



**Harnessing the potential of  
biological CO2 capture for the  
Circular Economy**



Co-funded by the  
European Commission  
within the Horizon 2020  
programme

# Report:

# CooCE Handbook methodologies and tools

## GREEK VERSION/ ELLINIKI EKDOSI

### Project information

Project Acronym	CooCE
Full Title	Harnessing potential of biological CO2 capture for Circular Economy
Project Number	327331
Grand Agreement Number	691712
Programme	ACT3 - Accelerating CCS Technologies
Start date	07/10/2021
Kick Off Meeting	29/11/2021
Website	<a href="https://cooce.eu/">https://cooce.eu/</a>
ACT Project Officer	Ragnhild Rønneberg
Project Manager	Prof. Tomas Morosinotto
Project Administrator	Prof. Luigi Bubacco

---

This project is part of the ACT - Accelerating CCS Technologies supported by the Research Council of Norway, Research and Innovation programme

### Document information

<b>Deliverable</b>	Handbook CooCE methods and tools
<b>Work Package:</b>	WP5
<b>Issue date:</b>	31 December 2024
<b>Due date:</b>	30 November 2024
<b>Nature:</b>	R – Report
<b>Dissemination level:</b>	PU - Public
<b>Lead Beneficiary:</b>	Imperial College
<b>Main authors:</b>	Rocio Diaz-Chavez, Yara Evans, Sara Giarola, Pablo Basterrechea, Ioannis Zacharopoulos, Laura Treu, Maria Silvia Morlino, Maria Gaspari, Bettina Müller, Isabella Porqueddu and Sara Agostini
<b>Reviewer(s):</b>	

## Document history

Version	Date	Responsible	Changes
1.0	20/11/2024	Rocio Diaz-Chavez	

### LEGAL NOTICE

Neither the Research Council of Norway Foundation nor any person acting on behalf of the Foundation is responsible for the use, which might be made, of the following information. The views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily reflect those of the Research Council of Norway Foundation.



Department for  
Energy Security  
& Net Zero

UK participants in ACT ERA-NET COFUND Horizon 2020 Project (CooCE) GA. 691712 is supported by The Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ) grant number 415000049187 (Imperial College London). Project CooCE is funded by the European Union under Horizon H2020 Grant Agreement No. 691712. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or DESNZ. Neither the European Union nor DESNZ can be held responsible for them.

## Πίνακας περιεχομένων

1. Η εργαλειοθήκη	4
2. Θέματα εργαλειοθήκης	5

## 1. Η εργαλειοθήκη

Στόχος της παρούσας έκθεσης είναι να παρουσιάσει το **εγχειρίδιο** του CooCE με τη μορφή **εργαλειοθήκης**. Στόχος του είναι να παρουσιάσει σε ταχεία μορφή τις βασικές μεθόδους, εργαλεία και διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τις διάφορες οδούς της πλατφόρμας CooCE. Η εργαλειοθήκη έχει ως στόχο να επιτρέψει στους βιομηχανικούς φορείς και άλλους ενδιαφερόμενους φορείς να εξετάσουν τη σκοπιμότητα και τις διαδικασίες για την παραγωγή των κύριων προϊόντων στο πλαίσιο της έννοιας CooCE.

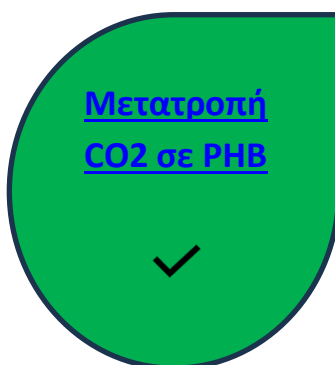
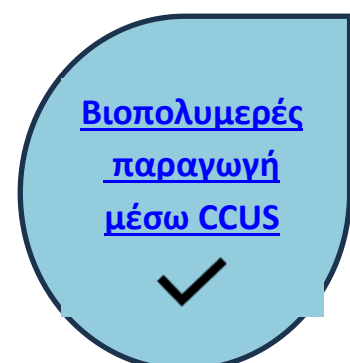
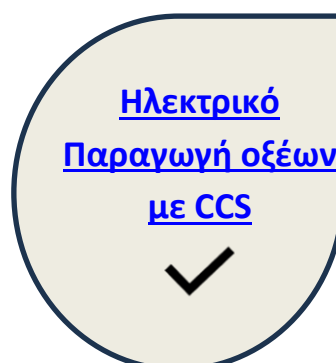
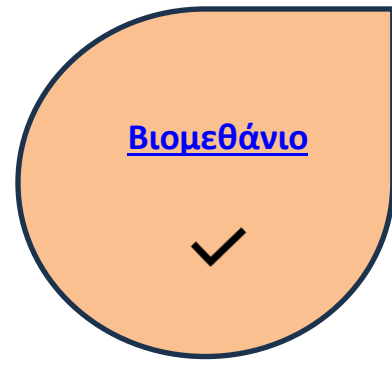
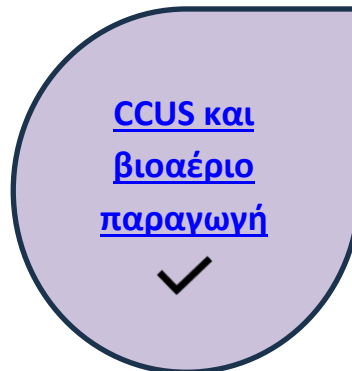
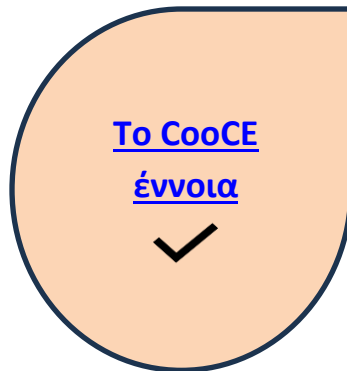
Η εργαλειοθήκη παρουσιάζει επίσης τα βασικά αποτελέσματα του έργου CooCE ως μέρος των στόχων αξιοποίησής του. Το εγχειρίδιο ή η εργαλειοθήκη εξετάζει εννέα κύρια θέματα για την ταχεία πρόσβαση των χρηστών όσον αφορά την οριοθέτηση του πεδίου εφαρμογής των δικών τους δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την κυκλική οικονομία και τις δυνατότητες χρήσης διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται από διαφορετικές πηγές, στην προκειμένη περίπτωση μονάδες βιοαερίου. Κάθε θέμα περιέχει μια σειρά ζωντανών συνδέσμων που επιτρέπουν στο χρήστη να έχει πρόσβαση σε διάφορα έγγραφα στην ιστοσελίδα του CooCE και σε άλλη σχετική βιβλιογραφία.

Τα θέματα που παρουσιάζονται είναι:

1. Η έννοια του CooCE
2. CCUS και παραγωγή βιοαερίου
3. Βιομεθάνιο
4. Ηλεκτρικό οξύ
5. Ηλεκτρικό οξύ με αναβάθμιση βιοαερίου
6. Παραγωγή βιοπολυμερών μέσω CCUS
7. Κυκλική μετατροπή CO<sub>2</sub> σε PHB
8. Μοντελοποίηση εφοδιαστικής αλυσίδας
9. Αξιολόγηση της κοινωνικής βιωσιμότητας

Το εγχειρίδιο/εργαλειοθήκη δεν προορίζεται να αντικαταστήσει τις πλήρεις περιγραφές μεθόδων, αλλά αντίθετα να παρέχει έτοιμη και εύκολη πρόσβαση σε διάφορες μεθόδους, πληροφορίες και πόρους. Κάθε ενότητα παρουσιάζει αναφορές και συνδέσμους. Το εγχειρίδιο διατίθεται επίσης στα ελληνικά, ιταλικά και δανικά. Κάνοντας κλικ σε κάθε ενότητα, ο χρήστης μπορεί να μεταβεί απευθείας σε αυτήν την ενότητα και κάνοντας κλικ στην εργαλειοθήκη θα επιστρέψει η σελίδα όλων των ενότητων.

# TOOLKIT



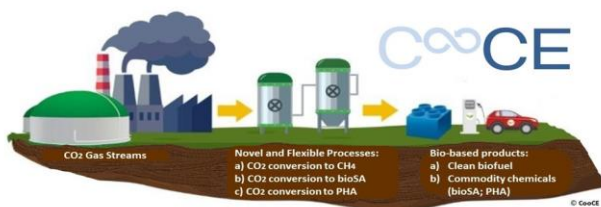


Η έννοια του CooCE στοχεύει να συμβάλει στη μετάβαση προς μια οικονομία αποδοτική στους πόρους, χαμηλού άνθρακα και ανθεκτική στην κλιματική αλλαγή. Θα το επιτύχει προσφέροντας στις βιομηχανίες έναν τρόπο αποανθρακοποίησης των δραστηριοτήτων τους μέσω ενός χαρτοφυλακίου διαφοροποιημένων και ευέλικτων τεχνολογιών CCUS, οι οποίες μπορούν επίσης να βοηθήσουν στη μείωση της εξάρτησης από ορυκτούς πόρους. Οι τεχνολογίες CCUS μετατρέπουν το CO<sub>2</sub> σε πολύτιμα εμπορικά προϊόντα ή υλικά (π.χ. υλικά κατασκευής, καύσιμα, χημικά και πλαστικά) ή σε πρώτες ύλες για περαιτέρω βιομηχανική επεξεργασία. Στην έννοια του CooCE, το CO<sub>2</sub> μετατρέπεται σε (τελικά ή ενδιάμεσα) βιοπροϊόντα χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνολογίες CCUS (Σχήμα 1), οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

Η υψηλής καθαρότητας βιομεθάνιο (CH<sub>4</sub>>95%) παράγεται μέσω της υδρογόνωσης του CO<sub>2</sub>. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την αποθήκευση υβριδικής ενέργειας στον τόπο: αξιοποιεί την περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας σε υδρογόνο και παράγει βιομεθάνιο. Το βιομεθάνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως υγρό (ισοδύναμο με το LNG και που μπορεί να προσφέρει μια χρήσιμη εναλλακτική για τη ναυσιπλοΐα) είτε ως συμπιεσμένο αέριο (ισοδύναμο με το CNG) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα περισσότερα οχήματα και να εισαχθεί στο δίκτυο φυσικού αερίου.

Το βιοσουλφονικό οξύ (BioSA) παράγεται από ζύμωση του βιοαερίου μαζί με μια πρώτη ύλη πλούσια σε υδατάνθρακες (συνήθως από ρεύματα αποβλήτων). Αυτή η τεχνολογία θα εξαλείψει την ανάγκη χρήσης πρώτων υλών βιομάζας και θα αποφύγει τη χρήση γης για καλλιέργεια. Το BioSA αντικαθιστά εύκολα το ορυκτό βιομηχανικό σουλφονικό οξύ. Το σουλφονικό οξύ χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλήθους εμπορευμάτων στους χημικούς, τροφίμων, γεωργικούς και φαρμακευτικούς κλάδους. Η ζήτηση του προέρχεται από τη βιομηχανία προσωπικής φροντίδας, ποτών, πολυουρεθάνης και βιοπλαστικών.

