



Teknikbevakning av polymera bränsleceller (PEMFC) 2012

Elforsk rapport 13:21



Rakel Wreland Lindström & Göran Lindbergh

Mars 2013

Teknikbevakning av polymera bränsleceller (PEMFC) 2012

Elforsk rapport 13:21

Förord

För att hålla Energimyndigheten, Elforsks intressenter och övriga bränslecells-intressenter uppdaterade på vad som sker inom bränslecellsområdet, har projektet Teknikbevakning av bränslecellsområdet (Elforsk projektnummer 25097) genomförts under 2012. Målet med projektet har varit att samla in och sprida information bland Elforsks intressenter, landets forskare och näringsliv om den senaste utvecklingen inom bränslecellsområdet.

I huvudsak har utvecklingen följts med utgångspunkt från IEA Implementing Agreement on Advanced Fuel Cells med ett delprojekt för varje annex, men också genom bevakning av intressanta konferenser och aktiviteter inom området. Denna rapport är en av ett tiotal delrapporter som tas fram inom projektet. Rapporten beskriver aktörer, teknikstatus och nyheter inom området polymera bränsleceller (PEMFC). Teknikbevakningen har skett genom deltagande i bränslecellskonferenser, genom att följa den vetenskapliga litteraturen på området, samt genom personliga kontakter med företag och andra forskare. Under året har rapportförfattarna deltagit i följande konferenser och IEA-AFC Annex 22-möten:

- Hydrogen & Fuel Cells in the Nordic Countries 2011, Malmö, Sverige, 25-26 oktober 2011.
- European Fuel Cell 2011, Rom, Italien, 14-16 december 2011.
- 221st Electrochemistry Society Meeting. Seattle, USA, 6-10 maj 2012.
- IEA-AFC Annex 22 Spring 2012 Workshop, Daejeon, Korea, 21-22 juni 2012
- 63rd Annual International Electrochemistry Meeting, Prag, Tjeckien, 19-24 augusti 2012.
- Carisma 2012 - 3rd Carisma International Conference, Köpenhamn, Danmark, 3-5 september 2012.
- IEA-AFC Annex 22 Fall 2012 Workshop, Espoo, Finland, 29-30 november, 2012.

Rapportens huvudsakliga slutsatser presenteras i en syntesrapport för hela teknikbevakningsprojektet (Elforsk rapport 13:30). Samtliga rapporter finns publicerade och fritt nedladdningsbara på Elforsks webbplats för bränslecellsbevakningen på adressen www.branslecell.se. Projektet har till största delen finansierats av Energimyndigheten. Volvo och Vätgas Sverige har bidragit med egeninsatser.

Styrgruppen för projektet, som också deltagit aktivt i projektgenomförandet, har bestått av följande ledamöter: Bernt Gustafsson och Greger Ledung Energimyndigheten, Göran Lindbergh KTH, Bengt Ridell Grontmij AB, Eva Fontes och Emmelie Wennstam Intertek Semko, Mohsen Assadi och Bengt Sundén LTH, Hans Pohl, Erik Wiberg Vätgas Sverige och Bertil Wahlund Elforsk AB. Elforsk framför ett stort tack till styrgruppen för värdefulla insatser.

Stockholm mars 2013

Bertil Wahlund, Programområde El- och värmeproduktion, Elforsk AB

Sammanfattning

Den kommersiella utvecklingen för PEMFC har gott starkt framåt de senaste åren. Mellan 2010 och 2011 ökade antalet levererade enheter med 87 %. Prognosen för 2012 är en ytterligare tredubbling av antalet sålda enheter till ca 71 000 under året. Försäljningen av stationära enheter ökar, och de står för en tredjedel av antalet och i effekt räknat knappa hälften med totalt drygt 20 MW. Ökningen består i några stora stationära anläggningar samt en fortsatt tillväxt i kombinerade kraftvärmeverk för bostäder (mikro-CHP). Ökningen speglas också av att den japanska katalysatortillverkaren Tanaka ökat sin försäljning av katalysatorer till bränsleceller med 67 % under 2011. Antalet enheter för transport är fortfarande litet men tros ta över marknaden när bränslecellsdrivna fordon kommer ut på marknaden runt 2015.

Kombinerade kraftvärmeverk för bostäder, mikro-CHP, har vunnit mark i Japan. Systemen under namnet ENE-FARM bygger på att naturgas reformeras och används i en PEMFC. Efter tsunamin och kärnkraftsolyckan 2011 har efterfrågan ökat ytterligare. Den globala marknaden för mikro-CHP, som domineras av den inhemska japanska, växte med 38 %. Sedan 2010 har det japanska systemet förbättras och fått 3 procentenheter högre elverkningsgrad och blivit 20 % billigare. Även i andra länder har intresset för mikro-CHP ökat. I Tyskland har man ett program som i juni 2012 hade 260 system installerade och i slutet av 2013 ska 550 system vara i bruk. Ett europeiskt program under namnet ene.field sammanför europeiska tillverkare och användare i 12 medlemsländer för att testa olika bränslecellstekniker i runt 1000 installationer i byggnader. I Korea har 350 mikro-CHP-system producerats under 2012.

Man har ganska nyligen fått upp ögonen för att stora mängder vätgas produceras som biprodukt i kemisk industri. Vätgasen förbränns vanligtvis för att ge värme men beräkningar visar att om gasen i stället används i bränsleceller skulle branschens höga elkostnader kunna sänkas med 20 %. Räknat på den globala produktionen av klor skulle 2.2 GW kunna produceras från biprodukten vätgas med bränslecellsteknik.

Fortfarande är det huvudsakliga målet för forskning och utveckling på bränslecellssystem att få ned kostnaderna och öka driftstiden. För att minska kostnaden handlar mycket av forskningen om att minska platina-mängden i PEMFC. Även forskningen kring icke-platinabaserade elektroder har intensifierats det senaste året. Dessa katalysatorer består av kol med aktiva katalytiska säten av en metalljon, företrädesvis järn, kobolt eller nickel som koordinerar till kväveatomer bundna till kolstrukturen.

