

ΟΛΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ *TYRHA DOMINGENSIS* ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΖΥΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΓΛΥΚΟΖΗΣ: ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΜΥΛΟΥΧΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ**Γ. Ιωαννίδου¹, Α. Καραπατσιά^{1,2}, Χ. Χατζηδούκας^{1,2*}**¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα;²Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ
(*chatzido@auth.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

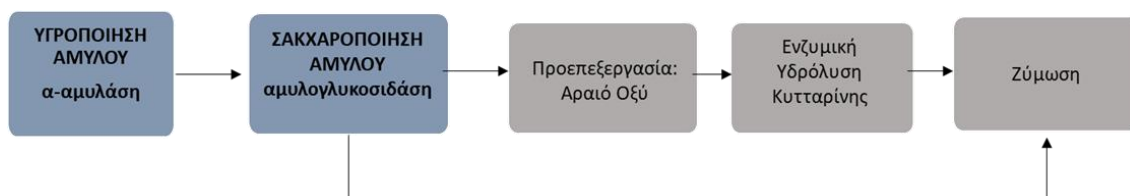
Η ανάγκη για αειφόρο παραγωγή βιοαιθανόλης ως εναλλακτικού καυσίμου από φυτική βιομάζα αυξάνεται επιτακτικά. Τόσο τα αμυλούχα, όσο και τα κυτταρινικά υλικά, μπορούν να μετατραπούν μέσω ενζυμικής υδρόλυσης σε ζυμώσιμα σάκχαρα και έπειτα να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς. Στην παρούσα εργασία μελετάται η αξιοποίηση του φυτού *Tyrha domingensis*, ως πλούσια πηγή πολυσακχαριτών (71.6% σε ξηρή βάση), για την παραγωγή γλυκόζης με ενζυμική υδρόλυση του αμυλούχου κλάσματος του φυτού. Η ποσοτική σύσταση της βιομάζας πραγματοποιήθηκε αναλυτικά με όξινη υδρόλυση του φυτού. Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στην αναγνώριση καίριων λειτουργικών μεταβλητών (αρχική συγκέντρωση βιομάζας % w/v, αρχική ποσότητα ενζύμου U/g υποστρώματος, ταχύτητα ανάδευσης rpm) ως παραγόντων που καθορίζουν την επιτυχή κλιμάκωση της διεργασίας ενζυμικής υδρόλυσης, με την προοπτική ανάπτυξης μιας εμπορικά αξιοποιήσιμης τεχνολογίας. Οι βέλτιστες συνθήκες υπολογίζονται κατόπιν πειραματικού σχεδιασμού Box Behnken και στατιστικής επεξεργασίας της επίδρασης των επιλεγμένων παραγόντων στην απόδοση και παραγωγικότητα της υδρόλυσης.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η απαίτηση για αειφόρο παραγωγή ενέργειας και βιοκαυσίμων είναι μια επιτακτική ανάγκη που η ικανοποίηση της διέρχεται μέσα από την αναζήτηση της αειφορίας τόσο στο στάδιο της παραγωγής πρώτης ύλης όσο και στις τεχνολογίες αξιοποίησης/αναβάθμισης αυτής. Προσανατολισμένη στην κατεύθυνση αυτή είναι η έρευνα για την παραγωγή και αξιοποίηση διαφόρων μορφών βιομάζας (φυτική, μικροβιακή, ζωικά απόβλητα, οργανικά απορρίμματα κ.ά). Ειδικότερα στην περίπτωση της φυτικής βιομάζας αναπτύσσονται τεχνολογίες ολοκληρωμένης διαχείρισης ενεργειακών φυτών που αφενός δεν εμπλέκονται σε κανένα στάδιο του δικτύου της διατροφικής αλυσίδας, αφετέρου συνεισφέρουν στην επεξεργασία και απομείωση περιβαλλοντικού φορτίου υγρών λυμάτων αστικών, βιομηχανικών και αγροτικών δραστηριοτήτων. Το μακρόφυτο *Tyrha domingensis* είναι ένα αντιπροσωπευτικό ενεργειακό φυτό, η συστηματική υδατοκαλλιέργεια του οποίου είναι δυνατή σε λίμνες ή ποτάμια που είναι αποδέκτες υγρών αποβλήτων υψηλού φορτίου ανόργανων υλικών (π.χ., νιτρικά, φωσφορικά άλατα προερχόμενα από λιπάσματα σε καλλιέργειες). Επιπλέον αποτελεί διπλή πηγή πολυσακχαριτών καθώς οι ρίζες και το ρίζωμα περιλαμβάνουν άμυλο σε μορφή μη δομικών πολυσακχαριτών επιπρόσθετα της δομικής κυτταρίνης που φέρουν τα ποώδη φυτά ^[1].

ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στοχεύοντας στην παραγωγή αιθανόλης από φυτική βιομάζα, καθίσταται αναγκαίος ο προσδιορισμός της σύστασης της βιομάζας με συμβατικές μεθόδους χημικής ανάλυσης. Η ολοκληρωμένη επεξεργασία της βιομάζας (προεπεξεργασία και ενζυμική υδρόλυση) έχει ως στόχο την υδρόλυση των πολυσακχαριτών και την παραγωγή γλυκόζης, η οποία έπειτα θα αποτελέσει πρώτη ύλη στη διεργασία της μικροβιακής ζύμωσης για την παραγωγή βιοκαυσίμων και άλλων βιοχημικών προϊόντων ^[2]. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της ενζυμικής υδρόλυσης του αμυλούχου κλάσματος του φυτού με τη βοήθεια κατάλληλων ενζύμων, των αμυλασών (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής για την ολιστική εκμετάλλευση της βιομάζας με έμφαση στην υδρόλυση του αμύλου.

Μελετάται η διαμόρφωση κατάλληλων συνθηκών που θα μεγιστοποιήσουν την απόδοση της συνολικής διεργασίας με τη χρήση ακολουθίας πειραμάτων βάση του πειραματικού σχεδιασμού Box Behnken. Το εύρος των μελετώμενων παραμέτρων καθορίζεται από διερευνητικά πειράματα σύγκρισης τιμών. Η ανάλυση ευαισθησίας μέσω στατιστικών εργαλείων αξιολογεί την επίδραση των λειτουργικών παραμέτρων στην παραγωγή της γλυκόζης, καθώς και στην απόδοση του σταδίου της ενζυμικής υδρόλυσης^[3]. Η απόδοση ορίζεται στην εξίσωση (1), όπου 21.59% είναι το ποσοστό του αμύλου επί της ξηρής βιομάζας του φυτού *Typha domingensis*:

$$\text{Απόδοση \%} = \frac{\text{Γλυκόζη (mg/ml)} \times 0.9}{\text{Βιομάζα} \times 21.59} \times 100 \quad (1)$$

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Προσδιορισμός Σύστασης της Βιομάζας

