Utgivningsår 2013



Artificiell fotosyntes

Energi från sol och vatten



Publikationer utgivna av Energimyndigheten
kan beställas eller laddas ned via www.energimyndigheten.se
eller beställas genom att skicka e-post till
energimyndigheten@cm.se eller per fax: 08-505 933 99

© Statens energimyndighet
ET2013:04
April 2013
Upplaga: 1000 ex
Grafisk form: Granath
Tryck: Arkitektkopia AB
Foto: Shutterstock, Energimyndigheten, Per Westergård, Stock.xchng
Illustration: Ellenor Olsson, Energimyndigheten

Förord

En av de största utmaningarna som mänskligheten står inför idag är att hitta sätt att omvandla energi till former som vi kan använda oss av, utan att i onödan belasta vår miljö eller påverka jordens klimat. Ett exempel på detta är transportsektorn, som just nu står inför en stor omställning då Sverige har satt upp nationella mål om en fossiloberoende fordonsflotta till år 2030. Vidare kommer utökade möjligheter till lagring av energi att vara en förutsättning för en ökad användning av förnybara energikällor i samhället.

Energimyndigheten stödjer forskning, utveckling, demonstration och kommersialisering av produkter och tjänster som bidrar till att skapa ett hållbart energisystem. Strävan bakom satsningarna är att resultaten ska nyttiggöras och ge önskade samhällseffekter.

I denna broschyr presenteras en av Energimyndighetens långtgående satsningar, nämligen forskningen inom konsortiet för artificiell fotosyntes. Detta är den tredje upplagan av broschyren, som har revideras efter hand som nya forskningsresultat har tagits fram och horisonten för vad som kan vara möjligt att göra inom det här området har flyttats framåt. Med fortsatt utveckling kan detta bli ett värdefullt bidrag i framtidens hållbara energisystem.

Anders Lewald,
stf avdelningschef teknikavdelningen

Solbränslen – ett sätt att lagra solenergi

Varje år strålar enorma mängder solljusenergi in över jorden, och även hos oss i norr. Sammanlagt är energimängden i solinstrålning över Sverige ca 400 000 TWh per år. Som jämförelse ligger Sveriges årliga energianvändning på strax över 400 TWh. Frågan är hur solenergin på ett enkelt och kostnadseffektivt sätt kan omvandlas till användbar energi i alla de former som vi använder: bränsle för industrier och som drivmedel, el och värme. Dessvärre är solinstrålningen som minst på vintern när det är mörkt och kallt och energibehovet är som störst. Även på sydligare breddgrader ställer den varierande tillgången på solljus under dygnets timmar höga krav på teknik som utnyttjar solenergi.

För att solenergi ska bli användbart i större skala behöver den kunna lagras i form av någon lämplig energibärare. Bränslen är energibärare som kan lagras och transporteras, för att sedan användas när energin behövs. Bränslen har högre energitäthet än andra energilagringsmedier, och de flesta bränslen går lätt att transportera. Ett bränsle som framställs direkt med hjälp av solenergi, kallas med ett nytt begrepp för solbränsle. Ett solbränsle kan i princip vara vilket bränsle som helst, men det vanligaste tilltänkta solbränslet som forskare och ingenjörer talar om är vätgas.


Bränslecells-
buss
BRÄNSLECELLBUSS







Vätgas, framtidens energibärare?

Vätgas är ett bränsle med högt energiinnehåll. Det är väl lämpat som drivmedel, för uppvärmningsändamål och för elproduktion. Teknik för lagring, transport och förbränning av vätgas har nått långt i utvecklingen redan, och är på frammarsch i Sverige och i övriga Europa. Om man lyckas framställa vätgas med hjälp av solenergi är den dessutom miljövänlig. Vid förbränning bildas vatten som restprodukt och det sker inga direktutsläpp av koldioxid alls. Man kan också omvandla energin som lagrats i from av vätgas till el i bränsleceller – en mycket lovande teknik som i allt större utsträckning testas av bilindustrin.

För att vätgas som energibärare skall bli en del av ett uthålligt energisystem måste tekniken utvecklas vidare. Vätgas är skrymmande i förhållande till sin vikt, vilket försvårar användningen vid lagring och långväga transporter. Alla dessa aspekter kräver en teknikutveckling innan vi kan börja använda vätgas i samhället. Enligt Internationella energisamarbetets (IEA) bedömningar, kan vätgas som energibärare komma att göra entré på marknaden runt år 2030. År 2050 ser man ett möjligt scenario där så gott som hela transportsektorn består av fordon som drivs med vätgas och el.

Hur fort det går, beror till stor del på om det kommer fram ett kostnadseffektivt och miljövänligt sätt att framställa vätgas på. För att hålla kostnader för infrastruktur och transporter nere, är det önskvärt med små, decentraliserade produktionsanläggningar för vätgasproduktion. Det krävs alltså ett långsiktigt perspektiv när man satsar på teknikutveckling för vätgasanvändning. Om forskningen kring framställning av solbränslen från artificiell fotosyntes lyckas, kan den ge oss betydande bidrag till uthållig produktion av vätgas eller andra bränslen.

Från solenergi till solbränslen – olika tekniker

Tekniker för produktion av bränslen från solenergi kan delas in i direkta och indirekta metoder. Med indirekta metoder omvandlas solenergin först till någon energibärare, som kan användas för bränsleframställning. Exempel på en indirekt metod är solceller som producerar el, där elen utnyttjas för att göra vätgas genom elektrolys av vatten. Direkta metoder för solbränsleproduktion innebär att infångandet av solenergin och bildande av bränslet sker i ett steg, utan mellanled. På så vis kan man få högsta tänkbara utbyte genom att man undviker de energiförluster som sker med indirekta tekniker.

Solceller och elektrolys

Det finns effektiva solceller för elproduktion. Flera olika typer av solceller, såsom kiselbaserade solceller, tunnfilmssolceller, och så kallade våta solceller (Grätzel-celler), är under snabb utveckling. Forskning och utveckling kring solceller för elproduktion är omfattande, och solel är på frammarsch på den globala energimarknaden.

Vätgas kan framställas genom elektrolys av vatten med hjälp av elektrisk ström, från exempelvis en solcell. En elektrisk spänning över två elektroder leder då till att vatten spjälkas till syre och vätejoner, på den ena elektroden. På den andra elektroden reagerar vätejoner och bildar vätgas. Kommersiella apparater som spjälkar vatten till syre och väte på detta sätt innehåller oftast dyra och sällsynta metaller. Detta är en indirekt metod för solbränsleframställning, och eftersom apparaten kopplas till solcellen via kablar medför det ytterligare materialkostnader och energiförluster.

Fotoelektrokemi

En fotoelektrokemisk solcell är ett system där det ljusinfångande materialet och elektroden är ett och samma. Vätgasproduktionen kommer då att ske i själva solcellen, vilket gör den till en direkt metod för framställning av solbränsle. En typ av fotoelektrokemisk cell som är under utveckling är en variant där halvledarmaterialet som utgör fotoelektroden är täckt av ett katalysatormaterial som kan spjälka vatten när halvledaren aktiveras av ljus. Teoretiskt sett kan man uppnå höga verkningsgrader i ett sådant system. Än så länge befinner sig denna teknik på ett grundläggande forskningsstadium.

