

ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΒΙΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ 1,4-ΒΟΥΤΑΝΟΔΙΟΛΗΣ ΑΠΟ ΑΠΟΒΛΗΤΗ ΒΙΟΜΑΖΑ

Δ. Τησαρχόντου¹, Ι. Κ. Κούκος^{1,2,*}

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

²Ερευνητική Υποδομή INVALOR, Πανεπιστημιούπολη Ρίο, Πάτρα, Ελλάδα

(*i.kookos@chemeng.upatras.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μη βιώσιμη διαχείριση των ορυκτών πρώτων υλών που οδήγησαν στην ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού και η σημαντική περιβαλλοντική επίπτωση που συνεπάγεται η αξιοποίηση ορυκτών πόρων έχουν οδηγήσει στην ανάγκη ανάπτυξης βιώσιμων τεχνολογιών παραγωγής χημικών και ενέργειας. Στην κατεύθυνση αυτή, η αξιοποίηση πρωτογενούς ή απόβλητης βιομάζας μέσω ενός βιώσιμου συστήματος βιο-διυλιστηρίων αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογική προσέγγιση στο πρόβλημα της αειφόρου διαχείρισης των φυσικών πόρων και της κυκλικής οικονομίας. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση της βιοτεχνολογικής παραγωγής 1,4-βουτανοδιόλης. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται μεθοδολογικά διαγράμματα ροής μιας πιθανής βιοδιεργασίας για την παραγωγή της 1,4-βουτανοδιόλης και στην συνέχεια υπολογίζεται το λειτουργικό κόστος. Η μελέτη ολοκληρώνεται με την αποτίμηση του αντίστοιχου επενδυτικού σχεδίου και την εκτίμηση του αποτυπώματος άνθρακα της παραγωγικής διεργασίας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η 1,4-βουτανοδιόλη αποτελεί σημαντικό ενδιάμεσο χημικό προϊόν και πρώτη ύλη για την παραγωγή πλαστικών, διαλυτών και συνθετικών ινών. Οι πολλαπλές πρόσφατες εφαρμογές της οδήγησαν σε σημαντική αύξηση στην εγκατεστημένη παραγωγικότητα της 1,4-βουτανοδιόλης στην Β. Αμερική, Ευρώπη και Κίνα. Η συνολικά παραγόμενη ποσότητα 1,4-βουτανοδιόλης ξεπέρασε τους 3350 kt/y το έτος 2015 και οι προβλέψεις αναφέρουν πιθανότητα σημαντικής αύξησης τα επόμενα χρόνια. Όσον αφορά στην τιμή της 1,4-βουτανοδιόλης έχουν αναφερθεί σχετικά χαμηλές τιμές 1.73-1.76 \$/kg (γ' τρίμηνο 2015) αλλά και υψηλές που προσεγγίζουν τα 3 \$/kg. Οι σημαντικότερες εταιρείες παραγωγοί 1,4-βουτανοδιόλης είναι η BASF, η Invista, η LyondellBasell, η Dairen Chemical Corporation, η Mitsubishi Chemical και η Markor Chemicals.

Η 1,4-βουτανοδιόλη παράγεται σήμερα^[1] με πρώτη ύλη κυρίως το ακετυλένιο (το οποίο παράγεται από λιγνίτη, νάφθα ή φυσικό αέριο) με την κλασική "τεχνολογία Reppe". Εναλλακτική μέθοδος παραγωγής χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη το προπυλένιο με ενδιάμεση μετατροπή του σε προπυλενοξείδιο ή 2-προπεν-1-όλη. Η παραγωγή μέσω μηλεϊνικού ανυδρίτη με τη "διεργασία Davy" αναπτύχθηκε πρόσφατα και χρησιμοποιείται, κυρίως από εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην Κίνα και στην Μέση Ανατολή. Οι παραπάνω τεχνολογίες χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος παραγωγής που κυμαίνεται μεταξύ 1.9 \$/kg και 3.3 \$/kg και εξάρτηση από ορυκτές πρώτες ύλες με ευμετάβλητες τιμές και σημαντικές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.

