



**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

# Danish version/Dansk version

## 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.

## Indholdsfortegnelse

Forkortelser .....	4
1. Værktøjskassen .....	5

## Abbreviations

ACRONYM	DEFINITION
BioSA	Biosuccinic Acid
CCUS	Carbon Capture, Use and Storage
CH <sub>4</sub>	Methane/Biomethane
CNG	Compressed Natural Gas
CO <sub>2</sub>	Carbon Dioxide
IC	Imperial College London
EOR	Enhanced Oil Recovery
EU	European Union
EUBCE	European Biomass Conference and Exhibition
EU ETS	EU Emissions Trading Scheme
HRS	Heat recovery steam generator
H <sub>2</sub>	Hydrogen
LNG	Liquefied Natural Gas
Net Zero	Commitment to reaching net zero carbon emissions by 2050
PHA	Polyhydroxyalkanoates (polymers)
R&D	Research and Development
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
TRL	Technological Readiness Level
T&S	Transport and Storage
WP	Work Package

## 1. Værktøjskassen

Formålet med denne rapport er at præsentere **CooCE-håndbogen** i form af en **værktøjskasse**. Det har til formål at præsentere de vigtigste metoder, værktøjer og processer, der anvendes til de forskellige veje i CooCE-plattformen, i en hurtig form. Værktøjskassen skal gøre det muligt for industrielle aktører og andre interessenter at afgrænse gennemførligheden og procedurerne for produktionen af de vigtigste produkter under CooCE-konceptet.

Værktøjskassen præsenterer også de vigtigste resultater af CooCE-projektet som en del af dets udnyttelsesmål. Håndbogen eller værktøjskassen omhandler ni hovedemner for brugernes hurtige adgang til at afgrænse deres egne aktiviteter i forbindelse med cirkulær økonomi og mulighederne for at anvende kuldioxid opsamlet fra forskellige kilder, i dette tilfælde biogasanlæg. Hvert emne indeholder en række live-links, der giver brugeren adgang til forskellige dokumenter på COOCE's hjemmeside og anden relevant litteratur.

De emner, der præsenteres, er:

1. CooCE-konceptet
2. CCUS- og biogasproduktion
3. Biometanering
4. Ravsyre
5. Ravsyre med biogasopgradering
6. Biopolymerproduktion gennem CCUS
7. Cirkulær CO<sub>2</sub> til PHB-konvertering
8. Modellering af forsyningskæden
9. Vurdering af social bæredygtighed

Håndbogen/værktøjskassen er ikke beregnet til at erstatte fuldstændige metodebeskrivelser, men er i stedet beregnet til at give let og nem adgang til forskellige metoder, oplysninger og ressourcer. Hvert afsnit præsenterer referencer og links. Håndbogen findes også på græsk, italiensk og dansk. Ved at klikke i hver sektion kan brugeren gå direkte til den sektion, og ved at klikke på toolkit returneres siden med alle sektioner.

# TOOLKIT

[CooCE  
koncept](#)



[CCUS og  
biogas  
produktion](#)



[Biometanering](#)



[Ravsyre  
Syre](#)



[Ravsyre  
Produktion af syre  
med CCS](#)



[Biopolymer  
produktion  
gennem CCUS](#)



[CO2 til PHB  
konvertering](#)

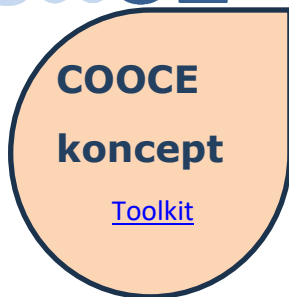


[Modellering af  
forsyningskæden](#)



[Social  
Bæredygtighed  
vurdering](#)





CooCE-konceptet sigter mod at bidrage til overgangen til en ressourceeffektiv, lavemissions- og klimamodstandsdygtig økonomi.

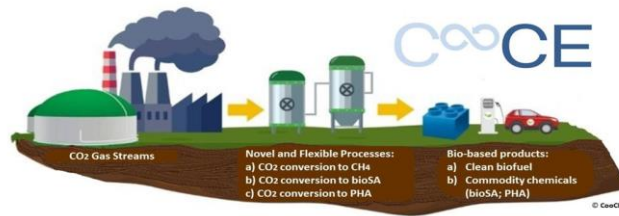
Det vil gøre dette ved at tilbyde industrien en måde at afkarbonisere deres aktiviteter gennem en portefølje af forskellige og fleksible CCUS-teknologier, der også kan hjælpe med at reducere afhængigheden af fossile ressourcer. CCUS-teknologier omdanner CO<sub>2</sub> til værdifulde kommercielle produkter eller materialer (f.eks. byggematerialer, brændstoffer, kemikalier og plast) eller til råvarer til videre industriel forarbejdning. I CooCE-konceptet omdannes CO<sub>2</sub> til (endelige eller mellemprodukter) bioprodukter ved hjælp af forskellige CCUS-teknologier (Figur 1), beskrevet som følger.

Høj renhed biomethan (CH<sub>4</sub>>95%) opnås fra CO<sub>2</sub>-hydrogenering. Denne teknologi muliggør hybrid energilagring på stedet: den værdsætter overskuddet af vedvarende energi til brint og genererer biomethan. Biomethan kan bruges enten som væske (motsvarende LNG og som kan give et nyttigt alternativ til skibsfart) eller som komprimeret gas (motsvarende CNG), som kan bruges i de fleste køretøjer og injiceres i naturgasnettet.

Biosuccinsyre (BioSA) opnås ved fermentering af biogas sammen med en kulhydratrig råvare (typisk fra affaldsstrømme). Denne teknologi vil undgå behovet for at bruge biomasse-råvarer og undgå landbrug til dyrkning. BioSA erstatter let den fossile-baserede kemiske succinsyre. Succininsyre bruges til at fremstille mange varer inden for kemisk industri, fødevarer-, landbrugs- og medicinalindustrien. Efterspørgslen kommer fra personlig pleje, drikkevarer, polyurethan og bioplastindustrien.

Biopolymerer (PHA'er) opnås gennem bio-katalytiske teknologier (baseret på *Cupriavidus necator* og *Synechocystis*), som bruger kulstofrige affaldsstrømme som biogas. Disse biopolymerer akkumuleres som opbevaringsmateriale i mikroorganismers celler, der fungerer som både kulstof- og energi-reserver. PHA'er har lignende egenskaber som almindelige plastmaterialer. Desuden er de biokompatible og nedbrydelige. De produceres i industriel skala til mange produkter som bioplast til emballage, præbiotiske og ernæringsmæssige forbindelser til medicinske anvendelser og bio-cremer til kosmetik.





Figur 1 CooCE-konceptet

### Referencer/Links

CooCE. 20224. Harnessing potential of biological CO<sub>2</sub> capture for Circular Economy.

<https://cooce.eu/>

## CCUS og biogas produktion

### [Toolkit](#)

Den Internationale Panel for Klimaændringer (IPCC) (2014) erklærede, at verden skal nå netto-nul drivhusgasemissioner inden midten af århundredet og netto-negative emissioner kort tid derefter for at afbøde de alvorlige konsekvenser af klimaforandringer.

Derfor hjælper aktiviteter som CO<sub>2</sub>-genanvendelse med at reducere antropogene emissioner, hvor den udsendte CO<sub>2</sub> fanges og omdannes til værdifulde kemikalier, brændstoffer eller materialer. Da CO<sub>2</sub> bruges som råvare i flere industrier, er virksomheder interesseret i biogen CO<sub>2</sub>, en klimavenlig kilde til CO<sub>2</sub>.

Biogen CO<sub>2</sub> er kuldioxid (CO<sub>2</sub>), der stammer fra nedbrydning, fordøjelse eller forbrænding af biomasse eller biomasseafledte produkter.

Det er en del af den "naturlige korte kulstofcyklus". Denne atmosfæriske CO<sub>2</sub> assimileres af biomasse gennem fotosyntese og returneres derefter som biogen CO<sub>2</sub> til atmosfæren eller til jorden, afhængigt af konversionstypen og den endelige anvendelse af biomassen. Ifølge European Biomass Association (EUBA, 2022), er der ingen CO<sub>2</sub>-akkumulering i atmosfæren under den naturlige korte kulstofcyklus, i stedet frigiver forbrænding af fossilt kuldioxid, der er lagret under jorden og tidligere ikke var tilgængeligt, yderligere CO<sub>2</sub> til atmosfæren.

Kilder til biogen CO<sub>2</sub> inkluderer:

Forbrænding af fast, flydende og gasformig biomassebrændstof, bioethanolvermering, vin- og ølproduktion og biogasopgraderingsprocesser i biogasindustrien, som i tilfælde af CooCE.