Fotobiologisk framställning av solbränslen

Cyanobakterier (även kallade blågröna alger) och grönalger är fotosyntetiska mikroorganismer som kan omvandla solens energi till vätgas. Vätgasproduktionen katalyseras i mikroorganismerna av så kallade hydrogenaser – proteiner som både kan producera och konsumera vätgas. Mikroorganismerna använder den mesta solenergin till andra saker än att producera vätgas, och vätgasutvecklingen är därför ganska liten. Å andra sidan får man ut bränslet utan att skörda organismerna, och det finns möjligheter att göra denna process energisnål och miljövänlig.

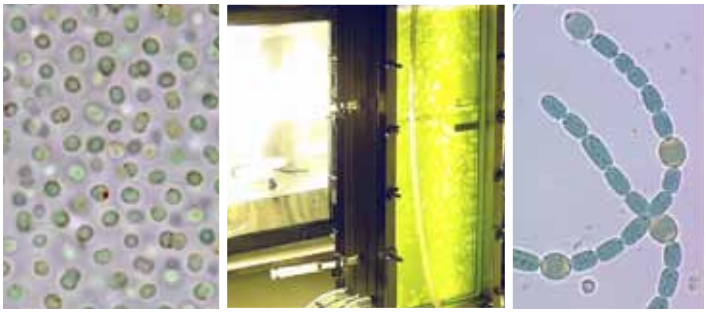
I dagsläget är verkningsgraden för den fotobiologiska vätgasproduktionen låg, men genom att förändra mikroorganismernas arvsanlag (DNA) är det möjligt att förbättra deras förmåga att producera vätgas.

Vätgas är inte det enda solbränslet som kan produceras på biologisk väg. Ett antal forsknings- och utvecklingsprojekt i världen utnyttjar genteknik för att få både cyanobakterier och grönalger att producera andra bränslen. Genom små förändringar i deras

ämnesomsättning kan mikroorganismerna till exempel göra kolväten eller alkoholer som kan användas som bränsle i vanliga motorfordon efter en enkel upparbetning. Utvecklingen på det här området har nått ganska långt, med testanläggningar för storskalig odling av bränsle- producerande alger och cyanobakterier.

Artificiell fotosyntes

Artificiell fotosyntes är, som namnet antyder, ett sätt att på konstgjord väg efterlikna delar av växternas fotosyntes. Vätgas ska produceras genom att spjälka vatten med hjälp av solljus, via fotokemi. Med artificiell fotosyntes skall solljusenergin utnyttjas i en direkt process av ett fotokemiskt system, för att skapa ett solbränsle. Vätgas är det bränsle man framför allt siktar på, men även andra bränslen kan bli aktuella som produkter av den artificiella fotosyntesen.



Olika mikroorganismer som alla kan producera vätgas från sol och vatten: Synechocystis (överst) är en encellig cyanobakterie; Nostoc (nederst) är en trådformig cyanobakterie, som dessutom kan omvandla luftens kväve till viktiga näringsämnen. Cyanobakterierna odlas i en specialgjord bioreaktor (mitten), där ljusmängd, temperatur och tillgång på näringsämnen är noggrannt reglerade. I framtiden kan stora bioreaktorer fulla med cyanobakterier vara en källa till biologiskt framställd vätgas från sol och vatten.



En effektiv energiomvandling

När man uppskattar effektiviteten hos den naturliga fotosyntesen i växter, räknar man ofta bara med det som går att skörda i form av biomassa. Då finner man att bara någon eller några procent av den totala infångade ljusenergin har omvandlats till biomassa.

I naturens fotosyntes är två processer kopplade i omvandlingen av solenergi. Den mest fundamentala processen är de s.k. ljusreaktionerna. Ljusreaktionerna innebär att solenergin fångas in och omvandlas till en kemiskt bunden form av energi. Steg två är de sekundära processerna (”mörkerreaktionerna”). I de sekundära processerna används den bundna energin till att ge livskraft åt växten, att bygga upp växtens delar, och till att föröka sig. Dessa processer har inte utvecklats för att vara energieffektiva, tvärtom är det i dessa steg som mycket av energin förbrukas (”går förlorad” för oss människor). Orsaken till att biomassan innehåller så liten del av ljusenergin är alltså att växten redan har använt energin till annat.

Själva ljusreaktionerna är däremot mycket effektiva. Upp till 30-40 procent av den infångade solenergin bevaras i bunden form, i naturliga kemiska energibärare. Med artificiell fotosyntes vill man härma de effektiva ljusreaktionerna, och utnyttja de kemiska och fysiska principer som ligger bakom. Målet med den artificiella fotosyntesen är inte att härma alla de sekundära processerna, utan att producera ett bränsle med så få mellansteg som möjligt. Solbränsleframställning med artificiell fotosyntes har därför en potential att bli mycket effektiv.

Hur mycket solbränsle kan man producera?

Den teoretiskt maximala verkningsgraden, alltså andelen av den absorberade energimängden som bevaras, uppskattas till ca 40 procent, baserat på jämförelser med den naturliga fotosyntesen. Om man ser till de solceller som finns på marknaden idag, så kan en framtida apparat för solbränsleframställning som baseras på artificiell fotosyntes realistiskt räknat komma att ha en verkningsgrad på 15 procent. Hur mycket användbar energi blir detta?

Låt oss ta ett räkneexempel: Energimängden i solljuset som per år och kvadratmeter strålar in över Sverige, är ca 1000 kWh (kilowattimmar), oavsett om det är i Skåne, Mälardalen eller Norrbotten. Energianvändningen i vanlig svensk enplansvilla



är i runda tal 150 kWh per år och kvadratmeter. Om taket på enplansvillan täcks med en solbränsleapparat, som producerar bränsle från sol och vatten med 15 procent verkningsgrad, räcker alltså bränslet för att täcka villans energibehov. Verkningsgraden är förstås bara hypotetisk, men fullt realistisk.

För att täcka energibehovet hos våra transportsystem skulle solbränsleproduktionen med den hypotetiska apparaten kräva en yta motsvarande mindre än 2 procent av Sveriges landyta. Beräkningarna i exemplen är ungefärliga, men de visar att utveckling av solenergi inte behöver innebära att enorma landytor måste täckas av solfångare.

Konsortiet för Artificiell fotosyntes

Sedan ett årtionde tillbaka ökar forskningen om artificiell fotosyntes och solbränslen runt om i världen. Sverige är ett föregångsland på detta område. För ca 20 år sedan var flertalet forskningsprojekt inom artificiell fotosyntes huvudsakligen fokuserade på att kopiera enskilda molekyler i den naturliga fotosyntesen. Ofta var målsättningen inte direkt kopplad till energiframställning.

