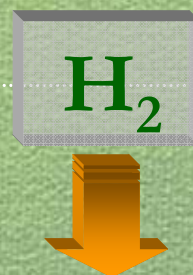

Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Χημικών Μηχανικών
Εργ. Βιοχημικής Μηχανικής & Τεχνολογίας
Περιβάλλοντος

Παραγωγή Βιοϋδρογόνου από Βιομάζα
Γλυκού Σόργου μέσω Μικτών Οξεογόνων
Καλλιεργείων και Καθαρών
Καλλιεργείων του Βακτηρίου
Ruminococcus albus

Γ.Αντωνοπούλου, Ι. Ντάικου, Χ.Ν. Γαβαλά,
Ι.Β. Σκιαδάς, Κ. Αγγελόπουλος,
Γ. Λυμπεράτος

Γενικά για το H₂

- ✦ Ενεργειακή κρίση → Εναλλακτικές μορφές ενέργειας
- ✦ Φαινόμενο θερμοκηπίου → μείωση αέριων ρύπων



- ✦ Μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- ✦ Μηδενική εκπομπή ρύπων
- ✦ Υψηλή ενεργειακή απόδοση (122KJ/g)

Βιολογική παραγωγή H_2

- ◆ Βιοφωτόλυση H_2O από αλγεις και κυανοβακτήρια
- ◆ Φωτοζυμωτική παραγωγή από οργανική ύλη
- ◆ Ζυμωτική παραγωγή υδρογόνου από οργανική ύλη
διάσπαση υδατανθράκων  πτητικά λιπαρά οξέα, αλκοόλες, H_2
- ◆ Υβριδικά συστήματα με χρήση ζυμωτικών και φωτοσυνθετικών βακτηρίων

Ζυμωτική παραγωγή H₂

Solomon et al. 1995; Kengen et al. 1996

Μέγιστη θεωρητική
απόδοση



$$\Delta G^0 = -206 \text{ KJ/mol}$$

Thauer et al. 1995

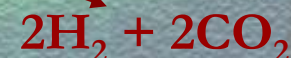


$$\Delta G^0 = -255 \text{ KJ/mol}$$

Voordouw 2002



$$\Delta G^0 = -209 \text{ KJ/mol}$$



Γλυκό σόργο



Sorghum bicolor (L.) Moench



Μονοετές C4 ενεργειακό φυτό με
μεγάλη παραγωγή σε βιομάζα
άμυλο και σάκχαρα



Γλυκό σόργο



τεμαχισμός
1-2 cm

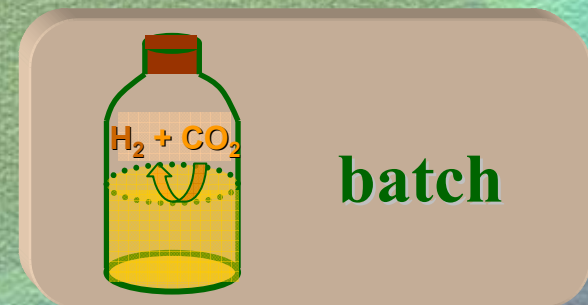
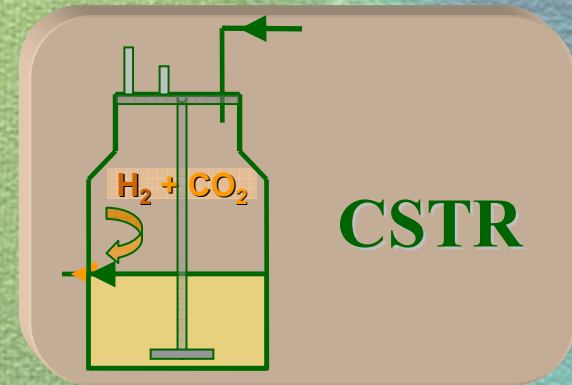
Εκχύλιση
5kg σόργο+30L H₂O,
30°C, 1h

Κλάσμα β
υπόλειμμα

λιγνίνη
κυτταρίνη, ημικυταρίνη

Κλάσμα α :
εκχύλισμα

Διαλυτά σάκχαρα :
γλυκόζη, σακχαρόζη



Αποτελέσματα I

- Μικτές Οξεογόνες Καλλιέργειες -

Συνεχή πειράματα (CSTR)



- ✦ ‘Τύπου CSTR’
- ✦ Λειτουργικός όγκος 500 mL
- ✦ $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$