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



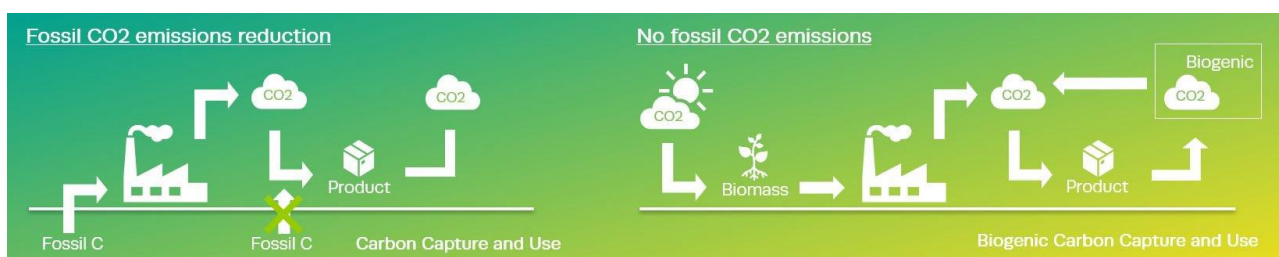
Figur 1. Eksempler på kilder til CO<sub>2</sub> i CooCE-projektet

Der har været forskellige afbødningsforanstaltninger for at reducere drivhusgasemissioner, såsom reduktion af brugen af fossile brændstoffer (inklusive kul og naturgas), forbedring af transportbrændstoffer med biofuels, udfasning af fossile brændstoffer til transport, reduktion af emissioner fra industrisektoren og reduktion af afskovning og emissioner fra landbruget blandt andet.

Nogle af de nyeste omfatter alternative former for at reducere eCO<sub>2</sub> i atmosfæren ved hjælp af teknologier som CO<sub>2</sub>-fangst og opbevaring (CCS), CO<sub>2</sub>-fangst og udnyttelse (CCU), CO<sub>2</sub>-fangst, anvendelse og opbevaring (CCUS) som den, der anvendes i CooCE-projektet. Nogle definitioner fra European Biomass Association (EUBA, 2022) præsenteres nedenfor:

- **Carbon Capture and Utilisation eller CCU: løsninger, hvor CO<sub>2</sub> fanges for at blive brugt som råvare til at producere brændstoffer, kemikalier og materialer. Ved at bruge biogen CO<sub>2</sub>, lav-emissions eller vedvarende energikilder, kan de erstatte deres fossile baserede modpartner og dermed reducere netto CO<sub>2</sub>-emissioner til atmosfæren. Disse løsninger er "bio-CCU" og involverer principperne for en bæredygtig cirkulær kulstoføkonomi, da det omfatter CO<sub>2</sub>-reduktion, genbrug, genanvendelse og fjernelse.**
- Bio-Carbon Capture and Storage eller bio-CCS, er når biogen CO<sub>2</sub> fanges og permanent opbevares under jorden i former for geologisk opbevaring såsom udtømte gasfelter eller dybe salte akviforer; det gør det muligt at fjerne CO<sub>2</sub> permanent fra atmosfæren.
- Bio-CCUS refererer til biogen CO<sub>2</sub>, der lagres i lang tid i et nyt produkt, enten byggemateriale eller plast. Dette bruger biogen CO<sub>2</sub> til at fremstille nye materialer.

Når man sammenligner CCU med fossil CO<sub>2</sub> og CCU med biogen CO<sub>2</sub> som i følgende diagram (EUBA, 2022), kan man se, at der er flere fordele ved CCU med biogen CO<sub>2</sub>.



Figur 2. Sammenligning af CO<sub>2</sub>-emissioner fra fossile og ikke-fossile kilder (EUBA, 2022)

## FORDELE

1. Kilden til CO<sub>2</sub> (fossil vs biogen)
2. Produktet eller servicen, som det CO<sub>2</sub>-baserede produkt erstatter, og den relaterede emissionsreduktion, der muliggøres ved brug af biogen CO<sub>2</sub>
3. Produktets kulstoflagringstid (midlertidig vs permanent)
4. Energieffektivitet og CO<sub>2</sub>-fodafttryk ved omdannelse af CO<sub>2</sub> til andre molekyler
5. Skalaen af mulighederne for CO<sub>2</sub>-anvendelse

Mulighederne for at fange CO<sub>2</sub> og bruge det til andre forsyningskæder og produkter er forklaret i CooCE-konceptet.

[Imperial College](#) bidrog til forskellige internationale *fora*, der forklarede disse begreber. Yderligere [koncepter og databaser om CCUS](#) kan findes på CooCE's websted samt [nationale politikker om CCUS](#).

### Referencer og links

CooCE. 20224. Harnessing potential of biological CO2 capture for Circular Economy.

<https://cooce.eu/>

Diaz-Chavez R and Muller B. 2024. "Biogenic CO2 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/](https://www.europeanbiogas.eu/_trashed-3/)

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

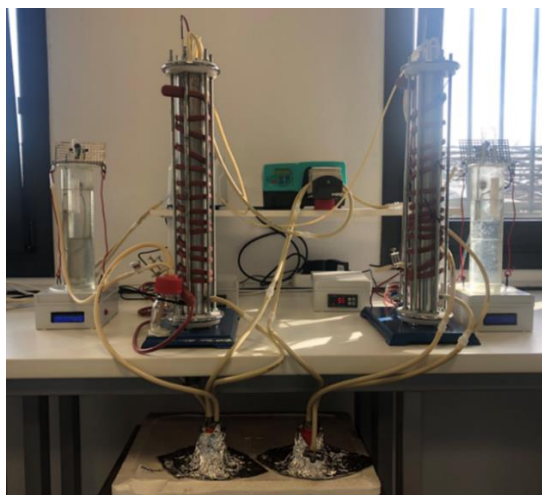
## Biometanering

### [Toolkit](#)

#### **Metan (CH<sub>4</sub>) er en farveløs, lugtfri gas og den primære komponent i naturgas.**

Da det er vidt tilgængeligt og indeholder meget energi, anvendes metan i mange industrier. Nogle anvendelser omfatter energiproduktion, hvor det brændes i kraftværker for at producere elektricitet, opvarmning i hjem, virksomheder og industrielle omgivelser, samt som transportbrændstof i form af komprimeret eller flydende naturgas (CNG eller LNG). Metan kan også genereres biologisk ved at omdanne kuldioxid (CO<sub>2</sub>) og brint (H<sub>2</sub>) til metan, en proces kendt som "biomethanation". Denne omdannelse faciliteres af specialiserede anaerobe mikroorganismer, kendt som hydrogenotrofiske methanogener. Processen betegnes som eks-situ, når CO<sub>2</sub> stammer fra eksterne kilder (for eksempel udstødningsgasser, biogas, syngas osv.) og forsynes med H<sub>2</sub> til væskefasen af reaktoren.

Som en del af CooCE-projektet ledede [ELGO-DIMITRA Arbejdspakke 2](#), som fokuserede på at studere biomethanationsprocessen og etablere de ideelle forhold. Denne undersøgelse blev gennemført ved hjælp af små skala (laboratorie-skala) anaerobe reaktorer i en trickle bed-konfiguration (Fig. 1). Reactorer af denne type er fyldt med materialer, der gør det muligt for mikroorganismer at sætte sig fast på dem. To materialer blev testet: aktivt kul-piller og K1 polyethylen Raschig-ringe. Reactorerne blev evalueret ud fra, hvor godt de producerede CH<sub>4</sub>, når mængden af gasforsyning gradvist blev øget, og også når gasforsyningen blev stoppet i 2 til 5 uger. I det første tilfælde fungerede K1 Raschig-ringe bedre og opnåede en CH<sub>4</sub>-renhed på 95% ved alle testede niveauer af gasforsyning (fra 0,083L/LReactor/h til 1L/LReactor/h). I det andet tilfælde fungerede begge materialer godt, selv efter lange perioder uden substrat, og vendte hurtigt tilbage til en CH<sub>4</sub>-renhed på 95%, når forsyningen blev genoptaget.



Figur 1. Laboratorie-skala bioreaktor opsætning

Derudover blev biomethanationsprocessen testet i større skala ved hjælp af en prototypereaktor med et arbejdsvolumen på 100L (Fig. 2). Baseret på resultaterne fra de små eksperimenter blev K1 Raschig-ringe valgt til pilotreaktoren. Undersøgelsen viste dog, at det ikke altid er let at skalere op fra små eksperimenter til større. Når der blev forsøgt at øge gasforsyningen gradvist som i laboratorietestene, blev reaktorens ydeevne ustabil. På trods af disse udfordringer, og med omhyggelig overvågning og justeringer, lykkedes det reaktoren at opfylde og overgå CooCE-målene, opnå en CH<sub>4</sub>-renhed over 95% og fange mere end 5 kg CO<sub>2</sub> pr. M<sup>3</sup> reaktor pr. Dag, hvilket opfyldte projektets mål.



