

**ΟΛΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ *TYRHA DOMINGENSIS* ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΖΥΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΓΛΥΚΟΖΗΣ: ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΥΤΤΑΡΙΝΙΚΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ****Θ.Μ. Μίγκος<sup>1</sup>, Α. Καραπατσιά<sup>1,2</sup>, Χ. Χατζηδούκας<sup>1,2\*</sup>**<sup>1</sup>Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα<sup>2</sup>Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ(\*[chatzido@auth.gr](mailto:chatzido@auth.gr))**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις ενέργειας και η συνεχής μείωση της διαθεσιμότητας των συμβατικών ορυκτών καυσίμων, έχει οδηγήσει στην αναζήτηση ανανεώσιμων πρώτων υλών <sup>[1]</sup>, όπως είναι η λιγνοκυτταρινική βιομάζα, που αφενός δεν ανταγωνίζονται κανένα στάδιο της διατροφικής αλυσίδας και αφετέρου ενισχύουν το δείκτη αειφορίας όταν ενταχθούν σε διεργασίες παραγωγής ενέργειας ή προϊόντων ευρείας χρήσης. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η πλήρης αξιοποίηση του αμύλου και της κυτταρίνης που περιέχονται στις ρίζες του φυτού *Tyrha domingensis*. Συγκεκριμένα μελετάται αρχικά η δυνατότητα βελτιστοποίησης αποκλειστικά του σταδίου της ενζυμικής υδρόλυσης της κυτταρίνης μέσω πειραματικού σχεδιασμού επιφανειών απόκρισης (Box Behnken) τριών ανεξάρτητων παραγόντων (συγκέντρωση υποστρώματος, ενζύμου και ρυθμός ανάδευσης). Η παραπάνω προσέγγιση που προϋποθέτει διαδοχική αξιοποίηση των πολυσακχαριτών του φυτού, αντιπαραβάλλεται με το σενάριο παραγωγής της γλυκόζης σε ένα ενιαίο στάδιο υδρόλυσης αμύλου και κυτταρίνης και τα αποτελέσματα αξιολογούνται με στόχο την οικονομικότητα του εγχειρήματος για τη μεταφορά του σε βιομηχανική κλίμακα. Η προτεινόμενη ολιστική εκμετάλλευση της βιομάζας επιτυγχάνει μετατροπή της βιομάζας σε γλυκόζη με ικανοποιητικές αποδόσεις, με την προοπτική να αποτελέσει ρεύμα τροφοδοσίας βιοαντιδραστήρων μικροβιακής παραγωγής βιοχημικών προϊόντων.

