

ΒΙΟΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΜΕΣΩ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΚΑΙ ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ**Β. Γιαννίτσης^{1*}, Δ. Τσιβάς¹, Δ. Θεοδόση Παλιμέρη¹, Α. Βλυσίδης¹**¹Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα(*vidianosgiannitsis@gmail.com)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της επεξεργασίας των υπολειμμάτων τροφίμων (FW), αξιοποιώντας σκεύασμα ενζύμων και μικροοργανισμών (mix), καθώς επίσης και η αξιολόγηση της δυνατότητας αξιοποίησης του τελικού προϊόντος επεξεργασίας για την παραγωγή μεθανίου. Κατά την βιοαποδόμηση με ένα τέτοιο σκεύασμα, τα υπολείμματα τροφών μεταβολίζονται σε ένα μίγμα πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) και σακχάρων το οποίο είναι ιδιαίτερα κατάλληλο ως υπόστρωμα για αναερόβια χώνευση. Αρχικά πραγματοποιείται επεξεργασία των υπολειμμάτων τροφίμων σε αντιδραστήρες εργαστηριακής κλίμακας με χρήση σκευάσματος ενζύμων μικροοργανισμών, και μελετώνται ως παράμετροι η θερμοκρασία, ο χρόνος και η αρχική ποσότητα του σκευάσματος. Ως μεταβλητές απόκρισης της βιοαποδόμησης λαμβάνονται η ποσότητα και το είδος των προϊόντων που παράγονται. Στη συνέχεια ακολουθεί η βιοαποδόμηση των FW σε πιλοτικό αντιδραστήρα 300 λίτρων προσαρμόζοντας τις πιο κρίσιμες λειτουργικές παραμέτρους όπως είναι η ποσότητα σκευάσματος/kg ξηρού FW και η παροχή νερού. Υδρολύματα τόσο από τα πειράματα εργαστηριακής κλίμακας όσο και από τον πιλοτικό αντιδραστήρα χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα σε αναερόβιους αντιδραστήρες διαλείποντος έργου για να προσδιορισθεί η μέγιστη ποσότητα καθώς και ο ρυθμός παραγωγής μεθανίου. Τα αποτελέσματα υδρόλυσης FW εργαστηριακής κλίμακας έδειξαν ότι στους 40°C επιτυγχάνεται καλύτερη βιοαποδόμηση ενώ σε αυτή τη θερμοκρασία με αύξηση της προσθήκης σκευάσματος ενζύμων μικροοργανισμών αυξάνεται και η οξεογένεση. Από τα πειράματα βιοαποδόμησης στον πιλοτικό αντιδραστήρα, η καλύτερη απόδοση ήταν $46,1 \pm 12,2$ % και παρατηρήθηκε σε συνθήκες: 35,8 kg FW/day με προσθήκη 0,005 L mix/kg FW και 4,2 kg νερού/kg FW. Κατά την αναερόβια χώνευση, η μέγιστη μεθανογόνος δραστηριότητα της λάσπης ήταν 10,776 mL CH₄/g VS-day και παρατηρήθηκε μετά την τροφοδοσία με υδρόλυμα προερχόμενο από βιοαποδόμηση με 0,005 L mix/kg FW. Συμπερασματικά η βιοαποδόμηση FW με σκεύασμα ενζύμων-μικροοργανισμών ως προεπεξεργασία οδηγεί σε αύξηση της μεθανογόνου δραστηριότητας της αναερόβιας λάσπης αλλά και της συνολικής παραγωγής μεθανίου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Υπολείμματα τροφίμων, Υδρόλυση, Βιοαποδόμηση, Αναερόβια χώνευση, Παραγωγή μεθανίου