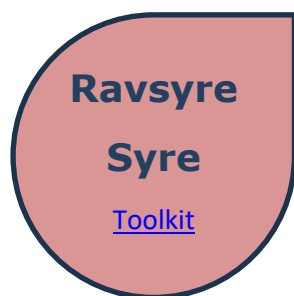
Figur 2. Pilot-skala bioreaktor opsætning

#### Referencer og links

<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/>

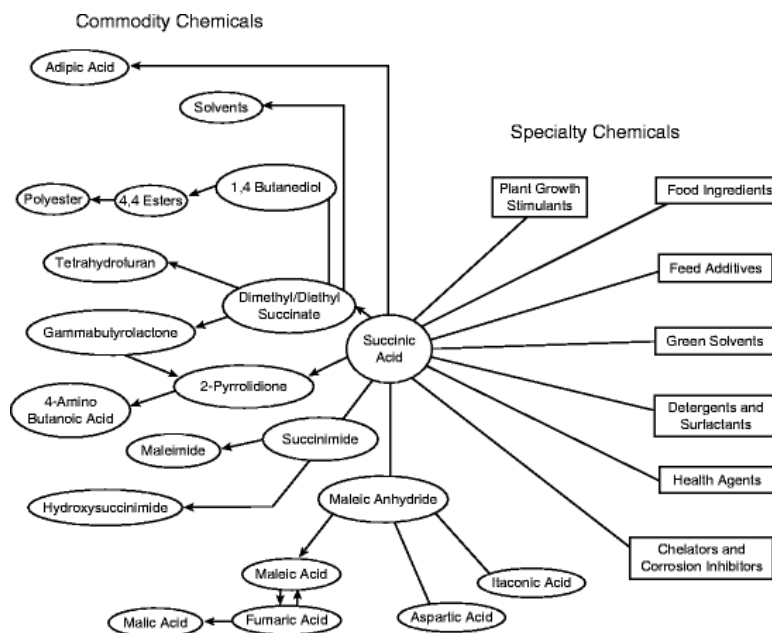


[Danmarks Tekniske Universitet](#) (DTU) arbejdede med ravsyre, som Succinsyre er en dicarboxylsyre med den kemiske formel  $(\text{CH}_2)_2(\text{CO}_2\text{H})_2$ .

Navnet stammer fra det latinske ord succinum, der betyder rav, da det historisk blev produceret ved destillation af rav. I dag stammer succinsyre dog hovedsageligt industrielt fra petrokemisk baserede substrater, og den primære proces for dets produktion er hydrogenering af maleinsyreanhydrid. For at nå målet om netto-nulemissioner inden 2050, som er fastsat af EU, er der et presserende behov for at skifte til renere og mindre kulstofintensive produktionsmetoder. Dette bliver endnu vigtigere, hvis det tages i betragtning, at efterspørgslen efter succinsyre stiger, og det forventes at blive en 200-million-dollar industri i 2026<sup>1</sup>.

Stigningen i efterspørgslen efter succinsyre drives af dens rolle som platformkemikalie og den brede og forskelligartede række af anvendelser, den har.

Den kan bruges som en prekursor til at producere en bred vifte af industrielle kemikalier og som byggesten for bioplast, hovedsageligt polybutylensuccinat. På grund af sine egenskaber som tensid bruges succinsyre som ingrediens i vaskemidler, og den er også blevet brugt i fødevarerindustrien som syre regulator. Endelig, på grund af sine antiinflammatoriske egenskaber, har den fundet anvendelse i medicinalindustrien<sup>2,3</sup>.

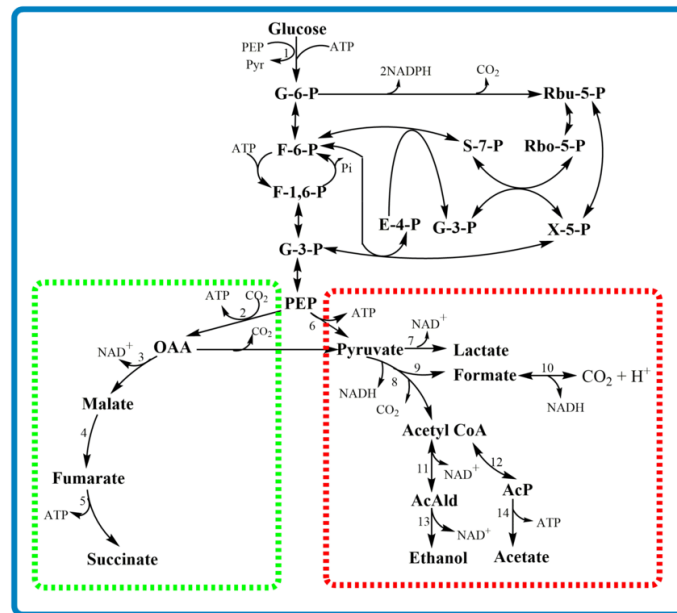


Figur 1: Anvendelser af succinsyre (Zeikus et al. (1999))

Alternativet til den petrokemisk baserede produktion af succinsyre er brugen af biologiske processer som mikrobiologisk fermentation. Deres alvendelse medfører en lang række fordele: Disse processer er mindre energi- og kulstofintensive sammenlignet med processer, der bruger petrokemisk afledte substrater, affaldsstrømme kan udnyttes som substrater, og processen kan indgå i et biorefining-system. Den mikrobiologiske produktion af succinsyre kræver forbrug af CO<sub>2</sub>, hvilket gør processen til en fremragende metode til kulstofoplagring.

Succinsyre er en del af citronsyrecyklussen (TCA-cyklussen). De fleste mikroorganismer, der er i stand til at producere succinsyre, opnår dette gennem den omvendte TCA-cyklus, og derfor forbruger de CO<sub>2</sub> i stedet for at producere det. Mere specifikt, for hver mol succinsyre, der produceres, kræves 1 mol CO<sub>2</sub>, som derfor fanges af processen. Desuden, jo højere koncentrationen af CO<sub>2</sub> er, desto højere kan udbyttet af succinsyre opnås, da høje koncentrationer af CO<sub>2</sub> fremmer den metaboliske skift mod succinsyrevejen, hvilket resulterer i mindre produktion af andre organiske syre-biprodukter som eddikesyre og myresyre<sup>4,5</sup>.





**Figur 2: Metabolisk vej for *Actinobacillus succinogenes*, en af de vigtigste succinsyreproducerende mikroorganismer (Dessie et al. (2021))**

Evnen til kulstoffiksering i en succinsyreproces er blevet demonstreret at være højere end i andre biologiske processer, der assimilerer kulstof, såsom algeopdyrkning<sup>6</sup>, og kombinationen af denne proces med udnyttelsen af affaldsstrømme som fermenteringssubstrat kan være en løsning på det nødvendige skift mod en mere bæredygtig platformkemikalieproduktion.

### Referencer og links

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).

## Ravsyre Produktion med CCS

[Toolkit](#)

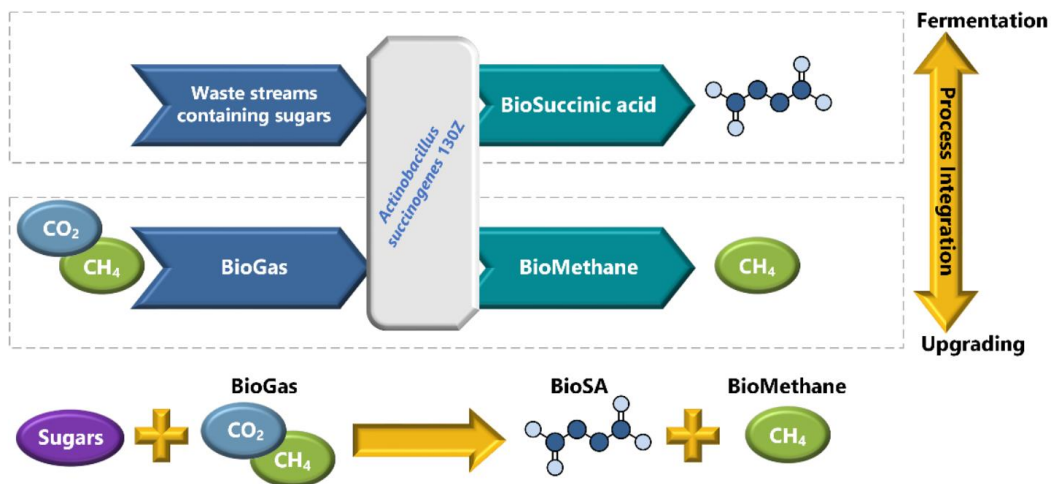
Succinsyre kan produceres biologisk, da det er en af de vigtigste metabolitter i citronsyrecyklussen (TCA-cyklussen), den primære metaboliske vej, som mikroorganismer bruger til at producere energi ved at forbruge en organisk kulstofkilde.

