



Fastoxidbränslecellens betydelse för fastigheter och miljö

Simon Lintu

EXAMENSARBETE	
Arcada	
Utbildningsprogram:	Distribuerade Energisystem
Identifikationsnummer:	
Författare:	Simon Lintu
Arbetets namn:	Fastoxidbränslecellens betydelse för fastigheter och miljön
Handledare:	DI Kim Rancken
Experthandledare:	DI Björn Wiberg
Uppdragsgivare:	Arcada
<p>Sammandrag:</p> <p>Dagens utsläpp leder till global uppvärmning och hotar det nuvarande klimatet. Med ökningen av energiproduktionen så har det uppstått ett behov av att ersätta fossila bränslen med förnybar energi. Europeiska unionen har upprättat en energiplan från år 2011 till 2050 för att motverka klimatförändringen och täcka behovet av energi. Målet är att reducera växthusgasutsläppen med 90-95% till år 2050. För att uppnå detta mål så måste det göras omfattande energibesparingar inom alla områden eller skapas ren produktion. En lösning på problemet är utvecklingen av en fastoxidbränslecell som omvandlar kemisk energi till elektricitet och värme för energiproduktion till en fastighet eller flera. Syftet med arbetet är att ge läsaren en heltäckande bild av teknologin bakom fastoxidbränslecellen samt dess konstruktion och hur den kan användas för energiproduktion i fastigheter och ta tillvara restvärmen från elproduktionen till uppvärmning av huset samt hur systemet minskar koldioxidutsläppen och andra växthusgaser som utsläpps vid drift. I arbetet har det samlats in utspridd information angående ämnet och man har använt sig av demonstrationer i Europa och Japan som exempel och för analys. Med att ta till vara restvärme från elproduktionen i ett fastoxidbränslecellsystem så minskas koldioxidutsläppen och andra växthusgasers emission. Teknologin för fungerande anläggningar finns och är i bruk globalt. Största problemet är att få ner tillverkningskostnaderna och skapa produktion och infrastruktur för väte. Det finns mycket lite publik information angående ämnet, för största delen av utvecklingen sker inom företags produktutveckling. Man analyserar också kort dagens värme- och elproduktion i jämförelse syfte.</p>	
Nyckelord:	Bränslecell, Combined heat and power, micro-CHP
Sidantal:	41
Språk:	Svenska
Datum för godkännande:	

DEGREE THESIS	
Arcada	
Degree Programme:	Distribuerade Energisystem
Identification number:	
Author:	Simon Lintu
Title:	Fastoxidbränslecellens betydelse för fastigheter och miljö
Supervisor:	DI Kim Rancken
Specialised supervisor:	DI Björn Wiberg
Commissioned by:	Arcada
Abstract:	
<p>Today's emissions lead to global warming and threatens the current climate. With the increase in energy production, there has arisen a need to replace fossil fuels with renewable energy. The European Union has set up an energy plan from 2011 to 2050 tackle climate change and meet the demand for energy. The goal is to reduce greenhouse gas emissions by 90 to 95 % by 2050. To achieve this goal, there must be substantial energy savings in all areas or created CO₂-free production. One solution is the development of the solid oxide fuel cell that converts chemical energy into electricity and heat for real estate heating. The aim is to give the reader a comprehensive overview of the technology behind the solid oxide fuel cell and its design and how it can be used for energy-production in a real estate and take advantage of waste heat from electricity production for heating the house and how the system will help reduce carbon dioxide emissions and other greenhouse gases during its operation. The work has been done collecting scattered information on the subject and demonstrations in Europe and Japan has been used as examples and for analysis. By taking advantage of waste heat from electricity production in a solid oxide fuel cell system, carbon dioxide emissions reduce and so other greenhouse gas emissions. The technology behind the functioning systems are available and in use globally. Biggest problem is to reduce material costs and create production and infrastructure for hydrogen. There is very little public information on the subject, for most of the development takes place within the company's product development.</p>	
Keywords:	Bränslecell, Combined heat and power, micro-CHP
Number of pages:	41
Language:	Swedish
Date of acceptance:	

Förord

Detta examensarbete är initierat inom yrkeshögskolan Arcada av DI Björn Wiberg. Detta arbete har gett mig en omfattande kännedom i flera olika områden vilket har varit väldigt nyttigt och lärorikt. Jag hoppas examensarbetet kommer väcka ett större intresse inom forskning och utveckling samt fördjupade studier inom bränsleceller vid yrkeshögskolan Arcada.

Jag vill rikta ett tack till min experthandledare DI Björn Wiberg och sedan DI Kim Rancken som fungerade som handledare och gjorde detta examensarbetet möjligt.

Helsingfors 13.10.2016

Simon Lintu

Sammandrag

Abstract

Förord

Innehåll

Termer och beteckningar	6
1. Inledning	7
1.1 Allmänt om energimarknaden	8
1.2 Minskning av CO ₂ -utsläpp	10
1.3 CHP-bränslecellsystems påverkan av CO ₂ -utsläpp.....	10
1.4 Koldioxidavtryck vid konstruktion av ett SOFC-CHP system.....	10
1.5 Minskning av övriga utsläpp och luftföroreningar	11
3. Fastoxidbränslecell.....	12
3.1 Elektrisk spänning	14
3.2 Struktur	16
3.3 Cellstapel.....	18
3.4 Material	19
3.5 Utvecklad intermediär- och låg temperaturs SOFC	20
4. SOFC-system för fastighet.....	21
4.1 Uppläggningar av CHP	21
4.2 Nedkylning med SOFC	22
4.3 Svårigheter med CHP-SOFC-system.....	23
4.4 SOFC-system under utveckling.....	23
4.4.1 Japan	24
4.4.2 Europa	27
4.4.3 Nordamerika.....	28
5. Energilagring.....	28
6. Kostnader	31
7. Sammandrag	33
Källor	35
Bilagor	

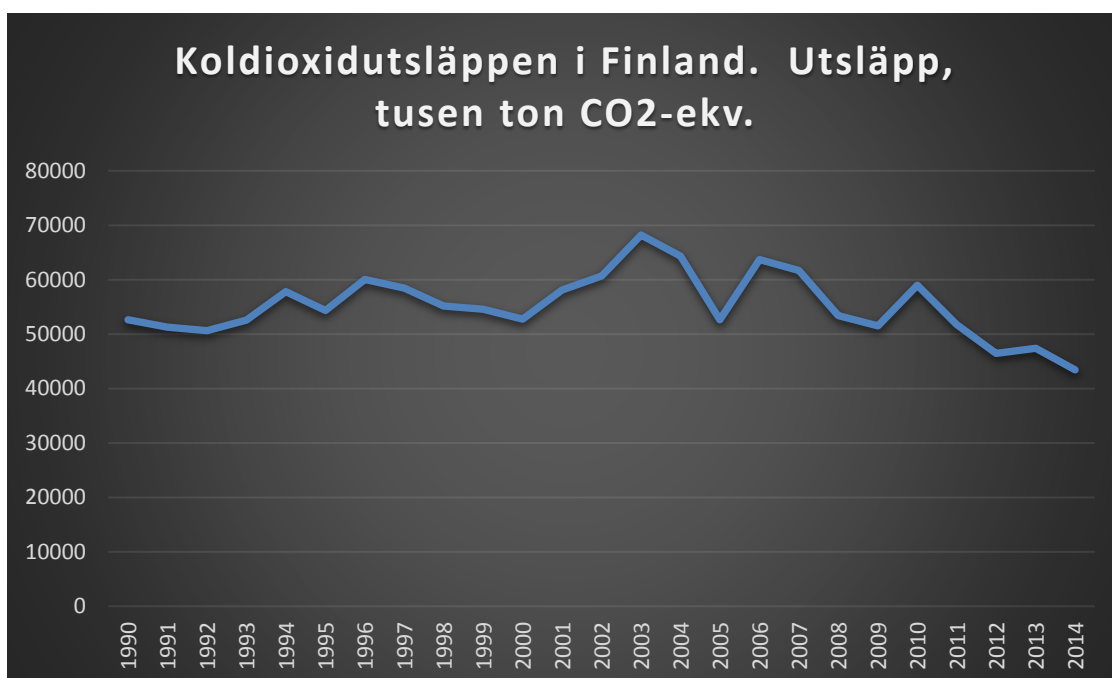
Termer och beteckningar

SOFC	Solid oxide fuel cell (engelska), fast oxid bränslecell.
CHP	Combined heat and power (engelska), kraftvärmeverk.
Micro-CHP	Micro combined heat and power (engelska), småskaligt kraftvärmeverk för fastighet upp till 50 kW.
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cells (engelska,)
FC	Fuel cell (engelska), bränslecell
E_0	Den vändbara spänningen hos en SOFC
ΔG	Gibbs fria energi i cellens reaktion
F	Farads konstant
R	Allmänna gaskonstanten
T	Temperatur
P_{H_2} och P_{O_2}	Partialtrycket av reaktanterna
P_{H_2O}	Partialtrycket av produkten
SCSZ	Stabilized zirconia
LSCF	Lanthanum strontium cobalt ferrite
LSM	Lanthanum strontium manganite
GDC	Gadolinium doped ceria

1. Inledning

På grund av koldioxidutsläpp och andra växthusgaser så ökar uppvärmningen av vår planet vilket är ett stort hot för det nuvarande klimatet som vi har. Denna uppvärmning leder till allt högre havsvattennivåer, ökad temperatur i oceanerna, smältande av planetens glaciärer, mer extrema väderförhållanden samt försurning av oceanerna.[1]

På grund av klimatproblemet har europeiska unionen uppgjort en energiplan från år 2011 till 2050. Målet är att ha reducerat växthusgasutsläppen med 90-95% till år 2050.[3] För att uppnå detta mål så måste det göras omfattande energibesparingar inom alla områden. Efterfrågan på primärenergi måste minska med 32-41 % till år 2050. Andelen förnybara energikällor måste öka till minst 55 % av bruttoenergianvändningen. [2] Det medför att nya investeringar i förnybar energi måste göras. Nya energikällor med låga koldioxidutsläpp eller inga koldioxidutsläpp alls måste utvecklas. I Finland utgör energisektorn största utsläppen av koldioxid med hela 40 % av alla koldioxidutsläpp år 2012 [3]. Det betyder att finns det ett påtagligt behov av att minska koldioxidutsläppen, och frågan är därför högst aktuell i Finland. Figur 1 visar utvecklingen åren 1990 – 2014.