Protonledande membranelektrolyter baserat på PFSA (poly-perfluorosulfonic acid) är helt dominerande för PEMFC, men de fluorerade jonomera materialen är dyra och tillverkningen miljömässigt ifrågasatt och forskning pågår för att utveckla nya alternativa polymerer. Dessa baseras på kolväten, som generellt har bättre stabilitet vid högre temperaturer men har större vattenupptag och lägre ledningsförmåga än PFSA. Ett relaterat område som fått större aktualitet och utvecklats är alkalina jonledande membran (AEM). Bränsleceller i alkalisk miljö har fördelar som högre aktivitet för icke-platinabaserade katalysatorer och mindre korrosiv miljö. Dock har de anjonledande polymererna idag sämre ledningsförmåga och stabilitet än de protonledande.

Summary

The commercial development of the PEMFC has made strong progress in recent years. Between 2010 and 2011, the number of units shipped increased by 87%. The forecast for 2012 is a further tripling of the number of units delivered to about 71,000 during the year. Sales of stationary units are increasing, and they account for a third of the number of units and almost half of the rated power with a total of over 20 MW. The increase consists of a few large units and a continued growth in small combined heat and power plant for residential use (micro-CHP). The increase is also reflected by the Japanese catalyst manufacturer Tanaka which increased its sales of catalysts for fuel cells by 67% in 2011. The number of units for transport is still small but is believed to take over the market when fuel cell vehicles enter the market around the 2015.

Combined heat and power plant for residential, micro-CHP, has gained ground in Japan. The systems under the name ENE-FARM is based on natural gas reformed and used in a PEMFC. The demand increased even further after the tsunami and nuclear disaster in 2011. The global market for micro-CHP, which is dominated by the Japanese market, grew by 38%. Since 2010, the Japanese system has improved and obtained higher electrical efficiency and become 20% cheaper. The interest in micro-CHP increase also in other countries. A Germany program had in June 2012 260 systems installed, and projected 550 systems at the end of 2013. A European program called ene.field brings together European producers and users in 12 member states to test various fuel cell technologies in around 1000 installations in buildings. In Korea, 350 micro-CHP systems have been produced in 2012.

The large amount of hydrogen produced as a by-product in the chemical industry has recently been highlighted. The hydrogen is today typically burned to provide heat, but calculations show that if the gas instead is used in fuel cells the industry's electricity costs could be reduced by 20%. Calculated on the global production of chlorine show that 2.2 GW of electrical power could be produced from by-product hydrogen with fuel cell technology.

The main goal of research and development of fuel cells is still to reduce cost and increase lifetime. Focus is on decreasing the amount of platinum catalyst to reduce the costs. Additionally, research on non-platinum-based catalysts has been intensified in the past year. These catalysts are composed of carbon with active catalytic sites of a metal, preferably iron, cobalt or nickel, which coordinates to the nitrogen atoms attached to the carbon structure.

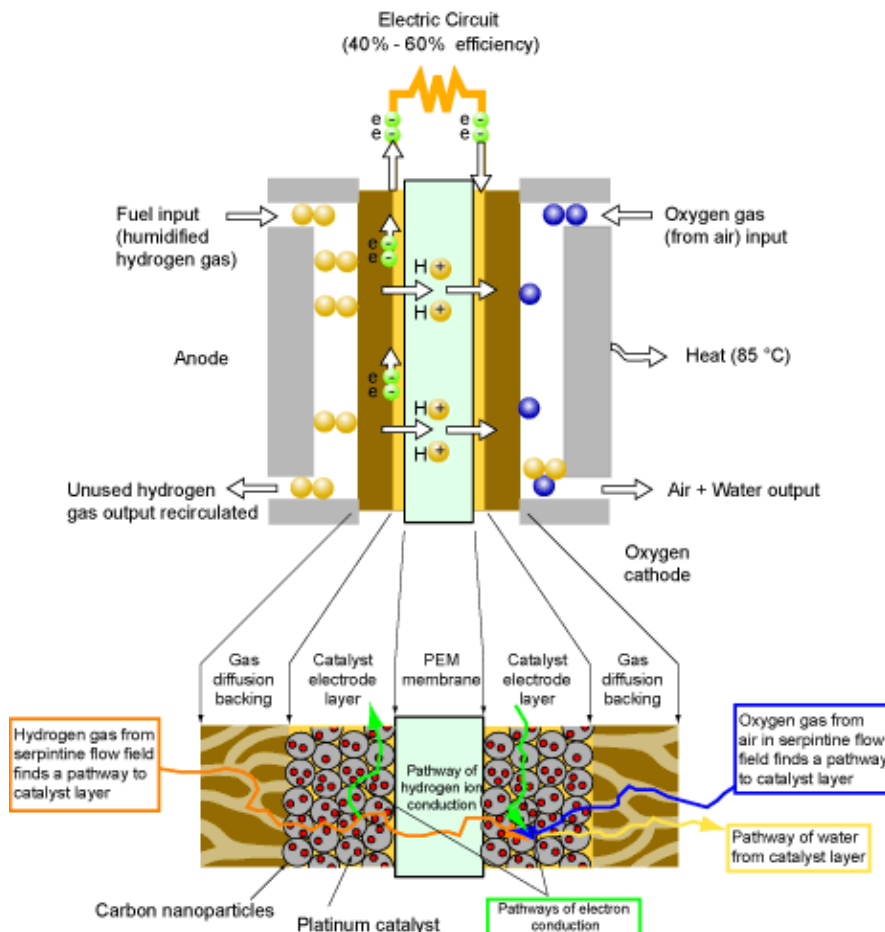
Proton Conductive membrane electrolytes based on PFSA (poly-perfluorosulfonic acid) are dominating for PEMFCs, but these fluorinated ionomer materials are expensive and the manufacturing is environmentally questioned and research is therefore underway to develop new alternative polymers. New membranes based on hydrocarbons generally have better stability at higher temperatures, but a greater water uptake and lower conductivity than PFSA. A related area with growing interest is the development of alkaline ion-conducting membranes (AEM). Fuel cells in alkaline environment have advantages such as higher activity of the non-platinum-based catalysts and less corrosive environment. However, anion-conducting polymers currently have poorer conductivity and stability than proton conducting.

