

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Carbofuel – utveckling och integrering av biodrivmedelsprocesser	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska [Klicka här och skriv]	
Universitet/högskola/företag LTH	Avdelning/institution Kemiteknik
Adress Box 124, 221 00 Lund	
Namn på projektledare Ola Wallberg	
Namn på ev övriga projektdeltagare Lucy Jensen, Sara Blomberg, Omar Abdelaziz, Ola Went, Alexey Polukeev, Christian Hulteberg	
Nyckelord: 5-7 st Omvänd vattengas, Fischer-Tropsch, Electrifiering	

## Förord

*Här ska stå vilka som har finansierat projekten samt andra som bidragit till ett lyckat projekt t ex referensgrupp.*

Projektet har finansierats av Energimyndigheten och Kiram AB.

## Innehållsförteckning

*Nedan ligger en kod för innehållsförteckning. Förutsatt att du använder formatmallarna för rubriker så kommer rubrikerna automatiskt med i innehållsförteckningen när du klickar på förteckningen och trycker på F9.*

Sammanfattning .....	2
Summary .....	2
Inledning/Bakgrund .....	4
Genomförande .....	7
Resultat .....	10
Omvänd vattengas.....	10
Fisher-Tropsch .....	13
Vätgaslagring i alkohol .....	13
Teknoekonomisk analys .....	14
Diskussion.....	17
Publikationslista.....	18
Referenser .....	18
Bilagor .....	20

## Sammanfattning

För att minska vår påverkan på klimatet är det centralt att sänka utsläppen av koldioxid. I projektet Carbofuel har ett nytt sätt att öka utbytet av förnybart kol undersökts. Genom att ta den koldioxid som släpps ut vid tillverkning av etanol och omvandla den till diesel kan koleffektiviteten ökas drastiskt. Det som krävs för att åstadkomma detta är en tillsats av vätgas, företrädesvis tillverkad från spjälkning av vatten med hjälp av elektricitet. Vätgasen används för att i ett första steg reagera koldioxiden till kolmonoxid och vatten. Detta görs vid hög temperatur och möjliggörs genom en ny katalysator som utvecklats inom projektet. Katalysatorn har förmågan att omvandla koldioxid med väte till kolmonoxid och vatten utan någon ånga närvarande. Detta höjer utbytet och sänker kostnaden.

Koloxiden kan reageras vidare med mer vätgas till syntetisk diesel genom den så kallade Fischer-Tropschreaktionen. Normalt sätt erhålls en relativt tung vaxprodukt som kräver efterbehandling för att kunna användas i traditionella förbränningsmotorer. Inom projektet har dock en katalysator för reaktionen tagits fram som ger hög omsättning och reaktionshastighet, men ett relativt högt utbyte till en direkt användbar dieselfraktion.

Om en kostnadsuppskattning görs för processen blir det uppenbart att både investeringskostnaden och driftkostnaden är kraftigt beroende av kostnaden för vätgasproduktionen. Mer än 75% av investeringskostnaden kan härledas till investering i elektrolysörer för att spjälka vatten och kostnaden för elektricitet är den överlägset största posten vad gäller driftkostnaderna. Detta innebär att antaganden kring investeringskostnaden för elektrolysörer och elpriser har störst innebörd på produktionspriset.

Det finns dock klara fördelar med att integrera de två processerna etanolproduktion och syntetisk dieselproduktion. För det första erhålls en ren koldioxidström från etanolprocessen som kan användas direkt i dieselprocessen utan rening. Vidare kan den värme som erhålls vid hög temperatur i dieselprocessen användas på flera ställen i produktionen av etanolen.

## Summary

To lower our climate impact, it is imperative to reduce carbon dioxide emissions. In the Carbofuel project, a new way of increasing the yield of renewable carbon has been investigated. By taking the carbon dioxide that is emitted in the production of ethanol and transform it into diesel, the carbon efficiency can be drastically increased. To achieve this, hydrogen needs to be added, preferably hydrogen derived from water splitting with using electricity. The hydrogen is used in a first unit operation to react the carbon dioxide to carbon monoxide and water. This is done at high temperature and is enabled using a new catalyst developed within the project. The catalyst has the ability to transform the carbon dioxide to water using hydrogen without any steam present, something that drastically increases the yields and lowers the cost of production.

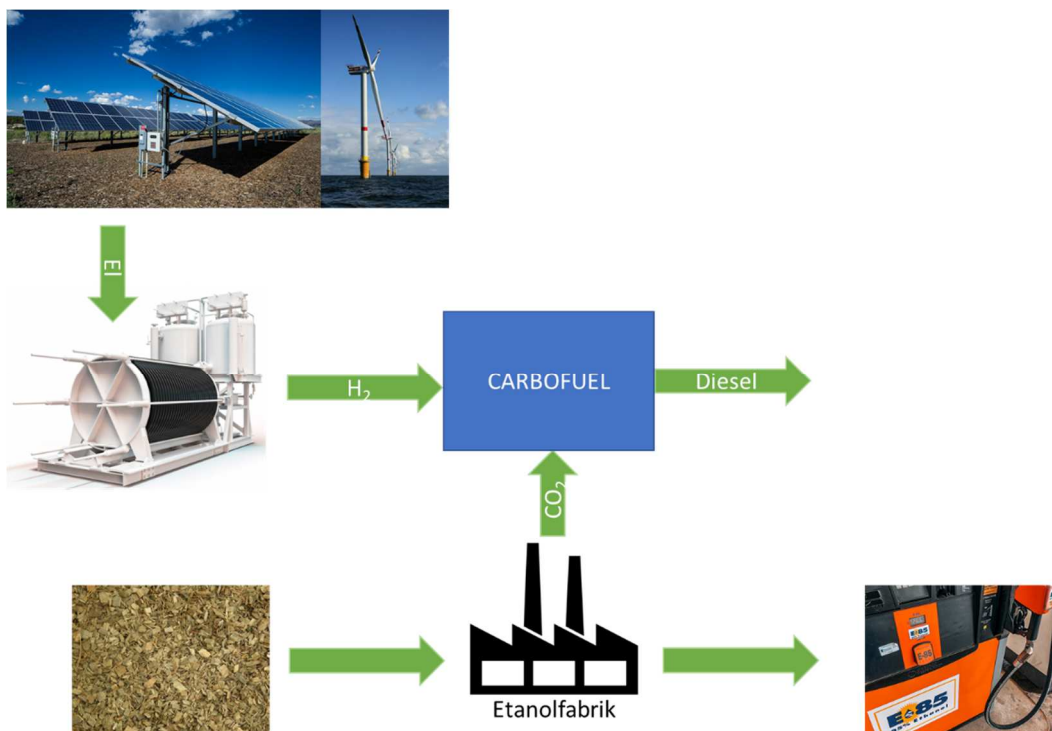
The carbon dioxide is further reacted with additional hydrogen to synthetic diesel using the so-called Fischer-Tropsch reaction. Normally, a relatively heavy hydrocarbon wax product is synthesised, requiring post-treatment to be used in traditional internal combustion engines. However, within the project, a catalyst has been developed that gives not only a high yield and a high reaction rate but also a relatively high yield to a diesel fraction that can be used as-is.

