

Vätgas som energibärare

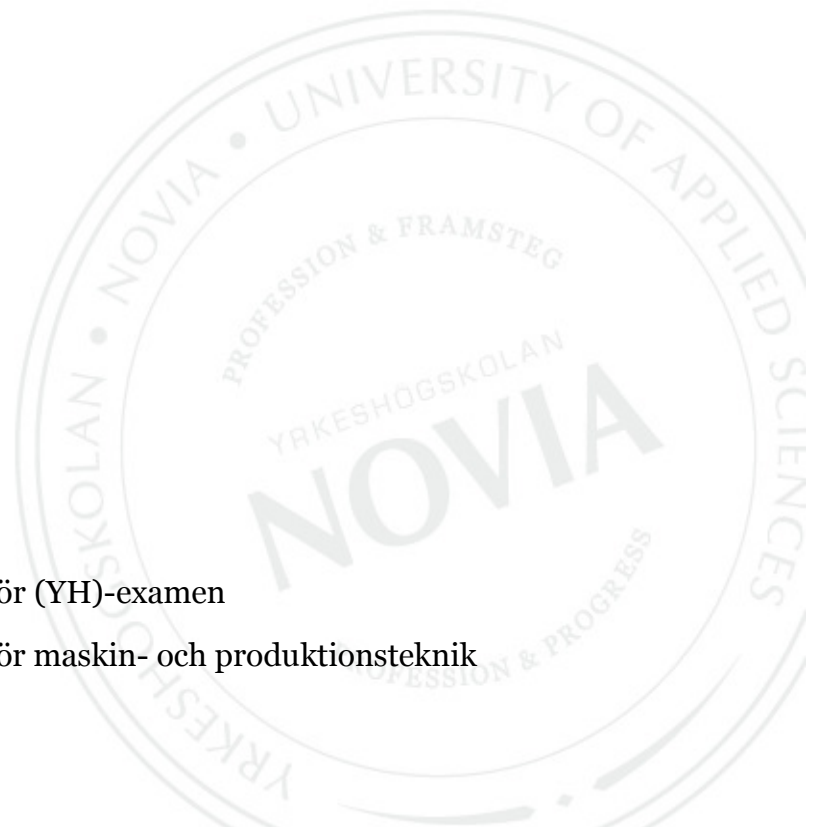
En översikt av vätgasanvändning i bränsleceller

Toni Lupala

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildningsprogrammet för maskin- och produktionsteknik

Raseborg 2011



EXAMENSARBETE

Författare: Toni Lupala

Utbildningsprogram och ort: Maskin- och produktionsteknik, Raseborg

Handledare: Håkan Bjurström

Titel: Vätgas som energibärare - En översikt av vätgasanvändning i bränsleceller

Datum 5.4.2011

Sidantal 35

Sammanfattning

I takt med att de fossila bränslereserverna förbrukas och småningom beräknas ta slut, ökar behovet av energi. Samtidigt måste utsläppen av växthusgaser också minskas för att bromsa klimatuppvärmningen. Det innebär att vi i framtiden måste producera elektricitet av råvaror som ger mindre utsläpp och också att verkningsgraden för elproduktionen höjs.

Ett alternativ som på många håll har förutspåtts ersätta de fossila bränslena är vätgas. En av de största fördelarna med vätgas är dess höga energidensitet: upp till tre gånger högre än bensin och fyra till fem gånger högre än stenkol. Den största nackdelen med vätgas är att vätet måste frigöras från olika kemiska föreningar, t.ex. kolväten eller vatten, vilket kräver en insats av yttre arbete. Tillverkning och lagring utvecklas dock ständigt mot effektivare och lättare metoder.

En bra metod för produktion av elektricitet med hög verkningsgrad och små utsläpp är bränsleceller. Om vätgas används som bränsle är det enda utsläppet vatten och en del spillvärme, som också kan utnyttjas för uppvärmning.

Det här examensarbetet behandlar vätgas som bränsle, tillverknings- och lagringsmetoder samt olika användningsmöjligheter. Den andra viktiga delen i arbetet behandlar bränsleceller, deras historia, uppbyggnad av bränslecellstackar, samt olika typer av bränsleceller och deras egenskaper.

Språk: Svenska

Nyckelord: bränsleceller, elektrolys av vatten, ångreforming,

väte, vätgas

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Toni Lupala

Koulutusohjelma: Maskin- och produktionsteknik

Ohjaaja: Håkan Bjurström

Nimike: Vetykaasu energiantantajana - Yleiskatsaus vetykaasun käytöstä polttokenoissa/Vätgas som energibärare - En översikt av vätgasanvändning i bränsleceller

Päivämäärä 5.4.2011

Sivumäärä 35

Tiivistelmä

Samaan aikaan kun fossiilisten polttoaineiden varat ovat ehtymässä, meidän energiantarpeemme jatkaa kasvamistaan. Kasvihuonepäästöjen määrää on vähennettävä, jotta ilmaston lämpenemistä pystyttäisiin hidastamaan. Tämä tarkoittaa että tulevaisuuden sähköntuotannon on perustuttava raaka-aineisiin, jotka tuottavat vähemmän päästöjä, samalla kun tuotannon hyötysuhdetta on nostettava.

Yksi ennustetuista fossiilisten polttoaineiden korvaajista on vetykaasu, jonka suurin etu on korkea energiatiheys, bensiiniin verrattuna kolminkertainen ja kivihiileen verrattuna jopa viisinkertainen. Vetykaasun suurin ongelma on se, että vety on ensin erotettava erilaisista kemiallisista yhdisteistä, kuten hiilivedyistä tai vedestä, ja tämä vaatii jonkinlaista energian käyttöä. Vedyn tuotanto ja säilöntä kehittyy kuitenkin koko ajan tehokkaampaan ja helppokäyttöisempään suuntaan.

Hyväksi todettu sähkön tuotantotapa on polttokennot, joissa yhdistyvät sekä korkea hyötysuhde että pienet päästöt. Kun vetyä käytetään polttoaineena, on päästöinä vettä sekä jonkin verran hukkalämpöä, joka myös voidaan ottaa hyötykäyttöön.

Tämä opinnäytetyö käsittelee vetykaasua polttoaineena, tuotannosta varastointiin ja eri käyttövaihtoehtoihin. Tärkeä osa opinnäytetyötä on myös polttokennojen esittely, joka käsittelee polttokennojen historiaa, kennostojen rakennetta, eri polttokennotyyppejä ja niiden ominaisuuksia.

Kieli: Ruotsi

Avainsanat: höyryreformointi, polttokenno, veden elektrolysointi, vety, vetykaasu

BACHELOR'S THESIS

Author: Toni Lupala

Degree Programme: Mechanical and Production Engineering, Raseborg

Supervisor: Håkan Bjurström

Title: Hydrogen Gas as an Energy Carrier - a Survey of Hydrogen Gas Usage in Fuel Cells/Vätgas som energibärare - En översikt av vätgasanvändning i bränsleceller

Date 5 April 2011

Number of pages 35

Summary

The fossil fuel resources are constantly depleted and getting more and more limited, and the demand for energy is increasing. At the same time we have to reduce our emissions of greenhouse gases to slow down the climate change. This means that in future energy must be produced from renewable raw materials and also with a higher efficiency than today.

One of the predicted replacing fuels is hydrogen gas, mainly because of its high heating value, almost three times higher than gasoline and up to five times higher than coal. The biggest disadvantage of hydrogen gas is the fact that it has to be extracted from various chemical compounds, such as hydrocarbons and water, which always requires some amounts of energy. The production and storage of hydrogen are, however, constantly developed towards more efficient and easier methods.

Fuel cells are a good way of combining high efficiency and low emission production of energy, If water is used as fuel in the fuel cell the only emission from the reaction is water and some waste heat, which also can be used e.g. for heating.

This thesis discusses hydrogen as a fuel, from different methods of production and storage to ways of usage. The other main part of this thesis discusses fuel cells, their history, construction, different types of fuel cells and their properties.

Language: Swedish Key words:electrolysis of water, fuel cells, hydrogen, hydrogen gas, steam reforming

Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
1.1 Syfte och begränsningar.....	1
2 Vätgas som energibärare.....	2
2.1 Fakta om väte.....	3
2.2 Historia.....	4
2.3 Vätgastillverkning.....	4
2.3.1 Ångreformerering.....	4
2.3.2 Elektrolys.....	6
2.3.3 Alternativa tillverkningsmetoder.....	8
2.4 Vätgaslagring.....	10
2.4.1 Lagring under högt tryck.....	10
2.4.2 Nedkylning och lagring i flytande form.....	11
2.4.3 Lagring i vätebärare.....	12
3 Vätgasanvändning i förbränningsmotorer.....	15
4 Bränslecellen.....	16
4.1 Bränslecellens historia.....	16
4.2 Uppbyggnad och funktionsprincip.....	17
4.3 Olika typer av bränsleceller.....	19
4.3.1 Polymerelektrolytbränsleceller (PEFC).....	20
4.3.2 Alkaliska bränsleceller (AFC).....	23
4.3.3 Fosforsyrabränsleceller (PAFC).....	25
4.3.4 Smältkarbonatbränsleceller (MCFC).....	27
4.3.5 Fastoxidbränsleceller (SOFC).....	29
4.4 Framtidsutsikter för användning hos den enskilda konsumenten.....	32
5 Sammanfattning.....	33
6 Egna kommentarer.....	35
Källförteckning.....	36

1 Inledning

Vätgas har länge ansetts vara en potentiell ersättare för de fossila bränslena vars tillgångar är begränsade. Väte finns i så gott som oändliga mängder, dock vanligen i föreningar med andra ämnen. Den största utmaningen för att vätgas skall slå igenom är i dagens läge att kunna tillverka tillräckligt ren vätgas och framförallt att sedan kunna lagra den kostnadseffektivt samt lika enkelt som de bränslen som är vanliga i dagens läge.

Bränslecellerna har redan under många tiotals år förutspåtts bli en betydande metod för elproduktion och bli en ersättare för batterier och förbränningsmotorer. Redan länge har det förutspåtts att bränslecellerna har slagit igenom inom tio år, men ännu är de rätt sällsynta i det vardagliga livet. Detta håller nu på att ändra också i verkligheten. Bränsleceller är nuförtiden inom räckhåll för konsumenter och nya produkter för t.ex laddning av mobiltelefoner eller bärbara datorer har börjat lanseras på mässor runt om i världen. Allmänt anses det att bilindustrin spelar en viktig roll för att bränslecellerna skall slå igenom stort eftersom masstillverkningen då kommer igång på riktigt, samtidigt ökar också efterfrågan och produktion av lämpliga bränslen. Båda dessa är faktorer som behövs för att få ner priset på både bränsleceller samt bränslen och deras förvaringsmetoder. Tills vidare rör sig investeringarna dock i några tusen euro redan för små anläggningar som ger några kWh energi per dygn. Då bränslet dessutom är betydligt dyrare än de nuvarande alternativen, har bränslecellerna sin huvudsakliga marknad i mera speciella tillämpningar där t.ex. vikten, minimala utsläpp, tysthet eller längre drifttid än batterier är viktigare kriterier än priset vid val av energikälla.

1.1 Syfte och begränsningar

Syftet med detta examensarbete är att skapa en helhetsbild över de olika delarna i vätgastillverkning, -lagring och -användning. Arbetet utförs som en litteraturstudie. Arbetets målgrupp är personer som kanske känner till att denna teknologi finns, men inte har djupare kunskaper inom området och samtidigt är intresserade av att veta mera.

I kapitlet vätgastillverkning presenteras de vanliga metoderna ångreforming och elektrolys, samt också några av de mest lovande alternativa metoder som är under utveckling. Kapitlet vätgaslagring behandlar de traditionella metoderna att lagra vätgas under tryck och nedkyllt i flytande form, samt några alternativa metoder för lagring i olika typer av vätebärare. Huvuddelen av arbetet behandlar bränsleceller, de olika huvudtyperna som finns och deras funktion, samt ett kort avsnitt om vilka typer av bränsleceller som förutspås bli de intressantaste för den enskilda konsumenten.

2 Vätgas som energibärare

Väte är det vanligaste grundämnet i vårt universum. Trots detta kan man på jorden inte kalla väte för en direkt energikälla eftersom det endast förekommer i mycket små mängder som fritt grundämne i naturen. Nästan allt väte på jorden finns bundet i föreningar med andra ämnen, t.ex. med syre i vattenmolekyler, eller med kol i olika former av kolväten. Därför måste man först frigöra vätet från dessa ämnen och på detta sätt tillverka väte som vid normaltryck och normaltemperatur uppträder i gasform. Denna gas kallas vätgas och har den kemiska beteckningen H_2 , och består alltså av vätgasmolekyler som i sin tur är uppbyggda av två väteatomer per vätgasmolekyl. (Jönsson, 2006, s.1; Fuel Cells 2000, u.å.).

Eftersom man är tvungen att tillverka väte innebär detta också att man tillför vätet energi på ett eller annat sätt. Därför är det lämpligare att tala om väte som en energibärare istället för energikälla. En av vätgasens fördelar är att den kan lagra många olika former av energi i en fysisk produkt som sedan kan transporteras och förbrukas på önskat sätt. Det är också intressant hur vätgasen tillverkas ur miljösynpunkt eftersom vätgasenergin är totalt sett lika miljövänlig som dess tillverkningsmetod. (Jönsson, 2006, s.1; Vätgas Sverige, u.å.a).

