

Väte som flygplansbränsle

Av Claes Eriksson

Väteframdrivning har betydande potential att minska klimatpåverkan under flygning med upp till 75% när den används i motorer för direkt förbränning och så mycket som 90% när den används i bränsleceller för att driva elektriskt drivna hybridmotorer eller distribuerade framdrivningssystem. Energirikt och lätt att tillverka från olika kolväten eller genom hydrolys av vatten till högre elförbrukning, har väte ändå inte lyckats ta fart av många skäl främst kanske för att den låga tätheten gör att stora tankvolymerna behövs. Många länder vill undvika import och eldningar av kolväten pga miljöskäl samt att man har egna små tillgångar.

Ett tidigare vätgasdrivet flygplansprojekt var denna tysk/ryska studie från 1990-talet



För att göra flygplan miljövänliga och undvika CO₂ utsläpp finns det flera olika teknologier från batteridrift till biobränsle till vätgas. Batterier har ett kapacitet/vikt/kostnadsproblem på flygplan för längre flygningar än en timme med över 20-50 passagerare. Batterierna tappar inte mätbart vikt då elen förbrukas samt har en begränsad livslängd och är då dyra att periodiskt byta till nya, ett passagerarplan har stor nytta av viktminskningen då jetbränsle förbrukas. Biobränsle ersätter visserligen olja från marken men vid förbränningen genereras lika mycket CO₂.

Väte kan förbrännas antingen i en jetmotor för att driva dess fläkt eller i en bränslecell där den genererar el för att driva elmotorer. Vätet som förbrukas minskar vikten på bränslet ombord vilket ökar flygplanets räckvidd.

För vätgas eller flytande kallt väte "LH₂" öppnas möjligheten för stater att kraftigt öka elkonsumentionerna med beskattad elkraft, ofta i statligt ägda kraftverk samt att kunna beskatta flygbränslet, även Tyskland med stor vindkraftsindustri ser en möjlighet att låta överskottselen som elnätet inte kan svälja producera vätgas. Tyskland har även en stor rysk naturgasimport som kan användas för att tillverka vätgas. Tyskland med Linde Gas och Frankrike med Air Liquid kan då bli dominerande väteproducenter i EU.

Svenska staten med Vattenfall ser möjligheter att även de få upp elförbrukningen speciellt som motvikt då det nya finska kärnkraftverket går med full effekt och Svenska Basel är stor kund. Med höga elpriser skapas möjligheter för stora energi- och

moms-skatteintäkter. De flesta länder i västvärlden tar in stora belopp på energiskatter. För diesel ligger Sverige på delad andra plats ihop med Norge på \$1.61/liter endast efter Hong Kong på \$1.84.

För elkraft utan nätavgifter ligger Sverige bättre till på \$0.19/kWh jämfört med trean/tvåan Danmark/Tyskland på \$0.34/0.36 kWh.

Vätgas producerad miljövänligt har fördelen att den kan lagras komprimerad eller kryogent i flytande fas. När det gäller infrastruktur är det en gynnsam faktor att man kan börja använda väte för marktransportfordon inom tidsperioden 2020-25. Detta kommer att bekanta flygplatserna med tekniken. Priset på flytande väte förutspås falla från fyra gånger kostnaden för flygfotogen i dag till ungefär samma kostnad senast 2050, enligt McKinsey. Även om det kan göra flygresor dyrare, skulle det förbli överkomligt, speciellt om nya flygplan blir lättare och får ännu effektivare vingar med högre glidtal i intressanta farter.

Väte kan produceras på olika sätt, de mest populära är från naturgas/metan eller via elektrolys från vatten med elkraft och smarta katalysatorer för att minska energiåtgången. Vätagasproduktionen, särskilt genom att använda ångreformprocessen för metan, kan nå effektivitetsintervallet (65% - 75%). Vätagas kan också produceras från vatten med hjälp av vattenelektrolysmetoden, som skapar cirka 95% av den totala mängden väte som produceras dock med betydande elförbrukning.

Väte som flygplansbränsle

Nyligen är plasmateknik en viktig metod för att producera hydrogen-bränslet med kolväten eller alkoholer. Vätgasproduktion med hjälp av ammoniakavfall är en ny metod som kan användas för att producera rent väte med hjälp av plasmamembranreaktorn.