Τα βιοπολυμερή (PHA) παράγονται μέσω βιοκαταλυτικών τεχνολογιών (βασισμένων στα *Cupriavidus necator* και *Synechocystis*) που χρησιμοποιούν πλούσια σε άνθρακα ρεύματα αποβλήτων, όπως το βιοαέριο. Αυτά τα βιοπολυμερή συσσωρεύονται ως υλικά αποθήκευσης μέσα στα κύτταρα των μικροοργανισμών, λειτουργώντας τόσο ως αποθεματικά άνθρακα όσο και ενέργειας. Τα PHA έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τα κοινά πλαστικά. Επιπλέον, είναι βιοσυμβατά και βιοδιασπώμενα. Παράγονται σε βιομηχανική κλίμακα για πολλά προϊόντα, όπως βιοπλαστικά για συσκευασίες, πρεβιοτικά και θρεπτικά συστατικά για ιατρικές εφαρμογές και βιοκρέμες για καλλυντικά.



Εικόνα 1: Η έννοια CooCE

Αναφορές/Σύνδεσμοι: CooCE. 20224. Harnessing potential of biological CO<sub>2</sub> capture for Circular Economy. <https://cooce.eu/>



## CCUS και βιοαέριο παραγωγή

[Toolkit](#)

Η Διεθνής Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) (2014) δήλωσε ότι ο κόσμος πρέπει να φτάσει σε μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μέχρι τα μέσα του αιώνα και σε αρνητικές εκπομπές αμέσως μετά, προκειμένου να μετριαστούν οι σοβαρές συνέπειες της κλιματικής θέρμανσης. Επομένως, δραστηριότητες όπως η ανακύκλωση του CO<sub>2</sub> βοηθούν στη μείωση των ανθρωπογενών εκπομπών, το CO<sub>2</sub> που εκπέμπεται καταστέλλεται και μετατρέπεται σε πολύτιμα χημικά, καύσιμα ή υλικά. Καθώς το CO<sub>2</sub> χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη σε πολλές βιομηχανίες, οι εταιρείες ενδιαφέρονται για το βιογενές CO<sub>2</sub>, μια φιλική προς το κλίμα πηγή CO<sub>2</sub>.

Το βιογενές CO<sub>2</sub> είναι διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που προκύπτει από την αποσύνθεση, πέψη ή καύση βιομάζας ή προϊόντων βιομάζας. Ανήκει στον «φυσικό βραχυπρόθεσμο κύκλο του άνθρακα». Αυτό το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> αφομοιώνεται από τη βιομάζα μέσω της φωτοσύνθεσης και στη συνέχεια επιστρέφει, ως βιογενές CO<sub>2</sub>, στην ατμόσφαιρα ή στο έδαφος, ανάλογα με τον τύπο μετατροπής και τη τελική χρήση της βιομάζας. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση Βιομάζας (EUBA, 2022), δεν υπάρχει συσσώρευση CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια του φυσικού βραχυπρόθεσμου κύκλου του άνθρακα, αντίθετα, η καύση ορυκτού διοξειδίου του άνθρακα που είναι αποθηκευμένο υπόγεια και προηγουμένως μη προσβάσιμο, απελευθερώνει επιπλέον CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα.

Πηγές βιογενούς CO<sub>2</sub> περιλαμβάνουν: την καύση στερεών, υγρών και αερίων καυσίμων βιομάζας, τη ζύμωση βιοαιθανόλης, την παραγωγή κρασιού και μπύρας και τη διαδικασία αναβάθμισης βιοαερίου στη βιομηχανία βιοαερίου, όπως στην περίπτωση του CooCE.

### CO<sub>2</sub> sources: biogas & exhaust gasses



lemvigbiogas.com



Σχήμα 1. Παραδείγματα πηγών CO<sub>2</sub> στο έργο CooCE

Υπάρχουν διάφορα μέτρα μετριασμού για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG), όπως η μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων (συμπεριλαμβανομένων του άνθρακα και του φυσικού αερίου), η βελτίωση των καυσίμων μεταφοράς με βιοκαύσιμα, η απομάκρυνση από τη χρήση ορυκτών καυσίμων για τις μεταφορές, η μείωση των εκπομπών από τον βιομηχανικό τομέα και η μείωση της αποδάσωσης και των εκπομπών από τη γεωργία, μεταξύ άλλων.

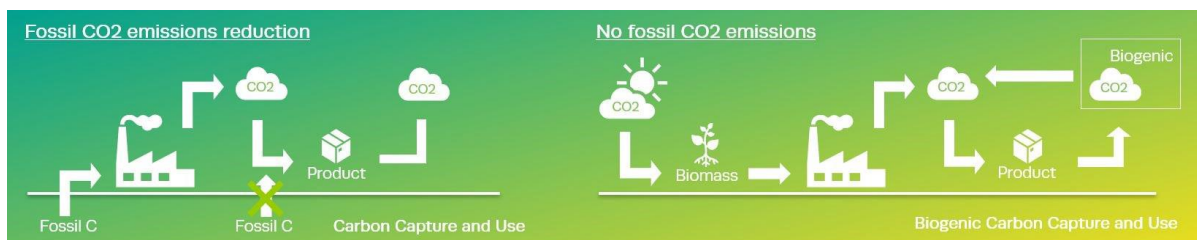
Μερικά από τα πιο πρόσφατα μέτρα περιλαμβάνουν εναλλακτικές μορφές μείωσης του eCO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως η δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα (CCS), η δέσμευση και αξιοποίηση διοξειδίου του άνθρακα (CCU), και η δέσμευση, αξιοποίηση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα (CCUS), όπως αυτή που χρησιμοποιείται στο έργο CooCE. Ορισμένοι ορισμοί από την Ευρωπαϊκή Ένωση Βιομάζας (EUBA, 2022) παρουσιάζονται παρακάτω:

**Δέσμευση και Αξιοποίηση Διοξειδίου του Άνθρακα ή CCU:** λύσεις που περιλαμβάνουν τη δέσμευση CO<sub>2</sub> για την αξιοποίησή του ως πρώτη ύλη για την παραγωγή καυσίμων, χημικών και υλικών. Χρησιμοποιώντας βιογενές CO<sub>2</sub>, πηγές χαμηλού άνθρακα ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μπορούν να αντικαταστήσουν τα ορυκτά καύσιμα και έτσι να μειώσουν τις καθαρές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Αυτές οι λύσεις είναι οι «βιο-CCU» και περιλαμβάνουν τις αρχές της βιώσιμης κυκλικής οικονομίας του άνθρακα, καθώς περιλαμβάνουν τη μείωση, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και αφαίρεση CO<sub>2</sub>.

**Βιο-Δέσμευση και Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα ή βιο-CCS** είναι όταν το βιογενές CO<sub>2</sub> δεσμεύεται και αποθηκεύεται μόνιμα υπόγεια σε μορφές γεωλογικής αποθήκευσης, όπως εξαντλημένα κοιτάσματα αερίου ή βαθιές αλμυρές δεξαμενές. Επιτρέπει στο CO<sub>2</sub> να αφαιρεθεί μόνιμα από την ατμόσφαιρα.

**Βιο-CCUS** αναφέρεται στο βιογενές CO<sub>2</sub> που αποθηκεύεται για μεγάλο χρονικό διάστημα σε νέο προϊόν, είτε υλικό κατασκευής είτε πλαστικά. Χρησιμοποιεί το βιογενές CO<sub>2</sub> για την παραγωγή νέων υλικών.

Όταν συγκρίνουμε την CCU με ορυκτό CO<sub>2</sub> και την CCU με βιογενές CO<sub>2</sub>, όπως στο παρακάτω διάγραμμα (EUBA, 2022), διαπιστώνεται ότι υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα της CCU με βιογενές CO<sub>2</sub>.



Σχήμα 2. Σύγκριση εκπομπών CO<sub>2</sub> από ορυκτά και μη ορυκτά (EUBA, 2022)

## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

1. Η πηγή του CO<sub>2</sub> (ορυκτό vs βιογενές).
2. Το προϊόν ή η υπηρεσία που αντικαθιστά το προϊόν με βάση το CO<sub>2</sub> και η αποφυγή εκπομπών που σχετίζονται με τη χρήση βιογενές CO<sub>2</sub>.
3. Η διάρκεια αποθήκευσης του άνθρακα του προϊόντος (προσωρινή vs μόνιμη).
4. Η ενεργειακή απόδοση και το αποτύπωμα άνθρακα για τη μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε άλλες μόρια.
5. Η κλίμακα της ευκαιρίας για τη χρήση CO<sub>2</sub>.

Οι δυνατότητες δέσμευσης CO<sub>2</sub> και η χρήση τους για άλλες αλυσίδες εφοδιασμού και προϊόντα εξηγούνται στην έννοια του CooCE. [To Imperial College](#) συνέβαλε σε διάφορα διεθνή *φόρα* εξηγώντας αυτές τις έννοιες. Πρόσθετες [έννοιες και βάση δεδομένων σχετικά με](#) το CCUS μπορείτε να βρείτε στον δικτυακό τόπο του CooCE, καθώς και στις [εθνικές πολιτικές για το CCUS](#).

## Βιβλιογραφικές αναφορές και σύνδεσμοι

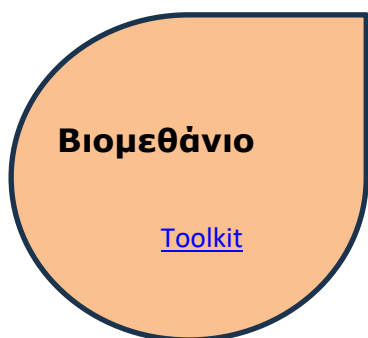
CooCE. 2024. Harnessing potential of biological CO<sub>2</sub> capture for Circular Economy.

