

MIKROORGANISMER OMDANNER MENNESKESKABT CO₂

Mikroorganismer kan hjælpe os med at omdanne CO₂ til nyttige molekyler som metan og eddikesyre, der kan indgå i vores carbonbaserede værdikæder. Derfor kan mikroorganismer få en vigtig rolle i mange Power-to-X-teknologier.

Der er i dag et globalt fokus på at reducere den menneskelige udledning af CO₂ til atmosfæren. At dette er en kæmpestor udfordring bunder i, at hele vores økonomi overvejende er carbonbaseret, og carbon udgør byggestenen til alle organiske molekyler, vi omgiver os med, hvad enten det er fossile brændstoffer eller biobaserede produkter i form af foder, fødevarer, materialer og biobrændsler.

For at mindske de menneskeskabte CO₂-udledninger, skal vi reducere vores brug af fossil carbon og i stedet bruge carbonbaserede produkter fra biomasse eller indfanget CO₂ fra eksempelvis biogas, røggas fra afbrænding af biomasse, cementproduktion eller direkte fra atmosfæren.

Der er imidlertid få anvendelsesmuligheder, hvor indfanget CO₂ har direkte nytte, og det er derfor vigtigt at forstå, at CO₂ i de fleste tilfælde skal genoplades (reduceres, som det hedder i kemiske termer) med energi for at have værdi. Carbon i CO₂ findes på den mest oxiderede form overhovedet, og der kan ikke trækkes yderligere energi ud af molekylet. Derfor må der tilføres energi for at fremstille nyttige molekyler som brændstof eller kemiske platformmolekyler af CO₂.

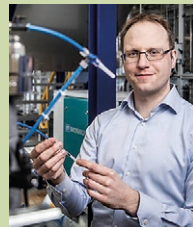
Det er her talen falder på "Power-to-X"-teknologier (PtX). Helt overordnet går Power-to-X ud på at omsætte elektrisk energi til kemisk energi. Den altdominerende teknologi til dette er i dag elektrolyse af vand (vandspaltning) til dioxygen (O₂) og hydrogen (H₂), hvor den kemiske energi ligger i H₂-molekylet. H₂ kan

i visse tilfælde bruges direkte, men da samfundets etablerede værdikæder alt overvejende baserer sig på carbonbaserede produkter, er det vigtigt at kunne overføre den kemiske energi fra H₂ til CO₂ og dermed danne grundlaget for at kunne videreføre mange af vores carbonbaserede værdikæder selv i en fossilfri økonomi.

Biologisk CO₂-omsætning

Paletten af teknologier til CO₂-omdanning med H₂ er bred, men her vil vi særligt fokusere på de biologiske. Levende organismer bruger CO₂ primært med to formål. Enten til at opbygge biomasse eller til at ånde (respirere). Konceptet med at bruge CO₂ til at opbygge biomasse er mest kendt fra fotosyntesen, hvor planter med energi fra sollys omdanner CO₂ til glucose og videre til en lange række kom-

Om forfatterne



Michael Vedel Wegener Kofoed er lektor, ph.d., ved Institut for Bio- og Kemiteknologi, Aarhus Universitet. Han er tilknyttet The Novo Nordisk Foundation CO₂ Research Center – CORC – og forsker i bioteknologi til løsninger indenfor energi og miljø, med fokus på omdannelse af CO₂ fra industrielle kilder. mvk@bce.au.dk



Lars Ditlev Mørck Ottosen er Professor og institutleder, ph.d., Institut for Bio- og Kemiteknologi, Aarhus Universitet. Han er tilknyttet The Novo Nordisk Foundation CO₂ Research Center - CORC. Han forsker i bioteknologi til løsninger inden for energi og miljø ldmo@eng.au.dk



