

**ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΚΥΨΕΛΩΝ  
ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΥΠΟΥ SOFC: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ  
ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΑ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

**Ε. Αντωνάκου, Α. Λάππας**

Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών, Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής  
Ανάπτυξης, 6<sup>ο</sup> χλμ. Χαριλάου-Θέρμης, ΤΘ 361, ΤΚ 57001, Θέρμη, Θεσσαλονίκη

**Κ. Αθανασίου, Γ. Πεκρίδης, Ν. Κακλίδης, Ε. Βακουφτού, Γ. Μαρνέλλος**

Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας,  
Μπακόλα & Σιαλβέρα, ΤΚ 50100, Κοζάνη

**Γ. Φεσσάς**

Proplan LTD, Βιομηχανική Περιοχή Εργατών, Φάση Β', 2643 Εργάτες, Τ.Θ. 25672, 1311  
Λευκωσία, Κύπρος

**Γ. Καπλάνης**

ΤΡΟΠΙΚΑΛ ΑΕΒΕ, Λεωφόρος Κηφισού 98, 12132 Περιστερί, Αθήνα

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Βάση των παραδοχών που χρησιμοποιήθηκαν η συνδυασμένη διεργασία πυρόλυσης και κυψέλης SOFC φαίνεται σε θέση να επιτυγχάνει ηλεκτρικές αποδόσεις της τάξης του 40 % της Ανώτερης Θερμογόνου Δύναμης της τροφοδοτούμενης βιομάζας με αποδόσεις συμπαράγωγής άνω του 85 %, ενώ η προκαταρκτική εξέταση των προοπτικών οικονομικής βιωσιμότητας οδηγεί σε ενθαρρυντικά συμπεράσματα.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας συνεπάγεται πλεονεκτήματα όπως η μηδενική συνεισφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, η ανεξάρτηση από τις εισαγωγές πετρελαίου, η τόνωση της γεωργικής οικονομίας κ.α. Η πυρόλυση αποτελεί την πλέον καινοτόμο από τις τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας. Στη διεργασία χρησιμοποιούνται θερμοκρασίες 500 – 800 °C και λαμβάνονται αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα, οι σχετικές αναλογίες των οποίων, εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, το χρόνο παραμονή, το είδος και την κοκομετρία της πρώτης ύλης. Στοχεύοντας κυρίως στην παραγωγή υγρών οι εφαρμογές της πυρόλυσης βρίσκονται ήδη σε επίπεδα βιομηχανικής δυναμικότητας (25 – 100 tn βιοελαίου την ημέρα) και παρουσιάζουν εξαιρετικές προοπτικές, αφενός γιατί αφορούν στην μετατροπή στερεών σε υγρά βιοκαύσιμα και αφετέρου λόγω της δυνατότητας της ταυτόχρονης συμπαράγωγής υγρών (φαινόλες κ.α.) και στερεών (ενεργός άνθρακας) παραπροϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, δυνατότητα που αναγνωρίζεται ως αποφασιστικής σημασίας για την οικονομική βιωσιμότητα των τεχνολογιών βιομάζας γενικότερα<sup>1,2</sup>. Παράλληλα οι κυψέλες καυσίμου επιτυγχάνουν εξαιρετικά υψηλές αποδόσεις ηλεκτρικής ισχύος<sup>3</sup>. Η παρούσα εργασία αφορά στην προσομοίωση της σύζευξης της πυρόλυσης βιομάζας και των κυψελών καυσίμου SOFC, σε μία ολοκληρωμένη διεργασία, για τη ταυτόχρονη παραγωγή φαινολών και ηλεκτρικής ισχύος. Η εκδοχή της σύζευξης των δύο διεργασιών που εξετάζεται περιλαμβάνει την αεριοποίηση του υπολειπόμενου βιοελαίου (μετά το διαχωρισμό των φαινολών) και τη συν-τροφοδοσία των αερίων πυρόλυσης και αεριοποίησης σε κυψέλη SOFC.

**ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το απλοποιημένο διάγραμμα ροής της ολοκληρωμένης διεργασίας, τα βασικά στάδια της οποίας είναι:

- η πυρόλυση της πρώτης ύλης βιομάζας
- η διεργασία διαχωρισμού φαινολών/βιοελαίου
- η αεριοποίηση του βιοελαίου
- η καύση των αερίων πυρόλυσης και αεριοποίησης στην κυψέλη καυσίμου τύπου SOFC
- η καύση των άκαυστων αερίων από την κυψέλη και του στερεού υπολείμματος
- η μετατροπή παραγόμενης θερμότητας σε ισχύ σε θερμικό κύκλο ατμοστροβίλου

Η ολοκληρωμένη διεργασία περιλαμβάνει δύο διατάξεις παραγωγής θερμότητας (την κυψέλη καυσίμου και τον καυστήρα), δύο διατάξεις οι οποίες καταναλώνουν θερμότητα (ο αντιδραστήρας πυρόλυσης και ο ατμοστροβίλος) ενώ ο αεριοποιητής ενδέχεται είτε να παράγει είτε να καταναλώνει θερμότητα ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας του, την έκταση της αεριοποίησης και την αναλογία τροφοδοσίας αέρα/βιοελαίου. Η διαχείριση και η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των επιμέρους σταδίων της ολοκληρωμένης διεργασίας επιτυγχάνεται με τη χρήση των κατάλληλων εναλλακτών. Στον Πίνακα 1 περιγράφονται τα ρεύματα της ολοκληρωμένης διεργασίας.

**Πίνακας 1** Περιγραφή των ρευμάτων της ολοκληρωμένης διεργασίας

---

1	Τροφοδοσία βιομάζας
2	Υγρά προϊόντα πυρόλυσης (συμπυκνώσιμια τμoί βιοελαίου)
3	Αέρια προϊόντα πυρόλυσης (σταθερά αέρια)
4	Στερεό υπόλειμμα πυρόλυσης (άνθρακας, πίσσα, τέφρα)
5	Νερό ψύξης των ατμών του Ρεύματος 2, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος
6	Θερμό νερό από την ψύξη του Ρεύματος 2
7	Υγροποιημένοι ατμοί βιοελαίου στη θερμοκρασία περιβάλλοντος
8	Παραγόμενη φαινόλη
9	Υπολειπόμενο βιοέλαιο μετά το διαχωρισμό του φαινολικού κλάσματος
10	Τροφοδοσία αέρα αεριοποίησης στη θερμοκρασία περιβάλλοντος
11	Στερεό υπόλειμμα της αεριοποίησης (άνθρακας, πίσσα, τέφρα)
12	Αέρια προϊόντα της αεριοποίησης στη θερμοκρασία του αεριοποιητή
13	Νερό ψύξης των αερίων προϊόντων της αεριοποίησης, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος
14	Θερμό νερό από την ψύξη των αερίων του Ρεύματος 12
15	Αέρια προϊόντα της αεριοποίησης
16	Αέρια τροφοδοσία της ανόδου της κυψέλης
17	Τροφοδοσία αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος
18	Τροφοδοσία προθερμασμένου αέρα στην κάθοδο της κυψέλης
19	Απεμπλουτισμένος αέρας στην έξοδο της καθόδου της κυψέλης
20	Απαέρια της ανόδου της κυψέλης στη θερμοκρασία λειτουργίας της
21	Απαέρια του καυστήρα στη θερμοκρασία λειτουργίας του
22	Απαέρια του καυστήρα μετά την παροχή θερμότητας στον αεριοποιητή
23	Απαέρια του καυστήρα μετά την προθέρμανση της τροφοδοσίας αέρα της καθόδου
24	Απαέρια του καυστήρα μετά την παροχή θερμότητας στον αντιδραστήρα πυρόλυσης
25	Απαέρια του στροβίλου
26	Απαέρια της διεργασίας
27	Νερό ψύξης των απαερίων της διεργασίας, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος
28	Θερμό νερό από την ψύξη των αερίων του Ρεύματος 25