Konsortiet för artificiell fotosyntes bildades 1994, med visionen att utveckla ett fullständigt kemiskt system för att producera bränsle direkt från sol och vatten. Inspirationen och idéerna om hur detta skall åstadkommas hämtas direkt från frontlinjerna av forskningen kring den naturliga fotosyntesen.

Från början bestod konsortiet av fyra forskargrupper vid tre svenska universitet: Lunds, Stockholms och Uppsala Universitet. När forskningen växte i omfattning, bestämde sig forskarna för att det var dags att ”flytta ihop”. 2006 flyttade större delen av konsortiet till Uppsala Universitet, och intog nybyggda lokaler på Ångströmslaboratoriet. 2012 växte konsortiet till med ytterligare forskargrupper

från Kungliga Tekniska Högskolan och Uppsala Universitet. En grupp är kvar vid Lunds Universitet, och man har täta kontakter med kollegorna i Uppsala och Stockholm.

I konsortiet för artificiell fotosyntes arbetar forskare som är verksamma över kemins hela spektrum, från fysikalisk kemi och synteskemi, till biokemi och molekylärbiologi. Konsortiet består av ca 60-70 personer med olika specialistkunskaper. Allt för att bidra med så varierad kompetens som möjligt.

Den svenska forskningen började uppmärksammas internationellt i början av 200-talet, och blev en av de viktigaste inspirationskällorna på området. Etablerade forkskargrupper finns nu bland annat i USA, Japan, Frankrike, Tyskland, Sydkorea och Australien. Fortfarande handlar det om grundforskning med målet att producera bränsle genom att härma fotosyntesen. Konsortiet har insett nödvändigheten av att samarbeta över de vetenskapliga ämnesgränserna, och har samlat ihop den expertis som krävs i projektet. Tack vare detta är Sverige alltjämt världsledande inom forskning kring artificiell fotosyntes för energiändamål. Konsortiets forskare är ofta efterfrågade vid internationella konferenser och som experter vid utvärderingar av forskningscentra och forskningsprojekt som rör artificiell fotosyntes.

Kan man plugga artificiell fotosyntes på universitetet?
Sedan några år finns ett utbildningsprogram i kemi på mastersnivå vid Uppsala Universitet. Programmets inriktning är Kemi för förnybar energi, och kan sökas av den som har en kandidatexamen eller motsvarande utbildning inom kemi. Masterutbildningen är tvåårig och innehåller bland annat kurser om fotokemi, artificiell fotosyntes, solceller, batterier, och bränsleceller. Mer information hittar du på: ***http://master.kemi.uu.se/***



Naturen inspirerar

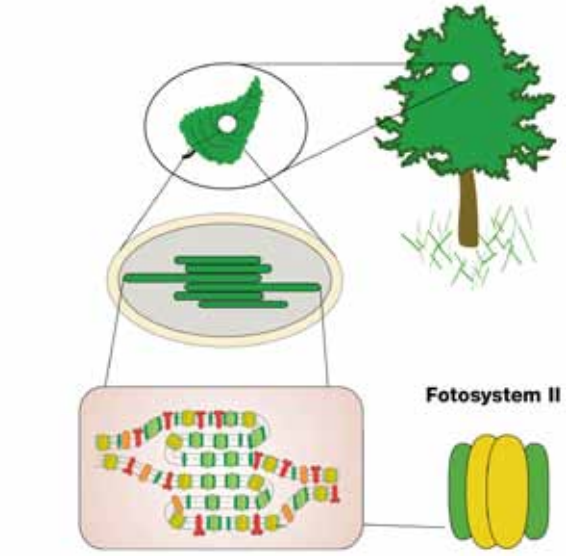
Avsikten med artificiell fotosyntes är att göra bränsle från solenergi med rent vatten som råvara. Den bärande idén är att skapa en fotokemisk katalysator för sönderdelning av vatten, något som alltid betraktats som mycket svårt att uppnå, och sätta ihop den med en katalysator som producerar bränsle. Komponenterna skall allra helst vara gjorda av ämnen som är vanliga i jordskorpan, för att de ska bli billiga att tillverka. Artificiell fotosyntes kan utvecklas tack vare kvalificerad kunskap om de naturliga kemiska processerna. Ett viktigt led i forskningsarbetet är därför att studera kemiska nyckelreaktioner i naturen.

I fotosyntesen fångar växterna först in solenergi. Energin används för att spjälka (sönderdela) vatten, och därigenom binda energin. Till sist används den bundna energin för att växten ska växa och föröka sig. När vatten spjälkas bildas det syre vi andas, som en sorts ”avgas”. Vid vattenspjälkningen frigörs elektroner och vätejoner, som båda är viktiga för att bilda energibärande molekyler. I det artificiella system som konsortiet fokuserar på, skall elektronerna och vätejonerna användas till att göra vätgas. Kruxet är att åstadkomma vattenspjälkningen. Det är svårt!

I alla växter och alger finns enzymer, bundna i biologiska membran, och som kan liknas vid små soldrivna generatorer. Inuti dessa flyttas elektroner, med solljusets hjälp, från ena sidan av membranet till den andra. På så vis skapas en spänning, ett

energirikt tillstånd, över membranet som enzymerna sitter i.

Det speciella enzym som forskarna är intresserade av att kunna härma, kallas Fotosystem II. Fotosystem II skapar och upprätthåller nämligen spänningen i membranet, genom att fånga in ljus och använda energin till att spjälka vattenmolekyler. När Fotosystem II flyttar elektronerna till den ena sidan av membranet, måste nya elektroner skjutas till hela tiden. Fotosystem II har förmågan att fylla på elektrondepåerna genom att ta elektroner från vatten, och på så sätt omvandla solenergin till en form som växten kan använda.

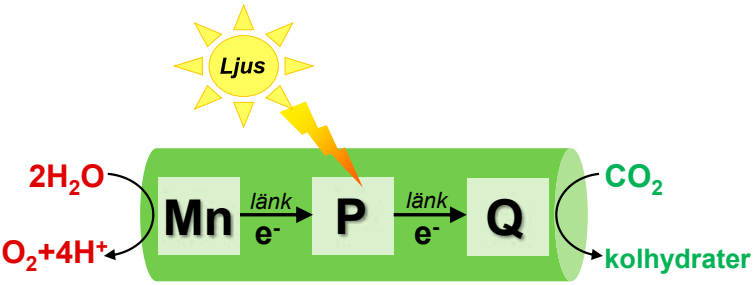


Det är i bladen det händer. Ljuset absorberas av det gröna färgämnet klorofyll. I bladens kloroplaster finns klorofyllet i membranbundna enzymer. Fotosystem II är ett av dem. Det är som ett litet solkraftverk som skapar energirika ämnen av sol och vatten.

Energiomvandling i fotosyntesen – steg för steg

Det går till såhär: Inuti Fotosystem II finns klorofyllmolekyler som absorberar solljus. När klorofyllet (P) har laddats med extra energi av ljuset, skickar det ut en elektron till elektronbärande ämnen i membranet (kinoner, Q). ”Elektronhålet” som då uppstår måste fyllas på, och en elektron flyttas därför till klorofyllet från ett grupp atomer av metallen mangan, som bildar ett komplex. Mangankomplexet (Mn) drar i sin tur ut elektroner från vattenmolekyler (H_2O), som binds vid manganets yta. Vattenmolekylerna spjälkas på så vis sönder, och det bildas syrgas.