If a cost estimate is performed for the process described above, it is obvious that both the investment cost and the operating cost is strongly influenced by the cost of hydrogen production. More than 75% of the investment cost is derived from the investment in electrolysers for water-splitting, and the cost of the electricity is the by far largest part of the operating costs. This indicates that the assumptions regarding the investment cost of the electrolyser and the electricity prices have the largest impact on the product price.

There are nevertheless clear advantages by integrating the two processes, the production of ethanol via fermentation and the production of synthetic diesel from carbon dioxide. First of all, the carbon dioxide stream from the ethanol plant is very pure and can be used as received in the diesel process. Secondly, the heat that is produced in the diesel process can be used in several places in the production of the ethanol

## Inledning/Bakgrund

Det finns en stor potential i att öka användning av biobränslen, elektricitet och vätgas i flera sektorer. I synnerhet vad gäller transportsektorn för att möta mål vad gäller emissioner och klimat. För vätgas och elektricitet finns det osäkerheter i hur lämpliga dess är då batterier och bränsleceller svårigen kan implementeras för långa transporter eller i närtid då de, i alla fall i de senare fallet, kräver ny infrastruktur (1). Också när det gäller uppskalning av biomassaanvändning finns framtida utmaningar, framförallt när det gäller på global nivå, då tillgången är begränsad; hållbart är inte samma sak som oändligt (2; 3; 4). Oavsett vilka scenarion som läggs fram för långa transporter eller för flyg så kommer det, i alla fall i en överskådlig framtid, att krävas flytande kolväten med hög densitet. Detta betyder dock inte att dessa transporter är förskonade från hållbarhetsmål utan de måste också minska sin klimatpåverkan (5; 6; 7). För att producera denna typ av kolväten skulle ett alternativ vara så kallade elektrobränslen, där koldioxid används som startpunkt och reduceras med hjälp av vätgas till användbara produkter (8; 9; 10); vätgasen kan med fördel produceras med förnybar elektricitet från vatten med hjälp av elektrolys. Ännu mer intressant blir det om koldioxiden som används dessutom kommer från en förnybar källa (11). Det genomförda projektet Carbofuel har fokuserat på att utveckla teknik som möjliggör användning av koldioxid för produktion av flytande kolväten, figur 1.



**Figur 1** Schematisk processöversikt.

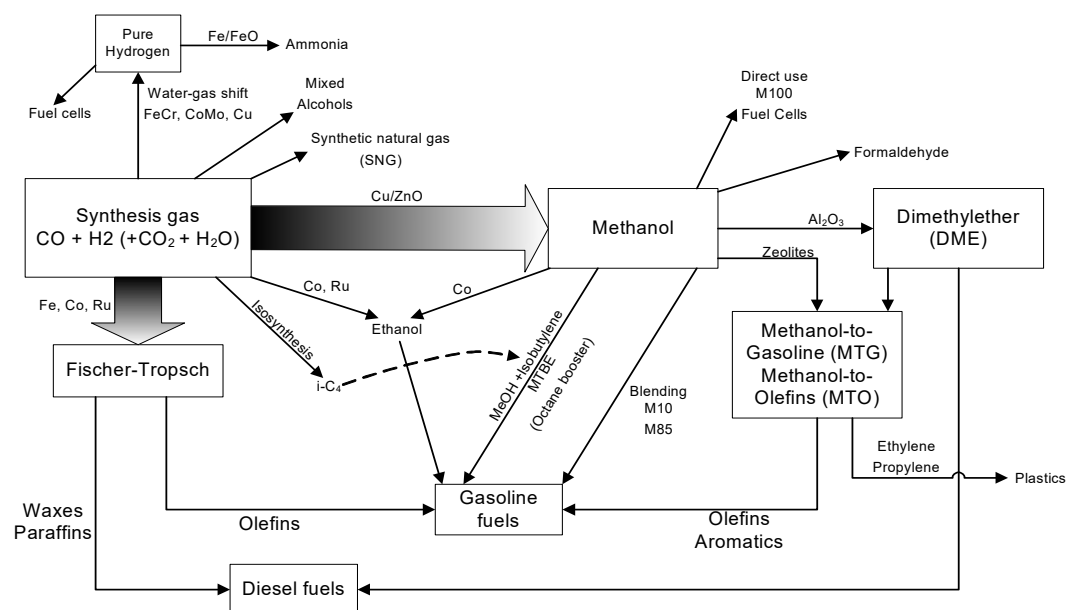
Mer specifikt har projektet undersökt möjligheten att använda den koldioxid som avges vid produktion av etanol. Tekniken som utvecklats bygger på heterogen katalys, som i två steg omvandlar koldioxiden med vätgas till kolväten. I det första steget reageras koldioxid med väte enligt:



Denna reaktion benämns omvänd vattengasreaktion (reversed water-gas shift) och är en jämviktsreaktion som gynnas av höga temperaturer och ju mer vätgas som används, desto högre omsättning av koldioxid kan förväntas. Vätgasen som används förväntas huvudsakligen komma från elektrolys av vatten, en teknik som är under kraftig frammarsch. Dock har i projektet möjligheten att kompensera för perioder med höga elektricitetspriser genom att använda den etanol som finns på den tänkta produktionsanläggningen som en extra resurs där etanolen (eller någon annan alkohol) används som en reversibel vätgasbärare; ett vätgaslager med andra ord.

Normalt sätt bildar denna typ av reaktion relativt enkelt fast kol på katalysatorn och för att motverka detta måste ånga användas för att undertrycka kolbildningen (12); en annan bireaktion är produktion av metan, som också kostar i utbyte, även om problemet med metanproduktion är mindre vid högre temperaturer. Närvaro av ånga är en tydlig kostnadsdrivande faktor då ånggenerering kostar energi. Därför har ett av projektets mål varit att utveckla en katalysator som kan arbeta utan närvaro av ånga, är stabil vid höga temperaturer (upp till 800 C) och som bildar minimalt med metan.

Den kolmonoxid som bildas kan därefter reageras på ett antal olika sätt efter den blandats med vätgas, det är inte för inte som blandningen benämns syntesgas eller syngas, figur 2.



