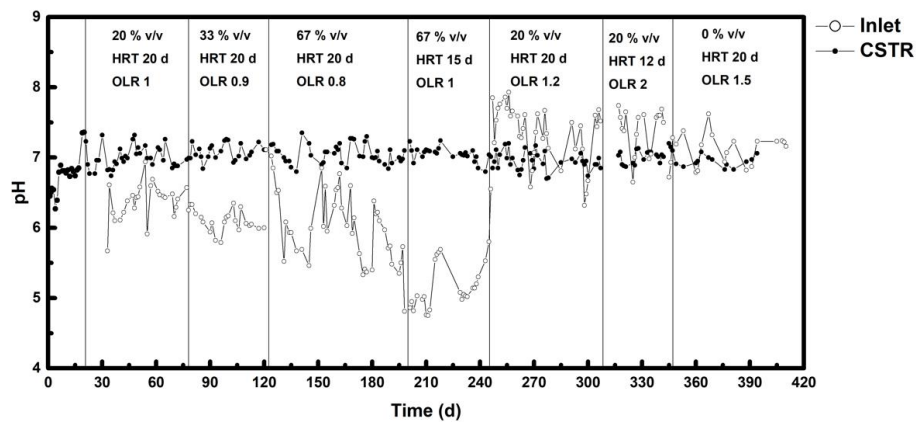
την αύξηση της συγκέντρωσης του συμπυκνώματος, λόγω της συνολικής έλλειψης ολικού αζώτου και στερεών στο συμπύκνωμα, που οδηγούν στην αραιώση του WAS.



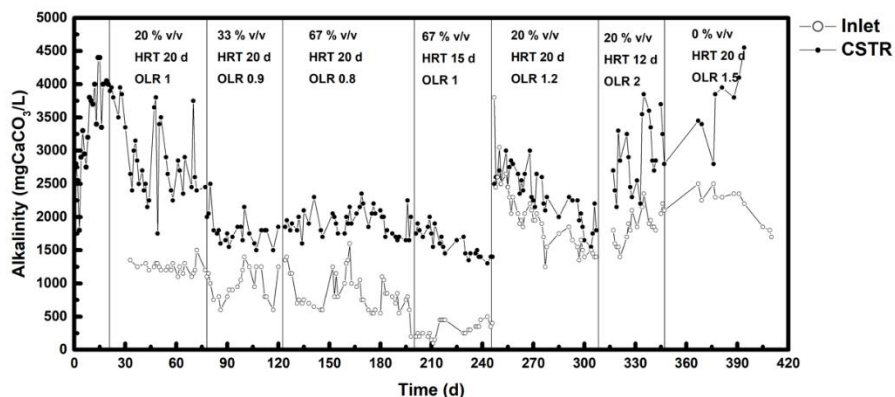
## D.6.2 . Έκθεση με την απόδοση και τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του CSTR

### Λειτουργία του βιοαντιδραστήρα

Το Σχήμα 102 δείχνει το pH στον βιοαντιδραστήρα και στην μικτή τροφοδοσία FMSW condensate/WAS, για κάθε πειραματική φάση λειτουργίας. Ο βιοαντιδραστήρας λειτούργησε σταθερά, σε pH 7, καθόλη την διάρκεια των πειραματικών φάσεων. Αντίστοιχα, το Σχήμα 103 παρουσιάζει την αλκαλικότητα στον βιοαντιδραστήρα και στην μικτή τροφοδοσία FMSW condensate/WAS, για κάθε πειραματική φάση λειτουργίας. Παρατηρείται ότι η σταδιακή αύξηση της ογκομετρικής περιεκτικότητας σε FMSW condensate από 20% σε 67% v/v, οδήγησε στην μείωση της αλκαλικότητας της τροφοδοσίας, από 4 gCaCO<sub>3</sub>/L σε έως και 1.8 gCaCO<sub>3</sub>/L. Επιπλέον, η αλκαλικότητα του αντιδραστήρα αυξήθηκε στα 5.4 gCaCO<sub>3</sub>/L κατά την 8<sup>η</sup> φάση λειτουργίας, κατα την διάρκεια της συμβατικής AD του WAS.



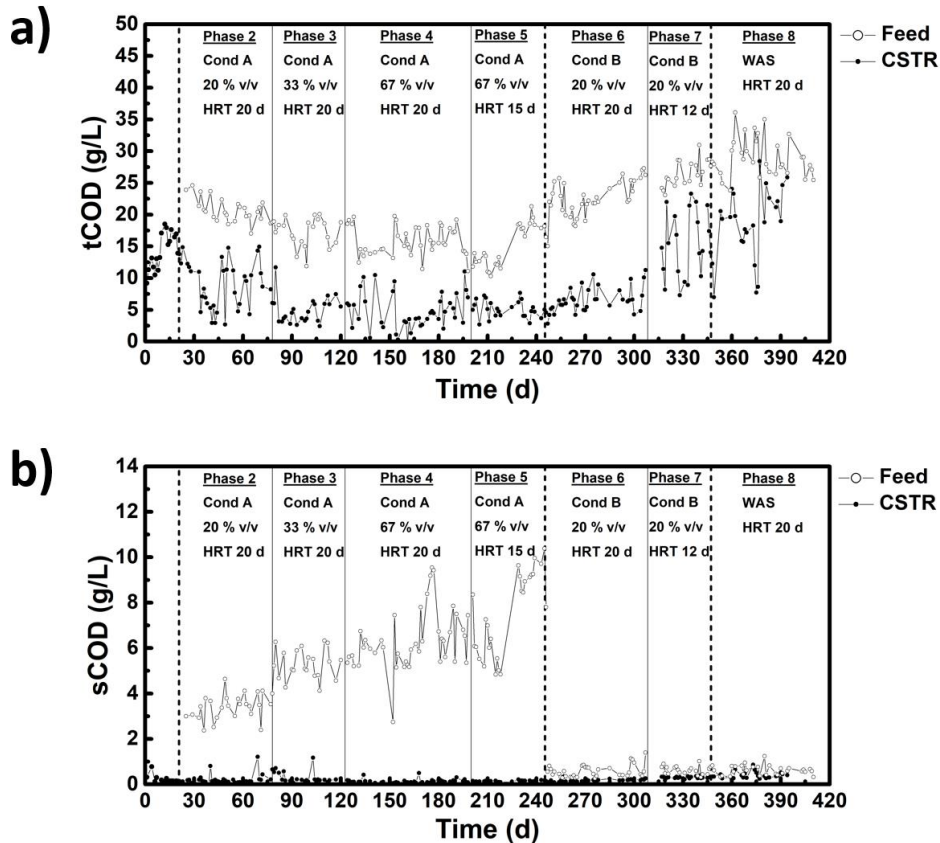
Σχήμα 102 Το pH στο ρεύμα εξόδου του βιοαντιδραστήρα (μαύρο) και στην μικτή τροφοδοσία FMSW condensate/WAS (λευκό), για κάθε πειραματική φάση λειτουργίας.



Σχήμα 103 Η αλκαλικότητα στο ρεύμα εξόδου του βιοαντιδραστήρα (μαύρο) και στην μικτή τροφοδοσία FMSW condensate/WAS (λευκό), για κάθε πειραματική φάση λειτουργίας.

## Απομάκρυνση οργανικού φορτίου

Οι συγκεντρώσεις tCOD και sCOD στην μικτή τροφοδοσία FMSW condensate/WAS και στον βιοαντιδραστήρα παρακολούθηθηκαν συστηματικά προκειμένου να αξιολογηθεί η απομάκρυνση του οργανικού φορτίου σε όλες τις φάσεις λειτουργίας. Το Σχήμα 104a και 104b δείχνει τις συγκεντρώσεις tCOD και sCOD, αντίστοιχα, εντός του αντιδραστήρα και της μικτής τροφοδοσίας FMSW condensate/WAS, για κάθε πειραματική φάση λειτουργίας.



Σχήμα 104 Οι συγκεντρώσεις των α) tCOD στο ρεύμα εξόδου του βιοαντιδραστήρα (μαύρο) και στην μικτή τροφοδοσία FMSW condensate/WAS (λευκό) και β) sCOD στο ρεύμα εξόδου του βιοαντιδραστήρα (μαύρο) και στην μικτή τροφοδοσία FMSW condensate/WAS (λευκό), για κάθε πειραματική φάση λειτουργίας.