---

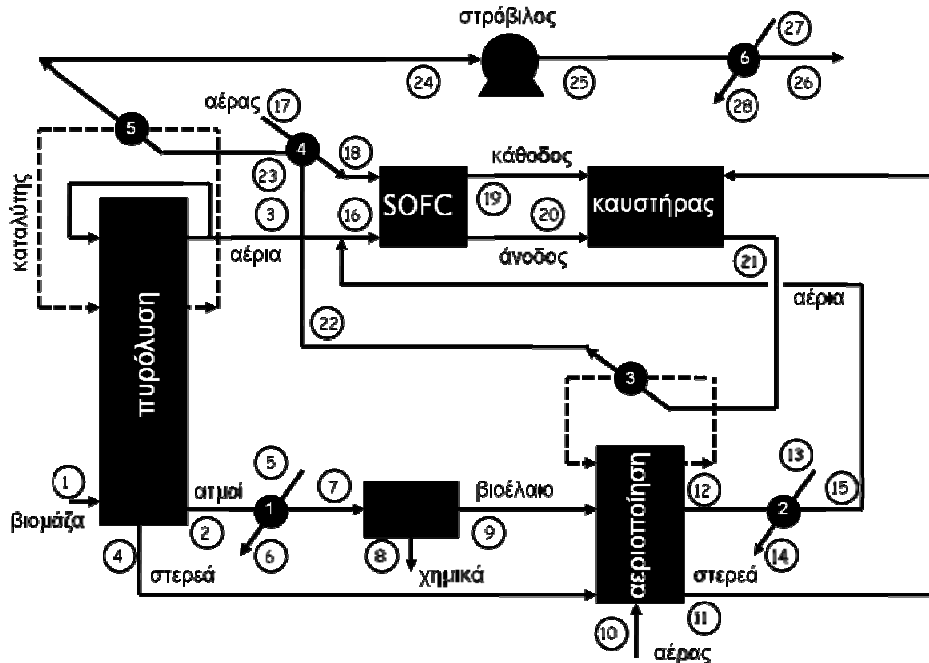
#### **ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η θερμοδυναμική ανάλυση στηρίχθηκε στις παραδοχές ότι οι θερμικές απώλειες της διεργασίας θεωρήθηκαν μηδενικές, ενώ δεν ελήφθησαν υπόψη οι, σε κάθε περίπτωση αμελητέες, ενεργειακές καταναλώσεις τυχόν αεροσυμπιεστών ή αντλιών που ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν, καθώς και των κοχλιωτών μεταφορέων των στερεών. Η μεταφορά θερμότητας προς τον αντιδραστήρα πυρόλυσης επιτυγχάνεται με την ανακυκλοφορία του καταλύτη, ο οποίος προθερμαίνεται από το ρεύμα απαερίων του καυστήρα, ενώ η μεταφορά

μάζας διευκολύνεται από την ανακυκλοφορία μέρους των παραγόμενων αερίων. Με βάση τη βιβλιογραφία η απόδοση της πυρόλυσης θεωρήθηκε στο τυπικό εύρος τιμών:

Υγρά (ατμοί)	70 % κ.β. ξηρής βιομάζας
Αέρια	15 % κ.β. >>
Στερεά (υπόλειμμα)	15 % κ.β. >>

Τα υγρά ψύχονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος πριν από το διαχωρισμό και στο αντίστοιχο ρεύμα διαχωρίζονται μόνο οι φαινόλες, οι οποίες αποτελούν το 10 % κ.β. των υγρών.



Σχήμα 1. Αρχή λειτουργίας της ολοκληρωμένης διεργασίας

Η μεταφορά θερμότητας προς τον αεριοποιητή επιτυγχάνεται με την ανακυκλοφορία του καταλύτη, ο οποίος προθερμαίνεται από το ρεύμα απαερίων του καυστήρα. Το παραγόμενο αέριο ψύχεται στους 700 °C, πριν αναμιχθεί με το ρεύμα αερίων της πυρόλυσης και τροφοδοτηθεί στη κυψέλη. Η απόδοση της διεργασίας αεριοποίησης, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, θεωρήθηκε ίση με 85 % κ.β. αέρια, τα οποία περιείχαν 3 % υδρογονάνθρακες (προσομοιώνονται με μεθάνιο). Η τροφοδοσία οξυγόνου θεωρήθηκε στο 10 % του οξυγόνου που απαιτείται για πλήρη καύση της τροφοδοσίας.

Το εμβαδόν της ανόδου θεωρήθηκε 100 m<sup>2</sup>. Ο αέρας που τροφοδοτείται στην κάθοδο προθερμαίνεται, προκειμένου να συντηρηθεί η λειτουργία της στους 1000 °C. Η χρήση καυσίμου θεωρήθηκε ίση με 85 % κ.ο. του υδρογόνου και του μονοξειδίου του άνθρακα που τροφοδοτήθηκε στην είσοδο. Αντίστοιχα, ο απεμπλουτισμός του αέρα δεν ελάττωνε τη συγκέντρωση του οξυγόνου κάτω από 13 % κ.ο. Για τον καυστήρα επαρκεί η τροφοδοσία του απεμπλουτισμένου αέρα από την κάθοδο (η περίσσεια οξυγόνου, που προκύπτει με τον τρόπο αυτό είναι 147 %).