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υπολείμματα τροφών αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα στις σύγχρονες κοινωνίες, καθώς έχει υπολογιστεί πως περίπου το 1/3 της παγκόσμιας παραγωγής τροφίμων ετησίως (1.3 δις τόνοι) καταλήγουν να απορρίπτονται. Η μη ορθή διαχείριση των αποβλήτων αυτών επιβαρύνει κάθε έναν από τους τρεις πυλώνες της βιωσιμότητας^[1]. Επομένως, είναι επιτακτική η ανάγκη εφαρμογής τεχνολογιών αξιοποίησης ή/και διαχείρισης των αποβλήτων αυτών, οι οποίες να είναι εύκολα εφαρμόσιμες σε μεγάλη κλίμακα. Το βασικότερο πρόβλημα επεξεργασίας των υπολειμμάτων τροφίμων είναι η περιεκτικότητά τους σε πολυμερή, των οποίων η υδρόλυση αποτελεί σημαντικό στάδιο για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων. Η υδρόλυση γίνεται συνήθως ενζυμικά καθώς έχει καταγραφεί πως επιφέρει υψηλότερες αποδόσεις και δεν παράγει προϊόντα τοξικά προς μικροοργανισμούς. Παρόλα αυτά, το υψηλό κόστος των ενζυμικών σκευασμάτων την

κάνει απαγορευτική σε μεγάλη κλίμακα^[3, 4]. Μία υποσχόμενη και οικονομική λύση είναι η χρήση σκευασμάτων τα οποία περιέχουν ένζυμα και μικροοργανισμούς. Αυτά τα σκευάσματα επιτρέπουν την ταυτόχρονη υδρόλυση και ζύμωση (SSF) των υπολειμμάτων τροφίμων για παραγωγή χρήσιμων προϊόντων, όπως η αιθανόλη και τα πτητικά λιπαρά οξέα τα οποία μπορούν είτε να ανακτηθούν ως έχουν ή να χρησιμοποιηθούν σε διεργασίες, όπως η αναερόβια χώνευση^[2], ως ένα υπόστρωμα το οποίο μπορεί να μετατραπεί σε μεθάνιο πολύ πιο αποδοτικά από ότι το αρχικό. Πιο συγκεκριμένα ένα τέτοιο υπόστρωμα βελτιώνει την σταθερότητα της διεργασίας αφού περιορίζονται τα στάδια της υδρόλυσης και οξεογένεσης και ευνοείται η δράση των μεθανογόνων μικροοργανισμών^[2, 5].

Η παρούσα εργασία στοχεύει στη βιοαποδόμηση των υπολειμμάτων τροφίμων με χρήση εμπορικού σκευάσματος ενζύμων-μικροοργανισμών, αλλά και στην αξιοποίηση του υδρόλύματος που προκύπτει για την παραγωγή μεθανίου. Για το λόγο αυτό εξετάζονται οι λειτουργικές συνθήκες της διεργασίας με σκοπό την βελτιστοποίησή της ώστε να μπορέσει να εφαρμοστεί αποτελεσματικά για την διαχείριση των υπολειμμάτων τροφών. Η επεξεργασία των FW αρχικά λαμβάνει χώρα σε αντιδραστήρες εργαστηριακής κλίμακας, και μελετάται η επίδραση της θερμοκρασίας και της ποσότητας του σκευάσματος στο είδος των προϊόντων που παράγονται (εκροή). Έπειτα η βιοαποδόμηση των FW δοκιμάζεται σε πιλοτικό αντιδραστήρα όπου εξετάζονται διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (π.χ. ποσότητα σκευάσματος, παροχή νερού) και ελέγχεται η απόδοση της υδρόλυσης. Τέλος, διερευνάται η δυνατότητα αξιοποίησης της παραγόμενης υγρής εκροής για την παραγωγή μεθανίου σε αναερόβιους αντιδραστήρες εργαστηριακής κλίμακας.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τα υπολείμματα τροφών που χρησιμοποιήθηκαν συλλέχθηκαν από το εστιατόριο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και αποθηκεύτηκαν στους -20°C για περαιτέρω χρήση. Για τα εργαστηριακά πειράματα, τα τρόφιμα τεμαχίστηκαν σε μπλέντερ (Cecotec Powder Black Titanium 2000) για να δημιουργηθεί μία ομοιόμορφη ημιστερεή φάση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα για την υδρόλυση, ενώ στην πιλοτική κλίμακα αυτό δεν ήταν απαραίτητο καθώς ο αντιδραστήρας είχε αυτή την δυνατότητα. Για την βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό σκεύασμα ενζύμων και μικροοργανισμών PROGEN το οποίο έχει ως σκοπό την αποτελεσματική υδρόλυση του υποστρώματος αλλά και την ζύμωση της οργανικής ύλης σε VFAs. Για την αναερόβια χώνευση χρησιμοποιήθηκε αναερόβια λάσπη προερχόμενη από 2 διαφορετικές πηγές: α) μονάδα επεξεργασίας απορριμμάτων Βοιωτίας και στη συνέχεια β) κέντρο επεξεργασίας λυμάτων στα βόρεια προάστια της Αθήνας.