Η παραγωγή 1,4-βουτανοδιόλης από ανανεώσιμες πρώτες ύλες έχει πρόσφατα εξεταστεί από εταιρίες όπως η Nexant Chemsystems, η Myriant και κυρίως από την Genomatica. Η τελευταία έχει μάλιστα προχωρήσει στην κατασκευή πιλοτικών μονάδων δυναμικότητας μερικών χιλιάδων τόνων 1,4-βουτανοδιόλης/έτος αλλά και σε σύμπραξη με την Tate & Lyle και την BASF^[2].

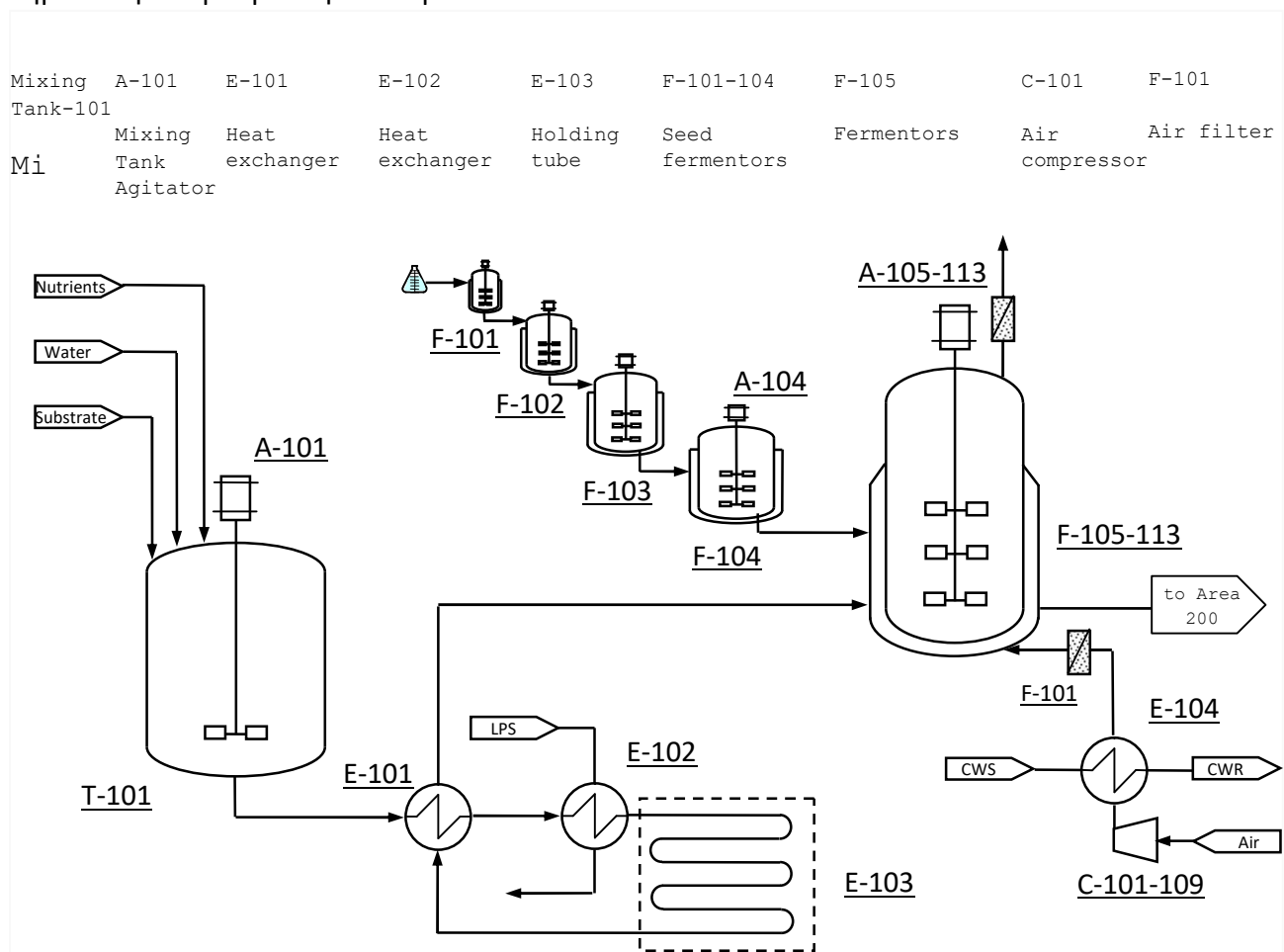
Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι, σε πρώτο στάδιο, η σύνθεση κατάλληλου διαγράμματος ροής για την βιοτεχνολογική παραγωγή 1,4-βουτανοδιόλης από μίγμα σακχάρων με γενετικά τροποποιημένο στέλεχος του *Escherichia coli*. Στοιχεία για την απόδοση της βιομετατροπής έχουν σχετικά πρόσφατα παρουσιαστεί από την Genomatica^[2] και συνοδεύονται από γενικά στοιχεία