✓ Εκκίνηση : ενδογενής βακτηριακός πληθυσμός εκχυλίσματος σόργου

✓ Προσθήκη ρυθμιστικού: 2.24 g NaOH, 6.8045 g KH_2PO_4

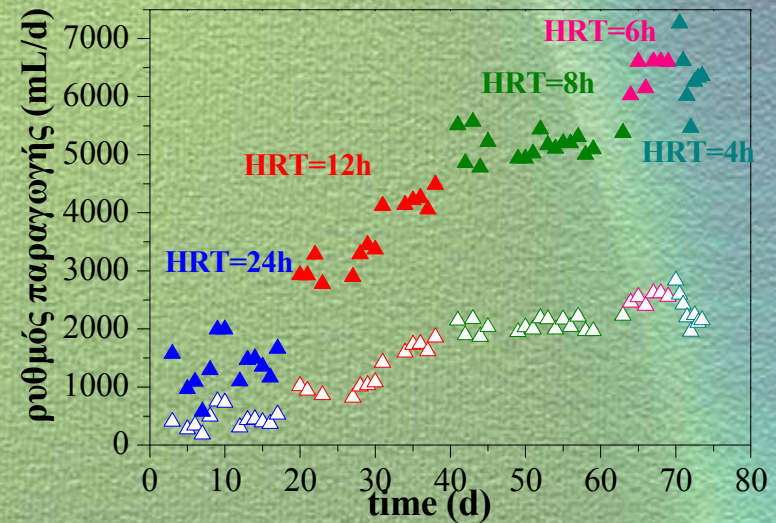
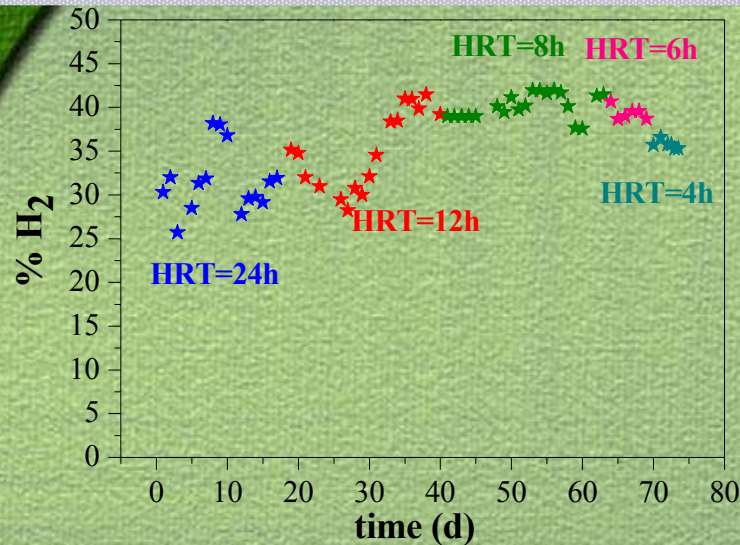
↻ $\text{pH}_{\text{feed}} = \sim 8.8$

Συνεχή πειράματα (CSTR)

✓ Επίδραση υδραυλικού χρόνου παραμονής

HRT (h)	24	12	8	6	4
παροχή (mL/d)	500	1000	1500	2000	3000
Φόρτιση (mmol _{υδατανθ} /L/d)	99.5	189	283	378	567

Συνεχή πειράματα (CSTR)



<i>HRT, h</i>	<i>Σύσταση $H_2\%$</i>	<i>Ρυθμός παραγωγής H_2, mL/d</i>	<i>Απόδοση, mol H_2/mol γλυκόζης</i>	<i>L H_2/kg ν. σόργου</i>
24	30.4 ± 1.2	410 ± 40	0.37 ± 0.02	4.9
12	39.9 ± 1.2	1740 ± 100	0.86 ± 0.04	10.4
8	40.5 ± 1.9	2070 ± 120	0.75 ± 0.05	8.4
6	39.2 ± 0.5	2550 ± 90	0.70 ± 0.02	7.6
4	35.0 ± 1.5	2180 ± 150	0.41 ± 0.02	4.3