Τα πειράματα βιοαποδόμησης σε εργαστηριακή κλίμακα ήταν διαλείποντος έργου και έγιναν σε διάταξη με 7 διαθέσιμα δοχεία συνολικού όγκου 1000 mL εξοπλισμένα με αναδευτήρες και με δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας. Οι θερμοκρασίες που εξετάστηκαν κατά τη βιοαποδόμηση ήταν 35 και 40°C. Σε κάθε δοχείο τροφοδοτήθηκαν 200 g τεμαχισμένων υπολειμμάτων τροφών και αυτά αραιώθηκαν με 600 ml νερό για την επίτευξη της ομοιογένειας. Οι ποσότητες του σκευάσματος ενζύμων-μικροοργανισμών (mix) που εξετάστηκαν είναι 0 (επίδραση μόνο της θερμοκρασίας), 1, 2, 4 και 8 mL με αντίστοιχες αναλογίες υποστρώματος/εμβολίου 200, 100, 50 και 25 g υγρού FW/mL mix. Η ανάδευση ρυθμίστηκε στα 120 rpm για κάθε πείραμα και η διάρκεια του κάθε πειράματος ήταν 72 ώρες. Η απόδοση της βιοαποδόμησης εκτιμάται από την παραγωγή VFAs στο τέλος της διεργασίας.

Για τα πειράματα σε πιλοτική κλίμακα χρησιμοποιήθηκε ο αερόβιος χωνευτήρας (MyECO) χωρητικότητας 300 L. Ο αντιδραστήρας έχει αδρανές πληρωτικό υλικό, για την καλύτερη διεπαφή FW και ενζύμων-μικροοργανισμών. Επίσης, έχει εσωτερική ζυγαριά για την

μέτρηση της μάζας της τροφοδοσίας του και ροόμετρο για την μέτρηση της παροχής νερού. Τέλος, έχει ένα PLC το οποίο επιτρέπει την ρύθμιση του ρυθμού τροφοδοσίας του ενζυμικού σκευάσματος καθώς και τη ρύθμιση του νερού που προστίθεται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα αλλά και στην εκροή του για την αραίωση του τελικού προϊόντος. Στα πειράματα που έγιναν εξετάστηκε η επίδραση του ρυθμού τροφοδοσίας του σκευάσματος (mL σκευάσματος/kg ξηρού FW/day) καθώς και της παροχής νερού στην υδρόλυση του FW. Η λειτουργία του αντιδραστήρα ήταν ημι-συνεχής καθώς η τροφοδοσία γινόταν 2 φορές την ημέρα με ποσότητες 25-36 kg υγρού FW/ημέρα, ενώ το κάθε πείραμα είχε διάρκεια 5 ημέρες. Η εκροή του αντιδραστήρα συλλεγόταν σε δεξαμενή συνολικής χωρητικότητας 250 L μετά από λιποσυλλογή. Για τα πειράματα πιλοτικής κλίμακας, η βασική απόκριση του πειράματος ήταν ο λόγος διαλυτού προς ολικό COD ο οποίος δείχνει την βιοαποδομησιμότητα του υποστρώματος.