Το 20 % της παρεχόμενης θερμότητας (Αισθητή θερμότητα στο ρεύμα 25 – Αισθητή Θερμότητα στο ρεύμα 26) μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ στο στρόβιλο, ενώ το υπόλοιπο θεωρείται ότι μπορεί να διατεθεί ως θερμότητα χαμηλής ποιότητας (νερό στους 90 °C). Με βάση τις παραδοχές, τα ισοζύγια μάζας της ολοκληρωμένης διεργασίας, ανά χιλιόγραμμο τροφοδοτούμενης ξηρής βιομάζας στο ρεύμα 1, παρουσιάζονται στους Πίνακες 2 – 5, ενώ τα αντίστοιχα ισοζύγια ενέργειας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

**Πίνακας 2** Στοιχειακή σύσταση και μαζική/γραμμομοριακή παροχή των ρευμάτων των στερεών της ολοκληρωμένης διεργασίας

Ρεύμα	Στερεά kg/sec	C			H			O			Νερό		
		kg	mole	%κβ	kg	mole	%κβ	kg	mole	%κβ	lt	mole	
1	Βιομάζα	1,00	0,50	41,67	50,0	0,06	60,00	6,0	0,44	27,50	44,0	0,10	5,56
4	Στερεά	0,15	0,11	8,75	70,0	0,00	3,75	2,5	0,04	2,58	27,5		
11	Στερεά	0,08	0,05	4,49	70,0	0,00	1,93	2,5	0,02	1,32	27,5		

**Πίνακας 3** Ογκομετρική/γραμμομοριακή παροχή των ρευμάτων νερού της ολοκληρωμένης διεργασίας

Ρεύμα	lt	mole	Ρεύμα	lt	mole	Ρεύμα	lt	mole
5	2,79	155,30	13	3,26	181,20	27	6,03	335,2
6	2,79	155,30	14	3,26	181,20	28	6,03	335,2

**Πίνακας 4** Στοιχειακή σύσταση και μαζική/γραμμομοριακή παροχή των ρευμάτων των υγρών/ατμών της ολοκληρωμένης διεργασίας

Ρεύμα	Υγρά kg/sec	C			H			O			Νερό		Αέρια ατμός				
		kg	mole	%κβ	kg	mole	%κβ	kg	mole	%κβ	lt	mole	lt	mole	%κο	kg	
2	Ατμοί	0,70	0,34	28,16	48,3	0,05	52,65	7,5	0,31	19,34	44,2			355,0	5,56		0,10
7	Υγρά	0,70	0,34	28,16	48,3	0,05	52,65	7,5	0,31	19,34	44,2	0,10	5,56				
8	Φαινόλη*	0,08															
9	Υγρά	0,72	0,28	23,06	44,6	0,05	47,50	7,6	0,30	18,48	47,7	0,10	5,56				

**Πίνακας 5** Σύσταση και παροχή των αερίων ρευμάτων της ολοκληρωμένης διεργασίας

Ρεύμα	Αέρια lt	N2		O2		H2		CO		CO2		CH4		ατμός			
		mole	%κο	mole	%κο	mole	%κο	mole	%κο	mole	%κο	mole	%κο	mole	%κο	kg	
3	Αέρια	303,7						2,12	44,6	1,73	36,4	0,90	18,9				
10	Αέρας	363,7	12,83	79,0	3,41	21,0											
12	Αέρια	5354,0	12,83	19,3			26,24	39,5	18,52	27,9	6,80	10,2	2,00	3,00			
15	Αέρια	5354,0	12,83	19,3			26,24	39,5	18,52	27,9	6,80	10,2	2,00	3,00			
16	Αέρια	3730,6	12,83	18,0			26,20	36,9	20,60	29,0	8,50	12,0	2,9	4,1			
17	Αέρας	5000,1	176,3	79,0	46,88	21,0											
18	Αέρας	15929,5	176,3	79,0	46,88	21,0											
19	Αέρας	19453,3	176,3	86,7	26,90	13,3											
20	Αέρια	6806,9	12,83	18,0			3,94	5,5	3,09	4,4	26,07	36,7	2,90	4,1			
21	Αέρια	35356,5	189,17	69,3	9,24	3,4					40,82	14,9			33,92	12,4	0,61
22	Αέρια	31712,1	189,17	69,3	9,24	3,4					40,82	14,9			33,92	12,4	0,61
23	Αέρια	19492,2	189,17	69,3	9,24	3,4					40,82	14,9			33,92	12,4	0,61
24	Αέρια	16471,6	189,17	69,3	9,24	3,4					40,82	14,9			33,92	12,4	0,61
25	Αέρια	8069,0	189,17	69,3	9,24	3,4					40,82	14,9			33,92	12,4	0,61
26	Αέρια	7453,0	189,17	69,3	9,24	3,4					40,82	14,9			33,92	12,4	0,61