Figur 1. Grafen visar koldioxidutsläppet i Finland mellan 1990 och 2014. Informationen baserar sig på av statistikcentralen utgivna data.

Fastoxidbränslecellen är en delösning på problemet hur man kan minska koldioxidutsläppen genom att ersätta traditionella fossila bränslen med väte och syre och få vatten som biprodukt. Det utvecklas massor av ny teknologi inom ämnet som man kan sätta ihop för att möjligen sälja konkurrenskraftiga energikällor i jämförelse med dagens energitillgångar. Med hänvisning till Finlands koldioxidutsläpp inom energisektorn så finns det ett behov av att minska koldioxidutsläppen inom fastigheter för att inte tala om hela energisektorn. Fastoxidbränslecellen är en möjlighet för att samtidigt skapa elektricitet och värme som man kan ta till vara för att öka energieffektiviteten och samtidigt minska koldioxidutsläppen.

Denna undersökning har genomförts genom att samla ihop den ringa mängden publikationer angående ämnet som finns allmänt tillgängligt och analysera deras innehåll och källor. Först presenteras den allmänna energimarknaden och dess andel av CO₂-utsläpp. Efter det behandlas CHP-systemets påverkan av CO₂ och övriga luftföroreningar och utsläpp i produktion och drift. Den grundläggande idén bakom fastoxidbränslecellen presenteras också och hur den kan användas för produktion av energi i en fastighet. I arbetet kommer det att användas engelska förkortningar för det är normen inom branschen samt då det inte finns översättningar för specifika ord ännu på grund av att teknologin är så ny. Examensarbetets syfte är också att samla in den utspridda informationen angående ämnet och uppmärksamma att det finns alternativ till fossila bränslen för att skapa energi som inte avger koldioxid i processen och presentera det på svenska då nästan all information om ämnet är på andra språk.

1.1 Allmänt om energimarknaden

I Finland produceras el på många olika sätt. De viktigaste baserade formerna för energiproduktion är stenkol, kärnkraft, vattenkraft, naturgas, träbränslen samt torv. Andelen vindkraft är liten, men håller på att växa. En tredjedel av elproduktionen sker i kombination med värmeproduktion. På det sättet utnyttjas energiinnehållet i bränslet så effektivt som möjligt. Upp till 90 procent av bränslets energi kan omvandlas till el och värme. Den största utmaningen är att minska utsläppen och lösa klimatfrågorna genom att öka

energieffektiviteten. Utvecklingen inom produktionen av el, fjärrvärme och fjärrkyla utgör en stor del av lösningen på klimat- och energifrågorna.

Den vanligaste uppvärmningsmetoden i vårt land är fjärrvärme. Fjärrvärme finns i nästan alla städer och tätorter i landet. 46 procent av uppvärmningsmarknaden värms med fjärrvärme. Upp till 95 procent av bostadshöghusen samt majoriteten av de offentliga och affärsbyggnaderna värms med fjärrvärme. Fjärrvärmen står för nästan 7 % av uppvärmningsenergin för enfamiljshus. Fjärrvärmens energieffektivitet beror framför allt på att fjärruppvärmningen tar till vara värmeenergi från elproduktionen. [4]

Vid uppvärmning av egnahemshus finns det att välja mellan olika alternativ såsom: flis- och vedpannor, fjärrvärme, naturgas, jordvärme, pelletsvärme, frånluftsvärmepump, luftvattenvärmepump, elpannor och ackumulatortankar med elpatron och oljepanna eller en kombination av dessa. Vid valet av uppvärmningssystem borde man tänka på miljövänligheten samt framtida elkostnader och inte bara på anskaffnings- och driftskostnaderna.

Vid val av uppvärmningssystem lönar det sig att beakta den ekonomiska utgångspunkten, de möjligheter som byggplatsen och byggnaden erbjuder, samt uppvärmningssystemets egenskaper. Naturgas och fjärrvärme är möjligt bara om byggnaden uppförs i närheten av ett fjärrvärme- eller naturgasnät. Vid användning av jordvärme måste det utredas ifall marken är lämplig för det. Vedeldning lämpar sig oftast ifall man har tillgång till egen vedtillverkning.

Uppvärmningen orsakar de största miljöbelastningen under fastighetens användningstid. Därför är det viktigt att utreda med vilket uppvärmningssystem man kan minska denna belastning. [5]

1.2 Minskning av CO₂-utsläpp

Globalt så var energirelaterade CO₂-utsläpp 31,2 Gt år 2011. Detta kommer enligt prognoser att stiga till 37 Gt år 2035 vilket förorsakar en höjning av den globala temperaturen med 3,6°C. En stor del av ökningen av växthusgaser är på grund av ökad efterfrågan på kol. Förbränningen av kol orsakar ca 71 % växthusgaser medan förbränningen av olja ca 17 % och naturgas 12 %. I Finland står kol för 10% av primärenergien. [6]

Värmetillverkning för fastigheter och industrin står för över hälften av den globala energi konsumtionen och en tredjedel av de globala CO₂-utsläppen. Det är allmänt känt att dagens kolvätebränslen måste ersättas med annat för att minska klimatändringen som växthusgaserna orsakar. [7]

1.3 CHP-bränslecellsystems påverkan av CO₂-utsläpp

Utvecklingen och ökningen av CHP-system kan minska CO₂-utsläppen med ca 4 % årligen medan den år 2030 kan ha reducerat utsläppen upp till 10 % årligen. CHP-system kan därför markant bidra till minskningen av CO₂-utsläppen. [8]

Generellt sett så är koldioxidutsläppen från elproduktion i ett CHP-kraftverk en tredjedel i jämförelse med traditionella kolkondenskraftverk och hälften av kraftverk fungerande med naturgas. [6]

1.4 Koldioxidavtryck vid konstruktion av ett SOFC-CHP system

Ett SOFC-system producerar elektricitet med hög effektivitet och har mindre utsläpp av CO₂ i jämförelse med de konventionella systemen. Det producerar mindre föroreningar så som CO, NO_x, SO_x och mikropartiklar. Ett SOFC-CHP-system kan ses som en av de renaste energiproducerande teknologierna.

Med koldioxidavtrycket vid konstruktion så menar man mängden växthusgaser som har producerats vid konstruktionen av systemet.

Vid uppbyggnad av ett CHP-bränslecellsystem baserat på PEMFC- och SOFC-teknik så resulterar utsläppen i 10 -20 g CO₂ per kWh producerad elektricitet. Detta är mycket lågt i jämförelse med fotovoltaiska solpaneler, som resulterar i ett utsläpp på 40-80 g CO₂ per kWh och kärnkraft med 10-30g CO₂ per kWh. [6]

1.5 Minskning av övriga utsläpp och luftföroreningar

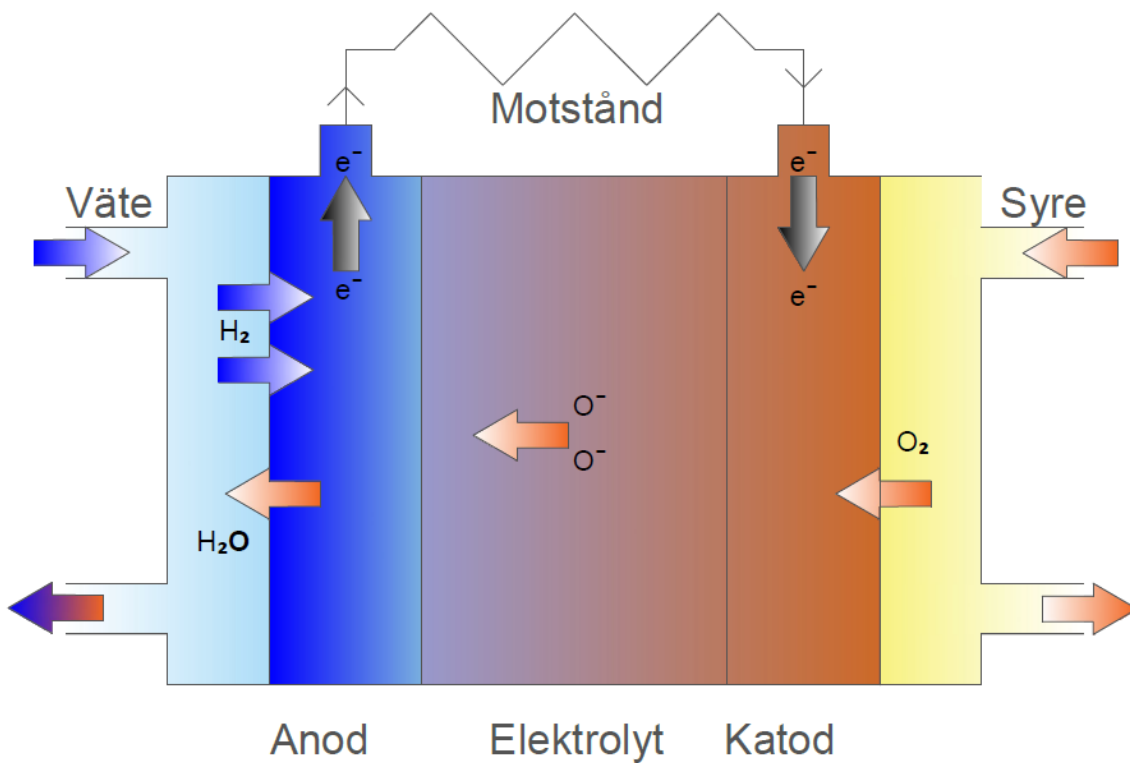
Processen med att bränna fossila bränslen (huvudsakligen diesel och kol) leder till utsläpp av flera luftföroreningar som kväveoxider (NO_x) och svaveldioxid (SO₂). Den största källan till SO₂ är från elproduktionen, som står för 44 % av de totala utsläppen under 2011. SO₂-utsläppen är huvudsakligen relaterade till förbränning av kol och även diesel, medan NO_x-föroreningar släpps ut från förbränning av alla typer av fossila bränslen. Dessa utsläpp orsakar en rad miljöproblem, såsom surt regn, luftföroreningar och ozonbildning.