Innehåll

1	Tekniköversikt	1
2	Nyheter och utvecklingstrender	3
2.1	Mål för bränslecellsutvecklingen.....	3
2.2	Vetenskapliga framsteg inom komponentutveckling	4
2.2.1	Platina-baserade elektroder	4
2.2.2	Icke platinabaserade elektroder.....	5
2.2.3	Membranutvecklingen	6
2.2.4	Uppskalning och massproduktion.....	7
2.3	Kommersiella framsteg för PEMFC.....	7
2.3.1	Stationär primärkraft för större och mindre byggnader	8
2.3.2	Nätstöd och utanför elnätet	9
2.3.3	PEMFC i fordon	10
3	Vad händer i Sverige nu och framåt?	12
3.1	Verksamhet vid svenska lärosäten	12
3.2	Kommersiell verksamhet i Sverige	12

1 Tekniköversikt

En bränslecell omvandlar kemisk energi till elektrisk energi genom att ett energirikt bränsle (vanligen vätgas, enkla kolväten eller alkoholer) oxideras i närvaro av en katalysator på anoden och en oxidant (vanligtvis luft eller syrgas) reduceras till vatten på katoden, också med en katalysator. Anod- och katodreaktionerna sker vid olika potentialer vilket ger upphov till en cellspänning och en elektrisk ström i kretsen mellan elektroderna. I polymerelektrolytbränslecellen (PEFC eller PEMFC), som visas i en schematisk skiss i figur 1, består vanligen både anod- och katodelektroderna av en porös bädd av platinabaserade nanopartiklar, oftast deponerade på en kolbärare (Pt/C). Elektroderna separeras av en protonledande fastelektrolyt, ett membran som typiskt är uppbyggt av sulfonerade och perfluorerade polymerer. För vätejonledningen måste membranerna även innehålla vatten.



Figur 1. Schematisk bild av en polymerelektrolyt-bränslecell.

Utöver membranet och elektroderna, det så kallade MEA (Membrane Electrode Assembly), är integrerade strömtilledare (bipolära plattor med gasdistributionskanaler) och ledande gasdiffusionsskikt viktiga komponenter för att transportera gasen, vattnet, och strömmen till och från elektroderna på ett effektivt sätt. I en bränslecellsstack staplas många enskilda celler till ett cellpaket, där den elektriska strömmen seriekopplas, medan gasflödena kopplas parallellt. Varje enskild cell har en cellspänning vid drift på 0,7-0,8 V, och kan belastas med strömtätheter på 0,5-2 A/cm², vilket ger praktiska effekttätheter på över 1 W/cm². Antalet celler bestämmer cellspänningen och elektrodarean (mängd katalysatoryta) i cellen bestämmer totalströmmen i stacken.

På grund av membranens fuktberoende är PEMFC:s arbetstemperatur oftast under 100 °C. Eftersom även värme bildas i cellen måste stacken kylas, detta i regel via kylvattenkanaler i de bipolära plattorna. För mycket små system (< 1 kW) kan det räcka med passiv kylning eller med luftkylning.

Som bränsle omvandlas ren vätgas mest effektivt till elektricitet, med mycket små energiförluster. Vätgasoxidationen ger inga biprodukter som kan påverka cellreaktionen. Den teoretiska verkningsgraden är över 80 % men i realiteten har ett bränslecellssystem t ex i ett fordon en verkningsgrad på 60 % (räknat från tank till hjul) vilket ändå är mer än det dubbla jämfört med konventionella fordon. Metanol som används i direktmetanolbränslecellen (DMFC) oxideras till koldioxid vid fullständig reaktion, men ger också en rad intermediära produkter som kan adsorbera och blockera katalysatorytan där reaktionen sker, d v s förgifta elektroden, vilket leder till en lägre verkningsgrad.

Ett alternativ till direktbränslecellen är reformatbränslecellsystem som genom en integrerad reformer/bränsleomvandlare först omvandlar ett kolväte som exempelvis metan i naturgas eller biogas till en vätgasrik gasblandning. Innan gasblandningen når bränslecellen måste den renas från eventuella förgiftande ämnen som svavelföreningar och kolmonoxid. Reformeringen sker sålunda i flera steg; efter svavelfälla följer ångreforming vid hög temperatur och/eller partiell oxidation med luft. Kombinationen kallas autoterm reformering. Kolmonoxidnivån sänks ytterligare genom ångreforming vid lägre temperatur (WGS) samt preferentiell oxidation med luft (PrOX). Med hjälp av rätt reformeringssystem kan en PEMFC drivas av i stort sett vilket kolvätebaserat bränsle som helst. De bränslen som oftast diskuteras i samband med stationära PEMFC-system är natur- och biogas, men även flytande bränslen kan reformeras. Bränslen med komplexa sammansättningar som t ex diesel kräver mer av reformeringssystemet, medan system för enklare bränslen som t ex metanol kan göras mycket enkla. PEMFC-anoden påverkas inte i någon stor utsträckning av bränsleutspädning, men systemet måste designas rätt för att hantera föroreningar. Bränsleceller kan således med fördel integreras i olika industriella processer som t ex klor-alkali och kloratframställning, biobränsleomvandling, avfallshantering etc. Elverkningsgraden hos reformatbränslecellen ligger runt 30 % och med värmets inkludering blir totalverkningsgraden ca 70-80 %. Även om reformatbränslecellen producerar CO₂ har den stora fördelar mot termisk förbränning både med tanke på sin höga verkningsgrad men också eftersom produkten blir mycket ren vilket är en fördel vid koldioxidsavskiljning.

2 Nyheter och utvecklingstrender

2.1 Mål för bränslecellsutvecklingen

Fortfarande är det huvudsakliga målet för forskning och utveckling på bränslecellssystem att få ned kostnaderna och öka drifttiden. Som vi skrivit om tidigare är livslängdsmålen uppnådda vad gäller bränsleceller för personbilar, men behöver fortfarande förbättras för stationära tillämpningar. Kostnaderna fortsätter att sjunka och mycket talar för att om en av de mer effektiva katalysatorerna som utvecklats och demonstrerats i mindre skala kan användas i en kommersiell cell så finns det mycket att spara i platinakostnader.