Για τον προσδιορισμό των πολυσακχαριτών (άμυλο, κυτταρίνη και ημικυτταρίνες), προηγείται το στάδιο της εκχύλισης για την απομάκρυνση και τον προσδιορισμό των εκχυλίσιμων συστατικών της βιομάζας (ελεύθερα σάκχαρα, λιπίδια, πρωτεΐνες, χρωστικές κ.α.). Η διεργασία της εκχύλισης πραγματοποιείται σε συσκευή Soxhlet και ολοκληρώνεται σε δύο στάδια απομακρύνοντας τα συστατικά που είναι διαλυτά στο νερό και στην αιθανόλη^[4]. Στη συνέχεια η βιομάζα ξηραίνεται και μέσω όξινης υδρόλυσης με 72% w/w H₂SO₄ υδρολύεται στα μονομερή συστατικά των πολυσακχαριτών, τα οποία προσδιορίζονται σε υγρό χρωματογράφο υψηλής απόδοσης (HPLC) (Agilent Technologies Inc. 1200 Series) με ανιχνευτή δείκτη διάθλασης (RI) (Agilent 1260 Infinity II)^[5]. Χρησιμοποιήθηκε στήλη Zorbax Carbohydrates (Agilent) με ροή 1.4 ml/min και κινητή φάση 70% ακετονιτρίλιο-30% νερό. Οι συγκεντρώσεις των ολιγοσακχαριτών που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της σύστασης των δομικών συστατικών της βιομάζας. Η διαλυτή στο οξύ λιγνίνη υπολογίζεται φασματοφωτομετρικά στα 320 nm, ενώ ο υπολογισμός της μη διαλυτής στο οξύ λιγνίνης προσδιορίζεται μετά την αφαίρεση της τέφρας από το στερεό υπόλειμμα της όξινης υδρόλυσης. Τέλος, η περιεκτικότητα σε τέφρα προσδιορίστηκε με την καύση του στερεού υπολείμματος στους 575°C σε φούρνο Box Furnace (Lindberg Blue M, Asheville USA)^[5].

Υδρόλυση αμύλου

Η υδρόλυση του αμύλου πραγματοποιείται σε δύο στάδια, στην υγροποίηση με τη συνεισφορά του ενζύμου α-αμυλάση (from *Bacillus amyloliquefaciens* EC 3.2.1., δραστηριότητας 250 U/gr) και τη σακχαροποίηση μέσω του ενζύμου αμυλογλυκοσιδάση (from *Aspergillus niger* EC 3.2.1., δραστηριότητας 70 U/ml). Η φυτική βιομάζα, αφού αλεστεί και κατανεμηθεί με κοσκίνιση σε διαφορετικά μεγέθη σωματιδίων, υποβάλλεται σε ενζυμική υδρόλυση. Συγκεκριμένα, ξηρή βιομάζα συγκέντρωσης 3% w/v εισάγεται σε κωνική φιάλη των 25 ml, όπου πραγματοποιείται αρχικά η ομογενοποίηση της σε υδατικό λουτρό στους 80 °C για 0.5 h με την προσθήκη του ρυθμιστικού διαλύματος οξικού οξέος 0.1M (pH=5). Στη συνέχεια προστίθεται η α-αμυλάση με δραστηριότητα 150 U/g υποστρ. και η υγροποίηση διαρκεί 2 h στους 80 °C. Με την ολοκλήρωση της αντίδρασης και την πτώση της θερμοκρασίας, το pH ρυθμίζεται στο 4.8 με την χρήση διαλύματος HCl 0.1 M. Έπειτα, διατηρώντας σταθερή την αναλογία των δύο ενζύμων αμυλάσης:αμυλογλυκοσιδάσης (1:2) προστίθενται 300 U/g υποστρ. αμυλογλυκοσιδάσης. Η

αντίδραση λαμβάνει χώρα σε επωαστήρα κυκλικής ανάδευσης στους 50 °C με ρυθμό ανάδευσης 150 rpm. Η συγκέντρωση της γλυκόζης αναλύεται με τη μέθοδο της υγρής χρωματογραφίας υψηλής απόδοσης (HPLC). Το στερεό υπόλειμμα ξεπλένεται και αποθηκεύεται για τα επόμενα στάδια της διεργασίας. Τα πειράματα μελέτης της χρονικής εξέλιξης της ενζυμικής υδρόλυσης πραγματοποιήθηκαν σε βιομάζα ξηρής μορφής και σε καθαρό άμυλο.

