

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LCA) ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ

N. Μπονάτσος¹, A. Αναγνώστου¹, K. Μαραζιώτη^{1,3}, A. Κουτίνας^{2,3}, X. Τατσιόπουλος^{1,3}, I. Κούκος^{1,3*}

¹Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ρίο, 26504 Πάτρα, Ελλάδα

² Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 118 55, Αθήνα, Ελλάδα

³ INVALOR: Ερευνητική Υποδομή Αξιοποίησης Απορριμμάτων και Βιώσιμης Διαχείρισης, Καραθεοδωρή 1, Πανεπιστημιούπολη, 26504, Πάτρα, Ελλάδα
(*i.kookos@chemeng.upatras.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ευρεία εφαρμογή και αξιοποίηση των φυτικών ελαίων και λιπών, έχει οδηγήσει στη σημαντική αύξηση της ετήσιας παραγωγής τους. Τα λίπη και τα έλαια καταναλώνονται κυρίως ως τρόφιμα και ως ζωοτροφές, ως πρώτη ύλη στη χημική βιομηχανία και πιο πρόσφατα ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Σήμερα, το ενδιαφέρον για τα μικροβιακά έλαια, τα οποία παράγονται μέσω της ζύμωσης σε πολλούς διαφορετικούς ελαιογόνους μικροοργανισμούς, χρησιμοποιώντας ποικίλες ανανεώσιμες πηγές, έχει αυξηθεί. Αυτά τα λίπη μπορούν να μετατραπούν σε μια ποικιλία προϊόντων προστιθέμενης αξίας, χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ως πηγή άνθρακα, όπως λιπαντικά, επιφανειοδραστικά, φαρμακευτικά, καλλυντικά, πρόσθετα πολυμερών και βιοκαύσιμα. Το κύριο πλεονέκτημα του μικροβιακού ελαίου είναι ότι η δομή και η σύνθεσή του μπορεί να είναι παρόμοια με εκείνη ενός φυτικού ελαίου. Ένα ευρύ φάσμα σημαντικών παραπροϊόντων των σημερινών βιομηχανικών δραστηριοτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για τη βιοτεχνολογική παραγωγή ελαίου. Σε αυτή την εργασία εξετάζεται η οικονομική απόδοση της βιοχημικής παραγωγής μικροβιακού ελαίου και η αποτίμηση του κύκλου ζωής. Η διαδικασία παραγωγής προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας εμπορικούς προσομοιωτές για την ακριβή εξαγωγή ισοζυγίων μάζας και ενέργειας και συλλέγονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα από την ανοιχτή βιβλιογραφία. Μετά το στάδιο προσομοίωσης της διεργασίας εκτελείται λεπτομερής τεχνικοοικονομική ανάλυση και εκτιμάται το κόστος πάγιου κεφαλαίου για ένα εύρος παραγωγής από 2 έως 40 kt μικροβιακού ελαίου ετησίως.

Μετά την ολοκλήρωση της τεχνικοοικονομικής ανάλυσης, πραγματοποιείται η Αποτίμηση Κύκλου Ζωής (LCA) και εκτιμώνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η αποτίμηση κύκλου ζωής είναι μια συστηματική μέθοδος για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με ένα προϊόν, μια διαδικασία ή μια δραστηριότητα, με την ανίχνευση και τη μέτρηση της ενέργειας και των υλικών που χρησιμοποιούνται σε όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος. Ανάλογα με τα όρια που θέτουμε, υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες. Στη μελέτη μας η επιλεγείσα κατηγορία ήταν «cradle to gate», λόγω του γεγονότος ότι το ενδιαφέρον μας επικεντρώνεται μόνο στα στάδια μέχρι την παραγωγή.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας σε συνδυασμό με την εντατική εξόρυξη και χρήση μη ανανεώσιμων ορυκτών πόρων έχουν οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των αερίων θερμοκηπίου με άμεσες συνέπειες αυξημένη απορρόφηση ακτινοβολίας, υπερθέρμανση του πλανήτη, ατμοσφαιρική ρύπανση και όξινη βροχή. Έτσι, καταβάλλονται προσπάθειες για τη υιοθέτηση «πράσινων» ή βιώσιμων, φιλικών προς το περιβάλλον διαδικασιών που αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση αυτών των επιπτώσεων με τη χρήση ανανεώσιμων πόρων και βιώσιμων τεχνολογιών παραγωγής.