Som vi skrivit om tidigare är följande forskningsfrågor inom PEMFC som prioriterade:

- *Komponentutveckling*: utveckla katalysatorer med mindre mängd platina, hållbara billigare membran med låg bränslepermabilitet för högre temperaturer, gasdiffusionsskikt, bipolära plattor, optimerade komponenter i stack.
- *Ökad förståelse*: Utveckla modeller och diagnostik för vattenhantering, åldring och nedbrytning och inverkan av föroreningar i bränsle och luft.
- *BoP (Balance of Plant)*: Designa kostnadseffektivt kringssystem (bränsle/luft/värme) och bränslereformersystem.
- *Analys*: Göra kostnad- och prestandaanalyser av bränslecellsystem

Specifika målsättningar från det amerikanska energidepartementet DoE 2012 är:

- 2015: ha utvecklat ett bränslecellssystem för portabel kraft (<250 W) med energitätheten 900 Wh/L.
- 2017: en direkt vätgasbränslecell för fordon med 60 % elverkningsgrad, 5000 timmars livslängd och till en kostnad av \$30/kW.
- 2020: distribuerad generering och mikro-CHP bränslecellssystem (5 kW) som drivs av naturgas eller LPG med 45% elverkningsgrad och en hållbarhet på 60 000 timmar systemkostnad av \$1500/kW.
- 2020: medelstora CHP bränslecellssystem (100 kW–3 MW) med 50% elverkningsgrad, 90% CHP totalverkningsgrad och 80 000 driftstimmar till en installationskostnad av \$1500/kW naturgasdrift, och \$2100/kW för drift på biogas.
- 2020: APU bränslecellssystem (1–10 kW) med specifik effekt på 45 W/kg och en effekttäthet på 40W/L till en kostnad av \$1000/kW.

2.2 Vetenskapliga framsteg inom komponentutveckling

Platinakatalysatorn vars pris är högt och fluktuerande är ett av de stora hindren för bränslecellens kommersiella genombrott. De huvudsakliga fyndigheterna är centrerade till Sydafrika och tillgången är begränsad, men det finns de som hävdar att bränslecellen som del av en drivlina i fordon bara skulle utnyttja motsvarande mängd som redan idag används för avgasrening. Hur som helst är materialen i bränslecellen, främst katalysatorn, mycket värdefulla och återvinning av uttjänta stackar liksom av rester från tillverkningsprocessen måste utvecklas. I ett stort brittiskt projekt med bland annat katalysatortillverkaren Johnson Matthey har man nyligen startat att undersöka möjligheterna till återvinning av de värdefulla materialen i PEM-bränslecellen.

För att minska kostnaden för bränslecellsstacken handlar mycket av forskningen om att minska platina-mängden i PEMFC. Bland annat har ett stort kanadensiskt projekt med flera stora aktörer som Ballard och AFCC nyligen dragits igång där målet är att minska platinamängden med 80 % inom 5 år. För att ändå bibehålla samma prestanda måste katalysatoraktiviteten öka dramatiskt. Eftersom syrgasreduktion är den långsammaste processen i systemet lägger man störst arbete på att få den reaktionen att gå enklare genom att utveckla katodkatalystorn.

2.2.1 Platina-baserade elektroder

Ett sätt att minska mängden platina och samtidigt öka den katalytiska aktiviteten är att utveckla katalysatorns design. I förra rapporten beskrev vi kärna-skal (core-shell) strukturer. Där ska helst kärnan vara billig d.v.s. oädel och ytan aktiv d.v.s. platina. Många olika kärnor har provats innehållande Pd, Ni, Au, Co, Fe, Ir, W, V och Nb och legeringar mellan dem. Utmaningen är att få dem så perfekta att skalet säkert täcker den mer oädla kärnan och att strukturen består i en riktig bränslecell med start-stop cykler. Dessutom måste syntesvägen vara skalbar för stora volymer. I forskningens spår har 2012 en stor katalysatortillverkare i Japan annonserat att man skall börja tillverka katalysatorer med platinaskal över en kärna av palladium.

Upplösning av det mindre ädla legeringselementet kan också vara ett sätt att få ett ojämnt ytskikt av Pt som får andra egenskaper än bulkplatina. Så kallad härdad nano-segregerad PtNi/C har visat sig hela 6 gånger mer aktiv än Pt/C i elektrokemiska mätningar. I bränslecell har GM visat att D-PtNi₃ och PtCo₃-legering uppnår målet på en massaktivitet över 0,44 A/mg_{PGM} (dvs strömtäthet vid 0.9 V), med 0,52 och 0,46 A/mg_{PGM} för respektive katalysator. PtCo₃ klarar dessutom livslängdsmålet på 30 000 cykler.

Förra året skrev vi om katalysatorpartiklar med facetterade ytor som kan vara flera gånger aktivare än konventionell Pt/C eftersom Pt(111) ytan har högre aktivitet än t.ex. Pt(100). Den här typen partiklar kan också göras med enkristallina legeringar med Co och Ni och så hög massaktivitet som 2.5 A/mg Pt har uppmätts.

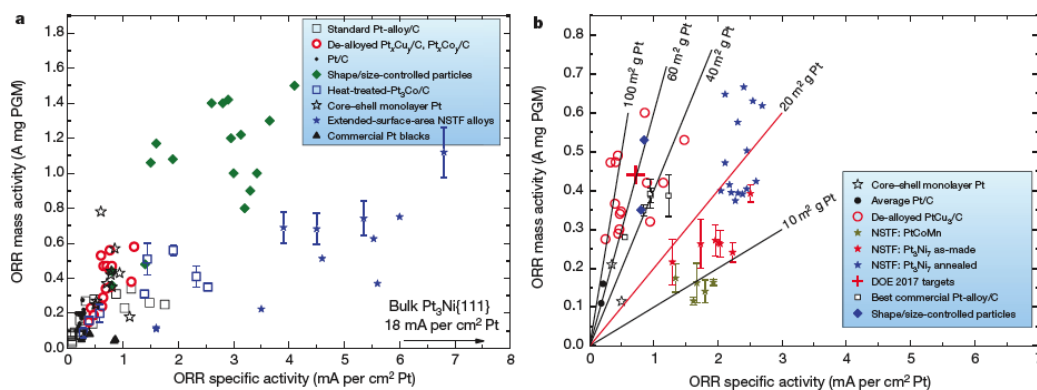
Även om mycket avancerade nanopartiklar kan utvecklas bygger det på att de i en elektrod sitter på en bärare som vanligtvis består av kol. Det har dock visat sig att för bränsleceller i drift är kol i syrgaselektroden inte stabilt i längden. Som vi skrivit förut om har mycket forskning lagts på stabilare

