

Systemperspektiv för effektiv produktion och användning av vätgas via koppling till fjärrvärme
AP5

Utvärdering av Bränslecells-teknologier för sektorkoppling till fjärrvärme

Sammanfattning

Fyra olika kommersiella bränslecells-teknologier, som finns tillgängliga idag, jämförs:

1. Protonledandemembranbränsleceller (PEMFC)
2. Fosforsyrabränsleceller (PAFC)
3. Fastoxidbränsleceller (SOFC)
4. Smältkarbonatbränsleceller (MCFC)

Detta är en kvalitativ jämförelse över de fyra teknologierna med avseende på kritiska material (sällsynta råvaror), arbetstemperaturer, elektrisk effektivitet, existerande applikationer samt fördelar och nackdelar när det handlar om sektorkoppling mot fjärrvärmeproduktion. Bränslecellsanläggningar kan också användas för elnätstjänster och eventuellt som reservkraft i nödsituationer.

PEMFC är den mest kostnadseffektiva tekniken trots behovet av ädelmetaller. Den har högst effektdensitet men spillvärmens i form av kylvätska förväntas vara under 80 °C. PEMFC är den dominerande tekniken för vätgasfordon. Ännu finns inga MW-anläggningar utan bara mindre enheter, men större installationer är planerade inför de närmaste åren.

PAFC är en gammal etablerad teknik med spillvärmeström kring 120 °C. Tekniken har liknande kemiska reaktioner och dyra katalysatorer som PEMFC. Ändå är effektdensiteten betydligt lägre. Dessutom verkar PAFC, trots att ha funnits länge, inte vara speciellt populär och idag finns endast två företag som aktivt jobbar med PAFC, enligt författarnas undersökningar.

SOFC är etablerat för mindre installationer på ett par hundra kW, men de senaste åren har det även byggts några större anläggningar i 20-30 MW-klassen. Tekniken kan vara intressant då den går att kombinera med gasturbin för förhöjd effektivitet. SOFC-tekniken är idag känd som integrerad (där bland annat in-luft värms av utgående luft) och trots sin höga drifttempertur är tillgång och temperatur på spillvärme osäker.

MCFC är intressant då den kan användas även för koldioxidavskiljning och väntas ha hög temperatur på spillvärmens, men idag finns endast ett företag som jobbar med tekniken aktivt, enligt undersökningarna. MCFC har också sämst reglerbarhet och effektdensitet av de studerade teknikerna.

Om det blir aktuellt att i Sverige bygga en pilot- och demo med integrerade bränsleceller i energisystemet kan PEMFC ligga nära till hands. Investeringskostnaden är lägre och den

RISE Research Institutes of Sweden AB

Postadress
Box 857
501 15 BORÅS

Besöksadress
Sommargatan 101A
626 37 Karlstad

Tfn / Fax / E-post
010-516 50 00
033-13 55 02
info@ri.se

Detta dokument får endast återges i sin helhet, om inte RISE Research Institutes of Sweden AB i förväg skriftligen godkänt annat.

kräver betydligt mindre yta än övriga tekniker. Det är värt att notera att det även finns en svensk leverantör av PEMFC-tekniken, Powercell.

Innehåll

Sammanfattning	1
Innehåll.....	2
Bakgrund.....	2
Kommersiella Bränslecells-teknologier tillgängliga idag	3
Protonledande membranbränsleceller (PEMFC).....	5
Fosforsyrabränsleceller (PAFC).....	7
Fastoxidbränsleceller (SOFC).....	9
Smältkarbonatbränsleceller (MCFC)	11
Teknisk analys av utvalda bränslecellsystem från 4 leverantörer	14
Kostnad och ekonomisk framtidsprognos för de olika teknikerna	15
Referenser.....	16

Bakgrund

Sveriges fjärrvärmeproducenter har ypperliga möjligheter att bidra i omställningsarbetet mot ett förnybart samhälle genom att tillverka grön vätgas under perioder med god tillgång till förnybar energi, framförallt vindkraft men också solkraft. Tack vare redan existerande infrastruktur (nätanslutning, processanläggningar, personal etc) samt möjligheterna att nyttiggöra både den förlustvärme och den syrgas som genereras vid grön vätgasframställning finns bästa möjliga förutsättningar för lönsamhet, energieffektivitet och resiliens i det svenska energisystemet. Vätgasen kan lagra energi, i en allt mer väderberoende elproduktion, för att vid ett senare tillfälle tillföra el till systemet, när efterfrågan på el är hög.

Det finns två olika tekniker för att göra el av vätgas:

1. genom elektrokemiska reaktioner i någon form av bränslecell
2. genom förbränning i en gasturbin

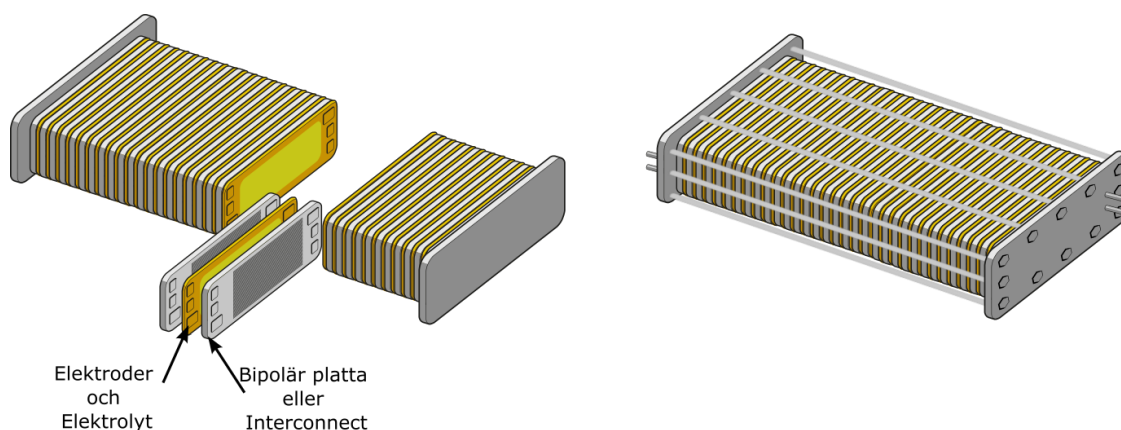
Denna rapport behandlar den första av dessa två tekniker. Rapporten beskriver olika typer av bränslecells-teknologier som finns tillgängliga idag inklusive tekniska analyser av utvalda bränslecellsystem. Dessutom finns en uppskattning över kostnader och ekonomiska framtidsprognoser för bränsleceller.