Μία από τις σημαντικότερες ομάδες πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις «πράσινες» τεχνολογίες είναι τα έλαια και τα λίπη, αν και το μεγαλύτερο ποσό των ποσοτήτων τους που παράγονται ετησίως χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση των διατροφικών αναγκών. Οι επιστήμονες έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους για τα Μικροβιακά Έλαια (MO ή SCO), τα οποία μπορούν επίσης να παραχθούν μέσω ζύμωσης από πολλούς διαφορετικούς ελαιογόνους μικροοργανισμούς, χρησιμοποιώντας ποικίλες ανανεώσιμες πηγές^[1]. Οι μικροοργανισμοί που μπορούν να παράγουν λιπίδια σε ένα ελάχιστο ποσοστό 20% της βιομάζας τους αναγνωρίζονται ως ελαιογόνα είδη^[2]. Ένας νέος, πολλά υποσχόμενος τρόπος για την

παραγωγή μικροβιακών λιπιδίων με το χαμηλότερο κόστος είναι η χρήση αποβλήτων αγρο-βιομηχανικών διεργασιών [3].

Οι συνθήκες και οι παράμετροι στις οποίες βασίζεται ο σχεδιασμός της διεργασίας για την παραγωγή SCO μέσω της διεργασίας της ζύμωσης βασίζονται κυρίως σε πειραματικές εργασίες που αναφέρονται στην μελέτη του Li et al. [4] και συζητήθηκε λεπτομερώς στη μελέτη του Koutinas et al. [5]. Ο χρησιμοποιούμενος μικροοργανισμός είναι ο *Rhodosporidium toruloides* Y4 που αναπτύσσεται σε γλυκόζη ως πηγή άνθρακα για την παραγωγή μικροβιακού ελαίου. Για τη διαδικασία ζύμωσης αναφέρεται χρόνος ζύμωσης 134 ώρες με τελική συγκέντρωση (titer) 71.9 g SCO / L και 106.5 g / L μικροβιακών κυττάρων (67.5% κατά βάρος σε SCO) που αντιστοιχεί σε ογκομετρική παραγωγικότητα SCO 0.54 g / (L·h).

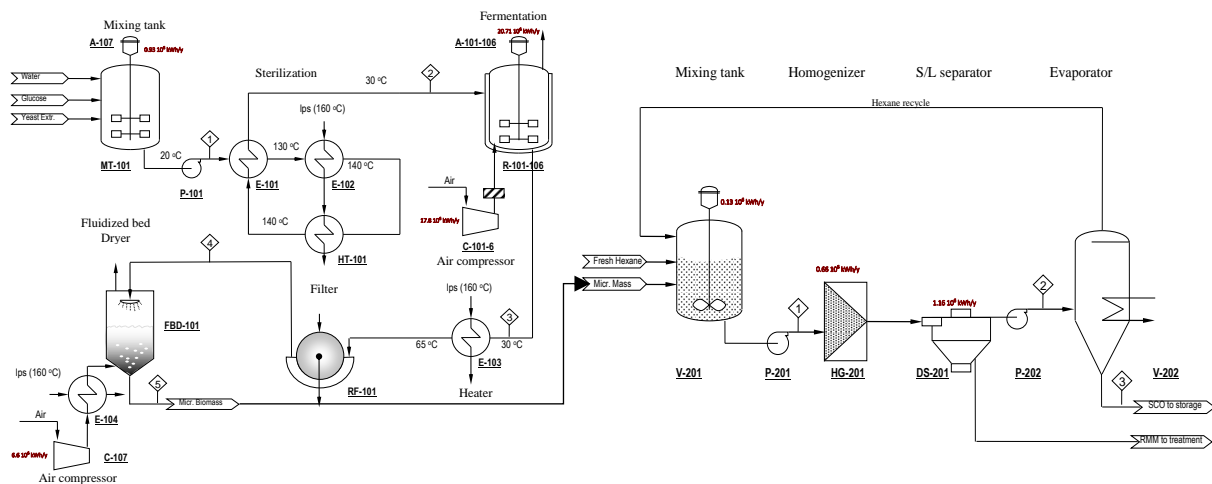
ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Ένα τυπικό διάγραμμα ροής της διαδικασίας για τη βιοτεχνολογική διεργασία για SCO που προέρχεται από ζυμομύκητες παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Η διαδικασία μπορεί να χωριστεί σε δύο περιοχές: περιοχή 100 (upstream) και περιοχή 200 (downstream).