Vattenspjälkningen sker på ena sidan av membranet, och elektronerna transporteras till den andra sidan för att det inte skall bli ”kortslutning”. I slutändan bevaras den absorberade solenergin genom att elektronerna som tagits från vattnet används för att bygga upp kolhydrater av luftens koldioxid (CO_2). Elektronerna är ”klistret” som får kolhydraterna att hålla ihop.



Principerna bakom fotosyntesens energiomvandling: Ljuset absorberas av klorofyllmolekyler (P). Elektroner (e-) strömmar då från ett mangankomplex (Mn) till ämnen som accepterar elektronerna (Q). Elektronerna slutar sin resa med byggandet av kolhydrater, med luftens koldioxid (CO_2) som byggmaterial. Elektronerna tas från början ur vatten (H_2O), med mangan (Mn) som katalysator. När vatten spjälkas, bildas syre (O_2) och vätejoner (H+).

Ljus och vatten!

Vattenspjälkning och elektrontransport – det verkar komplicerat. Varför är det så krångligt? Inuti en vanlig solcell flyttar eletroner också på sig med solenergins hjälp. Där vandrar elektronerna först i halvledaren och sedan ut i den elektriska ledningen där energin gör nytta. Till slut kommer elektroner tillbaka till halvledaren i den slutna kretsen. Men om man vill omvandla solenergi till ett bränsle så kan man inte ha en sluten krets. Elektronerna måste användas till att skapa bränslet ochdå krävs någon form av elektronkälla. Vatten finns det gott om på vår jord, och och om vi kan lära oss att ta elektroner från vatten på ett effektivt sätt kan vi skapa en outtömlig energikälla. Sökandet efter en bra katalysator som kan göra jobbet är därför i full gång.

Fotosystem II är nyckeln till nästan allt liv vi känner idag. Hemligheten är att det använder en outtömlig elektronkälla, vatten, och en outtömlig energikälla, solen. Tack vare Fotosystem II är växter och alger de dominerande livsformerna på jorden. Där det finns vatten och ljus, där finns det liv. Fotosystem II är därför förebilden under utvecklingen av artificiell fotosyntes.

Från naturlig till artificiell fotosyntes

Inom konsortiet för artificiell fotosyntes arbetar man med principer hämtade från naturen, men utvecklar också nya kemiska system som inte har sin motsvarighet i naturen. Istället för klorofyll, använder man syntetiska föreningar med ädelmetallen rutenium som ljusinfångande material. De har egenskaper som liknar klorofyllets, det vill säga ruteniumkomplexen kan absorbera ljus och ge och ta elektroner på liknande sätt som klorofyllet i Fotosystem II.

Ruteniumkomplex används också för att fånga in ljus i s.k. Grätzelsolceller, där ruteniumkomplexen har visat sig vara mycket stabila och hålla i åratal. Dessutom är ruteniumkomplex lätta att använda som byggstenar när man bygger mer komplicerade molekyler.

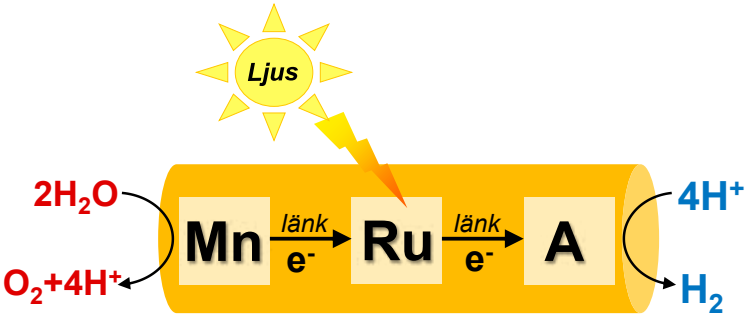
I Fotosystem II sker vattenspjälkningen med hjälp av metallen mangan, som är vanligt förekommande i jordskorpan. Konsortiet har arbetat länge med att ta fram katalysatorer gjorda av mangan för att härma Fotosystem II så mycket som möjligt. Men även andra metaller är intressanta för att utveckla en vattenoxiderande katalysator.

Ett kemiskt modellbygge

Konsortiet utvecklar den artificiella fotosyntesen stegvis, genom att lägga bit till bit och gradvis bygga upp större molekyler där komponenterna sitter i ett liknande arrangemang som i Fotosystem II. Tanken är att efterhärma det händelseförlopp som sker när växternas Fotosystem II omvandlar energin i solljuset till en kemiskt bunden form. Så här kan det artificiella systemet fungera:

När ljuset träffar ruteniumet (Ru) skickas en elektron till acceptordelen (A) av supermolekylen. Elektronhålet i ruteniumkomplexet fylls igen när en elektron transporteras från mangankomplexet (Mn) till rutenium. Mangankomplexet tar i sin tur elektroner från vattenmolekyler (H_2O). Resultatet av den här händelsekedjan blir att det frigörs elektroner som kan användas till att bilda ett bränsle. Dessutom bildas vätejoner (H+) och syrgas (O_2).

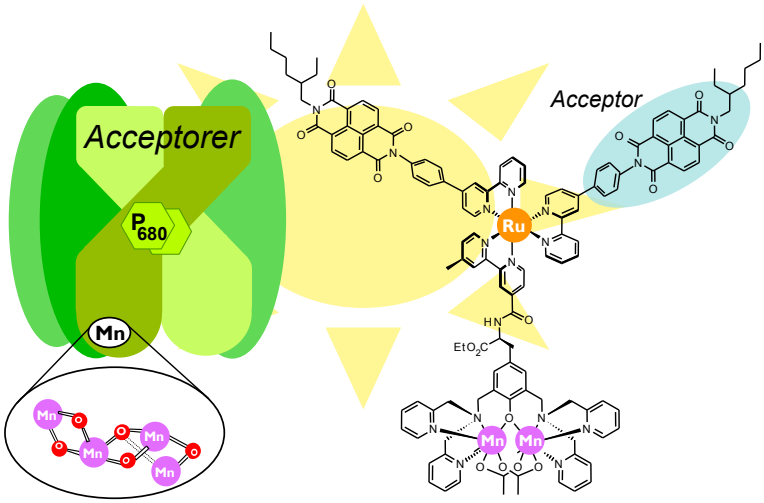
Det viktiga är vad man sedan gör med elektronerna, det vill säga hur energin binds och lagras. Här är man intresserad av att få ut ett bränsle så effektivt som möjligt. Därför ska elektronerna och vätejonerna sättas ihop till vätgas med hjälp av en kemisk katalysator.