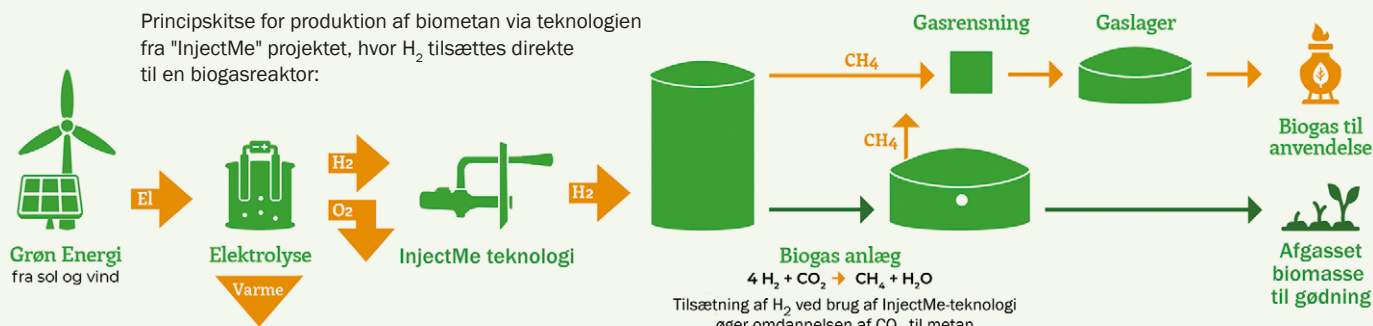
Fotos: Lars Kruse

Metaniseringsprojekter

På Aarhus Universitet har vi udviklet metaniseringssteknologi, sammen med den danske virksomhed Landia A/S, hvor hydrogen tilsættes direkte til en biogasreaktor. Teknologien udvikles på nuværende tidspunkt i projektet "InjectMe", der er et samarbejde med Landia A/S, University of Queensland og Aarhus Universitet og som støttes af Energistyrelsen (EUDP). På billedet (tv) ses den 30 m³ store biogasreaktor, der danner rammen for en stor del af forsøgene i projektet.

I et andet projekt, APPLAUSE, udvikler vi metaniseringssteknologi, hvor hydrogen og CO₂ tilsættes til en bioreaktor. Reaktoren på billedet (th) bruges til at omsætte CO₂ i biogas med hydrogen, dannet via elektrolyse af vand produceret fra elektrolyse-enheden til højre.

Principskitse for produktion af biometan via teknologien fra "InjectMe" projektet, hvor H₂ tilsættes direkte til en biogasreaktor:



plekse molekyler. Andre biologiske processer kræver ikke lys, frugtbar jord, vand og næringsstoffer, men omdanner CO₂ via kemisk energi. I denne kategori dominerer mikroorganismene. Igen skelner man mellem organismer, som primært bruger CO₂ til at opbygge biomasse via tilførsel af kemisk energi (de kaldes kemolithoautotrofe), og mikroorganismer, som bruger CO₂ som åndingsmiddel. De biomasseopbyggende mikroorganismer har typisk en energidannende proces adskilt fra den biomasseopbyggende proces. Et godt eksempel er knaldgas-bakterier, som oxiderer H₂ med O₂ og bruger noget af energien til at fiksere CO₂ til opbygning af biomasse under anvendelse af principper for CO₂-omdannelse, som også findes i fotosyntesen. Produktet fra de CO₂-optagende processer er typisk rå biomasse bestående af forskellige komplekse molekyler,

som eksempelvis kan bruges i foder og fødevareræddikæder.

I forhold til respiration findes der mikroorganismer, der ånder med CO₂ i stedet for O₂. Det kræver en lidt nærmere forklaring. Vi mennesker, og alle andre organismer baseret på eukaryote celler (celler med en cellekerne), får groft sagt energi ved at forbrænde kulhydrat med O₂ (aerob respiration). Bio-kemisk omorganiseres elektroner fra carbonet i kulhydrat til oxygenet, og de resulterende produkter er CO₂, H₂O samt kemisk energi til organismens livsprocesser. I oxygenfrie miljøer kan nogle mikroorganismer udnytte andre oxiderede stoffer som nitrat, jernforbindelser eller CO₂ i stedet for oxygen (anaerob respiration). Et godt eksempel på en naturlig proces, hvor mikroorganismer spiser hydrogen og ånder med CO₂, er metandannelse.

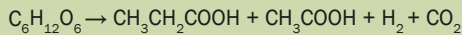
Denne energigivende proces består i, at disse mikroorganismer (kaldet metanogener) bruger elektroner fra H₂ til at reducere CO₂ til H₂O og CH₄ via komplekse stofskifteprocesser. En anden nyttig proces i samme kategori er den acetogene proces, hvor mikroorganismer (kaldet acetogener) via cellulære processer danner eddikesyre (CH₃COOH) fra H₂ og CO₂.