**Πίνακας 6.** Ισοζύγια ενέργειας της ολοκληρωμένης διεργασίας

Ρεύμα	T, °C	Αισθητή		Ρεύμα	T, °C	Αισθητή	
		Θερμότητα, kJ/sec	ΑΘΔ kJ			Θερμότητα, kJ/sec	ΑΘΔ kJ
1	25	0,0	17666,1	15	700	808,8	14521,3
2	577	502,9	13468,8	16	424	913,9	15923,3
3	577	105,1	1401,9	17	25	0,0	
4	577	390,3	3355,7	18	697,3	4565,6	
5	25	0,0		19	1000	6118,2	
6	90	760,5		20	1000	2880,4	4584,0
7	25	0,0	13468,8	21	1483,6	14410,2	
8	25	0,0	344,7	22	1270,7	12062,0	
9	25	0,0	13468,8	23	832,5	7496,4	
10	25	0,0		24	679,9	5986,8	
11	800	60,2	1722,6	25	120	809,2	
12	800	1696,7	14521,3	26	90	550,4	
13	25	0,0		27	25	0,0	
14	90	887,9		28	90	1640,8	

**Πίνακας 7** Παραγωγή και εναλλαγή θερμότητας της ολοκληρωμένης διεργασίας

	Θερμοκρασία, °C	Θερμότητα, kJ/s	Ηλεκτρική ισχύς, kJ/s
Πυρόλυση	577	-1509,6	
Εναλλάκτης 1		760,5	
Διαχωριστής	25		
Αεριοποιητής	800	-2348,2	
Εναλλάκτης 2		887,9	
Εναλλάκτης 4		4565,6	
Κυψέλη	1000	4500,9	5856,7
Καυστήρας	1483,6	4155,5	
Εναλλάκτης 3		2348,2	
Εναλλάκτης 5		1509,6	
Στροβίλος		4142,0	1035,5
Εναλλάκτης 6		1640,8	

Παραγόμενη ηλεκτρική ή θερμική ισχύς από τη διεργασία

Από τον Πίνακα 7 φαίνεται ότι η συνολική ηλεκτρική παραγωγή της ολοκληρωμένης διεργασίας ανέρχεται σε 6892,2 kJ ανά χγ τροφοδοτούμενης ξηρής βιομάζας, ποσό που αντιστοιχεί στο 39 % της ανώτερης θερμογόνου δύναμης στην είσοδο. Αντίστοιχα, η συνολική θερμική παραγωγή (7431,2 kJ ανά χγ τροφοδοτούμενης ξηρής βιομάζας) αφορά στο 42 % της ΑΘΔ της εισόδου, αυξάνοντας την απόδοση συμπαραγωγής της διεργασίας στο 81 %. Με βάση την θερμοδυναμική προσομοίωση της διεργασίας, οι ενεργειακές της απώλειες θα είναι:

$$\begin{aligned} \text{Απώλειες} &= (\text{θερμογόνο δύναμη στην είσοδο}) - (\text{ηλεκτρική} + \text{θερμική παραγωγή}) = \\ &= \text{ΑΘΔ Ξηρής Βιομάζας} - (\text{Ηλεκτρική Παραγωγή Κυψέλης}) - (\text{Ηλεκτρική Παραγωγή Στροβίλου}) - (\text{Θερμική Παραγωγή Στροβίλου}) - (\text{Θερμική Παραγωγή Εναλλάκτη 1}) - (\text{Θερμική Παραγωγή Εναλλάκτη 2}) - (\text{Θερμική Παραγωγή Εναλλάκτη 6}) = 17666,1 - 5856,7 - 1035,5 - 4142,0 - 760,5 - 887,9 - 1640,8 = 2342,7 \text{ kJ / kg ξηρής βιομάζας} \end{aligned}$$