Διερευνητικά Πειράματα και Πειραματικός σχεδιασμός

Για τη βελτιστοποίηση της διεργασίας είναι αναγκαίο να αξιολογηθούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της σακχαροποίησης. Για αυτό το λόγο, οι κρίσιμες παράμετροι της αντίδρασης θα μελετηθούν μέσω στατιστικής επεξεργασίας, ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση των παραμέτρων και των αλληλεπιδράσεων τους στην απόδοση και την παραγωγικότητα της υδρόλυσης. Το εύρος τιμών κάθε παραμέτρου επιλέγεται κατόπιν διερευνητικών πειραμάτων σύγκρισης, στα οποία οι υπόλοιπες συνθήκες παραμένουν σταθερές. Αρχικά διεξάγεται μια σειρά πειραμάτων υδρόλυσης με συγκεντρώσεις βιομάζας 3-6-9-12-15% w/v, με δραστηριότητα ενζύμου 150 U/g υποστρ. και ταχύτητα ανάδευσης 150 rpm, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της συγκέντρωσης του υποστρώματος στην απόδοση της υδρόλυσης. Στη συνέχεια, διεξάγονται πειράματα υδρόλυσης με διαφορετικές συγκεντρώσεις ενζύμου 30-45-60-150 U/g υποστρ. με συγκέντρωση υποστρώματος 3% w/v και ταχύτητα ανάδευσης 150 rpm, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση διαφορετικής δραστηριότητας ενζύμου για δεδομένο υπόστρωμα. Τέλος, μέσω ενός κατάλληλου πειραματικού σχεδιασμού, με τη βοήθεια του λογισμικού Minitab 7.0, εφαρμόζοντας τη μέθοδο επιφανειακής απόκρισης Box Behnken, μελετήθηκε η επίδραση τριών παραμέτρων (αρχική συγκέντρωση βιομάζας %w/v, αρχική ποσότητα ενζύμου U/g υποστρ., ταχύτητα ανάδευσης rpm) στις μεταβλητές απόκρισης της διεργασίας. Συνολικά διεξάγονται 15 πειράματα με επαναλήψεις, των οποίων οι συνθήκες καθώς και οι τιμές των μεταβλητών απόκρισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Χημική ανάλυση

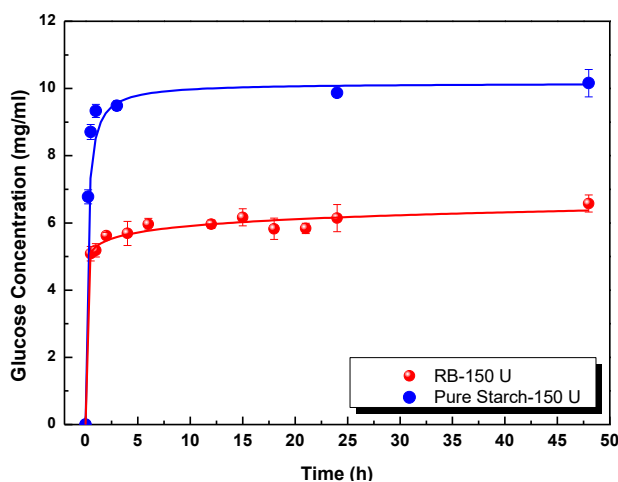
Ο προσδιορισμός της σύστασης της βιομάζας υποδεικνύει ότι η φυτική βιομάζα αποτελεί πηγή υδατανθράκων, οι οποίοι αποτελούν το 71.6 % της συνολικής βιομάζας σε ξηρή βάση. Από τον Πίνακα 1 διαπιστώνεται ότι το φυτό περιέχει υψηλή περιεκτικότητα σε γλυκάνες, που προέρχονται από την κυτταρίνη σε μεγαλύτερο ποσοστό και το άμυλο σε ικανοποιητικό επίσης ποσοστό. Οι ημικυτταρίνες αποτελούν το δίκτυο διακλαδισμένων πολυσακχαριτών γύρω από την κυτταρίνη, με δομικά συστατικά πεντόζες (κυρίως ξυλόζη) και εξόζες. Σημαντική είναι η αναγνώριση της περιεκτικότητας του φυτού σε λιγνίνη, καθώς αποτελεί παρεμποδιστικό παράγοντα της ενζυμικής υδρόλυσης.