Visse bakterier, såsom *Actinobacillus succinogenes*, er naturlige overproducenter af succinsyre, da de producerer og udskiller store mængder af det ekstracellulært. Produktionen af succinsyre sker gennem den omvendte TCA-cyklus, og udover den organiske kulstof kræves CO<sub>2</sub> for at skifte den metaboliske vej mod succinsyre og favorisere dens produktion frem for produktionen af andre organiske syrer, såsom eddikesyre eller myresyre. Desuden sker produktionen af succinsyre og forbruget af CO<sub>2</sub> i et 1:1 mol-forhold, hvilket betyder, at denne proces er velegnet til at blive brugt som en CO<sub>2</sub>-fangst teknologi<sup>1</sup>.

En anden biologisk proces med stort økonomisk potentiale og positiv miljøpåvirkning er anaerob nedbrydning, hvor en blandet kultur forbruger organisk substrat og producerer biogas (CH<sub>4</sub> og CO<sub>2</sub>), en blanding der ligner naturgas.

Biogassen har en sammensætning på omkring 55 % CH<sub>4</sub> og 45 % CO<sub>2</sub>. For at kunne bruges som brændstof og kunne injiceres i naturgasnettet, skal den have et CH<sub>4</sub>-indhold på over 90 %. Derfor skal biogas opgraderes ved at fjerne den CO<sub>2</sub>, den indeholder.

Ser man på begge processer, er der en klar forbindelse mellem dem, og de kan kombineres synergistisk, hvilket skaber en platform, der producerer både værdifulde kemikalier og ren bioenergi. Biogassen, der kommer fra en anaerob nedbrydningsenhed, kan bruges som den uorganiske kulstofkilde til succinsyre-fermentering, hvilket resulterer i produktionen af både meget høj kvalitet biomethan og succinsyre.

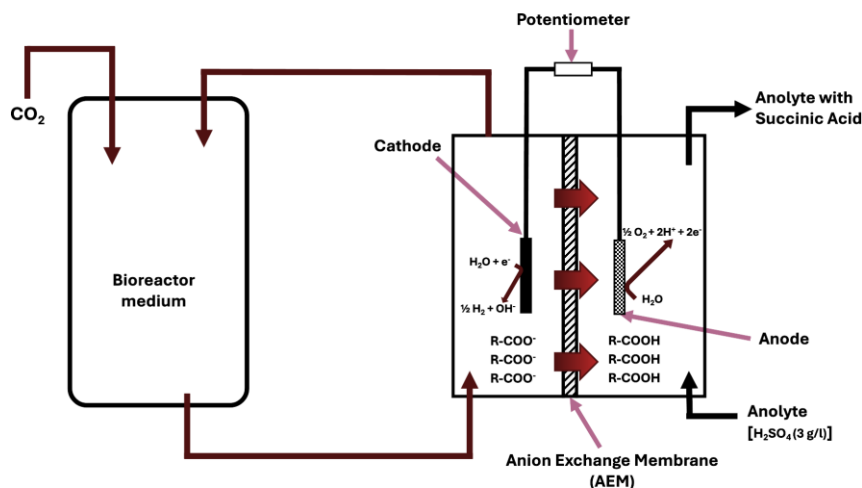


Figur 1: Skema over succinsyreproduktionsprocessen udviklet på DTU

For den proces, der er udviklet på [Technical University of Denmark \(DTU\)](https://www.dtu.dk) på [WP3](#), anvendes affaldsstrømmen fra slikproduktion. Affaldsstrømmen består af tre forskellige sukkerarter, nemlig glukose, sukrose og maltose. Dette er et fremragende substrat til mikrobiologisk fermentation af flere grunde. Det består hovedsageligt af sukkerarter, som bakterier naturligt kan vokse på, uden behov for genetisk modificering. På trods af at det er en affaldsstrøm, indeholder det ikke toksiske stoffer, der kan have en hæmmende effekt på væksten af bakteriekulturen. Da det er en affaldsstrøm, kommer det med en meget lav pris, hvilket sænker de samlede omkostninger ved processen, samtidig med at det øger bæredygtigheden og rentabiliteten af processen<sup>2</sup>.

Den store mængde succinsyre, som *A. Succinogenes* er i stand til at producere, kan være en ulempe, da høje koncentrationer kan have en hæmmende effekt på dens vækst og efterfølgende på udbyttet og produktiviteten af processen.

Af denne grund er en in situ elektrochemisk genvindingsmodul blevet integreret i processen. Ved at anvende elektrisk potentiale på systemet adskilles succinsyre ved hjælp af en anionbyttemembran<sup>3</sup>.



Figur 2: Skema over in-situ produktgenvindingsprocessen

Inkorporeringen af dette modul i processen kan medføre flere fordele:

Ved at fjerne den hæmmende succinsyre og andre organiske syre-biprodukter, bliver udbyttet af processen højere. Succinsyre adskilles in-situ, hvilket medfører lavere omkostninger i den efterfølgende behandling, som er en kendt økonomisk flaskehals for de fleste bioprocesser<sup>4</sup>.

Denne proces, der inkorporerer både biogasopgradering og in-situ produktgenvinding, er en meget lovende løsning for at integrere produktionen af succinsyre i en platformkemikalie- og energi-biorefining, som integrerer et aspekt af CO<sub>2</sub>-fangst, hvilket øger dens miljømæssige bæredygtighed og økonomiske gennemførlighed.

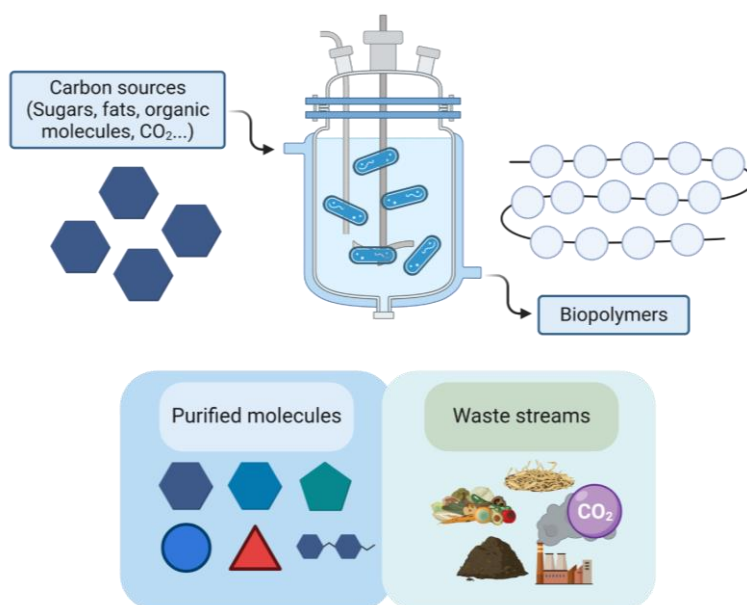
### Referencer og links

1. McKinlay, J. B. & Vieille, C. <sup>13</sup>C-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).
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).

## Biopolymer produktion igennem CCUS Toolkit

Massiv plastforbrug bidrager i høj grad til forurening og global opvarmning, da produktionen primært er afhængig af fossile kulstof- og energikilder. Plastik bidrager direkte til emissionen af drivhusgasser (GHG'er) i hver fase af deres livscyklus, fra udvinding, raffinering og fremstilling til bortskaffelse. Desuden er de normalt ikke fornybare og ikke-bionedbrydelige, så de kan forblive i økosystemerne i hundreder af år, komme ind i fødekæden og til sidst blive en menneskelig sundhedsmæssig bekymring. Biopolymerer kan produceres af planter (f.eks. og polylactic acid, PLA), dyr (chitosan og chitin), og mikroorganismer (polyhydroxyalkanoater, PHA) eller opnås ved behandling af vedvarende ressourcer (f.eks. biomasse, landbrugsrester og industrielt affald). Vedtagelsen af biopolymerer kan være miljømæssigt fordelagtig, endnu mere hvis produktionsprocessen er afhængig af at fange CO<sub>2</sub> som kulstofkilde.

Blandt CooCE-projektets mål repræsenterer produktionen af biopolymerer fra CO<sub>2</sub> et innovativt aspekt, der hjælper med at lukke kulstofloopet, i et cirkulært system, hvor kulstofemissioner genanvendes til værdifulde produkter. Biopolymere produceres naturligt af levende organismer, hvilket gør dem tilgængelige for produktion gennem fermentation: Ved at kende de passende dyrkningsforhold kan metabolismen af udvalgte organismer udnyttes til at maksimere produktionen af det ønskede biopolymer.



