

## ΟΡΓΑΝΟΛΥΤΙΚΗ (ORGANOSOLV) ΚΛΑΣΜΑΤΩΣΗ ΛΙΓΝΟΚΥΤΤΑΡΙΝΟΥΧΟΥ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΩΝ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ

**Κ. Καλογιάννης<sup>1\*</sup>, Α. Καρναούρη<sup>2</sup>, Ε. Τόπακας<sup>2</sup>, Χ. Μιχαήλωφ<sup>1</sup>, Α. Λάππας<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ, 57001, 6ο χλμ οδού Χαριλάου-Θέρμης, Θεσσαλονίκη

<sup>2</sup> Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα  
(\*kkalogia@cperi.certh.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη μίας νέας μεθόδου οργανολυτικής απολιγνίνωσης (organosolv) βιομάζας που στηρίζεται στην ήπια οξειδωση και αποπολυμερισμό της γηγενούς λιγνίνης σε μίγμα νερού – οργανικού διαλύτη. Στόχος ήταν η κλασμάτωση της βιομάζας στα τρία βασικά της συστατικά με την ταυτόχρονη διαλυτοποίηση και απομάκρυνση της λιγνίνης, την υδρόλυση της ημικυτταρίνης προς μόνο- και ολιγό- σάκχαρα και την ανάκτηση της κυτταρίνης ως στερεό προϊόν (πούλπα). Επιπρόσθετα, δευτερεύοντες στόχοι ήταν η μείωση του χρόνου κατεργασίας και της απαιτούμενης πίεσης ώστε να αποφευχθεί η υποβάθμιση των σακχάρων της βιομάζας και να απλοποιηθεί η διεργασία.

Οι βασικότεροι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν:

1. Πίεση (20-35 bar)
2. Θερμοκρασία (150-175 °C)
3. Χρόνος (30-120 min)
4. Είδος οργανικού διαλύτη (Τετραύδρο-φουράνιο, Ακετόνη, Αιθανόλη)

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως είναι δυνατή η μείωση της απαιτούμενης πίεσης αλλά και του χρόνου κατεργασίας, διατηρώντας σε υψηλά επίπεδα την απομάκρυνση της λιγνίνης αλλά και την ανάκτηση των επιθυμητών σακχάρων. Οι παράμετροι της διεργασίας έχουν συνεργιστικό χαρακτήρα. Αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αυξημένη απομάκρυνση της λιγνίνης σε συντομότερο χρονικό διάστημα ενώ αύξηση της πίεσης του οξειδωτικού μέσου (100% O<sub>2</sub>) επιτρέπει τη μείωση της απαιτούμενης θερμοκρασίας. Σημαντική επίδραση στη διεργασία είχε και η επιλογή του οργανικού διαλύτη. Η απολιγνίνωση με τέτραυδρο-φουράνιο ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματική σε χαμηλές θερμοκρασίες (150 °C) επιτυγχάνοντας 70+% βαθμό απολιγνίνωσης (BA) ενώ ακετόνη και αιθανόλη απαιτούσαν μεγαλύτερες θερμοκρασίες για να απομακρύνουν αποτελεσματικά τη λιγνίνη επιτυγχάνοντας BA άνω του 95% στη θερμοκρασία των 175 °C. Οι διαφορετικές πούλπες που ανακτήθηκαν βρέθηκαν πως ήταν ιδιαίτερα πλούσιες σε κυτταρίνη με ποσοστό κυτταρίνης >80% ενώ επετεύχθη υψηλή ανάκτηση της κυτταρίνης στο στερεό προϊόν σε όλες τις περιπτώσεις (~100%) λόγω της χρήσης οξειδωτικής ατμόσφαιρας στη θέση των ανόργανων ισχυρών οξέων που τυπικά χρησιμοποιούνται στις organosolv προκατεργασίες. Έγινε μελέτη ενζυμικής υδρόλυσης των προκατεργασμένων βιομαζών που έδειξε πως υπήρξε σημαντική αύξηση της υδρολυσιμότητας τους σε σχέση με το ακατέργαστο υλικό. Στη συνέχεια μελετήθηκε η μετατροπή τους προς γαλακτικό οξύ και ωμέγα-3 λιπαρά οξέα μέσω διεργασιών μικροβιακών ζυμώσεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι προκατεργασμένες με τετραυδρο-φουράνιο βιομάζες έδωσαν συγκριτικά καλύτερα αποτελέσματα ως προς την απόδοση των παραγόμενων προϊόντων, υποδεικνύοντας πως η λιγνοκυτταρινούχος βιομάζα μπορεί να αξιοποιηθεί ως φθηνή πρώτη ύλη για την παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνολογία του βιοδιυλιστηρίου που αποσκοπεί στην παραγωγή ανανεώσιμων καυσίμων και χημικών προϊόντων από απορρίμματα λιγνοκυτταρινούχου μη βρώσιμης βιομάζας, όπως τα παραπροϊόντα της δασικής και αγροτικής βιομηχανίας, έχει συγκεντρώσει σημαντικό επιστημονικό

ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Η πολυπλοκότητα της λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας επιβάλλει ένα στάδιο προκατεργασίας της που αποσκοπεί στην απομάκρυνση της λιγνίνης που δρα προστατευτικά ως προς παθογόνους οργανισμούς [1]. Η αφαίρεση της λιγνίνης έχει ως αποτέλεσμα τα υδρολυτικά ένζυμα να αποκτούν πρόσβαση στους υδατάνθρακες της βιομάζας ώστε να μπορέσουν αν τους αποπολυμερίσουν προς σάκχαρα [2]. Μία επιτυχημένη προκατεργασία πρέπει να κλασματοώνει αποδοτικά τη βιομάζα στα τρία κύρια συστατικά της μέρη, κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, λιγνίνη με την ελάχιστη δυνατή υποβάθμιση τους, με την ελαχιστοποίηση των παραπροϊόντων καθώς και ικανοποιώντας τους σύγχρονους όρους οικονομικής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Επιπρόσθετα, η ιδανική διεργασία προκατεργασίας πρέπει να είναι ευέλικτη και αγνωστική, να μπορεί δηλαδή να κλασματοώσει διαφορετικά είδη βιομάζας εξίσου αποδοτικά, παράγοντας ενδιάμεσα προϊόντα και υλικά με καλά ελεγχόμενες ιδιότητες.

Διαφορετικού τύπου προκατεργασίες έχουν μελετηθεί στη βιβλιογραφία, από μηχανικές μεθόδους όπως άλεση, χημική προκατεργασία με διαλύματα οξέων [3] και συνδυασμός αυτών [4]. Μία από τις πλέον ενδιαφέρουσες χημικές προκατεργασίες είναι η *organosolv* που χρησιμοποιεί μίγμα νερού και ενός οργανικού διαλύτη και με τη χρήση ισχυρού οξέος ή βάσεως σε μέτριες θερμοκρασίες (100-220 °C) διαλυτοποιεί τη λιγνίνη αφήνοντας πίσω ένα στερεό προϊόν πλούσιο σε κυτταρίνη (πούλπα) [5]. Το βασικό της πλεονέκτημα είναι η ανάκτηση καλής ποιότητας λιγνίνης, απαλλαγμένης από Θείο και η αποφυγή επανασυμπύκνωσης της λιγνίνης στην εξωτερική επιφάνεια της παραγόμενης πούλπας [6]. Η χρήση οξέων από την άλλη δημιουργεί μεγάλους όγκους υδατικών αποβλήτων που χρήζουν επεξεργασίας, ενώ έχει βρεθεί πως η *organosolv* προκατεργασία δε μπορεί να κλασματοώσει εξίσου αποδοτικά όλους τους τύπους βιομάζας, ειδικά στην περίπτωση των *softwoods* έχει αποδειχθεί πως δεν επιτυγχάνει ικανοποιητικούς βαθμούς απολιγνίνωσης (BA). Για αυτούς τους λόγους ενδιαφέρον έχει μία παραλλαγή της *organosolv* προκατεργασίας που χρησιμοποιεί αέριο οξυγόνο στη θέση των ανόργανων οξέων. Οι Gong et al. κατάφεραν να απολιγνινώσουν επιτυχώς ξύλο σφένδαμου και *Paulownia spp.* επιτυγχάνοντας BA μεγαλύτερους του 93% [7]. Η ομάδα του ΙΔΕΠ-ΕΜΠ κατάφερε να απολιγνινώσει τόσο ξύλο οξιάς (*hardwood*) όσο και υπολείμματα καλαμποκιού (αγροτικά παραπροϊόντα) και να μετατρέψει την ανακτημένη κυτταρίνη σε αιθανόλη σε υψηλά ποσοστά συγκέντρωσης διαλύματος (~8%) [8, 9].