avancerade kol men det verkar inte vara vägen då dessa i regel är mycket dyrare, inte mer aktiva och med tiden inte mycket mer stabila. Dessutom är materialen tveksamma ur hälsosynpunkt vid storskalig produktion. En annan väg att gå är att låta partiklarna bäras av stabilare, men ledande oxider, blandade med kol. Lovande resultat har visats med Pt-TaOPO₄/C.

Fördelen med 3Ms nanostrukturerade katalysatormatta (NSTF), som vi skrivit om tidigare, är att den inte har någon kolbärare och därför är mer stabil över tid. På grund av sin mer effektiva syrgasoxidation bildas mindre hydroxidradikaler som bryter ned membranet och följaktligen mindre läckage av floridjoner ur systemet. Idag producerar 3M Pt₆₈Co₂₉Mn₃ NSTF elektroder med massaktiviteter på 0.15-0.17 A/cm² Pt. Nyligen har de utvecklat en Pt₃Ni₇ legering med massaktiviteter upp mot 0.5 A/mg Pt vilket gör att de når massaktivitetsmålet på 0,44 A/mg_{PGM}. Sättet att applicera mattan på membranet har förfinats så att även prestandan förbättrats vid lägre cellspänningar och strömtätheter på 2 A/cm² har uppmätts. Elektroder med denna typ av katalysator har dock visat sig vara känsliga för mängden vatten i cellen.

Det finns även andra typer av tunnfilmsmaterial bestående av nanoporösa ultratunna filmer producerade med olika fysikaliska deponeringsmetoder.

Nedan visas en jämförelse av de mest avancerade katalysatorerna för syrgasreduktionen nyligen publicerat i en Review i Nature 2012.



Figur 1. a) Syrgasreduktionens aktivitet vid 0,9 V för olika typer av katalysatorer i svavelsyralösning. b) Syrgasreduktionens aktivitet vid 0,9 V för olika typer av katalysatorer i PEM-bränslecell (spridningen beror på olika elektrodsammansättningar). Ref doi:10.1038/nature11115

2.2.2 Icke platinabaserade elektroder

Forskningen kring icke-platinabaserade elektroder har intensifierats det senaste året; de ledande grupperna har höjt prestandan på sina elektroder och fler grupper har slagit in på spåret, bland annat Prof. Palmqvist på Chalmers har nyligen presenterat lovande resultat. Studier av mekanismen för syrgasreduktionen (ORR) har också ökat förståelsen. Gemensamt för dessa material är att de i huvudsak består av kol med aktiva katalytiska säten av en metalljon, företrädesvis järn, kobolt eller nickel som koordinerar till 4 kväveatomer som är bundna till kolstrukturen. Nyckeln är troligtvis metal-kvävebindningen i kolstrukturerna och det finns hopp om att man med rätt val

av legander skall kunna reglera bindningen för optimal katalytisk effekt. För syrgasreduktionen i PEM-bränslecellen har man nått en aktivitet som liknar den för Pt/C. Vad som skiljer denna typ av elektrod mot Pt/C-baserad är att Me-N-C materialen har mycket lägre katalysatortäthet (runt 1 %) som gör att man måste använda en mycket tjockare elektrod för att få samma mängd aktiv yta, vilket försvårar masstransporten av protoner, syremolekyler och vatten i elektroden. Detta blir främst ett problem vid höga strömuttag. Även stabiliteten är ett stort problem som eventuellt skulle förbättras om miljön var alkalisk och inte sur som fallet är i dagens PEMFC.

Eftersom syrgasreduktionen är den trögare av de två reaktionerna i en bränslecell och därigenom använder en större mängd katalysator har huvudfokus legat på katoden, men alternativa katalysatorer till anoden är lika svårt att hitta. För den alkaliska membranbränslecellen har man provat palladium men resultaten är inte så goda. Inom DMFC har PtRu länge varit dominerande för anoden men nyligen har PtRuSn visat högre aktivitet.

2.2.3 Membranutvecklingen

Fortfarande är sura membranelektrolyter baserat på PFSA (polyperfluorosulfonic acid) av typen Nafion®, Flemion®, Aciplex® eller Aquivion® de helt dominerade för både PEFC och DMFC. Skillnaden mellan de olika kommersiella polymererna är främst sidokedjans längd. Membranen är tunna, runt 20-30 μm i tjocklek, och ofta förstärkta med en polymer som PTFE. Forskning pågår runt andra förstärkningsmaterial, främst oorganiska material men ofta påverkas jonledningsförmågan negativt av inblandningar. Nyligen presenterades förstärkning med en slags glasflis som verkade lovande. En tydlig trend är att de nyare materialen klarar högre temperaturer och lägre fuktigheter. 3M har nyligen utvecklat en variant (PFIA) med två syragrupper, både en sulfon- (SO_3^-) och en imid- (NH -)grupp på sidokedjan som gör att materialet klarar lägre fuktigheter och får bättre mekaniska egenskaper.

De fluorerade jonomera materialen är dyra och tillverkningen miljömässigt ifrågasatt och forskning pågår för att utveckla nya alternativa polymerer. Dessa baseras på kolväten, oftast aromatiska kedjor och sulfongrupper. Typiska material är sulfonerade SPEEK(poly-eter-eterketon), SPAE (poly-arylen-eter), SPI(polyimid) etc. För att optimala protonledande kanaler ska bildas bör de bestå av separerade hydrofila och hydrofoba delar. Prof. Jannasch arbete vid Lunds Universitet har starkt bidragit till en ökad förståelse av hur egenskaperna kan kopplas till jonomerernas struktur. Generellt har den här gruppen av material bättre stabilitet vid högre temperaturer men har större vattenupptag och lägre ledningsförmåga än PFSA. Dock har de lägre permeabilitet för bland annat metanol vilket gör dem intressanta för DMFC. Även här laboreras med blandningar av polymera material med olika egenskaper och förstärkningar. Det pågår även försök med att blanda in fosforsyra i membranen eller göra blandningar med PBI (polybenzimidazol) polymerer. Fortfarande behövs mer forskning för att utveckla ett membran som är bättre än PFSA materialen.