Vattenelektrolysmetoden kan delas in i tre olika typer: electrolyte alkaline, proton exchange membrane (PEM) och solid oxide electrolyzers (SOE).

The typical specifications of alkaline, PEM and SOE	Alkaline	PEM	SOE
Technology maturity	State of the art	Demonstration	R & D
Cell temperature, °C	60 - 80	50 - 80	900 - 1000
Cell pressure, bar	<30	<30	<30
Current density, A/cm ²	0.2 - 0.4	0.6 - 2.0	0.3 - 1.0
Cell voltage, V	1.8 - 2.4	1.8 - 2.2	0.95 - 1.3
Power density, W/cm ²	Up to 1.0	Up to 4.4	-
Voltage efficiency, %	62 - 82	67 - 82	81 - 86
Specific system energy consumption, kWh/Nm ²	4.5 - 7.0	4.5 - 7.5	2.5 - 3.5
Partial load range, %	20 - 40	0 - 10	-
Cell area, m ²	<4	<300	-
Hydrogen production, Nm ² /hr	<760	<30	-
Stack lifetime, hr	<90,000	<20,000	<40,000
System lifetime, yr	20 - 30	10 - 20	-
Hydrogen purity, %	>99.8	99.999	-
Cold start-up time, min	15	<15	>60

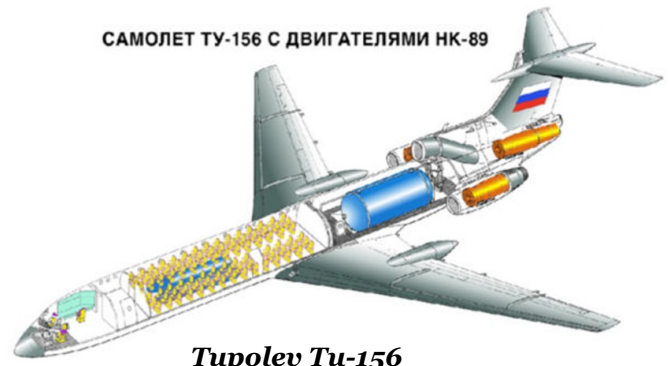
Man har redan provflugit vätgasdrivna flygplan bl a i Ryssland. Tupolev Tu-155 är en modifierad Tupolev Tu-154 (СССР-85035), som användes som testbädd för alternativa bränslen. Detta är det första experimentella flygplanet i världen, som flugit på flytande väte. En liknande Tu-156 byggdes aldrig.

Tu-155 flög först den 15 april 1988. Det använde vätebränsle och senare flytande naturgas (LNG). Det flög fram till Sovjetunionens fall och det är för närvarande avställt på Ramenskoye flygplatsen nära Zhukovskiy. Tu-156 var tänkt att flyga runt 1997, men ställdes in på grund av Sovjetunionens fall. Flygplanet använde kryogenik för att lagra bränsle. Bränsletanken var placerad i bakkroppen. Ett utmärkande drag hos flygplanet är att utskjutningen av ventilationssystemet är synlig på stjärten (nära nr 2-motorn). Tu-155 använde Kuznetsov NK-88 motorer. Tu-156 var avsedd att använda Kuznetsov NK-89 motorer. Tu-155 flög omkring hundra flygningar tills den pensionerades.

Användningen av väte i flygplan har också fått ny och stark uppmärksamhet i Europa. Det började i början av juni med att den franska regeringen fastställde miljömål för luftfarten (efter samråd med branschen), inklusive övergång till väte som ett primärt bränsle. Europeiska kommissionen uttryckte stöd och kopplade det till en kommande "vätestrategi". Forskningsprogrammet Hyperion kommer att utvärdera riskerna för framdrivning av väteflygplan. Den franska regeringen finansierar programmet, som börjar i år.