Τα είδη των προϊόντων που μπορούν να παραχθούν από την ανακτημένη κυτταρίνη και ημικυτταρίνη περιλαμβάνουν από καύσιμα μεταφορών και χημικά προϊόντα ως βιολειτουργικές ενώσεις με εφαρμογές στους τομείς της διατροφής και των φαρμακευτικών προϊόντων. Κάποιες από τις πλέον ενδιαφέρουσες βιο- λειτουργικές ενώσεις είναι το γαλακτικό οξύ, τα πρεβιοτικά και τα ωμέγα-3 λιπαρά οξέα που μπορούν να παραχθούν από ένζυμα ημικυτταρινασών, γαλακτοβακτήρια και ετερότροφη μικροάλγη αντίστοιχα. Σκοπός σε όλες τις περιπτώσεις είναι η αντικατάσταση των σακχάρων βρώσιμης προέλευσης από σάκχαρα που προέρχονται από λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα.

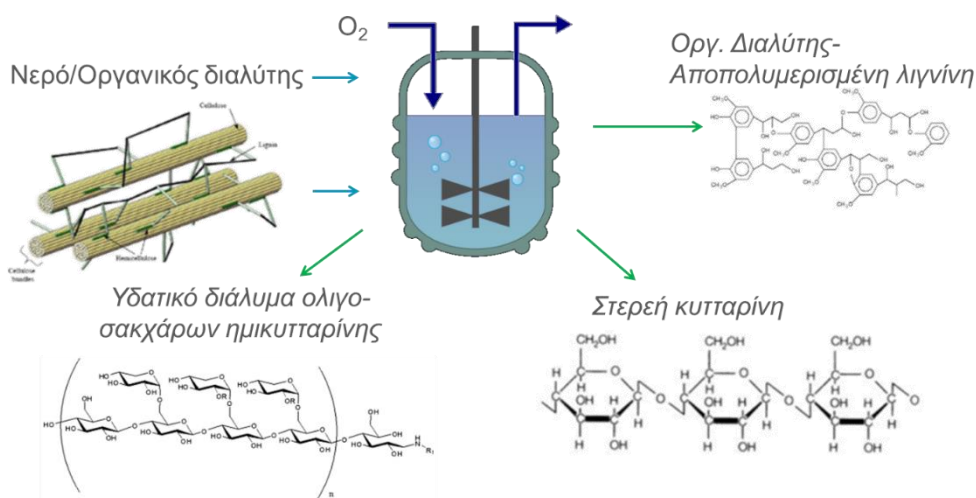
Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η διεργασία της οξειδωτικής οργανολυτικής προκατεργασίας και η επίδραση των παραμέτρων της. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν διαφορετικοί διαλύτες, χρόνοι, θερμοκρασίες και πιέσεις προκατεργασίας. Τα στερεά προϊόντα (πούλπες) που ανακτήθηκαν χαρακτηρίστηκαν για να εκτιμηθεί η σύστασή τους, ο BA, η ανάκτηση κυτταρίνης και ημικυτταρίνης στο στερεό προϊόν. Επιπλέον, έλαβε χώρα η ενζυμική υδρόλυση τους για να εξεταστεί η ευκολία μετατροπής τους σε διαλύματα σακχάρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τροφοδοσίες για τη βιομετατροπή τους προς βιολειτουργικές ενώσεις.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η μέθοδος της οξειδωτικής οργανόλυσης έλαβε χώρα σε αντιδραστήρα Hastelloy C-276 Parr, όγκου 975 ml. Η αναλογία στερεής βιομάζας/διαλύτη που χρησιμοποιήθηκε ήταν 1/10. Ο αντιδραστήρας συμπίεστηκε με αέριο O<sub>2</sub> υψηλής καθαρότητας (100%), σε πιέσεις από 8 ως 16 bar σε θερμοκρασία