Η περιοχή 100 αποτελεί το τμήμα της παραγωγής του SCO μέσω διεργασίας ζύμωσης. Η πηγή άνθρακα (γλυκόζη) και τα θρεπτικά συστατικά αναμειγνύονται στο δοχείο V-101 και μετά αποστειρώνονται σε εναλλάκτες θερμότητας E-101, E-102 και σωλήνα συγκράτησης (HT-101). Το αποστειρωμένο μίγμα τροφοδοτείται στον βιοαντιδραστήρα μαζί με τον εμβολιασμό. Στη συνέχεια, ο παραγόμενος ζυμός αερίζεται συνεχώς, αναδεύεται και ψύχεται, σε λειτουργία fed-batch μέχρι την ολοκλήρωση της παραγωγής SCO και έπειτα ο ζυμός θερμαίνεται (εν. θερμότητας E-103) με σκοπό την απενεργοποίηση των ενζύμων. Η περιοχή 100 συμπληρώνεται από ένα περιστροφικό φίλτρο κενού όπου η μικροβιακή μάζα ανακτάται και στη συνέχεια ξηραίνεται σε ξηραντήρα ρευστοποιημένης κλίνης. Το τελικό προϊόν στη συνέχεια οδηγείται στο τμήμα ανάκτησης (downstream) όπου λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός και τελικός εμπλουτισμός του SCO. Η ξηρή μικροβιακή μάζα στη συνέχεια αναμιγνύεται με εξάνιο στο δοχείο ανάμιξης V-201 και τροφοδοτείται σε έναν ομογενοποιητή (HG-201) ο οποίος διασπά τα κύτταρα και καθιστά το έλαιο αναμείξιμο με το διαλύτη. Χρησιμοποιείται ένας φυγοκεντρικός διαχωριστής (DS-201) για την απομάκρυνση της υπολειμματικής μικροβιακής μάζας και η διαδικασία τελικά ολοκληρώνεται διενεργώντας διαχωρισμό φάσεων σε μια δεξαμενή (V-202) όπου ο πτητικός διαλύτης ανακτάται θερμικά και ανακυκλώνεται ενώ παράγεται SCO σε υψηλή καθαρότητα.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι υπολογισμοί του κόστους αγοράς εξοπλισμού και του κόστους εγκατεστημένου εξοπλισμού για ετήσια δυναμικότητα 10 kt/έτος συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται συνοπτικά η κατανάλωση των βοηθητικών παροχών. Το κόστος του εγκατεστημένου εξοπλισμού εκτιμάται σε Μ\$21.7 και το κόστος πάγιου κεφαλαίου (FCI) εκτιμάται στη συνέχεια ότι είναι FCI=Μ\$26. Το κόστος των βοηθητικών παροχών (C_{UT}) μπορεί να ληφθεί λαμβάνοντας την τιμή για την ηλεκτρική ενέργεια (0,06 \$/kWh) και τον ατμό χαμηλής πίεσης (30 \$/t) και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του Πίνακα 1 ($C_{UT} = \text{Μ}\$3.68$). Το κόστος άμεσης εργασίας (C_{OL}) καθορίζεται με βάση τον εκτιμώμενο αριθμό εργαζομένων (26 εργαζόμενους) $C_{OL} = \text{Μ}\$1.17$. Το εκτιμώμενο κόστος παραγωγής COM είναι Μ\$32.45 ή 3.245 δολάρια ανά κιλό παραγόμενου SCO. Η ελάχιστη τιμή πώλησης (MSP) εκτιμάται ότι είναι 3.655 \$/kg SCO.