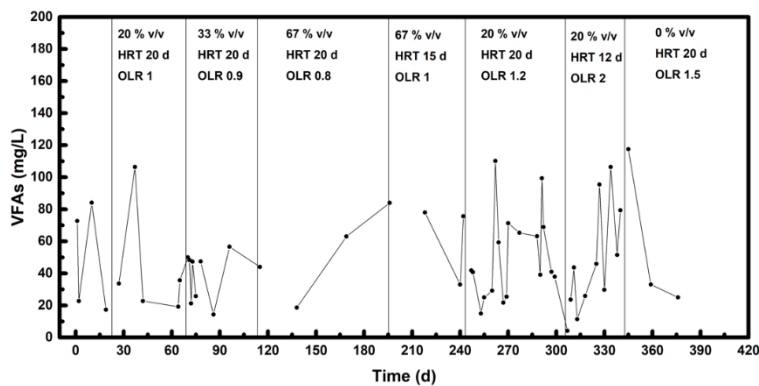
Όπως φαίνεται από το σχήμα 104a, κατά τις πρώτες 20 d της περιόδου εγκλιματισμού (φάση 1) το tCOD του αντιδραστήρα αυξήθηκε έως και 18 g / L ενώ το sCOD μειώθηκε από 0,6 g / L σε λιγότερο από 0,1 g / L (Σχήμα 104b) κατά τον ίδιο χρόνο. Μετά τη λειτουργία σε συνθήκες διαλλείποντος έργου, ο αντιδραστήρας λειτουργούσε σε συνεχή λειτουργία. Για το Condensate A (φάσεις 2 - 5), η αυξημένη ογκομετρική περιεκτικότητα από 20% σε 67% v/v οδήγησε σε σταδιακή μείωση του tCOD της τροφοδοσίας από 20,3 gCOD / L σε 15,8 gCOD/L. Συγκεκριμένα, ο μέσος tCOD για τη φάση 2 ήταν 8,9 g/L

στον αντιδραστήρα και 20,3 g/L στην τροφοδοσία. Για τη φάση 3 ο μέσος όρος tCOD ήταν 4,9 g/L στον αντιδραστήρα και 17,1 g/L στην τροφοδοσία. για τη φάση 4 ο μέσος όρος tCOD ήταν 4,8 g / L στον αντιδραστήρα και 15,8 g / L στην τροφοδοσία και για τη φάση 5 ο μέσος όρος tCOD ήταν 5 g / L στον αντιδραστήρα και 15,3 g / L στην τροφοδοσία (Εικόνα 8a). Από την άλλη πλευρά, το sCOD της τροφοδοσίας αυξήθηκε σταδιακά από 3,53 gCOD/L σε 6,36 gCOD/L, λόγω της αυξανόμενης ογκομετρικής περιεκτικότητας σε συμπύκνωμα (από 20% σε 67% v/v). Συγκεκριμένα, ο μέσος όρος sCOD για τη φάση 2 ήταν 0,23 g/L στον αντιδραστήρα και 3,53 g/L στην τροφοδοσία. Για τη φάση 3 ο μέσος όρος sCOD ήταν 0,27 g/L στον αντιδραστήρα και 5,31 g/L στην τροφοδοσία. για τη φάση 4 ο μέσος όρος sCOD ήταν 0,14 g / L στον αντιδραστήρα και 6,36 g / L στην τροφοδοσία και για τη φάση 5 ο μέσος όρος sCOD ήταν 0,14 g / L στον αντιδραστήρα και 7,49 g / L στην τροφοδοσία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τις φάσεις λειτουργίας 2 και 5, παρατηρείται σχετικά μεγάλη απόκλιση της τιμής tCOD στην τροφοδοσία (από 24 gCOD / L έως 18 gCOD / L κατά τη φάση 2 και από 12 gCOD / L έως 23 gCOD / L κατά τη φάση 5). Αυτό οφείλεται στην εποχική διακύμανση του WAS που προμηθεύτηκε από τη Δημοτική Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων, λόγω της μακράς λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα (420 d). Η εποχιακή μεταβλητότητα πολλών χαρακτηριστικών της λάσπης έχει διαπιστωθεί προηγουμένως (Illmer et al. 2009, Jones et al., 2010).

Μετά τη φάση λειτουργίας 5, η τροφοδοσία άλλαξε στο Condensate B (φάσες 6 και 7, Πίνακας 46). Κατά τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας 6 και 7 η ογκομετρική περιεκτικότητα του Condensate B διατηρήθηκε σταθερή (20% v/v) ενώ η HRT μειώθηκε από 20 d (φάση 6) σε 12 d (φάση 7). Κατά τη φάση 6 ο μέσος όρος tCOD ήταν 6,6 g/L στον αντιδραστήρα και 22,6 g/L στην τροφοδοσία ενώ κατά τη φάση 7 ο μέσος όρος tCOD ήταν 15,2 g/L στον αντιδραστήρα και 26,5 g/L στην τροφοδοσία. Επιπλέον, η μέση sCOD ήταν 0,16 g/L και 0,31 g/L στον αντιδραστήρα και 0,61 g/L και 0,63 g/L στην τροφοδοσία για τις φάσεις 6 και 7, αντίστοιχα. Κατά τη φάση 8 χρησιμοποιήθηκε μόνο WAS ως τροφοδοσία με tCOD 20,1 g/L στον αντιδραστήρα και 29 g/L στην τροφοδοσία ενώ το sCOD ήταν 0,39 g/L στον αντιδραστήρα και 0,57 g/L στην τροφοδοσία.

Το Σχήμα 105 παρουσιάζει την αθροιστική συγκέντρωση όλων των πτητικών λιπαρών οξέων στον βιοαντιδραστήρα, για κάθε πειραματική φάση λειτουργίας. Οι μετρήσεις των πτητικών λιπαρών οξέων επαληθεύουν αυτές του sCOD, καθώς η αθροιστική συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων δεν ξεπέρασε τα 100 mg/L, καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα.



Σχήμα 105 Η αθροιστική συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων (ακετικό οξύ, προπιονικό οξύ, ισο-βουτυρικό οξύ, βουτυρικό οξύ, ισο-βαλερικό οξύ, βαλερικό οξύ) στον βιοαντιδραστήρα, για κάθε πειραματική φάση λειτουργίας.

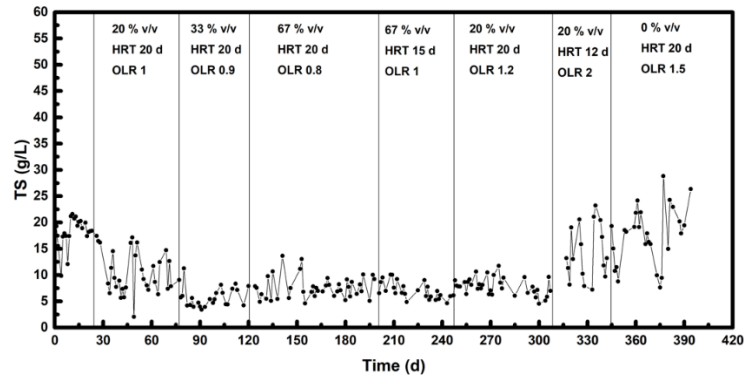
Ο Πίνακας 49 παρουσιάζει τη μέση απομάκρυνση tCOD και τη μέση απομάκρυνση sCOD για όλες τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Συγκριτικά με τη φάση 8, όπου δοκιμάστηκε η συμβατική AD του WAS (μέση απομάκρυνση tCOD 31% και μέση απομάκρυνση sCOD 32%), όλες οι άλλες φάσεις λειτουργίας έδειξαν αυξημένη απομάκρυνση οργανικού φορτίου (μέση απομάκρυνση tCOD πάνω από 43% και μέση απομάκρυνση sCOD πάνω από 51%), υποδεικνύοντας ότι η προσθήκη FMSW condensate στην τροφοδοσία ενισχύει την απόδοση του αντιδραστήρα. Επιπλέον, οι υψηλότερες απομακρύνσεις sCOD επιτεύχθηκαν χρησιμοποιώντας το Condensate A (αφαίρεση sCOD πάνω από 94%), ενώ η αφαίρεση sCOD για τα μείγματα Condensate B ήταν χαμηλότερη (αφαίρεση sCOD 74% και 51% για τις φάσεις 6 και 7, αντίστοιχα). Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι ο αντιδραστήρας αποδίδει καλύτερα με το Condensate A που αντιστοιχεί σε τιμές διαλυτών αναλογιών C/N άνω του 10, σε σύγκριση με το Condensate B που έχει τιμές διαλυτών αναλογιών C/N περίπου 2,5.