που αφορούν στην δομή του συστήματος παραγωγής και ανάκτησης του προϊόντος. Η διαθεσιμότητα των στοιχείων αυτών καθιστά δυνατή την εκτίμηση του κόστους παραγωγής της διεργασίας, τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής πώλησης αλλά και την αποτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

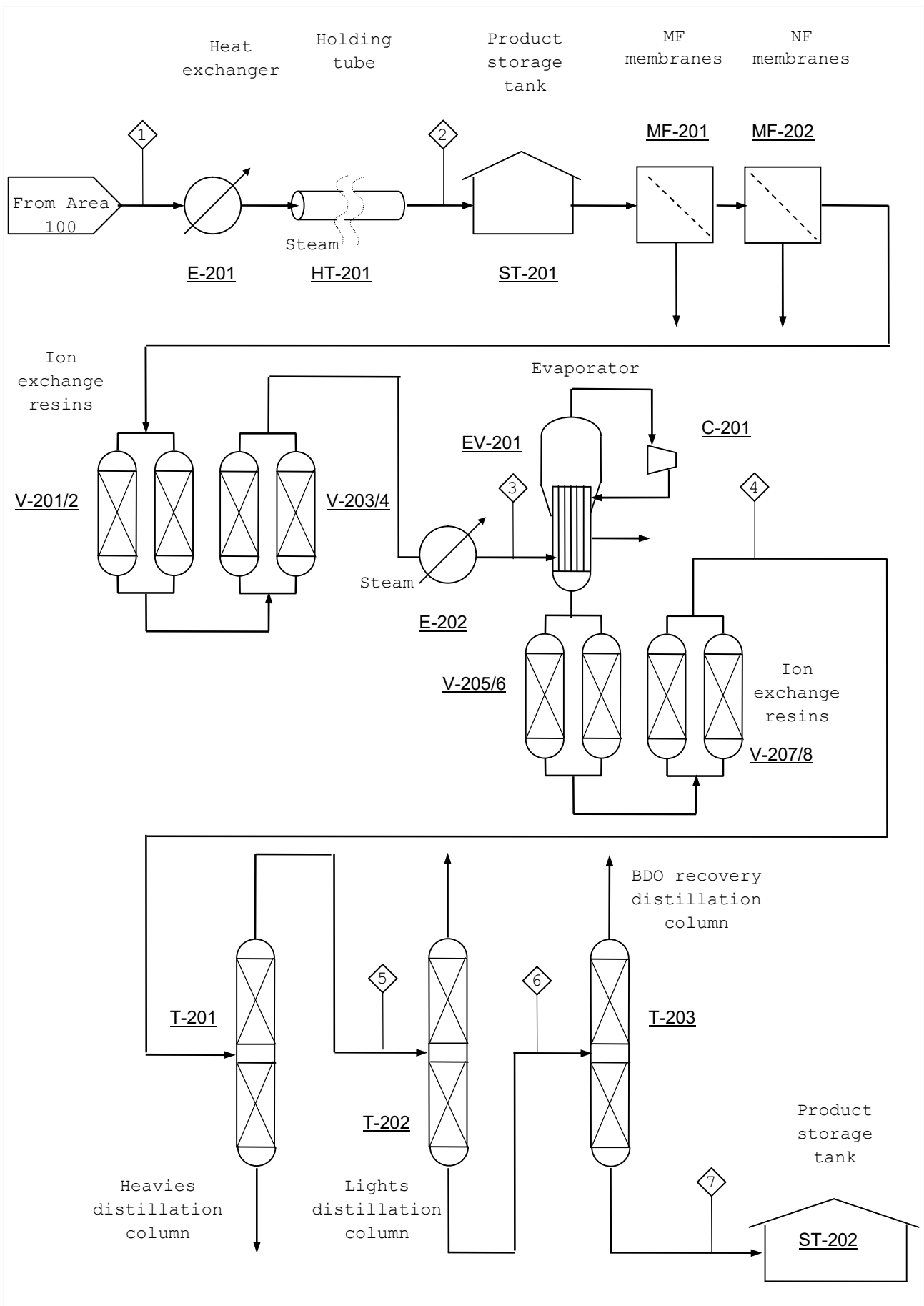
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το μεθοδολογικό διάγραμμα ροής του τμήματος βιοτεχνολογικής παραγωγής της 1,4-βουτανοδιόλης. Τα θρεπτικά συστατικά αναμιγνύονται με την πηγή άνθρακα (γλυκόζη ή μίγμα σακχάρων) στο δοχείο T-101 και στην συνέχεια το μίγμα αποστειρώνεται στους εναλλάκτες θερμότητας E-101, E-102 και στον αυλό κατακράτησης E-103. Παράλληλα, παρασκευάζεται το εμβόλιο μέσω συστοιχίας βιοαντιδραστήρων αυξανόμενου μεγέθους (F-101-104). Τα θρεπτικά συστατικά, η πηγή άνθρακα και το εμβόλιο προστίθενται σε αντιδραστήρα μεγάλου όγκου στον οποίο, σε αυστηρά στείρες και ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και pH και χαμηλό αερισμό (μικρο-αερόβια διεργασία), πραγματοποιείται η βιοτεχνολογική παραγωγή της 1,4-βουτανοδιόλης από γενετικά τροποποιημένο στέλεχος του *E. coli*.

Το ρεύμα προϊόντος από τον βιοαντιδραστήρα τροφοδοτείται στο σύστημα ανάκτησης και εξευγενισμού της 1,4-βουτανοδιόλης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Αρχικά, το ρεύμα προϊόντος θερμαίνεται ελαφρώς σε εναλλάκτη θερμότητας (E-201) και διατηρείται σε υψηλή σχετικά θερμοκρασία στον αυλό κατακράτησης, έτσι ώστε να απενεργοποιηθούν τα ένζυμα. Στη συνέχεια, το μίγμα των παραγόμενων προϊόντων αποθηκεύεται προσωρινά (ST-201) πριν τροφοδοτηθεί σε συστήματα μεμβρανών (MF-201 & MF-202) για την απομάκρυνση των στερεών. Το ρεύμα που προκύπτει, αφού επεξεργαστεί από σύστημα ιοντο-εναλλαγής, τροφοδοτείται σε σύστημα εξατμιστήρα με μηχανική ανασυμπίεση των ατμών (EV-201) όπου επιτυγχάνεται σημαντική απομάκρυνση του νερού.