Κινητική μελέτη της υδρόλυσης του αμύλου και Πειραματικός Σχεδιασμός

Τα αποτελέσματα της μελέτης της χρονικής εξέλιξης της ενζυμικής υδρόλυσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2 και υπέδειξαν ότι στις 48 h έχει παραχθεί η μέγιστη ποσότητα γλυκόζης (91.4%). Σύγκριση της υδρόλυσης του καθαρού αμύλου υπέδειξε σχεδόν ίδιο ποσοστό απόδοσης γλυκόζης (91.43%). Οι κοντινές αποδόσεις οφείλονται στην εύκολη πρόσβαση της πολυσακχαριτικής αλυσίδας του αμύλου στη δομή του φυτού, διευκολύνοντας την προσρόφηση των ενζύμων στην επιφάνεια του.

Πίνακας 1. Σύσταση βιομάζας σε ξηρή βάση.

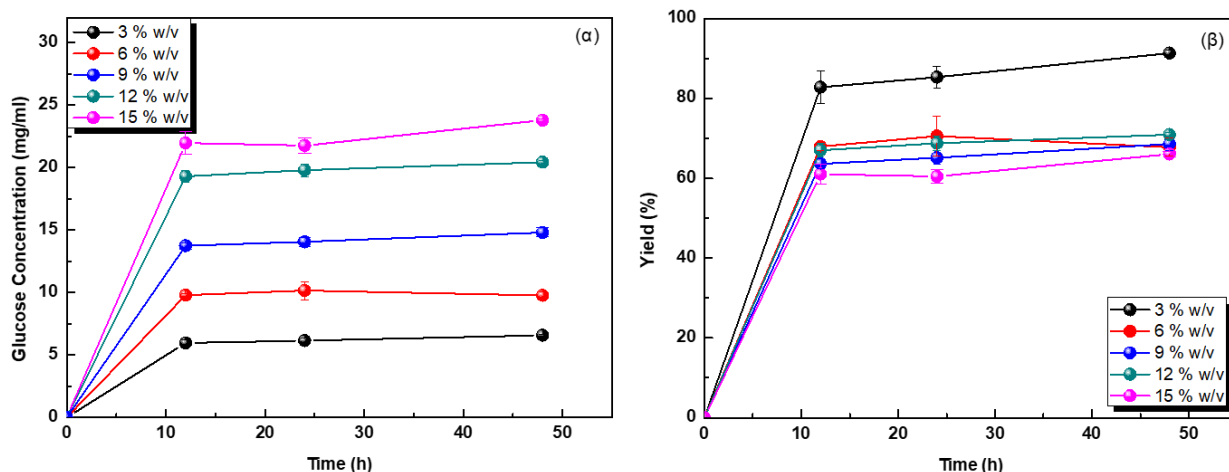
| Συστατικό Βιομάζας | Άμυλο | Κυτταρίνη | Ημικυτταρίνες | Λιγνίνη | Εκχυλίσμα συστατικά & Τέφρα |
|--------------------|-------|-----------|---------------|---------|-----------------------------|
| Ξηρή βάση (%) | 21.59 | 36.01 | 14.00 | 20.59 | 5.21 και 2.6 |



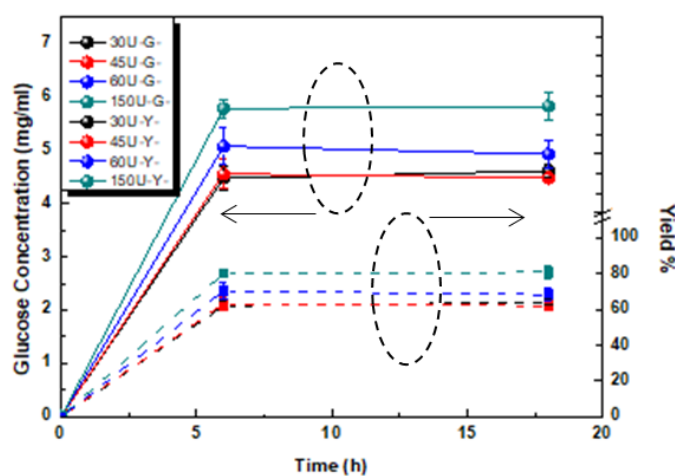
Σχήμα 2. Μελέτη ενζυμικής υδρόλυσης ακατέργαστης βιομάζας 3% w/v και καθαρού αμύλου 1% w/v σε σχέση με το χρόνο.