Industriell anvendelse af metanogener og acetogener

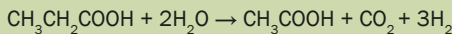
Forskere arbejder på at udnytte både metanogener og acetogener til produktion af henholdsvis metan og eddikesyre via CO₂ fra industrielle kilder. Disse mikroorganismer findes i både naturlige og tekniske systemer, for eksempel i oxygenfrie zoner i søbunde (ferskvandssedimentet), hvor de blandt andet medvirker til at omsætte det organiske materiale, der kommer fra døde alger og dyr. En del af de bobler, man ser fra

Mikrobiologi i biogasreaktoren

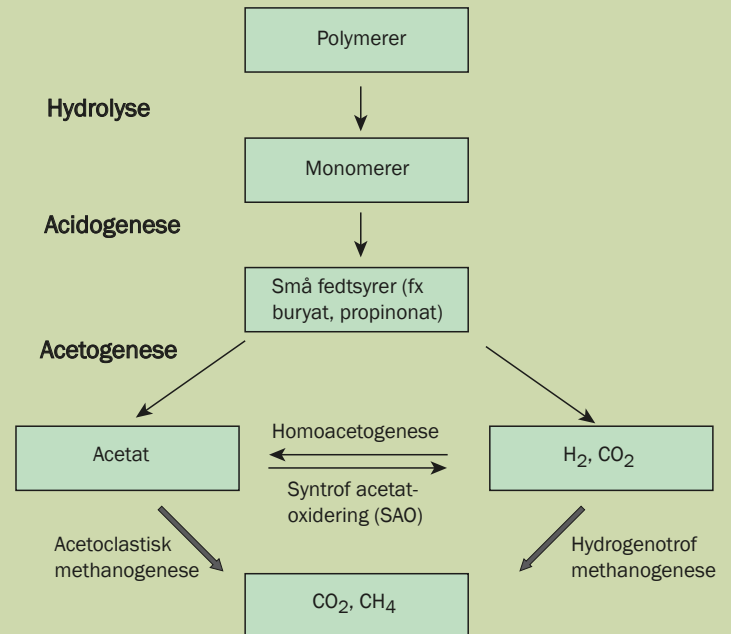
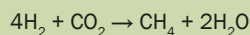
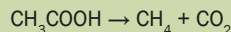
Processen i en biogasreaktor består af flere trin, der alle katalyseres af mikroorganismer. Under hydrolysen nedbrydes makromolekylernerne til deres enkeltkomponenter. Kulhydrater nedbrydes eksempelvis til di- og monosakkarider. Denne proces sker via enzymer, der udskilles af mikroorganismene i biogasreaktoren. Monomererne kan efterfølgende omdannes til små fedtsyrer igennem mikrobiologiske fermenteringsprocesser (acidogenese). Der foregår mange forskellige fermenteringsprocesser i reaktoren. Her ses et eksempel på omdannelse af glukose til propionsyre og eddikesyre m.m.:



De små fedtsyrer kan nedbrydes videre til eddikesyre (acetat), hydrogen og CO₂, via endnu et fermenteringstrin (acetogenese). Herunder ses eksempelvis på nedbrydning af propionsyre til eddikesyre, hydrogen og CO₂.



Afhængig af forholdene i reaktoren kan eddikesyre omdannes til hydrogen og CO₂, men H₂ og CO₂ kan også omdannes til eddikesyre. De ovenstående trin katalyseres alle af bakterier, mens det sidste trin i omdannelsen af H₂, CO₂ og eddikesyre til metan katalyseres af en anden gruppe mikroorganismer, nemlig arkæer (Archaea).



Mikrobielle trin involveret i nedbrydningen af organisk materiale til biogas.

Den endelige sammensætning vil blandt andet afhænge af, hvilke typer biomasse der i starten blev tilsat til reaktoren. Men koncentrationen af metan i biogassen ud af reaktoren vil normalt være 55-60%, med cirka 40-45% CO₂. Ud over metan og CO₂ vil gassen også indeholde ammoniak og svovlholdige gasser (primært svovlbriente).

sedimentet, er bobler af metan, der produceres af metanogener.

Metanogener og acetogener findes også i tarmsystemet hos mennesker og dyr. I klima-sammenhæng er der her fokus på metan-emission fra gylle eller fra køer, fordi metanogener i køernes tarmsystem producerer metan, der udledes til atmosfæren via køernes bøvser. Metanogener og acetogener bruges dog også aktivt i biogasindustrien, hvor de producerer metan, der kan anvendes i stedet for fossil naturgas. De processer, der sker i biogasreaktorer, minder på mange måder om, hvad der sker i koens vom. Processen kaldes anaerob nedbrydning, fordi den involverer nedbrydning af biologiske materialer (biomasser) uden tilstedeværelse af oxygen. Der er i dag bygget biogasanlæg, som omsætter forskellige typer biomasse, der tidligere er blevet

anset som affaldsprodukter, men som i dag betragtes som ressourcer. Disse inkluderer blandt andet husdyrgødning fra landbruget, slam fra renseanlæg, affaldsprodukter fra fødevarerindustrien og organisk husholdningsaffald.