HyCoGen är ett projekt som beaktar dessa aspekter utifrån ett systemperspektiv. Projektet medfinansieras av Energimyndigheten och Göteborg Energis Stiftelse för Forskning och Utveckling. Ett av arbetspaketerna arbetar med omvärldsanalys för att leverera indata och underlag till övriga arbetspaket. Denna rapport är resultatet av arbetet i detta arbetspaket och handlar om olika bränslecells-teknologier som finns idag eller är under utveckling.

Kommersiella Bränslecells-teknologier tillgängliga idag

Bränsleceller är ett samlingsbegrepp för ett flertal tekniker som kan producera el från ett bränsle och luft genom elektrokemiska reaktioner. I det här projektet ligger fokus på de tekniker som använder vätgas som bränsle och kan bidra med tillräckligt mycket spillvärme med tillräckligt hög temperatur för att kunna kopplas till fjärrvärme nätet i Sverige. Bränslecellerna i detta projekt är tänkta att kopplas ihop med ett system bestående av vätgaslager och elektrolys för vätgasproduktion..

Gemensamt för alla bränsleceller är att de kräver ett större kringssystem för bränsletillförsel, luftkompression, temperaturreglering, mm. Själva bränslecellen som producerar el utgörs av en eller flera stackar (staplar). De flesta stackar består sedan av många celler ihopklämda mellan två ändplattor. En schematisk bild av en individuell cell och en stack finns i Figur 1. För att få upp en högre elproduktion i en anläggning används flera bränslecellsstackar. Beroende på teknik kopplas stackarna till varandra i moduler med individuella stackar eller med flera stackar per modul. Med modul menas i detta perspektiv bränslecellsstack/ar med kringssystem. Modul aspekten hos bränslecellsanläggningar gör att kombinerade värme- och kraftbehov kan skalas väldigt fritt. Hur stora effektstegen blir beror på både bränslecellsteknik och leverantör. Men en fördubbling av antalet moduler resulterar alltid i en fördubbling av effekten. En viktig aspekt är dock att en ökning av effekt ofta också innebär en storleks ökning av det dimensionerade kringssystemet då detta ingår i en modul. [1]



Figur 1 – En generaliserad bild av hur en bränslecellsstack är uppbyggd. Beroende på leverantör och teknik finns det variationer av hur stackarna byggs med avseende på cellstorlek, utformning, förselningsteknik och antal celler per stack.

De fyra kommersiella tekniker som projektet fokuserar på är Protonledandemembranbränsleceller (PEMFC) Fosforsyrabränsleceller (PAFC), Fastoxidbränsleceller (SOFC) och Smältkarbonatbränsleceller (MCFC). En övergripande jämförelse mellan dessa tekniker visas i Tabell 1. Det finns tre kritiska materialkomponenter som har samma funktion i alla dessa bränsleceller:

- Anod: Porös elektrod med katalysator för vätgasreaktion.
- Elektrolyt: Fast material eller vätska som transporterar joner, men hindrar elektronöverföring.
- Katod: Porös elektrod med katalysator för syrgasreaktion.

Sedan finns det ytterligare tre viktiga materialkomponenter som beror på typ av teknik:

- Gasdiffusionsskikt: i PAFC och PEMFC mellan elektroder och bipolär platta, för gasdistribution, vattenhantering och elektronledning.
- Bipolär platta: Sitter mellan celler i en PAFC, PEMFC eller MCFC stack för att möjliggöra elektrisk ledning, gasdistribution och vattenhantering mellan celler.

- Interconnect: Sitter mellan celler i en SOFC stack för att möjliggöra elektrisk ledning och gasdistribution.

Dessa komponenter och deras materialkrav är nära kopplade till aspekter som prestanda, kostnad, flexibilitet och livslängd. Gemensamt för alla typer av bränsleceller är att värmeproduktion, effektivitet och mängd vätgas som förbrukas beror på hur mycket last som dras från anläggningen, dvs hur mycket el som produceras. Hur nämnda parametrar påverkas för olika tekniker och vilka andra fördelar/begränsningar som finns beskrivs kort per bränslecellstyp i Tabell 1.

Tabell 1 - En kvalitativ jämförelse mellan de olika bränslecellsteknikerna som utvärderas inom projektet, för källhänvisning se under tabellen.