I ett framtida solenergisystem fångar rutenium-komplexet (Ru) in ljus. Elektroner (e-) strömmar då från donatordelen (D) till acceptordelen (A). Elektroner hämtas från vatten (H_2O), precis som i naturens fotosyntes. På acceptorsidan används elektronerna och vätejonerna (H+) från det spjälkade vattnet för att göra vätgas (H)

Från idé till verklighet

När forskningsprojektet började 1994, var den första utmaningen att koppla ihop det ljusabsorberande ruteniumet med mangan i samma förening. Den allra första molekylen bestod av ett ruteniumkomplex kopplat till en bunden manganjon. Detta första steg visade att idén höll, att de bägge metallerna kunde sättas ihop, och det viktigaste av allt: man visade att en elektron kunde transporteras från manganet till ruteniumet med hjälp av ljus.



Ett artificiellt "fotosystem" till höger efterliknar naturens Fotosystem II till vänster: Klorofyllpigmentet "P" i Fotosystem II och rutenium (Ru) i det artificiella systemet absorberar ljus; När ljuset absorberas flyttas elektroner till en acceptor. Elektronerna kommer från ett från mangankomplex. I Fotosystem II spjälkas vatten, så att fler elektroner frigörs. Det artificiella systemet tar också elektroner från vatten, men inte lika bra än.

Nästa steg blev att införa fler än en manganjon. I Fotosystem II finns fyra manganjoner som tillsammans utför vattenspjälkningen, och forskarna har länge trott att det är nödvändigt med fyra manganer för att spjälka vatten. Det är kemiskt svårt att sätta ihop fyra manganjoner, så till en början nöjde man sig med två. I molekylen på bilden sitter två manganjoner kopplade till ett ruteniumkomlex, tillsammans med två acceptormolekyler. När ruteniumet absorberar ljusenergi, transporteras en elektron tillacceptorn, och en elektron transporteras från mangankomplexet till ruteniumet. Sammantaget kan mangankomplexet avge tre - fyra elektroner, trots att det bara har två manganjoner. Molekylen härmar även Fotosystem II på så vis att manganjonerna kan ta elektroner från vatten. Molekylen var var en stor framgång för konsortiet, eftersom den visade att det gick att härma flera steg i den naturliga fotosyntesen och det var ett viktigt steg i utvecklingen.

Ge kemin en chans

Rutenium-mangankomplexet kombinerar flera viktiga byggstenar för ett artificiellt ”fotosystem”. Den kan för det första flytta fler än en elektron från donatorsidan till acceptorsidan. Ett laddningsseparerat tillstånd kallas det när plusladdningar och minusladdningar befinner sig på olika platser i molekylen. En unik egenskap hos denna molekyl är att laddningsseparationen är ovanligt långlivad.

Långlivad laddningsseparation är något man känner till från naturen. Vattenspjälkningen i Fotosystem II är en ”långsam” process (en tusendels sekund är lång tid på kemisk tidsskala). Därför måste det laddningsseparerade tillståndet bevaras tillräckligt lång tid för att vattenspjälkningen ska hinna äga rum.

Kemin måste få en chans att arbeta så att man kan använda energin och göra ett bränsle. Inom forskningen kring artificiell fotosyntes har de kortlivade laddningsseparationerna länge varit en stötesten, men konsortiet har lyckats att återskapa liknande tidsskalor som i Fotosystem II.

Världsrekord i vattenspjälkning

Rutenium kan inte bara användas för att fånga in ljus, det har även visat sig kunna spjälka vatten. År 2012 lyckades forskare i konsortiet med att spjälka vatten med hjälp av ljus och en molekyl som innehåller rutenium. Denna molekyl visade sig vara den mest effektiva vattenspjälkande molekylära katalysator som någon forskare kunnat framställa. Med det nya ruteniumkomplexet har man för första gången kommit i närheten av samma effektivitet som i naturen. Det är faktiskt ett världsrekord i vattenspjälkning!

Här står alltså forskningen i dagsläget: Man har lyckats skapa molekyler som absorberar ljus, och med ljusenergins hjälp flyttar flera elektroner. Dessutom har man lyckats med konststycket att kopiera den stora effektivitet i vattenspjälkning som hittills bara kunnat mätas i naturens eget Fotosystem II.

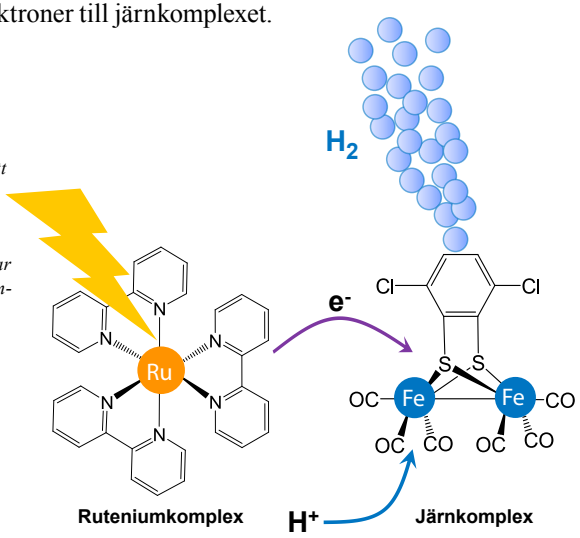
Ruteniumkomplexet som spjälkar vatten har lärt konsortiet mycket om vad som krävs, men man hoppas fortfarande att det skall gå att åstadkomma med billigare metaller än rutenium. Katalysatorn måste också kunna sättas ihop med andra byggstenar, för att energin ska kunna tas tillvara.

De senaste årens framgångar med långlivade laddningsseparationer och världens snabbaste vattenspjälkningskatalysator, är en väldigt lovande utgångspunkt för den framtida utvecklingen av artificiell fotosyntes.