*Πίνακας 49 Οι αποδόσεις της απομάκρυνσης οργανικού φορτίου και παραγωγής βιομεθανίου του βιοαντιδραστήρα, για όλες τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας.*

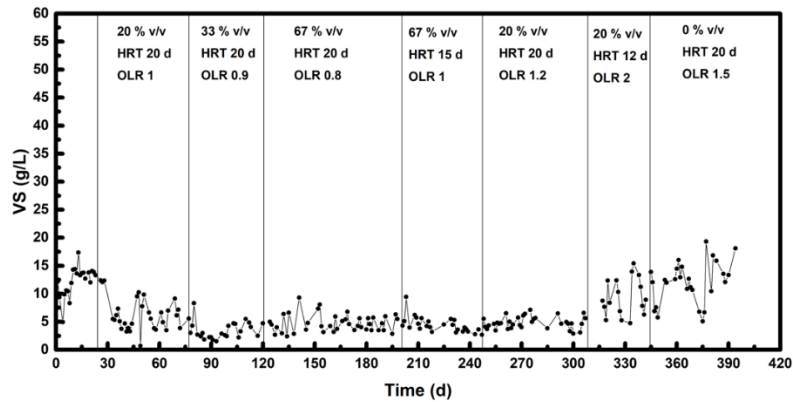
Πειραματική φάση λειτουργίας	Μέση απομάκρυνση tCOD (%)	Μέση απομάκρυνση sCOD (%)	Μέση παραγωγή βιοαερίου (L / L <sub>reactor</sub> / d)	Μέση σύσταση σε CH <sub>4</sub> (%)	Μέση παραγωγή CH <sub>4</sub> (L / d)
1	-	-	-	-	-
2	57	94	0.17	71	11
3	72	95	0.28	83	23
4	70	98	0.28	80	22
5	67	98	0.33	81	26
6	71	74	0.26	69	18
7	43	51	0.22	67	15
8	31	32	0.27	65	17

Τα Σχήματα 105-108 απεικονίζουν τις συγκεντρώσεις των ολικών στερεών, των πτητικών στερεών, των ολικών αιωρούμενων στερεών και των πτητικών αιωρούμενων στερεών, αντίστοιχα, για κάθε πειραματική φάση λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις όλων των στερεών στο ρεύμα εξόδου παρέμειναν σχετικά σταθερές κατά την αναερόβια συν-χώνευση του

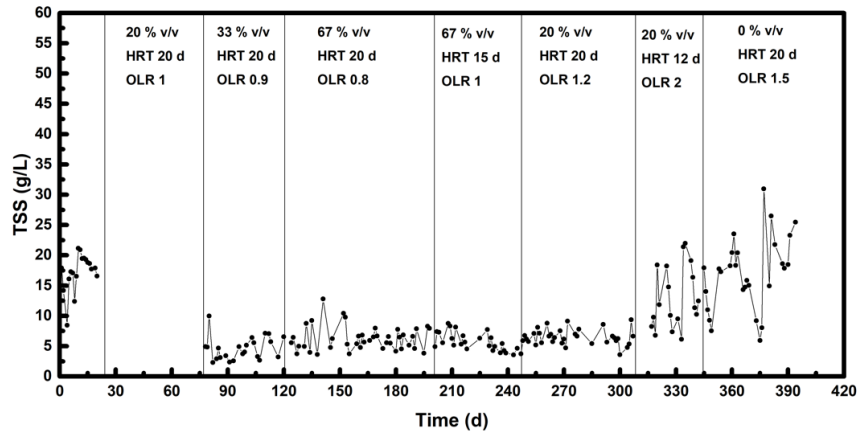
Condensate A με το WAS, παρόλαυτά παρουσίασαν αύξηση κατά τις φάσεις λειτουργίας 7 και 8, λόγω της μείωσης του HRT σε 12 d και της αναερόβιας χώνευσης του WAS, αντίστοιχα.



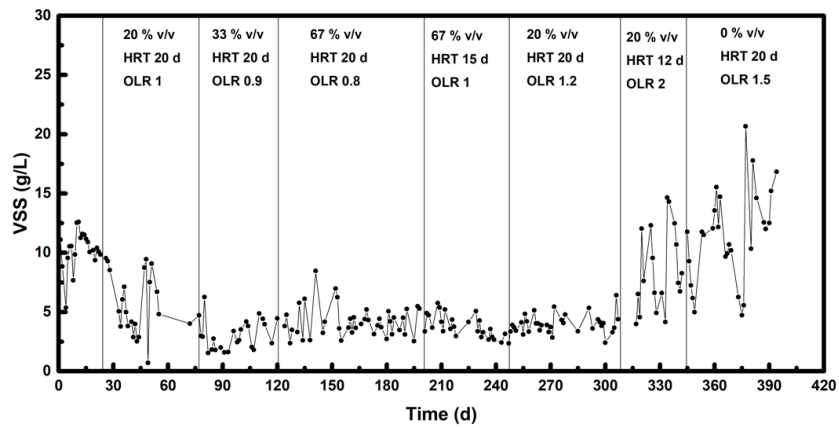
Σχήμα 105 Η συγκέντρωση των ολικών στερεών στον βιοαντιδραστήρα, για όλες τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας.



Σχήμα 106 Η συγκέντρωση των πτητικών στερεών στον βιοαντιδραστήρα, για όλες τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας.



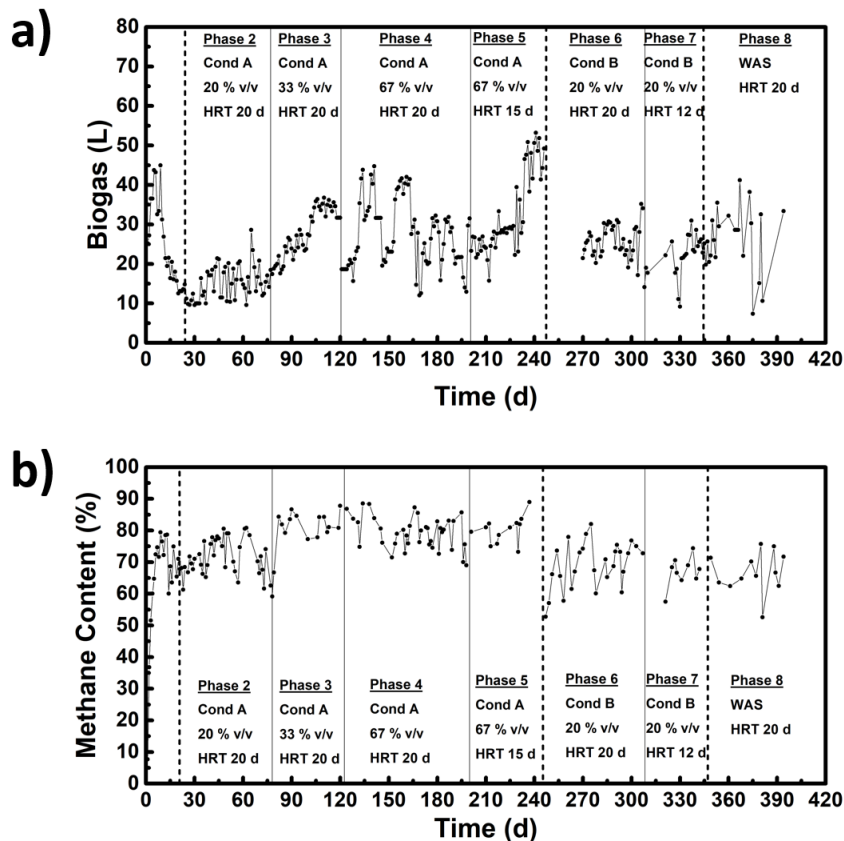
Σχήμα 107 Η συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών στον βιοαντιδραστήρα, για όλες τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας.