Teknik	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Sällsynta eller dyra råmaterial	Platina ^{b)}	Platina ^{b)}	Litium ^{c)}	Små mängder sällsynta jordartsmetaller ^{d)}
Temperatur a)	<120 °C	150-200 °C	600-700 °C	500-1000 °C
Elektrisk effektivitet a)	60%	40%	50%	60%
Existerande applikationer a)	<ul style="list-style-type: none"> • Reservkraft • Transport • Portabel kraftkälla • Specialfordon 	<ul style="list-style-type: none"> • Decentraliserad elkraft 	<ul style="list-style-type: none"> • Decentraliserad elkraft • Elproduktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Decentraliserad elkraft • Elproduktion
Fördelar a)	<ul style="list-style-type: none"> • Fast elektrolyt = mindre korrosion och vätskehantering • Låg temperatur möjlig • Snabb att starta och reglera 	<ul style="list-style-type: none"> • Bra för kombinerad kraft- och värmeproduktion • Högre tålighet mot bränsle föroreningar 	<ul style="list-style-type: none"> • Bra för kombinerad kraft- och värmeproduktion • Hög effektivitet • Bränsleflexibel • Kan kombineras med gasturbin 	<ul style="list-style-type: none"> • Bra för kombinerad kraft- och värmeproduktion • Hög effektivitet • Fast elektrolyt • Bränsleflexibel • Kan kombineras med gasturbin
Utmaningar a)	<ul style="list-style-type: none"> • Dyra katalysatorer • Känslig för bränsleföroreningar 	<ul style="list-style-type: none"> • Dyra katalysatorer • Lång uppstartstid • Känslig för svavel 	<ul style="list-style-type: none"> • Hög-temperaturskorrosion och degradering av delar • Lång uppstartstid • Låg effekt-densitet • Begränsat antal uppstart-/stopp-cykler 	<ul style="list-style-type: none"> • Hög-temperaturskorrosion och degradering av delar • Lång uppstartstid • Begränsat antal uppstart-/stopp-cykler
<p>a) Större delen av tabellen är från referens [2] och har sammanfattats av US Department of Energy. b) [3] c) [4] d) [4]</p>				

Protonledande membranbränsleceller (PEMFC)

Historik

Protonledande membranbränsleceller utvecklades i början av 60-talet och är nu en av de mest diskuterade teknikerna. Denna teknik började få genomslag efter ett antal demoprojekt i fordon under 90-talet och ett större testprojekt i Japan med kombinerade värme och el applikationer för bostäder från 2005. Dock var det först efter 2014 som tekniken tog fart på riktigt och nu finns den i en större mängd applikationer, både stationära och transportrelaterade [5].

Beskrivning av tekniken

PEMFC är om än väletablerad teknik hyfsat ny i större applikationer. Denna typ av bränslecell har den högsta volymmetriska effektdensiteten på systemnivå, dvs låg yt-area eller volym per effekt, ner till 3,15 m²/MW eller 6,3 m³/MW [6], eller möjligen ännu lägre. Därför har mycket av utvecklingen fokuserat på transportsektorn och andra applikationer där storlek och vikt har stor betydelse. De flesta system körs idag med några bars övertryck för bättre prestanda och det sker ständiga förbättringar sedan första lanseringen av kommersiella fordon år 2014 påbörjades. Då systemet kräver väldigt ren vätgas och att det är svårt att använda dem i kombination med naturgas var det först med ökande antal tankstationer som intresset har ökat. Därför har tillgången på ren vätgas varit ett problem för tekniken [1]. En av de större nackdelarna med tekniken idag är kostnaden [2]. En av de större hindren för kostnadsreduktionen är att produktionen av systemet är svår att automatisera [7]. Med avseende på detta projekt är det en nackdel att tekniken fortfarande inte är beprövad i mång-megawattsanläggningar.

Kort om PEMFC	
Hur de fungerar	PEMFC matas med mycket ren vätgas på anodsidan för reaktionen och bildar där protoner och elektroner. Elektronerna går i den yttre kretsen och protonerna transporteras genom membranelektrolyten till katoden. På katoden reagerar de med syrgasen i den komprimerade luften och bildar vatten. Tekniken körs ofta kring 80 °C och använder vattenkylning. Illustration av tekniken finns i Figur 2.
Begränsningar som påverkar prestanda/livslängd/pris	<p>Förklaring och möjliga förbättringar</p> <p>På grund av membranelektrolytens stabilitet och funktionalitet fungerar dessa celler bäst upp till 80 °C, men nya material eller konstruktioner studeras för högre drifttemperatur.</p> <p>Idag är den höga prestandan beroende av platina och rutenium, något som mycket forskning jobbar med att byta ut mot andra billigare katalysatormaterial.</p> <p>Maximala cellarean är begränsad på grund av transportfenomen, vilket också resulterar i att maxeffekten per stack är begränsad. Teknikutvecklingen jobbar aktivt för att lösa detta och man har kommit långt på vägen.</p>
Begränsad mot högre temperaturer	
Ädelmetallkatalysatorer	
Låg effekt per enhet	
Kritiska material	Platina Ruthenium Fluoropolymer-membran
Några leverantörer	<ul style="list-style-type: none"> Powercell Ballard Power Systems Plug Power Hydrogenics Nuvera Fuel Cells, LLC Horizon Fuel Cell Technologies Nedstack Fuel Cell Technology AVL Intelligent Energy Pragma Industries Shanghai Shenli Technology Co., Ltd. Johnson Matthey Toyota
	<p>The diagram shows a cross-section of a PEMFC. On the left is the Anode, where H₂ enters and splits into H⁺ and e⁻. The H⁺ ions move through the Electrolyte to the right. On the right is the Cathode, where O₂ from the air enters and reacts with H⁺ and e⁻ to form H₂O. An external circuit connects the anode and cathode, showing electron flow (e⁻) from the anode to the cathode through a load. Labels include: Bränsle in, Luft in, Rest bränsle, Rest luft, vatten och värme, Anod, Elektrolyt, Katod, and Elektrisk ström.</p>

Figur 2 - Schematisk illustration av PEMFC.

