

Jeg vågner ..

.. til duften af friskbrygget kaffe fra køkkenet. I køkkenet kører nyhederne stadig. Min kone har travlt om morgenen og glemmer somme tider at slukke for nyheds-streamingen. Imens jeg gør mig klar, hører jeg om hvordan de igen har udvidet kolonien på Mars. Den kommercielle interesse for etableringen steg enormt tilbage i 2020 da NASA demonstrerede at man med elektrolyse kunne omdanne atmosfæren på Mars til brændstof og ilt.

Jeg arbejder for det meste fra hjemmekontoret, men på dage som i dag, hvor jeg har nogle augmentet-reality møder med afdelingen i Indien, så foretrækker jeg at benytte VR-mødelokalet på min arbejdsplads. Min kone har ikke langt til arbejde, så hun kan fint klare sig med elbilen. De få gange om ugen jeg ikke arbejder hjemme, da tager jeg brintbilen, som vi ellers mest bruger til de lidt længere ferie ture. Det blæste godt i nat, så brændselscellerne i bilen har slået over til elektrolyse for at producere brint. Jeg nyder altid når turen ind til kontoret er på brint vi selv har produceret. Det giver en god fornemmelse at vide at man har udnyttet al den vind i løbet af natten. Denne nat var der et ekstra voldsomt blæsevejr, men den gas vi ikke selv kan udnytte ryger tilbage i naturgasnettet og bliver opbevaret i nogle store underjordiske grotter. Det er også fantastisk at vide at selv brændstoffet til flyveren jeg tog i sidste uge til konferencen i London til dels blev produceret af den gas vores elektrolyse stak har produceret. Når det hverken blæser eller solen skinner, så slår bilen over til brændselscelle-mode og producerer den strøm og varme vi selv har brug for i huset. Jeg sætter mig ind i bilen og tænder computeren for at checke beskeder imens den automatiske styring allerede har gættet at jeg skal til kontoret i dag..

At gemme energi

Sådan kunne din morgen forløbe i en ikke alt for fjern fremtid. I dag er vi godt på vej til en omstilling af vores energisektor med bæredygtig produktion af strøm fra vindmøller og solceller, personlige transport midler der kører på el, og andre former for elektrificering af vores hverdag. Vores nuværende batteri teknologi har været fantastisk til mange formål, men vi vil dog snart løbe ind i nogle udfordringer med resten af energisektoren.

Hvad gør vi fx når vinden ikke blæser og solen ikke skinner? I korte perioder kan vi gemme strømmen i batterier som fx firmaet Tesla har vist i Australien og på Hawaii, men hvad hvis vi ikke kan producere strøm i et par dage eller uger? I litium-ion batterier, som dem der sidder i din mobiltelefon og din elbil, der gemmes strømmen direkte i elektrode-materialet. Det vil sige at hvis man vil forøge kapaciteten, så skal man bruge mere litium. Det vil derfor blive vældigt dyrt hvis store dele af vores energiforbrug skal kunne dækkes af den nuværende batteri teknologi.

Og hvad med tung transport med fly og containerskibe? Flydende brændstof har utrolig høj energitæthed, så det hverken fylder eller vejer særlig meget. Batterier i fly og skibe bliver simpelthen for store og tunge. Og det er dyrt at lade disse transportmidler stå stille og lade op.

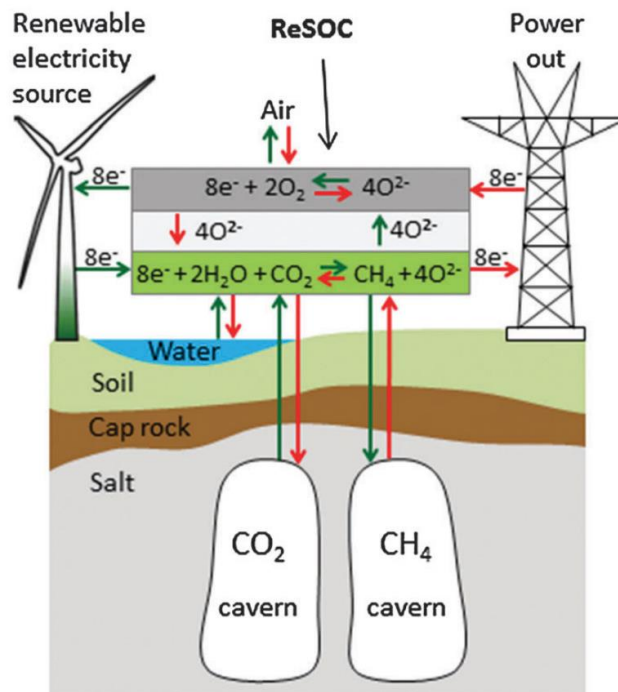
Hvis vi ønsker at minimere de negative konsekvenser af de klimaændringer vi allerede begynder at se, så er disse problemstillinger nødvendige at imødekomme inden de opstår. I løbet af min Ph.d. har jeg arbejdet med en teknologi som har potentialet til netop dette.