2.1 Fakta om väte

Atomnummer: 1, d.v.s. väte är det lättaste grundämnet.

Kemisk symbol: H

Normalt tillstånd: Tvåatomig, färglös gas, H₂

Densitet: Gas: 0,09 kg/m³

Vätska: 70,8 kg/m³

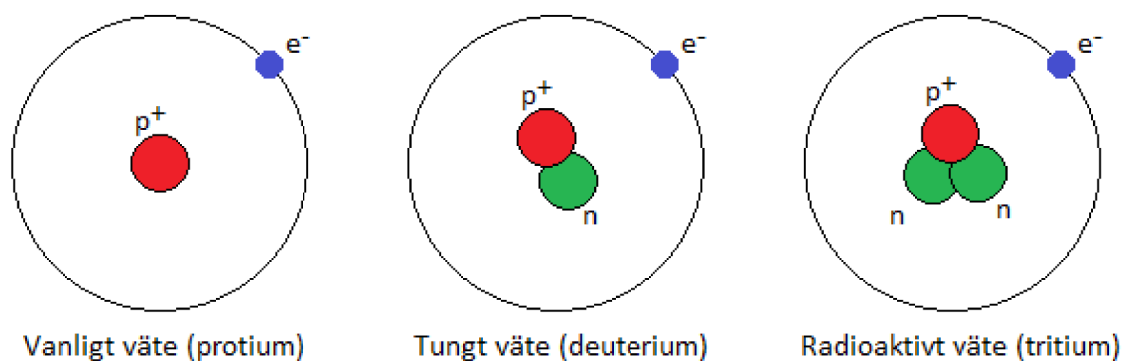
Fast form: 70,6 kg/m³

Kokpunkt: -253°C

Smältpunkt: -259°C

Värmevärde: 119 MJ/kg (jämför t.ex. bensin 43,5 MJ/kg, stenkol 26 – 32 MJ/kg)

Väte är ett av de få grundämnena som har naturligt förekommande namngivna isotoper, d.v.s. väteatomer med olika antal neutroner i atomkärnan, de namngivna isotoperna är protium, deuterium och tritium. Protium, ¹H, är det vanliga vätet vars atomkärna endast består av en proton. Deuterium, ²H, är den näst vanligaste väteisotopen och har förutom protonen även en neutron i atomkärnan, isotopen kallas ofta tungt väte och utgör ca 0,015 % av den naturliga väteförekomsten. Tritium, ³H, är den tyngsta och mest sällsynta av de naturligt förekommande isotoperna och har en proton samt två neutroner i atomkärnan, ³H väteisotopen är radioaktiv med en halveringstid på 12,33 år. Utöver dessa tre naturligt förekommande har man i laboratorieförhållanden kunnat tillverka både ⁴H och ⁵H. (MAOLs tabeller, 2000, s.72-82; Elding, Raldow & Österberg, u.å.; Wikipedia, u.å.a).



Figur 1. De naturligt förekommande väteisotopernas uppbyggnad.

2.2 Historia

Vätgas tillverkades troligtvis för första gången redan på 1600-talet, då bl.a. Robert Boyle upptäckte att en gas bildas när man löser järn i svavelsyra, men man visste inte vad som orsakade denna reaktion eller vad gasen bestod av. Därför anser man att väte upptäcktes först år 1766 av Henry Cavendish, då han löste metaller i olika syror och lade märke till att det då bildades en mycket lätt gas. År 1783 gjorde Cavendish experiment som visade att då denna gas förbränns så bildas vatten och i detta skede förstod man att vatten inte var ett grundämne, utan uppbyggt av väte och syre. Gasens namn hydrogène gavs år 1783 av Antoine Lavoisier och det svenska namnet väte gavs år 1795 av Pehr von Afzelius och Anders Gustaf Ekeberg. År 1784 tillverkade Lavoisier vätgas från vatten genom att leda vattenånga genom glödande järnrör, en metod som användes länge för vätgastillverkning. Vätgas tillverkades genom elektrolys av vatten för första gången redan år 1800 av William Nicholson och Anthony Carlisle. Väteisotoperna deuterium och tritium upptäcktes på 1930-talet. (Elding m.fl., u.å.; Wikipedia u.å.a).

2.3 Vätgastillverkning

Såsom tidigare nämndes finns väte inte tillgängligt som rent grundämne på jorden, därför är man tvungen att spjälka ut vätgas från sådana ämnen som innehåller rikligt med väte. De viktigaste metoderna för vätgastillverkning är i dagens läge ångreforming av kolväten (främst naturgas) och elektrolys av vatten. Utöver dessa finns en del metoder som idag är mindre betydande, men som hela tiden utvecklas tack vare pågående forskning. (Vätgas Sverige, u.å.b). I detta arbete kommer främst ångreforming och elektrolys att behandlas, därtill tas de alternativa metoderna ytligt upp i ett eget avsnitt.

2.3.1 Ångreforming

Ångreforming av lätta kolväten är för tillfället den överlägset vanligaste metoden för att tillverka vätgas, helt enkelt för att det är det mest kostnadseffektiva sättet av de tillgängliga metoderna. I U.S.A. står ångreforming av naturgas för upp till 95 % och i hela

världen för ca 50 % av all vätgastillverkning (New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA), u.å.). I korthet går ångreforming ut på att sammanföra ett kolväte och vattenånga vid hög temperatur, ca 700-800°C, samt ett övertryck på 3-25 bar, och spjälka det i kolmonoxid (CO) och vätgas. Därefter utförs en s.k. vatten-gas shif-reaktion där den bildade kolmonoxiden ytterligare reagerar med vattenånga vid 200-600°C och bildar koldioxid (CO₂) och mera vätgas samt avger värme som sedan kan återanvändas i ångreforming. (Noponen, 2003, s.1-2; Vätgas Sverige, u.å.b).

Den vanligaste råvaran i denna process är naturgas som till stora delar består av metan (CH₄). Här följer ett exempel på hur ångreformeringsreaktionen då ser ut



och för den därpå följande shift-reaktionen



Efter dessa processer skall gasen ännu renas, vilket innebär att koldioxiden måste tas bort för att få ren vätgas som sedan kan användas. (Karlsson, 2001, s.20-22; Noponen, 2003, s.1-4).

Fördelar med denna metod är att man kan använda en mängd olika råvaror för energiproduktionen, förutom den redan nämnda natur-/metangasen är andra möjliga råvaror t.ex. etan, biogas, metanol, etanol, oljeprodukter och kol, med andra ord kan man tillverka vätgas från de flesta fossila bränslen. Trots att det uppstår koldioxidutsläpp vid ångreforming av kolväten kan man här samla in koldioxiden på ett och samma ställe, istället för att ha bilar eller värmepannor som förbränner naturgas eller andra fossila bränslen och ger utsläpp i form av kolmonoxid, koldioxid, kväveoxider och svaveloxider. Med de anläggningar som idag finns i användning uppnår man som bäst verkningsgrader kring 65 % - 75 % (NYSERDA, u.å.). (Vätgas Sverige, u.å.a).

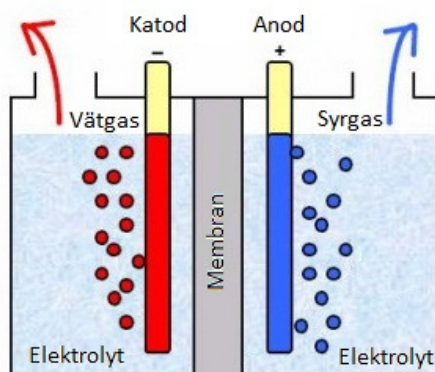
Ångreformingens största nackdel är som sagt koldioxidutsläpp vid reformeringen vilket bidrar till växthuseffekten om man använder fossila bränslen som råvaror i processen. Om man däremot använder biogas som råvara kan man tillverka i stort sett koldioxidneutral

vätgas, eftersom koldioxiden som frigörs är densamma som det nedbrutna organiska materialet har upptagit under sin livstid. En annan stor nackdel är att ångreformeringsanläggningen är anpassad för industriella behov och är p.g.a den höga temperaturen svår att göra lönsam i liten skala. (Karlsson, 2001, s.23; Nojonen, 2003, s.11).

2.3.2 Elektrolys

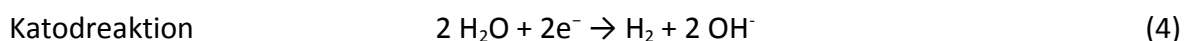
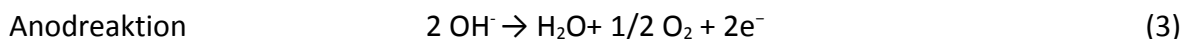
Elektrolys av vatten är en metod som i dagsläget inte ännu är så vanlig, men den är väldigt intressant eftersom man med denna metod kan tillverka mycket ren vätgas och dessutom utan utsläpp. Elektrolys som tillverkningsmetod för vätgas går ut på att man spjälkar upp vatten i syrgas och vätgas med hjälp av elektricitet. Själva elektrolysen kan delas upp i tre olika metoder enligt elektrolyt och funktion, dessa metoder är alkalisk elektrolys och polymerelektrolys som redan finns i bruk samt högttemperaturelektrolys som ännu är i forskningsstadiet. De två förstnämnda presenteras som följande i korthet. (Lehtolainen, 2003, s.3).

Den alkaliska elektrolysen är den vanligaste metoden för att elektriskt sönderdela vatten i vätgas och syrgas. Elektrolysapparaten är uppbyggd av en anod och en katod som är kopplade till en yttre likströmskälla, en alkalisk elektrolyt och ett membran som skiljer åt elektroderna. Vanligtvis är anoden (+) tillverkad av nickel eller järn med en katalysator av nickellegeringar eller metalloxider, katoden (-) är av stål och nickel med en nickelpkopparlegering som katalysator. Elektrolyten är en alkalisk vattenlösning för att förhindra korrosion av elektroderna och innehåller normalt ca 30 % kaliumhydroxid. Membranets uppgift är att skilja åt anod- och katodsidan samt att hålla den bildade vät- och syrgasen skilt från varandra, samtidigt måste membranet ha goda jonledningsegenskaper. Verkningsgraden för alkaliska elektrolysen är normalt ca 80-85 %, i idealförhållanden har man som bäst uppnått t.o.m. 95 % verkningsgrad. (Karlsson, 2001, s.22-24; Lehtolainen, 2003, s.1-3; ITPower, u.å.).



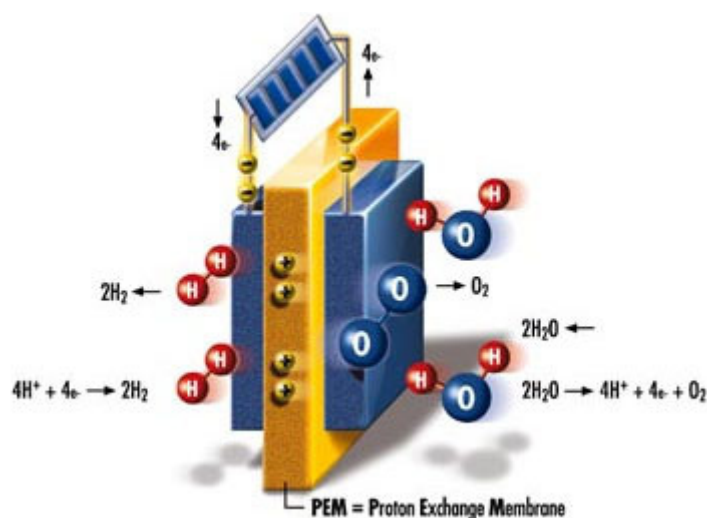
Figur 2. Principbild över uppbyggnaden av en alkalisk elektrolysapparat. (Bildtexter översatta från engelska till svenska. Ursprunglig bild (Sandru, 2010)).

Reaktionerna i en alkalisk elektrolys ser ut enligt



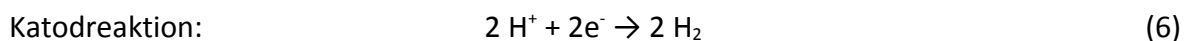
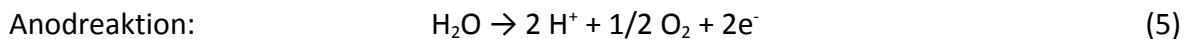
(Lehtolainen, 2003, s.2).

Polymerelektrolysen, också kallad PEM-elektrolys (Proton Exchange Membrane), påminner mycket om PE-bränslecellen som presenteras senare i arbetet. Elektrolyten är här ett protonledande teflonbaserat polymermembran i fast form, elektroderna är vanligen grafitbaserade med katalysatorer av platina på katoden och rutenium- eller iridiumoxid på anoden. Verkningsgraden vid polymerelektrolys är vanligen lite högre än vid alkalisk elektrolys och rör sig normalt mellan 80 och 90 %. (Lehtolainen, 2003, s.5; ITPower, u.å.).