Reglerbarhet

Reglerbarheten för PEMFC är mycket god i jämförelse med andra bränslecellstekniker. Uppstartstiden är väldigt kort, dock kan det ta ett par minuter innan den är uppe på en stabil nivå. Redan 2015, uppnåddes 50% av effekten på under en minut för systemstart vid minusgrader [8]. I applikationer där det tillåts lite långsammare reglering kan detta förlänga livslängden för systemet, dvs om man kan reglera på minuter istället för sekunder. När cellen ska gå upp i effekt brukar man prata om hastigheter på ca 50 mA/(cm² s). Vilket motsvarar kanske 15-30 A/s (eller 15-30 W/s) för en stack beroende på storlek. Då en anläggning som vi

pratar om i detta fall består av flera stackar, bör denna effektökning multipliceras med antalet stackar. Detta är en mycket snabbreglerad teknik och det är en av anledningarna att den används i fordon, där det är viktigt med snabb uppstart.

Existerande anläggningar

Det har precis börjat byggas ett antal anläggningar installerade på fraktskepp eller färjor och de är i skalan 1-25 MW. Dessa kommer då att tas i bruk närmaste åren. Några exempel på de som ska installeras på båtar är:

23 MW passagerarfärja: [DFDS press release](#)

3.2 MW färja i Norge med bränsleceller från Powercell, [Article link](#).

Hyship 20 MW: [FuelCellsWorks article](#)

Tyvärr finns det idag inga anläggningar i MW-klassen som är baserade på PEMFC, men flera stora anläggningar väntas byggas under de närmaste åren.

Fosforsyrabränsleceller (PAFC)

Historik

De första bränslecellerna som byggdes var alla baserade på en vätskeformig elektrolyt och den allra första byggde på svavelsyra och gick under namnet ”gasbatteri” på mitten av 1800-talet. Fosforsyra som är en dålig ledare vid låga temperaturer och blev dock inte ett alternativ för bränsleceller förrän efter 1960. Mycket på grund av att den amerikanska militären intresserade sig för tekniken blev detta en av de första kommersiella alternativen. Redan runt 90-talet fanns det PAFCs kommersiellt installerade som reservkraft och kombinerade applikationer för kraft- och värmeproduktion [9].

Beskrivning av tekniken

PAFC har länge använts för kombinerade kraft- och värmeanläggningar. Tekniken använder en flytande elektrolyt bestående av 100% fosforsyra i en matrix av porös kiselkarbid. Cellerna körs vid låga tryck och kan använda olika typer av kylmedia, beroende på vad som är av värde. Vätskekyllning har visat sig vara effektivast vad det gäller återanvändning av värmen [4]. En av de största fördelarna med den här tekniken är att den har varit kommersiell relativt länge och att det finns många anläggningar att dra lärdom av [10]. En av de större nackdelarna är att anläggningarna blir stora pga hög volym/yt-area per effekt, runt 47 m²/MW eller 140 m³/MW [11, 12]. En annan nackdel är att det idag inte finns lika många leverantörer som tidigare [13], då intresset för tekniken verkar ha minskat senaste åren.

Kort om PAFC	
Hur de fungerar	PAFC matas med vätgas på anodsidan för reaktion som bildar protoner och elektroner. Elektronerna går i den yttre kretsen och protonerna transporteras genom fosforsyraelektrolyten i kiselkarbid till katoden. På katoden reagerar de med syrgasen i den komprimerade luften och bildar vatten. Arbetstemperaturen är runt 180/200 °C och använder olika typer av kylning beroende på hur värmen utnyttjas. Illustration av tekniken finns i Figur 3
Begränsningar som påverkar prestanda/livslängd/pris	<p>Förklaring och möjliga förbättringar</p> <p>Låg prestanda Den låga prestandan är ett resultat av interna begränsningar, försök med ännu högre temperatur görs, men försvåras av den aggressiva elektrolyten.</p> <p>Ädelmetallkatalysatorer Idag används platina som katalysator och även om alternativ studeras kompliceras förbättringarna av den aggressiva miljön.</p> <p>Anläggningsstorlek Systemstorleken är främst ett resultat av den låga prestandan och kan komma att förbättras delvis genom bättre elektrod-design i framtiden, men vissa begränsningar är pga vätskeelektrolyt som inte kan frångås.</p> <p>Högkorrosiv elektrolyt De aggressiva förhållandena påverkar livslängden för systemen som ändå är väldigt bra, men kan bli ännu bättre om man kan hitta material som håller bättre eller förbättringar som gör att elektrolyten kan göras mindre aggressiv.</p>
Kritiska material	Platina
Några leverantörer	Doosan Fuel Cell America, Inc. Fuji Electric Co., LTD
<p>Figur 3 - Schematisk illustration av PAFC.</p>	

Reglerbarhet

PAFC-tekniken är relativt lättreglerad när systemet är igång och det går att justera effekten upp och ner relativt fort, inom ett par minuter. Från kallstart tar det dock lite längre tid då systemet måste komma upp i temperatur. [14]

Existerande anläggningar

PAFC har som redan nämnts använts länge, 2010 fanns över 260 anläggningar runt om i världen även om de flesta inte var i MW-skala [15]. Idag finns det en riktigt stor anläggning på skalan 50 MW i Sydkorea, där de utnyttjar restströmmar med vätgas från en annan industriproduktion till att producera el och värme. Bränslecellsleverantören i detta fall är Doosan och företaget som tog initiativet är Hanwha Energy [16].

Fastoxidbränsleceller (SOFC)

Historik

Den här tekniken uppfanns på 1930-talet och erhöll ett stort forskningsintresse runt slutet av 50-talet. Detta innebär att den är en av de tekniker som har varit studerad längst tid. Dock tappade SOFC tillfälligt stöd framåt 60-talet på grund av att MCFC, se sid 11, ansågs mer gynnsam. En av orsakerna var relaterat till problem med livslängd och material [9]. På 80- och 90-talet tilltog aktiviteter i Asien kring tekniken [17] och nu pågår mycket forskning igen.