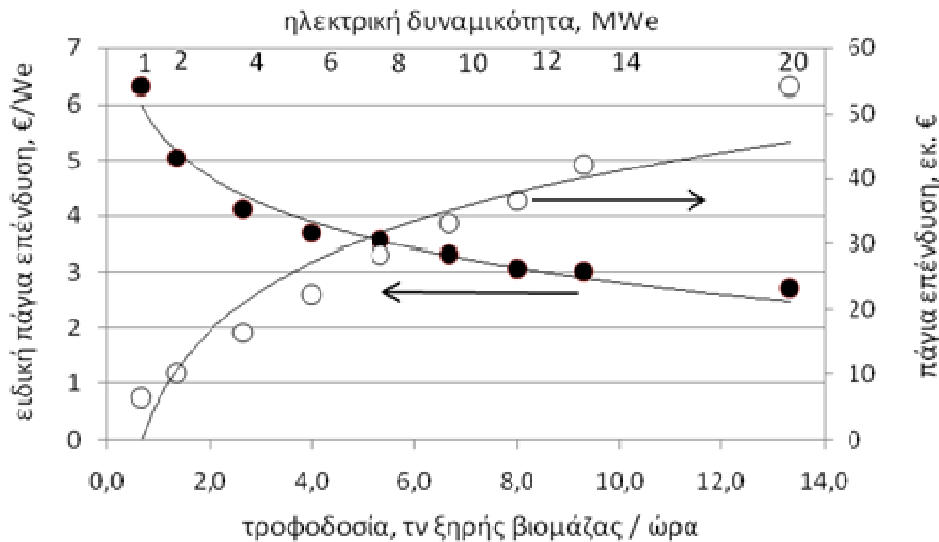
Ενώ σύμφωνα με την παραδοχή της αδιαβατικής λειτουργίας του κάθε σταδίου της διεργασίας, οι απώλειες αυτές αφορούν:

$$\text{Απώλειες} = (\text{Θερμότητα Καυσαερίων Ρεύματος 26}) + (\text{Λανθάνουσα Θερμότητα})$$

$$\begin{aligned} & \text{Συμπύκνωσης Νερού)} + (\text{Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη Φαινολών}) = \\ & = 550,4 + 1447,5 + 344,7 = 2342,7 \text{ kJ / kg ξηρής βιομάζας} \end{aligned}$$

#### ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το κόστος της αρχικής επένδυσης για την εγκατάσταση υπολογίστηκε με βάση βιβλιογραφικές εκτιμήσεις. Έτσι, η συνδυασμένη μονάδα θεωρήθηκε ότι αφορά σε μία εγκατάσταση αεριοποίησης βιομάζας – ατμοστροβίλου, της οποίας το αρχικό κόστος ως προς τη δυναμικότητα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2<sup>1</sup>. Στη μονάδα αυτή θεωρούνται οι προσθήκες ενός αντιδραστήρα πυρόλυσης, μεταξύ της τροφοδοσίας βιομάζας και του αεριοποιητή καθώς και μίας κυψέλης καυσίμου μεταξύ του αεριοποιητή και του ατμο-στροβίλου. Το κόστος για την προσθήκη μίας διεργασίας πυρόλυσης εκτιμήθηκε με βάση τα οικονομικά δεδομένα πραγματικών μονάδων πυρόλυσης βιομάζας<sup>4</sup>.