<https://cooce.eu/>

Diaz-Chavez R and Muller B. 2024. "Biogenic CO<sub>2</sub> use and storage: Enhancing the circularity and climate benefits of biogas". GBEP webinar. <https://www.youtube.com/watch?v=p6bSd3PlSww&t=4s>

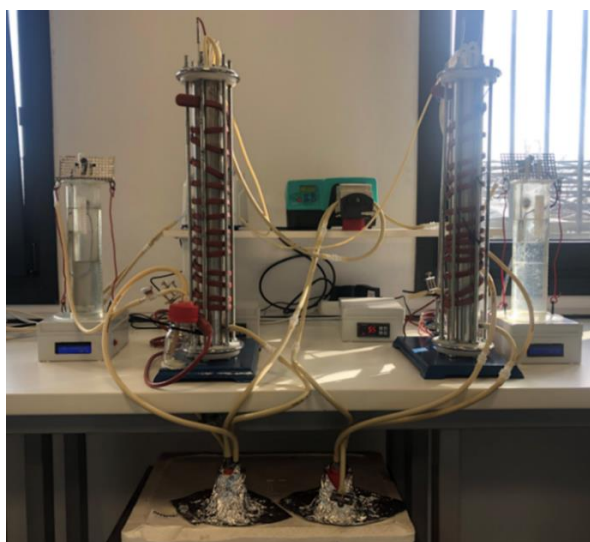
EUBA, 2022. EBA Statistical Report 2022. <https://www.europeanbiogas.eu/trashed-3/>

International Panel on Climate Change (IPCC) (2014). <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>



Το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) είναι ένα άχρωμο, άοσμο αέριο και το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Λόγω της ευρείας διαθεσιμότητάς του και της υψηλής ενεργειακής του περιεκτικότητας, το μεθάνιο χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανίες. Κύριες εφαρμογές του περιλαμβάνουν την παραγωγή ενέργειας, όπου καίγεται σε εργοστάσια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τη θέρμανση σε κατοικίες, επιχειρήσεις και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, καθώς και ως καύσιμο μεταφοράς υπό μορφή συμπιεσμένου ή υγροποιημένου φυσικού αερίου (CNG ή LNG). Το μεθάνιο μπορεί επίσης να παραχθεί βιολογικά μέσω της μετατροπής διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και υδρογόνου ( $\text{H}_2$ ) σε αυτό, μια διαδικασία γνωστή ως "βιομεθανιοποίηση". Αυτή η μετατροπή διευκολύνεται από εξειδικευμένους αναερόβιους μικροοργανισμούς, γνωστούς ως υδρογονοτροφικούς μεθανογόνους. Η διαδικασία χαρακτηρίζεται ως εξωγήνη όταν το  $\text{CO}_2$  προέρχεται από εξωτερικές πηγές (όπως καυσαέρια, βιοαέριο, συνθετικό αέριο κ.λπ.) και παρέχεται υδρογόνο στη υγρή φάση του αντιδραστήρα.

Στο πλαίσιο του έργου CooCE, ο [ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ](#) ηγήθηκε του [Πακέτου Εργασίας 2](#), το οποίο επικεντρώθηκε στη μελέτη της διαδικασίας βιομεθανιοποίησης και στη διαμόρφωση των ιδανικών συνθηκών. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μικρής κλίμακας (εργαστηριακής κλίμακας) αναερόβιους αντιδραστήρες σε διαμόρφωση trickle bed (Εικ. 1). Οι αντιδραστήρες αυτού του σχεδιασμού γεμίζονται με υλικά που επιτρέπουν την εγκατάσταση μικροοργανισμών πάνω τους. Δοκιμάστηκαν δύο υλικά: σφαιρίδια ενεργού άνθρακα και δακτύλιοι Raschig από πολυαιθυλένιο τύπου K1. Οι αντιδραστήρες αξιολογήθηκαν με βάση την απόδοσή τους στην παραγωγή  $\text{CH}_4$  καθώς αυξανόταν σταδιακά η παροχή αερίου, καθώς και όταν η παροχή αερίου διακοπτόταν για 2 έως 5 εβδομάδες. Στην πρώτη περίπτωση, οι δακτύλιοι Raschig K1 είχαν καλύτερη απόδοση, επιτυγχάνοντας καθαρότητα  $\text{CH}_4$  95% σε όλα τα επίπεδα παροχής αερίου που δοκιμάστηκαν (από 0,083L/LΑντιδραστήρα/ώρα έως 1L/LΑντιδραστήρα/ώρα). Στη δεύτερη περίπτωση, και τα δύο υλικά είχαν καλή απόδοση, ακόμη και μετά από μεγάλες περιόδους χωρίς παροχή πρώτης ύλης, επιστρέφοντας γρήγορα σε καθαρότητα  $\text{CH}_4$  95% όταν η παροχή επαναλαμβανόταν.



Σχήμα 1. Ρύθμιση βιοαντιδραστήρων σε πιλοτική κλίμακα

Επιπλέον, η διαδικασία βιομεθανιοποίησης δοκιμάστηκε σε μεγαλύτερη κλίμακα, χρησιμοποιώντας έναν πρωτότυπο αντιδραστήρα με ενεργό όγκο 100L (Εικ. 2). Βάσει των αποτελεσμάτων μικρής κλίμακας, οι δακτύλιοι Raschig K1 επιλέχθηκαν για τον πιλοτικό αντιδραστήρα. Ωστόσο, η μελέτη έδειξε ότι η κλιμάκωση από μικρά πειράματα σε μεγαλύτερα δεν είναι πάντα εύκολη. Όταν επιχειρήθηκε η σταδιακή αύξηση της παροχής αερίου, όπως στις εργαστηριακές δοκιμές, η απόδοση του αντιδραστήρα έγινε ασταθής. Παρά τις προκλήσεις, με προσεκτική παρακολούθηση και προσαρμογές, ο αντιδραστήρας κατάφερε να επιτύχει και να ξεπεράσει τους στόχους του έργου CooCE, επιτυγχάνοντας καθαρότητα  $\text{CH}_4$  πάνω από 95% και κατακρατώντας πάνω από 5 kg  $\text{CO}_2$  ανά  $\text{m}^3$  αντιδραστήρα την ημέρα, εκπληρώνοντας τους στόχους του έργου.



Σχήμα 2. Ρύθμιση βιοαντιδραστήρα σε πιλοτική κλίμακα

### Αναφορές/σύνδεσμοι στην ιστοσελίδα του CooCE και άλλες

<https://cooce.eu/hellenic-agricultural-organization-dimitra-elgo/>

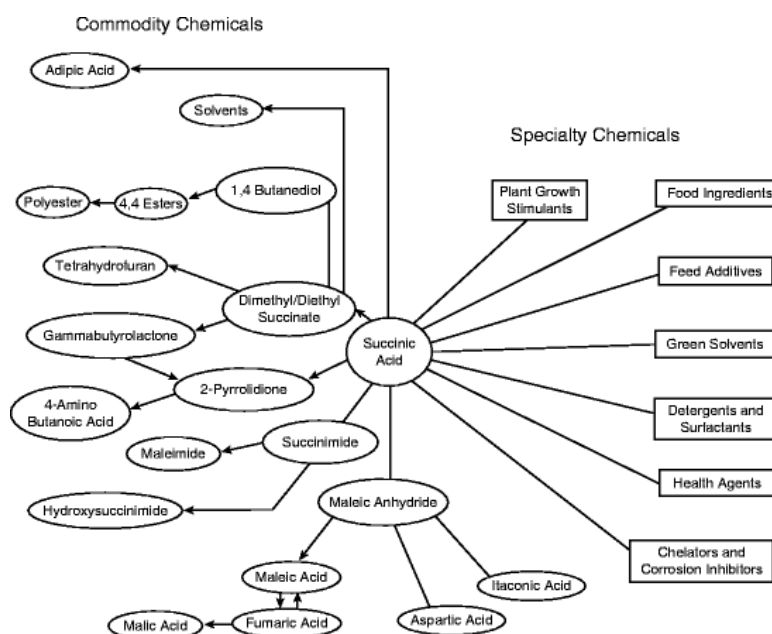
<https://cooce.eu/oral-presentation-in-international-conference-by-gaspari-et-al-2023/>

<https://cooce.eu/seminar-at-summer-school-by-dr-kougias-in-2022/>



[Το Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Δανίας](#) (DTU) ασχολήθηκε με το ηλεκτρικό οξύ, το οποίο είναι ένα δικαρθοξυλικό οξύ με χημικό τύπο  $(\text{CH}_2)_2(\text{CO}_2\text{H})_2$ . Το όνομά του προέρχεται από τη λατινική λέξη succinum που σημαίνει κεχριμπάρι, καθώς ιστορικά παραγόταν με απόσταξη κεχριμπαριού. Σήμερα, όμως, το ηλεκτρικό οξύ προέρχεται κυρίως βιομηχανικά από πετροχημικά υποστρώματα και η κύρια διαδικασία για την παραγωγή του είναι η υδρογόνωση του μηλεϊνικού ανυδρίτη. Ωστόσο, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος καθαρών μηδενικών εκπομπών έως το 2050 που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση, υπάρχει επείγουσα ανάγκη για τη μετάβαση σε καθαρότερες μεθόδους παραγωγής με λιγότερη ένταση άνθρακα. Αυτό γίνεται ακόμη πιο σημαντικό εάν ληφθεί υπόψη ότι η ζήτηση για ηλεκτρικό οξύ αυξάνεται, που προβλέπεται να είναι βιομηχανία 200 εκατομμυρίων δολαρίων το 2026 <sup>1</sup>.

Η αύξηση της ζήτησης για ηλεκτρικό οξύ οφείλεται στο ρόλο του ως χημικού πλατφόρμας και στην τεράστια και ποικίλη ποικιλία εφαρμογών που έχει. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κρουστήρας για την παραγωγή ενός ευρέος φάσματος βιομηχανικών χημικών ουσιών και ως δομικό στοιχείο για βιοπλαστικά, κυρίως ηλεκτρικό πολυβουτυλένιο. Λόγω των ιδιοτήτων του ως επιφανειοδραστικό, το ηλεκτρικό οξύ χρησιμοποιείται ως συστατικό απορρυπαντικού και έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία τροφίμων, ως ρυθμιστής οξύτητας. Τέλος, λόγω των αντιφλεγμονωδών ιδιοτήτων του, έχει βρεθεί ότι έχει βρει εφαρμογές στη φαρμακευτική βιομηχανία <sup>2,3</sup>.

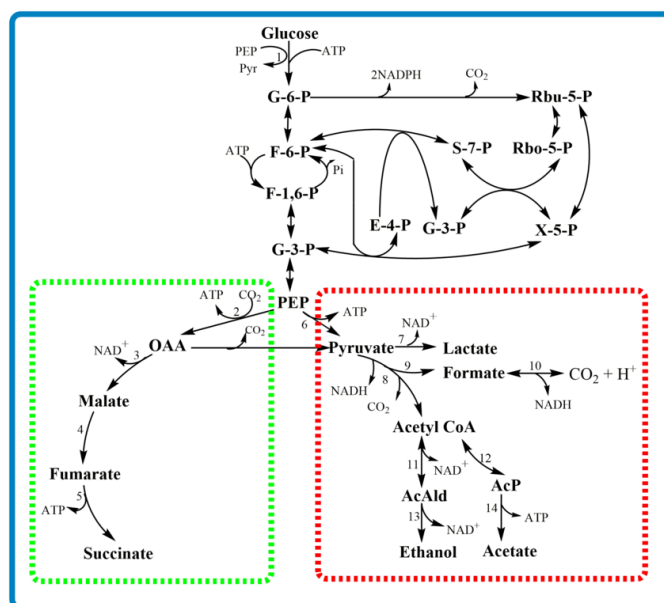


Σχήμα 1: Εφαρμογές ηλεκτρικού οξέος (Zeikus et. al. (1999))

Η εναλλακτική λύση στην πετροχημική παραγωγή ηλεκτρικού οξέος είναι η χρήση βιολογικών διεργασιών όπως η μικροβιακή ζύμωση. Η χρήση τους παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων: Αυτές οι διεργασίες είναι λιγότερο ενεργοβόρες και ανθρακούχες σε σύγκριση με τη διεργασία που χρησιμοποιεί πετροχημικά παραγόμενα υποστρώματα, τα ρεύματα αποβλήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποστρώματα και η διαδικασία μπορεί να συμπεριληφθεί σε ένα σύστημα βιοδιυλιστηρίου, η μικροβιακή παραγωγή ηλεκτρικού οξέος απαιτεί την κατανάλωση CO<sub>2</sub>, καθιστώντας τη διαδικασία μια εξαιρετική μέθοδο δέσμευσης άνθρακα.