Η αναερόβια χώνευση πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακούς αντιδραστήρες διαλείποντος έργου, συνολικού όγκου 500 mL. Αυτοί εμβολιάστηκαν με 120 g αναερόβια λάσπη, πληρώθηκαν με 350 mL νερού και τοποθετήθηκαν σε υδατόλουτρο με θερμοκρασία 37°C και ανάδευση 170 rpm. Αρχικά, η αναερόβια λάσπη ενεργοποιήθηκε με τροφοδοσία με οξικό οξύ (100 mg) και έπειτα ακολούθησε τροφοδοσία με τα υδρολύματα που προέκυψαν από τη βιοαποδόμηση με 0, 1, 2 και 4 mL mix/200 g FW στους 40°C, αλλά και με ανεπεξέργαστο FW. Το παραγόμενο αέριο αρχικά διοχετεύεται σε διάλυμα NaOH 1M όπου δεσμεύεται το διοξείδιο του άνθρακα ενώ το μεθάνιο συλλέγεται και μετράται με την τεχνική της μετατόπισης του υγρού. Η παραγωγή μεθανίου στο χρόνο καταγράφεται με σύστημα παρακολούθησης με χρήση κάμερας. Πραγματοποιήθηκαν 2 κύκλοι πειραμάτων αναερόβιας χώνευσης με λάσπη 2 διαφορετικών προελεύσεων. Κατά τον πρώτο κύκλο πειραμάτων (λάσπη Βοιωτίας) χρησιμοποιήθηκαν 1.55 g VS λάσπης/αντιδραστήρα, ενώ στον δεύτερο (λάσπη ΚΕΛ Αττικής) τροφοδοτήθηκαν 4.2 g VS λάσπης/αντιδραστήρα. Τέλος ακολούθησε η αναερόβια επεξεργασία του υδρολύματος που προέκυψε από τον πιλοτικό αντιδραστήρα με χρήση σκευάσματος ενζύμων-μικροοργανισμών που αντιστοιχούσε σε 1 και 2 mL mix/200 g FW, με χρήση λάσπης από ΚΕΛ Αττικής. Σε όλα τα πειράματα η τροφοδοσία υποστρώματος ήταν 100 mg sCOD, ενώ το κάθε πείραμα σταματούσε με την ελαχιστοποίηση του ρυθμού παραγωγής μεθανίου. Καθώς η καταγραφή του όγκου ήταν 24ωρη, υπήρξε δυνατότητα κινητικής ανάλυσης της παραγωγής μεθανίου με χρήση του τροποποιημένου μοντέλου Gompertz^[6] το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία για την ανάλυση αυτή^[3, 7].

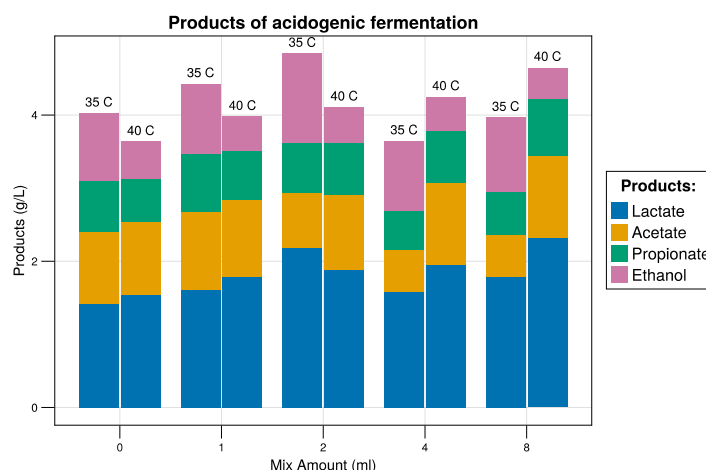
$$P(t) = P_{max} \exp \left(- \exp \left[\frac{R_{max} e^{(\lambda - t)}}{P_{max}} + 1 \right] \right) \quad (1)$$

Όπου $P(t)$ η παραγωγή μεθανίου σε χρόνο t , P_{max} η μέγιστη δυνατή παραγωγή μεθανίου, R_{max} ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής μεθανίου και λ ο χρόνος υστέρησης.