**Σχήμα 2.** Κόστος εγκατάστασης για μονάδα συνδυασμένου κύκλου - αεριοποίησης βιομάζας.

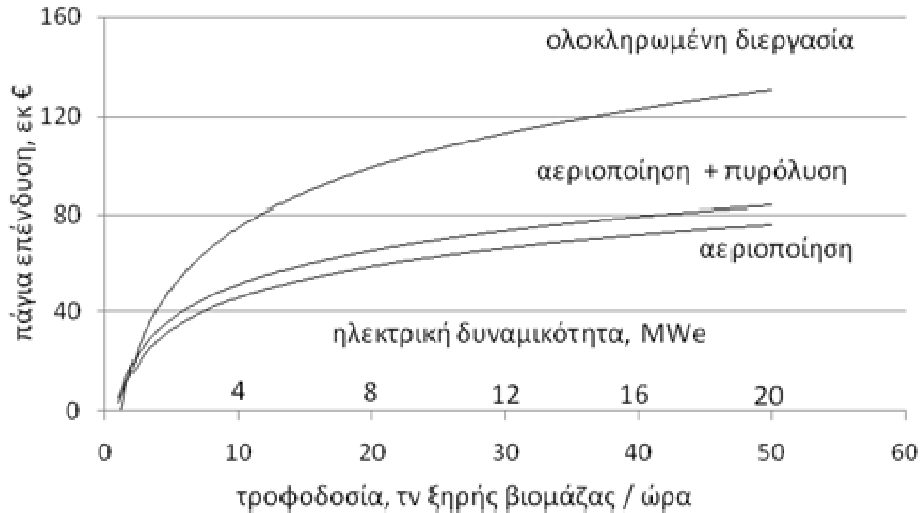
Όσον αφορά στην κυψέλη καυσίμου τύπου SOFC, η τεχνολογία της οποίας βρίσκεται σε στάδιο επίδειξης, το τρέχον κόστος εγκατάστασης εκτιμάται σε πάνω από 5.000 €/kW, γεγονός που θα καθιστούσε μία τέτοια ολοκληρωμένη μονάδα σύζευξης απαγορευτικά ακριβή. Η πρόβλεψη του κόστους μίας εγκατάστασης κυψέλης καυσίμου απασχολεί έντονα την ερευνητική κοινότητα και μία από της συγκρατημένες εκτιμήσεις θεωρεί την τιμή των 500 €/kW εφικτή, στην περίπτωση που αναπτυχθούν οι απαραίτητες οικονομίες κλίμακας και επιβεβαιωθούν οι αναμενόμενες καμπύλες μάθησης της αντίστοιχης βιομηχανίας<sup>3</sup>.

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω πρόβλεψη για το κόστος λειτουργικής ένταξης μίας κυψέλης καυσίμου στην ολοκληρωμένη διεργασία, το Σχήμα 4 παρουσιάζει την πρόβλεψη του συνολικού κόστους εγκατάστασης, από το οποίο φαίνεται η σημαντική επιβάρυνση από την κυψέλη καυσίμου. Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εκτίμησης της οικονομικής βιωσιμότητας της ολοκληρωμένης διεργασίας πυρόλυσης βιομάζας – κυψέλης καυσίμου, και με μία πρώτη ματιά γίνεται φανερό ότι ένα τέτοιο εγχείρημα καθίσταται οικονομικά ελκυστικό για δυναμικότητες πάνω από 5 tn βιομάζας την ώρα (περίπου 2 MW ονομαστική ηλεκτρική δυναμικότητα), οπότε και ο χρόνος αποπληρωμής των ιδίων κεφαλαίων ελαττώνεται κάτω από 10 έτη. Για τον υπολογισμό των στοιχείων του Πίνακα 11 θεωρήθηκαν οι παραδοχές:

τιμή διάθεσης ηλεκτρικής ενέργειας	80 €/MWh
τιμή διάθεσης θερμικής ενέργειας	20 €/MWh
τιμή διάθεσης φαινολών	1000 €/MWh

κόστος ξηρής βιομάζας 100 €/τν  
 κρατική επιδότηση επένδυσης 40 %

από τις οποίες η πλέον αμφίβολη είναι αυτή του κόστους βιομάζας, που θα μπορούσε να είναι αρκετά χαμηλότερο (καυσόξυλα για οικιακή χρήση τιμολογούνται σήμερα στα 50 – 80 €/τν).



Σχήμα 4 Εκτίμηση κόστους πάγιας εγκατάστασης για την ολοκληρωμένη διεργασία.

Πίνακας 11 Οικονομικά αποτελέσματα της ολοκληρωμένης διεργασίας

δυναμικότητα, τν/ώρα	1	5	10	20	40
επένδυση	11,6	38,1	60,7	93	132,3
ίδια κεφάλαια	7,0	22,9	36,4	55,8	79,4
ηλεκτρική παραγωγή, GWH/έτος	17,1	85,4	170,8	341,6	683,3
θερμική παραγωγή, GWH/ έτος	18,4	92,0	184,0	367,9	735,8
παραγωγή φαινολών, τν/ έτος	700,8	3504	7008	14016	28032
έσοδα, εκ €/έτος					
ηλεκτρισμός	1,4	6,8	13,7	27,3	54,7
θερμότητα	0,4	1,8	3,7	7,4	14,7
φαινόλες	0,7	3,5	7,0	14,0	28,0
σύνολο	2,4	12,2	24,4	48,7	97,4
έξοδα, εκ €/έτος					
βιομάζα	0,9	4,4	8,8	17,5	35,0
εργατικά	0,05	0,15	0,35	0,7	1,4
άλλα	0,03	0,09	0,21	0,42	0,84
αποσβέσεις, εκ €/έτος	1,16	3,81	6,07	9,3	13,23
ΚΠΦΑ, εκ €/έτος	1,5	7,6	15,0	30,1	60,1
ΚΠΦ, εκ €/έτος	0,3	3,7	9,0	20,8	46,9
καθαρά κέρδη, εκ €/έτος	0,2	2,4	5,8	13,5	30,5
χρόνος αποπληρωμής ιδίων, έτη	34	9	6	4	3