**Figur 2** olika möjliga reaktionsvägar från syntesgas till olika syntetiska bränslen, återgiven med tillstånd från (13).

I detta projekt valdes den väg som benämns Fischer-Tropsch (FT) i figuren ovan och som huvudsakligen ger ogrenade kolväten som produkt. Normalt sett ger denna process en vaxliknande produkt med långa kolväten som kräver en hel del efterbehandling för att kunna användas i ett fordon. Fokus för utvecklingen i detta

projekt har varit en aktiv katalysator som ger ett högt utbyte direkt till en dieselfraktion.

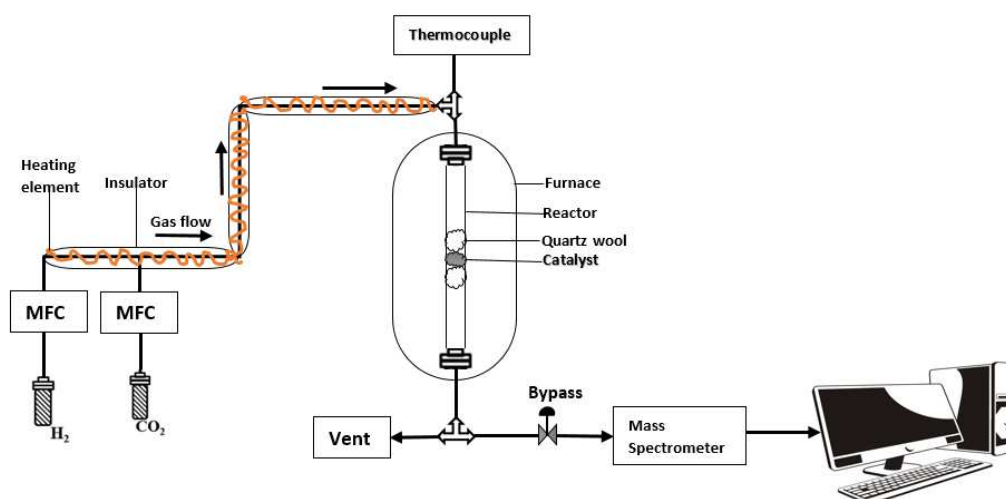
Slutligen har de utvecklade teknikstegen som utvecklats inom projektet, med undantag för vätgaslagringen i alkohol, kostnadsbedömts. Detta har gjorts i samarbete med ett annat energimyndighetsprojekt som letts av IVL, med Lunds universitet som projektpart (Biojet 48387-1). Huvuddelen av dessa beräkningar har redovisats i den rapport som publicerats inom ramen för det projektet (14) och i denna rapport kommer därför bara de effekter som uppkommer vid integrationen med etanolproduktionen att kommenteras.

Projektet har pågått under en period om ca 30 månader och projektet har huvudsakligen genomförts av olika grupper vid Lunds universitet. Finansiering har erhållits från energimyndigheten och Kiram AB.

## Genomförande

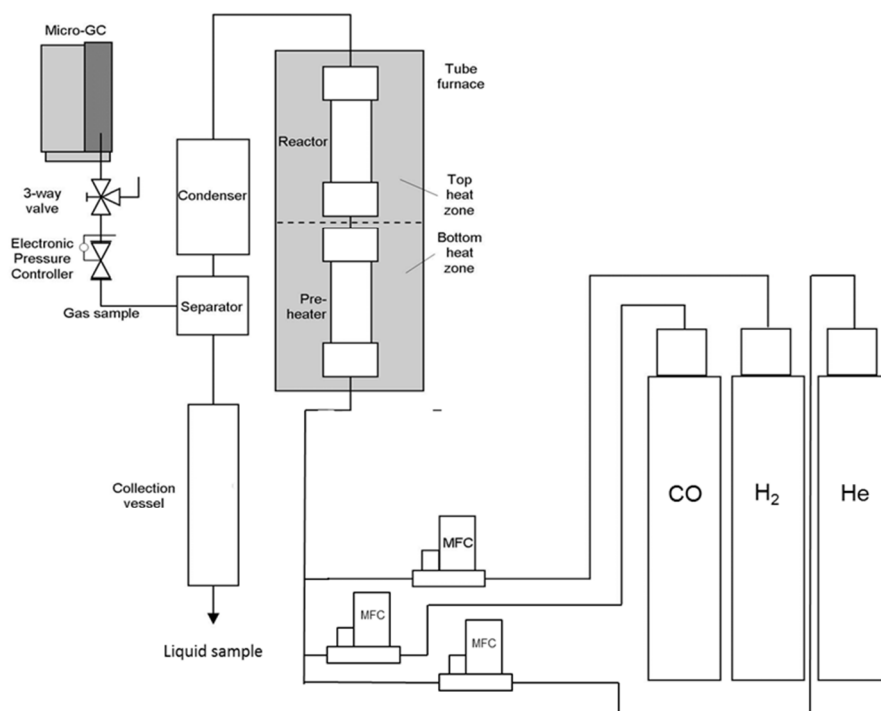
Projektet kan delas in i fyra delar, en del där den omvända vattengaskatalysatorn behandlas, en del där en aktiv och selektiv FT katalysator utvecklats, en del där vätagaslagring i alkoholer undersökts och slutligen en teknoekonomisk- och integrationsdel.

Den första delen har genomförts huvudsakligen av den doktorand som rekryterats till projektet, Lucy Jensen. Detta arbete har gjorts vid institutionen för kemiteknik vid Lunds tekniska högskola och inkluderar framtagning av en helt ny experimentell uppställning, syntes av ett antal katalysatorer och testning av dessa. Katalysatorerna i fråga har också vid ett flertal tillfällen karakteriserats med XAFS och XANES vid strålröret P65 vid DESY synkrotronen i Hamburg och HIPPIE vid MAX IV i Lund. Sara Blomberg har varit ledande i undersökningarna vid synkrotronen och handleder Lucy tillsammans med Christian Hulteberg och Ola Wallberg. En schematisk översikt för den nya uppställningen återges i figur 3. Ett antal olika driftparametrar har undersökts för varje katalysator, till exempel hur temperaturen, trycket, förhållandet mellan CO och H<sub>2</sub> samt närvaro av ånga. Slutligen har långtidsförsök genomförts, men då riggen inte kan köras mer än 8 h dagligen är det svårt att köra längre tider.