Fast-oxid celler



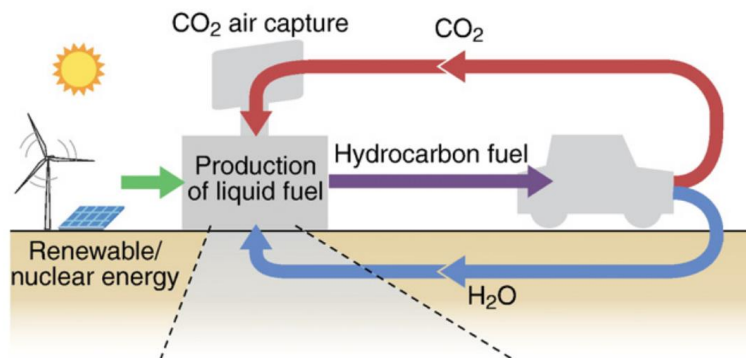
Figur 1. En fastoxid celle og stak. Fra Haldor Topsoe A/S.

Elektrokemiske faststof-oxid celler har evnen til at omdanne elektrisk energi til kemisk energi, og omvendt. Det giver nogle fantastiske muligheder for let at opbevare energi. Allerede i dag ser vi somme tider i Danmark at vi producerer for meget strøm fra vindmøllerne på meget blæsende dage. I dag er vi nødt til at give strømmen væk til nabolandende eller endda betale dem for at aflaste vores netværk. Med disse celler kan vi tage den overskudsstrøm og bruge den til effektivt at spalte vand til brint og oxygen i en proces der kaldes elektrolyse. Brinten kan vi med et par yderligere processer omdanne til naturgas. Det kan let gemmes i flere uger eller måneder i vores naturgas-netværk og underjordiske naturgas-grotter. Senere, når vinden ikke blæser, så kan vi tage denne syntetiske naturgas og køre den igennem de samme celler og omdanne gassen til strøm. På den måde kan de fungere som en slags flow gas batterier. Mængden af strøm vi kan lagre afhænger blot af hvor store grotter vi benytter til gassen.



Figur 2. Operation af fastoxid celler som flow batterier og opbevaring af metan og kuldioxid i underjordiske grotter. Fra ref. ¹.

Da cellerne opererer ved ganske høje temperaturer (600-800 °C), foregår omdannelsen med høj effektivitet (ca. 60% og 90% for hhv. brændselscellen og elektrolysecellen). Den høje temperatur gør også at cellerne kan omdanne kuldioxid, CO₂, til kulmonooxid, CO. Når vi i fremtiden bliver gode til at fange CO₂ fra luften eller havene, så kan vi altså genbruge den og sammen med brint lave almindelige flydende brændstoffer, som vi med god samvittighed kan fylde på skibe og fly. Man kan forestille sig store solcelle-parker placeret hvor solen skinner allermest, som i Sahara eller Australien, og store elektrolyseanlæg ved siden af som producerer bæredygtig, flydende syntetisk brændstof som så fragtes til storbyerne med store containerskibe.



Figur 3. Produktion af syntetisk brændstof fra kuldioxid og vand vha. bæredygtig energi. Fra ref. ².