Σχήμα 108 Η συγκέντρωση των πτητικών αιωρούμενων στερεών στον βιοαντιδραστήρα, για όλες τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας.

### Παραγωγή βιο-ενέργειας

Η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου και η περιεκτικότητα σε βιομεθάνιο στο παραγόμενο βιοαέριο, για κάθε πειραματική φάση λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 109.



Σχήμα 109 α) Η παραγωγή βιοαερίου του βιοαντιδραστήρα και β) η περιεκτικότητα σε βιομεθάνιο στο παραγόμενο βιοαέριο, για όλες τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας.

Κατά την περίοδο εγκλιματισμού (φάση 1), παρατηρήθηκαν αρχικά υψηλές τιμές βιοαερίου (45 L / d), οι οποίες μειώθηκαν σε 10 L / d μέχρι το τέλος της φάσης 1. Αυτό το αποτέλεσμα αποδόθηκε στον αέρα που εκτοπίστηκε από τον χώρο του αντιδραστήρα καθώς και η υψηλή περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub> κατά την εκκίνηση του αντιδραστήρα. Σταδιακά, ο βιοαντιδραστήρας προσαρμόστηκε στις αναερόβιες συνθήκες, παράγοντας περίπου 10 L/d βιοαέριο, το 65% του οποίου ήταν CH<sub>4</sub>. Κατά τις φάσεις 2-4, η παραγωγή βιοαερίου σταδιακά αυξήθηκε από 10 L / d σε 45 L / d, ενώ η περιεκτικότητα σε μεθάνιο στο βιοαέριο αυξήθηκε επίσης από 60% σε 85% (Εικόνα 14α και β, αντίστοιχα). Επιπλέον, κατά τη φάση 5 παρήχθησαν κατά μέσο όρο 33 L/d βιοαέριο ενώ η μέση περιεκτικότητα σε CH<sub>4</sub> ήταν 81%.

Κατά την αναερόβια συν-χώνευση του WAS και του Condensate B, η μέση παραγωγή βιοαερίου ήταν 26 L/d και 22 L/d και η μέση περιεκτικότητα σε CH<sub>4</sub> ήταν 69% και 67% για τις φάσεις 6 και 7, αντίστοιχα. Τέλος, η συμβατική AD του WAS στη φάση 8 παρήγαγε κατά μέσο όρο 27 L / d βιοαερίου με μέση περιεκτικότητα CH<sub>4</sub> 65%.

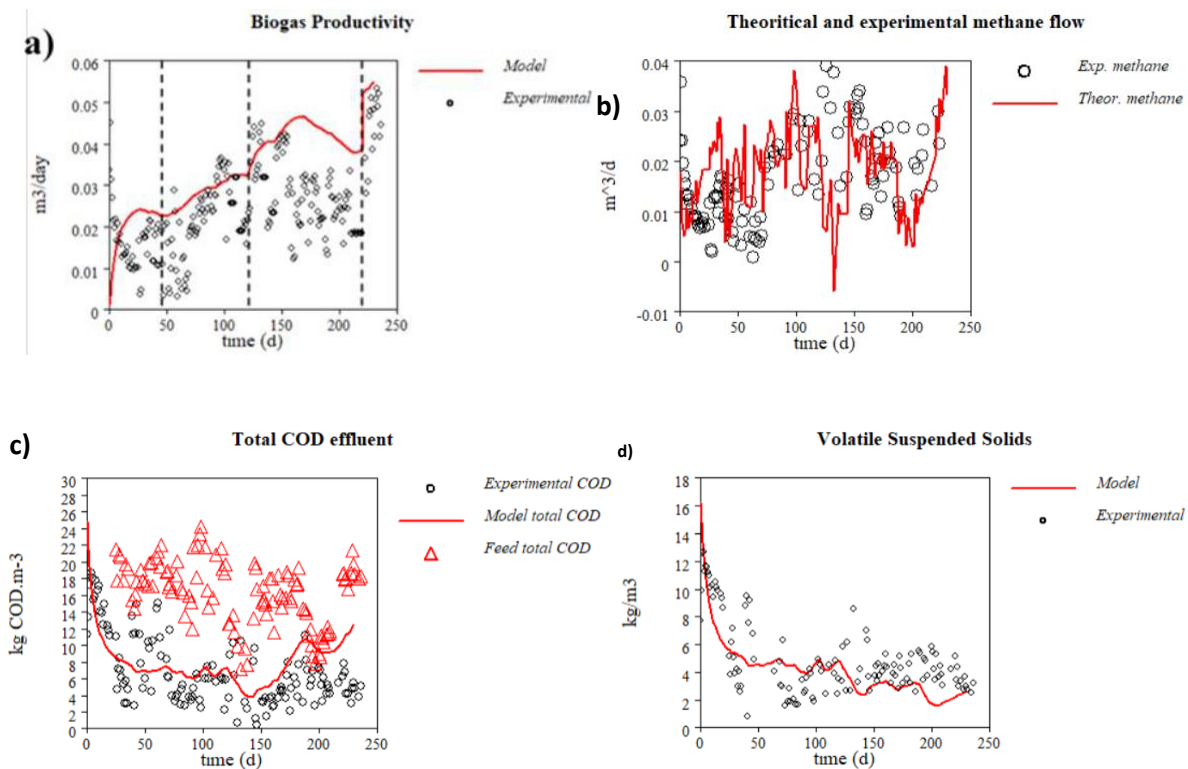
Ο Πίνακας 49 παρουσιάζει τη μέση παραγωγή βιοαερίου και τη μέση σύσταση σε CH<sub>4</sub> του παραγόμενου βιοαερίου, για όλες τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ημερήσια παραγωγή βιοαερίου συσχετίζεται στενά με την ημερήσια τιμή sCOD της τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα, η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου που επιτεύχθηκε ήταν 52 L / d με περιεκτικότητα CH<sub>4</sub> έως



και 87%, τιμή που αντιστοιχεί στο μέγιστο sCOD (10 g / L) της μικτής τροφοδοσίας (Εικόνα 8b). Αυτό το αποτέλεσμα επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι η εισαγωγή FMSW condensate στην τροφοδοσία, ενισχύει την απόδοση της AD. Ειδικότερα, η άμεσα διαθέσιμη πηγή άνθρακα που περιέχει το FMSW condensate, ευνοεί τα μεθανογόνα βακτήρια στη βιοχημική διαδικασία της AD. Αυτό υποδηλώνει ότι η οργανική ύλη του συμπυκνώματος είναι σε μειωμένη μορφή αφού είναι γνωστό ότι όσο πιο ανηγμένο είναι το αρχικό υπόστρωμα, τόσο περισσότερο βιοαέριο και υψηλότερη περιεκτικότητα σε μεθάνιο παράγεται (Stamatelatos et al., 2011).

### Υπολογιστική ανάλυση των κινητικών διεργασιών της αναερόβιας συν-χώνευσης

Το Σχήμα 110 απεικονίζει τα διαγράμματα της παραγωγικότητας βιοαερίου (α), του μέγιστου θεωρητικά παραγόμενου μεθανίου σε σύγκριση με το πειραματικό (β), των συγκεντρώσεων των tCOD (c) και VSS (d). Οι πειραματικές τιμές των διαφόρων παραμέτρων απεικονίζονται ως σημεία και η πρόβλεψη του μοντέλου ως κόκκινη καμπύλη.



Σχήμα 110 Διαγράμματα (α) παραγωγικότητας βιοαερίου, (β) θεωρητικά και πειραματικά παραγόμενου βιοαερίου, (c) συγκέντρωσης tCOD και (d) συγκέντρωσης VSS σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο ADM1, κατά τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας 1-5.