**Figur 3** En schematisk representation av den använda uppställningen för omvänd vattengasreaktion.

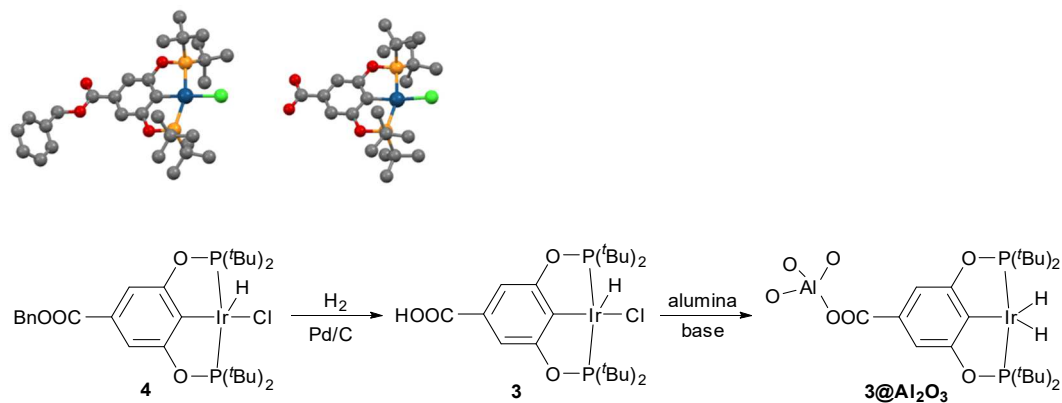
Vad gäller FT katalysatorer så har ett flertal material syntetiserats och undersökts. Dessa var av både järn- och kobolttyp och promoterades på olika sätt för att förbättra utbytet till den önskade kolvätefraktionen. En förenklad bild av testuppställningen återges i figur 4.



**Figur 4** En schematisk representation av den använda uppställningen för FT-syntes.

Precis som i fallet med den omvända vattengasreaktionen undersöktes hur ett antal olika driftparametrar så som temperaturer, tryck, gassammansättning och flödesbelastning påverkar utbytet. Den mest lämpliga katalysatorn avses skyddas varför informationen i denna rapport är något knapphändig. Denna del av arbetet utfördes av Christian Hulteberg, på kemiteknik vid LTH.

Vad gäller undersökningen att använda alkoholer som ett vätgaslager har först olika homogena komplex innehållande iridium undersökts för aktivitet för den önskade dehydreringsreaktionen, figur 5. Reaktionen driver av vätgas från alkohol under bildande av en aldehyd som sedan kan återbildas till alkohol.



**Figur 5** De olika komplex som används och hur dessa ympas på aluminiumoxid.



Katalysatorerna undersöktes både i satsvisa reaktorer som i tubreaktorer för flera olika alkoholer och vid olika temperaturer. Denna forskning har utförts som ett samarbete mellan materialkemi och kemiteknik vid Lunds universitet. Där det huvudsakliga arbetet utförts av Aleksey Polukeev och Omar Abdelaziz, med stöd av Ola Wendt och Christian Hulteberg.

Slutligen, när det gäller den teknoekonomiska analysen utfördes denna med bas i de resultats som erhöles för de ingående katalytiska stegen. Baserat på denna information gjordes en preliminär design för en process som omvandlar ca 7000 kg/h koldioxid per timme till ca 1700 kg/h transportbränsle i form av FT-diesel. Ett flödesschema upprättades och med hjälp av denna löstes mass- och energibalanserna ut. Med bas i balanserna har de enskilda komponenterna designats och genom att använda publikt tillgängliga databaser har en investeringskostnad kunnat beräknats. Till sist kan även driftkostnaden beräknas genom antaganden kring förbrukningsvaror så som elektricitet. Detta arbete utfördes av Omar Abdelaziz, Ola Wallberg och Christian Hulteberg som ett samarbete inom institutionen för kemiteknik.

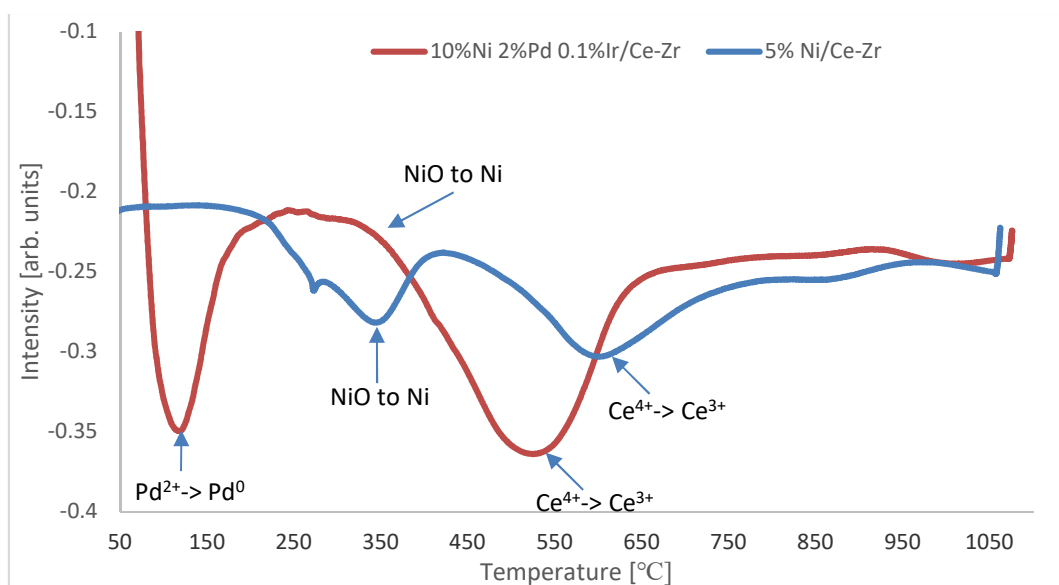
## Resultat

I detta avsnitt återges resultaten som erhållits inom ramen för projektet. Presentationen av resultaten följer processen och börjar således med den omvända vattengasreaktionen, följt av FT syntesen, vätgaslagring i alkoholer och den teknoekonomiska analysen.

### Omvänd vattengas

Ett antal katalysatorer har undersökts för denna reaktion, med blandad framgång. Då nickel på aluminiumoxid är en standardkatalysator för alla typer av högttemperaturreaktioner med CO och H<sub>2</sub> var detta det första alternativet som undersöktes. Reaktionen är fullt möjlig att genomföra över en generisk katalysator med 10 % Ni på alumina i ett temperaturspann från 400 till 800 °C, i ett tryckintervall från atmosfäriskt tryck till 10 bar. Detta kunde åstadkommas med en blandning mellan koldioxid och vätgas på ett till ett. Som konstaterades ovan har användning av ånga en stor inverkan både på reaktionen, men framförallt på drifekonomin. För att katalysatorn bestående av 10 % Ni på alumina ska fungera under längre tid måste minst 1,8 delar vatten per CO<sub>2</sub> sättas till, vilket blir baslinjen för det fortsatta arbetet.