Under den primära kraftgenereringsprocessen i en bränslecell så produceras mycket lite utsläpp och det är bara under bränslebearbetningsfasen som det kommer utsläpp, och detta beror på bränslet i användning, som är enda källan till utsläpp i ett CHP-bränslecellsystem. Utsläppen av NO_x är då mindre än 0,01 kg per MWh i jämförelse med naturgasförbränning som har utsläpp på 1-12,7 kg per MWh.

Källan till NO_x-utsläppen i CHP-bränslecellsystem är en brännare som levererar värmeenergi för den endotermiska reformeringsprocessen genom förbränning av naturgas, om denna används som bränsle. [6]

3. Fastoxidbränslecell

En bränslecell omvandlar kemisk energi till elektricitet och värme. Det sker genom att bränslet som används oxideras vid anoden och oxidationsmedlet reduceras vid katoden. En bränslecell består i sin enklaste form av fyra delar som syns i figur 2: ett skal, en anod, en katod och däremellan en elektrolyt. Det finns många olika sorters bränsleceller och det som skiljer dem åt är bränslet de använder samt restprodukten. Dessutom kan materialet hos anoden samt katoden och elektrolyten skilja sig från varandra också beroende på vilket bränsle man använder. [9]



Figur 2. Elektrolys via oxidation.

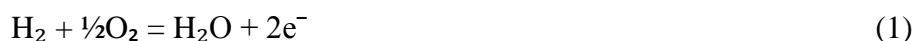
Fastoxidbränslecellen eller SOFC kan fungera i sin enklaste form med bara väte och syre med en temperatur från 600°C till 1000°C och baserar sig på en fast keramisk oxid som elektrolyt. SOFC producerar likström.

Till skillnad från andra bränslecellsystem så kan SOFC förutom väte och syre använda fossila energikällor, som till exempel naturgas.

SOFC används idag inom lokal kraftproduktion för bland annat serverutrymmen, enskilda hushåll, fordon och militära ändamål. I framtiden kommer SOFC ha stor potential i produktion och distribuering av energi i MW-skalan. [10] I dag säljer Toyota en bil som fungerar med SOFC-principen. Den använder som bränsle vätgas och luft, och har en effekt på 114 kW och har en energidensitet på 3,1 kW per liter använt bränsle. SOFC-systemet producerar upp till 650 volt spänning till drift av bilen. [11]

SOFC består av två stycken elektroder och en gastät keramisk elektrolyt. Den täta keramiska elektrolyten blir en jonledare med hög temperatur. Sönderfall och reduktion av syre sker vid katoden genom elektroner och de erhållna syrejonerna transporteras genom elektrolyten. Vid anodens sida reagerar syrejonerna med inkommande gas som genererar en produkt via oxidation samt värme och elektroner. [12]

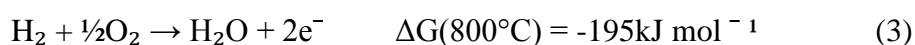
Den kemiska reaktionen som sker vid katodens sida är följande:



Vid anoden sker följande reaktion:



Den totala cellreaktionen:



Figur 2 visar funktionsprincipen för en SOFC via oxidation.

3.1 Elektrisk spänning

Den termodynamiska potentialskillnaden mellan anod och katod resulterar i en spänningsskillnad i bränslecellen. Detta kan beskrivas med Nernst ekvation för elektrokemiska funktioner. Nernst ekvation är en ekvation som relaterar reduktionspotentialen av halva cellen (eller den totala spänningen, dvs. den elektromotoriska kraften, av hela cellen) vid en tidpunkt i relation till elektrodpotentialen, temperatur, aktivitet och underliggande reaktioner. I detta fall fås den totala spänningen i hela bränslecellen.

Med hänsyn till ekvationerna (1-3) kan man räkna cellspänningen på följande vis: (4)

$$E_0 = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{RT}{2F} + \ln\left(\frac{P_{H_2}^2 \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}}\right) \quad (4)$$

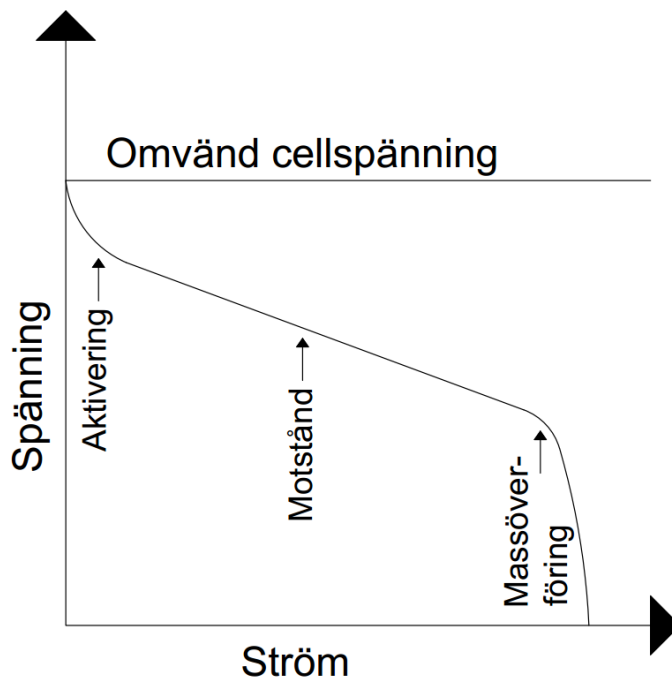
I ekvationen är ΔG Gibbs fria energireaktion $G = H - TS$ där H är entalpi; T temperaturen och S entropin. F är farads konstant. R är en konstant som uppträder i allmänna gaslagen och andra tillståndsekvationer för gaser och har det numeriska värdet $8,314462175 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$. T är reaktionstemperatur och P_{H_2} är partialtrycket för väte och P_{O_2} partialtrycket för syre. P_{H_2O} är partialtrycket för vatten.

Då bränslecellen startas är det låg spänning på grund av elektrokemisk kinetik.

Resistansen har ett linjärt samband med materialets i fråga resistans. Massöverföringsförluster vid hög spänning beror på begränsad överföringsförmåga till elektroderna. [12]

På grund av att strömmen utvinns via diffusion av oxidjoner (eller protoner) genom en fast elektrolyt så är det väsentligt att använda höga driftstemperaturer ($\sim 600\text{-}1000 \text{ }^\circ \text{C}$) för att uppnå förbättrad jonledningsförmåga. [13]

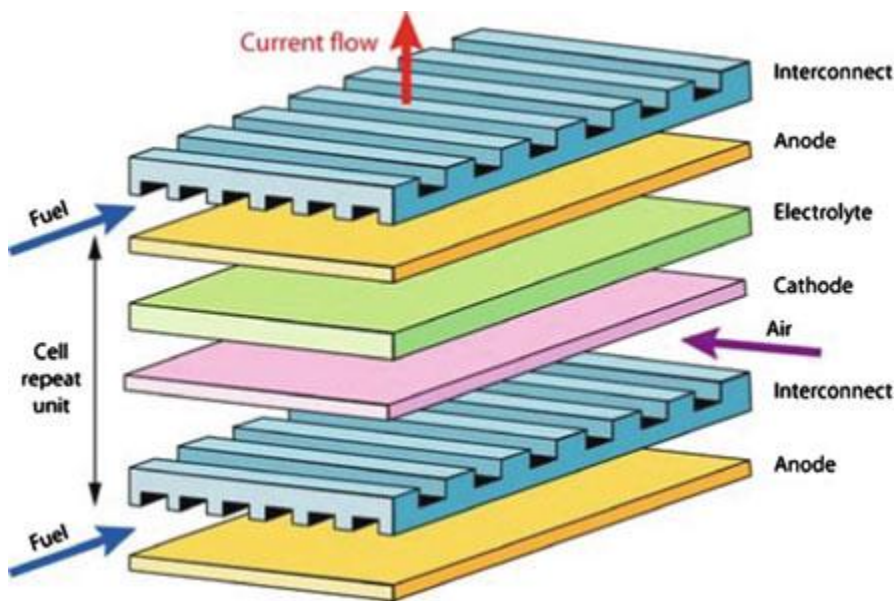
Spänningen hos en bränslecell minskar på grund av icke-ideala förluster. Förlusterna orsakas av överspänning som erfordras eller av polarisering som uppstår då ström tas från cellen. Förlusterna kategoriseras enligt uppstarten, resistansen och massöverföringsförluster som syns i figur 3.



Figur 3. Spänningen minskas av diverse förluster

3.2 Struktur

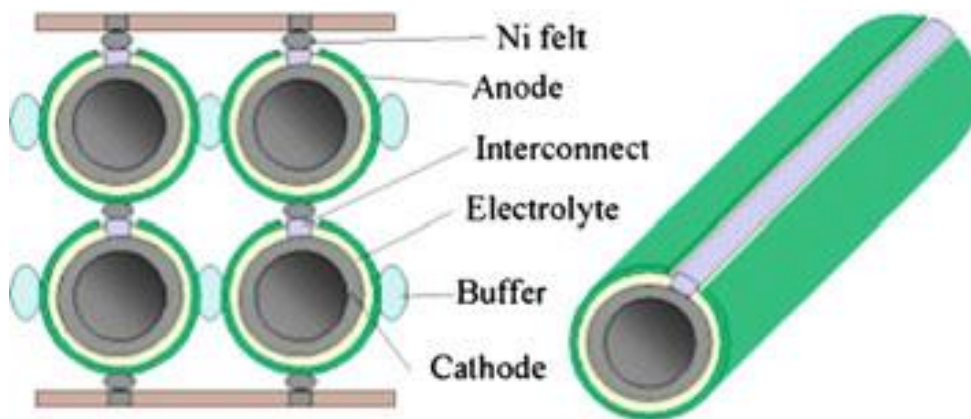
SOFC struktur beror på i vilket sammanhang cellerna skall användas. De har alla fördelar och nackdelar även om materialen i dem vore desamma. Det finns två grundstrukturer som används i tillverkningen av SOFC. Den ena är plana strukturer. Där uppbyggs cellen av rektangulära tunna skivor som visas i figur 4. Cellerna staplas på varandra i serie för att öka spänningen (figur 4).