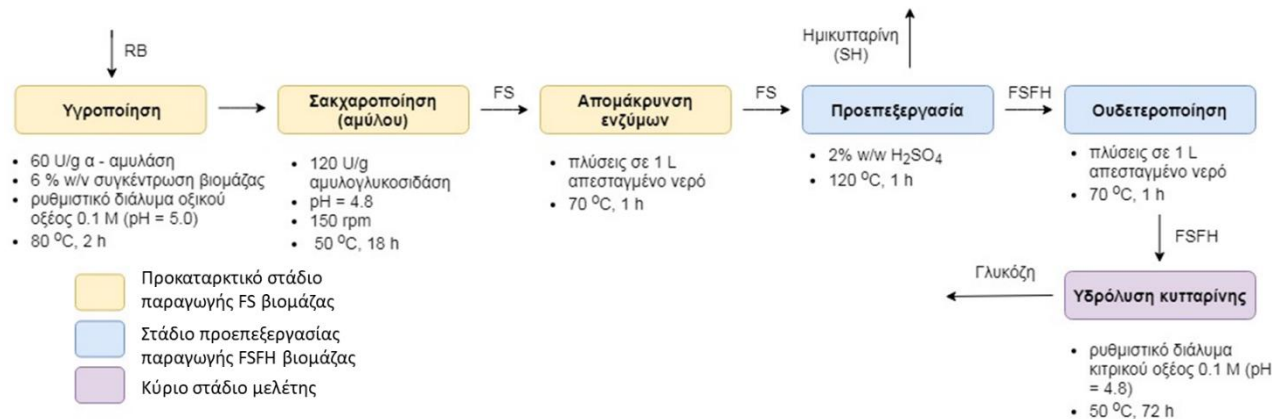
**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η λιγνοκυτταρινική βιομάζα αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη πηγή ενέργειας καθώς είναι πλούσια σε πολυσακχαρίτες, οι οποίες επεξεργάζονται κατάλληλα (προεπεξεργασία και ενζυμική υδρόλυση) με στόχο την εκμετάλλευση του μέγιστου αποθέματος πολυσακχαριτών, παρέχοντας πρώτη ύλη για βιοκαύσιμα (όπως βιοαιθανόλη) και άλλα βιοϋλικά υψηλής προστιθέμενης αξίας <sup>[2]</sup>. Το μακρόφυτο *Tyrha domingensis*, προσφέρεται για μελέτη σε ένα πλαίσιο ολοκληρωμένης διαχείρισης τόσο για την απομάκρυνση ρύπων από αστικά υδάτινα απόβλητα <sup>[3]</sup>, όσο για τα πλούσια αποθέματα υδατανθράκων που διαθέτουν οι ρίζες και το ρίζωμά του. Αποτελεί μάλιστα διπλή πηγή πολυσακχαριτών: αμύλου και δομικής κυτταρίνης. Η υδρολύση της ακατέργαστης βιομάζας με α-αμυλάση και αμυλογλυκοσιδάση στοχεύοντας στο αμυλούχο κλάσμα αποτελεί το πρώτο στάδιο της καθολικής αξιοποίησης του φυτού και μελετάται ξεχωριστά από την ίδια ερευνητική ομάδα. Στην παρούσα εργασία έμφαση δίνεται στην αξιοποίηση του κυτταρινικού κλάσματος του φυτού που ξεκινά με το στάδιο της προεπεξεργασίας με αραιό θειικό οξύ και έχει ως στόχο: τη διαλυτοποίηση των ημικυτταρινών που δρουν ως συνδετικό υλικό μέσα στην κυτταρινική δομή του φυτού, την αλλαγή της δομής της κυτταρίνης και της λιγνίνης, καθώς και την απομάκρυνση τμήματος της τελευταίας. Τέλος, η χρήση κυτταρινασών (ενδογλυκανάσες, εξωγλυκανάσες και β-γλυκοσιδάση) στοχεύει στην υδρόλυση της κυτταρίνης σταδιακά σε ολιγοσακχαρίτες και κελλοβιόζη, τα οποία στη συνέχεια θα μετατραπούν σε γλυκόζη.

**ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ**

Βασικός στόχος της συγκεκριμένης μελέτης αποτελεί η πλήρης εκμετάλλευση των πολυσακχαριτών που περιέχονται στο φυτό *Tyrha* μέσω της διεργασίας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, με ιδιαίτερη έμφαση στη μελέτη της υδρόλυσης του κυτταρινικού κλάσματος. Η μελέτη

βελτιστοποίησης των λειτουργικών παραμέτρων του σταδίου, πραγματοποιείται με τη χρήση ακολουθίας πειραμάτων βάση του πειραματικού σχεδιασμού Box Behnken. Το εύρος των μελετώμενων παραμέτρων καθορίζεται από διερευνητικά πειράματα σύγκρισης τιμών. Με στόχευση στην κλιμάκωση της διεργασίας και την εμπορική της αξιοποίηση, μελετήθηκε η ταυτόχρονη υδρόλυση του αμύλου και της κυτταρίνης σε ένα ενιαίο στάδιο.