Figur 3. Uppbyggnad av en polymerelektrolys, samt reaktionerna som sker vid elektroderna. Bild från (H-Tec (2011)).

Reaktionerna vid anod och katod i en polymerelektrolys ser ut enligt följande.



(Deshamps m.fl., 2006, s.2).

Nackdelar med vätgastillverkning genom elektrolys är främst att vätgasen vanligtvis blir betydligt dyrare än vid ångreforming på grund av elpriset. Om man har tillgång till billig överskottselektricitet kan elektrolys ändå vara ett konkurrenskraftigt alternativ för att tillverka vätgas. (Lehtolainen, 2003, s.7).

Den stora fördelen med elektrolys som tillverkningsmetod är, såsom tidigare nämndes, att inga utsläpp förekommer vid själva processen. Om man alltså har tillgång till ren elektricitet från t.ex. vind-, vatten- eller solenergi så kan man tillverka vätgas utan utsläpp. En annan stor fördel med vätgasen som tillverkas genom elektrolys är att den är så gott som 100 % ren, vilket är viktigt hos många typer av bränsleceller vars katalysatorer är känsliga för föroreningar. (Lehtolainen, 2003, s. 7).

2.3.3 Alternativa tillverkningsmetoder

Biologisk vätgastillverkning genom jäsnings är en metod som ännu är i början av sin utveckling. I nuläget är metoden inte kommersiellt intressant då man får ut relativt lite vätgas i förhållande till råmaterialets kapacitet. Forskning pågår hela tiden och t.ex. i Sverige har man hittat en ny typ av bakterie som kan producera dubbelt mera vätgas än de bakterier som vanligtvis används i dag. Forskare lär sig hela tiden att bättre förstå bakgrunden till effektiva vätgasproducerande bakterier och kan således kanske utveckla ännu effektivare typer. Om man lyckas med detta kan dessa bakterier bli en kommersiellt mycket betydande vätgaskälla. (Lunds Tekniska Högskola, (LTH) 2010).

Metoden fungerar ungefär som då man tillverkar biogas från organiskt material, t.ex. hushållsavfall, d.v.s. bakterier bryter ner organiskt material i koldioxid samt exempelvis metan och väte. Skillnaden vid vätgastillverkning är att processen sker i en syrefri miljö och då finns vissa typer av bakterier som producerar väte istället för metan och således

produceras i huvudsak koldioxid och väte. Då man använder denna metod kan man utvinna koldioxidneutral vätgas, koldioxiden som uppstår i processen är samma koldioxid som t.ex. växtresterna har bundit i sig under sin livstid och den skulle ha frigjorts genom rötning i alla fall. (Mikkola, 2003, s.12-13; Svensk Biogas, u.å.).

Vattenreningsverk, lantbruksgårdar, livsmedels- och skogsindustriärläggningar har förutspått vara möjliga användare av denna metod i framtiden och exempel från reningsverk visar att då man rengjort vattnet en gång på detta sätt kan man utvinna en biogas bestående till 60 % vätgas och resten koldioxid. Efter det kan man tillsätta metanproducerande bakterier för att rena vattnet ytterligare en gång och på så sätt bryta ner kolhydrater och jäsningsrester i koldioxid och metan. (Mikkola, 2003, s.15-16).

Ytterligare biologiska tillverkningsmetoder som är under forskning grundar sig allmänt på användning av solljus i processer som har sin grund i olika naturliga fenomen. Ett bra exempel är att använda fotosyntes där växter producerar syre och socker från koldioxid, vatten och solljus. Idén här är att solenergin lagras i det bildade sockret, som sedan med hjälp av bakterier och vatten kan spjälkas upp till väte och koldioxid enligt



(Mikkola, 2003, s.2-5).

En annan metod är biofotolys där man med hjälp av solljus och bakterier eller alger tillverkar vätgas från vatten. Därtill finns ännu ett antal solljusbaserade processer som liknar biofotolys och fotosyntes, men är på ett eller annat sätt modifierade för att ge en större verkningsgrad. Också hybridmetoder, där både fotolys och jäsningsprocesser ingår, är under forskning. Det gemensamma problemet för alla dessa biologiska tillverkningsmetoder är att de tills vidare har låg verkningsgrad, endast ca 4 % då man omvandlar solljus till biomassa (fotosyntesprocesser där t.ex. socker bildas) och ännu lägre då man direkt producerar vätgas. För att bli ekonomiskt lönsamma har det beräknats att man behöver verkningsgrader på minst 10 %. De metoder som har förutspått bli lönsammast med kortaste tidtabeller grundar sig på jäsningsprocesser. (Mikkola, 2003, s. 7-10, 13, 17).

2.4 Vätgaslagring

Eftersom vätgasens densitet är ca 90 g/m^3 betyder det att det i en kubikmeter vätgas av normaltryck och temperatur finns ganska lite energi, trots väteets höga värmevärde. Då värmevärdet är 119 MJ/kg så kan man beräkna att en kubikmeter vätgas av normaltryck och temperatur innehåller $119 \text{ MJ/kg} \times 0,09 \text{ kg/m}^3 = 10,71 \text{ MJ/m}^3$, vilket motsvarar energin som finns i ca 250 g bensin. Därför kräver lagringen av vätgas metoder som ger ett högre energiinnehåll per volymenhet, detta ger två möjligheter om man vill lagra rent väte. Det första alternativet är att lagra vätgas under högt tryck i tryckbehållare, medan det andra alternativet är att kyla ner vätgasen och lagra den som flytande väte. Båda metoderna har sina för- och nackdelar. Förutom dessa finns ännu alternativet att lagra väte i någon form av vätebärare varifrån man enkelt kan få ut väte tillbaka då det behövs. Sådana vätebärare är metallhydrider, nanostrukturer av kol, glassfärer och kemiska föreningar med andra ämnen. (Himanen, 2003, s.1).

Ett av de stora problemen med väte är att vätgasmolekyler tillsammans med syrgasmolekyler bildar explosiv knallgas (Wikipedia, u.å.a). Dessutom har vätgas ett mycket brett antändningsområde i luft, 4 - 75 vol.%, och brinner med nästan osynlig låga. Önskade vätgasexplosioner är ändå rätt sällsynta eftersom väte förångas snabbt och har en betydligt lägre densitet än luft och därför stiger uppåt. Därför bör också lagringsutrymmena vara ordentligt ventilerade så att det inte kan bildas stora vätgasansamlingar t.ex. under tak. Ventilationskraven blir speciellt höga vid lagring av flytande väte eftersom vätgasen blir tyngre ju kallare den är och då alltså stiger betydligt långsammare vilket gör att tidsperioden för en möjlig explosion förlängs. (Karlsson, 2001, s.7, 15, 34).

2.4.1 Lagring under högt tryck

Att lagra vätgas i tryckbehållare är i dagsläget det vanligaste lagringssättet. För industri- och andra stationära ändamål är 12-16 bar ett vanligt lagringstryck i tankar som rymmer tusentals kubikmeter. Det vanligaste lagringstrycket i mindre behållare torde vara 200 bar i 50 liters gasflaskor av stål, även lagringstryck på 350 bar och 700 bar börjar användas allt

mera då man börjat tillverka högtrycksbehållare av kompositmaterial. Att man i stationära anläggningar kan använda mindre tryck förklaras av att man har betydligt mera utrymme till förfogande för lagringen än t.ex. en bränsletank i ett fordon eller ett egnahemshus. (Himanen, 2003, s.2-4; Vätgas Sverige, u.å.b).

Det väsentliga vid komprimering av vätgas är att erhålla en så hög vätgasdensitet i behållaren som möjligt. I en 50 liters gasflaska får man med 200 bars tryck en beräknad vätgasdensitet på 17 kg/m^3 (Himanen, 2003, s.2). Enligt beräkningen $17 \text{ kg/m}^3 \times 119 \text{ MJ/kg} = 2023 \text{ MJ/m}^3$, innehåller 50 liter vätgas trycksatt till 200 bar då $2023 \text{ MJ/m}^3 \times 0,05 \text{ m}^3 = 101,15 \text{ MJ}$ energi. Denna energimängd motsvarar enligt $101,15 \text{ MJ} \div 43,5 \text{ MJ/kg}$ (värmevärdet för bensin) = ca 2,33 kg bensin (ca 3,1 liter beräknat med en densitet på $0,75 \text{ kg/l}$). Motsvarande siffror vid 350 bar lagringstryck är ca 30 kg/m^3 som enligt liknande beräkning motsvarar ca 82 kg bensin (ca 109 liter). En sådan 50 liters behållares innehåll motsvarar då ca 5,5 liter bensin. Energiåtgången vid komprimering av vätgas är allmänt kring 5-10 % av den komprimerade vätgasens energiinnehåll vid de ovan nämnda trycken och stiger ju högre trycket blir. (Himanen, 2003, s.2-4; Vätgas Sverige u.å.b.; egna beräkningar).

2.4.2 Nedkylning och lagring i flytande form

Den största orsaken till att lagra väte i flytande form är att man då får ett betydligt högre energiinnehåll per volymenhet än vid komprimering, väteets densitet i de olika aggregationstillstånden förklarar saken bra. Då vätgas med 300 bar lagringstryck väger ca 30 kg/m^3 , väger flytande väte $70,8 \text{ kg/m}^3$, eftersom värmevärdet, 119 MJ/kg , är detsamma har man alltså över dubbelt mera energi i samma volym då flytande väte används.

Då kokpunkten för väte är ca -253°C betyder det att man måste kyla ner vätet under denna temperatur för att få det att övergå i flytande form, detta innebär ett antal problem. Det första problemet är temperaturen, att kyla ner väte till -253°C kräver i dagens läge energi motsvarande ca 30 % av det flytande väteets energiinnehåll och är dessutom en komplicerad process i flera steg. Själva principen är dock enkel och

processen börjar med en nedkylning till -193°C med hjälp av flytande kväve, därefter körs gasen i expansionsmaskiner eller så utförs en Joule-Thomson-process. Joule-Thomson-processen bygger på att en gas som expanderar fritt kyls ner, förutsatt att processen sker i lägre temperatur än gasens inversionstemperatur och är isentalpisk. d.v.s. summan av gasens inre energi och produkten av dess tryck och volym, entalpin, är konstant (Wikipedia, u.å.b). Den redan nedkylda gasen får alltså expandera till ett utrymme med lägre tryck och kyls på så vis ytterligare. För vätgas fungerar Joule-Thomson-effekten kylande först vid temperaturer under inversionstemperaturen vid ca $-80,5^{\circ}\text{C}$ (Gummer & Hawksworth, 2008, s.4). I Joule-Thomson-processen arbetar gasen själv och kräver inte yttre energi men tar lång tid, därför används ofta expansionsmaskiner som försnabbar processen och inte kräver isentalpi, men istället behöver yttre energi för att utföra kylningsarbetet. Trots att själva idén är ganska enkel försvåras förverkligandet ändå av de låga temperaturerna som ställer stora krav på utrustningens material och isolering. (Lundbom, 2003, s.2-5; U.S. Department of Energy, u.å.a; Vätgas Sverige, u.å.b).

Efter att vätet blivit nedkyllt i flytande form uppstår följande problem då det skall lagras. Liksom för nedkylningsutrustningen ställs stora krav på materialen och ännu större för isoleringen, eftersom vätet nu skall hållas flytande i en obestämd tid framöver. Här är det största bekymret förångning av vätet, då temperaturen är under -253°C ger även det minsta värmestillskott från t.ex. pumpning, värmestrålning eller -ledning upphov till att det flytande vätet börjar förångas. Det är omöjligt att helt förhindra förångningen och normalt förångas ca 0,03 % - 3 % av vätgasen per dygn, beroende på hur bra lagringsutrustningen är. På grund av förångningen stiger både trycket och temperaturen i kärlet, vilket ytterligare ökar förångningshastigheten. Förångad vätgas måste alltså släppas ut ur behållaren med jämna mellanrum också om man inte använder vätgasen. (Lundbom, 2003, s.7; Karlsson, 2001, s.34).

2.4.3 Lagring i vätebärare

Såsom tidigare nämndes finns det ett antal olika möjligheter för material till vätebärare under utveckling och de presenteras nu i korthet.

Vätgaslagring i metallhydrider innebär att man sammanför vätgas och ett pulver av lämplig metall eller metallegering under högt tryck och på så vis uppstår en kemisk bindning mellan pulvret och vätgasmolekylerna. Processen avger värme då man sammanför vätet och legeringspulvret och måste då kylas ner, omvänt gäller då också att det krävs en tillförsel av värme i metallhydriden för att frigöra vätet på nytt. Orsaken till att man vanligen använder legeringar av flera metaller i denna process är att de grundämnen som i sig själva klarar av att binda väte på detta sätt kräver förhållanden (t.ex. tryck- och temperaturförhållanden) som är besvärliga att förverkliga. Den vanligaste typen av metallhydrider som används idag är legeringar av titan och järn som är en av de billigare möjligheterna. Dessa TiFe-legeringar förutspås ändå inte bli kommersiellt betydande eftersom legeringen är rätt så ostabil och känslig för föroreningar t.ex. i form av vatten eller syre, och har dessutom en relativt låg lagringskapacitet mellan 1 och 2 massprocent. En annan vanlig legering är $\text{TiCr}_{1,2}\text{V}_{0,8}$ som man kan lagra upp till 3,4 massprocent väte i, men den är också känslig för föroreningar. En legering som varit kommersiellt intressant är $\text{La}_{0,64}\text{Nd}_{0,36}\text{Ni}_{0,95}\text{Cr}_{0,19}\text{Mn}_{0,41}\text{Co}_{0,15}$, den har en ganska låg lagringskapacitet på 1,9 massprocent men däremot är den tålig mot föroreningar vilket ses som en stor fördel vid användning utanför laborieförhållanden. Förutom de vanliga typerna av metallhydrider finns flera nya varianter under utveckling, t.ex. Mg_2Fe som kan lagra upp till 5,5 massprocent väte. Detta tar dock betydligt längre tid än för de vanligare typerna av hydrider, vilket också gäller då man tar ut vätet tillbaka. (Himanen, 2003, s.4-7).