САМОЛЕТ ТУ-156 С ДВИГАТЕЛЯМИ НК-89



Tupolev Tu-156

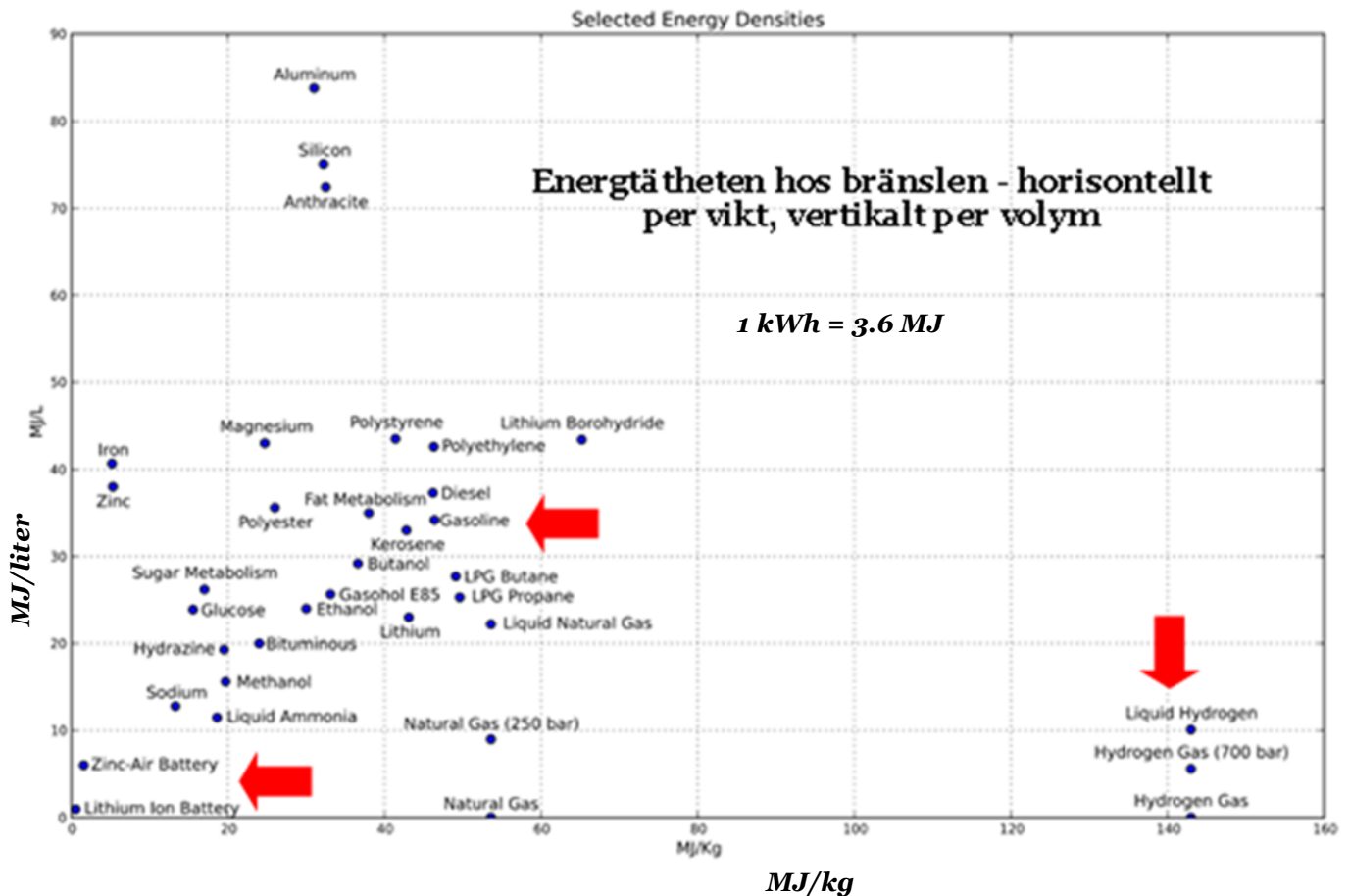
Det är många andra branscher som jobbar med väte som bränsle bl a i Sverige för stålindustrin där man jobbar med direktreduktion av järnmalm i stålverk där man med väte direkt ska binda syret i den smälta järnmalmen utan att som idag blanda med kol och sedan blåsa in syrgas i smältan för att kolet och syret ska bilda främst CO₂ men andra gaser bildas också.

Även järnväg, bil och lastbilar/bussar/fartyg studerar vätegas. Då speciellt järnväg och fartyg är mindre viktökning och går i lägre hastigheter blir problemen med stora och tunga vätetankar mindre och de kan då tillverkas i stål.