Figur 4 Strukturen av en plan strukturell cellstapel. [7]

En plan bränslecell måste få en effektiv tätning för att isolera luft från bränslet. Tätningen måste ha en värmeutvidgningsförmåga i relation till bränslecellkomponenterna. Den måste också vara elektriskt isolerande och klara av höga temperaturer under driftförhållandena för att inte skada andra cellkomponenter. Den måste klara av temperaturskillnader från normal rumstemperatur till över 800°C. Ett antal olika tätningmetoder är under utveckling som t.ex. glas-keramiska, eller visköst glas. Flera tätningmedel kan också användas samtidigt för kraven för cellkomponenten. Framgångsrik utveckling av tätningmaterial och koncept för plana SOFCs är förmodligen den viktigaste frågan för långsiktig stabilitet och livslängd för plana SOFC-stackar och därmed för eventuell kommersialisering och konkurrenskraftiga kostnader.

Det andra alternativet för en grundcellstruktur är av typen av är cylinderformig bränsle-cell (figur 5) där storleken kan variera från en diameter mindre än 5 mm (microtubulära celler) till större än 15 mm. Cellerna kan också vara platta och sedan sammankopplas för att få högre energidensitet. Vid tidigare studier av bränsleceller under 1990-talet så var den cylinderformiga strukturen det som man fokuserat mest på. Orsaken till detta var dess fördel av högre energidensitet och fördelen med att luften och bränslet



Figur 5. Strukturen hos ett rör formig cellstapel [7]

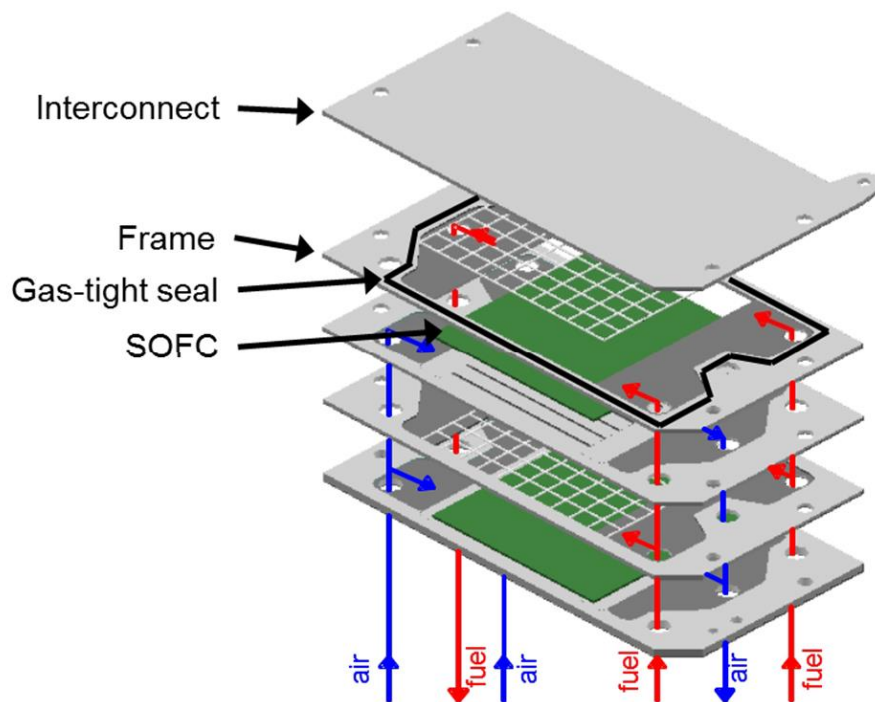
är naturligt isolerade eftersom rören är stängda i ena änden. I dagens läge är de ännu relevanta i situationer då det behövs snabb start, och snabb kylning är av intresse. Den enskilt största fördelen med rörformade celler framom plana celler är att de inte kräver tätningar för att isolera oxidationsmedlet från bränslet. Det gör driften av rörformiga cellstaplar mycket stabila under längre tidsperioder, men effekttäthet hos plana celler är upp till 2 W/cm^2 för enskilda celler och åtminstone $0,5 \text{ W/cm}^2$ för staplar vilket är högre än för rörformiga men samtidigt blir tillverkningskostnader högre. Effekttätheten per volym är också lägre för rörformade celler än för plana celler. För att öka effekttätheten och minska storleken och kostnaden för rörformiga SOFC så har Siemens utvecklat en ny form var man kombinerar rörformen med en plan struktur.

Vid tillverkningen av cylinderformiga bränsleceller så görs ena elektroden till en cylinderform med porösa väggar. På utsidan av elektroden finns elektrolyten som den andra elektroden sätts fast på. [14][15]

3.3 Cellstapel

Ur en bränslecell fås normalt ut mindre än 1 V. Det vanligare är att det fås ut 0,7-0,9 V. För att få ut mera spänning ur systemet så måste man seriekoppla flera bränsleceller, och det görs normalt med att stapla dem på varandra.

Figur 6 visar den normala strukturen för ett plant SOFC system. I detta fall stöds SOFC av en nickelkeramisk anod. Metalliska sammankopplingsplattor används för att leverera de gaser till elektroderna som behövs och för att ansluta cellerna i en serie för att få ut högre spänning.[14]



Figur 6. Flera celler är kombinerade på varandra. [7]

3.4 Material

Med tanke på cellens höga driftstemperaturer, 600 - 800°C, så uppstår det ett stort krav på materialen i användning. Med fel materialanvändning kan det uppstå problem med mekanisk och termisk stress vilket sker på grund av att olika material i cellstrukturen har olika värmeutvidgningskoefficient. Andra problem som kan uppstå är: termisk instabilitet, sintring av elektroden, katalysförgiftning. I forskning av material för SOFC så är det dessa problem som man försöker överkomma. I bilaga 1 framkommer en omfattande lista över material som används i SOFC (Bilaga 1 är från år 2014 och utvecklingen har sedan dess gått framåt vilket resulterat i ännu flera material än vad listan omfattar). Designen av anoden kräver förbättrad ”*Triple phase boundary*” vilket betyder förbättrad kontakt mellan alla tre lager i cellen (elektrolyt, elektrod och bränsle). Material som lämpar sig med hänvisning till kraven är metallerna Ni och Cu, cermeterna (Ni/Cu-YSZ), perovskit och pyroklor. Det har också visat sig att en finare mikrostruktur och lägre sintringstemperatur ökar kapaciteten hos anoden. Ni-YSZ har visat sig ha den bästa kapaciteten hos anoder med en smältpunkt på 1453°C. [16]

Elektrolyten kräver hög diffusion av joner vilket betyder hög operationstemperatur med minimal konduktivitet. En kristallin struktur såsom fluorit och perovskit lämpar sig väl som fast elektrolyt. För att termisk stabilitet är avgörande vid höga temperaturer och över 40 000 timmars drift så är keramiska material det enda alternativet. Dessutom måste elektrolyten vara tillräckligt tät för att bara släppa igenom joner eller protoner och förhindra rekombination av joner och att gaser inte genomträngs, med andra ord minimeras risken för en kortslutning och störst effekttäthet kan uttas. Att använda så kallad ”codoping” på ScSZ tillsammans med GDC har visat sig förbättra konduktiviteten av joner då SOFC opererar under låga temperaturer. [16]

Katoden måste vara porös för att möjliggöra bra diffusion av gasen i användning. Det vanligaste materialet för katoden är provoskit, vilket beror på hög p-dopad konduktivitet och jonledningsförmåga då den är utsatt för oxiderande atmosfär. Katoden måste också ha samma utvidgningskoefficient och permeabilitet av syremolekyler som elektrolyten. Den måste också kemiskt passa ihop med packningen. Polarisering av katoden förbättrar funktionen hos katoden. LSCF med ett tunt lager av LSM har visat sig vara det bästa materialet för katoden i en SOFC.

För att få ner kostnaderna och göra SOFC mera ekonomiskt lönsamma så är en lösning att införa rostfritt stål i cellstaplarnas form. För att använda rostfritt stål så krävs ändå en beläggning som skydd mot oxidation. Det går också att minska driftstemperaturen för att kunna använda billigare material men det ger en följd av reducerad jonisk ledningsförmåga i elektrolyten. [16]

För att förbättra cellens kapacitet vid låga temperaturer så är alternativet att använda en mycket tunn elektrolyt (några mikrometer) och nano-material för elektroderna. [17]

3.5 Utvecklad intermediär- och låg temperaturs SOFC

Lågtemperaturs SOFC (LO-SOFC) och utvecklad intermediär SOFC (ILT-SOFC) har på senaste tiden fått mycket stor uppmärksamhet inom forskning och utveckling. Med att minska den operativa temperaturen från 800-1000°C till så låga temperaturer som 500°C så minskar man kostnaderna för bränslecellen, för materialet kräver inte samma prestanda som i högre temperaturs SOFC. Kommersiellt så har REDOX som tillverkar SOFC för fastigheter lovat en driftstemperatur på 300°C - 500°C hos sin produkt.

Material som har potential att minska i kostnader med minskad temperatur är kopplingarna, samlingsrören och packningen. Den operativa livslängden för bränslecellen ökar också med minskad operativ temperatur. Men med lägre operativ temperatur uppstår i stället problem med ökad resistans mellan elektrolyten och elektroderna. [14]

4. SOFC-system för fastighet

Fastigheter står för 39% av energikonsumtionen på global nivå. Energin används för uppvärmning, uppvärmning av tappvatten och alla elektriska apparater i fastigheten. Det finns en stor variation i dessa, beroende bl.a. på klimatet. I kalla klimat ser man en topp-effekt i energianvändning under vinterhalvåret då det krävs som mest energi till uppvärmningen och i varmare klimat under sommarmånaderna då det krävs mest energi till nedkylning av fastigheterna. Det medför en viktig aspekt på konkurrenskraften hos ett CHP-system, då ett CHP-systems värde direkt korrelerar med inverkan av den elektriska konsumtionen av fastigheten. [18]

4.1 Uppläggningar av CHP

De väsentliga delarna i ett system som föreslås är en SOFC anläggning, värmepump och en vattentank. I engelskan talar man om ”micro-Combined heat and power” (micro-CHP) baserat på SOFC teknologi. SOFC anläggningen förses med väte för elproduktion som används av fastigheten och i drift av kompressorn i värmepumpen. Ifall väte inte är tillgängligt går det att köra systemet med naturgas med en bränsleomvandlare. Överloppsvärme tillvaratas för uppvärmning av tappvattnet och radiatornätet. Värmepumpen används då kravet på värme i fastigheten överstiger mängden värme som SOFC kan ge i form av restvärme i kylningsprocessen. Vattentanken lagrar värmen då SOFC-anläggningen producerar mera värme än vad fastigheten behöver. Systemet skall vara kopplat till elnätet då kravet på el i fastigheten och kompressorn är större än vad SOFC anläggningen kan producera. Ifall produktionen i SOFC anläggningen är större än behovet i fastigheten så skall överlopps elektricitet kunna säljas tillbaka till elnätet.