**Σχήμα 1.** Διάγραμμα ροής για την εκμετάλλευση της βιομάζας με έμφαση στην υδρόλυση της κυτταρίνης.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### Προεπεξεργασία με αραιό θειικό οξύ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2% w/v)

Η βιομάζα (ακατέργαστη (Raw biomass-RB) ή ελεύθερη αμύλου (Free from Starch-FS)) χειρίζεται με διάλυμα αραιού H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2% w/v σε θερμοανθεκτικές φιάλες των 100 mL, με συνθήκες: συγκέντρωση βιομάζας 10% w/v, θερμοκρασία 120 °C και διάρκεια αντίδρασης 1 h. Η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή σε λουτρό λαδιού υπό μαγνητική ανάδευση, η αντίδραση τερματίζεται σε λουτρό πάγου και το pH ουδετεροποιείται μέσω πλύσεων με τη χρήση αποσταγμένου νερού. Τα διαλυτοποιημένα συστατικά των ημικυτταρινών προσδιορίζονται με υγρό χρωματογράφο υψηλής απόδοσης (HPLC) (Agilent Technologies Inc. 1200 Series) με ανιχνευτή δείκτη διάθλασης (RI) (Agilent 1260 Infinity II). Χρησιμοποιήθηκε στήλη Zorbax Carbohydrates (Agilent) με ροή 1.4 ml/min και κινητή φάση 70% ακετονιτρίλιο-30% νερό. Οι συγκεντρώσεις των σακχάρων (ξυλόζη, αραβινόζη, μαννόζη, γλυκόζη, γαλακτόζη) καθορίζουν την απόδοση του σταδίου της προεπεξεργασίας σύμφωνα με τη Σχέση 1:

$$\text{Απόδοση διαλυτοποίησης ημικυτταρινών \%} = \frac{\text{Πεντόζες (mg/ml)} \times 0.88 + \text{Εξόζες (mg/ml)} \times 0.9}{\text{Βιομάζα} \times 14.004} \times 100 \quad (1)$$

όπου, 14.004% είναι το ποσοστό των ημικυτταρινών επί της ξηρής βιομάζας του φυτού. Το στερεό υπόλειμμα (FSFH) χρησιμοποιείται έπειτα από ξήρανση στα επόμενα στάδια.

### Ενζυμική υδρόλυση κυτταρίνης: Διερευνητικά πειράματα και Πειραματικός σχεδιασμός

Πραγματοποιήθηκαν διερευνητικά πειράματα όπως απεικονίζονται στον Πίνακα 1, ώστε να τοποθετηθούν τα όρια των τιμών, μέσα στα οποία θα μελετηθούν οι λειτουργικές παράμετροι κατά τον πειραματικό σχεδιασμό. Όλα τα πειράματα της ενζυμικής υδρόλυσης της κυτταρίνης διεξάγονται σε επωαστήρα κυκλικής ανάδευσης στους 50°C και στροφές 150 rpm, σε κωνικές φιάλες των 25 mL με pH=4.8 (ρυθμιστικό διάλυμα κίτρικού οξέος 0.1 M) και προσθήκη αντιμικροβιακού συστατικού (αζίδιο του νατρίου (NaN<sub>3</sub>) 0.2 g/l). Με βάση τα αποτελέσματα των διερευνητικών πειραμάτων καταστρώθηκε ο πειραματικός σχεδιασμός, για τον οποίο επιλέχθηκαν ως βασικές λειτουργικές παράμετροι (i) η συγκέντρωση του υποστρώματος, (ii) η συγκέντρωση των κυτταρινών και (iii) ο ρυθμός ανάδευσης. Τα διαφορετικά επίπεδα περιλαμβάνονται στον Πίνακα 2. Η αναλογία β-γλυκοσιδάσης:κυτταρινών διατηρείται σταθερή ίση με 2:1 και ο χρόνος υδρόλυσης 72 h. Η απόδοση του σταδίου ορίζεται από την εξίσωση (2), όπου 36.01% είναι το ποσοστό της κυτταρίνης επί της ξηρής βιομάζας του φυτού:

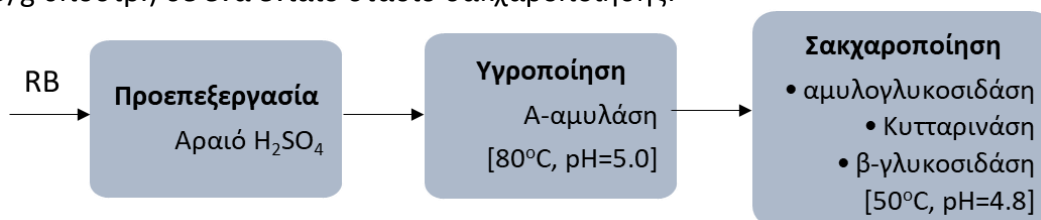
$$\text{Απόδοση \%} = \frac{\text{Γλυκόζη (mg/ml)} \times 0.9}{\text{Βιομάζα} \times 36.01} \times 100 \quad (2)$$

**Πίνακας 1.** Συνθήκες διερευνητικών πειραμάτων ενζυμικής υδρόλυσης.

Πειράματα	Συγκέντρωση υποστρώματος (% w/v)	Συγκέντρωση κυτταρινάσων (FPU/g υποστρ.)	Συγκέντρωση β – γλυκοσιδάσης (CBU/g υποστρ.)	Χρόνος υδρόλυσης (h)
Χρονικής εξέλιξης της ενζυμικής υδρόλυσης βιομάζας (FSFH)	3	50	100	96
Χρονικής εξέλιξης της ενζυμικής υδρόλυσης βιομάζας (FH)	3	50	100	96
Χρονικής εξέλιξης της ενζυμικής υδρόλυσης καθαρής κυτταρίνης	1	50, 100, 300	100, 200, 600	96
Διαφορετικές ποσότητες υποστρώματος	3, 6, 9, 12, 15	50	100	48
Διαφορετικές ποσότητες ενζύμων	3	50, 75, 100, 125, 150	100, 150, 200, 250, 300	72

### Ταυτόχρονη σακχαροποίηση

Η προεπεξεργασία της ακατέργαστης βιομάζας προηγείται, ενώ στη συνέχεια η FH βιομάζα (6% w/v) οδηγείται σε υγροποίηση με 60 U/g υποστρ. α-αμυλάσης σε ρυθμιστικό διάλυμα οξικού οξέος 0.1 M (pH=5.0). Μετά από ρύθμιση του pH=4.8, εισάγονται τα υπόλοιπα ένζυμα αμυλογλυκοσιδάση (120 U/g υποστρ.), κυτταρινάση (180 FPU/g υποστρ.) και β-γλυκοσιδάση (360 CBU/g υποστρ.) σε ένα ενιαίο στάδιο σακχαροποίησης.

**Σχήμα 2.** Διάγραμμα ροής διεργασίας ταυτόχρονης σακχαροποίησης αμύλου κυτταρίνης σε ένα στάδιο.

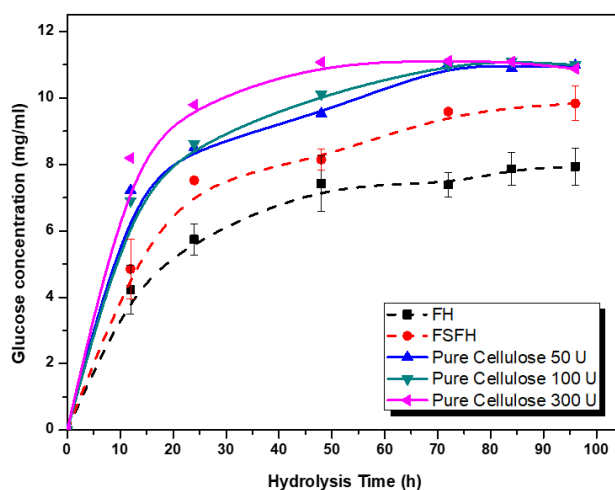
### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