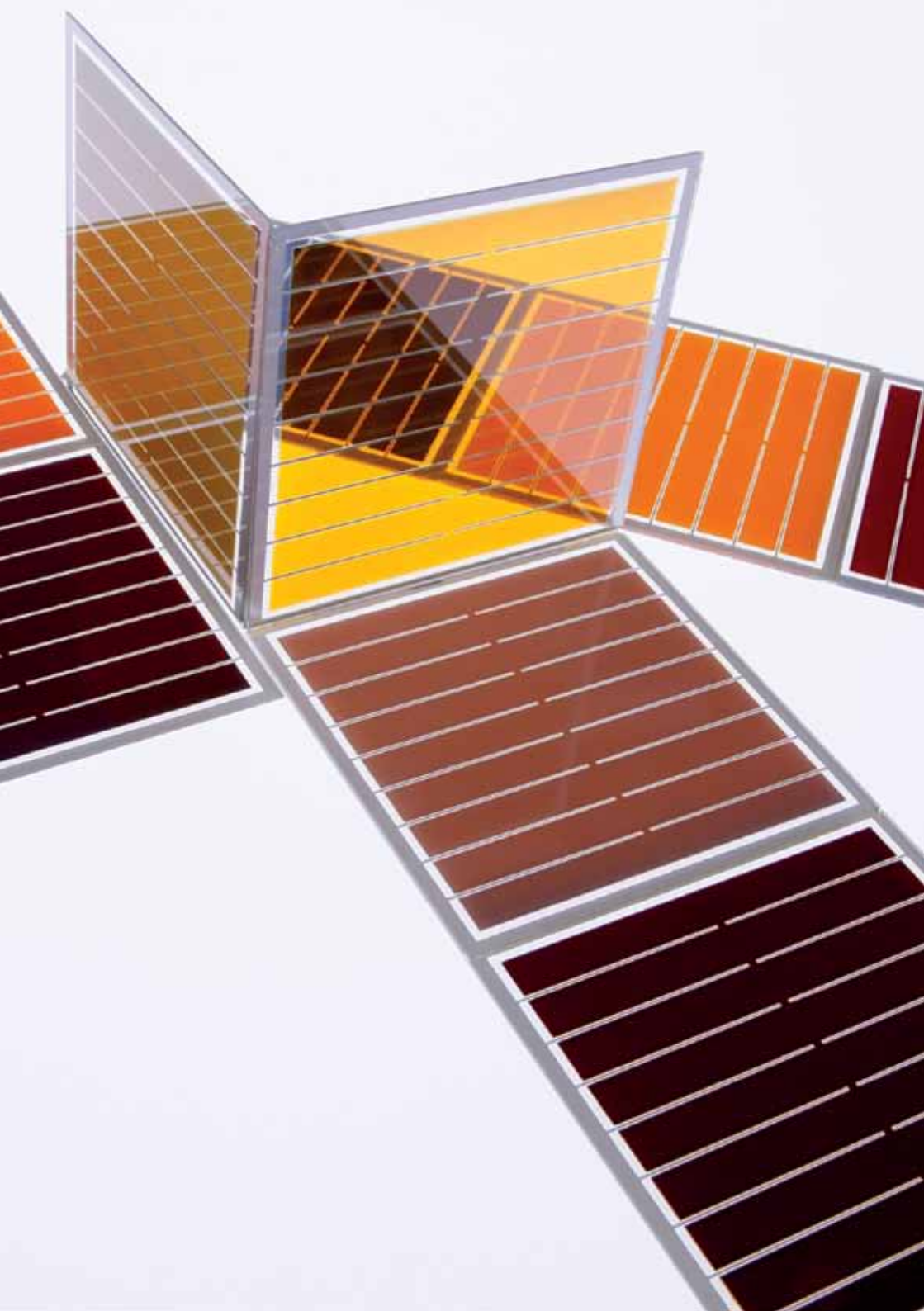
Biomimetiska katalysatorer bildar vätgas

Än är det en bit kvar till målet: att spjälka vatten och producera bränsle i ett komplett, välfungerande system. Vattenspjälkningen är bara ena halvan av ekvationen, sedan skall elektronerna från vattnet användas för att skapa bränslet. Katalysatorer som bildar vätgas har funnits ett tag, men de är ofta av dyra och sällsynta metaller. Många mikroorganismer har särskilda enzymer (biologiska katalysatorer) som kallas hydrogenaser. Hydrogenaserna kan sätta ihop vätejoner och elektroner så att det bildas vätgas. Så kallade järn-järn-hydrogenaser, har två järnatomer i sitt aktiva centrum.

Liknande katalysatorer kan tillverkas på syntetisk väg, och sedan 2003 har man konsortiet därför fokuserat mycket forskning på hur sådana järnföreningar skall se ut. Resultaten har inte låtit vänta på sig; konsortiet har nu framställt ett antal katalysatorer som kan producerar vätgas med högt utbyte under vissa betingleser. 2010 lyckades man med något som varit mycket efterlängtat: ljusdriven vätgasproduktion från ett järnkomplex med hjälp av ruteniumkomplex som fångar in ljuset och ger elektroner till järnkomplexet.



Det vätgasutvecklande järnkomplexet liknar ett naturligt hydrogenas, och producerar vätgas under kontrollerade betingelser. Det fungerar såhär: När ruteniumkomplexet absorberar ljus, skickar det en elektron (e-) till järnkomplexet. När järnet fått två elektroner, reagerar komplexet med två vätejoner (H+), och det bildas vätgas (H_2).



Våta solceller

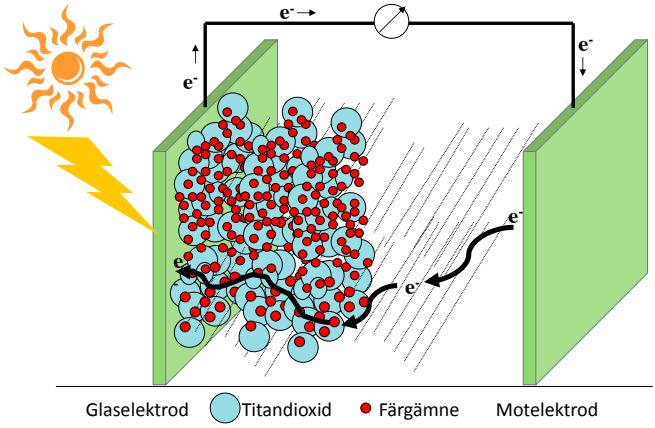
Hur ska man då tänka när man utformar en ”solbränsleapparat”? Vilka komponenter ska ingå? Under 1990-talet utvecklades en ny typ av solceller av schweizaren Michael Grätzel. De kallas färgämnesensiterade solceller, Grätzelceller, eller med ett populärt namn “våta” solceller. De består av ett mycket tunt lager av titandioxidpartiklar på en elektrod, en elektriskt ledande glasyta. Titandioxid är en halvledare som leder ström när man lyser på den med UV-ljus.

Titandioxidpartiklarna kan göras känsliga för solens ljus genom att belägga partiklarna med ett färgämne. Färgämnen som ofta används är olika typer av ruteniumkomplex, men även andra färgämnen kan användas. Färgämnet gör att ljuset absorberas av titandioxiden mycket effektivt. Solcellen blir komplett med hjälp av ytterligare en ledande glaselektrod. Mellan glasytorna finns en elektrolyt – en vätskelösning med joner - som förmedlar elektronerna från den ena elektroden till den andra. Det är elektrolytlösningen som är orsak till att solcellerna kallas “våta”.

När ljuset har absorberats sänds elektroner från ruteniumkomplexet in i titandioxidpartikeln. På så vis efterliknar den här typen av solcell också naturens fotosyntes, där klorofyllet är färgämmnet som absorberar ljus och sänder iväg elektroner.

Elektronerna transporteras genom det tunna titandioxidskiktet till glaselektroden, och sedan ut i den elektriska kretsen där de kan utföra arbete genom att driva en elektrisk apparat. Till slut kommer elektronerna tillbaka via motelektroden och elektrolytlösningen.

En av flaskhalsarna i utvecklingen av de våta solcellerna har länge varit elektrolytlösningen, vätskan mellan plattorna som förmedlar elektronerna till färgämnet. Den vanligaste sammansättningen på elektrolyten har visat sig medföra energiförluster, vilket ger dålig effektivitet. 2010 gjorde konsortiets forskare ett stort genombrott i sitt sökande efter en bra elektrolyt. Man fann att ett ämne som innehåller metallen kobolt kunde användas till lösningen, vilket gav en många gånger bättre effektivitet. Nu hoppas – och tror – man att den nya tidens Grätzelsolceller ska kunna nå 15 procents effektivitet inom loppet av några år.



