

Fastoxid elektrolyseceller:

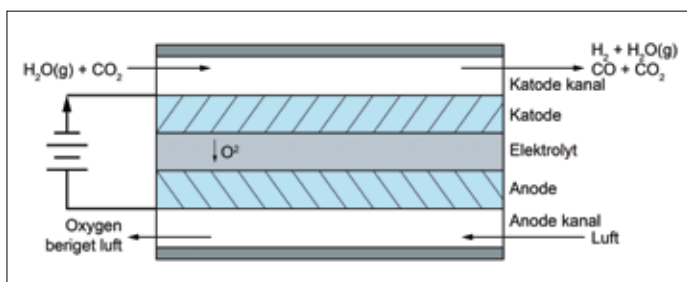
Store muligheder for integration med fremtidens energisamfund

I de kommende årtier vil andelen af fluktuerende el-produktion stige fra 20 til 80% af vores samlede energiforbrug. Dette stiller store krav til vores evne til både at tilpasse forbruget og at lagre energien. Et oplagt bud på en teknologi, der kan udjævne variationer i energiforbrug- og generering i fremtidens energisystem er fastoxid elektrolyseceller.

Af Jakob Dragsbæk Duhn^{a,b}, Anker Degn Jensen^a, Stig Wedel^a og Claus Flemming Friis Pedersen^b
 a: DTU Kemiteknik, b: Haldor Topsøe A/S

Haldor Topsøe har igennem en længere årrække arbejdet sammen med DTU om at udvikle fastoxid brændselsceller (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC). Haldor Topsøe valgte i 2014 at stoppe deres udvikling af brændselscellerne; men teknologien er ikke opgivet fra Haldor Topsøes side. Cellerne kan nemlig også anvendes ”omvendt” og dermed fungere som elektrolyseceller (Solid Oxide Electrolyzer Cell – SOEC).

SOEC er elektrokemiske systemer, der ved hjælp af strøm reducerer H_2O og/eller CO_2 til hhv. H_2 og/eller CO , figur 1. Sammenlignet med andre elektrolyseteknologier er fastoxid elektrolysesystemer interessante, da de virker ved høj temperatur ($700-850^\circ C$) og derved opnår en høj elektrisk virkningsgrad uden brug af dyre metaller. I modsætning til traditionel alkalisk elektrolyse og polymer elektrolyseceller (PEM), kan SOEC også reducere CO_2 . Dette er interessant for flere områder:



Figur 1. Tværsnit af en SOEC. Ved hjælp af strøm spaltes oxygen fra CO_2 -molekylet i katoden og transporteres som en oxygen-ion gennem elektrolytten. På anodesiden omdannes oxygen-ionerne til et oxygenmolekyle og transporteres med luftstrømmen ud af cellen.

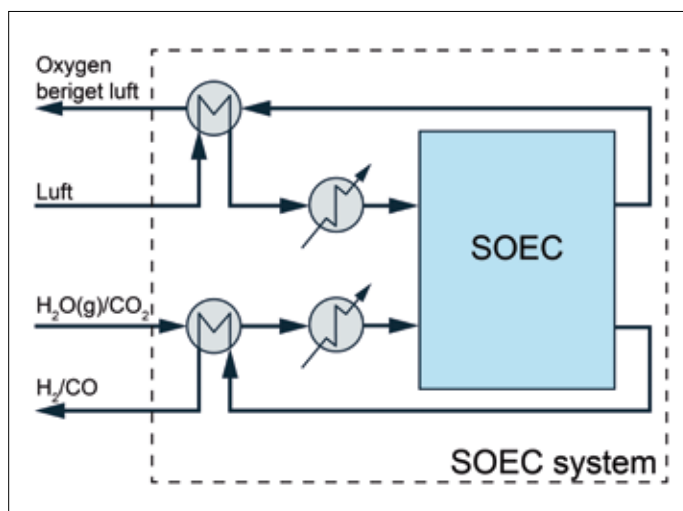
- 1) konvertering og lagring af elektrisk energi og
- 2) produktion af ilt ved rumrejser.

Af disse er det dog konvertering og lagring af elektrisk energi, der forskes mest indenfor, da produktion af ilt til rumrejser må siges at udgøre et meget lille marked i dag.

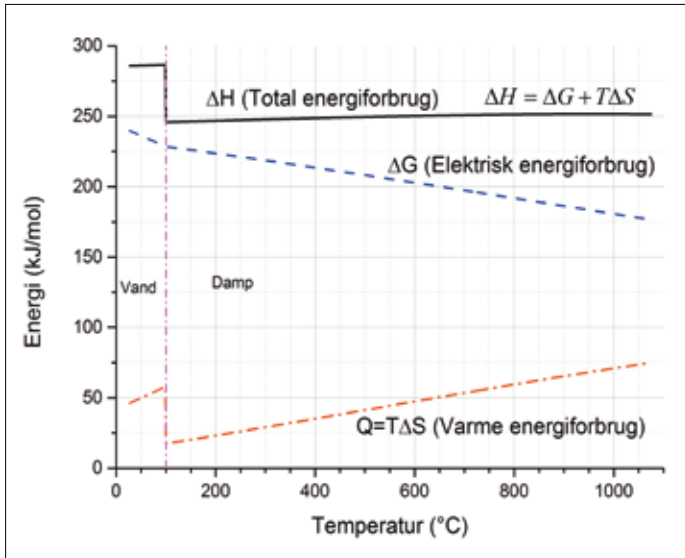
Kernen i Haldor Topsøes SOEC-satsning er et system bestående af en SOEC, to varmevekslere og to elektriske varmelegemer. Systemet er skitseret i figur 2 og vil i det følgende betegnes som et ”SOEC-system”.