Η διαμόρφωση του πειραματικού σχεδιασμού βασίστηκε στα διερευνητικά πειράματα που έθεσαν τα όρια των λειτουργικών παραμέτρων μέσα στα οποία θα ακολουθήσει η μελέτη ευαισθησίας. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα συγκριτικά πειράματα για διαφορετικές συγκεντρώσεις βιομάζας με σταθερή τη δραστικότητα του ενζύμου. Διαπιστώνεται ότι με αύξηση της συγκέντρωσης του υποστρώματος η παραγωγή της γλυκόζης αυξάνεται καθώς το ένζυμο έχει πρόσβαση σε περισσότερες ενεργές θέσεις. Επιπλέον, τα πειράματα υπέδειξαν ότι η μέγιστη απόδοση υδρόλυσης εντοπίστηκε με αρχική συγκέντρωση 3 %w/v σε 48 ώρες (91.4%), ενώ με περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης οι τιμές των αποδόσεων πλησιάζουν η μία την άλλη, χωρίς σημαντική διαφορά (6% w/v: 67.78%, 9% w/v: 68.55%, 12% w/v: 65.83%, 15% w/v: 66.08). Η συσχέτιση της αύξησης της βιομάζας με την παραγόμενη γλυκόζη ακολουθεί γραμμική πορεία που υποδηλώνει την απουσία παρεμποδιστικών φαινομένων μεταφοράς μάζας. Έτσι, ως μέγιστη τιμή αρχικής συγκέντρωσης υποστρώματος για τον Πειραματικό Σχεδιασμό, επιλέγεται η τιμή 18% w/v. Στη συνέχεια, κατά τη μελέτη διαφορετικής ποσότητας λόγου ενζύμου-υποστρώματος, η αύξηση του ενζύμου αυξάνει τη συγκέντρωση της γλυκόζης. Η αύξηση της δραστικότητας από 30 σε 45 U/g υποστρ. έχει μικρή επίπτωση στη συγκέντρωση της γλυκόζης με ικανοποιητική απόδοση (63.99% και 62.25%) σε 18 h, ενώ η δραστικότητα 60 U/g υποστρ. επιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό (απόδοση ίση με 68.4%). Τα 150 U/g υποστρ. ενισχύουν σημαντικά την απόδοση της υδρόλυσης. Το Σχήμα 4 απεικονίζει πώς μικρές αλλαγές στην ποσότητα του ενζύμου δεν επιφέρουν σημαντική αύξηση γλυκόζης. Συνεπώς, ο πειραματικός σχεδιασμός απαιτεί διευρυμένα επίπεδα τιμών. Η ικανοποιητική απόδοση σε χαμηλότερες ποσότητες ενζύμων δίνει τη δυνατότητα μελέτης μείωσης της ποσότητας των ενζύμων. Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα οι τιμές που επιλέχθηκαν για τα διαφορετικά επίπεδα των λειτουργικών παραμέτρων του πειραματικού σχεδιασμού περιλαμβάνονται στον Πίνακα 2.