Toshiba bränslecelldriven båt

Väte som flygplansbränsle



Den franska regeringen har avslöjat planer på att investera kraftigt i att utveckla framtidens flygplan. Frankrikes ambitioner för ett koldioxidsnålt plan inkluderar en omarbeting av den populära Airbus A320 till 2030 och övergången till vätgasbränsle till 2035. Sammanlagt kommer 15 miljarder euro (17 miljarder dollar) att satsas i flyg- och rymdsektorn under de kommande åren.

Räddningsaktionen för Frankrikes luftfartssektor är inte helt inriktad på att stödja befintliga flygbolag. Medan visst stöd kommer att ges åt Air France, är det den franska regeringens planer att satsa en stor summa i utvecklingen av plan i framtiden. Enligt rapportering i LesEchos är det landets ambitioner att utveckla ett noll koldioxidutsläpp flygplan med målet att lanseras så snart som 2035. Frankrike hade tidigare diskuterat ett nollutsläppsplan men har fört lanseringsmålet framåt från det tidigare målet 2050. Fördelen för Frankrike är att man skapar ett stort behov av el och därmed kärnkraftsel där Frankrike har stora intressen.

Hur påverkar vätgasdrivna motorer framtidens passagerarplan?

Även om flytande väte (LH 2) har tre gånger den gravimetriska energitätheten för jetbränsle, har det emellertid en låg volumetrisk densitet (cirka 2,4 kWh/liter jämfört med 10,4

kWh/liter för fotogen). Detta skapar en enorm utmaning för flygplansdesigners eftersom vätebränsle kommer att kräva ungefär fyra gånger volymen av jetbränsle för att bära samma energi ombord.

För widebody, långdistansflygplan, är det mest lämpliga alternativet inte väte på grund av komplexiteten och storleken på vätesystemen enligt managementkonsulten MckInsey, utan snarare syntetiska bränslen, där man använder förnybar energi för att omvandla koldioxid i luften och vatten till jetbränsle såsom träden gör för att ihop med solljus bilda cellulosa.

Hälften av alla flygresor över hela världen sker dock inom 500 nautiska mil, så det finns ett behov av ett nytt miljövänligt regionalt flygplan. Väte kan därför vara en lösning för mindre flygplan på korta distanser speciellt om man börjar med komprimerad vätgas till måttliga tryck i mindre tankar och man kan använda "stackar" av Toyota Mirai typ bränsleceller på mellan 100-200hk. Bl a Toshiba utvecklar sådana.

Förutom jetmotorernas anpassning är det de volym-mässigt stora trycktankarna för komprimerad vätgas, som ger utmaningar för ingenjörerna. Idag används ofta kompositförstärkta tunna metalltankar för trycksatt vätgas.

Ett komposit-tryckkärl "Composite Overwrapped Pressure Vessel" (COPV) är ett kärl som består av ett tunt metalliskt, icke-strukturellt foder lindad med strukturella fiberkompositer, konstruerat för att hålla inre övertryck. Fodret ger en barriär mellan vätskan/gasen och kompositen, vilket förhindrar läckor (som kan uppstå genom matrismikrosprickor, som inte orsakar strukturella fel) och kemisk nedbrytning av strukturen. I allmänhet appliceras ett skyddande skal för skyddande avskärmning mot slagskador på kompositen. De vanligaste kompositerna är fiberförstärkta polymerer med kol- och kevlar-fibrer. Den främsta fördelen med ett COPV jämfört med ett metalliskt tryckkärl av liknande storlek är lägre vikt, men detta kan uppvägas av de ökade kostnaderna för tillverkning och certifiering.

Toyota Mirai som har bränslecell och säljs kommersiellt i världen har "två vätetankar med en treskiktsstruktur gjord av kolfiberarmerad plast bestående av nylon 6 från Ube Industries och andra material. Tankarna lagrar väte på 70 MPa och har en sammanlagd vikt på 87,5 kg och 5 kg kapacitet."



Även om man antar att lättviktstankar kan utvecklas, betyder volymdensitetsfrågan att vätgasframdrivning - åtminstone för nära till medellång sikt - är bäst lämpad för mindre regionala, kort- och medelstora flygplan. Även om vätebränsle är tekniskt genomförbart för flygplan med längre räckvidd, kommer bränsletankarnas storlek att resultera i mycket längre eller större flygkroppar, vilket resulterar i kostnader så mycket som 50% högre per passagerare. På längre sikt är det emellertid möjligt att nya volymetriskt effektiva flygplanskonstruktioner och övergång till kryogent flytande väte som på många rymdraketer, skulle göra det möjligt att överväga väte för framtida applikationer med lång räckvidd.