#### Προεπεξεργασία με αραιό θειικό οξύ

Η προεπεξεργασία της FS βιομάζας παρουσιάζει αποτελεσματικότερη μετατροπή ημικυτταρινών (86.08%) σε σχέση με τη μετατροπή των ημικυτταρινών της RB (79%). Επιπλέον, η εφαρμογή του σταδίου προεπεξεργασίας απευθείας σε RB παράγει διάλυμα με σημαντική ποσότητα γλυκόζης, η οποία αποδίδεται στο άμυλο καθώς δεν έχει προηγηθεί το στάδιο της ενζυμικής υδρόλυσής του. Συγκεκριμένα, παρατηρείται απώλεια αμύλου σε ποσοστό 41.71%. Οι παραπάνω λόγοι καταδεικνύουν ότι η προεπεξεργασία είναι επιθυμητό να έπεται της υδρόλυσης του αμύλου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1, με στόχο τη μέγιστη ανάκτηση των διαθέσιμων πολυσακχαριτών.

#### Ενζυμική υδρόλυση κυτταρίνης: Διερευνητικά πειράματα και Πειραματικός σχεδιασμός

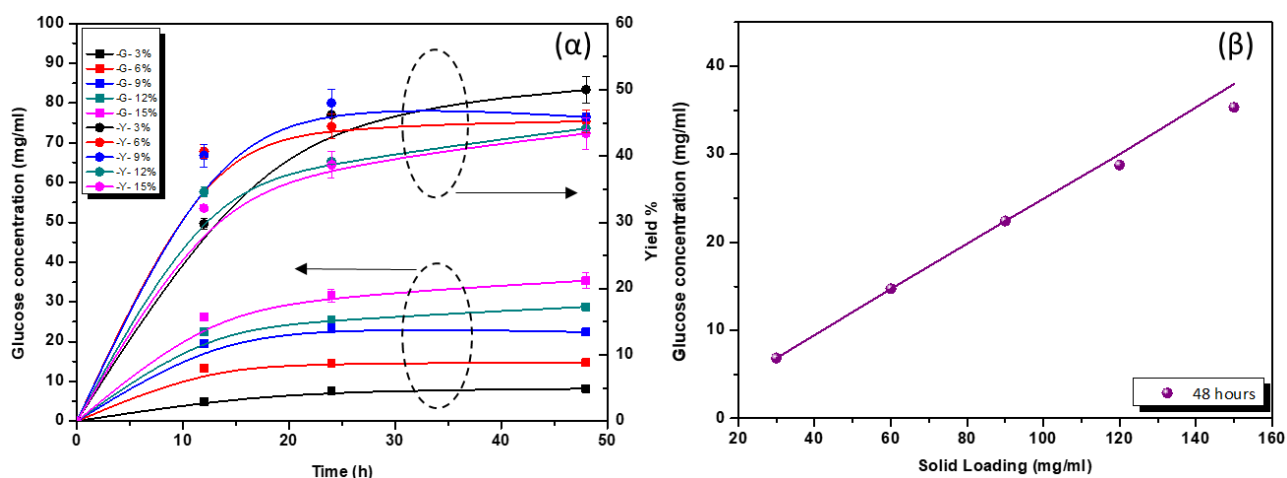
Η μέγιστη συγκέντρωση γλυκόζης στο ενζυμικό υδρόλυμα καταμετράται στις 72 h (Σχήμα 3). Είναι εμφανές ότι το στάδιο της ενζυμικής υδρόλυσης του κυτταρινικού κλάσματος διαρκεί σημαντικά καθώς η κυτταρίνη αποτελεί δομικό συστατικό του φυτού με δύσκολη πρόσβαση από το ένζυμο. Η σύγκριση της υδρόλυσης FSFH και FH βιομάζας δεν παρουσιάζει σημαντική διαφορά στην απόδοση του σταδίου: 9.85 mg/ml (60.41% απόδοση) και 7.95 mg/ml (53.96% απόδοση), αντίστοιχα. Η ύπαρξη σημαντικής ποσότητας αμύλου στην FH βιομάζα δρα παρεμποδιστικά για τις κυτταρινάσες, μειώνοντας την απόδοση του σταδίου. Επιλέγεται το στάδιο της υδρόλυσης του αμύλου να προηγείται αυτού της κυτταρίνης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1<sup>[4]</sup>.