Το μοντέλο φαίνεται να προσομοιώνει αρκετά ικανοποιητικά τη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα κατά τις 5 πειραματικές φάσεις λειτουργίας. Συγκεκριμένα, παρατηρείται καλή προσαρμογή του μοντέλου στις πειραματικές τιμές των tCOD και των VSS στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Η παραγωγικότητα του αντιδραστήρα σε βιοαέριο και μεθάνιο προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό τη μέγιστη θεωρητικά προβλεπόμενη, η οποία προκύπτει με βάσει την κατανάλωση tCOD στον αντιδραστήρα. Όσον αφορά στην παραγωγικότητα του βιοαερίου φαίνεται να υπάρχει μία απόκλιση μεταξύ του μοντέλου και των πειραματικών μετρήσεων, η οποία, όμως, πιθανώς να οφείλεται στην αστάθεια των μετρήσεων κατά την 4<sup>η</sup> φάση. Παρόλα αυτά, από το διάγραμμα είναι διακριτή η αλλαγή στην παραγωγικότητα του βιοαερίου για κάθε νέο κύκλο σύμφωνα με το προσαρμοσμένο μοντέλο. Ακριβέστερα, εμφανίζεται αύξηση της παραγωγικότητας βιοαερίου και δημιουργείται ένα σκαλοπάτι (step) στις 46, 120 και 220 ημέρες, στις οποίες πραγματοποιείται η αλλαγή των πειραματικών κύκλων.

Οι εκτιμώμενες παράμετροι από τις υπολογιστικές αναλύσεις ήταν οι κινητικές σταθερές Monod ( $k_m$  και  $K_s$ ) για όλα τα διαλυτά υποστρώματα, καθώς και οι κινητικές σταθερές 1ης τάξης για την αποσύνθεση σύνθετων σωματιδίων και νεκρής βιομάζας και για την υδρόλυση υδατανθράκων, πρωτεϊνών και λιπιδίων σε σάκχαρα, αμινοξέα και LCFAs αντίστοιχα. Η εκτίμηση παραμέτρων οδήγησε στις τελικές κινητικές τιμές φαίνονται στον Πίνακα 50 και στον Πίνακα 51.

*Πίνακας 50 Οι κινητικές σταθερές 1<sup>ης</sup> τάξης για την αποικοδόμηση και υδρόλυση σωματιδίων, όπως προέκυψαν από την προσαρμογή του υπολογιστικού μοντέλου ADM1 στα πειραματικά δεδομένα των πειραματικών φάσεων λειτουργίας 1-5.*

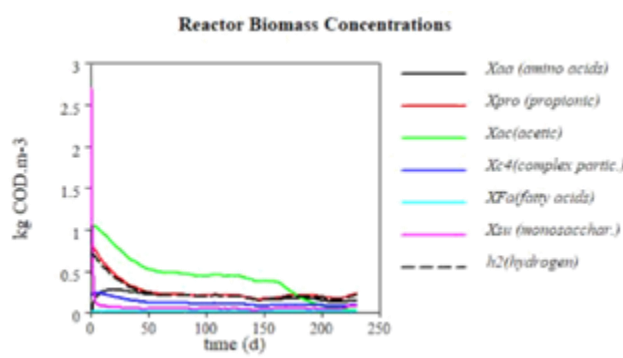
<b>Σταθερά υδρόλυσης 1<sup>ης</sup> τάξης</b>	
<b>Υδατάνθρακες</b>	0.3
<b>Λιπίδια</b>	991.3
<b>Πρωτεΐνες</b>	978.8
<b>Σύνθετα σωματίδια</b>	0.5
<b>Σωματιδιακή βιομάζα</b>	$9,9 \cdot 10^{-3}$

*Πίνακας 51 Οι κινητικές σταθερές Monod για την κατανάλωση κάθε διαλυτού υποστρώματος, όπως προέκυψαν από την προσαρμογή του υπολογιστικού μοντέλου ADM1 στα πειραματικά δεδομένα των πειραματικών φάσεων λειτουργίας 1-5.*

	<b><math>k_m</math></b>	<b><math>K_s</math></b>
<b>Amino acids</b>	79.5	$5.9 \cdot 10^{-4}$
<b>Sugars</b>	32.3	5.7
<b>LCFAs</b>	4.7	40.6

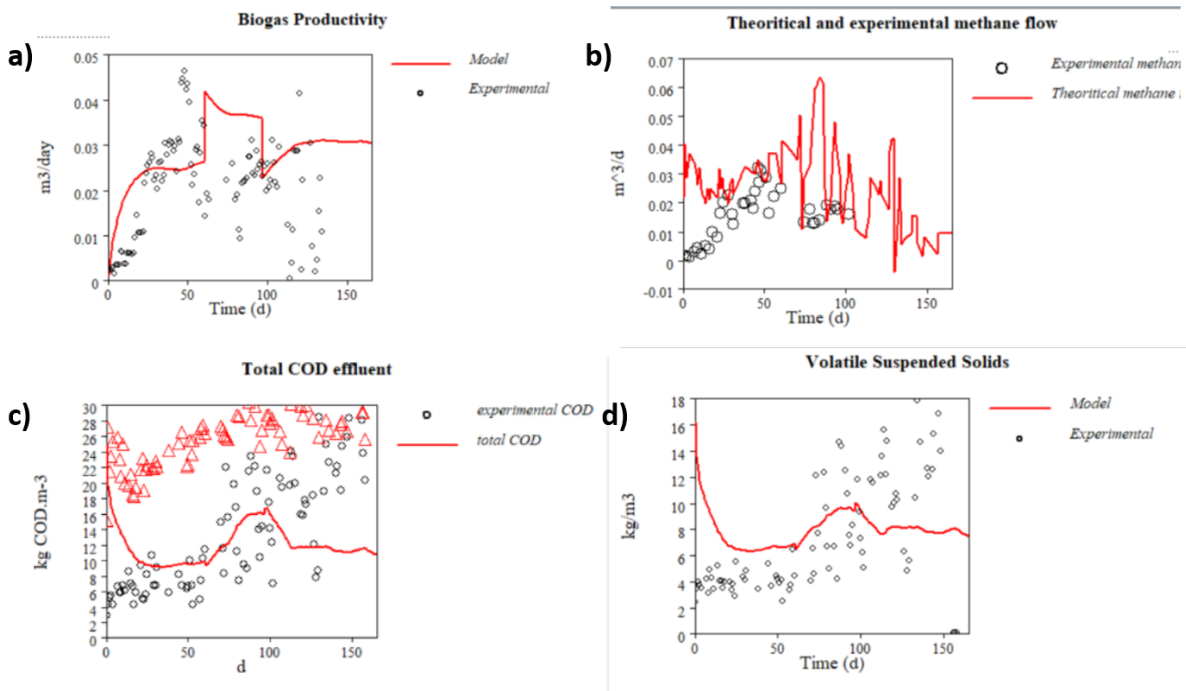
<b>H<sub>2</sub></b>	540.3	$6.3 \cdot 10^{-4}$
<b>Acetate</b>	322.1	$5.7 \cdot 10^{-5}$
<b>Propionate</b>	556.7	$6.6 \cdot 10^{-2}$
<b>Butyrate / Valerate</b>	273.3	$9.2 \cdot 10^{-8}$

Στην Εικόνα 16 φαίνεται η πρόβλεψη του μοντέλου για τις συγκεντρώσεις των διαφόρων ειδών μικροοργανισμών στον βιοαντιδραστήρα, κατά τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας 1-5.



Σχήμα 111 Διάγραμμα συγκεντρώσεων βιομάζας στον αντιδραστήρα σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο ADM1, κατά τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας 1-5.

Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερές τις κινητικές παραμέτρους (1<sup>ης</sup> τάξης και Monod) που εξήχθησαν από το μοντέλο ADM1 για την αναερόβια συν-χώνευση του Condensate A με WAS, ελέγχθηκε η προσαρμογή του μοντέλου κατά την αναερόβια συν-χώνευση του Condensate B με WAS και της AD του WAS με τα πειραματικά δεδομένα. Στην Εικόνα 17 απεικονίζονται τα διαγράμματα της παραγωγικότητας βιοαερίου (a), του θεωρητικά παραγόμενου μεθανίου σε σύγκριση με το πειραματικό (b), των συγκεντρώσεων των tCOD (c) και VSS (d) κατά τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας 6-8. Οι πειραματικές τιμές των διαφόρων παραμέτρων απεικονίζονται ως σημεία και η πρόβλεψη του μοντέλου ως κόκκινη καμπύλη.