Den största fördelen hos metallhydriderna är att man kan lagra stora mängder väte i förhållande till lagringsvolymen och man behöver heller inte arbeta med så höga tryck eller så låga temperaturer som då man lagrar vätgas i tryckbehållare eller väte nedkylt i flytande form. En annan nämnvärd fördel är säkerheten, eftersom det krävs värmertilförsel för att frigöra vätet från hydriden så uppstår inte likadana farosituationer om behållaren skadas som då t.ex. en tryckbehållare börjar läcka och vätgasen orsakar stor explosionsrisk tillsammans med luftens syre. En stor nackdel hos metallhydriderna är den höga vikten, t.ex. ger 1 massprocents lagringskapacitet en metallhydrid som väger 500 kg för att kunna lagra 5 kg väte. (Karlsson, 2001, s.27).

Kolstrukturer i nanostorlek, t.ex. nanorör, -fibrer och fullerener, är ett område som ännu är outvecklat och under forskning då det gäller vätgaslagring. Det är frågan om kolatomer som sammanbundits i olika former, i nanorören är kolatomerna sammanbundna i sexkantiga figurer som i sin tur är böjda till en cylinder, där det är möjligt att binda väte både på ytan och inne i kolröret. Nanokolfibrerna består i sin tur av grafitplattor med mellanrum på några tiotals nm, vätgasmolekylens diameter är ca 29 nm och meningen är då att den under tryck skall kunna trängas in mellan grafitplattorna för att sammanbindas med kolatomerna. Fullerenerna är i sin tur sfäriska kolstrukturer av olika typer, i vätgaslagring är funktionsprincipen att vätgasmolekylerna under tryck körs in i kolsfären och binds till kolatomerna. (Himanen, 2003, s.7-8).

Orsaken till att kolmaterialen har blivit intressanta är de relativt höga teoretiska lagringskapaciteterna, t.ex. upp till 14 massprocent i nanorör och ca 6 massprocent i fulleren av typen C-60. För nanokolfibrerna nämns siffror på upp till 67 massprocent, här gäller dock att ju högre tryck som används då vätet körs in mellan grafitplattorna, desto mera väte kan man lagra. Samtidigt betyder det också att betydligt högre temperaturer krävs för att få ut vätet tillbaka. (Himanen, 2003, s.7-8).

Fördelarna hos denna metod är, i alla fall i teorin, liknande som hos metallhydriderna. Den största nackdelen är i detta skede av utvecklingen det höga tillverkningspriset samt det redan nämnda problemet med energibehovet vid urladdning. (Himanen, 2003, s.7-8).

Att lagra trycksatt vätgas i mikrosfärer av glas är en metod som grundar sig på att vätgas kan tränga sig genom upphettat glas vid en temperatur mellan 200 °C och 400 °C. Man skulle då alltså använda små glassfärer med en väggtjocklek på ca 1 µm och en diameter på några tiotals – några hundra µm. Glassfärerna hettas upp till den nämnda temperaturen och trycksatt vätgas förs in i dem, när glassfärerna sen kyls ner blir vätgasen instängd i dem. Problemet är att sedan få ut vätgasen igen och alternativen är för tillfället att krossa glassfären, hetta upp den till motsvarande temperatur som vid inmatningen eller att använda ljusstrålning av lämplig intensitet tillsammans med kemiskt behandlade glassfärer. (Himanen, 2003, s. 8; Llanos, 2004).

Då glassfärens storlek rör sig i maximalt tiondels millimetrar beter de sig tillsammans ungefär som mycket finkornig sand, nästan som en vätska, och kunde därför lagras och distribueras liknande som dagens vätskeformade bränslen. Om man dessutom använder vätet utan att söndra sfärerna kan de tas tillvara efter användning och fyllas på nytt. Lagringskapaciteten beror på hur högt tryck som används samt glassfärens storlek och vägg tjocklek, i dagens läge är det att möjligt att uppnå ca 5 – 6 massprocent. (Himanen, 2003, s. 8; Llanos, 2004).

Utöver dessa metoder kan olika kemiska föreningar i form av kolväten också användas för att lagra väte. Intressantast ur denna synpunkt är sådana kolväten som förekommer i flytande form under normaltryck i rumstemperatur och dessutom innehåller mycket väte. Exempel på lämpliga kolväteföreningar är metanol och etanol som har ett väteinnehåll på 12,5 respektive 13 massprocent. Nackdelen här är att det krävs reformeringsanläggningar för att kunna använda vätet möjligast effektivt, och det uppstår alltså koldioxidutsläpp då vätgasen utvinns. (Himanen, 2003, s.8-9).

3 Vätgasanvändning i förbränningsmotorer

En möjlighet att använda energin som vätgasen innehåller är direktförbränning på liknande sätt som man idag förbränner bensin eller dieselolja. Utsläppen vid förbränning av vätgas är vatten och en del kväveoxider ur förbränningsluftens kväve, man slipper alltså utsläppen av växthusgaser som uppstår vid förbränning av fossila bränslen. Jämfört med bränsleceller är den här tekniken redan nu betydligt bättre känd och det största hindret för att vätgasmotorer skall bli allmänna är att ett distributionsnät för bränslet saknas. Verkningsgraden för de bästa vätgasmotorerna i dagens läge är ungefär i samma klass som för dieselmotorn, upp till 42 %, (Abrahamsson, 2009), men ändå betydligt lägre än vad som förväntas av bränslecellerna. (Andersson, 2001).

Framtiden för vätgasmotorer finns troligen inom fordonstekniken. BMW är en av biltillverkarna som styrt utvecklingen av sina vätgasdrivna bilar mot förbränningsmotorer och det ovan nämnda värdet på 42 % verkningsgrad är uppnått i BMW:s försök år 2009.

Redan före det hade BMW ett projekt med sin bil Hydrogen 7 vars motor gick att köra med både vätgas och bensen, och enligt dem så har vätgasmotorn sin framtid inom trafiken som en övergångsfas från bensen-/dieseldrivna fordon till bränslecellsfordon. (Stjerna, 2006; Abrahamsson, 2009).

4 Bränslecellen

Bränslecellerna är ett betydligt effektivare sätt än förbränning då man utnyttjar energin som finns lagrad i vätgas, de bästa vätgasmotorernas verkningsgrad på ca 40 % motsvarar en relativt dålig bränslecell. I bränsleceller reagerar bränslet, vanligen vätgas, elektrokemiskt med elektroderna och de enda restprodukterna vid denna reaktion är vatten och värme. Högtemperaturbränsleceller kan dessutom utnyttja kolmonoxid och t.o.m. metangas direkt som bränsle, utsläppen blir då förutom vatten också en del koldioxid. Bränslecellerna finns i ett antal olika typer som har olika egenskaper och därför lämpar sig för olika typer av elproduktion i allt från mobiltelefoner till stora kraftverk. Det största hindret för att bränslecellerna skall slå igenom på allvar är tillsvidare det höga priset på själva bränslecellerna och bristen på tillräckligt billigt bränsle. (Pihlatie, 2003, s.1-2).

4.1 Bränslecellens historia

Den första bränslecellen byggdes år 1839 av William Robert Grove då han höll på att vidareutveckla våtcells batteriet. Genom att sänka ner ändarna av två platinaelektroder i svavelsyra och samtidigt stänga in de andra ändarna i varsin behållare med vätgas och vatten samt syrgas och vatten, upptäckte han att det gick en konstant ström mellan elektroderna samtidigt som vattennivån i behållarna steg. I detta skede visste man ännu inte hur systemet fungerade och vilken roll de olika delarna hade i processen, detta förklarades 1893 av Friedrich Wilhelm Ostwald och man fick nu en vetenskaplig beskrivning av vad som händer då bränslecellen arbetar. Efter det bedrevs en del forskning och experiment gjordes med varierande framgång, först år 1959 presenterade Francis Thomas Bacon ett bränslecellssystem med 5 kW effekt samt Harry Karl Ihrig en

bränslecellsdriven traktor med 20 hk effekt. I detta skede fick den amerikanska rymdforskningsorganisationen, NASA, intresse för bränslecells forskning och började utveckla lämplig bränslecellsutrustning för att kunna producera elektricitet på sina rymdfärder. Detta var också länge det enda området där bränslecellerna var kommersiellt intressanta, först under 1980- och 1990-talen började man inse att bränslecellerna också kan vara kommersiellt intressanta t.ex. som ersättare av förbränningsmotorer i fordon, som elektricitets- och värmekälla i byggnader eller istället för dagens batterier i bärbara elektriska apparater. Forskningen är också igång på många håll och en allmän åsikt börjar vara att bränslecellerna inom närmaste framtiden kommer att ersätta de traditionella energikällorna i allt större grad. (Chalmers tekniska högskola, u.å.a).

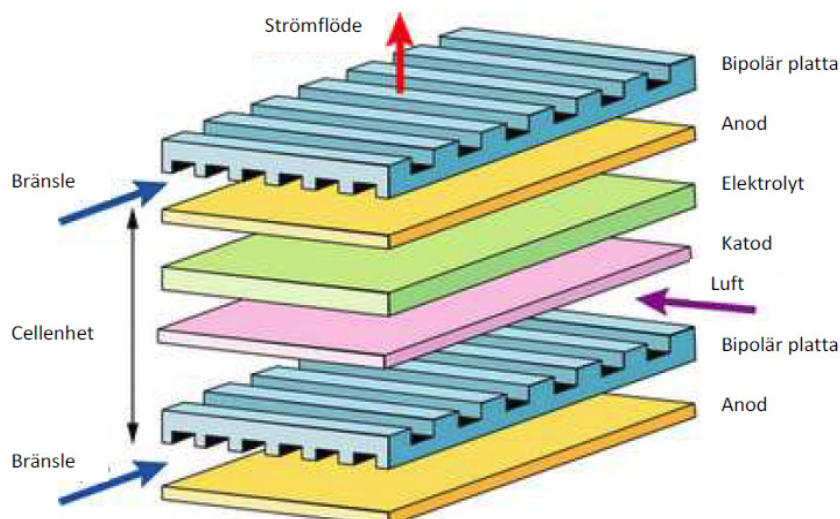
4.2 Uppbyggnad och funktionsprincip

Bränslecellen fungerar enligt liknande princip som batterier, men till skillnad från dem behöver bränslecellen inte bytas ut eller laddas upp mellan användningarna. Istället använder den väte (eller annat lämpligt bränsle) och syre för att producera elektricitet, som restprodukter bildas värme och vatten. Själva bränslecellen innehåller inga rörliga delar och är alltså så gott som underhållsfri, processen i bränslecellen omvandlar kemisk energi direkt till elektrisk energi utan förbränning. De viktigaste komponenterna i en bränslecell är elektroderna, anoden och katoden, samt elektrolyten som finns mellan dem. Intresset för att använda bränsleceller vid elektricitetsproduktion baserar sig på den höga verkningsgraden man kan uppnå. I teorin kan upp till 83 % av vätetets energiinnehåll omvandlas till elektricitet (Wikipedia, u.å.c.). Om man därtill utnyttjar spillvärmens värme för t.ex. uppvärmning av varmvatten eller byggnader kan man t.o.m. få över 90% av energin till godo. Den verkliga verkningsgraden varierar mycket beroende på vilken typ av bränslecell som används och detta tas upp senare i texten då olika typer av bränsleceller behandlas. (Pihlatie, 2003, s. 2-3; Chalmers tekniska högskola, u.å.b).

Funktionsprincipen för bränslecellen ser ut enligt följande. Bränsle, oftast väte, leds in vid den negativt laddade anoden, medan luft eller syre leds in vid den positivt laddade katoden. Vid anoden spjälks bränslet upp i positivt laddade joner och negativt laddade elektroner, denna process försnabbas ofta av katalysatorer. Den elektriska strömmen som

bränslecellen ger upphov till är likström och bildas då elektronerna leds genom en yttre strömkrets från anoden till katoden. För att återförena jonerna och elektronerna finns två olika funktionssätt. Ena möjligheten är att de positivt laddade jonerna transporteras genom elektrolyten till katoden där de förenas med elektronerna och syret. Den andra möjligheten är att syreatomerna och elektronerna bildar negativt laddade joner som går genom elektrolyten tillbaka till anodsidan där de förenas med de positivt laddade jonerna som finns kvar. Processen fortsätter i teorin så länge som nytt bränsle tillförs vid anoden och katoden har tillgång till syre. I praktiken kommer bränslecellens funktion ändå att sakta ner med tiden och till sist upphöra p.g.a att katalysatorerna åldras och korrosion försämrar bränslecellens komponenter. (Pihlatie, 2003, s. 2-3; Chalmers tekniska högskola, u.å.b).