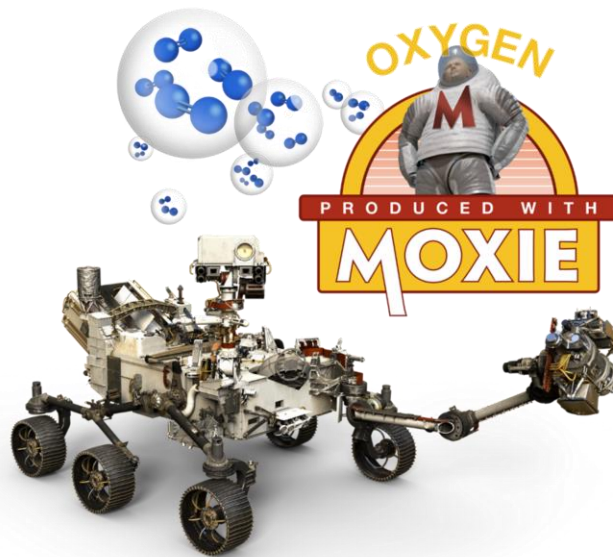
Problemet

Som med alle nye teknologier, så er problemet i dag at det er for dyrt. Cellerne fungerer ikke lang tid nok, hvilket gør at man er nødt til at udskifte dem for ofte. Det gør at teknologien på nuværende tidspunkt er for dyr til anvendelserne nævnt ovenfor. Masseproduktion har ikke sat ind og som ofte set før, så er det et spørgsmål om hønen og ægget. Dette kan løses på to måder. For det første kan finansiel støtte til forskning på universiteterne hjælpe med at forbedre teknologien, fx forøge levetiden af cellerne, og finansiel støtte til firmaer indenfor branchen kan nedbringe fabrikations-omkostningerne. For det andet, kan man forsøge at finde niche-markeder, hvor fordelene opvejer den højere pris.

Løsningen

Firmaet jeg lavede min erhvervs Ph.d. for, Haldor Topsoe A/S, har netop forsøgt at fokusere på et sådant niche-marked. Produktion af CO til brug inden for medicin og den kemiske industri sker på nuværende tidspunkt som et biprodukt i store, centraliserede katalytiske værker. Problemet er netop at de er centraliserede. Det vil sige at gasen skal transporteres over store afstande, og da CO er giftigt, så er dette meget dyrt. Elektrolyseanlæg kan let skaleres op og ned i størrelse uden det store tab, så med små decentraliserede elektrolyseanlæg kan gasen produceres lige hvor den skal bruges. En anden fordel er at man kan lave meget ren CO.

Et andet og lidt mere eksotisk eksempel på et niche-marked er også relateret til CO. Atmosfæren på Mars består af 96% CO₂ og al den gas kan vha. elektrolyse omdannes til oxygen og CO. Dette kan bruges som brændstof, så man kan sende raketter, og mennesker, tilbage til jorden, uden at man skal medbringe al den tunge brændstof hjemmefra. Oxygenet kan også bruges til at danne en åndbar atmosfære til en station på Mars. Alt dette lyder måske som science-fiction, men NASA har allerede offentliggjort at de vil sende et sådant elektrolyseanlæg med den næste raket til Mars i 2020 for at teste det.



Figur 4. Roveren med en fastoxid stak som bliver sendt til Mars i 2020. Fra mars.nasa.org.

CO₂ er jo en drivhusgas, så udnyttelsen af CO₂ på disse måder er naturligvis også meget attraktiv her på jorden. Det kan potentielt skabe et marked for CO₂ fanget fra skorstene, udstødningsrør eller måske direkte fra atmosfæren, og dermed nedbringe udledningen.

Mit studie

Mit studie af teknologien har af disse årsager bestået af to vinkler. Nummer et; at redegøre for hvor længe cellerne virker, hvorfor de går i stykker, og hvad vi kan gøre for at forbedre levetiden. Og nummer to; at opnå en bedre forståelse for omdannelsen af CO₂ til CO, og hvilke problemer dette medfører.

Jeg lavede et meta-studie af levetiden for celler og stakke og det blev klart at brændscelle-teknologien snart er klar til markedet, men at elektrolyse-cellerne halter bagefter. Min analyse bestod af mere end 50 parametre fra 150 publikationer som tilsammen gav data fra mere end 1 000 000 test timer. Teknologien er kompleks med mange parametre som varierer blandt forskellige tests, producenter og forskningsinstitutter; temperatur, strømtræk, gas blandinger, materialer, test-opstillinger, osv.

Få forskningsgrupper har studeret elektrolyse af CO₂, men det blev hurtigt klart at den største udfordring inden for dette felt har at gøre med en bestemt degraderings-mekanisme. Hvis man forsøger at omdanne for meget CO₂ til CO, så sker der en anden reaktion som danner kul inden i cellen. Det skyldes at katalysatoren inden i cellen, nikkel, også er en fantastisk god katalysator for den uønskede reaktion som danner kul. Der er ikke plads til kullet og det får derfor cellen til at sprække og gå i stykker. Da temperaturen, strømtrækket og gas blandingen ikke er konstant for hele cellen, så er det svært at analysere præcis under hvilke forhold dette sker. For at få svar på dette udviklede jeg en elektrokemisk metode som afslørede hvornår kul blev dannet under operation. Det viste sig at problemet var større end først antaget og at kul altså dannes langt lettere end man skulle tro.