Virkningsgrad

For at forstå hvorfor SOEC har en høj el-virkningsgrad, bliver man nødt til at se på termodynamikken. Figur 3 viser den totale



Figur 2. Et SOEC-system bestående af varmevekslere, varmelegemer og SOEC-enheden er kernen i Haldor Topsøes satsning på SOEC-teknologien.



Figur 3. Energi for vandeledning som funktion af temperaturen.

energimængde (ΔH), som kræves til vandeledning som funktion af temperaturen. Den totale energimængde er sammensat af Gibbs fri energi (ΔG) og varmeenergi (Q), som også er plotet på figur 3. ΔH stiger en lille smule med temperaturen, mens ΔG falder og Q stiger. Dette betyder, at man ved højere temperatur kan bruge mindre elektrisk energi og mere varmeenergi. Varmeenergien kan være spildvarme fra andre systemer, som tilføres ved at hæve indgangstemperaturerne på strømmene, men en del varme bliver også produceret i elektrolysecellerne, når strømmen løber igennem (Joule heating). Når denne udnyt-

tes, fås der en teoretisk virkningsgrad på 84,6%, baseret på den nedre brændværdi af brint (LHV).

LHV bruges til at sammenligne energiteknologier og beregnes ud fra, at kondensationsvarmen ikke udnyttes. Andre elektrolyseteknologier som alkalisk og polymer-elektrolytmembran (PEM), når kun op på hhv. 67% og 54% (LHV) [1]. Produces der i stedet for H_2 enten CO eller syntesegas (en blanding af H_2 og CO) stiger effektiviteten til hhv. 90% og 81% (LHV) [1], da mængden af ikke-kondenserbar gasser stiger.

Bruges der "gratis" spildvarme, fra f.eks. kraftvarmeværker eller industriel produktion, bliver den mængde varmeenergi, der skal tilføres fra el-varmelegemerne mindre og el-til- H_2 -effektiviteten stiger til over 100%, se ligning 1 og 2. Dette er specielt ønskeligt til energilagring, hvor den samlede effektivitet er vigtig.

$$\eta_{el \text{ til } H_2} = \Delta H / (\Delta G + Q_{\text{varmelegemer}}) \quad (1)$$

$$Q_{\text{varmelegemer}} = T\Delta S + c_{p,H_2O} \cdot \Delta T - Q_{\text{varmeveksler}} - Q_{\text{joule heating}} - Q_{\text{„gratis“ spildvarme}} \quad (2)$$

FOODTECH

Processing & Packaging | 1.-3. november 2016



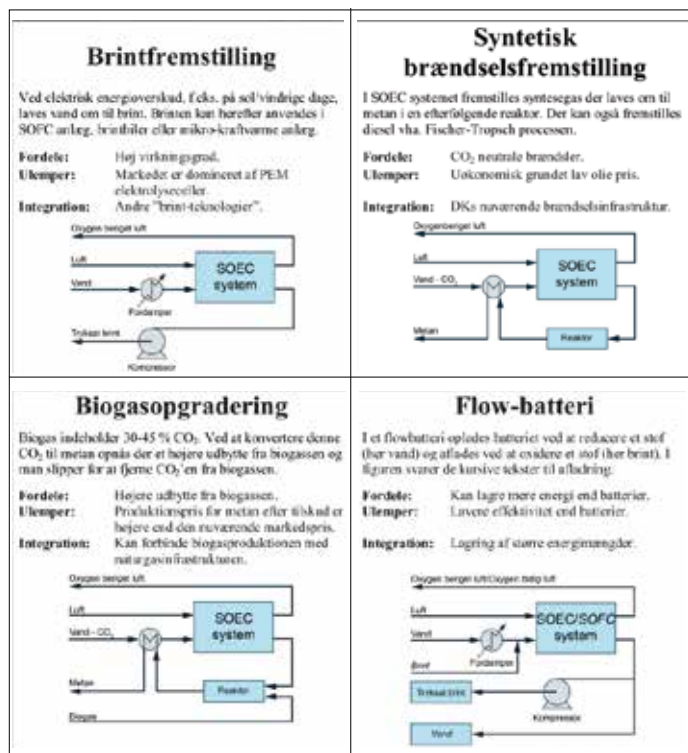
Nordeuropas største fagmesse for fødevareteknologi

BOOK STAND I DAG
PÅ FOODTECH.DK



Hosting EHEDG World Congress and International DAIRY and FOOD Contest





Figur 4. Samspil mellem SOEC og forskellige andre teknologier til energilagring.

den fordel, at hvis tiden med el-energioverskud er meget større end perioden med el-energiunderskud, kan anlæggets lagringsmedie (brint, metan eller andre syntetiske brændsler) bruges andre steder. Dette er ikke tilfældet for de andre energilagringsteknologier.