Οι χημικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε ακολουθία με τις Standard Methods: ολικά στερεά ενότητα 2540 B., πτητικά στερεά, ενότητα 2540 E., pH, ενότητα 4500-H+, χημικά απαιτούμενο οξυγόνο, ενότητα 5220 C. Τα VFAs αναλύθηκαν με HPLC (Agilent Technologies 1260 Infinity II).

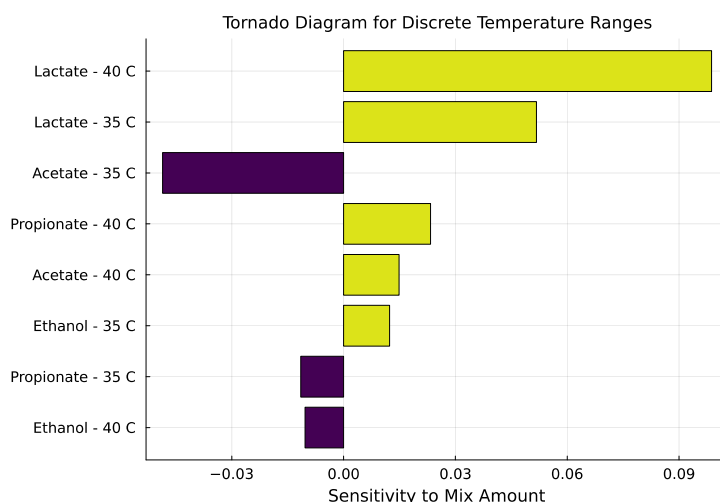
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ως απόκριση των πειραμάτων βιοαποδόμησης σε εργαστηριακή κλίμακα λαμβάνονται τα VFAs: Γαλακτικό Οξύ, Οξικό Οξύ, Προπιονικό Οξύ και Αιθανόλη τα οποία είναι προϊόντα οξεογενετικής ζύμωσης. Τόσο η συνολική ποσότητα προϊόντων όσο και η αναλογία τους αποτελούν το βασικό αποτέλεσμα του πειραματικού κύκλου αυτού.



Σχήμα 1. Προϊόντα της διεργασίας βιοαποδόμησης

Από το Σχήμα 1 παρατηρείται πως στους 35 °C παράγεται περισσότερη αιθανόλη σε όλες τις αναλογίες μίχ/υποστρώματος. Ωστόσο στους 40 °C παράγεται περισσότερο οξικό οξύ σε σχέση με αυτό στους 35 °C. Το οξικό οξύ αποτελεί ιδανικό υπόστρωμα για τη μεθανογένεση^[5]. Επίσης παρατηρείται πως η αύξηση στην προσθήκη μίχ ενζύμων-μικροοργανισμών συνεισφέρει στην πιο αποτελεσματική ζύμωση όταν αυτή λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία 40 °C. Ωστόσο, η δοκιμή με τα 2 mL μίχ, φαίνεται να οδηγεί στην πιο συμφέρουσα βιοαποδόμηση καθώς προσθήκη παραπάνω από 2 ml δεν δείχνει να συνεισφέρει σημαντικά.