Figur 1. Skematisk fremstilling af en bioprocess, hvor mikroorganismer omdanner den givne kulstofkilde til en biopolymer. Kulstofkilder er eksemplificeret i den nederste panel.

I en cirkulær økonomi-kontekst kan kulstoffet i affaldsstrømme bruges som en kilde til produktion af biopolymerer: dette er en fremragende strategi for at sænke omkostningerne, samtidig med at det giver en vej til at bortskaffe affaldsstrømme.

I denne sammenhæng er CO<sub>2</sub> en ideel lavpris kulstofkilde at udnytte, da det er overflødigt i røggasserne fra mange industrielle processer i sektorer, der spænder fra stål-, jern- og cementproduktion til biofuelproduktion og affaldsforbrænding. Eksistensen af mikroorganismer, der er i stand til samtidig at fiksere CO<sub>2</sub> og producere biopolymerer, åbner vejen for udviklingen af alternative CO<sub>2</sub>-fangst-, udnyttelses- og opbevaringsruter (CCUS), der er afhængige af disse metaboliske evner.

Traditionelle plastmaterialer dominerer stadig mange industrisektorer.

De er billige, holdbare og har flere egenskaber, der gør dem svære at erstatte for virksomheder. Deres anvendelse er dog forbundet med problemer, der ikke længere kan ignoreres, og et miljømæssigt og økonomisk bæredygtigt alternativ er presserende nødvendigt. Den stigende efterspørgsel efter biopolymerer på markedet stammer hovedsageligt fra emballagesektoren og produktionen af engangsprodukter, hvor biopolymerer repræsenterer et levedygtigt alternativ til fossilt baserede plastmaterialer. Dog udgør PHB, som har de bedste egenskaber med hensyn til bionedbrydelighed, stadig en begrænset andel på grund af de høje omkostninger, der i høj grad afhænger af kulstofkilden. Derfor repræsenterer udviklingen af en omkostningseffektiv CO<sub>2</sub> til PHB-konversion en mulighed, der vil imødekomme den stigende markedsefterspørgsel og afbøde klimaforandringer.

#### Referencer og links:

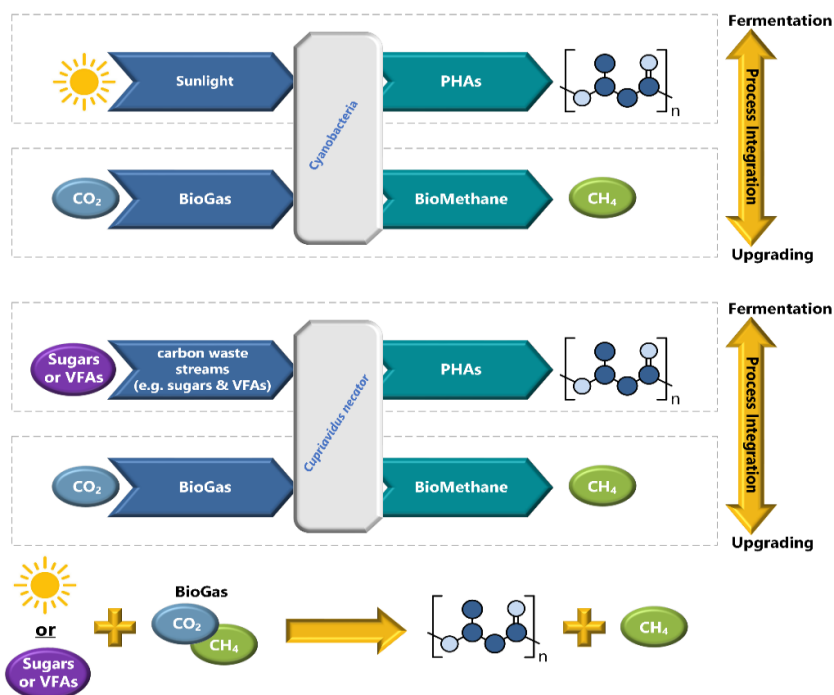
- <https://cooce.eu/wp4/>
- <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biopolymers-market-report>

## CO<sub>2</sub> til PHB konvertering

### Toolkit

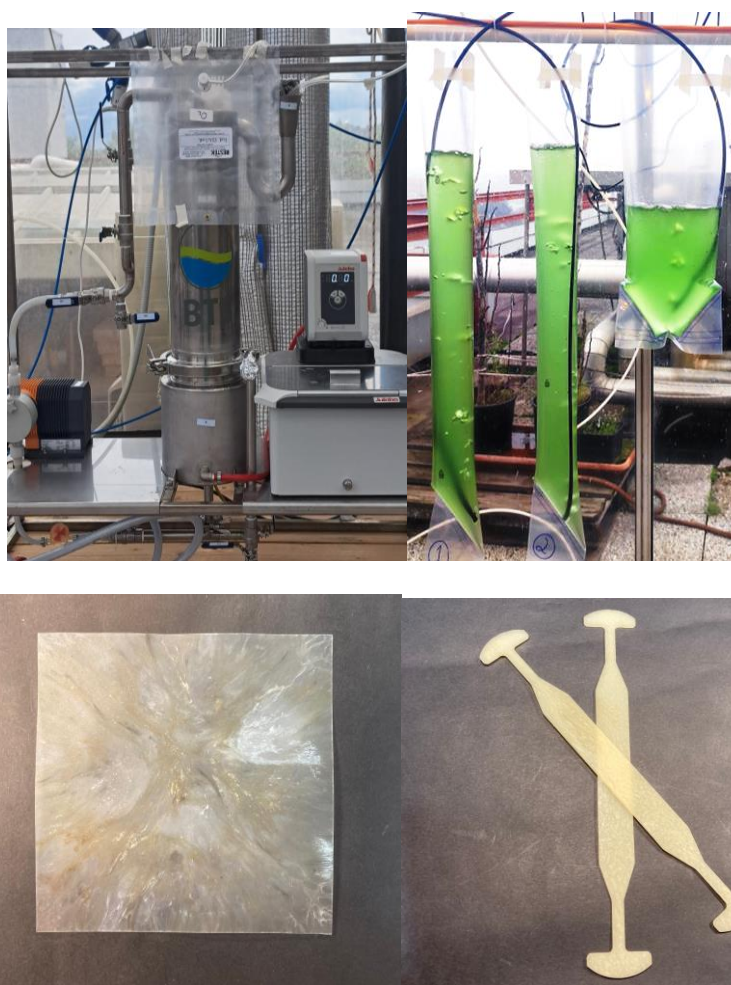
[Universitetet i Padova](#) deltager i CooCE-projektet med en [arbejdspakke](#), der fokuserer på biokonvertering af CO<sub>2</sub> og industrielle affaldsstrømme til polyhydroxybutyrat (PHB) inden for en cirkulær økonomisk tilgang. Omdannelsen af CO<sub>2</sub> til PHB opnås ved brug af bakterien *Cupriavidus necator* og cyanobakterien *Synechocystis* sp. B12. PHB er en meget bionedbrydelig polymer med egenskaber, der ligner den mere almindelige fossile baserede alternative polypropylen. De mikroorganismer, der anvendes i biokonverteringen, producerer PHB i form af intracellulære granuler og er i stand til at bruge CO<sub>2</sub> som den eneste kulstofkilde. *C. Necator* er i stand til at lagre store mængder biopolymer (op til 70 % af cellens tørvægt) og binde CO<sub>2</sub> i nærvær af brint og ilt. Dog kan spildevand rigt på sukker og flygtige fedtsyrer anvendes til bakterievækst, hvilket muliggør udviklingen af en fleksibel proces.

Cyanobakterien *Synechocystis* sp. B12 er en fotosyntetisk organisme, så den har primært brug for sollys, vand og CO<sub>2</sub> for at trives og kræver ikke dyre substrater, som ofte udgør en stor omkostning for denne type biologiske processer og påvirker deres samlede skalerbarhed.



Figur 1. Flydiagram over bioprocesserne til CO<sub>2</sub> til PHB, udviklet inden for Arbejdspakke 4 i CooCE

UniPD udvikler derfor to bioprocesser til omdannelse af CO<sub>2</sub> til PHB med det ambitiøse mål at koble dem med biogasproduktion: Rå biogas indeholder nemlig en betydelig mængde CO<sub>2</sub>, der kan fanges og bindes i PHB, hvilket resulterer i høj kvalitets biomethan (>95% CH<sub>4</sub>), som kan injiceres i gasnettet som et ækvivalent til naturgas. Med dette formål samarbejder UniPD med [BTS Biogas Srl](#) om levering af ægte biogasprøver til udførelse af tests og processtsimuleringer. Derudover støtter BTS UniPD i procesudviklingen ved at deltage i designet af de systemer, der er nødvendige til biokatalyse. En pilotreaktor, som har fået navnet "Dumbo", blev undersøgt, designet og bygget for at optimere opløseligheden af gasser i væsker under sikre forhold (især brint) og fremme den ønskede metabolisme af de udvalgte mikroorganismer (*C. necator*), der er til stede i kulturbouillon.