Ett relaterat område som fått större aktualitet nyligen är alkalina jonledande membran (AEM). Bränsleceller i alkalisk miljö har vissa fördelar som högre aktivitet för icke-platinabaserade katalysatorer och mindre korrosiv miljö för kolbärare och bipolära plattor. Dock har de anjonledande polymererna idag sämre ledningsförmåga och stabilitet än de sura. Området har dock utvecklats på senare tid och det finns både kolvätebaserade och fluorerade alkaliska jonomerer. Vanligtvis har de en amingrupp som bas. Som exempel har det Israeliska företaget EraCell utvecklat en stack baserat på det bästa som finns att tillgå inom alkalina jonomer och hävdar att de kan nå nästan $0,7 \text{ W/cm}^2$ med platinafri katod och Pt-anod i luft. Om även den sistnämnda elektroden byts ut till en icke-platina katalysator uppnås $0,4 \text{ W/cm}^2$. Enligt företaget är optimerade val av polymer för respektive elektrod och membranet en förutsättning för de lovande resultaten. Ett problem är dock att luftens koldioxidhalt försämrar den alkalina membranbränslecellens prestanda och luften måste alltså renas innan den kan användas. Prof Jannasch har nyligen fått ett Formas anslag för att bedriva forskning på alkaliska membran för bland annat bränsleceller.

2.2.4 Uppskalning och massproduktion

För de små volymer av bränslecellsstackar som hitintills tillverkats har det tagit ca 5 år för en komponent att kvalificeras för bränslecellsstacken. Inom kort framtid planeras massproduktion av bränslecellsfordon med volymer på 10- till 100-tusen fordon per år redan 2020. Därför kommer uppskalning av produktionen av komponenter och MEA-tillverkning vara centrala för utvecklingen. Om bränslecellsfordon kommer utgöra 10 % av världsmarknaden från 2030 betyder det ca 15 miljoner personbilar årligen. Varje stack innehåller ca 300 MEAor (300 cm^2), vilket ger 4,5 miljarder MEAor om året eller närmare 11 tusen MEAor i minuten. I den processen åtgår stora mängder platina, ca 1,5 kg per timme. Återvinning av material under processen måste utvecklas. Kvaliteten måste vara perfekt och troligtvis kommer man vilja undvika att använda organiska lösningsmedel. Det finns alltså mycket processutvecklingsarbete här kvar att göra och troligtvis kommer forskning och utveckling styras om från ökad aktivitet till stabilitet av system som går att massproducera. Frågor med ökad relevans är också åldringsmekanismer och inverkan av föroreningar, något som gruppen på Tillämpad Elektrokemi vid KTH har fokuserat på de senaste åren.

2.3 Kommersiella framsteg för PEMFC

Den kommersiella utvecklingen för PEMFC har gått starkt framåt de senaste åren. Mellan 2010 och 2011 ökade antalet levererade enheter med 87 %. Prognosen för 2012 är ytterligare en tredubbling till ca 71 000 enheter under året. Försäljningen av portabla enheter ökar men de stationära står för en knapp tredjedel av antalet levererade system och i effektkapacitet räknat utgör de stationära systemen ca hälften med totalt ca 20 MW. Ökningen består av några stora stationära anläggningar, en fortsatt tillväxt i kombinerade kraftvärmeverk för bostäder (mikro-CHP) och flera elektronikladdare ute på marknaden. Antalet enheter för transport är fortfarande litet men tros ta över marknaden när bränslecellsdrivna fordon kommer ut på den allmänna marknaden runt 2015. Ökningen av sålda

enheter speglas också av att den japanska katalysatortillverkaren Tanaka har ökat sin försäljning av katalysatorer till bränsleceller med 67 % under 2011.

2.3.1 Stationär primärkraft för större och mindre byggnader

För stora kraftverk är högtemperatur-bränsleceller dominerande men PEMFC-teknologin har börjat ta sig in på området. Det danska Dantherm har levererat ett 150 kW-system till Sydafrika och ett 50 kW-system till Sydkorea för att nyttogöra avfall till energi. Både Ballard och Nedstack har 1 MW-system som t.ex. kan drivas på vätgas producerat i kloralkali-industri.

Man har ganska nyligen fått upp ögonen för att stora mängder vätgas produceras som biprodukt i kemisk industri. Bara europeiska kloralkalifabriker, som står för 23 % av världshandeln, producerar 12,5 miljoner ton klor om året. Vätgasen förbränns vanligtvis för att ge värme men beräkningar visar att om gasen i stället används i bränsleceller skulle branschens höga elkostnader kunna sänkas med 20 %. Räknat på den globala produktionen av klor skulle 2.2 GW kunna produceras från biprodukten vätgas med bränslecellsteknik. Den största PEMFC anläggningen i detta sammanhang är i Solvays anläggning i Lillo i Belgien där en Nedstack 1 MW bränslecell installerades 2011. På en av Akzo-Nobels anläggningar i Tyskland har en 50 kW alkalisk bränslecell installerats och en liknande startar nu i Solvays fabrik i Warrington, England. Även Finland har liknande planer på att använda vätgasen producerad vid Kemirafabriken i Äetsä. På Ineos i Stenungsund har man länge diskuterat nya användningsområden för vätgas och nyligen har en liten PEMFC testats på plats även där.

Mikro-CHP, d.v.s. kombinerade kraftvärmeverk för bostäder, har vunnit marknad i Japan som vi har skrivit om tidigare. Det japanska systemet under namnet ENE-FARM bygger på att naturgas från gasnätet reformeras och används i en PEMFC. Efter tsunamin och kärnkraftsolyckan 2011 har efterfrågan ökat ytterligare. Den globala marknaden för mikro-CHP som domineras av den inhemska japanska växte med 38 % till 466 M€ 2011 och fortsatt tillväxt till 1000 M€ (ca 70 Mkr) förväntas för 2012, enligt den årliga "Micro-CHP" rapporten från industrianalytikerna Delta-ee.