Elektrolytens uppgift i bränslecellen är att leda joner men den får absolut inte leda elektroner, dessutom skall den hålla isär bränslet och syret. Om de fria elektronerna vid anoden också skulle ledas genom elektrolyten skulle ingen ström gå genom den yttre kretsen och bränslecellen skulle då inte vara till någon som helst nytta. Elektrodernas uppgift är igen att möjliggöra jonisering av bränslets atomer och att få jonerna och de fria elektronerna att bilda atomer igen samt att få dessa atomer att reagera med syremolekyler för att få bort dem från katoden. En viktig uppgift som elektroderna också har är att separera bränslet och syret från elektrolyten. Olika typer av bränsleceller delas i huvudsak in enligt vilket material elektrolyten består av, materialet kan vara både i fast och flytande form. Valet av material i bränslecellens komponenter är viktigt av både kostnadsskäl och för att få möjligast effektiv utrustning vid tillräckligt låga arbetstemperaturer. Ofta gäller att hög temperatur ger en snabbare och effektivare bränslecell utan katalysatorer, men ställer högre krav på materialen som används både i bränslecellstacken och i omkringvarande utrustning. För att få en välfungerande bränslecell vid låga temperaturer krävs igen dyra katalysatorer, ofta av platina, som långsamt förbrukas och måste förnyas, och dessutom kräver mycket ren vätgas för att inte förstöras. (Pihlatie, 2003, s.3; Chalmers tekniska högskola, u.å.b).



Figur 4. Uppbyggnaden av en traditionell bränslecellstack med bipolära plattor som placeras mellan anoden på en cell och katoden på följande cell. (Bildtexter översatta från engelska till svenska. Ursprunglig bild (Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science).

En ensam bränslecell ger vanligen upphov till en spänning på 0,6 - 0,7 V, för att få ut önskad spänning från systemet seriekopplar man ett lämpligt antal celler i serie med hjälp av bipolära plattor. De bipolära plattorna placeras mellan de enskilda bränslecellerna så att katoden från en cell och anoden från en annan cell ligger mot samma platta. En sådan sammanställning av enskilda bränsleceller kallas bränslecellstack. Effekten för en bränslecellstack bestäms av den totala reaktionsytan vid anoderna där elektroner kan frigöras från bränslet, samt av hur stor effekt per area man kan uppnå, denna siffra varierar i medeltal från ca 0,1 - 0,3 W/cm² beroende på vilken typ av bränslecell det är frågan om och kommer att presenteras senare i texten. (Staffell, 2009; Pihlatie, 2003, s.8; Chalmers tekniska högskola, u.å.b).

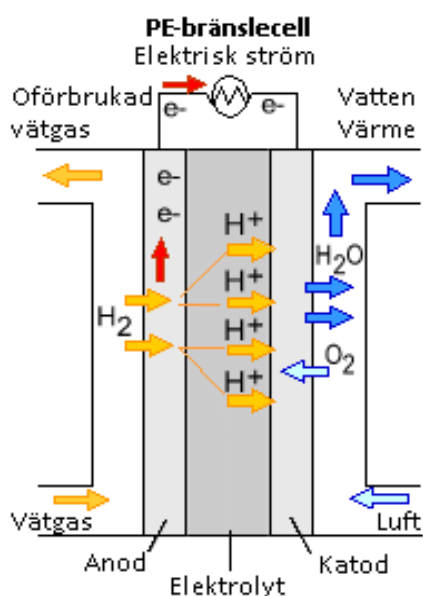
4.3 Olika typer av bränsleceller

I detta avsnitt behandlas olika typer av bränsleceller med tyngdpunkt på de varianter som lämpar sig för användning i liten skala, t.ex. i bärbara elektriska apparater såsom mobiltelefoner, musikspelare och bärbara datorer samt för elförsörjning i exempelvis segelbåtar, fritidsstugor och egnahemshus. Andra typer av bränsleceller t.ex. för användning vid större elkraftverk eller i fordon behandlas också vad gäller uppbyggnad

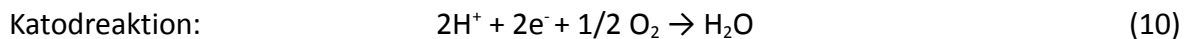
och material. Bränsleceller delas in i olika huvudtyper enligt vilken sorts elektrolyt som används, huvudtyperna kan sedan vara indelade i olika undertyper t.ex. enligt olika bränslen. Ordningen på bränslecellerna som presenteras går enligt arbetstemperatur från lägsta till högsta.

4.3.1 Polymerelektrolytbränsleceller (PEFC)

Polymerelektrolytbränslecellens elektroder är tillverkade av porösa kolbaserade material i tunna skikt, elektrolyten är ett tunt, vanligen teflonbaserat polymermembran, som släpper igenom protoner då det hålls fuktigt med hjälp av vatten. Arbetstemperaturen är vanligen under 80 °C p.g.a. att vattnet som fuktar elektrolyten inte får börja koka. Eftersom temperaturen är så pass låg är reaktionerna vid elektroderna långsamma, därför används platina som katalysator på elektroderna för att snabba upp reaktionen i den här typen av bränsleceller. PEFC-cellen använder ren vätgas som bränsle och detta spjälks upp i vätejoner (protoner) och elektroner vid anoden, protonerna går genom elektrolyten till katoden där de förenas med elektronerna och syremolekyler och bildar då vatten. (Pihlatie, 2003, s. 8-9; Crawley, 2006, s.1).



Figur 5. Schematisk bild över uppbyggnad och flöden i en PE-bränslecell. (Bildtexter översatta från engelska till svenska. Ursprunglig bild (U.S. Department of Energy, u.å)).



(Pihlatie, 2003, s.4).

Fördelar med den här typen av bränsleceller är att de är snabba att starta upp eftersom arbetstemperaturen är låg, de reagerar också snabbt på variationer i elförbrukningen. PEFC-cellstackarnas storlek varierar så att elproduktionen motsvarar effektbehovet och kan byggas för effekter upp till 250 kW, med en effekttäthet på i medeltal 0,33 W/cm² och en verkningsgrad mellan 40 och 60 % för enheterna. Dessutom kan cellstackarna göras tunna och kompakta eftersom både elektroderna och elektrolyten är formade som tunna filmer och en bränslecell blir endast några tiondels millimeter tjock. En annan stor fördel är att polymerelektrolyten i PEFC-cellerna är i fast form vilket gör att anordningen kan arbeta oberoende av vilken väg den är svängd, samt att den är mindre farlig än de starka syror som används som elektrolyt i en del andra typer av bränsleceller.

(Pihlatie, 2003, s.8-9; Crawley, 2006a, s. 1-2; Staffell, 2009).

Den låga arbetstemperaturen ses oftast som en fördel för PE-cellerna men den bidrar också till några oönskade effekter. Vid temperaturer under 150 °C fäster sig kolmonoxid enkelt på elektrodernas platinabelägg som då förstörs. Man kan heller inte höja temperaturen eftersom dagens elektrolytmembran måste fuktas med vatten för att släppa igenom protoner, om temperaturen höjs till över 100 °C kokar vattnet bort och bränslecellen slutar fungera. Bränslet måste alltså vara rent från kolmonoxid för att kunna användas i dagens PEFC-celler. (Pihlatie, 2003, s.9; Crawley, 2006a, s.2).

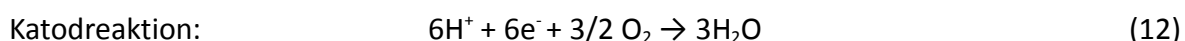
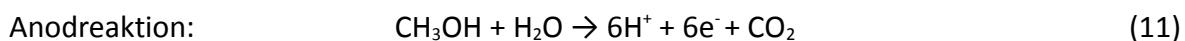
PEFC-cellens egenskaper gör den lämplig för användning bl.a. som drivkraft i fordon, som strömkälla i bärbara datorer, mobiltelefoner, bärbara gps-apparater, stugor m.m.

Forskningen och utvecklingen kring PEFC-cellerna har ännu många utmaningar att hitta lösningar till. Viktiga områden är bl.a. att utveckla polymermembran som inte behöver hållas fuktigt och således kunna höja temperaturen så högt att kolmonoxid inte längre är ett problem, samtidigt som man slipper övervakning av fukthalten i elektrolyten. Elektroderna behöver också utvecklas så att de kan tillverkas av billigare material och samtidigt så att mindre mängder platinakatalysator behövs. I dagens läge används ca 0,6

mg/cm² vid katoden och ca 0,25 mg/cm² vid anoden, målsättningen är att komma så lågt som 0,1 mg/cm². (Pihlatie, 2003, s.10).

PEFC-cellerna kallas ofta också PEMFC-celler (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) men det är alltså frågan om samma typ av bränsleceller. En intressant version av PEFC-cellen är direktmetanolbränslecellen, DMFC, som presenteras i följande avsnitt (Pihlatie, 2003, s.8-9; Crawley, 2006a, s.1-2).

DMFC-cellen är en typ av PE-bränslecell men till skillnad från dessa behöver man inte reformera metanolen till vätgas före användning. Istället blandas metanol med vatten eller vattenånga och leds sedan in vid anoden, där blandningen omvandlas till koldioxid, vätejoner och elektroner. Efter det fungerar DMFC-cellen precis som PEFC-cellen. (Crawley, 2007a, s.1).



(Crawley, 2007a, s.2).

DMFC-cellernas arbetstemperatur är 60 - 130 °C, vanligtvis ca 120 °C och verkningsgraden är som bäst ca 40 %. Huvudorsaken till att den här typen har blivit så intressant är att bränslehanteringen är betydligt lättare med metanol än med ren vätgas. Med många andra bränslecellssystem måste man ha vätgasen lagrad i trycktankar eller nedkyld i flytande form. Alternativt har man en egen reformeringsanläggning i samband med bränslecellen, vilket eliminerar lagringsproblemet men istället gör systemet mera skrymmande. Då en DMFC-cell används har man metanol i vätskeform som bränsle, detta är en stor fördel vid användning i bärbara elektriska apparater då bränslebehållarna kan göras betydligt enklare än vid lagring av ren vätgas, samt mycket lättare än då metallhydriderna används. (Pihlatie, 2003, s.10-11; Crawley, 2007a, s.2).

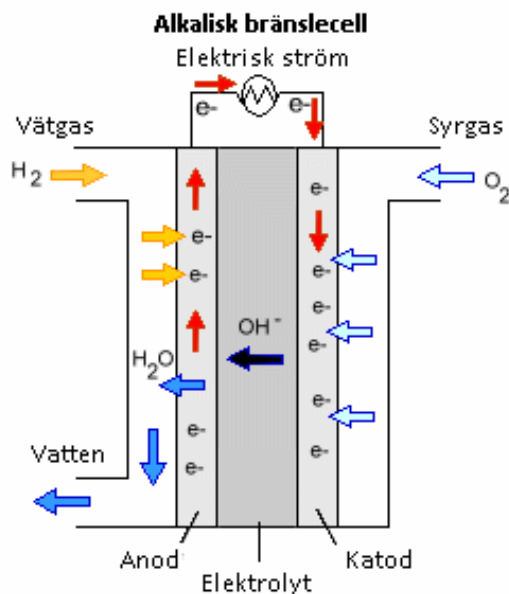
Nackdelarna med denna teknik är att metanol långsamt förgiftar de material som används i elektroderna i PEFC-cellerna och därför måste nya material ännu utvecklas, metanolen rinner också igenom det polymermembran som tidigare använts. Metanolen blandas därför med vatten för att bromsa dessa oönskade effekter, men samtidigt bromsas

bränslecellen också upp då bränslemängden minskas. En annan nackdel är att metanol också är giftigt för människor och på många håll har man därför förespråkat användning av direktmetanolbränsleceller (DMFC) istället. DMFC-cellernas verkningsgrad är i dagens läge bara ca hälften av PEMFC-cellernas, men tekniken är också betydligt yngre och ännu i början av sin utveckling och verkningsgraden förväntas stiga. (Pihlatie, 2003, s.10-11; Fuel Cell Test and Evaluation Center (FCTec), u.å.a).

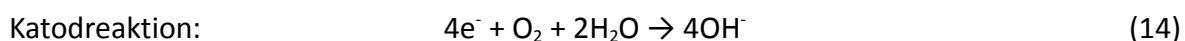
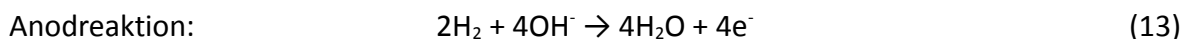
Eftersom de bränsleceller som idag används med direkt metanol inte är optimerade för bränslet vare sig gällande material eller funktion, så kan en 40 % verkningsgrad ändå anses vara rätt bra. Om tekniken och materialen kan förbättras så kan DMFC-cellerna vara ett bra alternativ som mellansteg i övergången från traditionella batterier och förbränning av fossila bränslen tills man lyckas lösa vätelagringsproblemet och kan övergå till bränsleceller som använder ren vätgas. (Pihlatie, 2003, s.11).