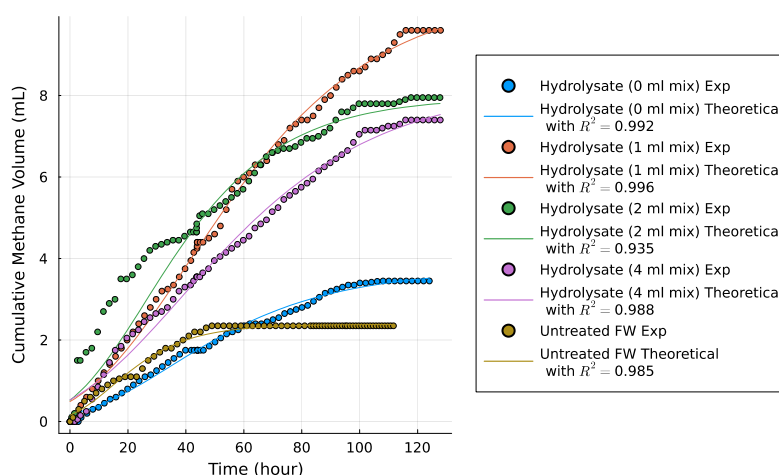


Σχήμα 2. Ανάλυση ευαισθησίας στην ποσότητα του μίχ για τις 2 θερμοκρασίες

Το Σχήμα 2 αναπαριστά ένα διάγραμμα ευαισθησίας στην ποσότητα του μίχ για κάθε ένωση σε κάθε θερμοκρασία το οποίο ενισχύει την υπόθεση αυτή. Φαίνεται πως με εξαίρεση την αιθανόλη, η οποία παράγεται σε μικρό βαθμό στους 40 °C, όλα τα προϊόντα είναι ευαίσθητα στην προσθήκη του μίχ και άρα γίνεται πιο αποτελεσματική βιοαποδόμηση.

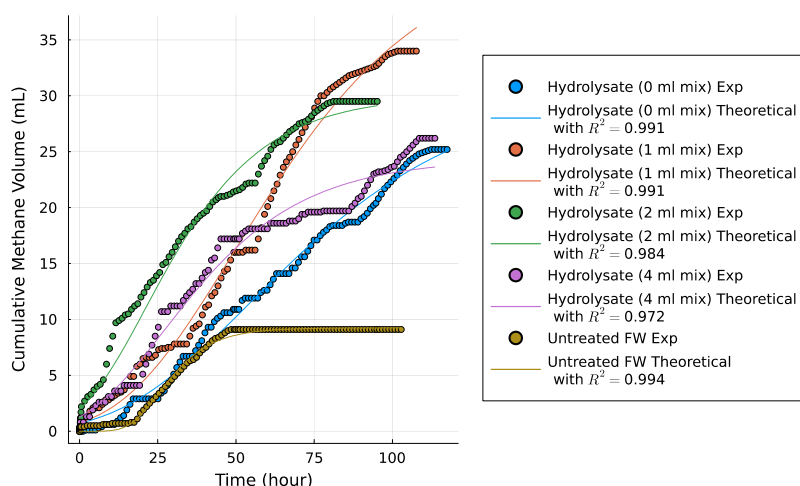
Κατά τη βιοαποδόμηση στον αντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας, αρχικά τροφοδοτήθηκαν 35,8 kg FW/day με προσθήκη 0.005 L mix/kg FW και 4,2 kg νερού/kg FW και η εκροή είχε sCOD $9205,5 \pm 3192,3$ mg/L και έναν λόγο sCOD/tCOD $46,1 \pm 12,2$ %. Σε αυτή την κλίμακα, η τυπική απόκλιση οφείλεται στην ανομοιογένεια των υπολειμμάτων τροφών που παράγονταν ανά ημέρα από το εστιατόριο. Στη συνέχεια, αυξήθηκε η αραίωση με χρήση 5,7 kg νερού/kg FW ενώ οι υπόλοιπες συνθήκες παρέμειναν σταθερές. Παρατηρήθηκε μία μείωση στο sCOD στα $4981,0 \pm 1288,7$ mg/L, ενώ ο λόγος sCOD/tCOD ήταν $39,2 \pm 10,4$ %.