Beskrivning av tekniken

SOFC är en av de tekniker som man har jobbat med att utveckla under längst tid, trots att den inte alltid får så mycket uppmärksamhet. Det är också en intressant teknik då den inte alltid följer det standardiserade stacksystemet, då cellerna som är keramiska även kan formas som tuber. En av de stora fördelarna systemmässigt är keramerna som är ett billigt material. Systemet behöver inte hantera något ämne i vätskefas, som kan läcka ut eller skapa liknande problem [4]. Dessutom har SOFC, som högtemperaturteknik, en av de högsta verkningsgraderna och är väldigt okänslig för föroreningar i bränslet [2]. Den kan också användas i kombination med gasturbiner för att ytterligare förbättra verkningsgraden [18, 19]. En nackdel är att SOFC ofta har dålig effektdensitet och att anläggningarna därför blir stora. De har en yt-area eller volym per effekt på runt 100 m²/MW eller 215 m³/MW [20, 21, 19]. På senaste tid har det börjat komma leverantörer med kompaktare system på 48 m²/MW eller 99 m³/MW [22].

Kort om SOFC	
Hur de fungerar	SOFC matas med vätgas på anodsidan för reaktion med oxidjoner till vatten och elektroner. Elektronerna går i den yttre kretsen till katoden. På katoden reagerar de med syrgasen i den komprimerade luften och bildar oxidjoner som i sin tur transporteras genom den keramiska elektrolyten till anoden. De körs vid 600-1000 °C och använder idag inget internt kylsystem i stacken, utan kyls med inkommande luft och bränslegaser. Illustration av tekniken finns i Figur 4.
Begränsningar som påverkar prestanda/livslängd/pris	Förklaring och möjliga förbättringar
Begränsat antal uppstart/nedstängningscykler	De sköra keramiska materialen och hur de sitter ihop tål inte så många temperaturcykler. En lösning som många leverantörer erbjuder är att alltid hålla stackarna varma, även när de inte används. Temperaturförändringar begränsar också cellstorleken pga att det kan bli förstora materialexpansioner.
Kort livslängd	De höga temperaturerna och materialändringarna orsakar ofta snabbare degradering. Det jobbas med två lösningar, bättre material och att försöka gå mot något lägre temperatur utan att tappa prestanda.
Anläggningsstorlek	Systemen blir stora mest på grund av kringssystemet inte på grund av låg effektivitet. Förhoppningen är att det minskar med vidareutveckling.
Värmeutnyttjande	Höga temperaturer används i cellerna och för att bli så energieffektiv som möjligt återanvänds nästan all värme i stacken. Idag arbetas det mot ett mer integrerat system vilket leder till mindre spillvärme.
Lång starttid från kall	För att cellerna ska fungera bra måste de upp i temperatur och det tar tid. En lösning som några leverantörer använder nu är att de aldrig kyler ned systemet även om bränslecellen inte körs.
Kritiska material	Sällsynta jordartsmetaller
Några leverantörer	
AVL SOLIDpower Group Bloom Energy Nexceris, LLC Mitsubishi Hitachi Power Systems Ceres Power Bosch Suzhou Huatsing Jingkun New Energy Technology Co., Ltd. AISIN SEIKI Convion Elcogen OxEon	<p>Elektrisk ström</p> <p>Bränsle in</p> <p>Luft in</p> <p>Rest bränsle och vatten</p> <p>Oanvänd gas</p> <p>Anod</p> <p>Elektrolyt</p> <p>Katod</p>
	Figur 4 - Schematisk illustration av SOFC.

Reglerbarhet

Denna teknik är känd för att vara känslig för många start/stopp om det innebär temperaturcykling (uppvärmning och nedkylning). Ett av de ledande företagen på marknaden har löst det genom att aldrig kyla ner sina bränsleceller. Detta innebär att de undviker problemen med kallstart och rapporterar en reglertid på 6-10 min vilket är väldigt snabbt för att vara SOFC [22].

Existerande anläggningar

Det finns ett flertal anläggningar i 15-30 MW klassen då främst med Bloom Energy Saver som bränslecellsleverantör. Två ligger i Sydkorea och sedan ett antal i USA [23]. Det verkar som att de har haft en del problem med att behövt byta flera av sina celler på grund av degradering nu på slutet och det finns osäkerheter kring hur stabila anläggningarna är [24].

Smältkarbonatbränsleceller (MCFC)

Historik

MCFC växte fram i början av 50-talet som en variant av den tidigare studerade högttemperaturtekniken SOFC. Forskningen fick på 60-talet stöd av amerikanska militären i sin utveckling, speciellt då denna bränslecell var mer accepterande mot blandade bränslen och tolerant för reformerad bensin [9]. Utredningar om MCFC som kraftverk har gjorts sedan 1979 i USA [25] och tekniken har fortsatt att utvecklas.

Beskrivning av tekniken

För många av de MCFC applikationer som finns idag används naturgas som bränsle istället för ren vätgas. Att använda naturgas är inget krav för tekniken utan då sitter en reformer innan stacken som sönderdelar naturgas till väte och koldioxid. Dock måste koldioxid finnas tillgängligt vid processen, i applikationer med ren vätgas cirkuleras koldioxiden för att undvika utsläpp, se Figur 5. Intressant är också att tekniken kan utnyttjas till koldioxidavskiljning och förvaring om den appliceras efter en industri där avgaserna/rökgasen innehåller både syre och koldioxid, detta då koldioxiden i gasen koncentreras och sedan kan lagras [10].