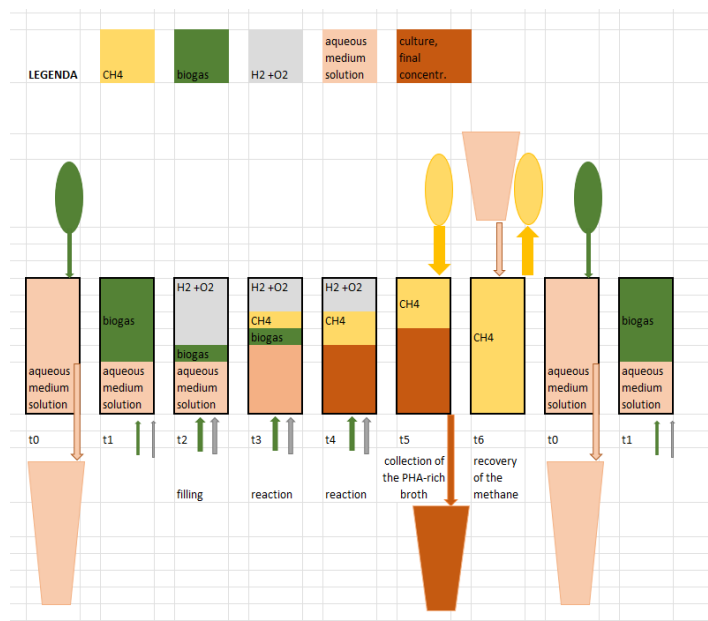
Figur 2. Bioreaktorer og fotobioreaktorer brugt til PHB-produktion med *C. Necator* (øverst til venstre) og *Synechocystis sp. B12* (øverst til højre). Prøver af PHB produceret ved UniPD er blevet testet som laminater (nederst til venstre), og emballageapplikationer er under udvikling (nederst til højre).

UniPD optimerer i øjeblikket de to biokonverteringssystemer i pilotskala med syntetiske gasblandinger og demonstrerer muligheden for integration med biogasopgradering, med lovende resultater vedrørende anvendeligheden af biogas som CO<sub>2</sub>-kilde.



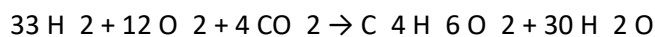
Den afgørende faktor for biokonvertering af CO<sub>2</sub> til PHA er tilgængeligheden af brint, og processen skal udføres, i det mindste i de indledende faser, i nærvær af et overskud af brint. *C. necator*s autotrofe metabolisme involverer også ilt, hvilket betyder, at gasblandingerne i reaktoren befinder sig inden for det eksplosive område for brint. Af disse grunde er reaktorens design udformet, så gasblandingen ikke kommer i kontakt med potentielle antændelseskilder, mens væsker forstøves ved at passere gennem en specialdyse, der maksimerer gas-væske-masseoverførsel.

Bioprocessen for PHA-produktion, der er koblet til biogasopgradering, er planlagt at finde sted i produktive cyklusser: råbiogas træder ind i systemet, og H<sub>2</sub> og O<sub>2</sub> leveres for at muliggøre CO<sub>2</sub>-fixering i bioplastgranuler. Methan bruges ikke af den bakterielle kultur; derfor bliver det rensat, mens bakterieceller ophober PHA. Ved slutningen af processen, når fuld forbrug af CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> og O<sub>2</sub> er opnået, høstes PHA-rig kulturbroth og opgraderet biomethan fra reaktoren, og en ny cyklus kan begynde (Figur 3).



Figur 3. Bioproces

Gasser blev tilført i henhold til følgende stoichiometri for autotrof PHB-produktion:



#### Referencer og links:

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

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

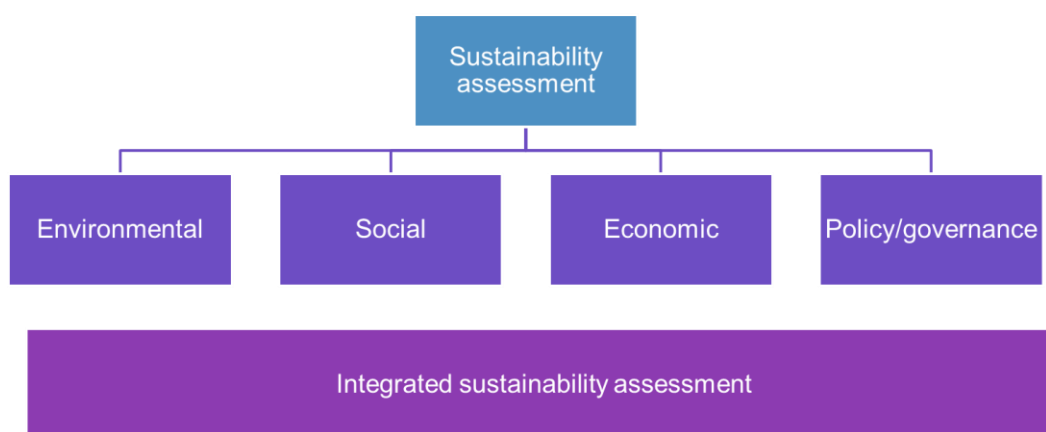
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852424007727?via%3Dihub>

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

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



[IMPERIAL](#) bidrog til CooCE-projektet med [WP5](#) bæredygtighedsvurdering. Bæredygtighedsvurderingen omfattede de miljømæssige, sociale, teknisk-økonomiske og politiske vurderinger.



Figur 1. Bæredygtighedsvurdering udført af Imperial.

De miljømæssige og teknisk-økonomiske vurderinger er baseret på forsyningskædemodellering og livscyklusvurdering for at optimere forsyningskæderne under hensyntagen til forskellige faktorer. Forsyningskædemodelleringsmetoden inkluderede to sektioner:

- Den Kemiske Proces Sektion: I denne del af modelleringen blev en faktisk simulation af et industrielt skala anlæg for den specifikke kemiske proces, der blev undersøgt, udviklet. Dette gjorde det muligt at opnå en række nyttige oplysninger om processen, såsom massebalancer, energibalancer, økonomiske evalueringer osv.
- Forsyningskædemodelleringssektionen: Den faktiske modellering af de forskellige forsyningskædefaser, der kan forventes i løbet af processens livscyklus. Dette omfatter råmaterialehvervelse, salg af produkter, transportfaser osv. De resultater, der blev opnået fra den Kemiske Proces Sektion, blev også brugt her, da den kemiske produktion er en integreret del af forsyningskæden.

Denne overordnede tilgang anvendes på de forskellige teknologier, der blev undersøgt i [CooCE](#) projektet: biomethanation, bio-succinsyreproduktion og biopolymerproduktion, selvom modellens struktur vil blive tilpasset de særlige forhold i hvert tilfælde.

Figur 2 viser den proces, der blev fulgt for de miljømæssige og teknisk-økonomiske vurderinger.