Με τη βοήθεια του στατιστικού προγράμματος Minitab 7.0 αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα πρόβλεψης επιφανειακής απόκρισης, που περιγράφουν την επίδραση των μελετώμενων παραμέτρων στις αποκρίσεις (συγκέντρωση γλυκόζης και απόδοση υδρόλυσης). Η συνεισφορά της αρχικής συγκέντρωσης βιομάζας αφενός και του λόγου ενζύμου/βιομάζας αφετέρου αποτελεί τον πιο καθοριστικό παράγοντα για τη διαμόρφωση της παραγόμενης γλυκόζης και τη διαμόρφωση της απόδοσης της υδρόλυσης αντίστοιχα. Τα στατιστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της υδρόλυσης βάσει διαφορετικών κριτηρίων, από την οποία προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 3. Ειδικότερα, η βελτιστοποίηση με κριτήρια τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της ενζυμικής υδρόλυσης συνδυαστικά με παραγωγή διαλύματος υψηλής συγκέντρωσης γλυκόζης (≥ 15 g/l) που δεν προϋποθέτει συμπύκνωση σε μεγάλο βαθμό, κρίνεται σημαντική για την προετοιμασία του ρεύματος τροφοδοσίας του σταδίου της ζύμωσης^[6].



Σχήμα 3. Μελέτη επίδρασης διαφορετικής συγκέντρωσης υποστρώματος στην (α) παραγωγή γλυκόζης, (β) απόδοση (yield %) κατά την υδρόλυση 3-6-9-12-15% w/v βιομάζας (150 U/g υποστρ., 150 rpm).



Σχήμα 4. Μελέτη επίδρασης της διαφορετικής δραστηριότητας ενζύμου 30-45-60-150 U/g υποστρ. στην παραγωγή γλυκόζης και την απόδοση (yield %) κατά την ενζυμική υδρόλυση βιομάζας 3% w/v (150 rpm).

Πίνακας 2. Επίπεδα ανεξαρτήτων παραγόντων πειραματικού σχεδιασμού, ποσότητα παραγόμενης γλυκόζης και απόδοση υδρόλυσης.

| Πειραματικός Σχεδιασμός Επιφανειών Απόκρισης Box Behnken | | | | | | | |
|--|---------------------------------|---|--|----------------|-----------------|------------------|-------------|
| Πειράματα | Συγκέντρωση Υποστρώματος (%w/v) | Λόγος | | Ανάδευση (rpm) | Γλυκόζη (mg/ml) | Γλυκάνες (mg/ml) | Απόδοση (%) |
| | | Δραστηριότητας Ενζύμου-Υποστρώματος (U/g υποστρ.) | | | | | |
| 1 | 6 | 100 | | 150 | 10.655 | 9.589 | 74.027 |
| 2 | 12 | 60 | | 150 | 16.517 | 14.865 | 57.376 |
| 3 | 18 | 60 | | 200 | 22.180 | 19.962 | 51.367 |
| 4 | 6 | 20 | | 150 | 8.608 | 7.748 | 59.809 |
| 5 | 18 | 100 | | 150 | 26.516 | 23.865 | 61.409 |
| 6 | 12 | 60 | | 150 | 16.517 | 14.865 | 57.376 |
| 7 | 6 | 60 | | 200 | 9.484 | 8.536 | 65.891 |
| 8 | 12 | 20 | | 200 | 14.527 | 13.074 | 50.465 |
| 9 | 12 | 60 | | 150 | 15.619 | 14.865 | 57.376 |
| 10 | 18 | 60 | | 100 | 21.089 | 18.980 | 48.841 |
| 11 | 18 | 20 | | 150 | 16.752 | 15.077 | 38.796 |
| 12 | 12 | 100 | | 200 | 17.652 | 15.887 | 61.320 |
| 13 | 12 | 100 | | 100 | 18.401 | 16.560 | 63.920 |
| 14 | 6 | 60 | | 100 | 10.760 | 9.684 | 74.759 |
| 15 | 12 | 20 | | 100 | 13.323 | 11.991 | 46.283 |