För ett Airbus A320 / Boeing 737-flygplan som flyger på typiska distanser upp till 2 000 km skulle frågan om bränslevolym kunna hanteras genom att sträcka flygkroppen för att rymma LH₂- tankar bakom passagerarkabi-

nen. Elkraft skulle tillhandahållas av ett hybridsystem som kombinerar vätebrännande turbinmotorer, som är dimensionerade för start och stigning, med en 11-megawatt bränslecell för att generera huvuddelen av kraften för flygningen, som en mycket kraftfull APU.

Ett avancerat alternativ för pendlare och regionala flygplan skulle vara bränsleceller, som driver ett distribuerat framdrivningssystem av elektriskt drivna propellrar. Detta alternativ skulle dock inte uppfylla energikraven för medel- och långdistansflygplan. Tills "Blended Wing-body" BWB och andra alternativa konfigurationer blir tillgängliga kommer de mest realistiska lösningarna vara att fortsätta utvecklingen av befintliga flygplan. I dessa skulle stora turbofläktmotorer anpassas för att bränna vätgas.

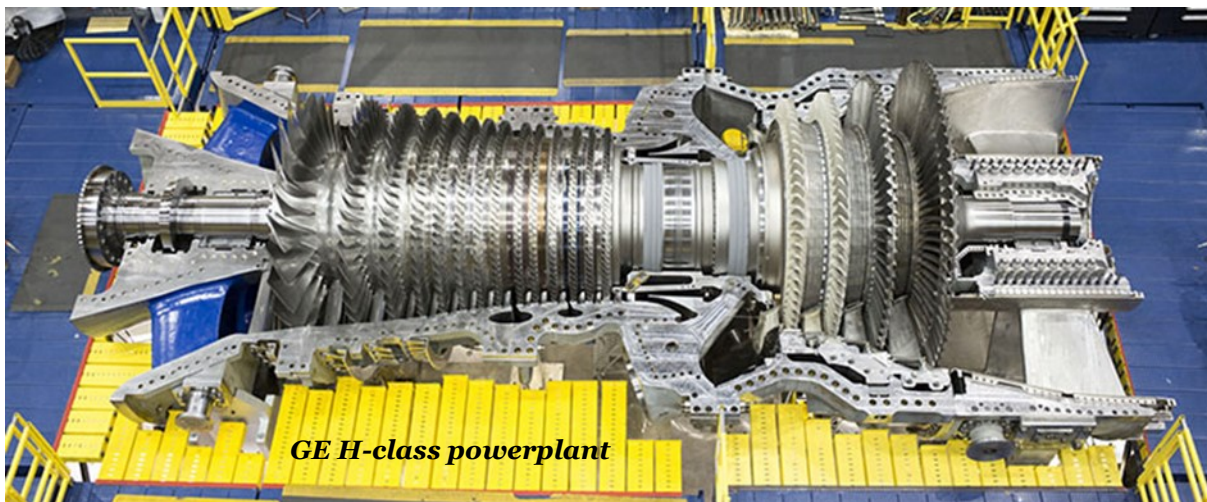


Kan gasturbiner köras på vätgasbränsle?

Vätskeraketmotorer har länge använt flytande syre LOX och flytande väte LH₂ för att få hög effekt ur raketerna. Väte som förbränns i syre "knallgas" har en hög flamhastighet och hög förbränningstemperatur. Den första tyska gasturbinen kördes faktiskt initialt på vätgas för att vara säker på att den skulle tända. Jetbränsle är normalt mycket lågt beskattat via multilaterala överenskommelser och där planen med lätthet kan tankas upp på flygplatser där bränslet är billigast.

Gasturbiner har nästan 30 års erfarenhet av en mängd olika bränslen som innehåller väte, totalt över 6 miljoner drifttimmar som vätedrivna turbiner med koncentrationer från 5% till 95% (i volym). Detta omfattar syntesgas (syngas), en mängd olika stålverksgaser (dvs. koksugns gas och masugns gas) och raffinaderigaser. Denna erfarenhet har hjälpt t ex GE att bli en av världens ledande inom tillämpningen av bränslen som innehåller väte i gasturbiner.