Πειράματα σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου



◆ $T=35.5^{\circ}\text{C}$

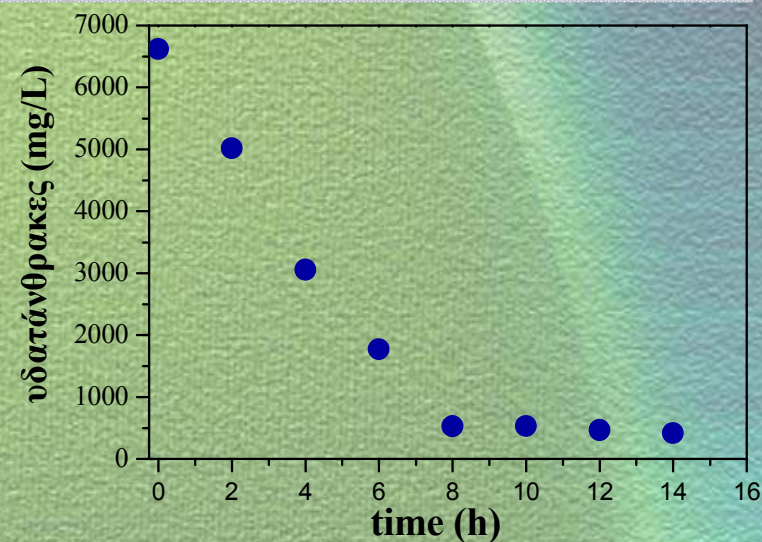
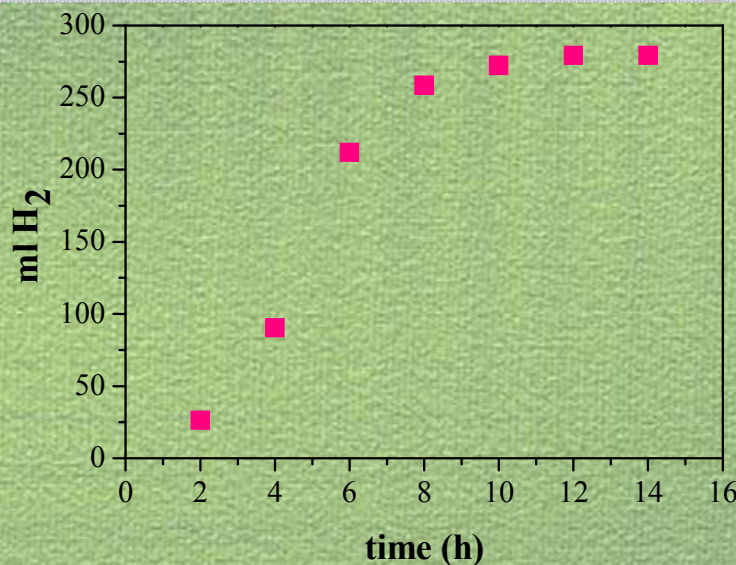
◆ Όγκος 1350 mL

◆ Μαγιά : 300 mL απορροής H_2 από CSTR,
σε (HRT=12, 8, 6, 4 h)

◆ Υπόστρωμα: 150 mL εκχυλίσματος σόργου

Πειράματα σε αντιδραστήρες διαλείποντος έργου

Μαγιά,
HRT 12h



Εμβόλιο από CSTR σε
μόνιμη κατάσταση
HRT, h

Απόδοση/ mol H_2
 mol γλυκόζης

$L \text{ H}_2 / \text{kg v.}$
βιομ. σόργου

12

0.786

11.16

8

0.75

8.76

6

0.648

6.26

4

0.53

8.1

Συμπεράσματα I

- ✓ Η παραγωγή H_2 από συνεχείς καλλιέργειες με εκχύλισμα σόργου βελτιστοποιείται για χρόνο παραμονής μεταξύ 6 και 12 h, παρουσιάζοντας μεγαλύτερο ρυθμό σε HRT 6h και μεγαλύτερη στοιχειομετρική απόδοση σε HRT 12h.
- ✓ Οι μικτές οξεογόνες καλλιέργειες παρουσίασαν την βέλτιστη παραγωγή H_2 για χρόνο παραμονής μεταξύ 8 και 12h και στις καλλιέργειες διαλείποντος έργου.
- ✓ Η μέγιστη παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα σόργου ήταν 10,4 l H_2 /kg νωπής βιομάζας στις συνεχείς καλλιέργειες και 11,2 l H_2 /kg νωπής βιομάζας στις καλλιέργειες διαλείποντος έργου.