4.3.2 Alkaliska bränsleceller (AFC)

De alkaliska bränslecellernas, AFC, elektroder består också vanligen av tunna kolbaserade material, men till skillnad från PEMFC-cellerna har de alkaliska en vätskeformad elektrolyt som oftast är en blandning av kaliumhydroxid och vatten. Vätskeblandningens koncentration varierar med bränslecellens arbetstemperatur så att den vid de lägre temperaturerna vid ca 60-120 °C är mellan 35 och 50 % och vid högre temperaturer upp till ca 260 °C är ungefär 85 %. Effektområdet för AFC-celler är från några kW upp till 100 kW, med en elektrisk verkningsgrad mellan 45 och 60 %, t.o.m. 70 % har uppnåtts under optimala förhållanden, och en effekttäthet på i medeltal ca 0,10 W/cm². Liksom vid användning av PEMFC-celler behöver man också här använda katalysatorer för att försnabba reaktionen vid anoden då låga arbetstemperaturer används, fördelen med AFC-cellerna är att man kan använda billigare material, t.ex. nickel, som katalysator. Då högre arbetstemperaturer används kan bränslecellen arbeta t.o.m. utan katalysator. AFC-cellen använder väte som bränsle, vätgasen reagerar på anodsidan med hydroxidjoner (OH⁻) och bildar vatten samt elektroner, vid katoden reagerar elektronerna med vatten och syre vilket bildar nya hydroxidjoner som sedan transporteras genom elektrolyten till anoden. (Pihlatie, 2003, s.11; Crawley, 2006b, s.1; Staffell, 2009; FCTec, u.å.b).



Figur 6. Schematisk bild över uppbyggnad och flöden i en Alkalisk bränslecell. (Bildtexter översatta från engelska till svenska. Ursprunglig bild (U.S. Department of Energy, u.å)).



(FCTec, u.å.b).

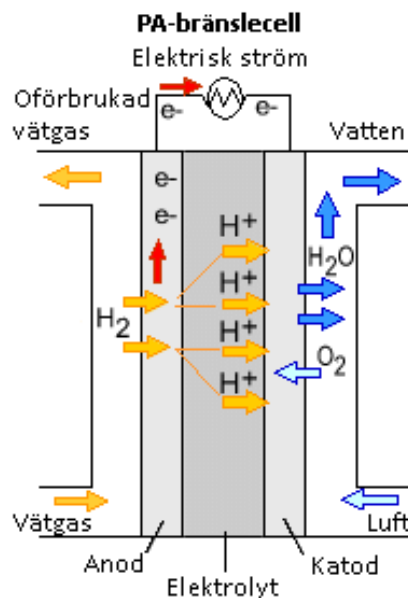
Fördelarna med AFC-cellerna är att tekniken är välkänd och då man samtidigt inte behöver använda dyra ädelmetaller som katalysator, är det också den billigaste typen av bränslecell att tillverka. Den elektriska verkningsgraden på upp till 70 % är också bland de bästa för bränsleceller och totalverkningsgraden kan ytterligare höjas genom att utnyttja spillvärmen.(FCTec, u.å.b).

Precis som PEFC-cellerna är också AFC-cellerna känsliga för föroreningar, här är koldioxid det stora giftet som reagerar med elektrolyten och försämrar dess jonledningsförmåga, detta är en av orsakerna till att de alkaliska bränslecellerna lämpar sig dåligt för användning i normala förhållanden. Syret som används vid katoden måste vara renat från koldioxid vilket gör det omöjligt att använda syre direkt från luften, eftersom luftens koldioxid då också reagerar med elektrolyten och förstör den. Då man dessutom behöver ren vätgas blir användningen av bränslecellen dyr och komplicerad. En alkalisk bränslecell kan heller inte svängas hur som helst eftersom elektrolyten är i vätskeform och också isoleringen av elektrolyten från gaserna vid elektroderna blir betydligt svårare än då fasta elektrolyter används. (Crawley, 2006b, s.2; FCTec, u.å.b).

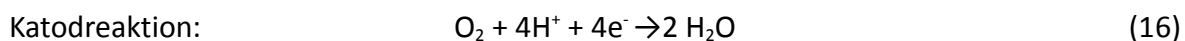
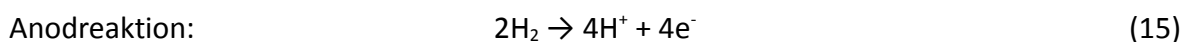
Forsknings- och utvecklingsarbetet kring AFC-cellerna är i dagens läge fokuserat främst på att utveckla tåligheten mot föroreningar. En möjlig lösning är att belägga anoden med membran som vid ett litet övertryck släpper igenom vätgas till själva elektroden, samtidigt som föroreningarna inte ryms genom membranet. Användningen sker främst inom specialområden såsom t.ex. den redan nämnda rymdteknologin samt som tyst och utsläppsfri elproduktion i ubåtar. AFC-cellerna anses inte ha någon större framtid i kommersiella produkter och utvecklingsarbetet är betydligt mindre än för PEFC- samt SOFC-cellerna. (Pihlatie, 2003, s.11-12).

4.3.3 Fosforsyrabränsleceller (PAFC)

Fosforsyrabränslecellens, PAFC, elektroder är tillverkade av porös teflon med en katalysator bestående av platinaatomer bundna till kol, som elektrolyt används fosforsyra absorberad i en blandning av teflon och kiselkarbid. Arbetstemperaturen för den här typen av bränsleceller är ca 200 °C och effekten för en anläggning är vanligen i intervallet 50-200 kW, även om man lyckats bygga anläggningar på upp till 5 MW. Den elektriska verkningsgraden för en cellstack är vanligen drygt 40 % och effekttätheten i medeltal ca 0,16 W/cm². PAFC-cellens reaktioner är likadana som PEFC-cellens, d.v.s. väteatomer spjälks vid anoden och protonerna går genom elektrolyten till katoden där de bildar vatten efter att ha förenats med elektronerna och syreatomer. (Pihlatie 2003, s12; Staffell, 2009; FCTec u.å.c).



Figur 7. Schematisk bild över uppbyggnad och flöden i en PA-bränslecell. (Bildtexter översatta från engelska till svenska. Ursprunglig bild (U.S. Department of Energy, u.å)).



(FCTec, u.å.c).

Fördelar med PAFC-cellen är t.ex. att man tack vare temperaturen kan använda vätgas från ångreformerade kolväten som bränsle utan att utföra krävande reningsprocesser. Den höga arbetstemperaturen ger också bättre möjligheter att utnyttja spillvärmen för uppvärmning och man kan då uppnå en totalverkningsgrad på ca 85 %. Det är också för tillfället den mest långlivade typen av bränsleceller med i medeltal nästan 60 000 timmars drifttid. (Staffell, 2009; FCTec, u.å.c).

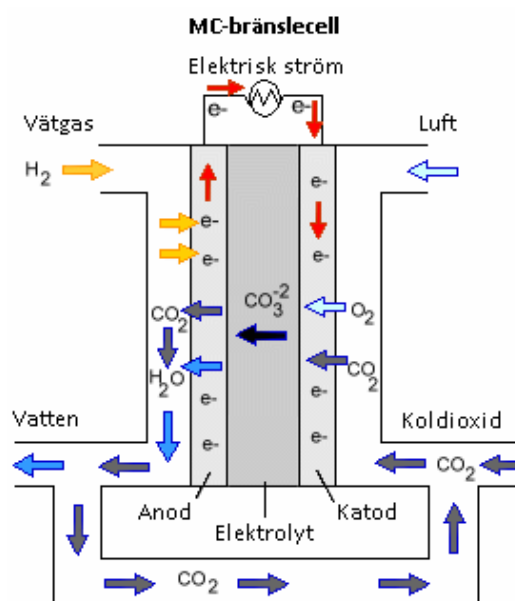
PAFC-cellens största nackdelar är behovet av platina som katalysator vid elektroderna och att effekttätheten trots katalysatorerna ändå är ganska låg jämfört med t.ex. PEFC- och SOFC-cellerna. Detta betyder alltså att man måste ha betydligt större PAFC-celler för att få samma effekt ur systemet.

PAFC-cellerna är i stort sett färdigutvecklade och ingen större forskning sker längre kring tekniken som används i dem, man förväntar sig också att andra typer av bränsleceller kommer att gå förbi i utveckling av både teknik och lönsamhet. De viktigaste användningsområdena är stationära anläggningar där man då också kan utnyttja

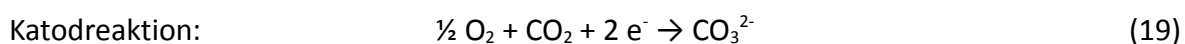
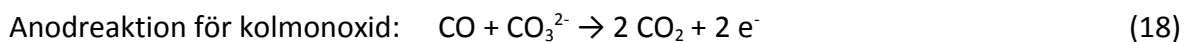
värmeenergin som bränslecellen avger, för tillfället används de t.ex. som reservkraft på sjukhus, hotell, telefoncentraler, samt av militären. Man beräknar att anläggningar motsvarande ca 75 MW har sålts och installerats, och nu är i bruk. (Pihlatie, 2003, s.12-13; FCTec, u.å.c).

4.3.4 Smältkarbonatbränsleceller (MCFC)

Smältkarbonatbränslecellerna, MCFC, har elektroder av nickelbaserade material. Anoden är tillverkad av poröst nickel där man har tillsatt oxider för att förhindra sintring i den höga arbetstemperaturen på ca 650 °C, katoden är tillverkad av litiumbehandlad, sintrad nickeloxid. Elektrolyten består vanligen av salterna litium/kaliumkarbonat eller litium/natriumkarbonat i litiumaluminat och är i fast form vid rumstemperatur men övergår i flytande form vid upphettning till bränslecellens arbetstemperatur. Tack vare den höga arbetstemperaturen klarar MCFC-cellerna av att utnyttja både kolmonoxid och väte som bränsle, som vid anoden reagerar med karbonatjoner från elektrolyten. Då väte reagerar bildas koldioxid, vatten och fria elektroner medan då kolmonoxid reagerar bildas endast koldioxid och fria elektroner. De fria elektronerna reagerar vid katoden med koldioxid samt syre och bildar då nya karbonatjoner till elektrolyten. (Pihlatie, 2003, s.13; Crawley, 2007b, s.1-2; FCTec, u.å.d).



Figur 8. Schematisk bild över uppbyggnad och flöden i en PE-bränslecell. Då kolmonoxid fungerar som bränsle kommer också koldioxid att finnas med som restprodukt. (Bildtexter översatta från engelska till svenska. Ursprunglig bild (U.S. Department of Energy, u.å)).



(Pihlatie, 2003, s.4).

Storleken på en anläggning är vanligen från några hundra kW upp till 5 MW. Den elektriska verkningsgraden är normalt kring 60 % och då spillvärmerna utnyttjas kommer man upp i en totalverkningsgrad på drygt 80 %. (Crawley, 2007b, s.8-9; U.S. Department of Energy, u.å.b).

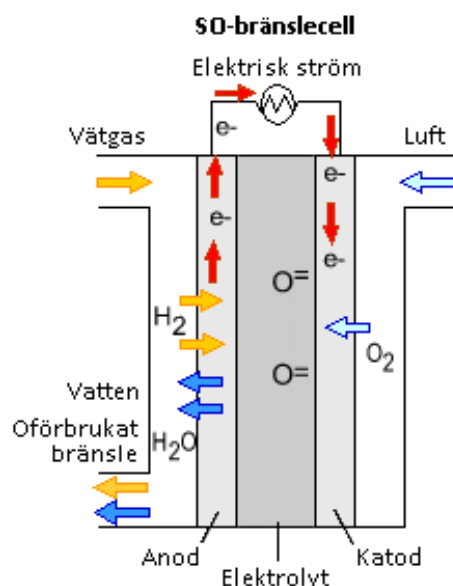
Den höga arbetstemperaturen bidrar med många goda egenskaper hos MCFC-cellerna. Såsom redan nämdes kan de utnyttja kolmonoxid som ett bränsle, vilket tillsammans med den höga temperaturen gör det möjligt att utföra en egen reformering av kolväten till bränsle. Koldioxid kan igen utnyttjas genom att avskilja och leda den till katoden för att där bilda nya karbonatjoner i en reaktion med syre och fria elektroner. Man behöver inte dyra katalysatorer av ädelmetaller utan kan använda sig av betydligt billigare nickelbaserade material i elektroderna och på det viset tillverka förmånligare bränsleceller. (Crawley, 2007b, s.2; U.S. Department of Energy, u.å.b).

En del av MCFC-cellens nackdelar är också en följd av den höga arbetstemperaturen. Den största nackdelen är att det tar en lång tid att köra igång den här typen av bränsleceller, därtill reagerar den dåligt på variationer i effektbehov. Den höga temperaturen tillsammans med elektrolyten ger också en del korrosionsproblem vid elektrolyterna vilket förkortar hela bränslecellens livstid. Nackdelar som inte beror på temperaturen är den vätskeformade elektrolyten som medför tätningsproblem och risker för läckage. Dessutom måste koldioxidmolekyler tillföras vid katoden eftersom karbonatjonerna i elektrolyten förbrukas och måste ersättas av nya för att processen skall kunna fortgå. Detta betyder att man måste avskilja koldioxid både vid anoden och från luften, sedan måste man också ha ett system som hela tiden kontrollerar och reglerar mängden koldioxid som körs in tillsammans med syre vid katoden. (Crawley, 2007b, s.2; FCTec, u.å.d).