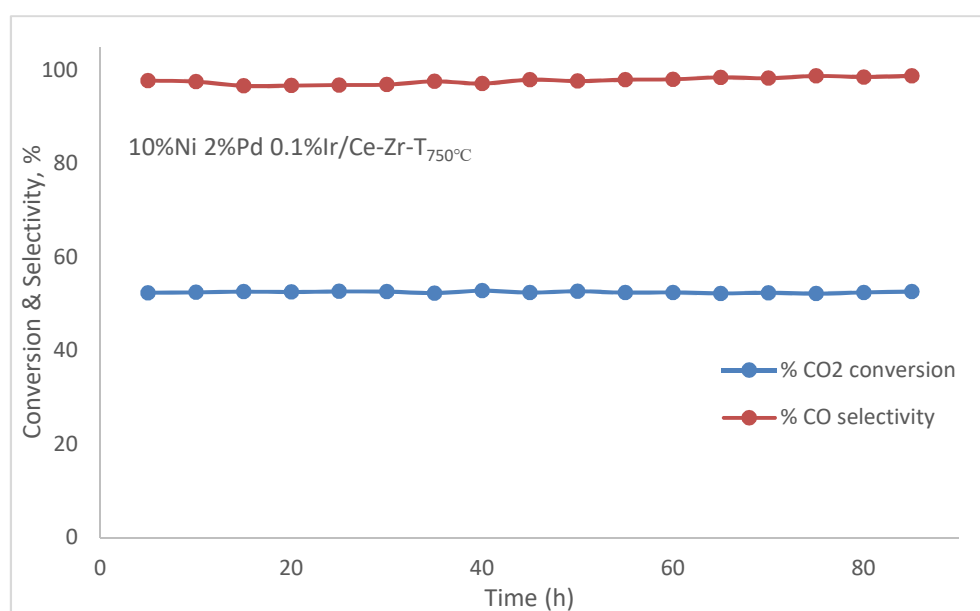
För att förbättra prestanda hos katalysator, framförallt med avseende på mängden ånga som används, förändrades katalysatorns sammansättning. Det var först och främst bäraren som ändrades från alumina till en mixad cerium-zirkoniumoxid. Därefter gjordes även en promotering av det aktiva niklet med palladium och iridium för att ytterligare förbättra aktiviteten på katalysatorn. Att öka katalysatorns aktivitet är viktigt för att klara av drift i reaktorer med hög värmetransport. Dessa båda katalysatorer Ni på CeZrO<sub>2</sub> och Ni/Pd/Ir på CeZrO<sub>2</sub> undersöktes vidare med olika karakteriseringsmetoder och jämfördes med referensmaterialet. Dessa katalysatorer belades med både 5 och 10 % nickel. I figur 6 nedan återges resultaten från en temperaturprogrammerad reduktion.



**Figur 6** H<sub>2</sub>-TPR av 10%Ni 2%Pd 0.1%Ir/Ce-Zr och 5% Ni/Ce-Zr katalysatorerna.

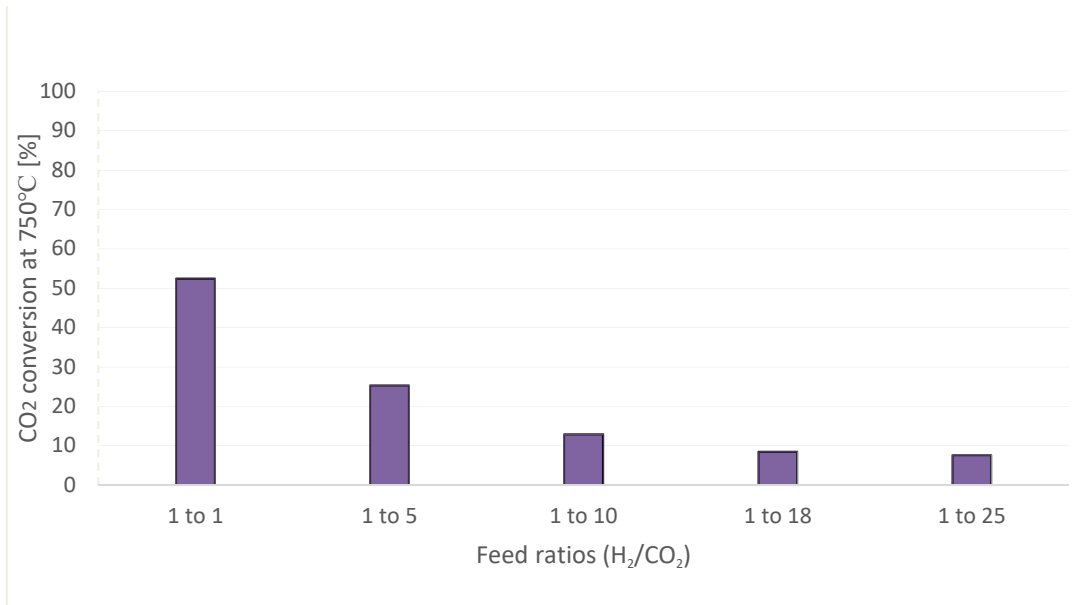
Som kan ses i figuren har katalysatorn med Pd en tidig topp som motsvarar reduktionen av Pd vid ca 75 C. Dessutom kommer en större topp som börjar vid 275 C och slutar vid 650 C som innehåller både nickel och ceriumreduktion. Att signalen börjar så högt upp för denna katalysator förklaras med bildning av palladiumhydrid som sönderdelas när temperaturen stiger. För katalysatorn utan Pd återfinns bara en reduktionstopp, den vid 350 C för nickel och en för ceria vid ca 600 C.

För att undersöka hur stabila katalysatorerna var har långtidsförsök gjorts, med olika katalysatorer, betingelser och halter av ånga i gasen. Det visar sig att den katalysator som innehåller 10% nickel, 2 % Pd och 0,1% Ir uppvisar en förträfflig stabilitet och aktivitet. I figur 7 återges en långtidskörning på nästan 100 timmar, där både omsättning och selektivitet visar sig vara konstanta vid  $18\ 000\ \text{h}^{-1}$  i gasbelastning, ett förhållande mellan CO och H<sub>2</sub> på 1 och helt utan tillsatt ånga.