Σχήμα 1. Διάγραμμα ροής διεργασίας βιοτεχνολογικής παραγωγής 1,4-βουτανοδιόλης.



Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής διεργασίας ανάκτησης και εξευγενισμού παραγόμενης 1,4-βουτανοδιόλης.

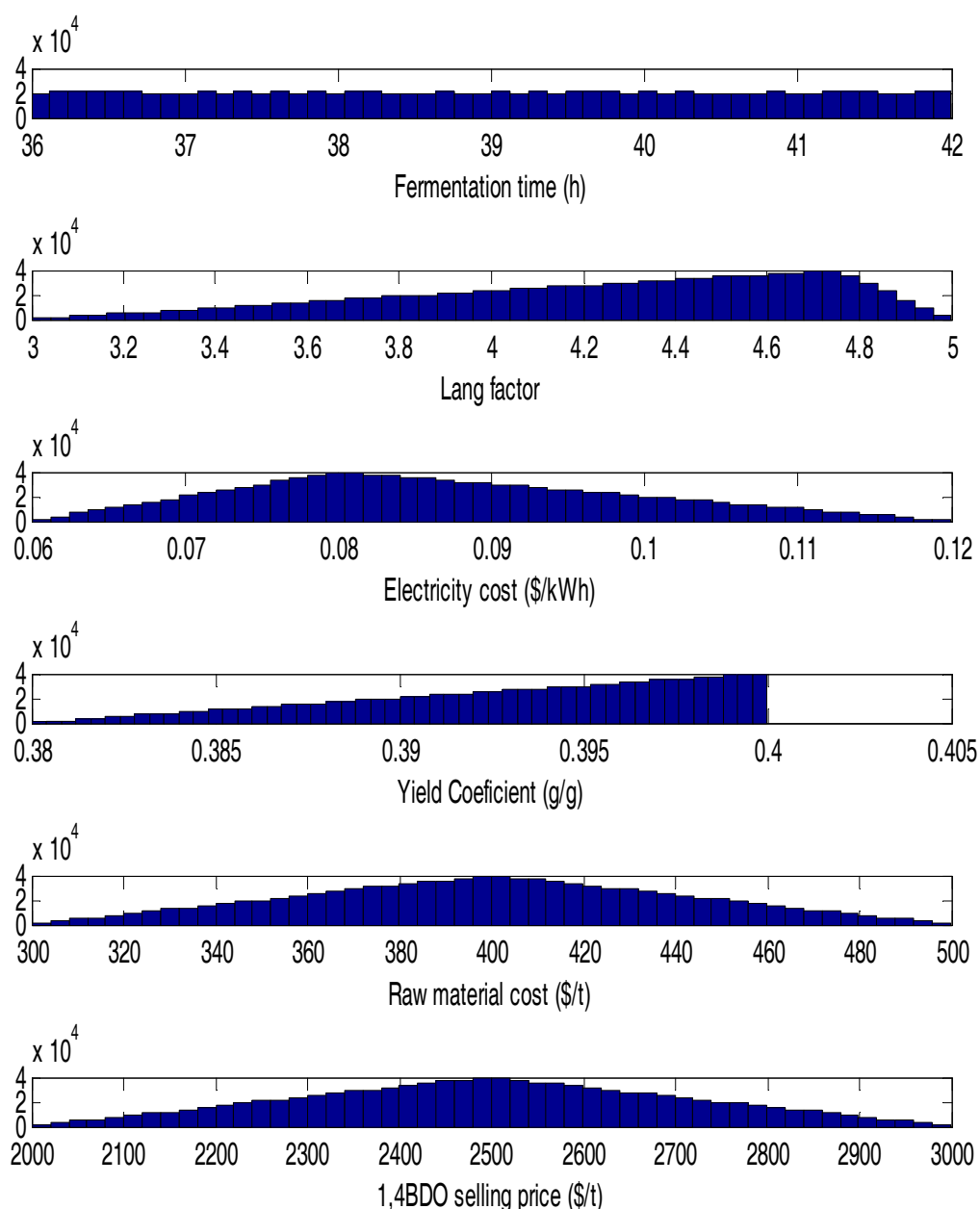
Το παραγόμενο ρεύμα που είναι εμπλουτισμένο σε προϊόν υφίσταται μια δεύτερη επεξεργασία από στήλες ιοντο-εναλλαγής πριν τροφοδοτηθεί σε σύστημα τριών στηλών κλασματικής απόσταξης (T-201, T-202 & T-203). Στην πρώτη αποστακτική στήλη (T-201) απομακρύνονται τα βαριά συστατικά ενώ στην δεύτερη (T-202) τα πτητικά συστατικά παρέχοντας ρεύμα πυθμένα (ρεύμα 6) το οποίο περιέχει γ-βουτυρολακτόνη και 1,4-βουτανοδιόλη. Ο διαχωρισμός των δύο συστατικών επιτυγχάνεται στην τρίτη στήλη απόσταξης (T-203) από όπου λαμβάνεται ως προϊόν βάσης η 1,4-βουτανοδιόλη με καθαρότητα >99.5%. Η διεργασία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 σχεδιάζεται στο λογισμικό^[3] GAMS, ενώ η διεργασία του Σχήματος 2 προσομοιώνεται στο εμπορικό προσομοιωτή UniSim της Honeywell.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Με βάση το διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στα Σχήματα 1 και 2 εκτελείται προκαταρκτική τεchnο-οικονομική ανάλυση για ετήσια δυναμικότητα 100 kt/y. Η επιλογή της υψηλής αυτής δυναμικότητας