I bilaga 2 syns en mycket simpel schematisk bild av hur ett SOFC-CHP system kan uppläggas.

Det som har lett till att CHP-system baserade på SOFC teknologin fått så mycket uppmärksamhet och forskning de senaste åren är att dessa system når en energieffektivitet på 85-90%. Traditionella CHP-system har högre system- och bränsle-effektivitet med lägre utsläpp än konventionella system som har en energieffektivitet på ca 45 %. Energiförlusterna minskas också då produktionen är decentraliserad.

Tidigare har man forskat i SOFC kombinerad med gas- och ångturbiner för att få högre effektivitet. Utvecklingstendenser tyder på att arbetstemperaturen hos SOFC kommer att sjunka vilket leder till mindre effektivitet i en gasturbin som använder restvärme från ett SOFC system.[19]

Med tanke på att väte som energikälla inte är så lättillgängligt så drivs de flesta kommersiellt tillgängliga SOFC anläggningarna med naturgas. SOFC-CHP-system byggs idag för att drivas med naturgas, för väte görs inte i stor skala ännu. Det beror på att det inte ännu finns en infrastruktur för att brett distribuera väte. Med att driva ett SOFC system med naturgas så elimineras nästa alla NO_x, SO_x och mikropartiklar och man minskar CO₂-utsläpp med upp till 54 %. De system som finns idag som använder naturgas kan också i de flesta fall drivas med väte. Reaktionen som sker vid användningen av naturgas sker enligt följande:



4.2 Nedkylning med SOFC

Under sommarhalvåret så finns det beroende på klimatet oftast ett behov för nedkylning. Ett SOFC-CHP system kan användas tillsammans med absorptionskylning. Bilaga 3 visar en simpel schematisk bild av helheten. Absorptionskylning använder värme som energikälla till skillnad från många andra system som använder elektricitet. En absorptionskylare innehåller följande komponenter: kondensator, strypventil och förångare. Till skillnad från en traditionell ångkompressor så fungerar absorptionskylare med hjälp av det fysikaliska trycket som uppstår vid de höga temperaturskillnaderna i kopplingen med expansionsventilerna, pumpen och förångaren.

Restvärme från SOFC används först för att förånga vattnet och öka trycket. När kondenseringstemperaturen är högre än den omgivande temperaturen så kondenseras köldmediet i kondensorn och avger värme. Ångan som har högt tryck passerar nu en strypventil som minskar dess tryck och värme, vilket i sin tur minskar köldmediets temperatur.

Vattnet strömmar sedan in i en förångare var det kokas upp vid låg temperatur och absorberar värmen från omgivningen. [20]

4.3 Svårigheter med CHP-SOFC-system

En väsentlig begränsning vid utplacering av CHP är svårigheten att distribuera värmeenergi över långa avstånd. På grund av detta måste CHP-enheterna ligga nära efterfrågan, vilket potentiellt ökar kostnaderna.

Uppstartningen av ett CHP-SOFC-system kan ta upp till 30 minuter på grund av att systemet måste förvärmas innan det kan köras igång. Därför är det svårt att täcka hela hushållets behov av energi med bara ett sådant system, för under dagarna förekommer det olika energitoppar i användningen och under andra tider används nästan ingen energi alls, vilket betyder att man i så fall har en del lagrad energi och systemet stängs av. Men p.g.a. den långa uppstartningstiden så skulle den inte kunna täcka en topp effekt i användningen strax efter det. Därför lönar det sig att använda ett CHP-SOFC-system så att det täcker grundenergibehovet och toppenergibehovet tas sedan t.ex. från elnätet.

Kostnaden är också en stor utmaning samt hård konkurrens bland andra företag som tillverkar FC-CHP system. Men det har visat sig att mellan åren 2009 och 2013 så halverades tillverkningskostnaderna globalt. ”Transparency Market Research”-prognoser visar att FC-CHP-systemens marknad kommer att växa med 27 % per år under de närmaste 5 åren varefter återbetalningstiden kommer att minska till ca 5 år för dessa system. [21]

4.4 SOFC-system under utveckling

Det forskas och utvecklas i SOFC hela tiden. De som är längst i utvecklingen är de länder som snabbast behöver förnya sin energiproduktion. Här behandlas de viktigaste av dessa, nämligen Japan, Europa och Nordamerika.

4.4.1 Japan

Japan är den ledande producenten av CHP-system i världen. Japan började redan på 1990-talet med statligt stödda projekt i vilka man skulle utveckla CHP-tekniken. Där satsade man på CHP-system med bränsleceller som energigivare. Bränslecellerna har ett bränsleomvandlingssystem som omvandlar naturgas till väte. Dessa system var avsedda att kunna leverera 60°C varmvatten till kunderna. År 2005 installerades 50 stycken system för demonstration. Efter det installerades 3357 system år 2008. 2009 kommersialiserades systemen. Efter jordbävningen i Japan år 2011 led Japan av för liten energi-produktion då flera kärnkraftverk lades ner. Ett nationellt bidrag på mer än 4 miljarder amerikanska dollar gavs år 2012 till vätebaserade bränslecellers utveckling. År 2012 installerades mer än 25 000 system i Japan, och år 2014 såldes över 138 000 system. Japanska regeringen har som långtidsmålsättning att år 2030 skall det finnas över 5,3 miljoner bränslecellsystem i Japan. Företag som *Kyocera* och *Eneos* började installera SOFC-CHP-system år 2012 med över 300 sålda enheter det året. [22]

I Japan utförde man ett experiment åren 2007 till 2009 var man utvärderade ett CHP-SOFC-system för ett höghus. I huset sammankopplades två lägenheter på tredje våningen och fyra lägenheter på fjärde våningen. De sex familjerna som bodde i lägenheterna utförde sina dagliga rutiner. Man ville med projektet demonstrera och evaluera ifall ett vätebaserat system kunde fungera och förbättra och optimera systemet. Dessutom fick man information över reduceringen av CO₂ i ett CHP-SOFC-system till skillnad från konventionell energi produktion.

Tillgången på energi måste motsvara efterfrågan i fastigheten. Det ansågs inte vara lönsamt att installera bränsleceller med en kapacitet motsvarade hela behovet eller toppbehovet. Ett hem i Japan använder ca 250-500 W med en topp effekt på 3-5 kW. Därför ansågs det lämpligt att använda bränsleceller med en effekt på 700-1000 W. Genom att kombinera hela grupper av lägenheter och se dem som en enda konsument så minskas den erforderliga totala kapaciteten hos utrustningen inklusive bränslecellerna.

Det installerades utöver bränslecellerna bränsleprocessorer som producerar vätgas från naturgas eller fotogen så att ingen väteinfrastruktur är nödvändig.

Bränsleceller används som ett CHP system för att öka effektiviteten genom värmeåtervinning. För att få fulla nyttan av systemet så är det viktigt att utbudet och efterfrågan för både el och värme är i balans.

Projektets väteproducerande anläggning installerades på fastighetens tak. Anläggningen bestod av tre bränsleprocessorer och en 200 l vätetank. Vätedistributionskanaler installerades för distributionen av vätgasen. I själva projektet utvärderades inte vätgasproduktionen.

Ett bränslecellsystem installerades på tredje våningen och två andra på fjärde våningen med inverter för att omvandla elektriciteten från DC till AC. Intill båda systemen installerades en vattentank för att ta till vara överloppsvärme som cellerna producerade utöver elektricitet för uppvärmning av fastigheterna. Men installerade även ånggeneratorer som reserv i varje lägenhet för uppvärmning. Värmeåtervinningen var 40 %.

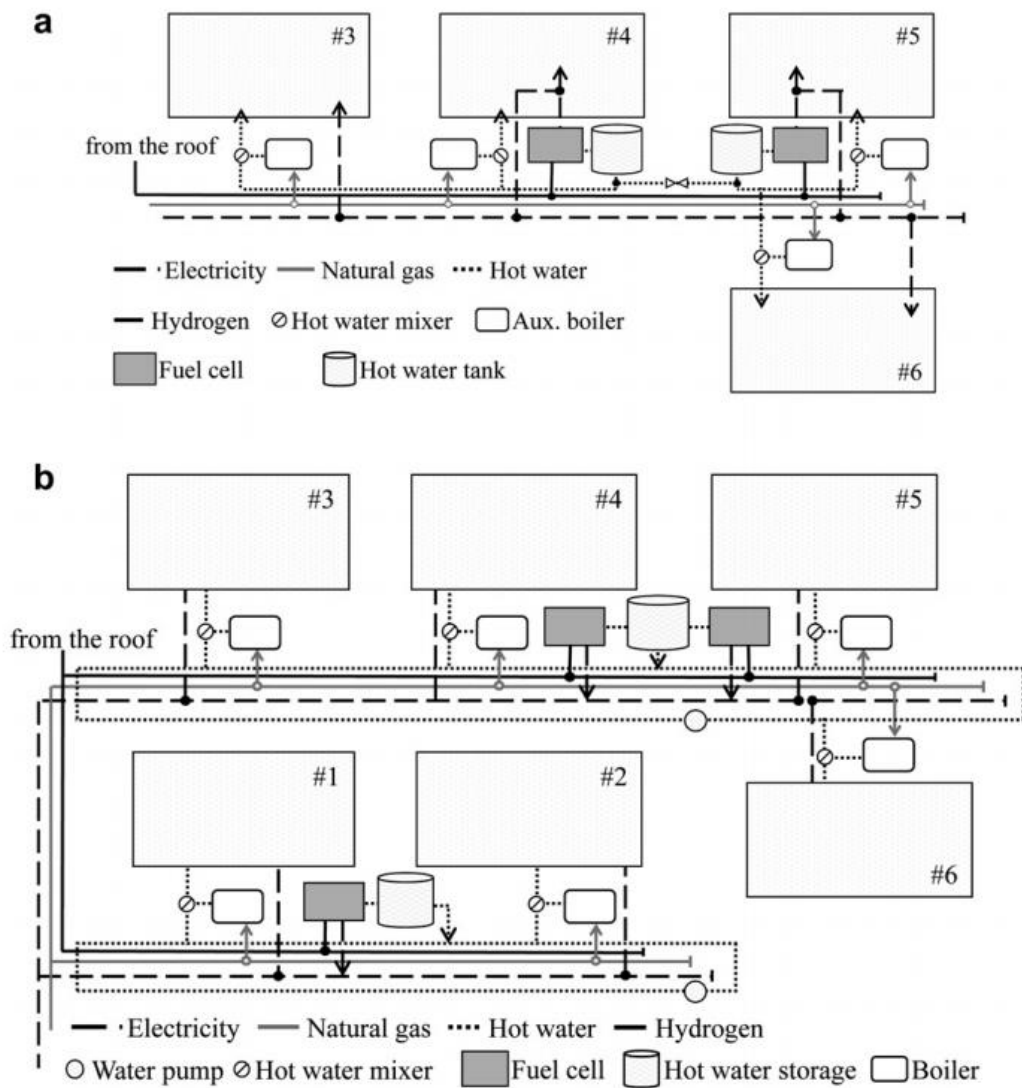
Två olika tester gjordes som syns i figur 10, det ena med avskilda lägenheter och det andra med sammankopplade lägenheter för att utvärdera skillnaden mellan ett distribuerat system och ett decentraliserat system.