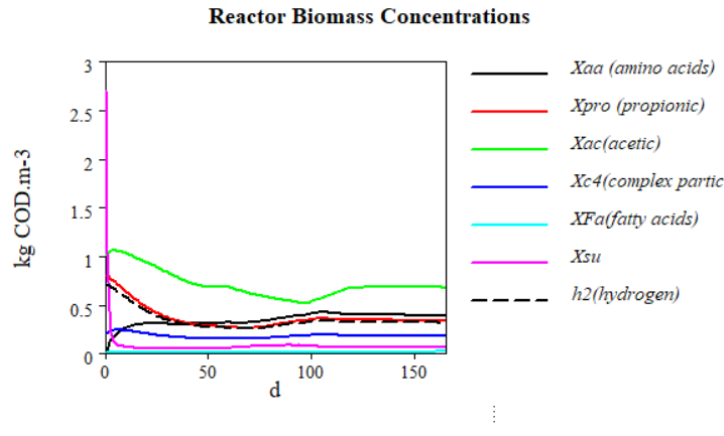
Σχήμα 112 Διαγράμματα (a) παραγωγικότητας βιοαερίου, (b) θεωρητικά και πειραματικά παραγόμενου βιοαερίου, (c) συγκέντρωσης tCOD και (d) συγκέντρωσης VSS σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο ADM1, κατά τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας 6-8.

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε με βάση τις παραπάνω κινητικές σταθερές (Πίνακες 50 και 51), προσομοιώνει ικανοποιητικά την λειτουργία του βιοαντιδραστήρα κατά τις φάσεις λειτουργίας 6 και 7. Συγκεκριμένα, η παραγωγικότητα του βιοαερίου (Σχήμα 110) ακολουθεί ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα κατά την φάση λειτουργίας 6, ενώ παρουσιάζεται μια απόκλιση κατά την φάση 7. Αντίστοιχα, η μέγιστη παραγωγή βιομεθανίου προσεγγίζει την μέγιστη θεωρητικά παραγόμενη και για τις 2 φάσεις λειτουργίας (6 και 7). Σχετικά με την προσαρμογή των συγκεντρώσεων tCOD και VSS, αυτή εφαρμόζει αρκετά ικανοποιητικά στις 2 φάσεις.

Στον αντίποδα, το μοντέλο αστοχεί να προσεγγίσει τα πειραματικά δεδομένα της συμβατικής AD του WAS, όπως φαίνεται στην Εικόνα 17a-d, κατά την 8<sup>η</sup> πειραματική φάση λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η εισαγωγή FMSW condensate για αναερόβια συν-χώνευση με WAS (ή η αύξηση της ογκομετρικής του παροχής από 20% v/v έως και 67% v/v), οδηγεί σε μείωση του OLR (από 1.6 έως και 0.8 gCOD/L/d, αντίστοιχα), ενώ ταυτόχρονα αυξάνει το διαθέσιμο διαλυτό υπόστρωμα και τον λόγο C/N. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ευνικότερων συνθηκών για την λειτουργία του AD και την επεξεργασία του αποβλήτου. Κατά την συμβατική αναερόβια χώνευση του WAS, το OLR είναι αυξημένο, χωρίς ιδιαίτερο υψηλό δείκτη διαλυτή λόγου C/N. Ως εκ τούτου, η συμβατική αναερόβια χώνευση του WAS παρουσιάζει μειωμένη απόδοση διεργασίας AD, από σκοπιάς βιοχημικών δράσεων. Αυτός θεωρείται και ο λόγος για τον οποίο, ενώ το ADM1 προσομοιώνει ικανοποιητικά την λειτουργία του αντιδραστήρα με διαφορετικά χαρακτηριστικά συμπυκνώματος (φάσεις 6 και 7), αποτυγχάνει να προσεγγίσει την λειτουργία της συμβατικής AD (φάση 8). Συμπερασματικά, η πρόβλεψη του μοντέλου για την 8<sup>η</sup> πειραματική φάση λειτουργίας του βιοαντιδραστήρα (συμβατική AD του WAS), με χρήση των βιοχημικών κινητικών σταθερών που προέκυψαν από τη διεργασία της αναερόβιας συν-χώνευσης του μίγματος FMSW condensate/WAS, παρουσιάζεται αισιόδοξη σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα καθώς αποκλίνει πολύ από αυτά.

Εξάγεται άρα το συμπέρασμα ότι η προσθήκη FMSW condensate προς αναερόβια συν-χώνευση με WAS, οδηγεί σε βελτίωση των βιοχημικών διεργασιών της AD.

Στο σχήμα 113 φαίνεται η πρόβλεψη του μοντέλου για τις συγκεντρώσεις των διαφόρων ειδών μικροοργανισμών στον βιοαντιδραστήρα, κατά τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας 6-8.



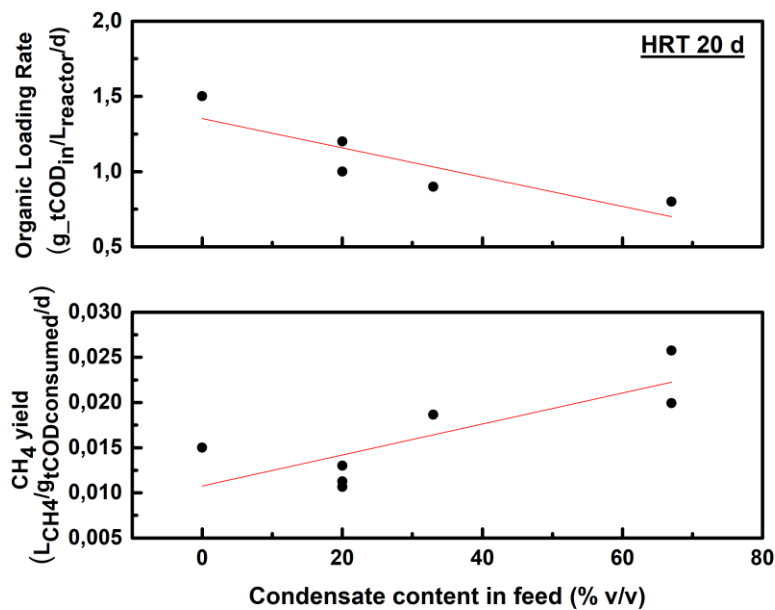
Σχήμα 113 Διάγραμμα συγκεντρώσεων βιομάζας στον αντιδραστήρα σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο ADM1, κατά τις πειραματικές φάσεις λειτουργίας 6-8.

### D.6.3 Αξιολόγηση του εναλλακτικού σεναρίου

#### Η επιρροή της συγκέντρωσης του FMSW condensate στην Αναερόβια Χώνευση

Το Σχήμα 113 δείχνει την απόδοση OLR και CH<sub>4</sub> του βιοαντιδραστήρα σε σχέση με την περιεκτικότητα σε FMSW condensate στην μικτή τροφοδοσία. Μπορεί να φανεί ότι με την αύξηση της περιεκτικότητας σε FMSW condensate, το OLR μειώνεται υπό σταθερό HRT. Συγκεκριμένα, το τυπικό OLR των 1,5 gCOD<sub>in</sub>/L<sub>reactor</sub>/d μπορεί να μειωθεί έως και 0,8 gCOD<sub>in</sub>/L<sub>reactor</sub>/d, ενώ αυξάνεται η αναλογία διαλυτών C/N από 2 σε 50. Αυτό σημαίνει ότι λιγότερα οργανικά στερεά εισέρχονται στον βιοαντιδραστήρα, ενώ υπάρχει επίσης διαθέσιμη προς αποικοδόμηση διαλυτή πηγή άνθρακα. Επιπλέον, η ταυτόχρονη αύξηση της αναλογίας διαλυτών C:N με την αύξηση της περιεκτικότητας σε FMSW condensate, οδηγεί σε ευνοϊκότερες συνθήκες για την AD. Αυτά οδηγούν σε αυξημένη απομάκρυνση COD, αυξημένη παραγωγή βιοαερίου και υψηλότερη περιεκτικότητα σε CH<sub>4</sub>, διατηρώντας παράλληλα μια σταθερή διαδικασία AD (pH~7), με επαρκή συγκέντρωση βιομάζας.