Πίνακας 3. Συνδυασμός παραμέτρων που βελτιστοποιούν την ενζυμική υδρόλυση σύμφωνα με το κριτήριο (α) μέγιστη συγκέντρωση γλυκόζης, (β) μέγιστη απόδοση και (γ) μέγιστη απόδοση - συγκεκριμένη τιμή συγκέντρωσης γλυκόζης.

| Παράμετροι | Τιμές | Τιμή Πρόβλεψης Κριτηρίου | Κριτήριο |
|--|-----------------------|---|--|
| Συγκέντρωση Υποστρώματος | 18% w/v | 26.72 g/l (Απόδοση: 62.38%) | Μέγιστη Συγκέντρωση Γλυκόζης |
| Λόγος Δραστικότητας Ενζύμου-Υποστρώματος | 100 U/ g υποστρώματος | | |
| Ανάδευση | 200 rpm | | |
| Συγκέντρωση Υποστρώματος | 6% w/v | 76.92 % (Συγκέντρωση γλυκόζης: 10.75 g/l) | Μέγιστη Απόδοση |
| Λόγος Δραστικότητας Ενζύμου-Υποστρώματος | 100 U/ g υποστρώματος | | |
| Ανάδευση | 100 rpm | | |
| Συγκέντρωση Υποστρώματος | 9.6% w/v | <ul style="list-style-type: none"> • 65.09% • 15.02 g/l | <ul style="list-style-type: none"> • Μέγιστη Απόδοση • Συγκέντρωση γλυκόζης ≥ 15 g/l |
| Λόγος Δραστικότητας Ενζύμου-Υποστρώματος | 100 U/ g υποστρώματος | | |
| Ανάδευση | 200 rpm | | |

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το αμυλούχο κλάσμα του φυτού υδρολύθηκε με τη χρήση αμυλασών και παρήχθησαν ζυμώσιμα σάκχαρα με ικανοποιητικό ρυθμό υδρόλυσης. Κατόπιν στατιστικής επεξεργασίας, μελετήθηκε η επίδραση των λειτουργικών παραμέτρων της ενζυμικής υδρόλυσης και ακολούθησε βελτιστοποίηση σύμφωνα με κριτήρια μεγιστοποίησης της απόδοσης και της παραγωγής διαλύματος γλυκόζης κατάλληλου για περαιτέρω εκμετάλλευση. Αποδείχθηκε ότι σημαντικές αποδόσεις υδρόλυσης με ικανοποιητικές συγκεντρώσεις γλυκόζης επιτυγχάνονται με κατάλληλο συνδυασμό δραστικότητας ενζύμου, συγκέντρωσης βιομάζας και ρυθμού ανάδευσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου "LIFE Biomass C+" (κωδικός έργου: LIFE16 CCM/GR/000044), και οι συγγραφείς της εργασίας ευχαριστούν θερμά την Ευρωπαϊκή Ένωση για τη συγχρηματοδότηση του έργου.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Arai-Sanoh Y, Ida M, Zhao R, Yoshinaga S, Takai T, Ishimaru T, Maeda H, Nishitani K, Terashima Y, Gau M, Kato N, Matsuoka M, Kondo M, (2011). Biosci. Biotechnol. Biochem., 75(6): 1104–12.
- [2] Jørgensen H, Jan Bach K, Claus F, (2007). Biofuel Bioprod Biorefin., 1(2): 119–34.
- [3] Mayer F.D, Gasparotto J.M, Klauck E, Werle L.B, Jahn S.L, Hoffmann R, Mazutti M.A, (2015). Starch, 67: 620-628.
- [4] Sluiter A, Ruiz R, Scarlata C, Sluiter J, Templeton D, (2005). Technical Report NREL/TP-510-42619.
- [5] Sluiter A, Hames B, Ruiz R, Scarlata C, Sluiter J, Templeton D, Crocker D, (2008a). Technical Report NREL/TP-510- 42618. Golden, Colorado.
- [6] Karapatsia A, Penloglou G, Chatzidoukas C, Kiparissides C, (2016). Biomass Bioenerg, 90: 32-41.