Avskilda lägenheter:

De två bränslecellerna delade jämt på produktionen av elektricitet som de fyra lägenheterna behövde på fjärde våningen då summan av efterfrågan var mindre än den nominell utgångs effekt av bränslecellerna. Varmvattnet lagrades i varsin varmvattenberedare bredvid bränslecellen var den försedde två lägenheter med varmvatten. De två varmvattenberedare var sammankopplade med ett rör. När en varmvattentank blev tom medan den andra hade tillräckligt varmt vatten så öppnades en ventil på utväxlingsröret för att leverera varmvatten till den tomma tanken

Sammankopplade lägenheter:

Tre bränsleceller delade på hela summan av elektricitet i hela fastighetens sex olika lägenheter. Varmvattenberedarna på fjärde våningen var kopplade sinsemellan till en enda varmvattenberedaren. Varmvattnet cirkulerade i golvet. Cirkulationspumparna var bara på ca varannan timme då temperaturen sjönk lägre än tillåtet. Anläggningen för vätgasproduktion gick bara på då mängden vätgas i vätgastanken sjönk för lågt.



Figur 10. [22] Uppsättningen av de två olika SOFC-CHP projektet i Osaka i Japan.. (A) Fristående hus. (B) sammanslagna hus.

Testerna gjordes tre veckor i rad för vardera testet under alla fyra årstider. Under topp-timmar då efterfrågan på varmvatten var som störst så räckte inte bränslecellernas värme till utan varmvattenberedaren täckte återstående behov.

Värmeförlusten från tankar, cirkulation, rör mellan fastigheter och pump var väsentlig, speciellt under sommarmånaderna då varmvattenbehovet var lågt och vattnet hann kylas ner i cirkulationssystemet. [22]

4.4.2 Europa

I Europa har det utförts flera olika projekt som har resulterat i lansering av micro-CHP-system. Det största projektet "ene.field" samarbetar med åtta stycken micro-CHP tillverkare som har lett till att över 1000 CHP bränslecellsystem har installerats runt i Europa för testning i riktiga användningsförhållanden.[23]

Ett annat exempel är First Buders Logapower FC10 system som installerades i ett egna-hems hus från 1953 och ersatte oljepannan . Systemet har en energieffektivitet på 90 % och genererar både elektricitet och värme. Den elektriska energin konsumeras av invånarna som kan mata eventuell överskottsel in i det allmänna nätet och få ersättning för det. Med att generera sin egen el kan husägaren minska sina energikostnader med förväntningsvis 800 till 1300 euro på årsnivå och minska risken för stigande elpriser. Bränslecellssystemet är en keramisk SOFC-CHP-modul som har en operativ temperatur på 700°C och uppnår en elektrisk effektivitet på 45 %. Systemet har också en varmvattenberedare och två bufferttankar på 75 liter respektive 150 liter. Ett integrerat omblandningssystem säkerställer att pannan används endast för att täcka toppbehovet, som till exempel när det krävs en stor mängd varmt vatten omedelbart.[24]

Ett annat stort projekt är Callux som har som målsättning att installera mer än 72 000 enheter baserat på vätesystem fram till år 2020.

I Vestanskov i Danmark finns ett projekt på gång att göra byns 200 invånare till världens första vätebaserade samhälle. På ön produceras all energi med vindkraft. I dagens läge så produceras väte i en elektrolysanläggning med en del av den ca 500% överloppsenergi som vindkraftsanläggningen producerar, vetet lagras sedan i tankar. På detta sätt

producerar CHP-bränslecell systemet el och värme till fastigheterna då det inte blåser. Detta gör hushållen helt självförsörjande via förnyelsebar och CO₂-neutral ”grön” energi. [25]

Andra projekt som är i slutskedet är bland annat ett hos Ceres Power Holdings PLC som de senaste tio åren har utvecklat en SOFC gjord av stål och keramik. Det som gör denna cell speciell är att den använder Ceriumoxid (CeO₂) som anod och katod. Enligt Ceres Power Holdings PLC så kan användningen av cellen minska CO₂-utsläppen från fastigheter upp till 30 %. [26]

4.4.3. Nordamerika

Det har varit mycket lite aktivitet på den nordamerikanska marknaden gällande SOFC-CHP även om företaget Ballard som finns i Kanada är en av världens största tillverkare av bränsleceller för kommersiellt och industriellt bruk. [27]

5. Energilagring

Med den ökande trenden av förnybar energi som vindkraftverk och solpaneler ger så uppstår det ett behov av lagring av överlopps energi då utbudet av elektricitet överstiger efterfrågan. Det finns fem olika sätt att lagra energi:

Lägesenergi, som kan användas då det finns litet behov av lagring i form av en uppspänd fjäder eller i form av att pumpa upp vatten i en reservoar för att använda det senare genom att låta det rinna genom en vattenturbin.

Rörelseenergi kan man lagra i form av att ha ett tungt svänghjul som roterar med låg friktion. Detta fungerar dock bara inom en mycket begränsad tidsram.

Värmeenergi kan lagras i sjöar eller stora vattentankar. T.ex. Helsingfors Energi har lagrat fjärrkyla i en stor bassäng under Helsingfors och värme i stora värmeackumulatörer kopplade till fjärrvärmennätet.[30]

Elektrisk energi lagras i kondensatorer eller i större batterier t.ex. som i Teslas nya "Powerwall"(figur 12)[28]



Figur 12. Teslas "powerwall" i användning på en husvägg. [28]

Kemisk energilagring passar mycket väl i samband med SOFC-CHP. Systemet använder väte som bränsle och väte går att producera med överlopps energi från solkraftverk och

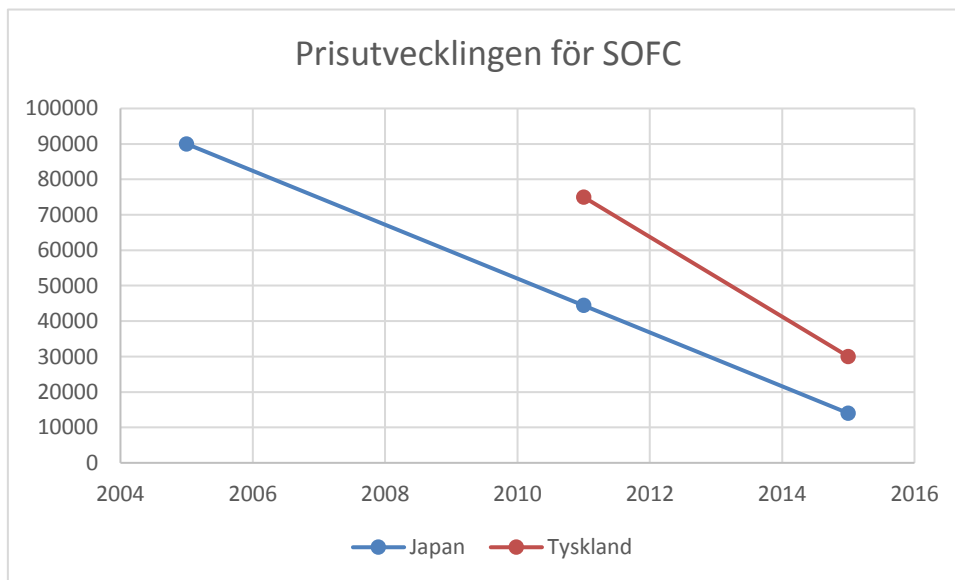
vindkraftverk genom att spjälka upp väte och syre ur vatten. På det sättet har man energitillverkning under dagen då solen lyser eller vinden blåser men då när dessa inte ger energi så kan man använda lagrat väte i stora tankar för att producera el och värme med SOFC, vilket alltså är fallet i Vestanskov i Danmark. [29]

6. Kostnader

För att uppnå konkurrenskraft så måste priset för systemet vara jämförbart med dagens kommersiellt använda uppvärmningssystem. Systemet måste ha en rimlig återbetalningstid. I nuläget även med statligt understöd i länder såsom Storbritannien och Japan så når inte återbetalningstiden ännu totalkostnaderna under beräknad drifttid.

Priset för SOFC-CHP har sjunkit med 85% i Japan de senaste 10 åren och med 60% i Tyskland de senaste 4 åren. Priset på kommersiella system år 2014 var i Japan 14.000 € - 19000€ för ett 0,7 kW system. I Australien kostade BlueGEN system på 1,5 kW 24.000 €. I Europa är priset uppskattat kring 30.000 €. Figur 13 visar trenderna, men dessa har på sistone börjat plana ut.

Sedan början av utvecklingen i Japan sjönk priset med 20% per år medan prissänkningen på sistone har avtagit. Det kan bero på en rad olika faktorer, bl.a. optimeringen av systemen har nått maximum, forskning och utveckling har inte tangerat utvecklingen av utbudet eller att själva SOFC kostanden inte sjunker mera och systemkomponenterna har redan nått sin optimala prisnivå.



Figur 13. Prisutvecklingen för SOFC i Japan och Tyskland. På y-axeln priset i euro och på x-axeln året.