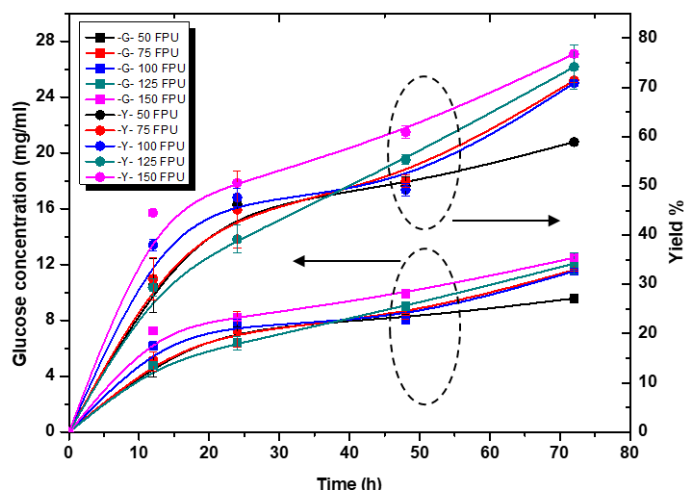
**Σχήμα 3.** Κινητική υδρόλυσης κυτταρίνης προς γλυκόζη για υποστρώματα 3% w/v FH, 3% w/v FSFH με 50 FPU/g υποστρ. και 1% w/v κυτταρίνης με 50, 100, 300 FPU/g υποστρ.

Στη συνέχεια, κατά τα διερευνητικά πειράματα μελέτης της επίδρασης της συγκέντρωσης του υποστρώματος παρατηρείται μικρή μείωση της απόδοσης της υδρόλυσης στις 48 h με αύξηση της βιομάζας πάνω από 3% w/v (3% w/v: 49.98%, 6% w/v: 45.23%, 9% w/v: 45.87%, 12% w/v: 44.15%, 15% w/v: 43.41) (Σχήμα 4α). Η σημαντική διαφοροποίηση παρατηρείται στο ρυθμό παραγωγής της γλυκόζης. Η πτώση του ρυθμού οφείλεται είτε στην παρεμποδιστική δράση της λιγνίνης και της παραγόμενης γλυκόζης, είτε σε προβλήματα μεταφοράς μάζας [5]. Ενδεικτική είναι η συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης της παραγόμενης γλυκόζης και της αρχικής συγκέντρωσης της βιομάζας (Σχήμα 4β) όπου παρατηρείται απόκλιση από τη γραμμικότητα για αρχική συγκέντρωση υποστρώματος πάνω από 9% w/v, που υποδηλώνει την εμφάνιση φαινομένων περιορισμού μεταφοράς μάζας. Παρόλα αυτά, η ποσότητα της γλυκόζης που παράγεται αυξάνεται καθώς το ένζυμο έχει πρόσβαση σε περισσότερες ενεργές θέσεις. Έτσι υποδεικνύεται ως μέγιστη συγκέντρωση υποστρώματος για τον Πειραματικό Σχεδιασμό η τιμή 18% w/v.