Αποτελέσματα II

- Ruminococcus albus -

Αντιδραστήρες



CSTR

- λειτουργικός όγκος : 1320 ml
- $T : 37 \pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- HRT : 42h

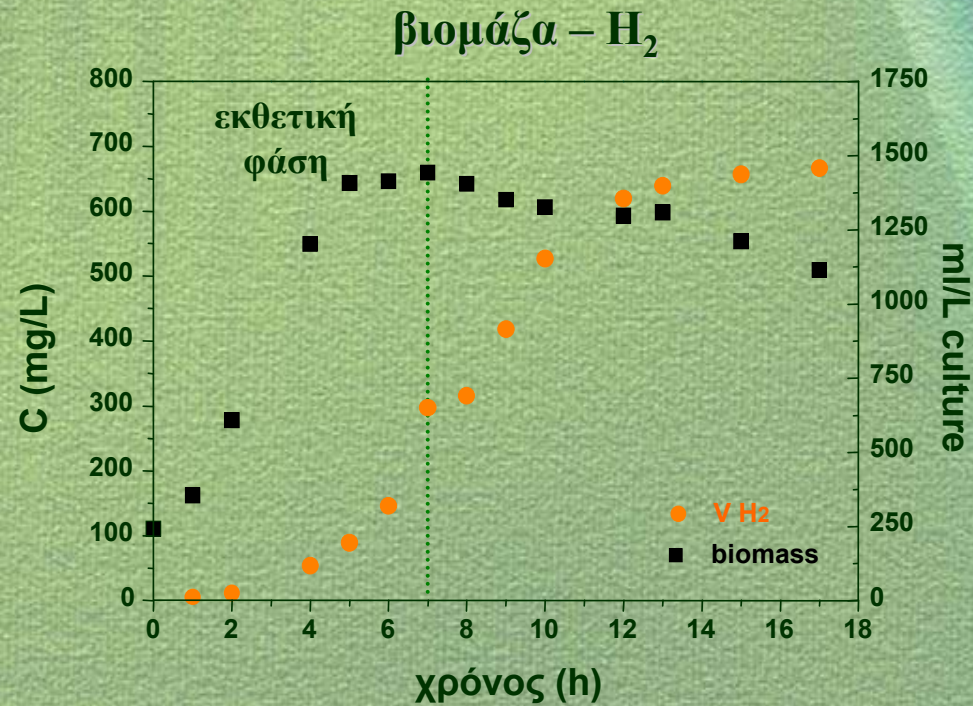
Batch

- ολικός όγκος : 160 ml
- $T : 37 \pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Παραγωγή H_2 από εκχύλισμα σόργου