Under produktionen af biogas pumpes biomasse ind i store reaktorer, hvor en stor del af det organiske materiale i løbet af nogle uger nedbrydes til biogas – en blanding af CO₂ og metan. Metanogenerne, der producerer metanen, kan ofte kun nedbryde små molekyler som H₂, CO₂, eddikesyre eller andre små organiske molekyler. De kan derfor ikke direkte nedbryde den biomasse, som tilsættes til biogasreaktoren, som ofte består af lange kæder af organiske molekyler (polymerer) i form af cellulose, proteiner eller andre store molekyler (makromolekyler) som fedtstoffer.

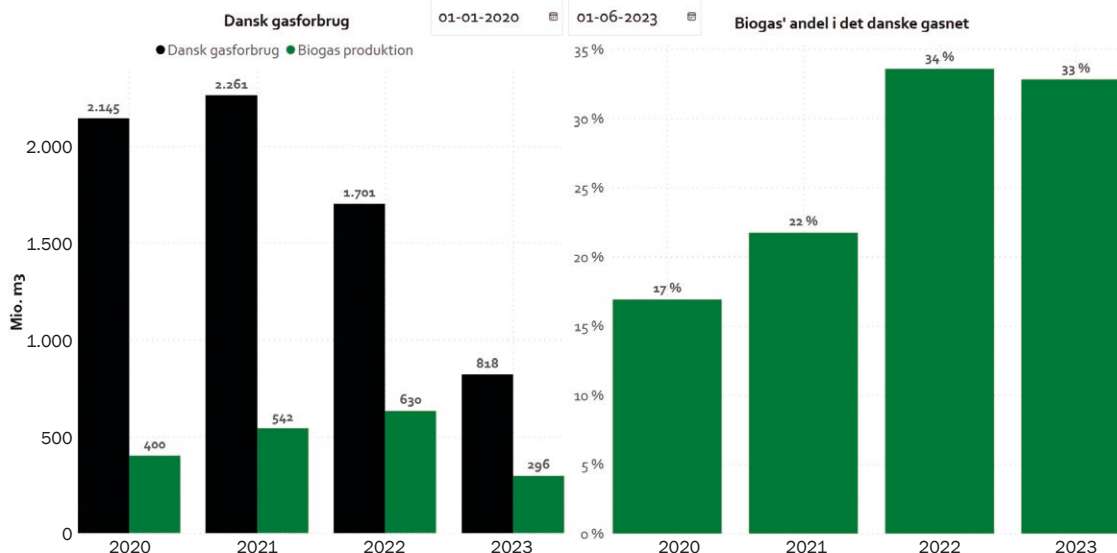
Disse stoffer skal derfor nedbrydes til mindre molekyler, før metanogenerne kan bruge dem.

Mikroorganismene får energi ud af fermenteringsprocesserne og metanogenesen. Denne energi bruger mikroorganismene til forskellige cellulære processer, herunder vedligeholdelse af deres cellulære maskineri og formering. Selvom der i biogasreaktorer hele tiden tilføjes og fjernes organisk materiale, er der ikke brug for at tilsætte nye mikroorganismer, fordi de formerer sig i reaktoren.

Biologisk metanisering via hydrogen

Tidligere var den mest almindelige praksis at afbrænde biogassen i en kedel eller motor for at kunne få varme og elektricitet. I dag opgraderer moderne biogasanlæg biogassen til en kvalitet lig den,

Andel af biogas i det danske naturgasnet.
Kilde: Energinet Data Service: Storage utilization og Storage available capacity, juni 2023.



Kilder / videre læsning
Angelidakis, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., Kougias, P.G., 2018. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnol. Adv.* 36, 452–466. doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011

Demirel, B., Scherer, P., 2008. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: A review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 7, 173–190. doi.org/10.1007/s11157-008-9131-1

Energinet, 2023. Nøgletal om den grønne omstilling. URL: energinet.dk/energidata/status-pa-gron-energi/nogletal-om-den-gronne-omstilling/

Jensen, M.B., Ottosen, L.D.M., Kofoed, M.V.W., 2021. H₂ gas-liquid mass transfer: A key element in biological Power-to-Gas methanation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 147, 111209. doi.org/10.1016/j.rser.2021.111209

Kofoed, M.V.W., Jensen, M.B., Ottosen, L.D.M., 2021. Biological upgrading of biogas through CO₂ conversion to CH₄, in: Aryal, N., Ottosen, L.D.M., Kofoed, M.V.W., Pant, D. (Eds.), *Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading*. Elsevier Inc., pp. 321–362. doi.org/10.1016/B978-0-12-822808-1.00012-X

man finder i fossil naturgas (>95% metan). Denne gas kan bruges til at erstatte vores nuværende forbrug af fossil naturgas, til gavn for både klima og forsyningsikkerhed, så man ikke er afhængig af naturgas fra andre lande. Biogassektoren er i dag voksende i både Danmark og resten af Europa. Andelen af biometan på naturgasnettet har derfor også være stigende de sidste par år og udgjorde i 2022 34% af gassen på naturgasnettet.