περιβάλλοντος και έπειτα θερμάνθηκε σε θερμοκρασίες αντίδρασης 150 ως 175 °C. Ο χρόνος που χρειαζόταν το σύστημα για να φτάσει τη θερμοκρασία αντίδρασης κατά το στάδιο της θέρμανσης και να ψυχθεί στη θερμοκρασία περιβάλλοντος μετά το πέρας του πειράματος ήταν 15 και 15 λεπτά αντίστοιχα. Διάρκειες πειράματος που εξετάστηκαν ήταν τα 30, 60 και 120 λεπτά.

Μετά την αποσυμπίεση του αντιδραστήρα η στερεή βιομάζα απομονώθηκε από το διάλυμα, με φιλτράρισμα υπό κενό, ξεπλύθηκε με 500 και 250 ml οργανικού διαλύτη και απεσταγμένου νερού αντίστοιχα. Έπειτα αφέθηκε να ξηραθεί στον αέρα μέχρι το βάρος του δείγματος να διατηρείται σταθερό (τυπική υγρασία ~ 4%). Ο προσδιορισμός της κυτταρίνης, ημικυτταρίνης και λιγνίνης στην τελική πούλπα έγινε με τη μέθοδο NREL [10] (Sluiter, A.; Hames, B.; Ruiz, R.; Scarlata, C.; Sluiter, J.; Templeton, D.; Crocker, D. Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP) (Revised July 2011); 2008). Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η διεργασία προκατεργασίας ήπιας οξειδωτικής οργανόλυσης.



**Σχήμα 1.** Απεικόνιση προκατεργασίας ήπιας οξειδωτικής οργανόλυσης λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας

Για τον έλεγχο της υδρολυσιμότητας προς την παραγωγή ζυμώσιμων σακχάρων και την αξιοποίηση της στερεής πούλπας, ακολούθησε ενζυμική υδρόλυση με τη βοήθεια του εμπορικού παρασκευάσματος Cellic<sup>®</sup> CTec2 (Novozymes) σε ρυθμιστικό διάλυμα 0.1 M κιτρικού-φωσφορικού (pH 5.0) και 72 ώρες επώασης στους 50°C. Τα πειράματα έγιναν με συγκέντρωση βιομάζας ίση με 9% β/ο, ενώ το ενζυμικό φορτίο ήταν 9 mg/g βιομάζας. Η απόδοση της διεργασίας αξιολογήθηκε με βάση τόσο την παραγωγή γλυκόζης, όσο και ολικών ανηγμένων σακχάρων, ακολουθώντας τις μεθόδους οξειδάσης της γλυκόζης (GOD-POD) [11] και δινιτροσαλικυλικού οξέος [12] αντίστοιχα.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προκατεργασίας ήπιας οξειδωτικής οργανόλυσης. Βρέθηκε πως οι παράμετροι της διεργασίας είναι αλληλένδετες και έχουν συνεργιστικό χαρακτήρα. Σε γενικές γραμμές, αύξηση της πίεσης, θερμοκρασίας και χρόνου κατεργασίας οδήγησε σε μεγαλύτερους ΒΑ, μικρότερη ανάκτηση ημικυτταρίνης στη στερεή πούλπα ενώ η ανάκτηση της κυτταρίνης ήταν πάντα σχεδόν 100%.