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η διάθεση των φαινολών αντιστοιχεί στο 30 % των εσόδων της εγκατάστασης και για το λόγο αυτό η δυνατότητα διαχωρισμού και εμπορικής αξιοποίησης τους είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την οικονομική βιωσιμότητα του εγχειρήματος. Τέλος, όσον αφορά στην χρήση κυψέλης καυσίμου, για την ενδεικτική δυναμικότητα των 40 τν ξηρής βιομάζας ανά έτος, η ηλεκτρική απόδοση της διεργασίας δεν αναμένεται να ξεπερνά το 20 % της ΑΘΔ της βιομάζας στην είσοδο, ενώ η απόδοση συμπαραγωγής το 80 %. Με τον

τρόπο αυτό τα έσοδα από ηλεκτρισμό ελαττώνονται κατά 26,6 εκ € /έτος, τα έσοδα από θερμότητα αυξάνονται κατά 6,3 εκ € /έτος και οι ετήσιες αποσβέσεις ελαττώνονται κατά 5,1 εκ € /έτος, με αποτέλεσμα τα Κέρδη προ Φόρων (ΚΠΦ) του εγχειρήματος να ελαττώνονται κατά 15,2 εκ € ή κατά 32 %, γεγονός που καταδεικνύει την οικονομική αποτελεσματικότητα των κυψελών καυσίμου παρά το πραγματικά υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης.

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Με βάση τη βιβλιογραφία στοιχειοθετήθηκε ένα πλήθος παραδοχών για την προσομοίωση της διεργασία σύζευξης της πυρόλυσης βιομάζας με κυψέλη καυσίμου τύπου SOFC, με βάση τις οποίες προβλέφθηκε ηλεκτρική απόδοση της τάξης του 42 % της ανώτερης θερμογόνου δύναμης της τροφοδοτούμενης βιομάζας και απόδοση συμπαραγωγής που ξεπερνά το 80 %. Η διεργασία εκτιμάται ως οικονομικά βιώσιμη για δυναμικότητες πάνω από 20 τν ξηρής βιομάζας την ώρα, ενώ η υποκατάσταση της κυψέλης καυσίμου από συμβατικότερες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος εξαναγκάζει τα οικονομικά του εγχειρήματος σε υποχώρηση. Σημαντική συμβολή (της τάξης του 30 %) στα έσοδα της συνδυασμένης διεργασίας είχε ο διαχωρισμός και η διάθεση των παραγόμενων φαινολών, ως ξεχωριστό προϊόν της διεργασίας.

### **Ευχαριστίες**

Η συγκεκριμένη έρευνα διεξήχθη στα πλαίσια του ερευνητικού έργου “Συνδυασμένη διεργασία πυρόλυσης βιομάζας και κυψελών καυσίμου τύπου SOFC για την ταυτόχρονη παραγωγή αερίων/υγρών βιοκαυσίμων και πράσινης ενέργειας”, το οποίο χρηματοδοτήθηκε μέσω του προγράμματος Ε&Τ συνεργασίας Ελλάδας-Κύπρου για τα έτη 2006-2008.

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1]. A.V. Bridgwater Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass Chemical Engineering Journal 91 (2003) 87–102
- [2]. S. Yaman Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks Energy Conversion and Management 45 (2004) 651 - 671
- [3]. G. Marnellos, C. Athanasiou, S. Makridis and E. Kikkinides "Integration of Hydrogen Energy Technologies in Autonomous Power Systems" In: Hydrogen - based autonomous Power Systems, Springer London, Zoulias, Emmanuel I. (Ed.) 2008 ISBN: 978-1-84800-246-3
- [4]. M. Ringer, V. Putsche, and J. Scahill “Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology November 2006 Assessment and Economic Analysis” NREL/TP-510-37779 (2006)