Sedan 2010 har det japanska systemet utvecklat av Panasonic förbättras och dagens system har fått 3 procentenheter högre elverkningsgrad, blivit 20 % billigare och mindre både i volym och effekt (från 1 kW till 0,7 kW), vilket är mer anpassat till de japanska konsumenterna. Systemet är kopplat till elnätet men det går att köpa till ett batteri som gör att de även fungerar vid strömbrott. Idag finns systemet även med SOFC men det förutsätter att systemet körs kontinuerligt vilket i många fall ger el och värme i överskott vissa tider på dygnet och på så vis sänker totalverkningsgraden. Den dominerande PEMFC-tekniken är därför bättre lämpat för den japanska marknaden där cellen vanligtvis stängs av under natten.

Även på andra platser i världen har man blivit intresserad av mikro-CHP. I Tyskland har man ett program med namnet Callux som i juni 2012 hade 260 system med PEMFC (Baxi) eller SOFC (Innotech, Hexis, Valliant) installerade och i slutet av 2013 ska 550 system vara i bruk. Även Danmark har ett projekt kring mikro-CHP där danska system från Dantherm, IRD Fuel Cell och Topsoe Fuel Cell testas i byggnader, bland annat i byn Vestensko. Beställningar för olika mikro-CHP har också kommit från Holland, Österrike och i Storbritannien. Panasonic har öppnat ett forsknings- och utvecklingscenter för bränslecells-mikro-CHP i Langen, Tyskland 2011 och i Cardiff, Wales 2012 för att fokusera på den europeiska marknaden.

Det europeiska programmet FCH JU har precis startat ett stort program under namnet ene.field som liknar det japanska ene.farm. Projektet sammanför nio europeiska mikro-CHP tillverkare och 24 användare, fastighetsbolag och kommuner, för att testa olika befintliga bränslecellstekniker i runt 1000 installationer i byggnader i 12 medlemsländer. Syftet är att stödja kommersialisering av mikro-FC-CHP, minska CO₂-utsläppen, och studera eventuella socioekonomiska hinder som framkommer för utbredd användning av mikro-FC-CHP i Europa.

I Korea har 350 system producerats 2012 av GC Fuel Cell, Hyosung och Fuel Cell Power och även Hyundai Hysco planerar att börja producera mikro-CHP.

I Kalifornien i USA finns sedan slutet av 2011 100 stycken 5 kW ClearEdge5 högtemperatur PEMFC-system installerade. Även andra tillverkare är inriktade på högtemperatur-PEMFC för dessa tillämpningar.

2.3.2 Nätstöd och utanför elnätet

Bränsleceller för backup-el för telekommunikation har visat sig bättre, i vart fall om man ska tro mobildistributören MetroPCS tester i USA, än andra tekniker som batteri eller dieselgeneratorer och har lägre totalkostnader. Den stora stormen Sandy som drabbade den amerikanska östkusten 2012 visade att de vanligaste dieseldrivna backupsystemen inte fungerade särskilt länge medan bränslecellsdrivna system kopplade till gasnätet fungerade bra över lång tid. Ökningen av försäljningen av bränslecellsbackupsystem under 2011 var ganska liten men under 2012 har försäljningen accelererat. Potentialen finns främst i länder där elnätet är opålitligt som i Asien, Afrika och Sydamerika. Trots stora leveranser i USA under 2012 har företagen i branschen försökt att nå nya marknader. Hydrogenics och telekomjätten CommScope har skrivit kontrakt liksom Dantherm och Indiska Delta Power. Även Altergy har kunder i Indien. Telekomföretaget China Mobile söker också en hållbar och kostnadseffektiv teknik för att ersätta de blybatterier som används idag och har köpt in ett antal bränslecellssystem från bland annat Dantherm.

Även nätbolag har börjat intressera sig för bränsleceller för backup. Bland annat har Statliga Nät-kooperationen i Kina implementerat Jupiter backup system från FutureE för att undvika elavbrott. Detta är en bransch som även ReliOn satsar på. Deras system liknar IdaTechs bio-HydroPlus med internreforming av metanol.

Den klassiska direktmetanol-bränslecellen lämpar sig bäst för små system och saluförs främst av SFC i Tyskland som säljer produkten EFOY till husbilar, fritidsbåtar och militära tillämpningar, och den här marknaden har varit relativt konstant de senaste åren. Dock syns en ökning av metanol som primärbränsle i större system där metanolen först i systemet reformeras till vätgasrik gas som leds in i en vanlig PEMFC. Fördelen med systemet är att metanol är ett mer lätthanterligt bränsle som t.ex. lättare kan transporteras till avlägsna platser i tredje världen jämfört med vätgas. Med metanol som bränsle producerar systemet förvisso CO₂, men om metanolen är en produkt från förnybar biomassa eller avfall kan den ändå vara koldioxidneutral.

System där el från en förnybar källa, vind eller sol, genom en elektrolysör genererar lagringsbar vätgas som senare kan generera el via en bränslecell är en intressant lösning för att lagra elenergi i elnätet. Ett antal system är i demonstration på olika platser, i Europa bland annat hos Vattenfall Tyskland och E.On. Hela systemlösningar med elektrolysör, vätgaslagring och bränslecell tillverkas idag av FutureE och Electro Power Systems.

Den här typen av hela systemlösningar för att balansera nätet i kombination med förnybar elproduktion är särskilt intressanta för öar och demonstrationsprojekt finns idag på Utsira (Norge), Lolland (Danmark), Shetlandsön Unst (Storbritannien) och Korsika (Frankrike). Större och mer omfattande projekt som också involverar tankstationer och fordon planeras på Isle of Wight (Storbritannien) och Hawaii (USA).