Schematisk bild av en Grätzelsolcell. Ett tunt lager av titandioxidpartiklar täcker en glasyta som fungerar som elektrod. Ljuset tas upp av färgämnet, ett ruteniumkomplex, som täcker de små titandioxidpartiklarna. Energirika elektroner överförs då från färgämnet till titandioxiden och vandrar sedan mellan partiklarna ut i den elektriska kretsen. Sedan förs elektronerna tillbaka till färgämnet via elektrolytlösningen i solcellen. Till höger en bild av en prototyp för en Grätzelsolcell.

En användbar formgivningsidé

Konsortiets forskare har arbetat länge med att undersöka de kemiska reaktionerna i de våta solcellerna, för att hitta vägar till att göra dem bättre och mer efektiva. Nya effektivare färgämnen, miljövänliga komponenter med lång livslängd, och effektivare utformning av halvledarskiktet är några av de saker man arbetar med. De färgämnesensiterade solcellerna har fått relativt stort genomslag, och internationellt finns redan företag som arbetar med prototyper på solpaneler för spridning på marknaden.

För utvecklingen av artificiell fotosyntes för solbränsleproduktion, finns mycket användbart att hämta från forskningen kring våta solceller. Själva uppbyggnaden med elektroder, halvledare och färgämnen som absorberar ljus, kan också användas för den komplicerade apparat med katalysatorer som skall ge solbränsleproduktion. Man tänker sig en delad ”låda” eller cell, där den ena sidan spjälkar vatten och den andra producerar bränsle. Utöver färgämnet som titandioxiden är täckt med, kan man sätta katalysatormolekyler på ytan, och istället för en koboltelektrolyt vill man ha rent vatten. Alla de olika halvledarmaterial och katalysatorer som skall komma att ingå vill konsortiet helst ska vara så billiga och robusta som möjligt.

Vätgasproducerande bakterier stimulerar nytänkandet

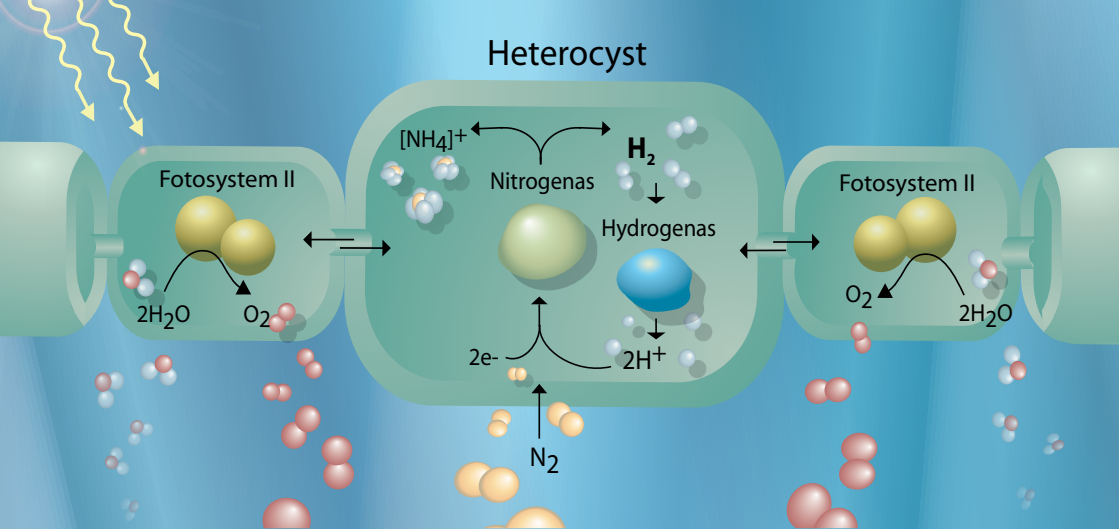
Cyanobakterier och grönalger är mikroorganismer som kan producera vätgas från sol och vatten. De har redan det maskineri som forskarna i artificiell fotosyntes försöker utveckla på konstgjord väg. Naturens vätgasutvecklande system är en inspirationskälla till den artificiella fotosyntesen.

Den naturliga vätgasproduktionen i dessa organismer är väldigt liten, och det är ännu inte ekonomiskt hållbart att odla cyanobakterier för vätgasutvinning. Därför arbetar två av konsortiets forskningsgrupper med att förändra cyanobakterierna på genetisk väg, så att de producerar mycket vätgas med solen som energikälla.

Liksom alla levande varelser har cyanobakterier utvecklats för att hushålla med sin energi. I bakteriernas ämnesomsättning bildas det naturligt lite vätgas. Den tar bakterierna hand om, eftersom vätgas är ett energirikt ämne. En strategi för att få cyanobakterierna att släppa ifrån sig vätgasen istället, är att slå ut de gener som på olika sätt styr hur bakterien tar upp vätgas. Även i detta forskningsområde ligger konsortiet långt framme.

Arbetet med cyanobakterier medför delvis andra utmaningar än den artificiella fotosyntesen, så en viktig komponent i det dagliga arbetet är tankeutbyte och kommunikation kollegor emellan. I mötet mellan biologi och kemi kan oanade och fruktbara idéer uppstå. Därför pågår forskningen om den biologiska vätgasproduktionen parallellt med arbetet med de artificiella molekylerna.





En konstnärlig syn på cyanobakterier *Cyanobakterier är fotosyntetiska (ljuslevande) mikroorganismer som kan utveckla vätgas från sol och vatten. Bilden föreställer en sorts celler, så kallade heterocyster, som kan ta upp luftens kväve och omvandla det till näring. När detta sker bildas vätgas som restprodukt. Den energirika vätgasen tas omhand av cellens avancerade maskineri. Konsortiet arbetar med att "tämja" cyanobakterierna på genetisk väg, så att de lämnar ifrån sig vätgasen.*

Förbättra naturen – går det?

Under 2000-talet har det skett en stor utveckling inom forskning om solbränslen från mikroorganismer. Cyanobakterier och grönalger är som alla levande varelser anpassade för bästa möjliga överlevnad under tuffa omständigheter. Konsortiet arbetar med den svåra uppgiften att ändra deras arvsanlag så att mikroorganismerna ska bli goda producenter av solbränsle. För att de levande organismerna ska klara de nya kraven är det också viktigt att ge dem en gynnsam miljö, en där de inte behöver kämpa för sin överlevnad.