Batch

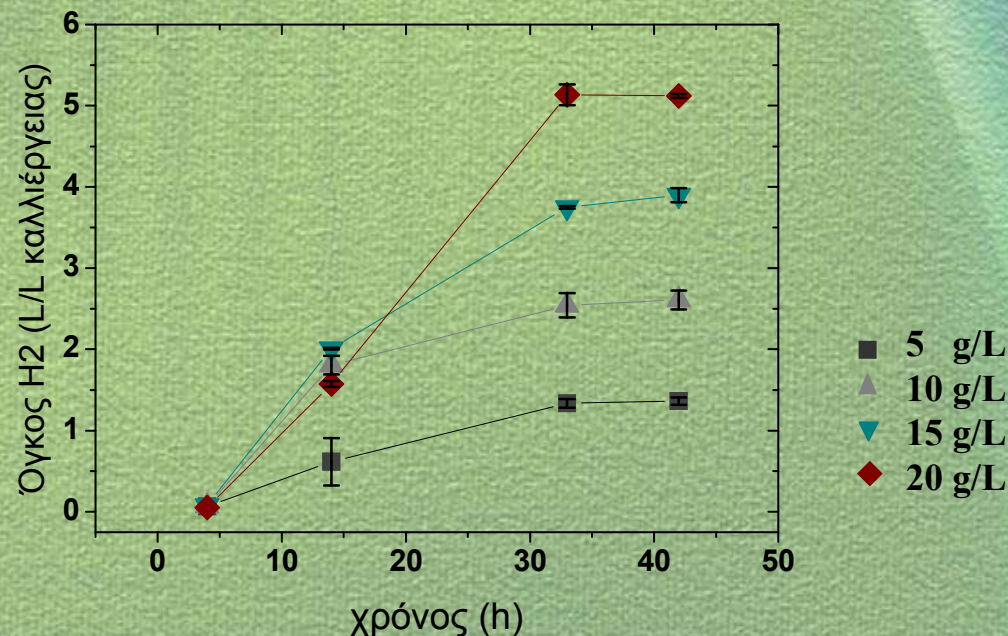


✓ Καθυστερημένη παραγωγή H_2 από το $HCOOH$



Παραγωγή H_2 από εκχύλισμα σόργου

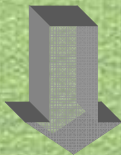
Batch



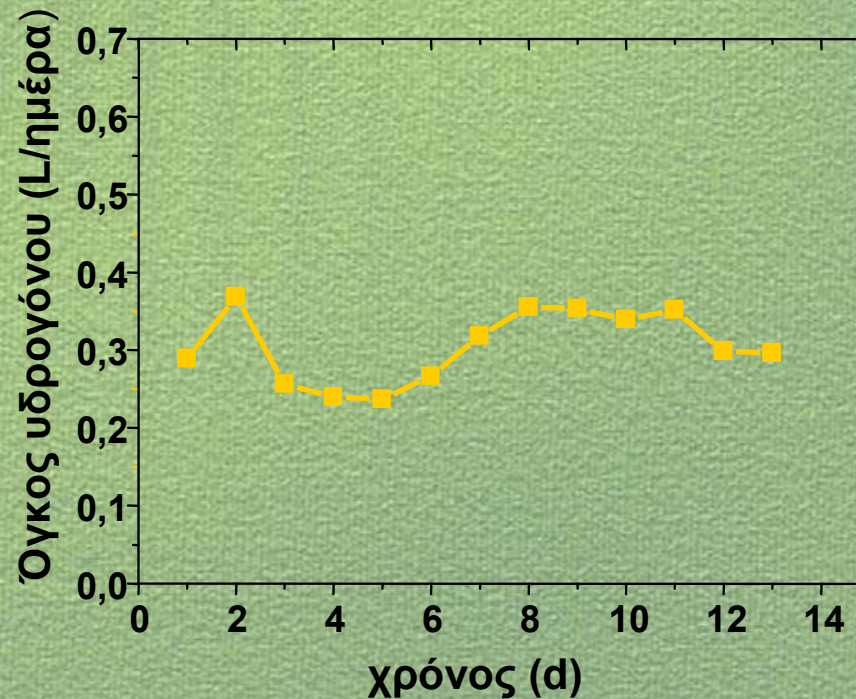
$C_{\text{αρχ}}$ σακχάρων (g/L)	Απόδοση H_2 , (mol/mol ισοδ. γλυκόζης)	Τελική P_{H_2} , (atm)
5	2.09 ± 0.07	0.81 ± 0.03
10	2.12 ± 0.09	0.77 ± 0.05
15	2.11 ± 0.05	0.77 ± 0.03
20	2.14 ± 0.01	0.77 ± 0.00