Κατά τα διερευνητικά πειράματα μελέτης της διαφορετικής ποσότητας ενζύμου-υποστρώματος (Σχήμα 5), η αύξηση του ενζύμου αυξάνει τη συγκέντρωση της γλυκόζης. Για δόση ενζύμου 50 και 150 FPU/g υποστρώματος παράγονται 9.59 και 12.5 g/l γλυκόζης, αντίστοιχα. Επιπλέον, η αύξηση του ενζύμου πάνω από 50 FPU/g υποστρώματος αυξάνει σημαντικά την τελική απόδοση της υδρόλυσης στις 72 h. Δεδομένης της σημαντικής αύξησης της απόδοσης, για τον Πειραματικό Σχεδιασμό επιλέχθηκαν δοσολογίες ενζύμων >50 FPU/g υποστρώματος (Πίνακας 2).



**Σχήμα 4.** (α). Μελέτη επίδρασης διαφορετικής συγκέντρωσης υποστρώματος στην συγκέντρωση γλυκόζης και την απόδοση (yield %) κατά την υδρόλυση 3-6-9-12-15% w/v FSFH βιομάζας (50 FPU/g υποστρ.) (β). Συσχέτιση διαφορετικής συγκέντρωσης υποστρώματος και συγκέντρωσης παραγόμενης γλυκόζης σε 48 h.



**Σχήμα 5.** Μελέτη επίδρασης διαφορετικής διαφορετικής δραστηριότητας ενζύμου (50-75-100-125-150 FPU/g υποστρ.) στην παραγωγή γλυκόζης και την απόδοση (yield %) κατά την υδρόλυση 3% w/v FSFH βιομάζας.

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). Οι συνθήκες και τα αποτελέσματα της σειράς πειραμάτων του πειραματικού σχεδιασμού παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της υδρόλυσης προσεγγίζεται με διαφορετικά κριτήρια και στον Πίνακα 3 απεικονίζονται οι αντίστοιχες βέλτιστες συνθήκες. Συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση με κριτήρια τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της ενζυμικής υδρόλυσης σε συνδυασμό με παραγωγή διαλύματος υψηλής συγκέντρωσης γλυκόζης ( $\geq 50$  mg/ml) που δεν απαιτεί συμπύκνωση σε μεγάλο βαθμό, κρίνεται σημαντική για την προετοιμασία του ρεύματος τροφοδοσίας του σταδίου της ζύμωσης με υψηλή συγκέντρωση σακχάρων (π.χ. 100 mg/ml)<sup>[6]</sup>.

**Πίνακας 2.** Αποτελέσματα πειραματικού σχεδιασμού

Run	Συγκέντρωση υποστρώματος (% w/v)	Συγκέντρωση κυτταρίνας (FPU/g <sub>sub</sub> )	Ρυθμός ανάδευσης (rpm)	Συγκέντρωση γλυκόζης (mg/ml)	Απόδοση (%)
1	12	180	200	55.26	84.85
2	12	60	100	45.37	69.66
3	18	120	200	64.90	66.43
4	18	180	150	45.33	46.40
5	12	180	100	52.67	80.87
6	12	120	150	38.68	59.39
7	6	180	150	21.81	66.97
8	6	120	200	27.19	83.49
9	6	60	150	21.98	67.50
10	12	60	200	41.86	64.28
11	12	120	150	41.64	63.93
12	12	120	150	33.53	51.48
13	18	60	150	43.99	45.03
14	18	120	100	65.44	66.99
15	6	120	100	27.94	85.76

### Ταυτόχρονη σακχαροποίηση

Η ταυτόχρονη σακχαροποίηση του αμύλου και της κυτταρίνης σε ένα ενιαίο στάδιο επιτυγχάνεται με απόδοση 34.82% (24 h) και 41.50% (72 h), ως προς τα ολικά αρχικά σάκχαρα που περιέχονται στη βιομάζα. Αντίστοιχα πειράματα, υπό τις ίδιες συνθήκες, όπου έγιναν ξεχωριστά τα δύο στάδια υδρόλυσης, οδηγούν σε αξιοποίηση συνολικά του 67.54% των διαθέσιμων