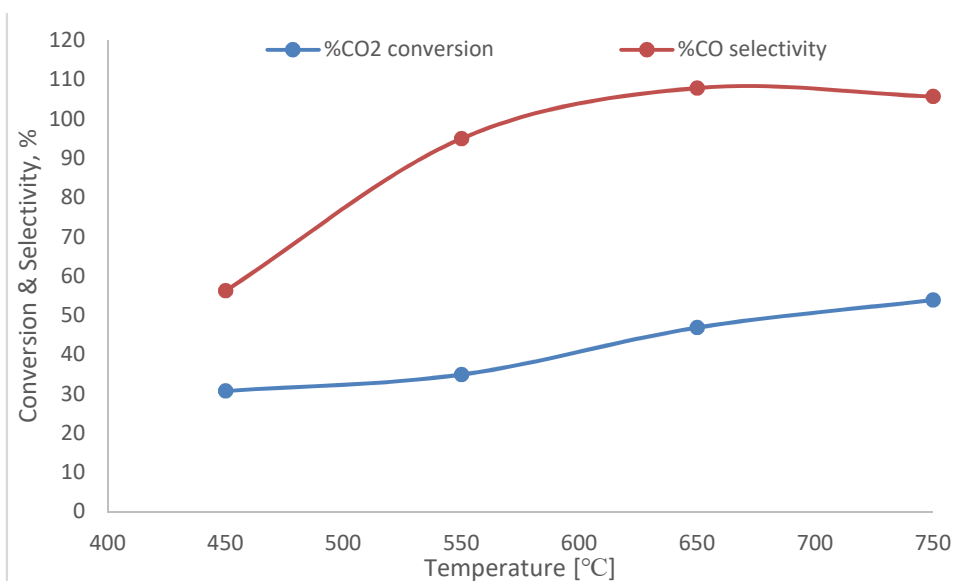
**Figur 7** Omsättning av CO<sub>2</sub> och CO selektivitet på 10%Ni 2%Pd 0.1%Ir/Ce-Zr vid 750°C och 1 bars tryck.

Att skapa en katalysator som är så här stabil utan någon som helst tillsats av vatten överträffar med råge de förväntningar som fanns innan projektet. Efter den första långtidskörningen gjordes vidare studier för att bättre förstå katalysatorn. I figuren nedan återges katalysatorns beroende av olika förhållanden mellan CO och H<sub>2</sub>, fortfarande utan vatten närvarande i den ingående gasen.



**Figur 8** uppmätt aktivitet vid 750°C för olika H<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> förhållanden.

Det kan konstateras att det är gynnsamt med mer vätgas i förhållande till koldioxid och att resultaten i princip följer jämvikten vid denna temperatur. Temperaturen har också en effekt, vilket visas i figur 9.



**Figur 9** CO<sub>2</sub> omsättning och CO selektivitet för 10%Ni 2%Pd 0.1% Ir/Ce-Zr vid olika temperaturer vid 1 bars tryck

Det kan konstateras från figuren att omsättningen av koldioxid är beroende av temperaturen till viss del, reaktionen är gynnad av höga temperaturer. Det samma kan sägas om selektiviteten som också ökar i det temperaturspann som undersökts. Detta är också en effekt av jämvikten då nickel är en välkänd

katalysator också för metanisering, som gynnas av lägre temperaturer och högre tryck.

### Fisher-Tropsch

Vad gäller arbetet som utförts med FT så har en av de många katalysatorer som tagits fram och undersökts inom ramen för projektet visat på en god selektivitet till en C<sub>11</sub> till C<sub>20</sub> fraktion, tabell 1. Den framtagna katalysatorn visar också på en relativt hög aktivitet och god produktivitet.

**Tabell 1** Utbyte och omsättning för den bästa katalysatorn som tagits fram inom projektet

	CO/H <sub>2</sub> = 1	CO/H <sub>2</sub> = 0,5
<b>Omsättning (%)</b>	41	65
<b>Selektivitet till CO<sub>2</sub> (%)</b>	52	32
<b>Selektivitet till CH<sub>4</sub> (%)</b>	3	8
<b>Selektivitet till C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub> (%)</b>	24	7
<b>Selektivitet till C<sub>11</sub>-C<sub>20</sub> (%)</b>	18	41
<b>Selektivitet till C<sub>20+</sub> (%)</b>	3	6

### Vätgaslagring i alkohol

Som tidigare nämnt har möjligheten att använda en alkohol som vätgasbärare undersökts inom ramen för projektet. Tanken är att vätgas kan lagras genom att katalytiskt hydrera/dehydrera en aldehyd till en alkohol och tillbaka igen. På så sätt kan kostsamma trycksatta vätgaslager eller dyra metallhydrider undvikas samtidigt som en buffertkapacitet skapas av vätgas. För att göra denna reaktion så krävs en aktiv och selektiv katalysator och av denna anledning har en homogen katalysator med en iridiumatom som center tagits fram och verifierats. Vilken aktivitet som åstadkommits redovisas i tabell 2 nedan för en modellalkohol.

**Tabell 2** Omsättning av alkohol till aldehyd.

Tid (h)	Betingelser 1		Betingelser 2	
	Omsättning %	Kumulativ reaktion	Omsättning %	Kumulativ reaktion
0,5	8,4	336	15,1	604
1,5	20,4	816	38,8	1552
2,5	30,8	1232	53,3	2132
3,5	38,6	1544	62,5	2500
5,5	50,1	2004	80,1	3204
9,5	76,6	3064	-	-
24	97,9	3749	99,0	3862
36	100,0	3728	99,5	3866

Dessa försök utfördes i en satsvis reaktor och det är uppenbart att reaktionshastigheten blir lång när reaktionen utförs på detta vis. I tillägg blir det

svårt att återanvända katalysatorn då den är i samma fas som reaktanter och produkter. Återvinning är viktigt för en eventuell framtida produktionsekonomi. Baserat på dessa två förutsättningar, låg reaktionshastighet och svårighet med återvinning, bestämdes det att försöka ympa katalysatorn på ett fast material. Det fasta materialet kan därefter användas i en kontinuerlig fastbädd reaktor. Detta möjliggör höga reaktionshastigheter och enklare separation mellan katalysator och produkt. Katalysatorn ympades fast på två olika typer av oxid, aluminium och kisel, och utvärderades i en tubreaktor. Som kan ses i tabell 3, så kan reaktionshastigheten ökas drastiskt då katalysatorn ympas på en bärare.