MCFC är den teknik som byggs med störst effekt per modul, där en modul kan ge över 1 MW uteffekt [26]. Denna högttemperaturteknik kan också användas i kombination med gasturbiner för att ytterligare förbättra verkningsgraden [18]. De största nackdelarna med tekniken är att anläggningarna blir stora pga hög yt-area eller volym per effekt, runt 140 m²/MW eller 720 m³/MW [26]. Då dessa idag innehåller en reformeringsanläggning kan de bli något mindre om ren vätgas används. Tyvärr finns det idag inte lika många leverantörer som tidigare [27], då intresset för tekniken verkar ha minskat senaste åren.

Kort om MCFC	
Hur de fungerar	MCFC matas med vätgas på anodsidan och en blandning av luft och koldioxid på katoden. På anoden reagerar vätgasen med karbonatjoner till vatten, koldioxid och elektroner. Elektronerna går i den yttre kretsen till katoden. På katoden driver de reaktionen mellan syrgas och koldioxid så att karbonatjoner produceras för att i sin tur transporteras till anoden genom den porösa keramiska matrisen fylld med elektrolyten av ett flytande karbonatsalt (i princip bikarbonat). Då koldioxid reagerar på katoden och sedan återbildas på anoden brukar den recirkuleras för att minska utsläpp. Tekniken arbetar runt 600-700 °C och använder idag inget internt kylsystem i stacken, utan kyls med inkommande luft och bränslegaser. Illustration av tekniken finns i Figur 5.
Begränsningar som påverkar prestanda/livslängd/pris	Förklaring och möjliga förbättringar
Anläggningsstorlek	På grund av både hög temperatur och behovet av recirkulering av koldioxid blir anläggningarna stora. Det är svårt att hitta data utan naturgasreforming så möjligen kan de bli något mindre i framtiden.
Använder koldioxid	Detta kan medföra ett mindre utsläpp även om mycket återanvänds, men det kan också möjliggöra CO2 separation för tex CCS eller annan kemikaliesyntes.
Högkorrosiv och rörlig elektrolyt	Den aggressiva miljön ställer höga krav på materialen i de ingående komponenterna. Det pågår ständigt materialutveckling för att öka livslängden.
Låg prestanda	Detta är relaterat till bland annat resistanser, dels pga vätskeelektrolyten begränsar transport i cellen, men också mellan material. Materialutveckling pågår.
Klarar inte start/stop	De anläggningar som finns idag klarar nästa inga upp och nedstängningar. De flesta anläggningar som körs idag stängs nästan aldrig ner.
Kort livslängd	Väldigt nära relaterat till aggressiv elektrolyt och bör kunna förbättras med bättre material.
Kritiska material	Litium
Några leverantörer	Fuel Cell Energy (USA)
Figur 5 – Schematisk illustration av MCFC.	

Reglerbarhet

Effekten kan ändras ca 10% per timme enligt en rapport från NREL i USA [14]. Detta innebär att tekniken är väldigt långsam att reglera. Som en konsekvens blir uppstartstiden förmodligen över 10 timmar för att nå maxeffekt, då 10% per timme innebär att det tar 10 h att nå maxeffekt och innan dess måste systemet nå maxtemperatur.

Existerande anläggningar

Då den mest etablerade leverantören på marknaden levererar moduler i storleksordningen 1,4 MW så är många av de idag installerade anläggningarna i megawattskala. De används också regelbundet för kombinerad kraft- och värmeproduktion och är vanligast i USA för användning i lokala områden, t.ex. hamnar eller universitet [28]. Fuel Cell Energy har levererat ett MCFC-system till en av världens största bränslecellsanläggningar i Sydkorea via Gyeonggi Green Energy, 59 MW [29].

Teknisk analys av utvalda bränslecellssystem från fyra leverantörer

I Tabell 2 nedan jämförs fyra olika bränslecellsleverantörer baserade på de fyra olika teknikerna lite mer i detalj. Valet av leverantörer till MCFC och PAFC baserades på de som fortfarande verkar jobba aktivt och levererar system. För SOFC valdes den leverantör som idag rapporterar högst effektdensitet och för PEMFC det svenska företaget som levererar tillräckligt stora system för att vara relevant i denna systemstudie. Syftet är inte att göra en uttömmande jämförelse av alla olika leverantörer utan att närmare visa på skillnaderna mellan tekniker.

Tabell 2 - Jämförelse av fyra olika bränsleceller från världsledande leverantör för respektive teknik.

Leverantör	Powercell [6] (PowerCellution)	Doosan [11]	Bloom [22]	Fuel cell energy** [26]
Teknik	PEMFC	PAFC	SOFC	MCFC
kW/modul	200	440	300	1400
kW/ton	285,7	16,2	21	14,1
kW/m³	158,7	7,1	10,1	1,4
kWh/kg H₂	15,4	Ingen information	16	Ingen information
Effektivitet H₂->ström	60%	50%	52%	47%
Spillvärme typ	Kylvätska	Förmodligen Kylmedel*	Utgående gas	Inbyggd värmväxlare
kW_{värme}/kW_{el} optimal drift	1*	0,73	Ingen information	0,46
Temperatur spillvärmeström	<80	120	80-100	121 ut värmväxlare
Tid kallstart	<10 min*	<1 h*	"always on"	10-12 h*
Tid reglerbarhet	~2 min*	Ett par min*	6-10 min	~10 %/h*
MW anläggningar finns	inte ännu	upp till 50 MW	upp till 30 MW	Upp till 59 MW
Operations intervall	10-100% av maxeffekt*	20-100% av maxeffekt*	20-100% av maxeffekt*	20-100% av maxeffekt*
Gaser	O ₂ , H ₂	O ₂ , H ₂	O ₂ , H ₂	O ₂ , H ₂ , och CO ₂

* Värden uppskattade baserat på den generella tekniken då det inte anges av specifik leverantör [14], [8].