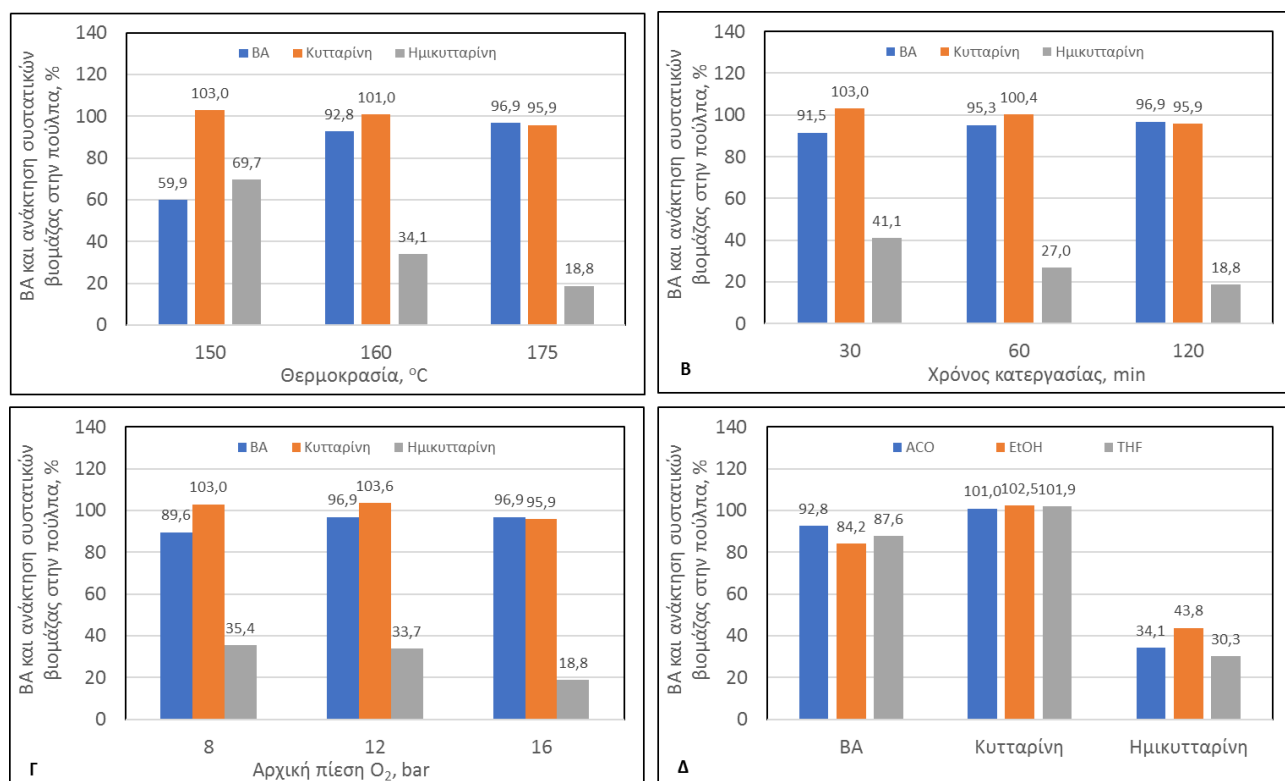
**Πίνακας 1.** Συνθήκες οξειδωτικής οργανόλυσης προιονιδίου οξιάς, σύσταση στερεάς πούλπας, ΒΑ και ανάκτηση κυτταρίνης και ημικυτταρίνης στη στερεά πούλπα.