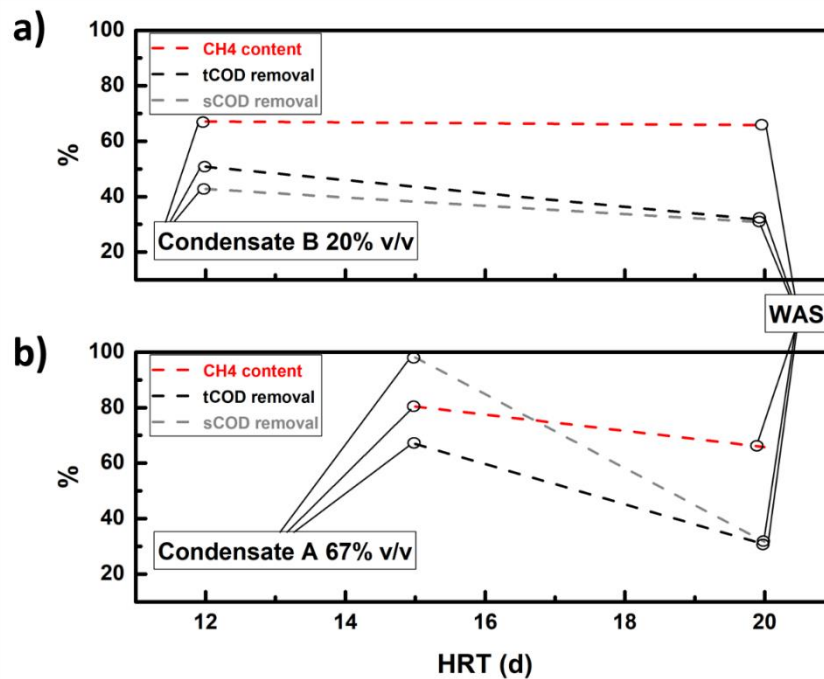
Επιπλέον, η απόδοση σε CH<sub>4</sub> αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε FMSW condensate (από 0,01 σε 0,025 LCH<sub>4</sub>/d/gCOD<sub>consumed</sub>), δηλαδή από την ίδια ποσότητα μεταβολιζόμενου υποστρώματος, εμφανίζεται λιγότερη βιομάζα αλλά περισσότερα μεταβολικά προϊόντα και επομένως περισσότερο CH<sub>4</sub>. Αυτό αποδίδεται στη φύση του συμπυκνώματος ως πλούσιας πηγής θρεπτικών συστατικών και στην υψηλότερη κατάσταση οξείδωσης των οργανικών τους μορίων. Όσον αφορά τις φάσεις 2, 6 και 7 που περιείχαν 20% v/v συμπύκνωμα στην τροφοδοσία, η απόδοσή τους σε CH<sub>4</sub> φαίνεται ελαφρώς χαμηλότερη από τη συμβατική διεργασία AD (0,01-0,013 έναντι 0,015 LCH<sub>4</sub>/d/ gCOD<sub>consumed</sub> για τη συμβατική AD). Ειδικά για τη φάση 2 όπου χρησιμοποιήθηκε συμπύκνωμα Α, η διαφορά με την απόδοση CH<sub>4</sub> μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι ακολούθησε την περίοδο εγκλιματισμού και ήταν η πρώτη φάση που χρειάζονταν τα βακτήρια για να εγκλιματιστούν στο νέο υπόστρωμα στην μικτή τροφοδοσία. Οι φάσεις 6 και 7 μπορούν να εξηγηθούν από το γεγονός ότι η αραιώση του WAS με Condensate Β οδηγεί σε χαμηλότερη συγκέντρωση στερεών ενώ δεν εμπλουτίζει σημαντικά την αναλογία διαλυτών C:N.



Σχήμα 113 Ο ρυθμός οργανικής φόρτισης του βιοαντιδραστήρα, σε σταθερό υδραυλικό χρόνο παραμονής 20 d (πάνω) και η απόδοση σε CH<sub>4</sub> (κάτω), σε σχέση με την περιεκτικότητα της τροφοδοσίας σε FMSW condensate.

### Η επιρροή του υδραυλικού χρόνου παραμονής στην αναερόβια συν-χώνευση του μίγματος FMSW condensate/WAS

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η πρόσθετη ογκομετρική ροή της εισαγωγής FMSW condensate στη συμβατική AD, εξετάστηκαν διαφορετικά HRT και για τα δύο condensates (A και B). Συγκεκριμένα, δύο διαφορετικά HRTs εξετάστηκαν για το Condensate A σε ογκομετρική αναλογία 67% (HRT 20 d, φάση 4; HRT 15 d, φάση 5) και για το Condensate B (HRT 20 d, φάση 6; HRT 12 d, φάση 7 (Σχήμα 114)). Η λειτουργία του βιοαντιδραστήρα δοκιμάζεται κάτω από χαμηλότερο HRT για να προσομοιωθεί η αύξηση του ρυθμού ροής τροφοδοσίας. Το Σχήμα απεικονίζει την περιεκτικότητα σε CH<sub>4</sub> στο παραγόμενο βιοαέριο, καθώς και την αφαίρεση tCOD και sCOD σε σχέση με το HRT, τόσο για το Condensate A όσο και για το Condensate B. Αυτά συγκρίνονται άμεσα με τη συμβατική AD του WAS, σε HRT 20 d.



Σχήμα 114 Η περιεκτικότητα του παραγόμενου βιοαερίου σε μεθάνιο και οι απομακρύνσεις sCOD και tCOD, κατά την αναερόβια συν-χώνευση του μίγματος FMSW condensate/WAS και της συμβατικής αναερόβιας χώνευσης του WAS, σε σχέση με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής για a) το Condensate B (20% v/v) και b) το Condensate A (67% v/v).

Στην περίπτωση του 20% v/v συμπυκνώματος Β (σχήμα 114α), η μείωση του HRT από 20 ημέρες σε 12 ημέρες, αυξάνει την απομάκρυνση του tCOD από 31% σε 43%, ενώ δεν επηρεάζει την παραγωγή CH<sub>4</sub>, η οποία παραμένει σχετικά σταθερά (15 – 17 LCH<sub>4</sub>/ d). Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε χαμηλή

αναλογία διαλυτών C/N, η διεργασία AD πρακτικά δεν επηρεάζεται και δεν συσσωρεύονται περιοριστικοί παράγοντες όταν το Condensate B και το WAS συν-χωνεύονται αναερόβια.

Επιπλέον, φαίνεται στο Σχήμα 114b ότι στην περίπτωση του 67% v/v Condensate A, η μείωση του HRT από 20 ημέρες σε 15 ημέρες, οδηγεί σε σημαντικά βελτιωμένη περιεκτικότητα σε CH<sub>4</sub> στο παραγόμενο βιοαέριο (αύξηση από 65% σε 81%, αντίστοιχα), καθώς και σημαντικά αυξημένη παραγωγικότητα βιοαερίου (από 27 L / d σε 33 L / d). Επιπλέον, η απομάκρυνση του tCOD αυξάνεται από 31% σε 67%. Η διαδικασία AD είναι επομένως σταθερή και διαχειρίσιμη για διαχείριση αποβλήτων και σε χαμηλότερα HRT (έως 12-15 d), υποδεικνύοντας την ικανότητα του FMSW condensate να συν-χωνεύεται επιτυχώς με το WAS στις υπάρχουσες υποδομές, ανεξάρτητα από την ισχύ του (Condensate A ή B).

### **Συμπεράσματα**

Η παρούσα μελέτη διερεύνησε τη σκοπιμότητα της αναερόβιας συν-χώνευσης του συμπυκνώματος με ενεργό ιλύ σε πιλοτικής κλίμακας CSTR. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το συμπύκνωμα που προκύπτει από την ξήρανση των απορριμμάτων τροφίμων, μπορεί να ενσωματωθεί στις υπάρχουσες υποδομές αναερόβιας χώνευσης, ανεξάρτητα από την πρώτη ύλη των απορριμμάτων τροφίμων, η οποία οδήγησε στην παραγωγή συμπυκνώματος διαφορετικής ισχύος (4 and 13 gCOD/L). Γενικά, επιτεύχθηκε σταθερή μακροπρόθεσμη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα και η αναερόβια συν-χώνευση αυτών των δύο ρευμάτων μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη ποιότητα λυμάτων (αυξημένος λόγος C/N μέχρι και 50) και υψηλότερη παραγωγή βιοενέργειας (μέχρι και 35% αύξηση βιομεθανίου σε σχέση με την συμβατική αναερόβια χώνευση) κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Επιπλέον, η αύξηση της συνδυασμένης ογκομετρικής ροής των αποβλήτων, λόγω της εισαγωγής του συμπυκνώματος, δεν αναμένεται να επηρεάσει αρνητικά τη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα (λόγω της μείωσης μέχρι και 40% του OLR με την εισαγωγή συμπυκνώματος). Επομένως, το συμπύκνωμα μπορεί να υποστεί επιτυχή επεξεργασία και απόρριψη, οδηγώντας σε υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και βιώσιμη κυκλικότητα. Αυτή η εργασία καταδεικνύει έναν εφικτό τρόπο συνδιαχείρισης του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των αστικών στερεών αποβλήτων με τα αστικά λύματα καθώς αυτά τα δύο ρεύματα είναι παρόμοια από σκοπιάς χημικής σύστασης (και τα δύο είναι άμεσα βιοαποδομήσιμα).