** Data enbart tillgänglig för applikation med reformering av naturgas, värden kan ändras något för ren vätgas och koldioxid.

Det är intressant att observera att PEMFC har absolut högst volym- och viktbaserad effektdensitet (kW/m³ och kW/kg), mer än 10 gånger högre än den näst mest effektiva. Detta ger tekniken en klar fördel gällande anläggningsstorlek. En annan viktig skillnad för koppling till fjärrvärme är att för PAFC och PEMFC båda har ett aktivt kylsystem med kylvätska. För MCFC och SOFC är det istället utgasen som är varm och där värme kan tas tillvara. För SOFC, är trots den höga arbetstemperaturen, utgasens temperatur relativt låg, detta tros bero på att systemet är integrerat för att värma ingående gaser och därmed utnyttjas spillvärmern internt.

Alla av de ovan presenterade teknikerna har använts för kombinerad kraft och värme (CHP) i mindre system så som individuella byggnader [30]. I dessa applikationer är det idag vanligast med PEMFC och SOFC tack vare den stora lanseringen av Ene-farm, över 300 000 enheter, i Japan sedan Fukusima incidenten [17]. Detta visar att teknikerna är beprövade för värmeutnyttjande och bör kunna kopplas till fjärrvärmeanläggningar i Sverige.

Uppskattade kostnader och ekonomiska framtidsprognoser för bränsleceller

Något som är tydligt från den tekniska analysen ovan är att mest fokus nu läggs på SOFC och PEMFC, detta bara genom antalet företag som jobbar med det. Detta blir ännu tydligare då man försöker hitta kostnadsinformation om de olika teknikerna. För PEMFC riktat mot transportsektorn finns ett antal rapporter, även för SOFC finns det några presenterade data de senaste åren. För PAFC och MCFC är större delen av informationen mer än 10 år gammal, vilket kan vara ett resultat av vad som verkar vara ett minskande intresse. Härmed kommer vi bara kort beröra den ekonomiska aspekten av kostnaderna för PEMFC och SOFC. Det bör dock nämnas att värdena i följande segment till stor del är baserade på ekonomiska analyser och projektioner, därmed kan faktiska anbud från leverantörer skilja sig.

Tabell 3 - Kostnader för PEMFC och SOFC, de generella data kommer från system för naturgas då dessa har funnits längst, men enda systemskillnaden är med eller utan reformer och varken kostnadsbildningen eller livslängden påverkas nämnvärt [31]. De specifika kostnaderna för Powercell och Bloom är för vätgassystem.

Teknik	PEMFC	SOFC
Livslängd	30 000 h	10-20 000 h
Underhållskostnad/år	0,12 kSEK/kW	-
Investeringskostnad medel kSEK/kW	14,8-17,5	12,2-36,7
Investeringskostnad Powercell/Bloom kSEK/kW	15,4 [32]	59,9 [33]

Som kan ses från tabellen ovan är Bloom (SOFC) betydligt dyrare än de uppskattade kostnader som angivits av Powercell (PEMFC). Tyvärr kommer då inte värdena från samma rapport och därmed kan det bli en skev jämförelse. Tittar vi istället på uppskattade värden från liknande källor är SOFC fortfarande dyrare än PEMFC, även där det finns ett större intervall för uppskattad kostnad. Det större intervallet beror förmodligen på att den inte är fullt etablerad, då marknaden ännu inte har ställt in sig. Båda teknikerna har goda förutsättningar för framtida kostnadsreduktioner då volymproduktion ökar, men många framtidsprognoser är fortfarande osäkra.

Driftkostnaden ovan tar inte hänsyn till vätgaskostnaden som i det här projektet diskuteras närmare i elektrolysrapporten. Den tar inte heller direkt hänsyn till stackbyten utan fokuserar främst på underhållskostnad. Båda värdena ovan visar på att kostnadsreduktioner fortfarande är nödvändigt för storskalig kommersialisering.

Referenser

- [1] Department of Energy, "Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan - 3.4 Fuel cells," [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads/hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office-multi-year-research-development>. [Använd 22 07 2021].
- [2] US Department of Energy, "Fuel cell comparison chart," [Online]. Available: https://www.energy.gov/sites/default/files/2016/06/f32/fcto_fuel_cells_comparison_chart_apr2016.pdf. [Använd 22 07 2021].
- [3] Gencell, "Comparing fuel cell technologies," Gencell Energy, [Online]. Available: <https://www.gencellenergy.com/news/comparing-fuel-cell-technologies/>. [Använd 22 07 2021].
- [4] Department of Energy, Fuel Cell Handbook (Seventh Edition), Department of Energy, 2004.
- [5] M. M. Whiston, I. L. Azevedo, S. Litster, K. S. Whitefoot, C. Samaras och J. F. Whitacre, "Expert assessments of the cost and expected future performance of proton exchange membrane fuel cells for vehicles," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, nr 11, pp. 4899-4904, 2019.
- [6] Powercell, "Marine MegaWatt Solutions - Download brochure," [Online]. Available: <https://powercellution.com/marine-megawatt-solutions>. [Använd 23 07 2021].
- [7] S. Porstmann, T. Wannemacher och T. Richter, "Overcoming the Challenges for a Mass Manufacturing Machine for the Assembly of PEMFC Stacks," *Machines*, vol. 7, nr 4, p. 66, 2019.
- [8] Department of energy, DOE, "DOE Technical Targets for Fuel Cell Systems and Stacks for Transportation Applications," [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-and-stacks-transportation-applications>. [Använd 30 08 2021].
- [9] E. I. Ortiz-Rivera, A. L. Reyes-Hernandez och R. A. Febo, "Understanding the History of Fuel Cells," i *IEEE Conference on the History of Electric Power*, 2007.
- [10] M. Rahaman och M. M. Islam, "Comparative Study of Different Fuel Cell Technologies," *Asian Journal of Contemporary Science and Technology*, vol. 1, pp. 29-32, 2019.
- [11] Doosan Energy, "PureCell Model 400 Hydrogen," [Online]. Available: <https://www.doosanfuelcell.com/en/prod/prod-0102/>. [Använd 22 07 2021].
- [12] Fuji Electric, "Fuji Electric Fuel cells specification," [Online]. Available: <https://www.fujielectric.com/products/fuelcell/spec.html>. [Använd 22 07 2021].
- [13] Fortune Business insights, "Phosphoric Acid Fuel Cell Market to Hit USD 1.12 Bn by 2026; Rising Focus on Bringing Down Carbon Emissions Worldwide to Boost Market Prospects: Fortune Business Insights," *Fortune*, 2020. [Online]. Available: [RISE Research Institutes of Sweden AB](https://www.globenewswire.com/news-release/2020/02/17/1985659/0/en/Phosphoric-Acid-Fuel-Cell-Market-to-Hit-USD-1-12-Bn-by-2026-Rising-Focus-on-Bringing-</div><div data-bbox=)