Το ηλεκτρικό οξύ αποτελεί μέρος του κύκλου του τρικαρβοξυλικού οξέος (TCA). Οι περισσότεροι από τους μικροοργανισμούς που είναι σε θέση να το παράγουν αυτό το επιτυγχάνουν μέσω του αντίστροφου κύκλου TCA και ως εκ τούτου, αντί να παράγουν CO<sub>2</sub> το καταναλώνουν. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε γραμμομόριο ηλεκτρικού οξέος που παράγεται απαιτείται 1 mol CO<sub>2</sub> και κατά συνέπεια δεσμεύεται από τη διαδικασία. Επιπλέον, το πιο άφθονο CO<sub>2</sub> είναι η υψηλότερη απόδοση ηλεκτρικού οξέος που μπορεί να επιτευχθεί, καθώς οι υψηλές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> ευνοούν τη μεταβολική μετατόπιση προς την οδό του ηλεκτρικού οξέος, παράγοντας λιγότερα άλλα υποπροϊόντα οργανικού οξέος όπως οξικό και μυρμηκικό οξύ<sup>4,5</sup>.





Εικόνα 2: Μεταβολική οδός του *Actinobacillus succinogenes*, ενός από τους κύριους μικροοργανισμούς που παράγουν ηλεκτρικό οξύ (Dessie et. al (2021))

Η ικανότητα δέσμευσης άνθρακα μιας διεργασίας ηλεκτρικού οξέος έχει αποδειχθεί ότι είναι υψηλότερη από άλλες βιολογικές διεργασίες αφομοίωσης άνθρακα, όπως η καλλιέργεια φυκών<sup>6</sup> και ο συνδυασμός του με τη χρήση ροών αποβλήτων ως υποστρώματος ζύμωσης μπορεί να αποτελέσει λύση για την τόσο αναγκαία μετάβαση σε μια πιο βιώσιμη πλατφόρμα χημικής παραγωγής.

### Παραπομπή και σύνδεσμοι

1. Intelligence, M. *Succinic Acid Market - Growth, Trends and Forecasts (2019- 2024)*. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/succinic-acid-market> (2019).
2. Zeikus, J. G., Jain, M. K. & Elankovan, P. Biotechnology of succinic acid production and markets for derived industrial products. *Appl Microbiol Biotechnol* **51**, 545–552 (1999).
3. Saxena, R. K., Saran, S., Isar, J. & Kaushik, R. Production and Applications of Succinic Acid. in *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (eds. Pandey, A., Negi, S. & Soccol, C. R.) 601–630 (Elsevier, 2017). doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63662-1.00027-0>.
4. McKinlay, J. B. & Vieille, C. 13C-metabolic flux analysis of *Actinobacillus succinogenes* fermentative metabolism at different NaHCO<sub>3</sub> and H<sub>2</sub> concentrations. *Metab Eng* **10**, 55–68 (2008).
5. Dessie, W., Wang, Z., Luo, X., Wang, M. & Qin, Z. Insights on the Advancements of In Silico Metabolic Studies of Succinic Acid Producing Microorganisms: A Review with Emphasis on *Actinobacillus succinogenes*. *Fermentation* **7**, (2021).
6. Zhang, Q. et al. Carbon capture and utilization of fermentation CO<sub>2</sub>: Integrated ethanol fermentation and succinic acid production as an efficient platform. *Appl Energy* **206**, 364–371 (2017).

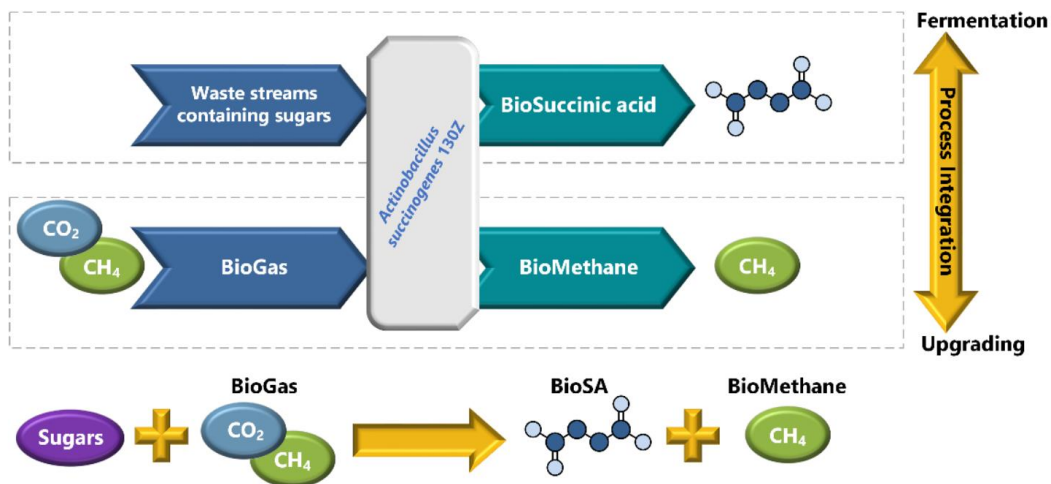
## Ηλεκτρικό οξύ Παραγωγή με CCS

[Toolkit](#)

Το ηλεκτρικό οξύ μπορεί να παραχθεί βιολογικά καθώς είναι ένας από τους κύριους μεταβολίτες του κύκλου του τρικαρβοξυλικού οξέος (TCA), της κύριας μεταβολικής οδού που χρησιμοποιούν τα μικρόβια για την παραγωγή ενέργειας καταναλώνοντας μια πηγή οργανικού άνθρακα. Ορισμένα βακτήρια, όπως το *Actinobacillus succinogenes* είναι φυσικοί υπερπαραγωγοί ηλεκτρικού οξέος, καθώς παράγουν και εκκρίνουν εξωκυτταρικά μεγάλες ποσότητες. Η παραγωγή ηλεκτρικού οξέος πραγματοποιείται μέσω του αντίστροφου κύκλου TCA και, εκτός από τον οργανικό άνθρακα, απαιτείται CO<sub>2</sub> προκειμένου να μετατοπιστεί η μεταβολική οδός προς το ηλεκτρικό οξύ ευνοώντας την παραγωγή του αντί της παραγωγής άλλων οργανικών οξέων, όπως οξικό ή μυρμηκικό οξύ. Επιπλέον, η παραγωγή ηλεκτρικού οξέος και η κατανάλωση CO<sub>2</sub> συμβαίνει σε αναλογία 1:1 mole, πράγμα που σημαίνει ότι αυτή η διαδικασία είναι κατάλληλη για να χρησιμοποιηθεί ως τεχνολογία δέσμευσης άνθρακα <sup>1</sup>.

Μια άλλη βιολογική διαδικασία με μεγάλες οικονομικές δυνατότητες και θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο είναι η αναερόβια χώνευση, όπου μια μικτή καλλιέργεια καταναλώνει οργανικό υπόστρωμα, παράγοντας βιοαέριο (CH<sub>4</sub> και CO<sub>2</sub>) ένα μείγμα που μοιάζει με φυσικό αέριο. Το βιοαέριο έχει σύσταση περίπου 55% CH<sub>4</sub> και 45% CO<sub>2</sub>. Ωστόσο, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο και να μπορεί να εγχυθεί στο δίκτυο φυσικού αερίου, πρέπει να έχει περιεκτικότητα σε CH<sub>4</sub> άνω του 90%. Ως εκ τούτου, το βιοαέριο πρέπει να αναβαθμιστεί με την αφαίρεση του CO<sub>2</sub> που περιέχει.

Εξετάζοντας και τις δύο διαδικασίες, υπάρχει σαφής σύνδεση μεταξύ τους και μπορούν να συνδυαστούν συνεργικά, δημιουργώντας μια πλατφόρμα που παράγει τόσο πολύτιμα χημικά όσο και καθαρά βιοκαύσιμα. Το βιοαέριο που προέρχεται από μονάδα αναερόβιας χώνευσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανόργανη πηγή άνθρακα για ζύμωση ηλεκτρικού οξέος, με αποτέλεσμα την παραγωγή τόσο βιομεθανίου όσο και ηλεκτρικού οξέος πολύ υψηλής ποιότητας.



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας ηλεκτρικής παραγωγής που αναπτύχθηκε στην DTU

Για τη διαδικασία που αναπτύχθηκε στο Τεχνικό [Πανεπιστήμιο της Δανίας \(DTU\)](#) στο [WP3](#) χρησιμοποιείται το ρεύμα αποβλήτων της παραγωγής καραμελών. Το ρεύμα waste αποτελείται από τρία διαφορετικά σάκχαρα, δηλαδή γλυκόζη, σακχαρόζη και μαλτόζη. Αυτό είναι ένα εξαιρετικό υπόστρωμα για μικροβιακή ζύμωση για πληθώρα λόγων. Αποτελείται κυρίως από σάκχαρα, τα οποία τα βακτήρια είναι σε θέση να αναπτυχθούν φυσικά, χωρίς την ανάγκη οποιασδήποτε γενετικής τροποποίησης, παρά το γεγονός ότι είναι ένα ρεύμα αποβλήτων δεν περιέχει τοξικές ουσίες που μπορούν να έχουν ανασταλτική επίδραση στην ανάπτυξη της βακτηριακής καλλιέργειας, καθώς είναι ένα ρεύμα αποβλήτων έρχεται με πολύ χαμηλό κόστος, μείωση του συνολικού κόστους της διαδικασίας, με παράλληλη αύξηση της βιωσιμότητας και της κερδοφορίας της<sup>2</sup>.

Η υψηλή ποσότητα ηλεκτρικού οξέος που μπορεί να παράγει το *A. succinogenes* μπορεί να είναι μειονέκτημα, καθώς οι υψηλές συγκεντρώσεις μπορούν να έχουν ανασταλτική επίδραση στην ανάπτυξη του και στη συνέχεια στην απόδοση και την παραγωγικότητα της διαδικασίας. Για το λόγο αυτό, μια *in situ* ηλεκτροχημική μονάδα ανάκτησης έχει ενσωματωθεί στη διαδικασία. Με την εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού στο σύστημα, το ηλεκτρικό οξύ διαχωρίζεται χρησιμοποιώντας μια μεμβράνη ανταλλαγής ανιόντων<sup>3</sup>.