Forskningen inom MCFC-cellerna är främst koncentrerad till att förlänga bränslecellernas livslängd, genom att ta fram nya material och legeringar som tål korrosion från elektrolyten bättre, eller genom att ändra på bränslecellens uppbyggnad så att korrosionen förhindras eller åtminstone bromsas upp. P.g.a. den långa starttiden och den dåliga reaktionen på variationer i effektbehovet begränsas MCFC-cellernas användningsområde till olika typer av kraftverk där bränslecellen kan vara igång konstant. Även på det området förväntas dock fastoxidbränslecellerna gå förbi i utvecklingen och bli det vanligare alternativet. (FCTec, u.å.d.; U.S. Department of Energy, u.å.b).

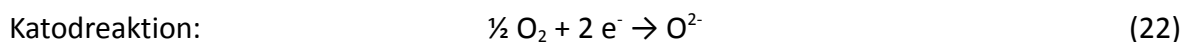
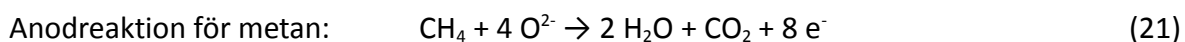
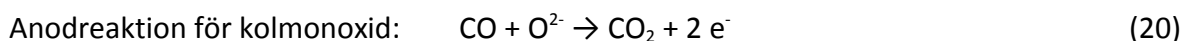
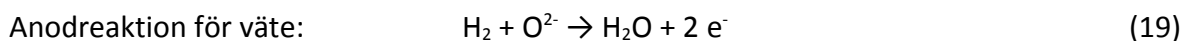
4.3.5 Fastoxidbränsleceller (SOFC)

Fastoxidbränslecellernas, SOFC, elektrolyt består av fasta keramiska material, vanligen zirkoniumoxid (ZrO_2) stabiliserat av yttriumoxid (Y_2O_3), ofta förkortat YSZ (Yttria-Stabilized Zirconia). Detta keramiska material ingår också i anoden som vanligtvis tillverkas genom sintring av YSZ och nickel, katoden består i sin tur vanligen av en blandning av lantan, strontium och mangan, La-Sr-Mn. SOFC-cellerna har den högsta arbetstemperaturen av alla bränslecellstyper, vanligen rör den sig kring ca 1000 °C men utvecklingen går mot lägre temperaturer och man har kunnat tillverka bränsleceller som fungerar vid ca 800 °C. Tack vare den höga arbetstemperaturen kan SOFC-cellerna, liksom MCFC-cellerna, använda kolmonoxid som bränsle vid sidan av väte och dessutom kan man här ännu använda metangas direkt som ett bränsle. Reaktionen sker vid anoden där elektroner frigörs från bränslet och går genom strömkretsen till katoden, där reagerar de fria elektronerna med syre från luften och bildar negativt laddade syrejoner. Syrejonerna transporteras genom elektrolyten och beroende på med vilket bränsle reaktionen där sker bildas vatten och/eller koldioxid. (Pihlatie, 2003, s.14-15; Crawley, 2007c, s.1).



Figur 9. Schematisk bild över uppbyggnad och flöden i en PE-bränslecell. Då kolmonoxid eller metan fungerar som bränsle kommer också koldioxid att finnas med som restprodukt.

(Bildtexter översatta från engelska till svenska. Ursprunglig bild (U.S. Department of Energy, u.å)).

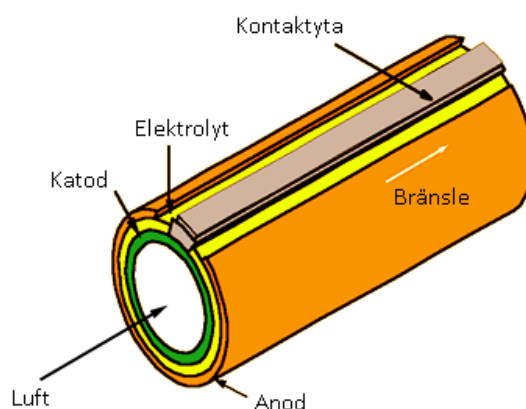


(Pihlatie, 2003, s.4).

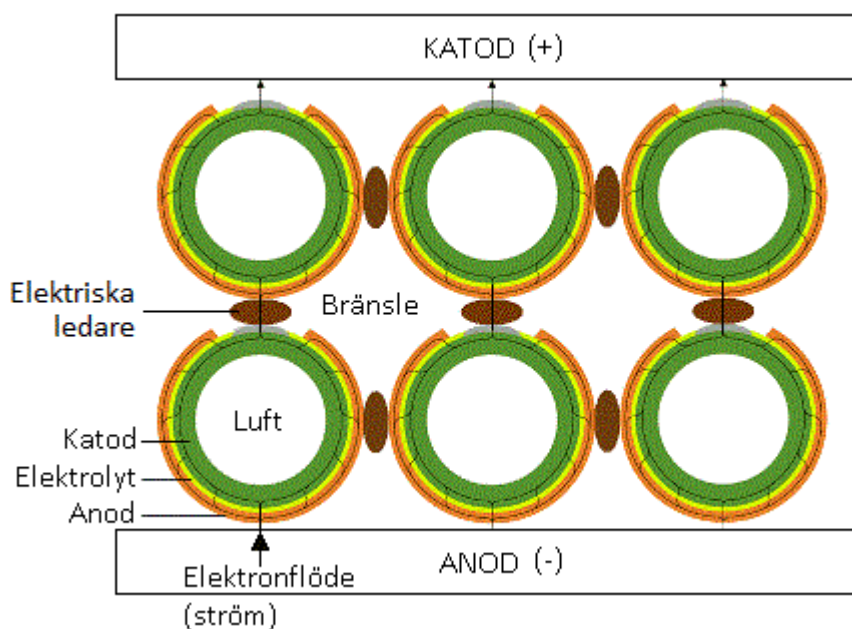
SOFC-cellernas effektområde är ganska brett eftersom den här typen av bränslecell är möjlig att använda både i liten och i stor skala. Exempel på användning i liten skala är t.ex. som kraftkälla för extrautrustning såsom kylaggregat inom transportsektorn, då man behöver några enstaka kW. Samtidigt finns också kraftverk på upp till 300 kW i funktion och 500 kW under planering. Verkningsgraden motsvarar MCFC-cellens på ca 60 % för elproduktion och ca 85 % då man utnyttjar spillvärmens t.ex. för ångreformerings eller uppvärmning av byggnader, effekttätheten är i medeltal 0,27 W/cm² vilket är relativt bra jämfört med t.ex. PAFC- och AFC-cellerna. (Crawley, 2007c, s.4, 13; Staffell, 2009).

SOFC-cellernas utformning är inte närapå lika begränsad som t.ex. MCFC-cellernas eftersom elektrolyten här är i fast form hela tiden, utvecklingen har gått mot två huvudtyper varav den ena modellen är att ha cellen formad som en plan skiva medan den andra modellen är en cylinderformad bränslecell där ena änden är stängd. Med den plana

lösningen byggs cellstackarna precis som vilken annan bränslecell som helst, cellerna staplas utanpå varandra med bipolära plattor mellan cellerna (Figur 4). De cylinderformade bränslecellerna är byggda så att anoden utgör ett yttre skal med ett spår i, katoden fungerar som rörets insida och har en kontaktyta i spåret i anoden för att underlätta sammankopplingen vid byggandet av cellstacken. I en SOFC-cellstack av cylinderformade bränsleceller leds luft in i själva rören, medan bränslet leds in i utrymmet som finns mellan de sammankopplade cellerna. (Pihlatie, 2003, s.15; Crawley, 2007c, s.2).



Figur 10. Uppbyggnad av en cylinderformad SOFC-bränslecell. (Bildtexter översatta från engelska till svenska. Ursprunglig bild (Siemens, u.å.).)



Figur 11. Uppbyggnad av en cellstack då cylinderformade bränsleceller används. En cellstack är givetvis inte begränsad till sex stycken bränsleceller utan kan byggas vidare till önskad storlek. (Bilden gjord av skribenten utgående från genomskärbild vid (Siemens, u.å.).)

Fördelar med SOFC-cellerna är långt desamma som för MCFC-cellerna, d.v.s man kan utnyttja enkla kolväten direkt som bränsle utan att behöva reformera det först, med hjälp av den höga temperaturen kan man också driva ett eget reformeringssystem. Den höga temperaturen betyder också att man inte behöver använda ädelmetaller som katalysatorer. Dessutom har SOFC-cellerna goda egenskaper som inte MCFC-cellerna har. T.ex. det att man inte har så strikta begränsningar på utformningen samtidigt som man kan bygga effektmässigt betydligt mindre system, betyder att den här typen av bränsleceller kan anpassas till betydligt flera områden. Man har inte heller de tätningssystem eller risker för läckage som finns vid användning av MCFC-celler. (FCTec, u.å.e; U.S. Department of Energy, u.å.a).

En del av SOFC-cellernas nackdelar är också liknande som MCFC-cellernas, främst den långa starttiden och den dåliga förmågan att reagera på variationer i elkonsumtionen. Korrosion är också ett problem speciellt vid kontaktmaterialen mellan de enskilda bränslecellerna. Den höga temperaturen ställer också krav på materialen hos bränslecellens övriga delar såsom utrustningen för bränsletillförsel samt på isoleringen. (Pihlatie, 2003, s.15-16; FCTec, u.å.e; U.S. Department of Energy, u.å.a).

4.4 Framtidsutsikter för användning hos den enskilda konsumenten

De bränsleceller som antas bli kommersiellt viktiga i framtida användning är främst polymerelektrolyt- och fastoxidbränslecellerna. Vid elförsörjning i liten skala verkar direktmetanolversionen av PEFC-bränslecellen för tillfället vara den intressantaste lösningen och kommer antagligen ännu att utvecklas mot en högre verkningsgrad än i dagens läge. Om direktetanolbränsleceller kan utvecklas till en lika bra verkningsgrad som för metanol kan de t.o.m. bli ett bättre alternativ då etanol är mindre farligt för användaren. Den lätta hanteringen av bränsle är ett av de viktigaste kriterierna för användning i bärbara apparater och det är dessa bränslecellers största fördel i jämförelse med vanliga PEFC-bränsleceller.

Vid elproduktion och uppvärmning av byggnader i liten skala, under 200 kW, verkar både PEFC- och SOFC-cellen vara potentiella modeller, båda har sina fördelar och nackdelar vid den här typen av användning.

PEFC-cellerna har en lämpligare arbetstemperatur för det här ändamålet då man tänker ur säkerhetssynpunkt, den höga effekttätheten samt kompakta uppbyggnaden ger också betydligt mindre skrymmande bränsleceller som dessutom kan startas upp på relativt kort tid. Samtidigt ger den låga temperaturen inte möjligheten att utföra en egen reformering av kolväte, dessutom behövs betydligt renare vätgas än vad som fås genom ångreforming.

SOFC-cellernas höga arbetstemperatur ger flera goda möjligheter, från att helt enkelt utnyttja den för uppvärmning av vatten och byggnader till att ångreformera sitt eget bränsle från kolväten och också använda enkla kolväten direkt som bränsle. Det senare ger en betydligt lättare bränslehantering än då ren vätgas används. Ett alternativ är också att utnyttja värmen till att generera vattenånga och driva en ångturbin precis som i ett traditionellt kraftverk, på så sätt kunde man uppnå ännu högre elektriska verkningsgrader. Den höga temperaturen kräver dock att anläggningen isoleras väl för att skydda användare och kringvarande byggnader, detta betyder att anläggningarna blir rätt så skrymmande. Såsom tidigare också nämndes är SOFC-cellen inte heller lika flexibel som PEFC-cellen samt att den kräver betydligt längre tid för att köras igång.