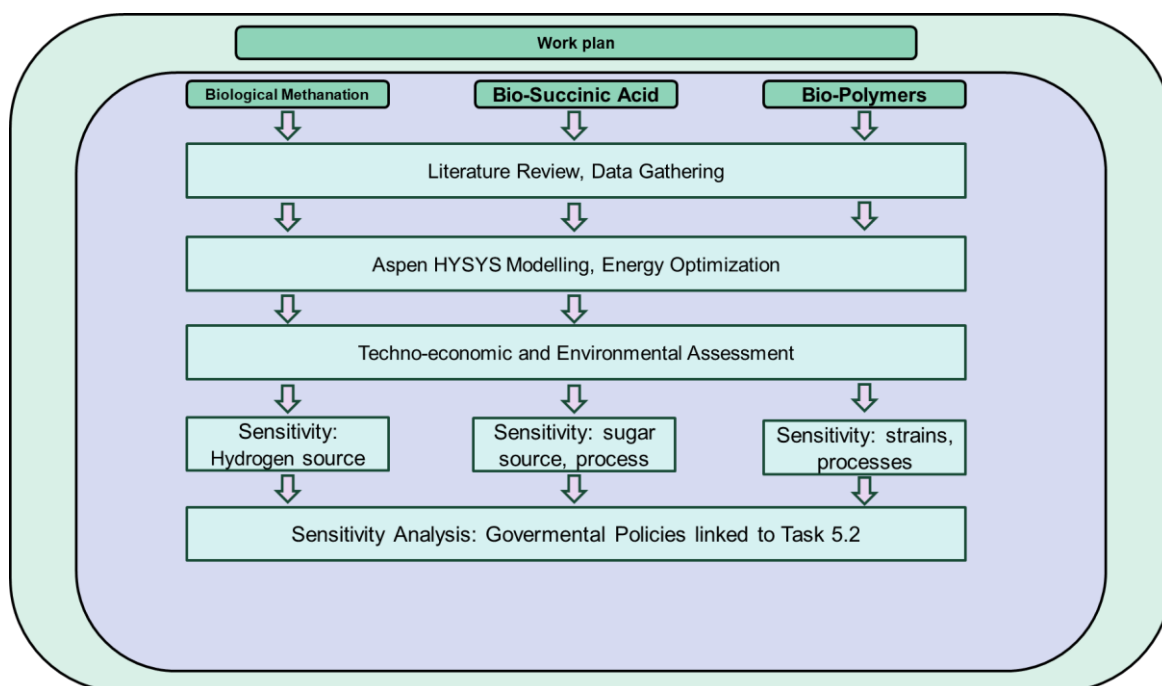


Figure 2. Proces fulgt i WP5 til vurdering af forsyningskæder

### A) Kemisk Process Sektion

Den Kemiske Process Sektion består af en matematisk model, der vil simulere de indre funktioner i en industriel skala anlæg af den undersøgte proces.

Dette vil give følgende:

- Teknologisk Levedygtighed: Implementeringen af modellen vil hjælpe med at definere de teknologiske begrænsninger for den indledende skitse af anlægget, hvilket resulterer i et mere raffineret sluskskema for processen.
- Massebalancer: De samlede mængder af forbrugte råmaterialer og genererede produkter, samt de anvendte forsyninger i anlægget, såsom damp eller kølevand.
- Energibalancer: Den samlede mængde energi, der forbruges i anlægget, både i form af elektricitet fra nettet (eller alternative kilder) samt forsyninger i form af varmeveksling.
- Energoptimering og Pinch Analyse: Afhængig af den samlede design af processen, kan det være muligt at anvende pinch analyse til at udføre en optimering af varmevekslernetværket i anlægget, hvilket resulterer i lavere økonomiske omkostninger og miljøpåvirkninger.

- **Økonomisk Evaluering:** En økonomisk evaluering af installationen inkluderer omkostningerne ved køb og installation af udstyret i anlægget, samt driftsomkostningerne for en given periode, inklusive energiomkostninger, medarbejderlønninger, vedligeholdelse osv. Dette kan udvides til at inkludere design- og juridiske omkostninger, samt justering af disse værdier afhængig af anlæggets placering.

På grund af kompleksiteten ved at udvikle denne model, blev den ikke direkte kodet manuelt, men i stedet anvendte man en af de mange professionelle kemiske proces simulators, der findes på markedet. Hver af disse simulatore kan have nogle udfordringer, men bør generelt være i stand til at gennemføre de tidligere nævnte opgaver. I CooCE-projektet blev Aspen-suiten brugt (Aspen HYSYS, Aspen Energy Analyzer, Aspen Process Economic Analyzer osv.).

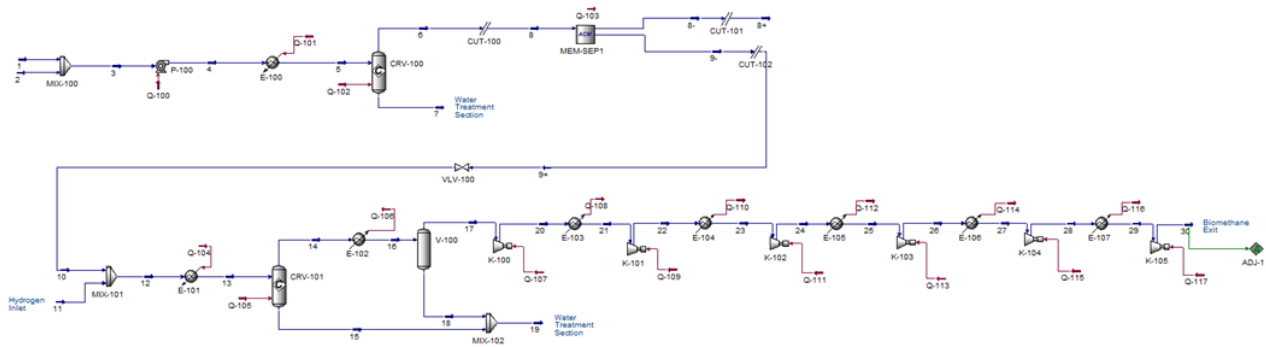


Figure 3. Aspen HYSYS model of the Biomethanation process.

## B) Forsyningskædemodelleringssektion

Forsyningskædemodellen er en matematisk repræsentation af den livscyklus, der undersøges, og inkluderer en række noder:

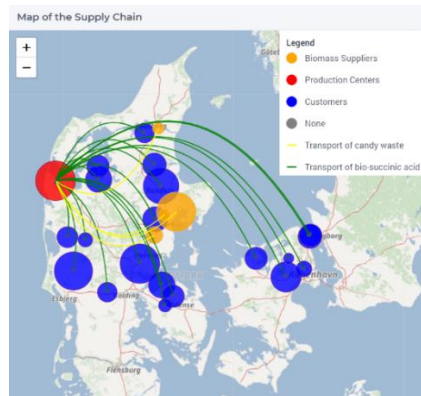
- **Leverandører:** Noder, der repræsenterer råvare-/forsyningsleverandører, nødvendige som udgangspunkt for processen.
- **Produktionscentre:** Noder, der repræsenterer de steder, hvor råmaterialerne omdannes via kemiske processer til de raffinerede produkter, der skal commercialiseres. Defineret af den kemiske procesmodel.
- **Kunder:** Noder, der repræsenterer den endelige destination, som produkterne når frem til, og hvor den tilsvarende indtægt modtages.

Disse noder defineres ved hjælp af geografiske koordinater og en række variabler afhængige af placeringen. Noderne er forbundet via transportlinjer, som kan klassificeres i to typer:

- De, der forbinder leverandører og produktionscentre, svarende til transport af råmaterialer.
- De, der forbinder produktionscentre og kunder, svarende til transport af produkter.

Når modellen er færdig, og alle nødvendige input og oplysninger er givet, vil forsyningskæden blive optimeret for både økonomisk rentabilitet og miljømæssig bæredygtighed. Denne model skal udvikles ved hjælp af et allerede tilgængeligt kommercielt program. Der findes mange forskellige muligheder, men i dette tilfælde blev AIMMS brugt til at gennemføre implementeringen.

Figur 3 viser kortet over en optimeret forsyningskæde genereret af AIMMS.



Figur 3 viser kortet over en optimeret forsyningskæde genereret af AIMMS.

Resultaterne af bæredygtighedsvurderingen findes i afsnittet om leverancer på CooCE-webstedet. Derudover udviklede Imperial som en del af CooCE's træningsaktiviteter en APP. Denne applikation gør det muligt at vurdere mulighederne for at valorisere biogas. Appen indeholder tre tutorials, som giver brugeren mulighed for at ændre data om kapacitet i et biogasanlæg og gennemgå de ændringer, det producerer i pengestrømme, tilbagebetalingstid og andre parametre. Denne APP kan tilgås ved at følge QR-koden nedenfor:



IMPERIAL APP FOR TRAINING

Figure 4. APP used during the CooCE training

#### Referencer og links

[Aspen HYSIS](#) website

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

<https://cooce.eu/>

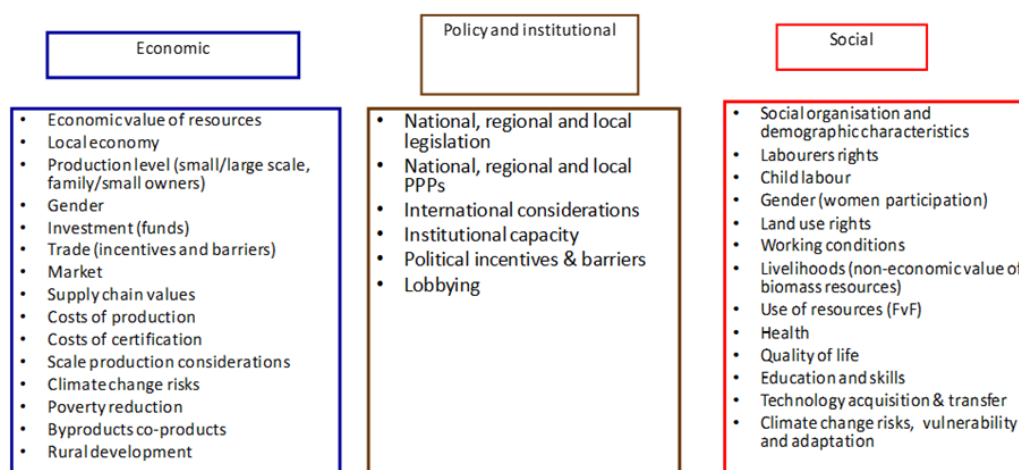
ISO. 2006. International Standard Organisation, SS-EN ISO 14044, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines, ISO.