βασίστηκε στην εμπειρία, εφόσον σε δυναμικότητες μεγαλύτερες των 30-50 kt/y επιτυγχάνεται ελάχιστο κόστος παραγωγής. Η εκτίμηση των διαφόρων στοιχείων κόστους (κόστος παγίου κεφαλαίου, κόστος πρώτων υλών και εργατικών και κόστος βοηθητικών παροχών) πραγματοποιείται με μεθόδους που αναφέρονται λεπτομερώς στην βιβλιογραφία^[4]. Με βάση τις μεθόδους αυτές εκτιμάται ότι για την δυναμικότητα των 100 kt/y το πάγιο κεφάλαιο ανέρχεται σε M\$198, το κόστος των πρώτων υλών σε M\$108.75/y, το κόστος της άμεσης εργασίας σε M\$1.755/y και το κόστος των βοηθητικών παροχών σε M\$25.05/y. Με βάση ανάλυση των χρηματικών ροών (που λαμβάνουν χώρα σε 30 έτη λειτουργίας με ελάχιστο αποδεκτό ρυθμό επιστροφής 10% και φορολογία επιχειρήσεων στο 35%) προκύπτει ελάχιστη τιμή πώλησης της 1,4-βουτανοδιόλης ίση με 2.34 \$/kg (το έτος των σχετικών υπολογισμών είναι το 2018 με δείκτη Chemical Engineering Cost Index=603.1). Η τιμή αυτή είναι εντός των προαναφερόμενων ορίων κόστους προμήθειας της πετροχημικά παραγόμενης 1,4-βουτανοδιόλης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης για τιμή πώλησης της 1,4-βουτανοδιόλης ίσης με 2.5 \$/kg ανέρχεται σε M\$95.7. Τα στοιχεία αυτά είναι ενθαρρυντικά για την οικονομική βιωσιμότητα του επενδυτικού σχεδίου αλλά αποτελούν σημειακές εκτιμήσεις.