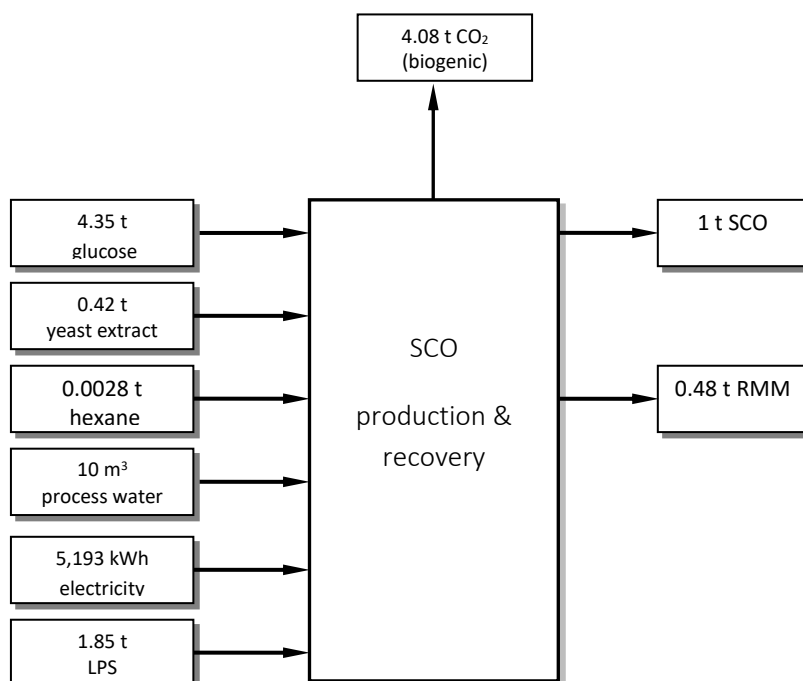


Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής της διεργασίας παραγωγής και ανάκτησης SCO.

Πίνακας 1. Συνοπτικά αποτελέσματα εκτίμησης κόστους πάγιου κεφαλαίου (FCI) και βοηθητικών παροχών.

Unit	Short description	C _p (M\$@2017)	#	F _{inst}	C _{inst} (M\$@2017)	10 ⁶ kWh/y	LPS (t/y)
AREA 100: BIOREACTION AND CELL DRYING							
R-101-6	594.4 m ³ , SS304	0.566	6	2	6.792	-	-
A-101-6	530 kW, SS316	0.557	6	1.5	5.013	20.71	-
C-101-6	456 kW, CS	0.221	6	1.6	2.122	17.80	-
MT-101	600 m ³ , SS304	0.382	1	1.8	0.382	-	-
A-107	530 kW, CS	0.557	1	1.5	0.557	0.93	-
E-101	550 m ² , SS316	0.203	1	2.2	0.447	-	-
E-102	32 m ² , SS316	0.032	1	2.2	0.070	-	2,788
HT-101	0.18 m×120 m, SS316	0.103	1	2.2	0.227	-	-
Subtotal fermentation section (increased by 10% to account for seed fermentors)					16.750	43.38	3,067
E-103	6.1 m ² , SS316	0.005	1	2.2	0.011	-	-
E-104	30 m ² , SS316	0.031	1	2.2	0.068	-	8,332
RF-101	57 m ² , CS	0.382	3	2.32	2.658	-	-
C-107	795 kW, CS	0.289	1	1.6	0.463	6.60	-
FBD-101	20 m ³ , CS	0.281	1	2.2	0.618	-	-
TOTAL AREA 100					20.568	49.98	11,399
AREA 200: SCO RECOVERY AND PURIFICATION							
V-201	13.75 m ³	0.070	1	3.5	0.245	0.13	-
HG-201	10.96 m ³ /h	0.188	1	2.06	0.387	0.66	-
DS-201	10.96 m ³ /h	0.124	1	1.3	0.161	1.16	-
V-202	5.5 m ²	0.126	1	2.5	0.315	-	7,158
TOTAL AREA 200					1.108	2.17	7,158
TOTAL					21.676	51.93	18,557