Den konventionelle opgradering af biogas til naturgaskvalitet benytter separation af metan fra CO₂, hvor metanen oprenses og injiceres på naturgasnettet, mens CO₂'en udledes til atmosfæren. Både forskere og virksomheder arbejder i dag på både kemiske og biologiske teknologier, der kan bruges til at omdanne denne CO₂ til andre produkter i stedet for at udlede den til atmosfæren.

På Aarhus Universitet arbejder vi blandt andet på at udvikle løsninger, hvor man bruger de metanogene mikroorganismer, der allerede er til stede i biogasreaktoren til at omdanne CO₂ i biogassen til endnu mere metan. Dette kan eksempelvis gøres ved at tilsætte H₂ til reaktoren, så man hermed stimulerer metanogenerne til at omsætte endnu mere af CO₂'en til metan.

Som udgangspunkt virker processen simpel. En vigtig del af udviklingsarbejdet er dog at studere, hvordan tilsætning af den ekstra

hydrogen påvirker de komplekse biologiske processer i reaktoren, samt hvordan man kan tilsætte så store mængder hydrogen, som der er behov for. Sidstnævnte er en fælles udfordring for de biologiske processer, da hydrogen har en meget lav opløselighed i væske. En vigtig del af teknologiudviklingen er derfor at designe systemer, der understøtter overførsel af store volumener af denne uopløselige gas til mikroorganismene, der findes i reaktorens væske. Vi arbejder med forskellige tilgange til denne problemstilling, både i laboratorierne i Aarhus og på Aarhus Universitets testfacilitet på Campus Viborg (Se faktaboks om metaniseringprojekter).

Mikroorganismer til omdannelse af CO₂ fra røggasser

Vi arbejder også på løsninger, der ikke er direkte koblet til biogas, men kan bruges til at omsætte CO₂ fra andre kilder, overvejende røggasser fra forbrænding. Reaktorerne kan have forskellige designs og driftsforhold, men benytter stadig mikroorganismer, man naturligt vil kunne finde i biogasreaktorer.

Selvom biogas er ideelt til biometanisering via tilsat H₂, fordi det allerede har et højt indhold af metan og CO₂ og ikke indeholder oxygen, der er giftigt for mikroorganismene, så udgør biogas kun en lille del af den CO₂, der i dag produceres ved menneskelig aktivitet. Her udgør CO₂ fra røggasser dannet ved for eksempel forbrænding en langt større

del. Således udgjorde den globale udledning af CO₂ i 2021 ifølge det internationale energiagentur (IAE) 36,3 Gigaton fra energiproduktion alene. I modsætning til biogas indeholder røggasser dog store koncentrationer af oxygen og nitrogenforbindelser, mens CO₂'en kun udgør cirka 8-15% afhængig af brændstof og forbrænding. Både mængden og sammensætningen udgør en signifikant udfordring. Forskere over hele verden arbejder i dag på udvikling af forskellige teknologier til at løse netop dette. Andre forskere undersøger desuden muligheden for at fange CO₂ direkte fra luften. Dette udfordres af den lave koncentration af CO₂ i luft i forhold til koncentrationen i biogas og røggas.

Mikroorganismer har potentialen til at udgøre en vigtig del af fremtidige løsninger til omdannelse af CO₂. Opgaven består i at forstå mikroorganismernes livsprocesser og krav til ideelle vækstbetingelser og på det grundlag designe og konstruere en teknologi omkring dem, som bedst muligt understøtter deres aktivitet og giver den mest effektive omsætning af CO₂. De menneskelige udledninger af CO₂ kombineret med vores enorme behov for carbon-baserede kemikalier og brændstoffer betyder dog, at der ikke kun er én løsning på denne globale udfordring. Der er brug for alle tænkelige realistiske teknologier. Fremtidige løsninger vil derfor sandsynligvis være baseret på teknologier både med og uden biologi og i forskellige kombinationer. ■