**Tabell 3** Omsättning av alkohol till aldehyd, jämförelse mellan satsvis och tubreaktor.

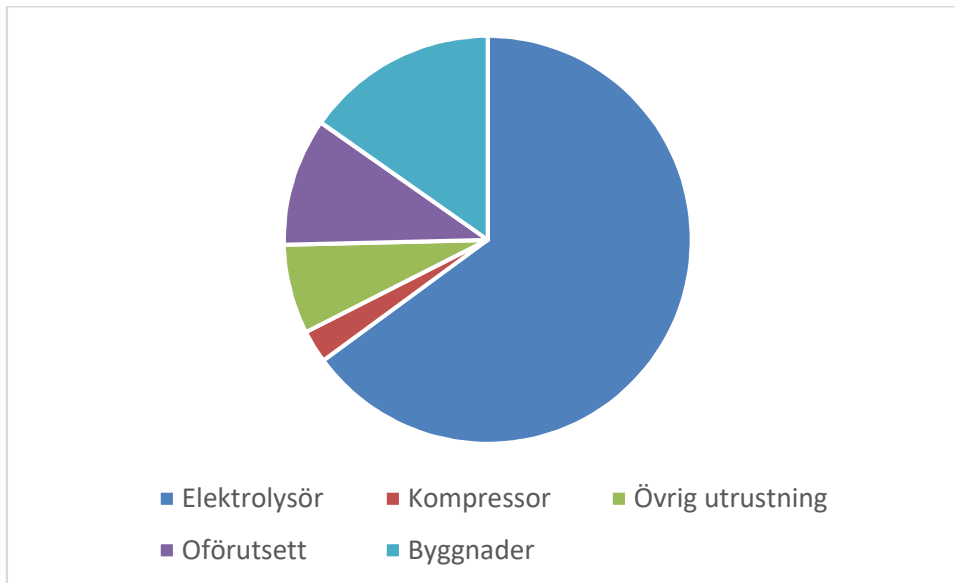
T, °C	Reaktionshastighet, h <sup>-1</sup>			
	Sats 1 40 000/1	Tub 2@SiO <sub>2</sub>	Tub 3@Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - kalcinerad	Tub 3@Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ej kalcinerad
135	448	147		
150	584	321	324	
175	1032	1218		
190	1248	2250		
200		2922	2001	
260		16 405	10 512	2300
300		34 908	24 366	
350		99 936	56 060	

Som kan ses kan reaktionshastigheten ökas drastiskt genom ympning, både beroende på att högre temperatur kan användas, men också på grund av den högre reaktionshastigheten i reaktormodellen.

Tyvär visar försök med etanol att det inte är lämpligt med etanol som alkohol vid denna reaktion. Detta då det bildas en Ir-CO binding som starkt inhiberar dehydreringsreaktionen. Det går dock fint med en alkohol som inte har alkohol ytterst på kolvävet så som isopropanol.

### Teknoekonomisk analys

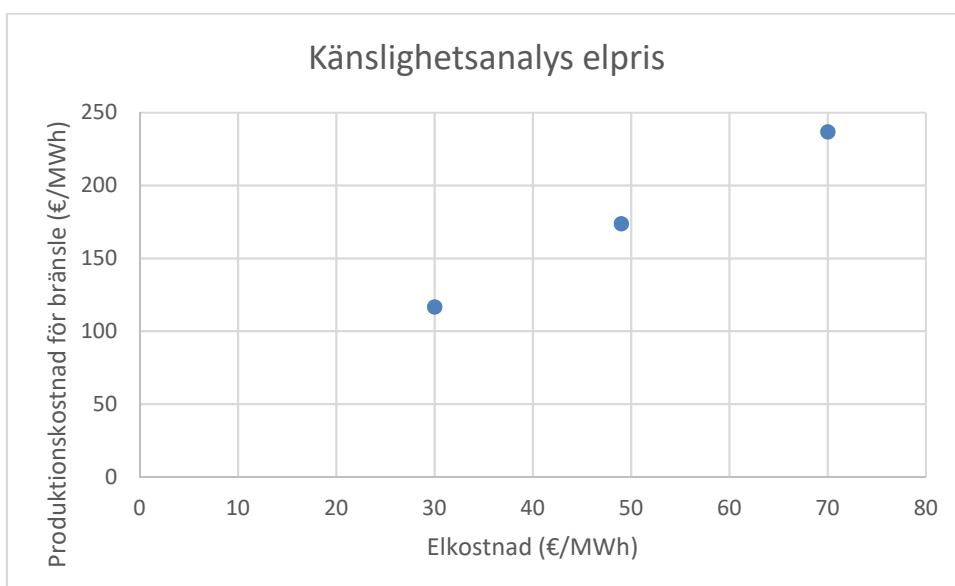
Vid en genomgång av den teknoekonomiska situationen för denna typ av anläggning (14), blev det uppenbart att investeringskostnaden för anläggningen i princip uteslutande beror på elektrolysörerna som generera vätgas. Värdena gäller för en preliminär design för en process som omvandlar ca 7000 kg/h koldioxid per timme till ca 1700 kg/h, eller knappt 15 000 årston, transportbränsle i form av FT-diesel. En nedbrytning av investeringskostnaden återfinns i figur 10 nedan.



**Figur 10** En nedbrytning av investeringskostnaden för den föreslagna tekniken.

Som kan ses i figuren är ca 65 % av kostnaden själva elektrolysören, men det ska tilläggas att även oförutsett och byggnader är skattade med faktorer, vilket gör dessa beroende av storleken på investering i elektrolysören. Naturligtvis beror storleken på investering i elektrolysör på vilket antagande som görs om kostnaden per installerad MW, som i sig har ett ganska stort spann enligt litteraturen (15), närmare bestämt \$430-\$2121/MW.

Förutom investeringskostnaden krävs det insatsvaror för att producera bränslet och också här är det elektrolysören som är kostnadsdrivande. Närmare bestämt är det elektriciteten som behövs för att framställa vätgasen som är den överlägset största kostnadsposten. Då elektriciteten kan variera användes tre olika värden för att beräkna kostnaden för bränslet, figur 11.



**Figur 11** Produktionskostnaden för bränslet beräknat för en årlig drifttid på 8400 h, 5% ränta och en avskrivningstid på 25 år.

Trots det stora beroendet av elektricitetspris och elektrolysörinvestering så ses vissa fördelar med integrationen av de två processerna, etanolproduktion och CO<sub>2</sub> omvandling. Vid produktion av vätgas genereras också en hel del lågtemperatur värme vid 60-80 C. Denna värme kan, om etanolproduktionen använder spannmål som råvara, användas för att torka foderfraktionen. Om trä används som utgångsmaterial för produktionen är användningen av detta värme mindre uppenbar, kanske kan det användas för att torka biomassan, men detta är inte så troligt. Vidare kan den värme som genereras av den exoterma FT reaktionen användas för att driva av etanolen i destillationsdelen av fabriken. Vid start från biomassa kan denna högkvalitativa värme med fördel användas först i förbehandlingen av biomassan och därefter i destilleringen och på så sätt åstadkomma en effektiv integrering. Dock kommer detta inte att mer än på marginalen påverka produktionskostnaderna.