Ο κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι να παρουσιάσει, για πρώτη φορά στην ανοικτή βιβλιογραφία, την αποτίμηση κύκλου ζωής "cradle to gate" του SCO. Για το σκοπό αυτό, τα όρια της διεργασίας καθώς και οι εισροές και εκροές του συστήματος συνοψίζονται στο Σχήμα 2. Η λειτουργική μονάδα που επιλέγεται είναι ο 1 t παραγόμενου SCO. Σημειώνεται ότι για τη βιοτεχνολογική διεργασία παραγωγής SCO οι κύριες ροές εισερχόμενων υλικών είναι ο μονοσακχαρίτης που χρησιμοποιείται ως πηγή άνθρακα (4,35 t ανά τόνο SCO), yeast extract (0,42 t ανά τόνο SCO) και νερό (υπολογίζεται σε 10 t νερού ανά t του SCO).

**Σχήμα 2.** Όρια μελετώμενου συστήματος- Εισροές και εκροές της παραγωγής SCO από γλυκόζη

Οι εισερχόμενες ροές ενέργειας έχουν τη μορφή απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (5,193 kWh ανά τόνο SCO) και ατμού χαμηλής πίεσης (1.85 t ατμού ανά t του SCO). Υπάρχουν επίσης άμεσες εκπομπές στην ατμόσφαιρα που είναι κυρίως CO₂ (4.08 t βιογενείς εκπομπές CO₂ ανά τόνο SCO) που παράγονται από το μεταβολισμό των κυττάρων και το εξάνιο (2.8 kg εξανίου ανά t του SCO) λόγω διαφυγής εκπομπών κατά την ανάκτηση και αποθήκευση του διαλύτη. Η υπολειμματική μικροβιακή βιομάζα RMM (0.48 t βιομάζας ανά τόνο SCO) είναι το κύριο παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας.