Fra litteraturen og mine egne tidligere studier vidste jeg at hvis man erstatter den almindelige katalysator med et andet materiale, cerium oxid, så kan man undgå at danne kul, men stadig opnå den ønskede reaktion af CO₂ til CO. Hvorfor der ikke dannes kul på cerium oxid har dog stået uforklaret hen indtil nu. Jeg rejste til Stanford University i Californien for at finde svaret. Der samarbejdede jeg med to forskellige grupper som er eksperter indenfor hvert deres felt. Den første gruppe hjalp mig med at benytte røntgenstråling med meget høj intensitet fra en synkrotron til at analysere det øverste nanometer-tykke lag på mine prøver. Her kunne jeg se kul vokse frem når vi pressede elektrolyse-cellen tilstrækkeligt, og vi kunne bekræfte at celler med en cerium-oxid-katalysator i stedet for en nikkel-katalysator var langt

mere modstandsdygtig over for kuldannelse. Vi kunne også se andre kemiske kul-arter som var til stede på cerium-oxid-cellen, men ikke på nikkel-cellen. Disse observationer har vi siden hen kombineret med resultaterne fra den anden gruppe jeg samarbejdede med. De er eksperter inden for kvantemekaniske computer-simuleringer, og med kombinationen af disse to stærke teknikker lærte vi at den høje dækningsgrad af karbonater på cerium oxid holdt kulatomet "fanget" inden det kunne danne det skadelige kulstof. Fra computer-simuleringerne opdagede vi også at en bestemt side af cerium oxid krystallerne var bedst til at opnå effekten. Med denne viden kan man i fremtiden producere mere holdbare elektrolyseceller.

Nikkel som katalysator er dog stadig den mest udbredte inden for feltet, og hvis man vil løse problemet for disse slags celler, så må man tage andre midler i brug. Jeg forsøgte at hælde en væske med cerium oxid ind i cellerne (også kaldet imprægnering) for på den måde at dække nikkel-materialet og lave et slags beskyttende lag som forhindrede kuldannelsen. Som det ofte er tilfældet med forskning, viste det sig sværere end først antaget. Nikkel er meget mobilt ved disse høje temperaturer og det er meget svært at dække det fuldstændig med cerium oxid. Til gengæld fandt jeg ud af at man med samme metode kan reparere en celle som tidligere er blevet beskadiget af kuldannelse. Det betyder at man kan forlænge cellens levetid, selv efter alvorlige skader på strukturen i elektroden. Altså, ved grundigt at undersøge de fundamentelle mekanismer er vi blevet klogere på hvad der sker, hvornår det sker, og har fundet en metode til at modvirke effekten, selv når skaden er sket.

Hvad nu?

For at realisere de førnævnte scenarier er der dog stadig et stykke vej endnu. At forbedre og teste levetid tager naturligvis lang tid, så teknologien har brug for yderligere modning og økonomisk støtte. Fremtidig forskning vil erstatte nikkel med cerium-oxid-baserede elektroder, så de bliver mere tolerante over for både kul dannelse og andre urenheder. Et vigtigt skridt på vejen. En anden angrebsvinkel til bedre og billigere systemer er at få udviklet materialer som kan virke tilsvarende godt ved en lavere temperatur. Dette vil åbne op for muligheden for brugen af billigt metal integreret i selve cellen. En stabil metal-baseret celle kan opvarmes væsentligt hurtigere, så vi også kan bruge disse celler i fx biler. Disse perspektiver er årsagen til at jeg fortsat arbejder med teknologien og de mange spændende udfordringer.

Referencer:

1. Jensen, S. H. *et al.* Large-scale electricity storage utilizing reversible solid oxide cells combined with underground storage of CO₂ and CH₄. *Energy Environ. Sci.* (2015).
2. Graves, C., Ebbesen, S. D. & Mogensen, M. Co-electrolysis of CO₂ and H₂O in solid oxide cells: Performance and durability. *Solid State Ionics* **192**, 398–403 (2011).