2.3.3 PEMFC i fordon

Eftersom transportsektorn är den som slukar mest olja och till följd står för en huvuddel av CO₂-utsläppen finns det en stark drivkraft till att hitta nollemissionlösningar för driften av alla typer av vägfordon. Lösningen är elektriska fordon. Medan batterilösningar fungerar för småbilar som kör kortare sträckor, lämpar sig bränslecellshybridfordon (FCEV) bättre till något större fordon som kör längre sträckor.

Som vi skrivit om tidigare är bränslecellsutvecklingen idag i huvudsak driven av fordonsindustrin. Daimler kommersialiserar sin tredje generation F-CELL 2014 men tror på stora volymer först 2017 med sin fjärde generation FCEV. Ford har en länge framförhållning då de förlorade styrfart i och med sin stora kris 2008 och har först 2020 som mål för sin FCEV. Även GM var hårt drabbad av krisen och frågan är om de kommer ut med sin HydroGen4 till 2015? Mer fart är det på de asiatiska tillverkarna. Troligtvis kommer Honda att kommersialisera FCEV parallellt med BEV i en existerande bilmodell 2015. Hyundai-Kia producerar redan hundratals ix35 FCEV för demonstration och planerar tillverkning av 10 000 fordon 2015. Kostnaden för en sådan kommer ligga på ca 350 000 kr. På sikt kommer Kia göra små elbilar medan Hyundai står för de större bränslecellshybriderna. Nissan har kommit särskilt långt med sin stackutveckling och den nyaste stacken har, baserat på presenterade data, högre effekttäthet, mindre mängd platina och mer kostnadseffektiva delar än sina konkurrenter. En FCEV med den här stacken kommer ut 2016. Toyotas första kommersiella FCEV 2015 kommer att vara en lyxig sedanmodell för ca 850 000 kr och även de samordnar utvecklingen av FCEV, BEV och PHEV med gemensamma komponenter och standarder.

En förutsättning för en fordonsflotta som drivs på vätgas är förstås tankstationer med vätgas. Hundratals projekt för sådana har byggts och är på gång att byggas över hela världen, främst i Japan, Korea, Kalifornien, Tyskland men även i våra skandinaviska grannländer. Trafikverket är involverat i planeringen för utbyggnad i Sverige tillsammans med Vätgas Sverige.

3 Vad händer i Sverige nu och framåt?

3.1 Verksamhet vid svenska lärosäten

Som vi skrivit om bedrivs forskning idag kring PEMFCs olika komponenter främst av Patric Jannasch grupp vid Lunds Universitet, Anders Palmqvist grupp vid Chalmers och Göran Lindberghs grupp vid KTH. Sedan finns det ytterligare grupper med verksamheter som berör bland annat korrosion av bipolära plattor, vätelagring, reformering, modellering och systemstudier.

Efter Mistras bränslecellsprogram som avslutades 2009 har det varit mycket trögt med finansieringen för bränslecellsforskning på svenska lärosäten. Generellt är finansieringen dålig för bränslecellsprojekt på nationell nivå. Sverige saknar ett program för bränsleceller och vätgas. Energimyndighetens program Energieffektiva vägfordon har i sin fortsättning från 2011 inga projekt som rör bränsleceller. Den nationella finansiella matchning av EU-projekt inom bränsleceller som är vanlig i flera europeiska länder, där ibland våra skandinaviska grannar, saknas i Sverige och gör det svårt att kunna delta i EU-programmen trots att mycket medel fördelas ut den vägen. Den svenska noden CC Sweden i KIC Innoenergy har nyligen lagt ned sin verksamhet inom energilagring med vätgas och bränsleceller innan projekttiden löpt ut i brist på svenskt kommersiellt intresse för tekniken.

De projekt som drivs idag är det här bevakningsprojektet från Elforsk och några enstaka projekt finansierade av forskningsråden. I brist på stöd från energimyndigheten har KTH och Chalmers tagit egna initiativ inom respektive energiplattformar inkluderat den strategiska satsningen StandUp for Energy med UU, KTH och SLU som har vissa aktiviteter inom området bränsleceller.

3.2 Kommersiell verksamhet i Sverige

Powercell Sweden AB är det största bränslecells företaget i Sverige och tillverkar bränslecellsstackar och utvecklar främst hjälpkraftssystem (APU, Auxillary Power Units) för fordon. De tillverkar och säljer nu sin bränslecellsstack S1 som lämpar sig för reformatbränsle. Under 2012 har de ett helt system på 3 kW, 230 VAC, att testa i demonstration med vätgas. Under 2013 kommer ett sådant demonstrationssystem visas upp på Göteborgsoperan. De har också annonserat att deras system Powerpac med integrerad dieselreforming skall vara färdigt för demonstration under 2013. Powercell har under hösten skrivit ett "letter of intent" med det tyska företaget Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH (EMB) för att i Barleben, Saxony-Anhalt, Tyskland, skapa ett gemensamt joint venture för att utveckla, tillverka och distribuera PEMFC.

myFC är ute med sin produkt PowerTrek, en liten portabel laddare för bärbar elektronik, som är omtalad överallt inom bränslecellsvärlden och utanför. Den visas nu upp på elektronikmässor över hela världen. Företaget fick nyligen pris som det modigaste under detta årtionde.

Företaget Cellkraft AB levererar bränslecellssystem för off-grid eller back-up som är robusta och tål temperaturer ned till – 30°C. De har också uppfuktare som produkter.

Morphic Fuel Cells styrka är en process för tillverkning av flödesplattor till bränsleceller. De bedriver utveckling och försäljning av tillverkningssystem.

Även Sandvik har utvecklat en bipolär platta med ett kolskikt med låg kontaktresistans som samtidigt skyddar plattan från att korrodera.

Sverige har också företag inom tjänstebranschen som erbjuder konsulttjänster och testning (Intertek, ETC, Etteplan, ÅF, Grontmij) och modelleringsverktyg (Comsol).

Branschorganisationen Vätgas Sverige arbetar för att bränsleceller och vätgasteknologi skall komma ut på marknaden i Sverige. De är geografiskt placerade i Göteborg och arbetar i huvudsak med olika demonstrationsprojekt kring fordon och tankstationer finansierade av EU. De arbetar mycket på regional nivå eftersom regionerna Skåne, Halland och Västra Götalandsregionerna idag är de som visat störst intresse av tekniken.

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se