Παρά τη μείωση της απόδοσης της υδρόλυσης δεν προκύπτει ασφαλές συμπέρασμα για την επίδραση της αραίωσης στη βιοαποδόμηση (p-Value 0,86). Έπειτα μειώθηκε η τροφοδοσία σε 25 kg FW/day και δοκιμάστηκε η προσθήκη διπλάσιας ποσότητας ενζύμων, δηλαδή 0,01 L mix/kg FW ενώ η αραίωση ήταν 8.9 kg νερού/kg FW. Το sCOD του πειράματος αυτού ήταν $3609,3 \pm 1993,0$ mg/L ενώ ο λόγος sCOD/tCOD ήταν $32,7 \pm 10,3$ (%). Ο λόγος αυτός είναι μικρότερος από αυτούς των δύο παραπάνω πειραμάτων (p-Value 0,0002 και 0,0011 για το πρώτο και δεύτερο πείραμα αντίστοιχα) με συμπέρασμα ότι αυτή η αναλογία mix/υποστρώματος δεν αυξάνει την απόδοση της υδρόλυσης. Με βάση τα αποτελέσματα της εργαστηριακής κλίμακας, η αναλογία αυτή, η οποία είναι αντίστοιχη των 2 mL mix/200 g FW σε εκείνη την κλίμακα, βοήθησε στην παραγωγή περισσότερων προϊόντων ζύμωσης. Οπότε συμπεραίνεται πως η υδρόλυση και η ζύμωση δεν έχουν τις ίδιες βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας.



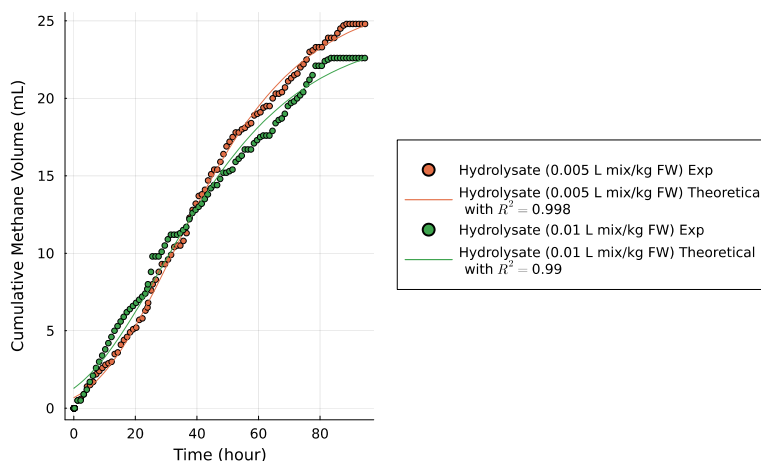
Σχήμα 3. Αποτελέσματα πρώτου κύκλου αναερόβιας χώνευσης

Από το Σχήμα 3 φαίνεται πως η προσαρμογή του μοντέλου Gompertz ήταν καλή σε όλα τα πειράματα ($R^2 > 0,93$). Συγκρίνοντας την συσσωρευτική παραγωγή μεθανίου από το ανεπεξέργαστο FW και από τα υδrolύματα παρατηρείται πως δεν μπορεί να παραχθεί μεγάλη ποσότητα μεθανίου χωρίς προεπεξεργασία. Μέσω του μοντέλου Gompertz και των g VS/αντιδραστήρα υπολογίστηκε η ειδική μεθανογόνος δραστηριότητα της λάσπης (SMA). Για τις δοκιμές με 0, 1, 2, και 4 mL mix αυτή ήταν 0,672, 1,707, 1,752 και 1,248 mL CH₄/g VS-day αντίστοιχα. Η SMA του ανεπεξέργαστου FW ήταν 0,936 mL CH₄/g VS-day. Το pH στους αντιδραστήρες όπου τροφοδοτήθηκαν με υδrolύματα διακυμάνθηκε από 6,8 έως 7,7 ενώ στον αντιδραστήρα που τροφοδοτήθηκε με ανεπεξέργαστο FW παρατηρήθηκε πτώση του pH σε 4,22 και κατά συνέπεια επήλθε αναστολή της μεθανογένεσης. Η τροφοδοσία με υδrolύμα χωρίς την προσθήκη σκεύασματος (επίδραση μόνο της θερμοκασίας) οδηγεί επίσης σε χαμηλή παραγωγικότητα. Είναι εμφανές πως το πείραμα με τα 2 mL mix, έχει τον γρηγορότερο ρυθμό παραγωγής μεθανίου λόγω της οξεογενούς ζύμωσης. Ωστόσο το υδrolύμα με 1 mL mix, μετά από κάποιο χρόνο καθυστέρησης παρήγαγε περισσότερο μεθάνιο. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μια σχετικά χαμηλή παραγωγή μεθανίου σε σχέση με τη μέγιστη θεωρητική (35 mL/100 mg COD) και ακολούθησε ένας δεύτερος κύκλος πειραμάτων με αναερόβια λάσπη διαφορετικής προέλευσης και ενεργότητας. Τα αποτελέσματα αυτής φαίνονται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4. Αποτελέσματα δεύτερου κύκλου αναερόβιας χώνευσης