Genom att följa med kostnadsutvecklingen så uppskattas priset om 4-6 år nå som lägst 5.000 € till 10.000 €. De största påverkarna av reducerad kostnad är förenkling av systemen genom optimering av komponenter som bränsleomvandlare. Ökningen energidensiteten, samarbetet mellan producenterna för att minska komponentpriserna samt ökningen av produktionsvolymen kan bidra till sänkta kostnader.

Medan produktionskostnaderna är höga så är driftskostnaderna låga. Det beror på att mindre elektricitet från elnätet behövs. System för fastigheter minskar de årliga kostnaderna för fastigheter med 400 € - 900 € per år. Besparingen beror mest på lägre elkostnader och gaspriser.

Det kommer att finnas stora regionala skillnader också i systemens kostnader. Beroende på klimatet så visar modeller att där det behövs mera energi för uppvärmningen så kommer återbetalningstiden att vara kortare. [30]

7. Sammandrag

Det är allmänt accepterat att CO₂-utsläppen måste minska. EU har energi och klimatmål för att det skall ske. I Finland så är ca. 90% av egnahemshusen utanför fjärrvärmenätet. Dessa bostäder använder uppvärmningsmetoder som genererar CO₂-utsläpp. För egnahemshusen skulle ett SOFC-CHP system vara passande. Till storleken tar det inte mycket utrymme så det är lätt att byta mot nuvarande system.

Projektet i Osaka visar att SOFC-CHP tekniken finns tillgänglig och fungerar. Hela systemet fungerade under testperioden utan problem. Detta indikerar att teknologin för vattenburet värmesystem baserat på CHP-bränslecellssystem är en nivå vilket går att använda. Bränslecellernas andel av elproduktionen var liten under sommaren. Bränslecellerna stängdes emellan av på grund av att varmvatten efterfrågan var så lite. Detta beror på att bränslecellerna måste kylas ner men varmvattnet blev uppvärmt till maximum ibland. Genom att dela varmvattnet mellan lägenheterna så minskades mängden avstängningar. Majoriteten av varmvattnet producerades av bränslecellerna förutom på vintern. Efterfrågan var då högre än vad bränslecellerna kunde tillverka men kompensades av varmvattenberedaren. Resultatet var att ett CHP-system med varmvattenberedare är lämpligt för hushåll med stora variationer i varmvattenbehovet, ty efterfrågan på vintern var 3-5 gånger större än på sommaren.

Tekniken för SOFC-CHP-system finns idag och med hänvisning till projektet som gjordes i Osaka åren 2007 -2009 samt de över tusen anläggningar i Europa. Det är inte bara ett intresse, utan stora företag håller på att utveckla idén hela tiden. Men på grund av att det i stor utsträckning är företag som utvecklar detta så finns det ringa information om ämnet allmänt tillgängligt. Detta har i stort sätt begränsat examensarbetet till den information som är publikt tillgänglig. Men en väsentlig utveckling sker hela tiden inom alla delar av konstruktionen. Speciellt utvecklingen av LO-SOFC kommer att minska tillverkningskostnaderna, vilket är en av de viktigaste faktorerna för att öka försäljningen men kommer igen att minska på effektivitet för CHP.

Ett CHP-SOFC-system fungerar som elproducent för fastigheter och ger restvärme för uppvärmningen. Det som skapar problem är vilket för bränsle som skall användas och,

ifall det är väte, hur vätgasen skall produceras. De flesta systemen som finns idag fungerar med naturgas. För det finns det redan en infrastruktur. Samma CHP-system går att använda med väte ifall det blir tillgängligt. Till dess så måste ett bränsleomvandlings system användas. Uppläggningsen av ett CHP-SOFC-system kan göras genom att ha en varmvattenberedare som reserv. För framtida forskning lönar det sig också att demonstrera möjligheten att integrera SOFC med befintlig jordvärme eller fjärrvärme i fastigheterna.

I de olika projekten har det framkommit att man kan minska CO₂ utsläppen i fastigheter med upp till 30 %. CHP-systemen kan ha en global påverkan med att minska CO₂ utsläppen ifall produktionen kommer igång enligt prognoserna. CHP system baserat på SOFC teknik är överlägsen i hänsyn till mängden växthusgaser som system utsläpper i produktion samt drift i jämförelse med dagens mest använda teknik.

I Storbritannien garanterar producenter av bränsleceller av storleken 0,7 – 1 kW en minskning på 1,3 – 1,9 t CO₂ per år i ett 4 personers egnahemshus och det större BlueGEN systemet från Australien 3 t CO₂ per år. [30]

Källor

1. Climate change: How do we know?, [www], Tillgänglig:

<http://climate.nasa.gov/evidence/>

Hämtad 15.3.2016

2. EUROPEISKA KOMMISSIONEN, MEDDELANDE FRÅN KOMMISSIONEN TILL EUROPAPARLAMENTET, RÅDET, EUROPEISKA EKONOMISKA OCH SOCIALA KOMMITTÉN OCH REGIONKOMMITTÉN, Energifärdplan för 2050, Bryssel, 15.12.2011, [www, PDF], Tillgänglig:

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0885&from=EN>

3. PX-Web Statfin, Tilastokeskus [www], Tillgänglig:

http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ymp_khki/010_khki_tau_101.px/?rxid=841d0efc-aaa0-4fc8-9e8c-97aef8926e80

Hämtad 15.3.2016

4. Energi och miljö [www], Tillgänglig:

<http://energia.fi/sv/energi-och-miljo>

Hämtad: 7.9.2016

5. Byggande [www], Tillgänglig:

<http://www.motiva.fi/sv/byggande>

Hämtad 7.9.2016

6. Harikishan R. Ellamla, Iain Staffell, Piotr Bujlo, Bruno G. Pollet, Sivakumar Pasupathi. Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector. Journal of Power Sources. Volume 293, 2015, Pages 312–328

7. Chendong Zuo, Mingfei Liu and Meilin Liu, Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies, Springer; 2012 edition, 932

8. Energy and Air Pollution 2016 - World Energy Outlook Special Report [www], Tillgänglig:

<http://www.worldenergyoutlook.org/>

Hämtad 8.8.2016

9. Barbir, F 2005, PEM Fuel Cells : Theory and Practice, Burlington, MA, USA: Academic Press, 448. Available from: ProQuest ebrary. [4 November 2015].

10. MARTIN ANDERSSON, BENGT SUNDÉN, 2015, Technology review – Solid Oxide Fuel Cell, Energiforsk AB, 24

11. Framtiden heter Toyota Mirai Allt om Toyotas nya bränslecellsbil, [www], Tillgänglig:<https://www.toyota.se/om-toyota/nyheter/2014/toyota-mirai.json>

Hämtad 21.3.2015

12. Matias Halinen, 2015, Improving the performance of solid oxide fuel cell systems, Finland, Teknologiska forskningscentralen VTT Ab, 15

13. Neelima Mahato, Amitava Banerjee, Alka Gupta, Shobit Omar, Kantesh Balani, Progress in Material Selection for Solid Oxide Fuel Cell Technology: A Review, Volume 72, July 2015, P 141–337, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.001>

14. Chendong Zuo, Mingfei Liu and Meilin Liu, Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies, Springer; 2012 edition, 932

15. Kevin Kendall, Nguyen Q. Minh, Subhash C. Singhal. High Temperature and Solid Oxide Fuel Cells, Chapter 8 - Cell and Stack Designs, 2013. Pages 197-228.

16. C.Wincewicz K, Cooper JS. Taxonomies of SOFC material and manufacturing alternatives. Journal of Power Source. 2005;140:280-96.

17. Zhu B. Solid oxide fuel cell (SOFC) technical challenges and solutions from nano-aspects. International Journal of Energy Research. 2009;33:1126-37.

18. Paul E. Dodds, Iain Staffell, Adam D. Hawkes, Francis Li, Philipp Grunewald, Will McDowall, Paul Ekins. Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 40, 2015, pages 2065-2083
19. Giulio Vialetto, Masoud Rokni. 2015. Innovative household systems based on solid oxide fuel cells for a northern European climate. *Renewable Energy* 78. pages 146-156
20. Julia Meng Pei Chen, Meng Ni. Economic analysis of a solid oxide fuel cell cogeneration/trigeneration system for hotels in Hong Kong. *Energy and Buildings* 75. 2014. pages 160–169
21. Harikishan R. Ellamla, Iain Staffell, Piotr Bujlo, Bruno G. Pollet, Sivakumar Pasupathi. Current status of fuel cell based combined heat and power systems for residential sector. *Journal of Power Sources*. Volume 293, 2015, Pages 312–328
22. Hirohisa Aki, Yukinobu Taniguchi, Itaru Tamura, Akeshi Kegasa, Hideki Hayakawa, Yoshiro Ishikawa, Shigeo Yamamoto, Ichiro Sugimoto. Fuel cells and energy networks of electricity, heat, and hydrogen: A demonstration in hydrogen-fueled apartments. *internationaljournal of hydrogenenergy* 37, 2012, Pages 1204 - 1213
23. ene.field, [www], Tillgänglig: <http://enefield.eu/category/about/>
Hämtad 1.8.2016
24. First Buderus ene.field fuel cell system successfully tested in single-family home. [www] Tillgänglig: http://enefield.eu/wp-content/uploads/2014/10/Buderus_065-14_FP_Brennstoffzelle_Endersbach_e.pdf
Hämtad: 3.8.2016

25. The Petersens Claimed Independence from fossil fuels. [www]. Tillgänglig: <http://www.ird.dk/technology/cases/powering-the-worlds-first-hydrogen-village/>

Hämtad 8.8.2016

26. Why the Steel Cell is Unique. [www] Tillgänglig: <http://www.cerespower.com/technology/why-the-steel-cell-is-unique>

Hämtad 16.5.2016

27. Paul E. Dodds, Iain Staffell, Adam D. Hawkes, Francis Li, Philipp Grunewald, Will McDowall, Paul Ekins. Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. International Journal of Hydrogen Energy. Volume 40, 2015, pages 2065-2083