Πίνακας 2. Συνοπτικά αποτελέσματα αποτίμησης κύκλου ζωής για την παραγωγή 1t SCO

MATERIAL OR ENERGY		Unit	Agricultural production	Processing of crop	SCO production unit	TOTAL	GWP _i (kg CO ₂ -eq/Unit)	GWP (kg CO ₂ -eq/functional Unit)
INPUTS								
ENERGY	Diesel	L	79.38			79.38	2.90	230.20
	Electricity from grid	kWh	657.89			657.89	0.576	378.95
	Electricity on-site	kWh			5,193	5,193.00	0.576	2,991.17
	Coal	MJ	-	304.50		304.50	0.32	97.44
	Low Pressure steam	kg			1,850	1,850	0.28	518.00
FERTILIZERS	Nitrogen fertilizer as N	kg	59.68			59.68	3.63	216.64
	Phosphorous fertilizer as P	kg	6.83			6.83	3.07	20.97
	Potassium fertilizer as K	kg	23.36			23.36	0.51	11.91
	Agrilime	kg	240.51			240.51	0.22	52.91
	Pesticide (active ingredient)	kg	1.08			1.08	13.70	14.80
CHEMICALS AND NUTRIENTS	Lime (CaO)	kg		15.23		15.23	0.22	3.35
	Phosphoric acid	kg		1.22		1.22	-	
	Flocculants	kg		0.0035		0.0035	-	
	Yeast Extract	kg			420	420	0.44	184.80
	Hexane	kg			2.80	2.8	-	
WATER	Irrigation water	m ³	1,869.42			1,869.42	-	
	Process Water	kg			10,500	10,500	-	
TRANSPORTATION	Transport/Shipping	tkm	1,898.90			1,898.90	0.0404	76.72
	Transport/Agricultural truck	tkm	84.12			84.12	0.1380	11.61
	Transport/Rigid truck	tkm	8.99			8.99	0.1380	1.24
	Transport/Rail	tkm	516.97			516.97	0.0157	8.12
	Transport/Road	tkm	136.25			136.25	0.1380	18.80
EMISSIONS								
EMISSIONS TO AIR	Direct emissions to air: N ₂ O	kg	6.18	0.335		6.52	265	1,656.25
	Direct emissions to air: CH ₄	kg	1.04	0.756		1.80	28	50.40
	Direct emissions to air: NO _x	kg	14.02			14.02	-	
	Direct emissions to air: SO _x	kg	0.47			0.47	-	
	Direct emissions to air: NH ₃	kg	1.62			1.62	-	
	Direct emissions to air: NMVOC	kg	2.34	0.007		2.35	3	7.05
	Direct emissions to air: CO ₂ biogenic	kg			4,080	4,080.00	0	
EMISSIONS TO WATER	Emissions to water: NO ₃	kg	16.82			16.82	-	
	Emissions to water: P	kg	0.86			0.86	-	
	Emissions to water: pesticide	kg	0.0136			0.0136	-	
TOTAL non-biogenic kg CO₂-eq/t SCO								6,551.33
OUTPUTS (PRODUCT AND CO-PRODUCTS)							CO ₂ -eq avoided	
PRODUCT	SCO	kg			1,000	1,000		
CO-PRODUCTS	Residual microbial mass	kg			480	480	-0.44	-211.2
	Low pressure steam	kg		18,270		18,270	-0.28	-5,115.6
TOTAL after displacement non-biogenic kg CO₂-eq/t SCO								1,224.5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζεται μία λεπτομερής οικονομική και ανάλυση αποτυπώματος άνθρακα. Μετά τον λεπτομερή σχεδιασμό και τον υπολογισμό του κόστους της γενικής διαδικασίας, το FCI της συνολικής διαδικασίας υπολογίζεται ότι είναι περίπου Μ\$26. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι το FCI στο τμήμα παραγωγής (upstream) οφείλεται στο κόστος αγοράς των βιοαντιδραστήρων, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος ανάδευσης και αερισμού, το οποίο ανέρχεται στο 60% του συνολικού κόστους. Η λεπτομερής ανάλυση LCA δείχνει ότι οι εκπομπές GHG είναι σημαντικά υψηλότερες σε σύγκριση με προηγούμενες μελέτες αποτίμησης κύκλου ζωής για τα φυτικά έλαια και υπολογίζεται ότι είναι 6,551 kg CO₂-eq/t SCO. Έτσι, είναι προφανές ότι η παραγωγή μικροβιακού ελαίου από ελαιογόνους μικροοργανισμούς δεν είναι περιβαλλοντικά επικερδής σε σύγκριση με εκείνες από καλλιέργειες φυτών και χρειάζεται περαιτέρω έρευνα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου «INVALOR: Ερευνητική Υποδομή Αξιοποίησης Αποβλήτων και αειφόρου διαχείρισης Φυσικών πόρων» (MIS 5002495) που υλοποιείται στο πλαίσιο της Δράσης «Ενίσχυση της Υποδομής Έρευνας και Καινοτομίας», που χρηματοδοτείται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» (ΕΣΠΑ 2014-2020) και συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης). Ο Νικόλαος Μπονάτσος υποστηρίζεται από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) και το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛΙΔΕΚ) για την έρευνα αυτή.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Papanikolaou, S., Aggelis, G., Lipids of oleaginous yeasts. Part I: Biochemistry of single cell oil production. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 113, (2011), 1031–1051.
- [2] Ratledge C., Wynn J.P., The biochemistry and molecular biology of lipid accumulation in oleaginous microorganisms, *Adv. Appl. Microbiol.* 51,(2002), 1-51.
- [3] Koutinas, A.A., Vlysidis, A., Pleissner, D., Kopsahelis, N., Lopez Garcia, I., Kookos, I.K., Papanikolaou, S., Kwan, T.H., Lin, S.C. Valorization of industrial waste and by-product streams via fermentation for the production of chemicals and biopolymers. *Chem. Soc. Rev.* 43, (2014), 2587-2627.
- [4] Li Y.H., Zhao Z.B., Bai F.W., High density cultivation of oleaginous yeast *Rhodospiridium toruloides* Y4 in fed-batch culture. *Enz. Microb. Technol.*; (2007), 41:312–7
- [5] Koutinas, A.A., Chatzifragkou, A., Kopsahelis, N., Papanikolaou, S., Kookos, I.K. b., Design and techno-economic evaluation of microbial oil production as a renewable resource for biodiesel and oleochemical production, *Fuel* 116, (2014),566–577.