πολυσακχαριτών. Η μειωμένη απόδοση οφείλεται στην απώλεια κλάσματος αμύλου κατά την προεπεξεργασία της βιομάζας (41.7% του αμύλου υδρολύεται στην αραιή όξινη υδρόλυση). Επιπλέον, η παρουσία αμύλου στο υπόστρωμα παρεμποδίζει την κυτταρινική υδρόλυση όπως γίνεται εμφανές στο Σχήμα 3. Η πραγματοποίηση ταυτόχρονης σακχαροποίησης του αμύλου και της κυτταρίνης σε ένα ενιαίο στάδιο δε βελτιώνει την τελική απόδοση της συνολικής διεργασίας, αλλά αποτελεί σίγουρα σημαντική πληροφορία για την πιθανή κλιμάκωση της διεργασίας σε βιομηχανικό επίπεδο, καθώς προτείνει τεχνολογία με μειωμένο εξοπλισμό και χρόνο διεργασίας.

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

Παράμετροι	Τιμές	Τιμή Πρόβλεψης Κριτηρίου	Κριτήριο
Συγκέντρωση Υποστρώματος	18% w/v	<b>64.75 mg/ml</b> (πρόβλεψη απόδοσης από το μοντέλο 71.33%)	Μέγιστη Γλυκόζη
Λόγος Δραστικότητας Ενζύμου-Υποστρώματος	180 FPU/ g υποστρώματος		
Ανάδευση	200 rpm		
Συγκέντρωση Υποστρώματος	6% w/v	<b>89.24%</b> (πρόβλεψη συγκέντρωσης από το μοντέλο, 33.7 mg/ml)	Μέγιστη Απόδοση
Λόγος Δραστικότητας Ενζύμου-Υποστρώματος	180 FPU/ g υποστρώματος		
Ανάδευση	200 rpm		
Συγκέντρωση Υποστρώματος	12.5% w/v	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>76.37%</b></li> <li>• <b>51.53 mg/ml</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μέγιστη Απόδοση</li> <li>• Συγκέντρωση ≥50 mg/ml</li> </ul>
Λόγος Δραστικότητας Ενζύμου-Υποστρώματος	180 FPU/ g υποστρώματος		
Ανάδευση	100 rpm		

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κυτταρινικό κλάσμα του φυτού υδρολύθηκε με τη χρήση κυτταρινασών και παρήχθη πλούσιο διάλυμα γλυκόζης με υψηλό ρυθμό υδρόλυσης. Κατόπιν στατιστικής επεξεργασίας, μελετήθηκε η επίδραση των λειτουργικών παραμέτρων της ενζυμικής υδρόλυσης και ακολούθησε βελτιστοποίηση με κριτήρια τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και παραγωγή διαλύματος γλυκόζης με συγκέντρωση ικανοποιητική για περαιτέρω εκμετάλλευση. Αποδείχθηκε ότι σημαντικά υψηλές συγκεντρώσεις γλυκόζης καθώς και αποδόσεις υδρόλυσης 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] M. Yang, W. Li, B. Liu, Q. Li, J. Xing. *Bioresour. Technol.*, 101(13) (2010) 4884 – 4888.
- [2] M.J. Cardona, E.J. Tozzi, N. Karuna, T. Jeoh, R.L. Powell, M.J. McCarthy. *Bioresour. Technol.* 198 (2015) 488 – 496.
- [3] M.P. Ciria, M.L. Solano, P. Soriano. *Biosyst. Eng.* 92(4) (2005) 535 – 544.
- [4] C. Martin, M. Wei, S. Xiong, L.J. Jonsson. *Industrial Crops and Products* 97 (2017) 21-31
- [5] H. Jørgensen, J. Vibe – Pedersen, J. Larsen, C. Felby. *Biotechnol. Bioeng.* 96(5) (2007) 862 - 870.
- [6] A. Karapatsia, G. Penloglou, C. Chatzidoukas, C. Kiparissides. *Biomass Bioenerg* 90 (2016) 32-41