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Abdel-Shafy, H. I., Mansour, M. S. M.: Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egypt. J. Pet.*, 27, 4, 1275–1290 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>.

APHA/AWWA/WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Stand. Methods. 541 (2012).

Batstone, D. J., Keller, J.: Industrial applications of the IWA anaerobic digestion model No. 1 (ADM1). *Water Sci. Technol.*, vol. 47, no. 12, pp. 199–206 (2003). <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0647>.

- Capson-Tojo, G., Rouez, M., Crest, M., Steyer, J. P., Delgenès, J. P., Escudié, R.: Food waste valorization via anaerobic processes: a review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 15, 3, 499–547 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9405-y>.
- Chatzikonstantinou, D., Tremouli, A., Papadopoulou, K., Kanellos, G., Lampropoulos, I., Lyberatos, G.: Bioelectricity production from fermentable household waste in a dual-chamber microbial fuel cell. *Waste Manag. Res.*, 36, 11, 1037–1042 (2018). <https://doi.org/10.1177/0734242X18796935>.
- Chen, C., Chaudhary, A., Mathys, A.: Nutritional and environmental losses embedded in global food waste. *Resour. Conserv. Recycl.*, 160, May, 104912 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104912>.
- Chen, X., Chen, Z., Wang, X., Huo C., Hu Z., Xiao, B., Hu, M.: Application of ADM1 for modeling of biogas production from anaerobic digestion of *Hydrilla verticillata*. *Bioresource Technology*, 211, 101-107 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.002>.
- Gardiner, R, Hajek, P.: Municipal waste generation, R&D intensity, and economic growth nexus – A case of EU regions. *Waste Manag.*, 114, 124–135 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.038>.
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., Lu, X.: Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 76, November, 1485–1496 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>.
- Illmer, P., Gstraunthaler, G.: Effect of seasonal changes in quantities of biowaste on full scale anaerobic digester performance. *Waste Manag.*, 29, 1, 162–167 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.005>.
- Jones, P. A., Schuler, A. J.: Seasonal variability of biomass density and activated sludge settleability in full-scale wastewater treatment systems. *Chem. Eng. J.*, 164, 1, 16–22 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.07.061>.
- Lytras, G., Koutroumanou, E., Lyberatos, G.: Anaerobic co-digestion of condensate produced from drying of Household Food Waste and Waste Activated Sludge. *J. Environ. Chem. Eng.*, 8, 4, 103947 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103947>.
- Manjusha, C., Beevi, B. S.: Mathematical Modeling and Simulation of Anaerobic Digestion of Solid Waste. *Procedia Technol.*, vol. 24, pp. 654–660 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.174>.
- Maragkaki, A. E., Fountoulakis, M., Kyriakou, A., Lasaridi, K., Manios, T.: Boosting biogas production from sewage sludge by adding small amount of agro-industrial by-products and food waste residues. *Waste Manag.*, 71, 605–611 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.024>.
- Mathioudakis, D., Michalopoulos, I., Kalogeropoulos, K., Papadopoulou, K., Lyberatos, G.: Anaerobic digestion of dried/shredded food waste in a periodic anaerobic baffled reactor. *Water Sci. Technol.*, 84, 2, 420–430 (2021). <https://doi.org/10.2166/wst.2021.230>.
- Michalopoulos, I., Lytras, G. M., Mathioudakis, D., Lytras, C., Goumenos, A., Zacharopoulos, I., Papadopoulou, K., Lyberatos, G.: Hydrogen and Methane Production from Food Residue Biomass Product (FORBI). *Waste and Biomass Valorization*, 11, 5, 1647–1655 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00550-4>.



- Michalopoulos, I., Lytras, G.M., Michalakidi, S., Zgouri, S., Papadopoulou, K., Lyberatos, G.: Evaluation of in-vessel and pilot scale composting as an alternative for Food Waste Valorization. 7th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorization, WasteEng18, July 2-5, Prague, Czech Republic (2018).
- Ng, H. S., Kee, P. E., Yim, H. S., Chen, P. T., Wei, Y. H., Chi-Wei Lan, J.: Recent advances on the sustainable approaches for conversion and reutilization of food wastes to valuable bioproducts. *Bioresour. Technol.*, 302, 135, 122889 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122889>.
- Ozgun, H.: Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) for mathematical modeling of full-scale sludge digester performance in a municipal wastewater treatment plant. *Biodegradation* 30, 27–36 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10532-018-9859-4>.
- Papanikola, K., Papadopoulou, K., Tsiliyannis, C., Fotinopoulou, I., Katsiampoulas, A., Chalarakis, E., Georgiopoulou, M., Rontogianni, V., Michalopoulos, I., Mathioudakis, D., Lytras, G. M., Lyberatos, G.: Food residue biomass product as an alternative fuel for the cement industry. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26, 35, 35555–35564 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05318-4>.
- Paritosh, K., Yadav, M., Mathur, S., Balan, V., Liao, W., Pareek, N., Vivekanand, V.: Organic fraction of municipal solid waste: Overview of treatment methodologies to enhance anaerobic biodegradability. *Front. Energy Res.*, 6, August, 1–17 (2018). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00075>.
- Pramanik, S. K.: Anaerobic co-digestion of municipal organic solid waste: Achievements and perspective. *Bioresour. Technol. Reports*, 20, September, 101284 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101284>.
- Shahbaz, M., Ammar, M., Korai, R. M., Ahmad, N., Ali, A., Khalid, M. S., Zou, D., Li, X.: Impact of C/N ratios and organic loading rates of paper, cardboard and tissue wastes in batch and CSTR anaerobic digestion with food waste on their biogas production and digester stability. *SN Appl. Sci.*, 2, 8, 1–13 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03232-w>.
- Stamatelatou, K., Antonopoulou, G., Lyberatos, G.: Production of biogas via anaerobic digestion. Woodhead Publishing Limited, 1895 (2011).
- Tiong, J. S. M., Chan, Y. J., Lim, J. W., Mohamad, M., Ho, C. D., Rahmah, A. U., Kiatkittipong, W., Sriseubsai, W., Kumakiri, I.: Simulation and optimization of anaerobic co-digestion of food waste with palm oil mill effluent for biogas production. *Sustain.*, 13, 24, 1–22 (2021). <https://doi.org/10.3390/su132413665>.
- Tremouli, A., Kamperidis, T., Lyberatos, G.: Comparative study of different operation modes of microbial fuel cells treating food residue biomass. *Molecules*, 26, 13 (2021b). <https://doi.org/10.3390/molecules26133987>.
- Tremouli, A., Karydogiannis, I., Pandis, P. K., Papadopoulou, K., Argirusis, Stathopoulos, V. N. C., Lyberatos, G.: Bioelectricity production from fermentable household waste extract using a single chamber microbial fuel cell. *Energy Procedia*, 161, 2–9 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.051>.
- Tremouli, A., Kamperidis, T., Pandis, P. K., Argirusis, C., Lyberatos, G.: Exploitation of Digestate from Thermophilic and Mesophilic Anaerobic Digesters Fed with Fermentable Food Waste Using the MFC

Technology. Waste and Biomass Valorization, 12, 10, 5361–5370 (2021a). <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01414-0>.

Wang, X., Lu, X., Li, F., Yang, G.: Effects of temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: Focusing on ammonia inhibition. PLoS One, 9, 5, 1–7 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097265>.

WASTE4think - Moving towards life cycle thinking by integrating advanced waste management systems <https://waste4think.eu/>

Yousefloo, A., Babazadeh, R.: Designing an integrated municipal solid waste management network: A case study. J. Clean. Prod., 244 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118824>.