Κατά το δεύτερο κύκλο αναερόβιας χώνευσης παρατηρείται η υψηλότερη παραγωγή μεθανίου με το υδρόλυμα από τη βιοαποδόμηση με 1 mL mix/200 g FW να προσεγγίζει μάλιστα τη μέγιστη θεωρητική παραγωγή σε ποσοστό 97%. Ως προς την συνολική παραγόμενη ποσότητα μεθανίου ακολουθεί το υδρόλυμα από 2 mL mix ενώ το ανεπεξέργαστο FW παρήγαγε τη λιγότερη ποσότητα. Και σε αυτό τον κύκλο υποδεικνύονται παρόμοιες τάσεις ως προς το ρυθμό παραγωγής μεθανίου με τον προηγούμενο. Πιο συγκεκριμένα η SMA για τα υδρόλύματα από 0, 1, 2 και 4 mL mix/200 g FW ήταν 4,8, 10,8, 8,5 και 7,3 mL CH₄/g VS-day, ενώ η SMA μετά από τροφοδοσία με το ανεπεξέργαστο FW ήταν 4,44 mL CH₄/g VS-day.



Σχήμα 5. Αποτελέσματα αναερόβιας χώνευσης με το υδρόλυμα της πιλοτικής μονάδας

Η συσσωρευτική παραγωγή μεθανίου από υδρόλυμα το οποίο προέκυψε από τον πιλοτικό αντιδραστήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 5. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την παραγωγή μεθανίου με υπόστρωμα υδρόλυμα πιλοτικού αντιδραστήρα, έρχονται σε συμφωνία με τα πειράματα στα υδρόλύματα εργαστηριακής κλίμακας. Πιο συγκεκριμένα η SMA που προκύπτει ύστερα από τροφοδοσία με υδρόλυμα προερχόμενο από 0,005 mL mix/kg FW είναι 2,304 mL CH₄/g VS-day, ενώ η αντίστοιχη για 0,01 mL mix/kg FW είναι 1,933 mL CH₄/g VS-day. Παράλληλα όταν χρησιμοποιείται 0,005 mL mix/kg FW η συνολική παραγωγή μεθανίου είναι υψηλότερη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ishangulyyev R, Sanghyo K, and Sang HL. (2019). *Foods.*, 8, 297.

- [2] Usmani Z, Minaxi S, Abhishek KA, Gauri DS, Denise C, S. Chandra N, Vijay KT, Ravi N, Ashok P, Vijai KG. (2021). *Journal of Hazardous Materials.*, 416, 126154.
- [3] Uçkun EK, Antoine PT, and Yu L. (2015). *Bioresource Technology.*, 183, 47–52.
- [4] Ma C, Liu J, Min Y, Zou L, Qian G, Li YY. (2018). *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 90, 700–709.
- [5] Zhang, Jingxin, Kai-Chee Loh, Wangliang Li, Jun Wei Lim, Yanjun Dai, and Yen Wah Tong. (2017). *Applied Energy.*, 194 (5), 287–95.
- [6] Zwietering MH, Jongenburger I, Rombouts FM, Riet K. (1990). *Ap. and Env. Microbiology.*, 56, 1875–81.
- [7] Kai F, Huan L, Zhou D, Qiao W, Yangyang Z, Chengzhi Z. (2020). *Renewable Energy.*, 146, 1588–95.