## Diskussion

Det kan konstateras att det är fullt möjligt att med den utvecklade tekniken öka det biogena kolvätes utbytet från en etanolanläggning. Genom att tillsätta vätgas och använda de katalysatorer som utvecklats inom projektet kan en process tas fram där ett flytande kolväte utan syrenehåll kommer ut som en sidoprodukt tillsammans med etanolen. Det kan dock konstateras att de ska till stora mängder förnybar elektricitet för att denna typ av process ska kunna utföras i större skala. Det kommer dessutom att vara kostsamt och framtida arbete ska fokuseras främst mot att sänka investeringskostnaden för elektrolysörerna, samtidigt som verkningsgraden för dessa höjs. Detta görs bäst genom utveckling av nya elektroder, men också genom att tänka om vad gäller typ av elektrolysör, där anjonbytarmembran och fastoxidbränsleceller kan ersätta den traditionella alkaliska elektrolysören eller protonbytarmembrantypen. Speciellt när det finns värme tillgänglig vid hög temperatur, så som från den omvända vattengasreaktionen, kan elförbrukningen minskas genom användning av en fastoxidbränslecell.

Det finns därefter bara överstigliga hinder för att kommersialisera tekniken och det ger god mening att integrera den i en etanolanläggning där både hög- och lågvärdig värme kan användas i flera steg, samtidigt som en ren koldioxidström finns tillgänglig. Denna typ av integration är mer lämplig än till exempel integration i ett kraftvärmeverk där koldioxiden måste separeras från rökgaserna innan processering. Dock kan den lågvärdiga värmen i det fallet med fördel användas på fjärrvärmesystemet.

Användning av en alkohol för att generera och lagra vätgas under kortare perioder för att buffra en fluktuerande tillgång på elektricitet med låg kostnad har potential. Det visar sig vara möjligt att framställa vätgas med hög produktionshastighet med de framtagna, ympade katalysatorerna. Vidare arbete ska fokuseras på användning av etanol istället för andra alkoholer för att göra processen ännu mer tillgänglig för användning.

Resultaten i projektet kan på medellång till lång sikt möjliggöra tillverkning av bränslen, men också kemikalier, från en biogen koldioxid och förnybar elektricitet. Detta kommer att vara en viktig del av omställningen till ett framtida samhälle som är oberoende av fossil energi.

## Publikationslista

Inom ramen för projektet har tre publikationer tagits fram för publicering.

1. Improving Ni/Ce-Zr Catalysts for the Reverse Water-Gas Shift Reaction: On the Effect of Pd and Ir as Activity/Selectivity Co-Catalyst and Promoter, Ajakaiye Jensen L.I., Blomberg S. and Hulteberg P.C., to be submitted to Catalysts
2. Acceptorless dehydrogenation of alcohols by iridium pincer complexes under batch and continuous flow conditions, Alexey V. Polukeev, Omar Y. Abdelaziz, Christian P. Hulteberg, Ola F. Wendt, submitted to Angewandte chemie.
3. Economic and environmental potential of large-scale renewable synthetic jet fuel production through integration into a biomass CHP plant in Sweden, Fagerström, Abdelaziz, Poulidikou, Lewrén, Hulteberg, Wallberg, Rydberg, abstract accepterad, fullängdsartikel under arbete till Frontiers in Sustainability

Den första artikeln sammanfattar arbetet som gjorts kring den mest lovande katalysatorkandidaten för den omvända vattengasreaktionen. De mest framstående resultaten i artikeln är att katalysatorn oväntat nog inte behöver någon ånga närvarande vid reaktionen och att den har god termisk stabilitet.

Den andra artikeln visar på hur väl ett samarbete mellan organokemister och reaktionstekniker kan falla ut. I artikeln beskrivs arbetet som gjorts för att kunna använda en alkohol som ett vätgaslager och de katalysatorer som tagits fram först som homogena katalysatorer för att sedan ympas fast på bärare och användas i flödesreaktorer. Den stora behållningen för projektet är, förutom proof-of-concept, att det är möjligt att under flödesförhållanden uppnå mycket högre aktivitet än vid satsvis körning.

I den tredje artikeln kommer slutligen de teknoekonomiska aspekterna av denna typ av bränsleproduktion att redovisas. Den stora utfallet från beräkningarna visar att den överlägset största investeringskostnaden är för vätgasproduktionen och att den överlägset största driftkostnaden är för elektricitet.

## Referenser

1. *The future of hydrogen – opportunities and challenges*. . **Ball , M and Wietschel , M**. 2009, Int J Hydrog Energy, Vol. 34.
2. **Mendes Souza , G, et al**. *Bioenergy & sustainability: bridging the gaps*. São Paulo : Brazil: Scientific Committee on Problems of the Environment (Scope), 2015.
3. *The role of biofuels for transportation in CO2 emission reduction scenarios with global versus regional carbon caps*. **Grahn , M, Azar , C and Lindgren, K**. 3, 2009, Biomass Bioenergy, Vol. 33, pp. 60–71.
4. *Biomass for energy: a dream come true... or a nightmare?* **Azar , C**. 2011, Wiley Interdiscip Rev: Clim Change, Vol. 2, pp. 09-23.
5. **SOU 2013:84**. *Fossilfrihet på väg*. s.l. : Statens Offentliga Utredningar, 2013.
6. **ER 2017:07**. *Strategisk plan för omställning av transportsektorn till fossilfrihet*. s.l. : Statens Energimyndighet, 2017.
7. **ER 2017:14** . *Luftfartens omställning till fossilfrihet*. 2017 : Statens Energimyndighet.
8. **Nikoleris , A and Nilsson , L**. *Elektrobränslen en kunskapsöversikt [Electrofuels an overview]*. Lund : Faculty of Engineering, Lund University; 2013., 2013.
9. *Terminology used for renewable liquid and gaseous fuels based on the conversion of electricity: a review*. **Ridjan , I, Mathiesen , BV and Connolly , D**. 37, 2016, J Clean Prod, Vol. 112 (Part 5), pp. 09–20.
10. **Brynolf, S**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.288> : s.n., 2017.
11. *On the use of electrolytic hydrogen from variable renewable energies for the enhanced conversion of biomass to fuels*. **Mignard , D and Pritchard , C**. 4, 2008, Chem Eng Res Des, Vol. 86, pp. 73-87.
12. **Rostrup-Nielsen, Jens R**. *Steam reforming catalysts: an investigation of Catalysts for Tubular Steam Reforming of Hydrocarbons*. Kgs Lyngby : Danish Technical Press, 1976.

## **Bilagor**

- Administrativ bilaga
- Vetenskapliga artiklar
- Känslig information som ej ska publiceras i Energimyndighetens projektdatabas.