## Gennemførelse af en vurdering af social bæredygtighed: sagen om CooCE

Vurdering af bæredygtighed, der adresserer de miljømæssige, økonomiske og sociale konsekvenser, er blevet etableret og obligatorisk for nye teknologier, der involverer bioprocesser, og skal vurderes på tværs af hele deres værdikæde.

[Imperial](#) arbejdede på [WPS](#) med vurdering af social bæredygtighed. Dette indebærer at vurdere de sociale og økonomiske konsekvenser af politikker, projekter eller praksisser. En række metoder og rammer er blevet udviklet til vurdering af social bæredygtighed, herunder Social Livscyklusvurdering (SLCA), som bygger på Livscyklusvurdering (LCA). LCA vurderer de potentielle miljøpåvirkninger af et produkt eller en proces, og giver indsigt i produktionseffektivitet samt identificerer forbedringsområder. Det dækker alle faser af et produkts livscyklus, herunder råmaterialeudvinding, forarbejdning, transport, brug og bortskaffelse. Men mens LCA involverer indsamling af data om det primære produkt og om hele livscyklussen for alle materialer involveret i produktionen, kræver SLCA yderligere dataindsamling relateret til organisatoriske og sociale aspekter gennem hele forsyningskæden. SLCA kan også kombineres med Social Impact Assessment (SI) for at give en mere omfattende og robust vurdering (Diaz-Chavez, 2014). Figur 1 viser et udsnit af sociale, økonomiske og politiske spørgsmål, der kan vurderes i forhold til påvirkninger. Figur 2 viser igen, hvordan de relaterer sig til hinanden.



Figur 1. Spørgsmål til påvirkningsvurdering (Diaz-Chavez, 2014)



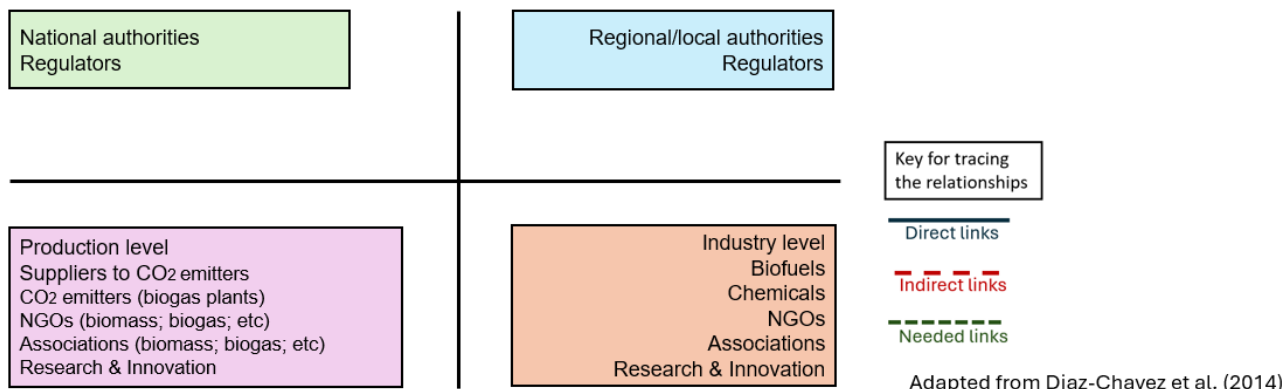
Figur 2. Analyse af et produktionssystem med SLCA og SIA (Diaz-Chavez, 2014)

Vurderingen af social bæredygtighed for CooCE blev udført ved hjælp af en sammensat tilgang udviklet af Diaz-Chavez (2014), der kombinerer elementer fra SLCA og SIA og anvendes på en række tematiske parametre til vurdering gennem kvantitative og kvalitative indikatorer. I CooCE blev der undersøgt i alt 11 parametre. De er: Handel med råmateriale; Identifikation af interessenter; Politik og reguleringer; CO<sub>2</sub>-punktskilde; Samfundsdeltagelse; Landdistriktsudvikling og infrastruktur; Jobskabelse og lønninger; Kønsligestilling; Arbejdsforhold; Sundhed og sikkerhed; og Konkurrence med andre sektorer.

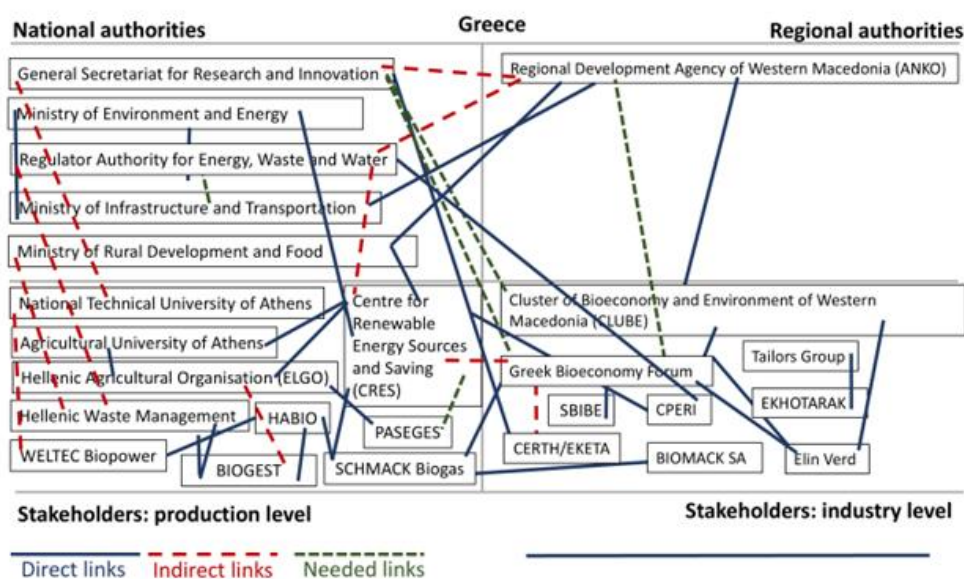
Figur 3 illustrerer parametrene for interessentkortlægning, kriterierne og andre specifikationer. Figur 4 illustrerer tilgangen til interessentkortlægning, mens Figur 5 illustrerer dens anvendelse i Grækenland, et af de lande, hvor CooCE-bioteknologier udvikles.

Tabel 1. Parametre for interessenter

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	<i>Qualitative</i> Desk search Research Partners <i>Quantitative</i> Survey



Figur 4. Matrix for kortlægning af interessenter



Figur 5. Kortlagte interessenter

En række indikatorer kan anvendes til at muliggøre den sociale vurdering, hentet fra velrenommerede databaser eller også fra værktøjer til SLCA. Tabel 1 illustrerer indikatorer og data fra Social Hotspot Database, et værktøj til Social Livscyklusvurdering, for parameteren Arbejdsforhold.



Tabel 2. Risici relateret til arbejdsstyrken.

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

De vigtigste resultater fra analysen af alle parametre overføres derefter til en matrix for vurdering af social bæredygtighed, som bruger evalueringssystemet vist nedenfor.

Tabel 3. Evaluering af kriterier for den samlede vurdering.

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	

Matrixen for vurdering af social bæredygtighed giver således et overblik over de vigtigste socioøkonomiske påvirkninger, risici og fordele forbundet med implementeringen af CooCE sammen med anbefalinger for at afbøde negative påvirkninger og højere risici. Tabel 1 viser resultaterne for én parameter.

Tabel 4. Matrix for vurdering af social bæredygtighed.

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. CEAP, CRCF, ETS-I, FuelEU Maritime, PWD, RED III, TEN-E, WDF); 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

Samlet set muliggør denne sammensatte metode en omfattende evaluering af de potentielle socioøkonomiske påvirkninger og risici forbundet med implementeringen af nye bioteknologiske processer og etablering af værdikæder på lokalt niveau, såsom CooCE's.

### Referencer og links

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/>

This Handbook/toolkit was prepared as part of WP5 of the CooCE project and should be cited as follows:

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 Italian was AI originated and therefore there may be inaccuracies

BEMÆRK: Den originale version af denne håndbog/værktøjskasse er på engelsk. Den oversatte version til italiensk stammer fra AI, og der kan derfor være unøjagtigheder

CooCE CO<sub>2</sub>toCH<sub>4</sub> 20<sup>th</sup>  
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