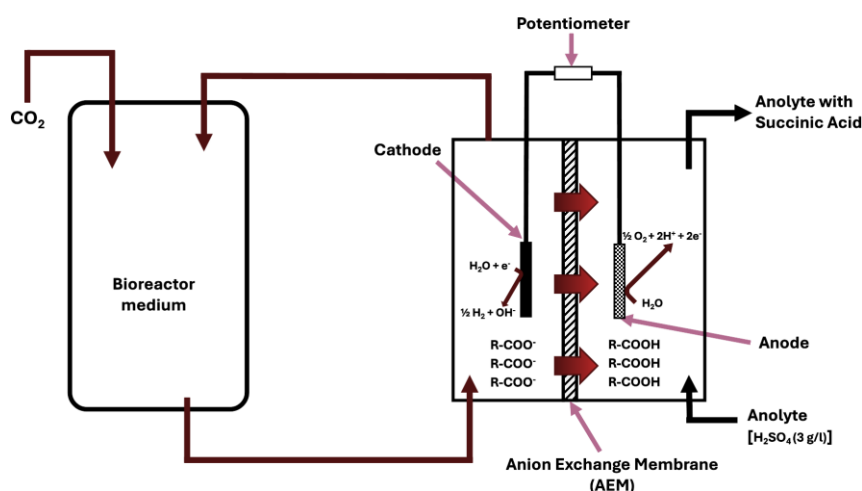


Figure 2: Schematic of the in-situ product recovery process

Η ενσωμάτωση αυτής της ενότητας στη διαδικασία, μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλά πλεονεκτήματα: Αφαιρώντας το ανασταλτικό ηλεκτρικό οξύ και άλλα υποπροϊόντα οργανικού οξέος, η απόδοση της διαδικασίας είναι υψηλότερη. Το ηλεκτρικό οξύ διαχωρίζεται επιτόπου, οδηγώντας σε μειωμένο κόστος στο κατόπιν τμήμα επεξεργασίας της διαδικασίας, το οποίο αποτελεί γνωστό οικονομικό εμπόδιο για τις περισσότερες βιοδιεργασίες<sup>4</sup>.

Αυτή η διαδικασία που ενσωματώνει τόσο την αναβάθμιση του βιοαερίου όσο και την επιτόπια ανάκτηση προϊόντων είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την ενσωμάτωση της παραγωγής ηλεκτρικού οξέος σε ένα χημικό και ενεργειακό βιοδιυλιστήριο πλατφόρμας, ενσωματώνοντας μια πτυχή της δέσμευσης άνθρακα, ενισχύοντας την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την οικονομική σκοπιμότητά του.

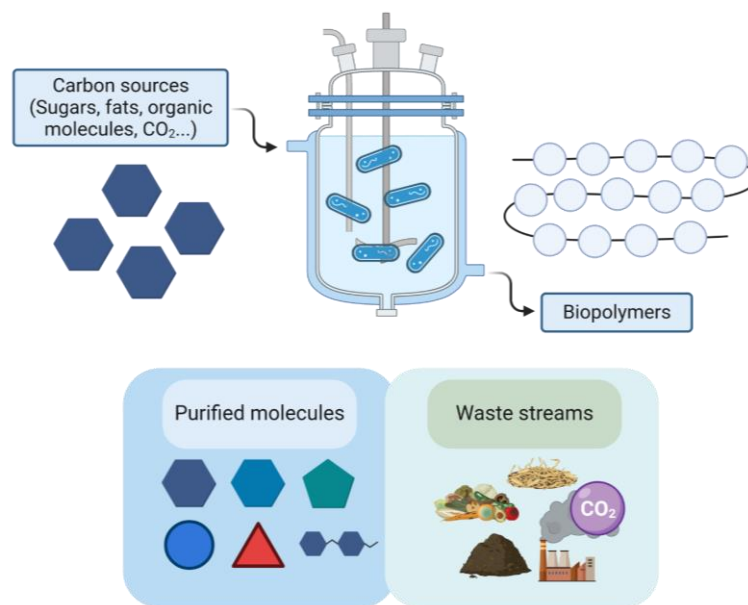
### Παραπομπές και σύνδεσμοι

1. McKinlay, J. B. & Vieille, C. 13C-metabolic flux analysis of *Actinobacillus succinogenes* fermentative metabolism at different  $\text{NaHCO}_3$  and  $\text{H}_2$  concentrations. *Metab Eng* **10**, 55–68 (2008).
2. Lithourgidis, A. A. *et al.* Bio-succinic acid production, up to pilot scale, by fermentation of industrial candy waste with *Actinobacillus succinogenes* 130Z and its downstream purification process. *J Environ Chem Eng* **11**, 110920 (2023).
3. Pateraki, C., Andersen, S. J., Ladakis, D., Koutinas, A. & Rabaey, K. Direct electrochemical extraction increases microbial succinic acid production from spent sulphite liquor. *Green Chemistry* **21**, 2401–2411 (2019).
4. Kumar, R., Basak, B. & Jeon, B.-H. Sustainable production and purification of succinic acid: A review of membrane-integrated green approach. *J Clean Prod* **277**, 123954 (2020).

## Βιοπολυμερές παραγωγή δια μέσου CCUS Toolkit

Η μαζική χρήση πλαστικού συμβάλλει σημαντικά στη ρύπανση και την υπερθέρμανση του πλανήτη, καθώς η παραγωγή βασίζεται κυρίως σε άνθρακα και πηγές ενέργειας ορυκτής προέλευσης. Τα πλαστικά συμβάλλουν άμεσα στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (GHG) σε κάθε βήμα του κύκλου ζωής τους, από την εξόρυξη, τη διύλιση και την κατασκευή έως τη διάθεση. Επιπλέον, είναι συνήθως μη ανανεώσιμα και μη βιοαποικοδομήσιμα, επομένως μπορούν να παραμείνουν στα οικοσυστήματα για εκατοντάδες χρόνια, να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα και τελικά να αποτελέσουν επίσης πρόβλημα ανθρώπινης υγείας. Τα βιοπολυμερή μπορούν να παραχθούν από φυτά (π.χ. άμυλο και πολυγαλακτικό οξύ, PLA), ζώα (χιτοζάνη και χιτίνη) και μικροοργανισμούς (πολυυδροξυαλκανοϊκά, PHA) ή να ληφθούν με επεξεργασία ανανεώσιμων πόρων (π.χ. βιομάζα, γεωργικά υπολείμματα και βιομηχανικά απόβλητα). Η υιοθέτηση βιοπολυμερών μπορεί να είναι περιβαλλοντικά επωφελής, ακόμη περισσότερο εάν η διαδικασία παραγωγής βασίζεται στη δέσμευση του CO<sub>2</sub> ως πηγής άνθρακα.

Μεταξύ των στόχων του έργου CooCE, η παραγωγή βιοπολυμερών από CO<sub>2</sub> αντιπροσωπεύει μια καινοτόμο πτυχή, συμβάλλοντας στο κλείσιμο του κύκλου άνθρακα, σε ένα κυκλικό σύστημα όπου οι εκπομπές άνθρακα ανακυκλώνονται σε πολύτιμα προϊόντα. Τα βιοπολυμερή παράγονται φυσικά από ζωντανούς οργανισμούς, καθιστώντας τα διαθέσιμα για παραγωγή μέσω ζύμωσης: γνωρίζοντας τις κατάλληλες συνθήκες καλλιέργειας, ο μεταβολισμός επιλεγμένων οργανισμών μπορεί να αξιοποιηθεί για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής του βιοπολυμερούς-στόχου.



Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση μιας βιοδιεργασίας όπου μικροοργανισμοί μετατρέπουν τη δεδομένη πηγή άνθρακα σε βιοπολυμερές. Οι πηγές άνθρακα παρουσιάζονται στο κάτω πλαίσιο.

Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, ο άνθρακας που περιέχεται στις ροές αποβλήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή παραγωγής βιοπολυμερών: πρόκειται για μια εξαιρετική στρατηγική για τη μείωση του κόστους, παρέχοντας παράλληλα μια οδό για τη διάθεση των ροών αποβλήτων. Από αυτή την άποψη, το CO<sub>2</sub> είναι μια ιδανική πηγή άνθρακα χαμηλού κόστους για εκμετάλλευση, καθώς είναι άφθονο στα καυσαέρια πολλών βιομηχανικών διεργασιών σε τομείς που κυμαίνονται από την παραγωγή χάλυβα, σιδήρου και τσιμέντου έως την παραγωγή βιοκαυσίμων και την αποτέφρωση αποβλήτων. Η ύπαρξη μικροοργανισμών ικανών να δεσμεύουν ταυτόχρονα CO<sub>2</sub> και να παράγουν βιοπολυμερή ανοίγει το δρόμο για την ανάπτυξη εναλλακτικών οδών δέσμευσης, χρήσης και αποθήκευσης CO<sub>2</sub> (CCUS) που βασίζονται σε αυτές τις μεταβολικές ικανότητες.

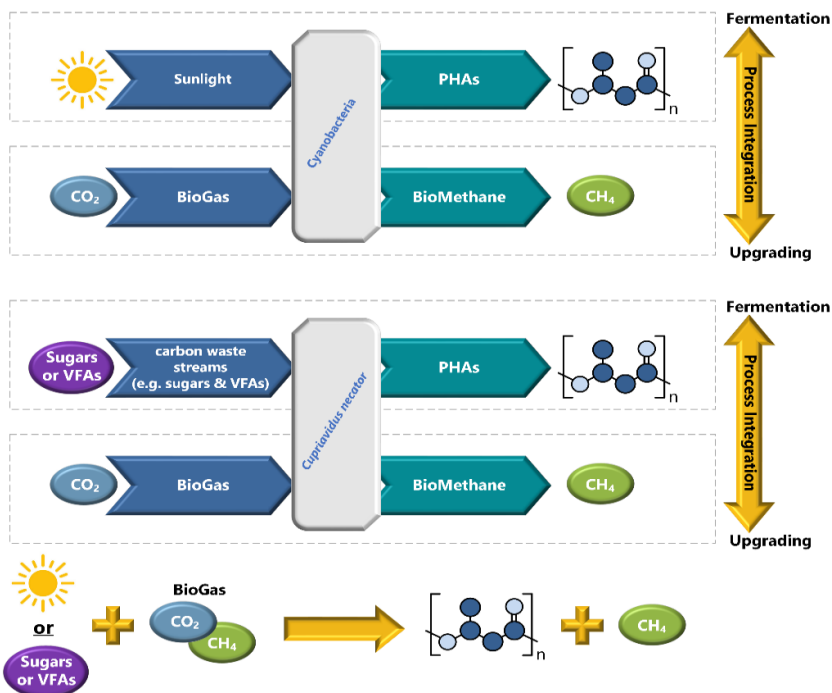
Τα παραδοσιακά πλαστικά εξακολουθούν να κυριαρχούν σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς. Είναι φθηνά, ανθεκτικά, με πολλά χαρακτηριστικά που τα καθιστούν ακόμα δύσκολο να αντικατασταθούν για τις εταιρείες. Ωστόσο, η χρήση τους συνδέεται με ζητήματα που δεν είναι πλέον αμελητέα και απαιτείται επείγοντως μια περιβαλλοντικά και οικονομικά βιώσιμη εναλλακτική λύση. Η αυξανόμενη ζήτηση βιοπολυμερών στην αγορά προέρχεται κυρίως από τον τομέα της συσκευασίας και την παραγωγή ειδών μίας χρήσης, όπου τα βιοπολυμερή αντιπροσωπεύουν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στα πλαστικά με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, το PHB, το οποίο έχει τα καλύτερα χαρακτηριστικά όσον αφορά τη βιοαποδομησιμότητα, εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει περιορισμένο μερίδιο λόγω του υψηλού κόστους, το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πηγή άνθρακα. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη μιας οικονομικά αποδοτικής μετατροπής CO<sub>2</sub> σε PHB αντιπροσωπεύει μια ευκαιρία που θα ανταποκρινόταν στην αυξανόμενη ζήτηση της αγοράς και θα μετριάσει την κλιματική αλλαγή.