5 Sammanfattning

Vätgas som energibärare kan mycket väl bli en ersättare för traditionella bränslen i framtiden, de största hindren verkar för tillfället vara bristen på ett ordentligt distributionsnät, samt de höga kostnaderna för både vätgastillverkning och -lagring. Kostnaderna kan sänkas både genom utveckling av effektivare mera lätthanterliga lagringsmetoder, samt genom att storskalig tillverkning kommer igång, men för att få uppbyggt ett vettigt distributionsnät krävs en betydligt större efterfrågan än i dagens läge. Efterfrågan byggs i sin tur upp av ett större utbud av apparatur, vilket samtidigt betyder att det måste finnas enkel tillgång till bränsle. Fördelarna med vätgas som

energibärare är främst dess mångsidighet då man kan lagra energi av flera olika typer genom att tillverka vätgas samt att då vätgasen används uppstår inga utsläpp av växthusgaser. De största nackdelarna är att man måste tillverka vätgasen genom att lösgöra den från olika kemiska föreningar innan man kan utnyttja den som bränsle samt att den på grund av sin enkla atomära struktur är ganska svårhanterlig och kan läcka t.o.m. från lufttäta behållare. Utvecklingen pågår hela tiden för att förbättra verkningsgraden hos de traditionella metoderna och för att ta fram nya metoder för både tillverkning och lagring av vätgas,

Bränslecellerna ses som ett vettigare sätt att använda vätgas än direkt förbränning i förbränningsmotorer eftersom verkningsgraden i regel är betydligt högre samt för att man då slipper utsläppen av kväveoxider som förekommer då vätgas förbränns i luft. Tekniken i en del typer av bränsleceller är redan färdigutvecklad, men de polymerelektrolyt- och fastoxidbränsleceller som förutspås bli viktiga för konsumentmarknaden i framtiden är ännu under utveckling. PE-bränslecellerna ses som framtidens drivkraft i trafiksammanhang, medan direktmetanolversionen av PE-cellen är den modell som verkar allra mest lovande för ersättandet av de traditionella batterierna i t.ex. bärbara datorer eller mobiltelefoner och metanolbränsleceller har redan börjat dyka upp på marknaden. Fastoxidbränslecellerna förutspås bli den viktigaste typen av bränslecell för elproduktion t.ex. som reservkraft vid exempelvis gsm-stationer, radarstationer, sjukhus o.s.v. eller som kombinerad el- och värmekälla för byggnader. Största bromsande orsaken för att bränslecellerna skall slå igenom på marknaden är än så länge det höga priset. Detta beror dels på de dyra material som behövs som katalysatorer för att försnabba reaktionerna i de bränsleceller som fungerar vid låg temperatur, eller de material som krävs för att klara av den höga temperaturen i t.ex. fastoxidbränslecellerna. Bränslecellernas höga pris beror delvis också på de låga produktionsvolymerna som inte ännu gör tillverkning på löpande band ekonomiskt lönsamt.

6 Egna kommentarer

Då jag påbörjade examensarbetet var meningen att litteraturstudien skulle fokusera på vätgasanvändning för produktion av elektricitet i liten skala med en tekniköversikt och en kartläggning av produkter lämpliga för konsumenter som finns på marknaden i dagsläget. Redan i första skedet då jag samlade in material för arbetet insåg jag att det inte går att skriva om ämnet som sådant utan att bränslecellen som koncept utgör en stor del av arbetet. Då jag sedan också samlade in fakta om bränsleceller, dök det hela tiden upp sådant material som jag ansåg vara viktigt för en intresserad läsare som inte ännu har så djupgående kunskaper inom ämnet bränsleceller, såsom jag själv som läsare innan jag inledde detta arbete. Arbetet blev därför mer och mer en tekniköversikt av vätgastillverkning och -lagring, samt en översikt av olika typer av bränsleceller, deras egenskaper och lämplighet för olika områden.

Under arbetets gång har jag lärt mig en hel del nytt om ett ämne som jag nog har haft ett visst intresse och baskunskaper för, men aldrig riktigt satt mig in i. Källorna som har använts i detta arbete är till största delen från internet, både i form av artiklar och i form av rapporter som publicerats i pdf-format. Tidsmässigt är de flesta källor ungefär från mitten av 2000-talet och vissa uppgifter om t.ex. verkningsgrader kan ha förändrats sedan dess, många artiklar saknar också utgivningsår. Prisuppgifter har jag medvetet lämnat bort eftersom gamla uppgifter verkar variera stort mellan tillverkare och ofta krävs en offertförfrågan för att få kostnader för skräddarsydda paket. Priserna ändrar också ständigt då man utvecklar nya tillverkningsmetoder och material.

Källförteckning

- Abrahamsson H. (2009). *Vätgas i motorn ger verkningsgrad på topp*.
http://www.nyteknik.se/nyheter/fordon_motor/motor/article260033.ece
 (hämtat 10.3.2011).
- Andersson N. (2001). *Oljeshejker skolas om till vätgasbaroner*.
http://www.nyteknik.se/nyheter/it_telekom/allmant/article219242.ece
 (hämtat 13.2.2011).
- Chalmers tekniska högskola. (u.å.a). *Utvecklingshistoria*.
<http://fy.chalmers.se/~f1xjk/FysikaliskaPrinciper/Projekt/Projekt30/historia.html>
 (hämtat 15.2.2011).
- Chalmers tekniska högskola. (u.å.b). *Vad är en bränslecell*.
<http://fy.chalmers.se/~f1xjk/FysikaliskaPrinciper/Projekt/Projekt30/vadar.html>
 (hämtat 17.2.2011).
- Crawley G. (2006a). *Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells*.
http://www.fuelcelltoday.com/media/pdf/archive/Article_1084_PEM%20article.pdf
 (hämtat 21.2.2011).
- Crawley G. (2006b). *Alkaline Fuel Cells (AFC)*.
http://www.fuelcelltoday.com/media/pdf/archive/Article_1087_AFC.pdf
 (hämtat 22.2.2011).
- Crawley G. (2007a). *Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)*.
http://www.fuelcelltoday.com/media/pdf/archive/Article_1194_DMFC%20Technology%20Article.pdf (hämtat 21.2.2011).
- Crawley G. (2007b). *Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)*.
http://www.fuelcelltoday.com/media/pdf/archive/Article_1161_MCFC%202007.pdf
 (hämtat 22.2.2011).
- Crawley G. (2007c). *Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)*.
<http://www.fuelcelltoday.com/media/pdf/surveys/2007-SOFC-Survey.pdf>
 (hämtat 22.2.2011).
- Deschamps A., Etievant C., Fateev V., Grigoriev S., Kalinnikov A., Millet P., Poremsky V., Puyenchet C. (2006). *Development of advanced PEM water electrolyzers*.
http://www.ceth.fr/download/presse/art_ceth_4.pdf (hämtat 29.3.2011).
- Elding L.I., Raldow W. & Österberg C-J. (u.å.). *Väte*.
 Nationalencyklopedin.
<http://www.ne.se/lang/vate/347979> (hämtat 28.2.2011).
- Fuel Cell Test and Evaluation Center. (u.å.a). *Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)*.
http://www.fctec.com/fctec_types_dmfc.asp (hämtat 22.2.2011).
- Fuel Cell Test and Evaluation Center. (u.å.b). *Alkaline Fuel Cells (AFC)*.

http://www.fctec.com/fctec_types_afc.asp (hämtat 22.2.2011).

Fuel Cell Test and Evaluation Center. (u.å.c). *Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)*.
http://www.fctec.com/fctec_types_pafc.asp (hämtat 22.2.2011).

Fuel Cell Test and Evaluation Center. (u.å.d). *Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC)*.
http://www.fctec.com/fctec_types_mcfc.asp (hämtat 21.2.2011).

Fuel Cell Test and Evaluation Center. (u.å.e). *Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)*.
http://www.fctec.com/fctec_types_sofc.asp (hämtat 21.2.2011)

Fuel Cells 2000. (u.å.). *Hydrogen Basics*.
<http://www.fuelcells.org/hydrogen/basics.html> (hämtat 17.2.2011).

Gummer J. & Hawksworth S. (2008). *Spontaneous ignition of hydrogen*.
UK Health and Safety Executive
www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr615.pdf (hämtat 7.3.2011).

Himanen O. (2003). *Vetyteknologiat. Vedyn varastointi*.
Espoo: Teknillinen Korkeakoulu.
www.tkk.fi/Units/AES/courses/crspages/Tfy-56.170_03/Tfy-56.170_03-Loppuraportti.pdf
(hämtat 1.3.2011).

IT Power. (u.å.) *Electrolyser*.
<http://www.itpower.co.uk/investire/pdfs/electrolyser.pdf> (hämtat 23.2.2011)

Jönsson H. (2006). *Vätgasens historia i Sverige. Aktörer och aktiviteter inom vätgas- och bränslecellsområdet mellan 1960 och 2005*. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola.
www.esa.chalmers.se/Publications/PDF-files/TR/ESA20061.pdf (hämtat 16.2.2011).

Karlsson A. (2001). *Vätgasinblandning i CNG*.
Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola samt Svenskt gastekniskt center Ab.
www.sgc.se/dokument/sgc122.pdf (hämtat 23.2.2011).

Llanos M. (2004). *A future for glass in a hydrogen economy*.
http://www.msnbc.msn.com/id/5343023/ns/us_news-environment/
(hämtat 9.3.2011).

Lehtolainen A. (2003). *Vetyteknologiat. Elektrolyysi ja fotolyysi*.
Esbo: Helsinki University of Technology.
www.tkk.fi/Units/AES/courses/crspages/Tfy-56.170_03/Tfy-56.170_03-Loppuraportti.pdf
(hämtat 1.3.2011).

Lundbom J. (2003). *Vetyteknologiat. Nestevely*.
Esbo: Helsinki University of Technology.
www.tkk.fi/Units/AES/courses/crspages/Tfy-56.170_03/Tfy-56.170_03-Loppuraportti.pdf
(hämtat 1.3.2011).

Lunds Tekniska Högskola. (2010). *Ny bakterie fördubblar vätgasproduktionen*.

[http://www.lth.se/omlth/aktuellt/visa_nyhet/?no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=1137&tx_ttnews\[backPid\]=4](http://www.lth.se/omlth/aktuellt/visa_nyhet/?no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=1137&tx_ttnews[backPid]=4) (hämtat 21.2.2011).

Matemaattisten Aineiden Opettajien Liitto. (2000). *MAOLs tabeller: matematik, fysik, kemi*. 7 uppl. Svensk översättning av Nils Jansson. Esbo: Schildts Förlags Ab

Mikkola M. (2003). *Vetyteknologiat. Biologinen vedytuotanto*.

Esbo: Helsinki University of Technology.

www.tkk.fi/Units/AES/courses/crspages/Tfy-56.170_03/Tfy-56.170_03-Loppuraportti.pdf (hämtat 1.3.2011).

New York State Energy Research and Development Authority. (u.å.). *Hydrogen Production – Steam Methane Reforming*.

www.getenergysmart.org/files/hydrogeneducation/6hydrogenproductionsteammethanereforming.pdf (hämtat 1.3.2011).

Noponen M. (2003). *Vetyteknologiat. Vedyn tuotantotavat – Reformointi*.

Esbo: Helsinki University of Technology.

www.tkk.fi/Units/AES/courses/crspages/Tfy-56.170_03/Tfy-56.170_03-Loppuraportti.pdf (hämtat 1.3.2011).

Pihlatie M. (2003). *Vetyteknologiat – Polttokennot*.

Esbo: Helsinki University of Technology.

www.tkk.fi/Units/AES/courses/crspages/Tfy-56.170_03/Tfy-56.170_03-Loppuraportti.pdf (hämtat 1.3.2011).

Staffell I. (2009). *A review of small stationary fuel cell performance*.

University of Birmingham.

www.fuelcells.bham.ac.uk/documents/review_of_fuel_cell_performance.pdf (hämtat 16.3.2011)

Stjerna M. (2006). *I serieproduktion: Vätgasdrivna BMW 760*.

http://www.teknikensvarld.se/provkorningar/bmw_1/hydrogen_7/index.xml (hämtat 10.3.2011).

Svensk Biogas. (u.å.). *Produktion*.

<http://www.svenskbiogas.se/sb/biogas/produktion/> (hämtat 2.3.2011).

U.S. Department of Energy. (u.å.a). *Gaseous and Liquid Hydrogen Storage*.

http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/hydrogen_storage.htm (hämtat 3.3.2011).

U.S. Department of Energy. (u.å.b). *Types of Fuel Cells*.

http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html (hämtat 21.2.2011).

Wikipedia. (u.å.a). *Väte*.

<http://sv.wikipedia.org/wiki/Väte> (hämtat 11.3.2011).

Wikipedia. (u.å.b). *Entalpi*.
<http://sv.wikipedia.org/wiki/Entalpi> (hämtat 4.3.2011).

Wikipedia. (u.å.c) *Fuel Cell*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell (hämtat. 15.3.2011).

Vätgas Sverige. (u.å.a). *Miljö*.
<http://www.vatgas.se/fakta/miljoe> (hämtat 21.2.2011).

Vätgas Sverige. (u.å.b). *Så produceras vätgas*.
<http://www.vatgas.se/fakta/produktion> (hämtat 21.2.2011).

Figurer:

Figur 2. Ovidiu Sandru. (2010). *New Catalyst for Electrolysis Reduces Costs by 97% and Increases Hydrogen Production Fourfold*.
<http://www.greenoptimistic.com/2010/05/19/gridshift-electrolysis-catalyst/>

Figur 3. H-Tec (2011). *Transparencies – Renewable Energy, Fuel Cell Technology*.
<http://www.h-tec.com/portal/download.php?objectId={EE998E0D-3173-3ECF-6569-E0CE742EFFBA}&index=0> (hämtat 30.3.2011).

Figur 4. Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science, (DoITPoMS). (2006).
University of Cambridge
<http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/printall.php> (hämtat 24.3.2011)

Figur 5-9. U.S. Department of Energy. (u.å.b).
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html
(hämtat 21.2.2011).

Figur 10-11. Siemens. (u.å.) *The Principle Behind the Technology*.
<http://www.energy.siemens.com/br/en/power-generation/fuel-cells/principle-behind-technology.htm#content=Tubular%20Design> (hämtat 27.3.2011)