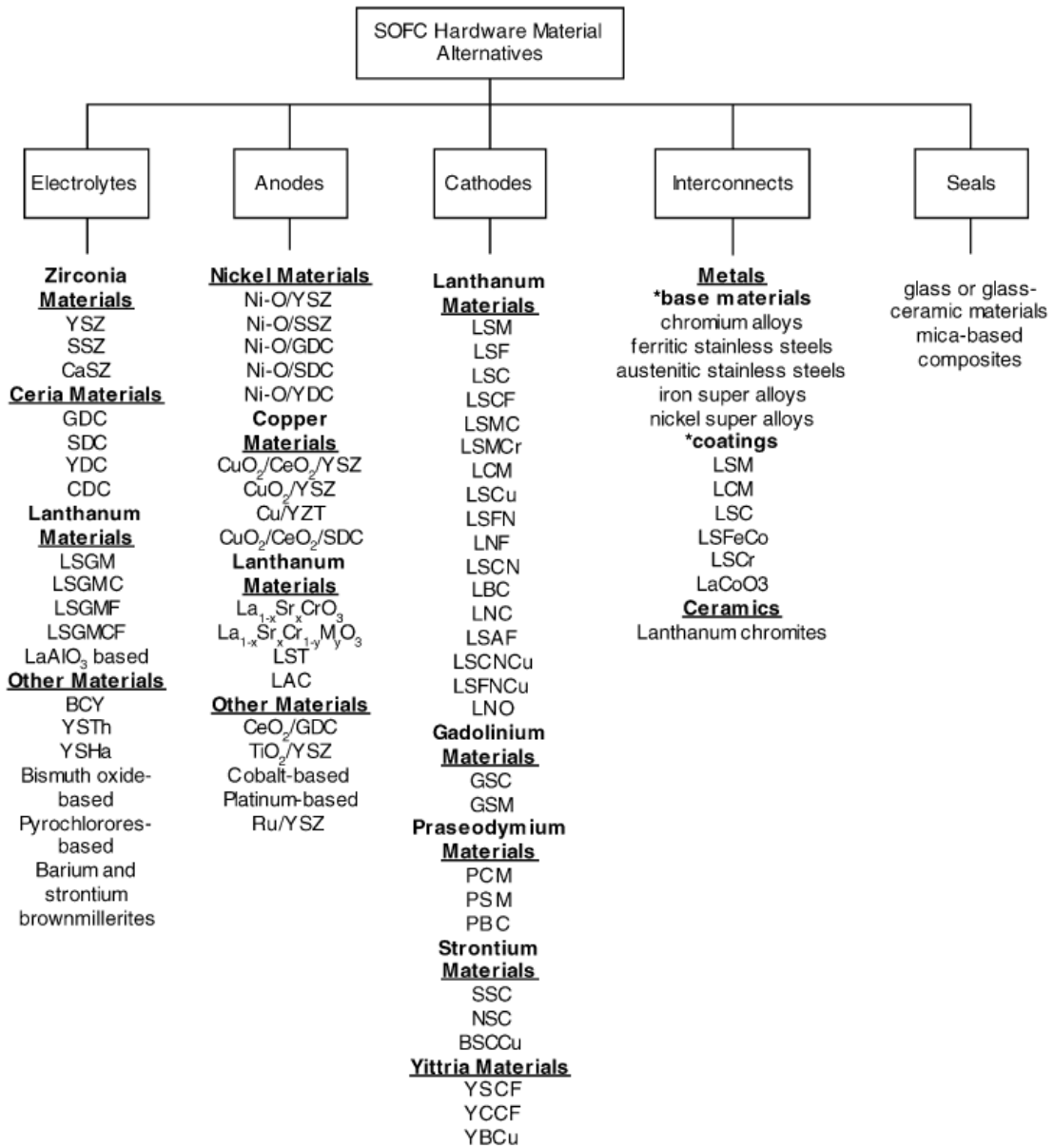
28. Powerwall. [www]. Tillgänglig: <https://www.tesla.com/powerwall>

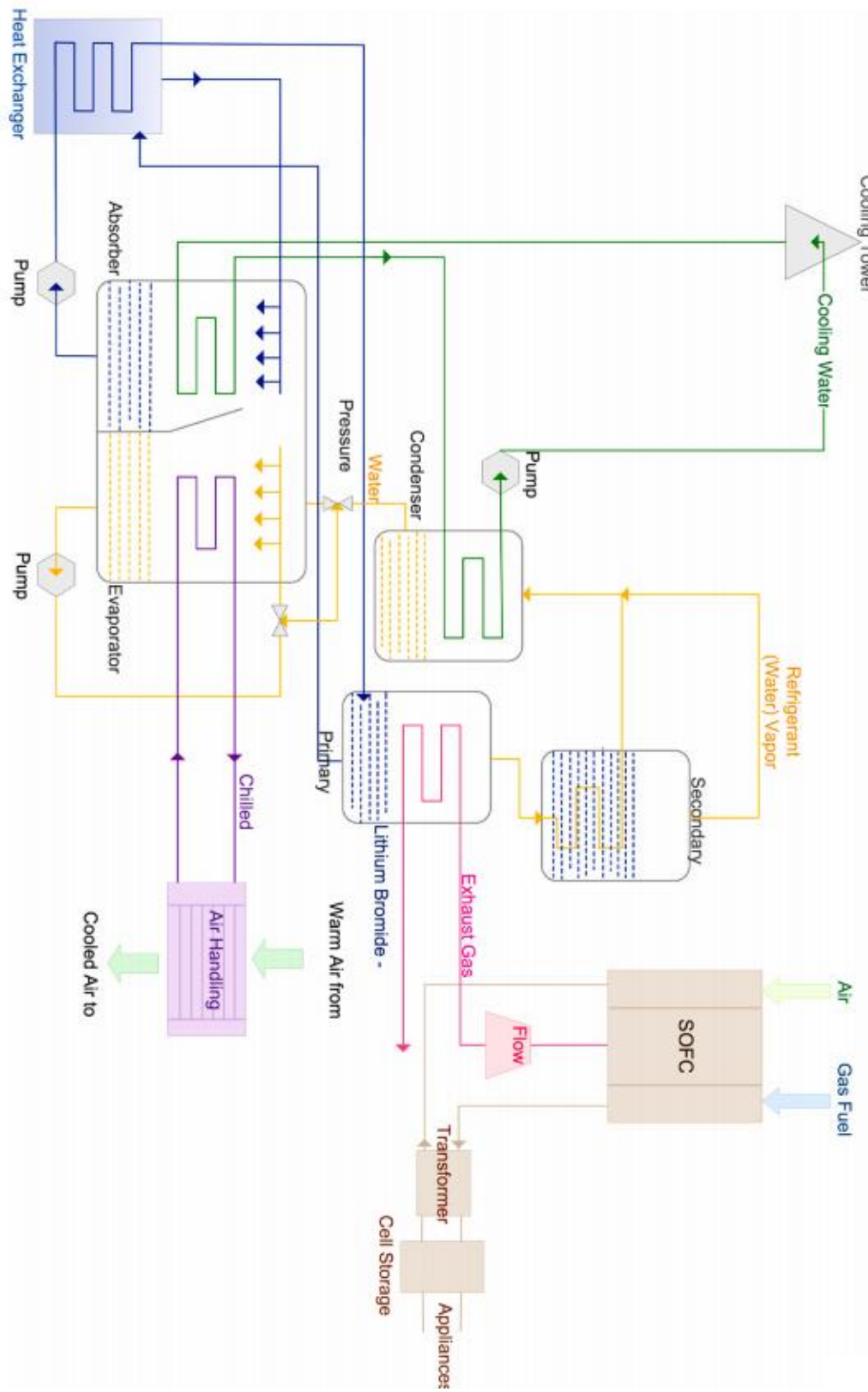
Hämtad 21.9.2016

29. Energy storage. [www] Tillgänglig: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_storage

Hämtad: 21.9.2016

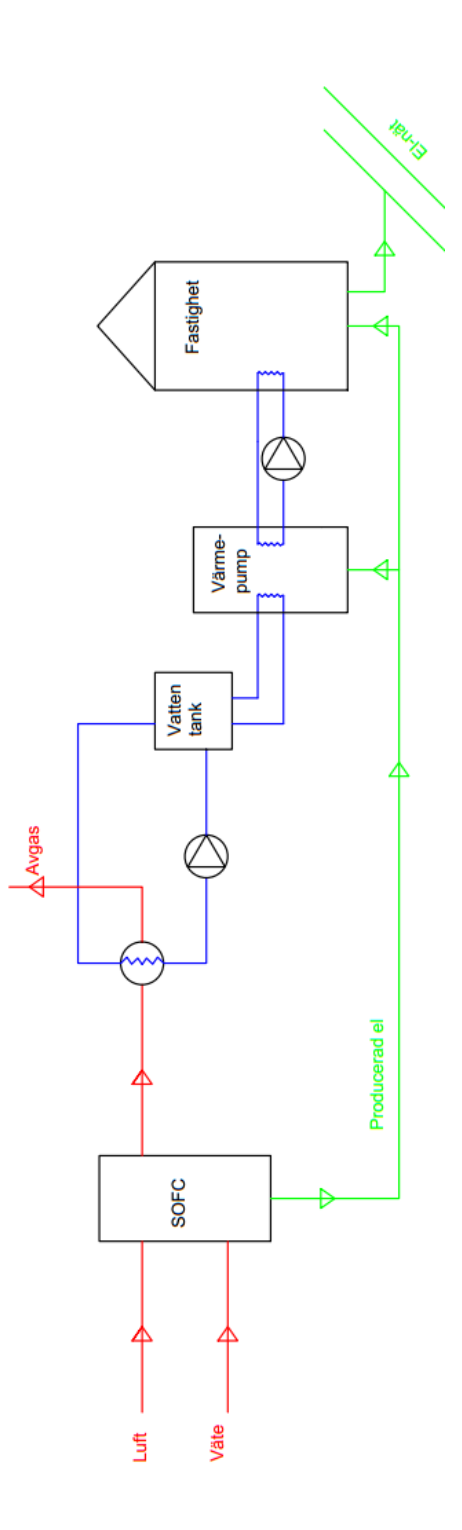
30. Paul E. Dodds, Iain Staffell, Adam D. Hawkes, Francis Li, Philipp Grunewald, Will McDowall, Paul Ekins. Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. International Journal of Hydrogen Energy. Volume 40, 2015, pages 2065-2083





Två olika simplifierade planer för uppläggning av SOFC-CHP-system. I a) modellen använder värmepumpen det varma vattnet från vattentanken för att värma upp fastighetens varmvatten. I b) modellen värmer värmepumpen upp varmvattnet för fastigheten vid behov.

a)



b)