**Παραπομπές και σύνδεσμοι:**

- <https://cooce.eu/wp4/>
- <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biopolymers-market-report>

**Μετατροπή  
CO<sub>2</sub> σε PHB**  
Toolkit

Το [Πανεπιστήμιο του Πάντοβα](#) συμμετέχει στο έργο CooCE με ένα [πακέτο εργασίας](#) που επικεντρώνεται στη βιομετατροπή του CO<sub>2</sub> και των βιομηχανικών ρευμάτων αποβλήτων σε πολυϋδροξυβουτυρικό (PHB), στο πλαίσιο μιας κυκλικής οικονομίας. Η μετατροπή του CO<sub>2</sub> σε PHB επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το βακτήριο *Cupriavidus necator* και το κυανοβακτήριο *Synechocystis sp. B12*. Το PHB είναι ένα εξαιρετικά βιοδιασπώμενο πολυμερές, με ιδιότητες παρόμοιες με την πιο κοινή, πετρελαιοπαραγωγή εναλλακτική λύση, το πολυπροπυλένιο. Οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούνται στη βιομετατροπή παράγουν PHB με τη μορφή ενδοκυτταρικών κόκκων και είναι σε θέση να χρησιμοποιούν το CO<sub>2</sub> ως την μοναδική πηγή άνθρακα. Το *C. necator* είναι ικανό να αποθηκεύει μεγάλες ποσότητες βιοπολυμερούς (έως 70% του ξηρού βάρους του κυττάρου) και να δεσμεύει το CO<sub>2</sub> παρουσία υδρογόνου και οξυγόνου. Ωστόσο, τα λύματα πλούσια σε ζάχαρα και πτητικά λιπαρά οξέα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη των βακτηρίων, επιτρέποντας την ανάπτυξη μιας ευέλικτης διαδικασίας. Το κυανοβακτήριο *Synechocystis sp. B12* είναι ένα φωτοσυνθετικό οργανισμός, οπότε χρειάζεται κυρίως ηλιακό φως, νερό και CO<sub>2</sub> για να ευδοκιμήσει και δεν απαιτεί ακριβές πρώτες ύλες που συχνά αντιπροσωπεύουν υψηλό κόστος για αυτούς τους τύπους βιολογικών διαδικασιών, επηρεάζοντας τη συνολική τους κλίμακα.



Εικόνα 1. Διάγραμμα ροής των βιοδιαδικασιών για τη μετατροπή CO<sub>2</sub> σε PHB, που αναπτύχθηκε στο Πακέτο Εργασίας 4 του CooCE.



Έτσι, το Πανεπιστήμιο του Παδί (UniPD) αναπτύσσει δύο βιοδιαδικασίες για τη μετατροπή CO<sub>2</sub> σε PHB, με τον φιλόδοξο στόχο να τις συνδυάσει με την παραγωγή βιοαερίου: στην πραγματικότητα, το ακατέργαστο βιοαέριο περιέχει σημαντική ποσότητα CO<sub>2</sub>, η οποία μπορεί να συλληφθεί και να απορροφηθεί σε PHB, παράγοντας υψηλής ποιότητας βιομεθάνιο (>95% CH<sub>4</sub>) που μπορεί να εγχυθεί στο δίκτυο αερίου ως ισοδύναμο του φυσικού αερίου. Για το σκοπό αυτό, το UniPD συνεργάζεται με την [BTS Biogas Srl](#) για την παροχή πραγματικών δειγμάτων βιοαερίου προκειμένου να πραγματοποιηθούν δοκιμές και προσομοιώσεις διαδικασιών. Επιπλέον, η BTS υποστηρίζει το UniPD στην ανάπτυξη των διαδικασιών, συμμετέχοντας στο σχεδιασμό των συστημάτων που είναι απαραίτητα για τη βιοκατάλυση.

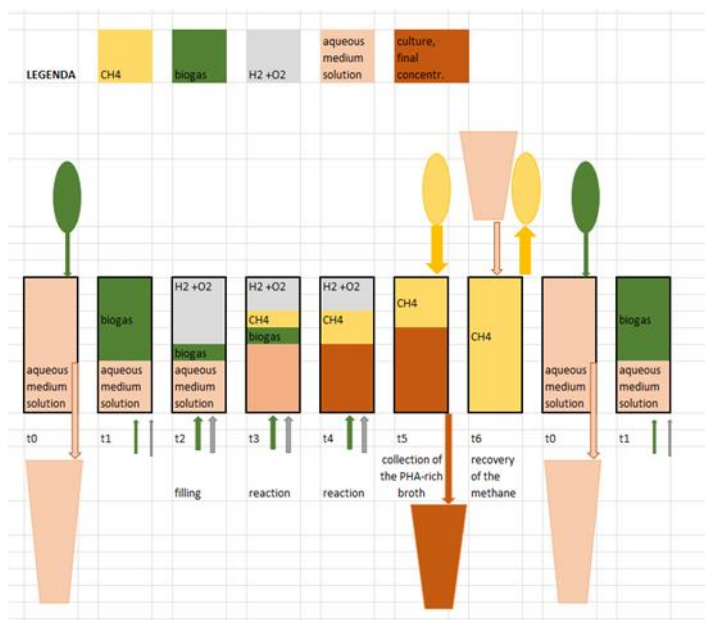


Εικόνα 2. Βιοαντιδραστήρες και φωτοβιοαντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή PHB με *C. necator* (άνω αριστερά) και *Synechocystis* sp. B12 (άνω δεξιά). Τα δείγματα PHB που παράγονται στο UniPD έχουν δοκιμαστεί ως επικαλύμματα (κάτω αριστερά) και αναπτύσσονται εφαρμογές συσκευασίας (κάτω δεξιά).

Αυτή τη στιγμή, το UniPD βελτιστοποιεί τα δύο συστήματα βιομετατροπής σε πιλότο κλίμακας με συνθετικά μείγματα αερίων και αποδεικνύει τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους με την αναβάθμιση του βιοαερίου, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα σχετικά με την εφαρμογή του βιοαερίου ως πηγή CO<sub>2</sub>.

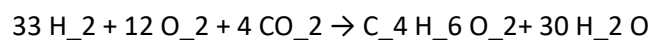
" κρίσιμη πτυχή για τη βιομετατροπή CO<sub>2</sub> σε PHA είναι η διαθεσιμότητα υδρογόνου και η διαδικασία πρέπει να διεξάγεται, τουλάχιστον στις αρχικές φάσεις, παρουσία περισσειας υδρογόνου. Ο αυτοτροφικός μεταβολισμός του *C. necator* περιλαμβάνει επίσης οξυγόνο, επομένως τα μείγματα αερίων μέσα στον αντιδραστήρα βρίσκονται εντός του εκρηκτικού εύρους για το υδρογόνο. Για τους λόγους αυτούς, ο σχεδιασμός του αντιδραστήρα διασφαλίζει ότι το μείγμα αερίων δεν έρχεται σε επαφή με πιθανές πηγές ανάφλεξης, ενώ τα υγρά ψεκάζονται περνώντας μέσα από ένα ειδικό ακροφύσιο μεγιστοποιώντας τη μεταφορά μάζας αερίου-υγρού.

Η βιοδιεργασία της παραγωγής PHA σε συνδυασμό με την αναβάθμιση του βιοαερίου σχεδιάζεται να συμβεί σε παραγωγικούς κύκλους: το ακατέργαστο βιοαέριο εισέρχεται στο σύστημα και παρέχονται H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub> για να επιτρέψουν τη δέσμευση του CO<sub>2</sub> σε βιοπλαστικούς κόκκους. Το μεθάνιο δεν χρησιμοποιείται από τη βακτηριακή καλλιέργεια. Ως εκ τούτου, καθαρίζεται καθώς τα βακτηριακά κύτταρα συσσωρεύουν PHA. Στο τέλος της διαδικασίας, όταν επιτευχθεί πλήρης κατανάλωση CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>, συλλέγεται από τον αντιδραστήρα ζυμός καλλιέργειας πλούσιος σε PHA και αναβαθμισμένο βιομεθάνιο και μπορεί να ξεκινήσει ένας νέος κύκλος (Σχήμα 3).



Εικόνα 3. Βιοδιεργασία

Τα αέρια τροφοδοτήθηκαν σύμφωνα με την ακόλουθη στοιχειομετρία για την παραγωγή αυτοτροφικού ΡΗΒ:



**Αναφορές/σύνδεσμοι στην ιστοσελίδα CooCE και άλλες:**

<https://cooce.eu/bts-biogas-s-r-l/>

<https://cooce.eu/oral-presentation-in-international-conference-by-morlino-et-al-2024-mary-dk/>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852424007727?via%3Dihub>

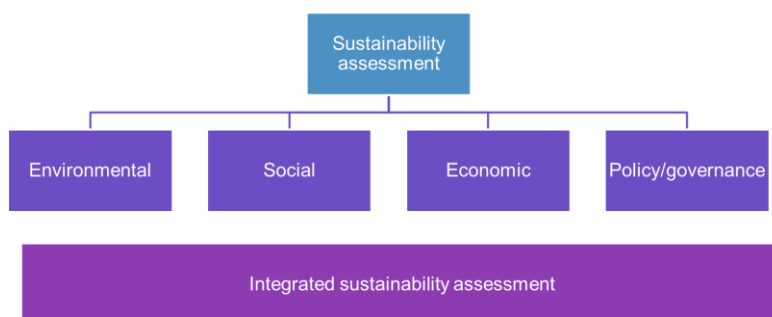
<https://cooce.eu/oral-presentation-in-international-conference-by-collura-et-al-2023/>

<https://bts-biogas.com/en/>

## Μοντελοποίηση εφοδιαστικής αλυσίδας

Toolkit

Η [IMPERIAL](#) συνέβαλε στο έργο CooCE με την Αξιολόγηση Βιωσιμότητας [WP5](#). Η αξιολόγηση βιωσιμότητας περιλάμβανε την περιβαλλοντική, κοινωνική, τεχνοοικονομική και πολιτική αξιολόγηση.

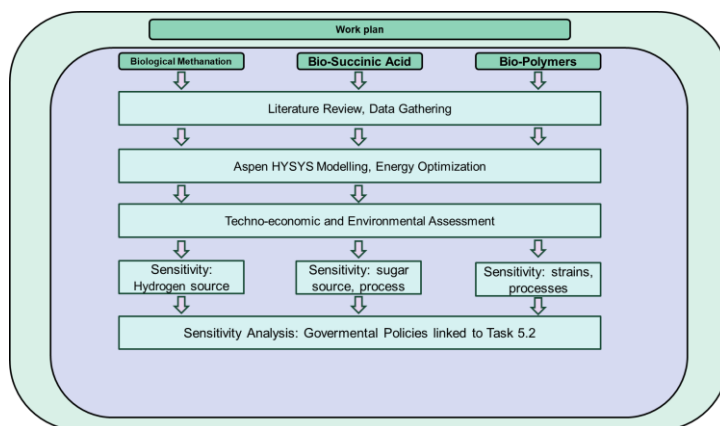


Σχήμα 1. Αξιολόγηση Βιωσιμότητας που πραγματοποιήθηκε από την Imperial.