Användningen av vätgas som gasturbinbränsle har visats kommersiellt, men det finns skillnader mellan naturgas och väte som måste beaktas för att korrekt och säkert använda väte i en gasturbin. Förutom skillnader i förbränningsegenskaperna hos dessa bränslen måste effekterna på alla gasturbinsystem och den totala balansen i anläggningen beaktas. I ett kraftverk med en eller flera vätgasdrivna turbiner kan det behövas förändringar i bränsletillbehör, botten-cykelkomponenter och anläggningssäkerhetssystem. En bred falterfarenhet gör det möjligt för ingenjörer att förstå effekten av att använda väte som gasturbinbränsle.



GE H-class powerplant

Eftersom gasturbiner i sig är bränsleflexibla kan de konfigureras för att fungera på grönt väte eller liknande bränslen som en ny enhet, eller uppgraderas även efter införandet av modifieringar på traditionella bränslen. Omfattningen av de ändringar som krävs för att konfigurera en gasturbin för att fungera på vätgas beror på gasturbins ursprungliga konfiguration och den totala balansen i anläggningen, liksom den önskade vätekoncentrationen i bränslet.

Vätgasdrivna turbiner kan också spela en stor roll i världens ansträngningar att minska koldioxidutsläppen. Om man blandar väte med naturgas till dessa turbiner, kan man ta bort en rejäl bit av koldioxidutsläppen. Till exempel kan en 5 procent blandning av väte i naturgas till GE's 9F.03 gasturbin minska de årliga CO₂-utsläppen med nästan 19000 ton. En 50 procent blandning sparar 281000 ton, medan en 95 procent blandning minskar CO₂-utsläppen med jättestora 1,04 miljoner ton. Det motsvarar det årliga koldioxidavtrycket av nästan 70000 amerikaner. Skönheten i dessa turbiner är deras bränsleflexibilitet.

En gasturbin som går på vätgas bränner en del av luftens syre och resten av luften främst kvävgas åker med och kan vid höga temperaturer bilda kväveoxider "NOX" som inte är önskvärda. Detta ställer krav på brännkammarens utformning och att tiden som luften är i den heta lågan minimeras, då hinner inte så mycket NOX bildas.

Det finns förstås många problem. Val måste göras som kan forma framtiden för industrin - mellan gasformigt och flytande väte samt mellan bränsleceller och turbinmotorer, bland annat. Varje beslut kommer att få konsekvenser både för flygplan och för hela ekosystemet - från flygplatser till flygledningstjänst (ATM). Mycket beror på vad som händer med bilar. Drift av flygplan med väte kommer att gynnas av teknikens mognad inom fordonsindustrin där Toyota producerar Mirai med elmotor på 154 hk (113kW), BMW och andra har jobbat längre med väte, Mercedes Lastbilar fick en ny partner i Volvo Lastvagnar som köpt in sig i Mercedes bränslecellsutveckling.

Man kan använda flytande vätgas som flygbränsle som då är mycket kallt och det medför sina problem, men då planet nått sin flyghöjd på 10 000 m är omgivningen kall ca: -50C. Den vätgas, som kokar av från LH₂, används som bränsle till motorerna. Detta medför om man tankar på backen att planet bör starta direkt efter tankning för att minska förlusterna av



Toyota Mirai

Bränslecell och vätgastank



H₂ om motorerna inte hinner svälja all vätgas som kokar upp från tankarna ihop med flytande bränsle i speciella pumpar som klarar att mata en gas/vätskeblandning till insprutningstryck. Man kan då förgasa den trycksatta LH₂ genom att använda den till att kyla kompressorluften och därmed minska kompressorarbetet (dvs. höja verkningsgraden) samt om luften in till brännkammaren är kallare kan man öka effekten på motorn eller ha en lägre turbininloppstemperatur och därmed öka livslängden på de dyraste delarna i motorn, "Brännkammare, Turbin inloppsledskenor, HPT blad stg 1 och stg 2, HPT ledskenor, HPT tättnings segment, HPT turbin-skivor och dess roterande tätningar" samt möjliggöra tillverkning av dessa detaljer i billigare material. Det kan bli avgörande för tillverkning av "Loyal wingmen" motorer som måste ha ett långt pris och tillräcklig dragkraft. Med LH₂ kan man då minska volymen på tankarna jämfört med komprimerad H₂ gas och efter landning snabbt suga ur kvarvarande mix av H₂ och LH₂.