Παραγωγή H_2 από εκχύλισμα σόργου

CSTR



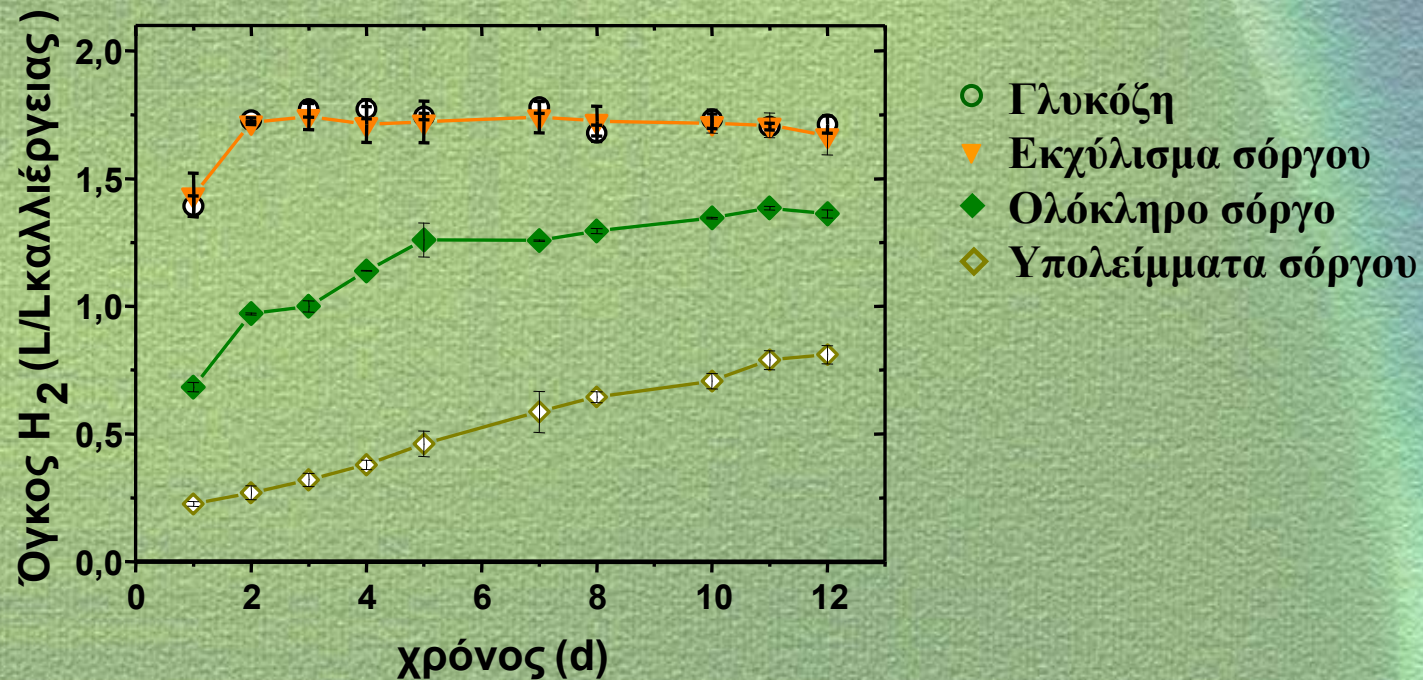
HRT : 42 h



$1.07 \pm 0.2 \text{ mol } H_2/\text{mol γλυκόζης}$

$15.83 \pm 2.4 \text{ L } H_2/\text{kg σόργου}$

Συγκριτική παραγωγή H_2 από βιομάζα σόργου



Στοιχειομετρικές
αποδόσεις

(mol H_2 /mol
ισοδ.γλυκόζης)



- Γλυκόζη → 2.52 ± 0.09
- Ολόκληρο σόργο → 3.15 ± 0.03
- Υπολείμματα σόργου → 2.59 ± 0.05
- Εκχύλισμα σόργου → 2.61 ± 0.08

Παραγωγή H_2 από βιομάζα σόργου

		<i>$L H_2/kg$ νωπού σόργου *</i>	
		batch	CSTR
➤ Ολόκληρο σόργο	➡	✓ 58 ± 2.8	-
➤ Εκχύλισμα σόργου	➡	28 ± 1.7	15.83 ± 2.4
➤ Υπολείμματα σόργου	➡	31 ± 1.3	-
➤ Συνολικά		✓ 59	

* υγρασία ~75%

Συμπεράσματα II

- ✓ Η απόδοση H_2 στα πειράματα διαλείποντος έργου δεν επηρεάζεται από την συγκέντρωση υδατανθράκων στο εκχύλισμα σόργου, στο εύρος συγκεντρώσεων που ελέγχθηκαν, παρουσιάζοντας ιδιαίτερα υψηλές τιμές.
- ✓ Η παραγωγή υδρογόνου από λιγνοκυτταρινούχα υπολείμματα σόργου γίνεται πιο αργά αλλά οδηγεί σε εξίσου υψηλές αποδόσεις με το εκχύλισμα σόργου.
- ✓ Η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα σόργου είναι η ίδια ανεξάρτητα από το αν η ζύμωση πραγματοποιείται σε ένα ή δύο στάδια .

Γενικά συμπεράσματα

- ✓ Η χρήση καθαρών καλλιεργειών *R. albus* για την επεξεργασία του εκχυλίσματος σόργου οδηγεί σε υψηλότερες αποδόσεις H_2 σε σύγκριση με τη χρήση μικτών οξεογόνων καλλιεργειών. Επίσης λόγω των κυτταρινολυτικών ιδιοτήτων του *R. albus* είναι η εφικτή η πλήρης αξιοποίηση όλης της βιομάζας σόργου για παραγωγή H_2 .
- ✓ Το μειονέκτημα της χρησιμοποίησης καθαρών καλλιεργειών έναντι της μικτής οξεογόνου καλλιέργειας, είναι η ανάγκη συνεχούς αποστείρωσης των επιμέρους τμημάτων των αντιδραστήρων και της τροφοδοσίας. Συνεπώς η χρήση της μικτής γηγενούς καλλιέργειας έχει μικρότερες ενεργειακές ανάγκες συντήρησης και συνεπώς μικρότερο κόστος.

Ευχαριστίες

Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας
για την οικονομική στήριξη της παρούσας
εργασίας υπό του προγράμματος ΠΕΝΕΔ
01ΕΔ390