Μια περισσότερο χρήσιμη και διαφωτιστική ανάλυση βασίζεται στην εκτίμηση του επενδυτικού κινδύνου, η οποία μπορεί να στηριχτεί στην μεθοδολογία Monte-Carlo. Στην μεθοδολογία αυτή γίνεται, καταρχήν, αναγνώριση όλων των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην ανάλυση χρηματικών ροών ενός επενδυτικού σχεδίου και οι οποίες συνοδεύονται από σημαντική αβεβαιότητα. Στην συνέχεια εκτιμάται η ευαισθησία της καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ) ως προς τις αβέβαιες παραμέτρους και επιλέγονται οι παράμετροι εκείνες οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την καθαρά παρούσα αξία. Για τις παραμέτρους αυτές πραγματοποιείται υπόθεση που αφορά στην στατιστική κατανομή που ενδεχομένως ακολουθούν και εκτελείται δειγματοληψία για ικανοποιητικά μεγάλο αριθμό επαναλήψεων/προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων υπόκεινται σε στατιστική ανάλυση και εξαγονται συμπεράσματα που αφορούν στην πιθανότητα εμφάνισης οικονομικής ζημίας από την υλοποίηση της εξεταζόμενης επένδυσης^[4].

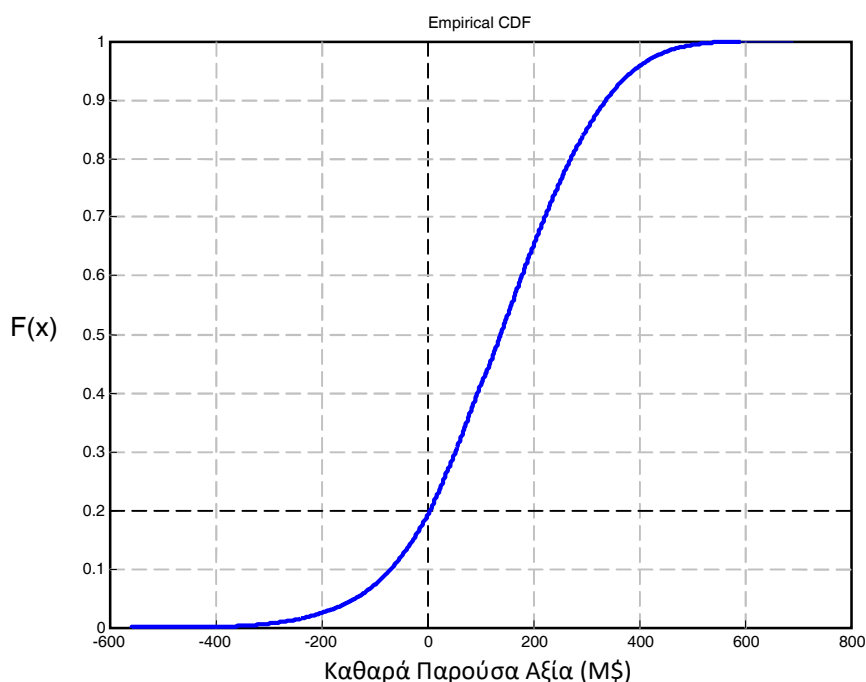
Μια τέτοια ανάλυση πραγματοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία. Αναγνωρίστηκαν οι ακόλουθοι παράμετροι ως σημαντικές παράμετροι για την οικονομική απόδοση της εξεταζόμενης επένδυσης: ο χρόνος ζύμωσης, ο συντελεστής Lang υπολογισμού του παγίου κεφαλαίου, το μοναδιαίο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και της πηγής άνθρακα, ο συντελεστής απόδοσης του υποστρώματος σε προϊόν και η τιμή πώλησης της 1,4-βουτανοδιόλης. Οι εμπειρικές κατανομές που επιλέχθηκαν για τις παραμέτρους αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Στη συνέχεια έγιναν 10⁶ προσομοιώσεις της διεργασίας και προέκυψε η αθροιστική κατανομή της καθαρής παρούσας αξίας του Σχήματος 4. Σύμφωνα με το Σχήμα 4, για τις κατανομές των αβέβαιων παραμέτρων του Σχήματος 3, η πιθανότητα θετικής ΚΠΑ είναι μεγαλύτερη από 80%.