“September 27, 2019 - Mercedes-Benz GLC F-CELL (viktad vätgasförbrukning: 0,91 kg/100 km, viktade CO₂-utsläpp: 0 g/km, viktad strömförbrukning: 18 kWh/100 km) är en mycket speciell plug-in hybrid, eftersom den drivs med en bränslecell och batteriteknik. ”

Det finns två spinn isomerer av väte; flytande väte består av 99,79% parahydrogen och 0,21% ortoglad. H₂ måste kylas till 20,28 K (-252,87 °C). En vanlig metod för att erhålla flytande väte innebär en kompressor som liknar en jetmotor i både utseende och princip. Flytande väte används vanligtvis som en koncentrerad form av vätelagring. LH₂-tätheten är dock mycket låg jämfört med andra vanliga bränslen. Flytande kan den upprätthållas som en vätska i trycksatta och termiskt isolerade behållare.

Man är begränsad i materialval då vissa metaller blir vätesprödkänsliga när vätet diffunderar in i metallen och ansamlas vid lokal uppvärmning tex. slipning och då det vandrar till korngränser där en ansamling av väteatomer gör metallen spröd. Detta är ett vanligt problem på HSS stål ”High Strength Steel” som används tex. i flygplans landställ. Dock är LH₂ ännu mera kostsamt än komprimerad H₂ och är då en ännu större möjlig intäktskälla för de som hanterar bränsle och processar det på flygplatser.

När det gäller bränslecell eller turbinmotor, så är bränslecellens effektivitet 55-60% jämfört med gasturbinens 40-50%. Dock väger en bränslecell mycket mera per utvecklade effekt. En bränslecell skulle alltså vara det bästa alternativet för att

minska ett mindre flygplans klimatpåverkan då den kan ta vikten av bränslecellstackarna för önskad effekt. Vattenånga, som släpps ut från en bränslecell, är svalare och helt kontrollerbar inuti flygplanet. Det kan konditioneras, beroende på tillståndet i den atmosfär som flygplanet flyger i. Detta för minimering av ångstrimmor som främst är små sotpartiklar där luftens vattenånga faller ut, så det är vattenångan man ser, dock med många flygplan över samma område kan mängden ångstrimmor bli mycket störande som tex. över vissa delar av Alperna.

Sammanfattningsvis kan det vara ekonomiskt och tekniskt genomförbart att använda LH₂ i flygplan i A321- eller 737-10 storlek med en passagerarkabin som är mindre såsom i A320 eller 737-8, upp till viss räckvidd men skalningseffekterna gör detta allt mer utmanande med större flygplan som A350 eller 787 som flyger längre sträckor. Bränsletankteknologi är därför en kritisk faktor som styr hastigheten och utsträckningen i vilken väte kommer att användas. Man kan notera att den senaste NASA raketens SLS ”Space Launch system” LH₂ och LOX bränsletankar är tillverkade i Al-Li och friktionssvetsade med ESAB robotsvetsar i en specialrigg i New Orleans.

”Svetsningen är klar på den största delen av grundsteget, som ska ge bränsle för den första flygningen av NASA: s nya raket, Space Launch System, med Orion rymdfarkosten 2018. Grundstegets flytande vätetank har svetsats på Vertical Assembly Center vid NASA: s Michoud Assembly Facility i New Orleans. Den flytande vätetanken är mer än 30 meter hög och är den största kryogena bränsletanken för en raket i världen. Den flytande vätetanken och flytande syretanken är en del av grundsteget - ”ryggraden” i SLS-raketerna, som kommer att bli mer än 200 meter hög. Tillsammans kommer tankarna att hålla 733.000 liter drivmedel och mata farkostens fyra RS-25 motorer för att producera totalt 2 miljoner pund dragkraft. Detta är den andra stora delen av grundstegets flygande hårdvara att svetsas på Vertical Assembly Center. Den centrala etappen avslutade svetsning i april. Mer än 2,7 miles av svetsar har slutförts för grundstegets hårdvara på Michoud.”