Η περιβαλλοντική και τεχνοοικονομική αξιολόγηση βασίζεται στη μοντελοποίηση εφοδιαστικών αλυσίδων και στην αξιολόγηση κύκλου ζωής για την βελτιστοποίηση των εφοδιαστικών αλυσίδων λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες. Η προσέγγιση μοντελοποίησης εφοδιαστικής αλυσίδας περιλάμβανε δύο τμήματα:

- **Το Τμήμα Χημικής Διαδικασίας:** Σε αυτό το μέρος της μοντελοποίησης, αναπτύχθηκε μια πραγματική προσομοίωση ενός εργοστασίου βιομηχανικής κλίμακας για τη συγκεκριμένη χημική διαδικασία που μελετάται. Αυτό επέτρεψε την απόκτηση διάφορων χρήσιμων πληροφοριών για τη διαδικασία, όπως μαζικοί ισολογισμοί, ενεργειακοί ισολογισμοί, οικονομικές αξιολογήσεις, κ.ά.
- **Το Τμήμα Μοντελοποίησης Εφοδιαστικής Αλυσίδας:** Η πραγματική μοντελοποίηση που αφορά τα διάφορα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας που αναμένονται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της διαδικασίας. Αυτό περιλαμβάνει την απόκτηση πρώτων υλών, την πώληση προϊόντων, τα στάδια μεταφοράς, κ.ά. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το Τμήμα Χημικής Διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν και εδώ, καθώς η χημική παραγωγή είναι αναπόσπαστο μέρος της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Αυτή η συνολική προσέγγιση εφαρμόζεται για τις διάφορες τεχνολογίες που μελετήθηκαν στο έργο [CooCE](#): βιομεθανία, παραγωγή βιο-μηλικού οξέος και παραγωγή βιοπολυμερών, αν και η δομή της μοντελοποίησης θα προσαρμοστεί στις ιδιαιτερότητες κάθε περίπτωσης. Η Εικόνα 2 δείχνει τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την περιβαλλοντική και τεχνοοικονομική αξιολόγηση.



Εικόνα 2. Μεθοδολογία

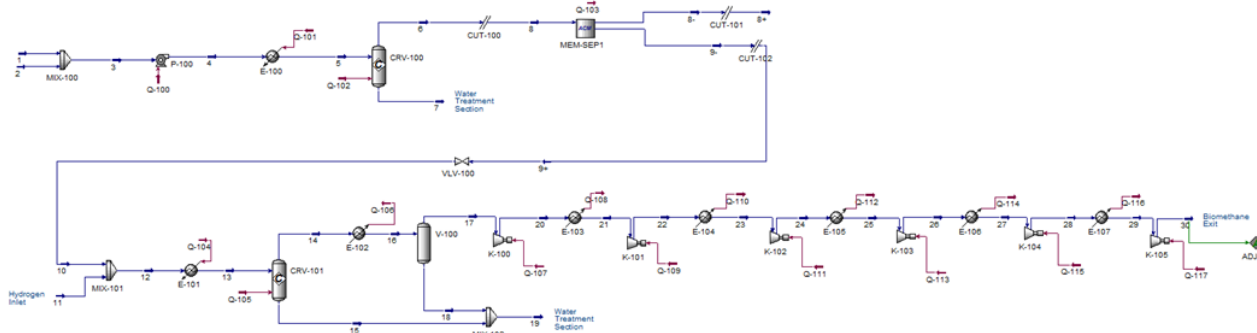
### A) Τμήμα Χημικής Διαδικασίας

Το Τμήμα Χημικής Διαδικασίας αποτελείται από ένα μαθηματικό μοντέλο που θα προσομοιώνει τη λειτουργία ενός εργοστασίου βιομηχανικής κλίμακας της εξεταζόμενης διαδικασίας. Αυτό θα παρέχει τα εξής:

- **Τεχνολογική Βιωσιμότητα:** Η εφαρμογή του μοντέλου θα βοηθήσει στον καθορισμό των τεχνολογικών περιορισμών του αρχικού σχεδίου του εργοστασίου, με αποτέλεσμα ένα πιο επεξεργασμένο τελικό σχέδιο για τη διαδικασία.
- **Μαζικές Ισορροπίες:** Οι συνολικές ποσότητες πρώτων υλών που καταναλώνονται και των παραγόμενων προϊόντων, καθώς και οι υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται στο εργοστάσιο, όπως ατμός ή ψυκτικό νερό.
- **Ισορροπία Ενέργειας:** Η συνολική ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται στο εργοστάσιο, τόσο με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο (ή εναλλακτικές πηγές) όσο και ως υπηρεσίες με τη μορφή ανταλλαγής θερμότητας.
- **Βελτιστοποίηση Ενέργειας και Ανάλυση Pinch:** Ανάλογα με το συνολικό σχέδιο της διαδικασίας, μπορεί να είναι δυνατή η εφαρμογή της ανάλυσης pinch για τη βελτιστοποίηση του δικτύου θερμικών ανταλλαγών που χρησιμοποιείται στο εργοστάσιο, με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- **Οικονομική Εκτίμηση:** Μια οικονομική εκτίμηση της εγκατάστασης περιλαμβάνει το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού του εργοστασίου, καθώς και τα λειτουργικά έξοδα για μια δεδομένη χρονική περίοδο, περιλαμβανομένων των ενεργειακών εξόδων, μισθών εργαζομένων, συντήρησης κ.λπ. Αυτό μπορεί να επεκταθεί για να συμπεριλάβει έξοδα σχεδίασης και νομικά έξοδα, καθώς και για την προσαρμογή αυτών των τιμών ανάλογα με την τοποθεσία του εργοστασίου.

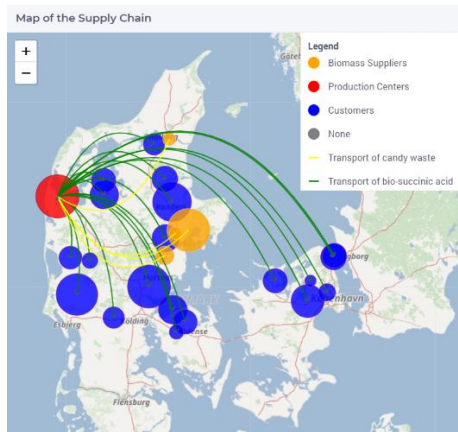
Λόγω των πολυπλοκοτήτων που εμπεριέχει η ανάπτυξη αυτού του μοντέλου, δεν κωδικοποιήθηκε άμεσα με το χέρι, αλλά χρησιμοποιήθηκε ένας από τους πολλούς επαγγελματικούς προσομοιωτές χημικών διεργασιών που είναι διαθέσιμοι στην αγορά. Κάθε ένας από αυτούς τους προσομοιωτές

μπορεί να έχει κάποιες προκλήσεις, αλλά γενικά θα πρέπει να είναι ικανοί να ολοκληρώσουν τις προηγούμενες εργασίες. Στην περίπτωση του έργου CoCE, χρησιμοποιήθηκε η σουίτα Aspen (Aspen HYSYS, Aspen Energy Analyzer, Aspen Process Economic Analyzer, κ.λπ.).



Σχήμα 3. Μοντέλο Aspen HYSYS της διεργασίας Βιομεθανωσης.

## Β) Τμήμα Μοντελοποίησης Εφοδιαστικής Αλυσίδας



Εικόνα 4. Χάρτης μιας βελτιστοποιημένης αλυσίδας εφοδιασμού που δημιουργήθηκε από το AIMMS.

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης βιωσιμότητας βρίσκονται στην ενότητα παραδοτέων της ιστοσελίδας του CooCE.

Επιπλέον, στο πλαίσιο των εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων του CooCE, η Imperial ανέπτυξε ένα APP. Αυτή η εφαρμογή επιτρέπει την αξιολόγηση επιλογών για την αξιοποίηση του βιοαερίου. Η εφαρμογή περιέχει τρία μαθήματα που επιτρέπουν στον χρήστη να αλλάξει τα δεδομένα χωρητικότητας σε μια μονάδα βιοαερίου και να εξετάσει τις αλλαγές που παράγει στις ταμειακές ροές, τον χρόνο απόσβεσης και άλλες παραμέτρους. Αυτή η εφαρμογή είναι προσβάσιμη ακολουθώντας τον παρακάτω κωδικό QR:



IMPERIAL APP FOR TRAINING

Εικόνα 5. APP που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης CooCE

### Αναφορές και σύνδεσμοι

[Aspen HYSIS](#) website

CooCE. 2024. Harnessing potential of biological CO<sub>2</sub> capture for Circular Economy.

<https://cooce.eu/>

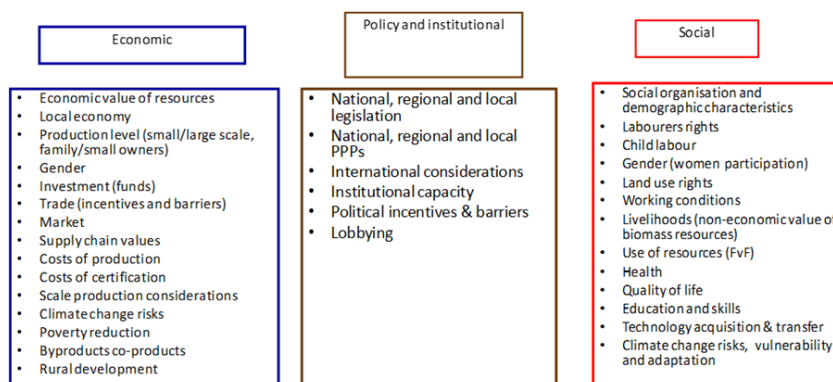
ISO. 2006. International Standard Organisation, SS-EN ISO 14044, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines, ISO.



## Η Διενέργεια Αξιολόγησης Κοινωνικής Βιωσιμότητας: η περίπτωση του CoCoCE

Η αξιολόγηση της βιωσιμότητας που αφορά τις περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις έχει καθιερωθεί και είναι υποχρεωτική για τις νέες τεχνολογίες που περιλαμβάνουν βιοδιαδικασίες και πρέπει να αξιολογούνται σε όλη την αλυσίδα αξίας τους.