Συνθήκες	Σύσταση πούλπας, % κ.β.			ΒΑ, ανάκτηση συστατικών, % κ.β. επί αρχικού συστατικού				
	Πίεση O <sub>2</sub> , bar	Θερμ., °C	Λιγνίνη	Κυτταρίνη	Ημικυτταρίνη	ΒΑ	Κυτταρίνη	Ημικυτταρίνη
				Θερμοκρασία				
1	16	150	13,5	62,7	21,0	<b>59,9</b>	103,0	69,7
2	16	160	3,2	76,6	13,3	<b>92,8</b>	101,0	34,1

3	16	175	1,6	86,1	8,7	<b>96,9</b>	95,9	18,8
Χρόνος								
4*	16	175	3,6	79,7	15,7	<b>91,5</b>	103,0	41,1
5*	16	175	2,3	86,0	11,9	<b>95,3</b>	100,4	27,0
Πίεση								
6	8	175	4,6	82,3	13,9	<b>89,6</b>	103,0	35,4
7	12	175	1,5	84,6	14,2	<b>96,9</b>	103,6	33,7
Διαλύτης								
8**	16	160	6,4	73,0	16,0	<b>84,2</b>	102,5	43,8
9**	16	160	5,5	79,1	12,1	<b>87,6</b>	101,9	30,3

\*Σε όλα τα πειράματα χρόνος αντίδρασης ήταν 120 min εκτός των 3, 4 που ήταν 30 και 60 min αντίστοιχα.

\*\*Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε μίγμα Νερού/Ακετόνης (50/50, β/β) εκτός των 8 και 9 όπου χρησιμοποιήθηκε Αιθανόλη και Τετραυδροφουράνιο αντίστοιχα.



**Σχήμα 2.** Α) Επίδραση θερμοκρασίας, διαλύτης: ακετόνη, χρόνος κατεργασίας: 120 min, αρχ. Πίεση O<sub>2</sub>: 16 bar, Β) Επίδραση χρόνου κατεργασίας, διαλύτης: ακετόνη, Θερμοκρασία: 175 °C, αρχ. Πίεση O<sub>2</sub>: 16 bar, Γ) Επίδραση πίεσης O<sub>2</sub>, διαλύτης: ακετόνη, χρόνος κατεργασίας: 120 min, θερμοκρασία: 175 °C, Δ) Επίδραση διαλύτη, θερμοκρασία: 160 °C, χρόνος κατεργασίας: 120 min, αρχ. Πίεση O<sub>2</sub>: 16 bar.

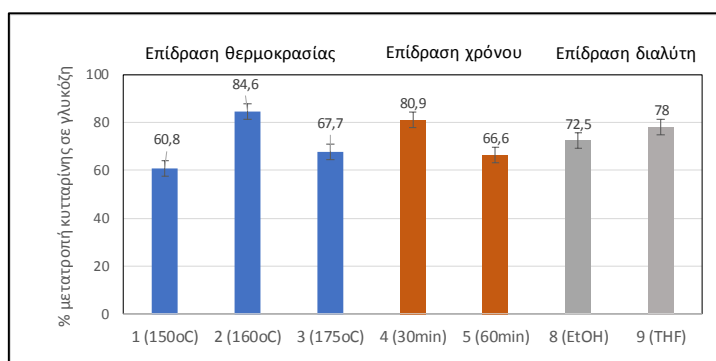
Στο σχήμα 2 απεικονίζονται οι επιδράσεις των παραμέτρων της διεργασίας στον BA και στην ανάκτηση κυτταρίνης και ημικυτταρίνης στη στερεή πούλπα. Θερμοκρασία άνω των 160 °C ήταν αρκετή για να επιτευχθεί BA άνω του 90%, ενώ στην περίπτωση των 175 °C επετεύχθη BA σχεδόν 97% που θεωρείται υψηλότερος για διεργασία ενός σταδίου. Ο χρόνος προκατεργασίας ήταν επίσης σημαντική παράμετρος αν και στην υψηλή θερμοκρασία των 175 °C ακόμη και στο μικρότερο χρόνο προκατεργασίας των 30 min επιτυγχάνεται BA άνω του 90%. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται και την αρχική πίεση O<sub>2</sub>. Το γεγονός πως επιτυγχάνεται υψηλός BA και στις χαμηλότερες πιέσεις απλοποιεί τη διεργασία κάνοντας πιο εύκολη την ανάπτυξη της σε εμπορικό επίπεδο. Τέλος, όσον αφορά στην επίδραση διαλύτη, αποδεικνύεται καταρχάς η ευελιξία της προκατεργασίας, καθώς όλοι οι διαλύτες ήταν κατάλληλοι για την προκατεργασία της βιομάζας. Στη χαμηλότερη θερμοκρασία των 160 °C όλοι οι διαλύτες πέτυχαν BA άνω του 84% με