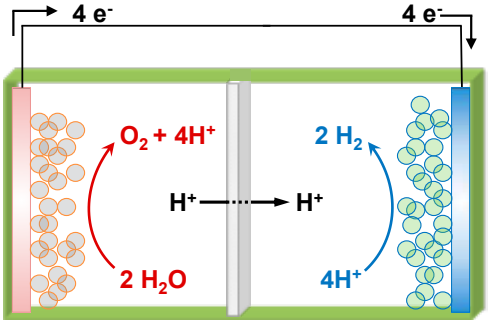
En så kallad foto-bioreaktor är en behållare med välkontrollerad miljö, där tillgången på bland annat luft och ljus kan styras. Konsortiets forskare studerar hur mikroorganismernas miljö kan designas för att ge hög produktivitet, och den kanske viktigaste uppgiften är att kunna förutse vilka anpassningar man behöver göra för att en bränsleproducerande organism skall överleva.



Framtiden

Hur kommer då de framtida solbränsleapparaterna att se ut? Konsortiet för artificiell fotosyntes tänker utveckla en teknik som bygger på alla delarna i forskningsprojektet. Grundprincipen för de färgämnesensiterade solcellerna är att sätta samman två ljuskänsliga elektroder med en elektrolyt emellan. Den här idén vill konsortiet utveckla för att ta fram en helt ny typ av solcell: en solbränsleapparat.

I apparaten tänker man sig att det ska finnas två elektroder, var och en med ett lager av halvledarpartiklar som är täckta med färgämnen som absorberar solens strålning. På den ena elektroden tänker man sig att det dessutom skall finnas molekyler som kan katalysera vattenspjälkning, och producera elektroner och vätejoner. På den andra elektroden skall det finnas katalysatorer som producerar vätgas av elektronerna och vätejonerna. Mellan ytorna skall det finnas vatten. När ljuset träffar färgämnet på den vattenspjälkande sidan sänds elektroner in i elektrodytan, och vattenspjälkningen startas. På den vätgasutvecklande sidan bidrar färgämnet

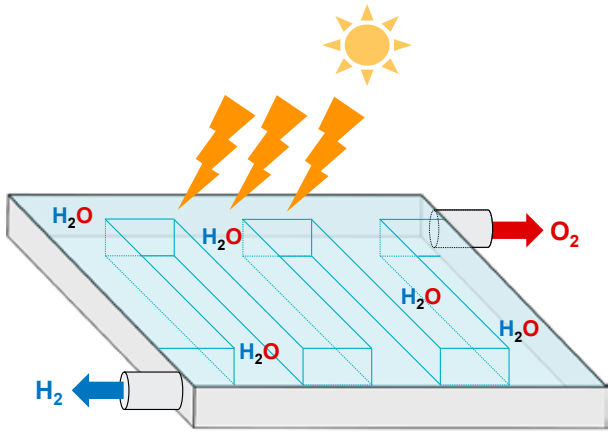


En framtida solbränsleapparat kan komma att fungera så här: Ett lager av titandioxidpartiklar täcker en elektrod, och ljuset tas upp av ett färgämne som täcker titandioxidpartiklarna. Ett mangankomplex avger elektroner till färgämnet på elektrodytan, och spjälkar vattenmolekyler för att få ut elektronerna. Det bildas då syrgas och vätejoner. Vätejonerna vandrar genom ett membran till andra sidan där ett järnkomplex sitter på en liknande halvledaryta, tillsammans med ett färgämne. När ljus träffar färgämnet skickar det elektroner till järnkomplexet. Där fogas vätejonerna samman med elektronerna och det bildas vätgas.

istället till vätgasproduktionen genom att skicka sina elektroner till den vätgasproducerande katalysatorn. Färgämnet får tillbaka elektronen via elektroden som är kopplad till ledningen.

En möjlighet är en typ av solpanel, som skulle kunna sitta på outnyttjade ytor till exempel hustak. När hela apparaten fungerar puttrar det ut livgivande syre i ena änden, och den värdefulla vätgasen i den andra. Vätgasen kan användas direkt, eller lagras ner i speciella vätgasabsorberande material (så kallade metallhydrider). Förhoppningen är att systemet ska kunna vara självgående, så att allt man behöver göra är att ”tanka” det med vatten då och då. Apparaten kan vara byggd i moduler, så att delar av den kan monteras isär för underhåll.

En annan viktig aspekt är att solbränsleapparaten troligen kommer att kunna byggas i nästan vilken storlek som helst – stor eller liten – efter behov. Det gör att man kan minska på transporterna och det blir lättare att integrera vätgastekniken i samhället.



En möjlig framtida solbränslepanel. Artificiella supermolekyler befinner sig i två utrymmen åtskilda av ett membran. I det ena spjälkas vatten och syrgas produceras, i det andra produceras vätgas av elektroner och vätejoner.

Utsikter

Hur nära är drömmen om en sant förnybar energikälla att bli förverkligad? Hur man skall göra för att omvandla solljus hela vägen till bränsle i ett slutet system på konstgjord väg, är inte en lätt nöt att knäcka. Man vet hur man gör om ljusenergi till kemisk energi, och man kan tillverka vätgas på kemisk väg. Man vet mycket om hur cyanobakterier och alger fungerar, men de är svåra att tämja för våra ändamål. Att koppla ihop kunskapen från olika områden, är en av utmaningarna i forskningen. Det är svårt att uppskatta hur lång tid det kommer att ta. Upptäckter och intelligenta lösningar kommer ofta plötsligt och språngvis.

Förhoppningen är att kunna ersätta miljöbelastande energikällor med en ren, förnybar och överallt tillgänglig energiform. Artificiell fotosyntes för framställning av bränsle från sol och vatten har potential att uppfylla denna förhoppning. Fortfarande är det långt kvar och det krävs omfattande insatser från duktiga och fantasirika forskare. Annars förblir detta bara en dröm.

Vill du veta mera?
Konsortiet för Artificiell Fotosyntes finns på Institutionen för Kemi - Ångström vid Uppsala Universitet, Institutionen för Kemi vid Kungliga Tekniska Högskolan, samt på Avdelningen för Kemisk Fysik vid Lunds Universitet.

Vi svarar på frågor:
Stenbjörn Styring, professor och konsortiets ordförande; Ann Magnuson, docent och huvudförfattare av den här kunskapsöversikten. Vi finns på Institutionen för kemi på Ångströmlaboratoriet i Uppsala.





Ett hållbart energisystem gynnar samhället
Energimyndigheten arbetar för ett hållbart energisystem, som förenar ekologisk hållbarhet, konkurrenskraft och försörjningstrygghet.

Vi utvecklar och förmedlar kunskap om effektivare energianvändning och andra energifrågor till hushåll, företag och myndigheter.

Förnybara energikällor får utvecklingsstöd, liksom smarta elnät och framtidens fordon och bränslen. Svenskt näringsliv får möjligheter till tillväxt genom att förverkliga sina innovationer och nya affärsidéer.

Vi deltar i internationella samarbeten för att nå klimatmålen, och hanterar olika styrmedel som elcertifikatsystemet och handeln med utsläppsrätter. Vi tar dessutom fram nationella analyser och prognoser, samt Sveriges officiella statistik på energiområdet.

Energimyndigheten

Energimyndigheten, Box 310, 631 04 Eskilstuna
Telefon 016-544 20 00. Fax 016-544 20 99
E-post registrator@energimyndigheten.se
www.energimyndigheten.se