- Down-Carbon-Emissions-Worldwide-to-Boost-Market-Prospects-Fortune-Business-Insights.html. [Använd 22 07 2021].
- [14] D. Steward, M. Penev, G. Saur, W. Becker och J. Zuboy, "Fuel Cell Power Model Version 2: Startup Guide, System Designs, and Case Studies," National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA, 2013.
- [15] Department of Energy, "MCFC and PAFC R&D Workshop," NREL, 2010.
- [16] A. Larson, "Innovative Byproduct-Hydrogen Fuel Cell Power Plant Completed," *Power Magazine*, pp. <https://www.powermag.com/innovative-byproduct-hydrogen-fuel-cell-power-plant-completed/>, 13 04 2021.
- [17] Osaka Gas, "About technological development of the SOFC system," Osaka Gas, [Online]. Available: <https://www.osakagas.co.jp/en/rd/fuelcell/sofc/technology/details.html>. [Använd 22 07 2021].
- [18] J. Brouwer, "9 - Hybrid fuel cell gas turbine (FC/GT) combined cycle systems," i *Combined Cycle Systems for Near-Zero Emission Power Generation*, Woodhead publishing, 2012, pp. 265-282.
- [19] Mitsubishi Power, "Mitsubishi Power - Fuel cells - MEGAMIE 250kW class," [Online]. Available: <https://power.mhi.com/products/sofc>. [Använd 22 07 2021].
- [20] S. J. McPhail, J. Kiviaho och B. Conti, "The Yellow Pages of SOFC Technology," ENEA, 2017.
- [21] Convion, "Convion fuel cell systems," [Online]. Available: <https://convion.fi/products/>. [Använd 22 07 2021].
- [22] Bloom Energy, "Bloom Energy - HYDROGEN FUEL CELLS - Hydrogen datasheet," [Online]. Available: <https://www.bloomenergy.com/applications/hydrogen-fuel-cells/>. [Använd 22 07 2021].
- [23] A. Larson, "New Fuel Cell Power Plants Deployed in South Korea and California," *Power Magazine*, pp. <https://www.powermag.com/new-fuel-cell-power-plants-deployed-in-south-korea-and-california/>, 3 09 2020.
- [24] S. Schmidt, "Delaware Public Media - Bloom Energy seeks to replace all fuel cells at Delaware plants," Delaware Public Media, 1 1 2019. [Online]. Available: <https://www.delawarepublic.org/post/bloom-energy-seeks-replace-all-fuel-cells-delaware-plants>. [Använd 31 08 2021].
- [25] US Department of Energy, "DEVELOPMENT OF MOLTEN CARBONATE FUEL CELL POWER PLANT TECHNOLOGY," US Department of Energy, 1980.
- [26] Fuel Cell Energy, "Fuel Cell Energy - Products - Suresource xxxx specification," [Online]. Available: <https://www.fuelcellenergy.com/products/>. [Använd 22 07 2021].
- [27] R. Bove, A. Moreno och S. McPhail, "International Status of Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) Technology," JRC Scientific and Technical reports, 2008.
- [28] FuelCellWorks, "FuelCellWorks - Fuelcell Energy details microgrid performance successes," FuelCellWorks, 14 01 2020. [Online]. Available:

<https://fuelcellsworks.com/news/fuelcell-energy-details-microgrid-performance-successes/> . [Använd 30 08 2021].

- [29] FuelCellWorks, "FuelCellWorks - south-korea-posco-energy-signs-fuel-cell-agreement-with-gyeonggi-green-energy," FuelCellWorks, 04 2019. [Online]. Available: <https://fuelcellsworks.com/news/south-korea-posco-energy-signs-fuel-cell-agreement-with-gyeonggi-green-energy/>. [Använd 31 08 2021].
- [30] National Renewable Energy Laboratory, "NREL - Stationary Fuel Cell Systems Analysis," NREL, [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/hydrogen/stationary-fuel-cell-analysis.html>. [Använd 31 08 2021].
- [31] Battelle Memorial Institute, "Manufacturing Cost Analysis of 100 and 250 kW Fuel Cell Systems for Primary Power and Combined Heat and Power Applications," Battelle Memorial Institute, 2016.
- [32] K. Sjölin och E. Holmgren, "A Proton Exchange Membrane & Solid Oxide Fuel Cell comparison," Department of Mechanics and Maritime Sciences, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, 2019.
- [33] M. ANDERSSON och J. FROITZHEIM, "TECHNOLOGY REVIEW – SOLID OXIDE CELLS 2019," Energiforsk, 2019.