την ακετόνη να αποδεικνύεται η καταλληλότερη με ΒΑ σχεδόν 93%. Η παρουσία οξυγόνου οδηγεί στην οξείδωση και σχάση των αιθερικών δεσμών της λιγνίνης. Η αποπολυμερισμένη αυτή λιγνίνη διαλυτοποιείται από τον οργανικό διαλύτη και απομακρύνεται από τη βιομάζα αφήνοντας πίσω την πλούσια σε κυτταρίνη πούλπα. Στο πίνακα 2 παρουσιάζεται η υδρολυσιμότητα των κυτταρινικών υποστρωμάτων που παρήχθησαν ως προς την ποσότητα γλυκόζης και ολικών σακχάρων που απελευθερώθηκαν ανά γραμμάριο βιομάζας, ενώ στο σχήμα 3 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας, του χρόνου κατεργασίας και του διαλύτη στη μετατροπή της κυτταρίνης προς γλυκόζη.

**Πίνακας 2.** Αποτελέσματα ενζυμικής υδρόλυσης κυτταρινούχων υποστρωμάτων στις 72 ώρες, με ενζυμικό φορτίο ίσο με 9mg/g υποστρώματος και αρχική συγκέντρωση βιομάζας 9 % β/ο.

	Γλυκόζη (mg/g βιομάζας)	Ολικά σάκχαρα (mg/g βιομάζας)
1	424 ± 40	634 ± 63
2	685 ± 17	849 ± 16
3	647 ± 26	685 ± 31
4	717 ± 54	940 ± 32
5	636 ± 37	862 ± 45
6	712 ± 28	847 ± 5
8	693 ± 42	806 ± 44
9	686 ± 58	873 ± 66

Σε όλες τις περιπτώσεις τα ποσοστά μετατροπής της κυτταρίνης σε γλυκόζη ήταν υψηλά, ενώ παράλληλα σημειώθηκε σημαντική παραγωγή ολικών σακχάρων, που έφτασε μέχρι και 940 mg/g αρχικής βιομάζας. Η κατεργασία στους 160°C φαίνεται να δίνει βιομάζα που υδρολύεται αποδοτικότερα, ενώ τα αποτελέσματα της μελέτης της επίδρασης του χρόνου της προκατεργασίας δείχνουν πως η αύξηση του χρόνου πέραν των 30 λεπτών δεν οδηγεί σε βελτιστοποίηση της διεργασίας. Συγκρίνοντας διαφορετικά συστήματα διαλυτών για την προκατεργασία στους 160°C για 120 λεπτά, φαίνεται πως η ακετόνη οδηγεί σε στερεή πούλπα που υδρολύεται με υψηλότερα ποσοστά μετατροπής κυτταρίνης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Αξίζει όμως να σημειωθεί πως η ποσότητα γλυκόζης και ολικών σακχάρων που απελευθερώνονται ανά γραμμάριο βιομάζας είναι συγκρίσιμη και για τα τρία συστήματα διαλυτών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.