Hvor langt er teknologien?

Teknisk set er holdbarheden af cellerne den største udfordring for SOEC-teknologien, og den får derfor stor fokus fra forskellige forskningsgrupper.

Sammen med Idaho National Laboratory og European Institute for Energy Research er DTU Energy med helt i front med udviklingen af SOEC-teknologien.

Danske Haldor Topsøe og tyske Sunfire er de mest aktive virksomheder inden for kommercialiseringen af teknologien, og de arbejder aktivt for at udvikle teknologien fra laboratoriet til fungerende anlæg.

Økonomisk set bliver energilagring først interessant, når en langt større del af vores energi kommer fra vedvarende energikilder med stærkt fluktuerende produktion. Det betyder dog ikke, at vi skal lægge teknologien på hylden. Der er et behov for at færdigudvikle teknologien nu, så den er klar, når omstillingen til en større andel af vedvarende energikilder gennemføres.

Konklusion

SOEC er en lovende teknologi, der kan blive et vigtigt element i Danmarks fremtidige energisystem. Teknologien kan arbejde sammen med en række af de andre energiteknologier, som Danmark satser på, såsom vindenergi, solenergi, brintbiler, CO₂-neutral gas og diesel samt biogas. Teknologien kan også anvendes til flowbatterier, der vil kunne bruges til at udjævne vind- og solbaseret el-produktion.

Tak

Projektet er delvist finansieret af Innovationsfondens Erhvervs-ph.d.-program (1355-00140).

E-mail:

Jakob Dragsbæk Duhn: JADU@kt.dtu.dk

Litteratur

- Mathiesen, B.V., Ridjan, I., Connolly, D., Nielsen, M.P., Vang Henriksen, P., Bjerg Mogensen, M., ... Dalgaard Ebbesen, S. (2013). Technology data for high temperature solid oxide electrolyser cells, alkali and PEM electrolyzers. Department of Development and Planning, Aalborg University
- Stambouli, A. Boudghene., Traversa, E. (2002). Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 6, Issue 5, Oktober 2002, s. 433-455, [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00014-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00014-X).
- Ibrahim, H., Iinca, A. (2013). Energy Storage - Technologies and Applications, Dr. Ahmed Zobaa (Ed.), ISBN: 978-953-51-0951-8, InTech, <http://dx.doi.org/10.5772/52220>.

Lagring af elektrisk energi

Lagring af elektrisk energi bliver nødvendigt i fremtiden, da vi producerer mere energi fra fluktuerende kilder som vind og sol. Batterilagring er velegnet til lagring af mindre energimængder, men skal der lagres større mængder energi, bliver den lave energitæthed i batterier problematisk. Fastoxid elektrolyseceller kan konvertere og lagre den elektriske energi i form af kemisk bindingsenergi. Dette kan være som brint, metan eller andre kulbrinter, hvor energitætheden er større end i de nuværende batterityper. Figur 4 viser fire eksempler på, hvordan fastoxid elektrolyseceller kan bruges til energikonvertering og -lagring. Vi vil i det følgende fokusere specifikt på anvendelsen af fastoxid elektrolyseceller som et flowbatteri.

Flowbatteri

Da SOEC og SOFC basalt set er det samme, kan man med kun én type fastoxidcelle lave et system, der både kan omdanne elektricitet til brint/metan eller andre kulbrinter og omdanne brint/kulbrinter til elektricitet. Systemet er skitseret i figur 4, og det består foruden elektrolysecellen/brændselscellen af tanke til SOEC-råmaterialer og SOFC-brændsel. SOEC-råmaterialerne kan være vand eller vand+CO₂. SOFC-brændslet kan tilsvarende være enten brint eller syntesegas. Et vand-brint-system vil være det mest simple, mens et vand+CO₂-syntesegas-system vil kunne kobles sammen med en reaktor og reformeres til metan eller andre syntetiske brændsler. Gøres dette, kan flowbatteriets SOFC-brændsels-tank i princippet være hele naturgasnettet.

Virkningsgraden for et fastoxid flowbatteri kan beregnes som produktet af virkningsgraden for SOEC-delen og SOFC-delen. Som tidligere beskrevet kan virkningsgraden for en udelukkende el-drevet SOEC nå 84%, men kan stige til over 100%, såfremt der tilføres overskydende spildvarme udefra. Effektiviteten af SOFC-delen er 45-60% [2]. Det giver en samlet effektivitet på mellem 38 og 60%. Dette er lavere end for f.eks. batterier og roterende hjul, ($\eta \approx 80\%$), men er sammenligneligt med andre højenergimængde lagringsteknologier som vandopumpning ($\eta \approx 70\%$) [3]. Anlægget har ydermere