Σχήμα 3. Εμπειρικές κατανομές των αβέβαιων παραμέτρων που εμφανίζονται στην ανάλυση χρηματικών ροών της βιοτεχνολογικής παραγωγής 1,4-βουτανοδιόλης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η τεchnο-οικονομική ανάλυση διεργασίας βιοτεχνολογικής παραγωγής 1,4-βουτανοδιόλης από ανανεώσιμες πρώτες ύλες. Η ελάχιστη τιμή πώλησης που υπολογίστηκε για ετήσια δυναμικότητα 100 kt 1,4-βουτανοδιόλης είναι συγκρίσιμη με την εμπορική τιμή της βιοτεχνολογικά παραγόμενης, ενώ η αποτίμηση του επενδυτικού κινδύνου έδειξε ότι η πιθανότητα θετικού οικονομικού αποτελέσματος (ΚΠΑ) είναι μεγαλύτερη του 80%. Τα παραπάνω στοιχεία καταδεικνύουν το γεγονός ότι η βιοτεχνολογική παραγωγή της 1,4-βουτανοδιόλης μπορεί να είναι ανταγωνιστική της παραγόμενης από ορυκτές πρώτες ύλες.

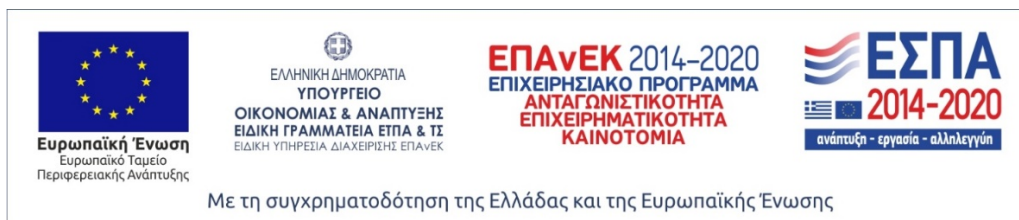


Σχήμα 4. Εμπειρική κατανομή καθαρής παρούσας αξίας της διεργασίας βιοτεχνολογικής παραγωγής 1,4-βουτανοδιόλης.

Όσον αφορά στις εκπομπές αερίων και στο δυναμικό υπερθέρμανσης (GWP) μπορεί να αναφερθεί εν συντομία ότι όταν τα καταναλισκόμενα σάκχαρα προέρχονται από ζαχαροκάλαμο τότε οι εκπομπές ανέρχονται σε περίπου 2.4 kg CO₂-eq/kg 1,4-βουτανοδιόλη και αυξάνονται σε 4.6 CO₂-eq/kg 1,4-βουτανοδιόλη όταν τα σάκχαρα προέρχονται από άμυλο καλαμποκιού. Η λεπτομερής ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων θα παρουσιαστεί στη διάρκεια του συνεδρίου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Πράξης «Ερευνητική Υποδομή για την Αξιοποίηση Αποβλήτων και Αειφόρου Διαχείρισης Φυσικών Πόρων–INVALOR» (MIS 5002495) που εντάσσεται στη Δράση «Ενίσχυση Υποδομών Έρευνας και Καινοτομίας» και χρηματοδοτείται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2014-2020, με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης).



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <https://www.chemanager-online.com> , BDO: The Pacemaker Stumbles, article by Klaus Jopp.
- [2] A. Burgard, M.J. Burk, R. Osterhout, S. Van Dien, H. Yim, Cur. Opin. Biotechn. 42 (2016) 118-125.
- [3] E. Dheskali, K. Michailidi, A. Machado de Castro, A.A. Koutinas, I. K. Kookos, Biores.Techn., 224 (2017) 509-514.
- [4] Ι. Κ. Κούκος, Εισαγωγή στο Σχεδιασμό Χημικών Εργοστασίων, 2η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2019.