**Σχήμα 3.** Επίδραση θερμοκρασίας, χρόνου κατεργασίας και διαλύτη στη σακχαροποίηση.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία ήπιας οργανολυτικής οξείδωσης που αναπτύχθηκε στο ΙΔΕΠ αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική και ευέλικτη. Επιτεύχθηκε απομάκρυνση λιγνίνης μέχρι 97% σε ένα στάδιο διατηρώντας ανέπαφο το 100% της κυτταρίνης και σημαντικό ποσοστό της ημικυτταρίνης. Υψηλή απομάκρυνση λιγνίνης (84%) μπορούσε να επιτευχθεί και στη χαμηλότερη θερμοκρασία των 160

°C, ενώ απεδείχθη πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διαφορετικοί οργανικοί διαλύτες εξίσου αποδοτικά, γεγονός που καθιστά τη διεργασία ιδιαίτερα ευέλικτη. Το συγκριτικό πλεονέκτημα της διεργασίας είναι η αντικατάσταση της ομογενούς κατάλυσης, τυπικά χρησιμοποιείται H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, με αέριο O<sub>2</sub>. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να διατηρείται ανέπαφη η κυτταρίνη και σε κάποιο βαθμό και η ημικυτταρίνη ενώ απλοποιείται σημαντικά η όλη κατεργασία της βιομάζας μιας και δε παράγονται όξινα απόβλητα που χρίζουν διαχείρισης. Η καταλληλότητα της προκατεργασίας επιβεβαιώθηκε μέσω ενζυμικής υδρόλυσης των κυτταρινούχων υποστρωμάτων. Βρέθηκε πως ακόμη και στις περιπτώσεις όπου έλαβε προκατεργασία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (150, 160 °C), η μετατροπή της ολικής κυτταρίνης προς σάκχαρα ήταν σε υψηλά ποσοστά παράγοντας ρεύματα σακχάρων υψηλής συγκέντρωσης. Τα παραπάνω καταδεικνύουν τις δυνατότητες της τεχνολογίας προκατεργασίας που αναπτύχθηκε στην αποδοτική και απλή κλασμάτωση λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας σε ένα στάδιο και τη συνακόλουθη αξιοποίηση των ρευμάτων σακχάρων με βιοχημικές διεργασίες προς υψηλής προστιθέμενης αξίας προϊόντα.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο χρηματοδοτείται από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) και από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ), με αρ. Σύμβασης Έργου 1085.



#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Yang B, Wyman CE. *Biofuels Bioprod Biorefining*. 2008;2:26–40.
- [2] Du J, Li Y, Zhang H, Zheng H, Huang H., *Cellulose*. 2014;21:2409–17.
- [3] Gong C, Goundalkar MJ, Bujanovic BM, Amidon TE., *J. Wood Chem Technol*. 2012;32:93–104.
- [4] Miura T, Lee S-H, Inoue S, Endo T., *Bioresour. Technol*. 2012;126:182–6.
- [5] Kalogiannis KG, Stefanidis S, Marianou A, Michailof C, Kalogianni A, Lappas A., *Waste Biomass Valorization*. 2015;6:781–90.
- [6] Katsimpouras C, Christakopoulos P, Topakas E., *Bioprocess Biosyst. Eng*. 2016;39:1415–23.
- [7] Gong C, Bujanovic BM., *Energies*., 2014;7:857–73.
- [8] Katsimpouras, C., Kalogiannis, K.G., Kalogianni, A., Lappas, A.A., 2017, *Biotechnol. Biofuels*, 10, 54.
- [9] C. Katsimpouras, G. Dedes, P. Bistis, D. Kekos, K. Kalogiannis, E. Topakas, 2018, *Bioresour. Technol.*, 270, 208-215.
- [10] Sluiter, A.; Hames, B.; Ruiz, R.; Scarlata, C.; Sluiter, J.; Templeton, D.; Nrel, D.C. *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass*; National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO, USA, 2012.
- [11] J. Lin, B. Pillay, S. Singh. *Biotechnol Appl Biochem*. 30(1) (1999) 81-7.
- [12] G.L. Miller, *Anal. Chem*. 31 (3) (1959) 426–428.