Η [Imperial](#) εργάστηκε στο [WPS](#) στην αξιολόγηση της κοινωνικής βιωσιμότητας. Αυτό περιλαμβάνει την αξιολόγηση των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων πολιτικών, έργων ή πρακτικών. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες και πλαίσια για την αξιολόγηση της κοινωνικής βιωσιμότητας, συμπεριλαμβανομένης της Κοινωνικής Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής (SLCA), η οποία βασίζεται στην Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (LCA). Η LCA αξιολογεί τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος ή διαδικασίας, προσφέροντας πληροφορίες για την αποδοτικότητα της παραγωγής και εντοπίζοντας περιοχές για βελτίωση. Καλύπτει όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, όπως η εξόρυξη πρώτων υλών, η επεξεργασία, η μεταφορά, η χρήση και η απόρριψη. Ωστόσο, ενώ η LCA περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων για το βασικό προϊόν και για ολόκληρο τον κύκλο ζωής όλων των υλικών που εμπλέκονται στην παραγωγή του, η SLCA απαιτεί επιπλέον συλλογή δεδομένων που σχετίζονται με οργανωτικά και κοινωνικά στοιχεία σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού. Η SLCA μπορεί επίσης να συνδυαστεί με την Αξιολόγηση Κοινωνικών Επιπτώσεων (SI) για να παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη και ισχυρή αξιολόγηση (Diaz-Chavez, 2014). Η Εικόνα 1 δείχνει ένα δείγμα κοινωνικών, οικονομικών και πολιτικών θεμάτων που μπορούν να αξιολογηθούν σε σχέση με τις επιπτώσεις τους. Η Εικόνα 2, με τη σειρά της, δείχνει πώς αυτά συνδέονται μεταξύ τους.



Εικόνα 1: Θέματα για την Αξιολόγηση Επιπτώσεων (Diaz-Chavez, 2014)





Εικόνα 2: Ανάλυση Συστήματος Προϊόντος με SLCA και SIA (Diaz-Chavez, 2014)

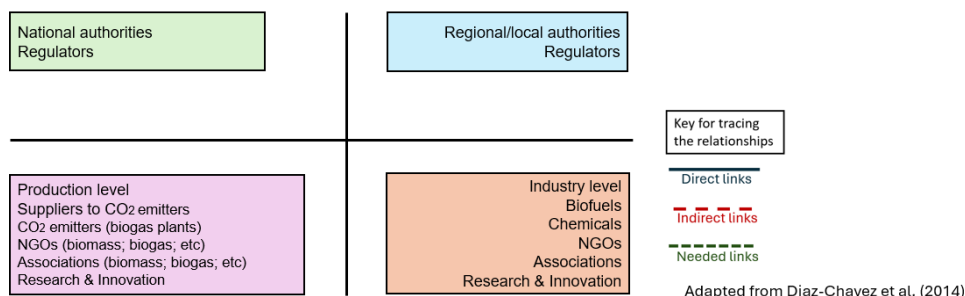
Η Αξιολόγηση Κοινωνικής Βιωσιμότητας του CooCE πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια συνδυαστική προσέγγιση που αναπτύχθηκε από τον Diaz-Chavez (2014) και συνδυάζει στοιχεία του SLCA και του SIA, τα οποία εφαρμόζονται σε μια σειρά θεματικών παραμέτρων για αξιολόγηση μέσω ποσοτικών και ποιοτικών δεικτών. Συνολικά, εξετάστηκαν 11 παράμετροι στο πλαίσιο του CooCE. Αυτές είναι: Εμπορία πρώτων υλών, Αναγνώριση Εμπλεκόμενων Μερών, Πολιτικές και Κανονισμοί, Σημείο Εκπομπής CO<sub>2</sub>, Συμμετοχή της Κοινότητας, Αγροτική Ανάπτυξη και Υποδομές, Δημιουργία Θέσεων Εργασίας και Μισθοί, Ισότητα Φύλων, Συνθήκες Εργασίας, Υγεία και Ασφάλεια, και Ανταγωνισμός με άλλους τομείς.

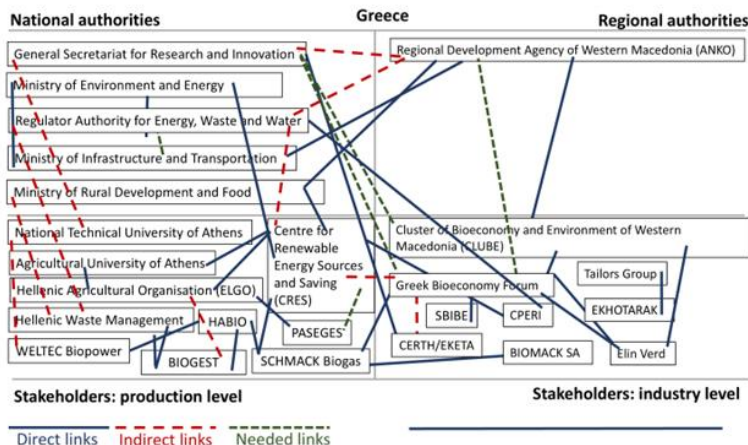
Η Εικόνα 3 απεικονίζει τις παραμέτρους για τον Χαρτογραφητή Εμπλεκόμενων Μερών, τα κριτήρια και άλλες προδιαγραφές. Η Εικόνα 4 δείχνει την προσέγγιση για τον Χαρτογραφητή Εμπλεκόμενων Μερών, ενώ η Εικόνα 5 απεικονίζει την εφαρμογή της στην Ελλάδα, μία από τις χώρες όπου αναπτύσσονται οι βιοτεχνολογίες του CooCE.

Πίνακας 1: Παράμετροι Εμπλεκόμενων Μερών

Parameter	Characteristics/ criteria	Assessment Level	Supply chain stage	Data type and source
<b>Identification of stakeholders along the supply chain</b>	Associations Authorities/regulators Businesses CO <sub>2</sub> emitters Investors Researchers etc	National Local	All	Qualitative Desk search Research Partners Quantitative Survey

Εικόνα 4: Μήτρα για τον Χαρτογράφηση των Εμπλεκόμενων Μερών





Εικόνα 5: Χαρτογράφηση των Εμπλεκομένων Μερών

Μια ποικιλία δεικτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διενέργεια της κοινωνικής αξιολόγησης, αντλώντας δεδομένα από αξιόπιστες βάσεις δεδομένων ή εργαλεία για την Κοινωνική Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (SLCA). Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει δείκτες και δεδομένα από τη βάση δεδομένων Social Hotspot, ένα εργαλείο για την Κοινωνική Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής, για την παράμετρο των Εργασιακών Συνθηκών.

Πίνακας 2: Κίνδυνοι που Σχετίζονται με το Εργατικό Δυναμικό

CooCE countries/ Sectors	Chemicals/plastics	Electricity	Gas	Transportation	Water
Overall country-sector risk of child labour					
Denmark, Italy, UK	L	L	L	L	L
Greece	M	M	M	M	M
Overall country-sector risk of forced labour					
Denmark	M	L	L	M	L
Greece	H	H	H	H	H
Italy	M	M	M	M	M
UK	L	L	L	L	L
Risk of trafficking in persons					
Denmark, Greece, Italy	M	M	M	M	M
UK	L	L	L	L	L

Source: SHDB (2024) Key: L= low; M=Medium; H=High; VH= Very High; ND= No Data; risk level colour is as used in the SHDB

Τα βασικά αποτελέσματα από την ανάλυση όλων των παραμέτρων μεταφέρονται στη Μήτρα Αξιολόγησης Κοινωνικής Βιωσιμότητας, η οποία χρησιμοποιεί το παρακάτω σύστημα αξιολόγησης.

Πίνακας 3 Κριτήρια Αξιολόγησης για τη Συνολική Εκτίμηση

Impact	Type	Evaluation
Direct	D	Where the project itself produces the impact
Background	B	Where local conditions influence implementation of the project
Positive	+	Project likely to produce a benefit
Negative	-	Project likely to produce impact that will not be of social benefit to country/local community
Neutral	N	Project produces no impact at all

Risk	Benefit	Type	Evaluation
L	L	Low	According to the data and indicators examined, and the likelihood of a problem emerging in the future even where the impact was assessed as positive
M	M	Medium	
H	H	High	
VH	VH	Very High	

Ο Πίνακας Κοινωνικής Βιωσιμότητας παρέχει μια συνοπτική εικόνα των βασικών κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων, κινδύνων και οφελών που σχετίζονται με την υλοποίηση του έργου CooCE, μαζί με συστάσεις για την αντιμετώπιση αρνητικών επιπτώσεων και υψηλού κινδύνου. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για μία παράμετρο.

Table 1 Social Sustainability Assessment Matrix

Parameter	Characteristics/Criteria	Type	Impact	Risk	Benefit	Actions/Mitigation	Observations
Policies and regulations	International National	B	- +	M	VH	Ensure stable, coherent, and interconnected policies for energy, transport, and platform biochemicals to encourage investment in the CooCE concept; devise policies specific to CCUS; amend existing EU policy instruments (e.g. <i>CEAP, CRCF, ETS-I, FuelEU Maritime, PWD, RED III, TEN-E, WDF</i> ); advocate for policies that support the circular economy and prioritise the use of captured CO <sub>2</sub> to reduce competition with other CO <sub>2</sub> sources	Extensive EU policy framework for energy, transport and platform biochemicals but many gaps (no specific legislation for CCUS nor bioproducts obtained through it); normative instruments need to be transposed properly/timely by member states to enable and support the scaling up of CooCE into successful commercial ventures

Συνολικά, αυτή η σύνθετη μεθοδολογία επιτρέπει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των πιθανών κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων και κινδύνων που συνδέονται με την εφαρμογή καινοτόμων βιοτεχνολογικών διαδικασιών και τη δημιουργία αλυσίδων αξίας σε τοπικό επίπεδο, όπως αυτές του έργου CooCE.

#### Αναφορές και σύνδεσμοι:

CooCE (2024) Harnessing the Potential of Biological CO<sub>2</sub> Capture for the Circular Economy: <https://cooce.eu/>

Diaz-Chavez, R (2014) 'Indicators for Socio-Economic Sustainability Assessment', in Ruts, D and R Janseen, (eds) Socio-economic impacts of Bioenergy Production, Springer: Switzerland: 17-37.

SHDB (2024) Social Hotspot Database: <http://www.socialhotspot.org/>

Αυτό το εγχειρίδιο/εργαλειοθήκη προετοιμάστηκε ως μέρος του WP5 του έργου CooCE και θα πρέπει να αναφερθεί ως εξής:

Díaz-Chavez R, Evans Y, Giarola S, Basterrechea P, Zacharopoulos I, Treu L, Morlino M S, Gaspari M Müller B, Porqueddu I and Agostini S. 2024. Best practice handbook/toolkit for the potential of biological CO<sub>2</sub> capture for circular economy. The CooCE project. <https://cooce.eu/>

NOTE: The original version of this Handbook/toolkit is in English. The translated version into Greek was AI originated and therefore there may be inaccuracies.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Η αρχική έκδοση αυτού του εγχειριδίου/εργαλειοθήκης βρίσκεται στα Αγγλικά. Η μεταφρασμένη έκδοση στα ελληνικά προήλθε από AI και επομένως μπορεί να υπάρχουν ανακρίβειες.

CooCE  $CO_2$  to  $CH_4$  CooCE - LIFE CO<sub>2</sub>toCH<sub>4</sub> Conjoint Public Workshop November 26th, 2024, at 14:00 CET Click to Join the meeting

**CooCE**  
ACT-CooCE

Harnessing potential of biological CO<sub>2</sub> capture for Circular Economy

Accelerating CCS Technologies

Biomethane	Biosuccinic acid	PHAs
Biofuel	Chemical building block	Biopolymer