

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Tankar för flytande vätgas	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Liquid hydrogen tanks (LH2-Tanks)	
Universitet/högskola/företag RISE Research Institutes of Sweden	Avdelning/institution Fibrer, polymerer och kompositer
Adress Box 857, 501 15, Borås	
Namn på projektledare Robin Olsson	
Namn på ev övriga projektdeltagare Chalmers Tekniska Högskola, KonveGas Sweden AB, Linköpings Universitet Oxeon AB, RISE SICOMP AB	
Nyckelord: 5-7 st Fossilfritt flyg, Vätgas, Kompositmaterial, Kryogena tankar, Lättvikt	

Förord

Projektets huvudfinansiär har varit Energimyndigheten. Medfinansiärer har varit Oxeon AB samt i mer begränsad grad KonveGas Sweden AB. Underlag för dimensioneringskraven har inhämtats från Oxeons kunder inom europeisk flygindustri. RISE SICOMP var tidigare projektledare, men är från 2022-04-01 helt integrerade i RISE AB, som sedan dess är projektledare.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Summary	2
Inledning/Bakgrund	2
Genomförande	4
Resultat	8
Diskussion.....	10
Publikationslista.....	11
Referenser, källor.....	12
Bilagor	12

Sammanfattning

I projektet har en demonstratortank för flytande väte (LH2) dimensionerats, tillverkats och provats, med det långsiktiga syftet att utveckla ultralätta flygplanstankar för LH2. Väte kan användas som fossilfritt bränsle i förbränningsmotorer eller i bränsleceller för att generera el till motorer. För att minimera volymen måste vätet lagras flytande vid mycket låg temperatur (-253°C). Tankens cylindriska del består av ett lätt kompositmaterial med skikt av kolfiberförstärkt plast. De halvsfäriska gavlarna har tillverkats i titan genom additiv tillverkning. Tryck- och temperaturförändringarna vid tankning med LH2 orsakar normalt mikrosprickor i kompositen, som ger gasläckage. Sprickorna har förhindrats genom att använda olikriktade tunna kompositskikt, vilket har möjliggjort en tank utan invändigt foder. Projektet har studerat gasgenomsläpplighet och uppkomst av mikrosprickor vid utmattning och extremt låga temperaturer, samt studerat materialets egenskaper vid -253°C. Kunskapen har använts för att dimensionera och tillverka kompletta tankar med kompositmaterial för relevanta temperaturer och tryck. Under 20 cykler med fyllning och tömning av flytande kväve (-196°C) observerades inga skador eller läckage. Vid ett efterföljande sprängprov uppnåddes ett tryck på nästan 30 bar, vilket är tre gånger högre än målet vid dimensioneringen. Projektet bidrar till att stärka Sveriges ledande position inom området och möjliggör marknadsföring av vätgastankar med svenska tunnskiktskompositer till flygindustrin.

Summary

In the project a demonstrator tank for liquid hydrogen (LH2) has been designed, manufactured, and tested, with the long-term aim to develop ultralight aircraft tanks for LH2. Hydrogen can be used as a fossil-free fuel in combustion engines or in fuel cells to generate electricity for motors. To minimize the volume the hydrogen must be stored in liquid form at very low temperature (-253°C). The cylindrical part of the tank consists of a lightweight composite material with layers of carbon fibre reinforced plastic. The hemispherical end caps (domes) have been produced in titanium by additive manufacturing. The changes in pressure and temperature during fuelling with LH2 normally cause micro-cracking in the composite, which causes hydrogen leakage. The cracks have been prevented by using thin composite plies of different orientation, which has allowed a linerless tank. The project has studied hydrogen permeability and crack initiation during fatigue and extremely low temperature, and the material properties at -253°C. The knowledge has been used to design and manufacture complete tanks with composite material for relevant temperatures and pressure. During 20 cycles of filling and emptying of liquid nitrogen (-196°C) no signs of damage or leakage were observed. During a subsequent burst test a pressure of almost 30 bar was reached, which is three times more than the design target. The project contributes to strengthening the leading position of Sweden in the area and allows marketing of hydrogen tanks with Swedish thin-ply composites for the aerospace industry.

Inledning/Bakgrund

För att hejda den globala uppvärmningen krävs på kort sikt drastiska sänkningar av koldioxidutsläppen och på längre sikt en helt fossilfri ekonomi, vilket ligger till grund för de utsläppsmål som satts upp av FN, EU och i Sverige.

För att uppnå det långsiktiga målet krävs även fossilfria flygtransporter. Batteri-drivna flygplan kan användas på korta sträckor, men för längre sträckor krävs fossilfria bränslen. Väte ett lovande fossilfritt bränsle, förutsatt att vätet genereras med el från vind-, våg-, eller solenergi, t. ex. genom elektrolys av vatten. Vätet kan sedan användas antingen som bränsle i förbränningsmotorer eller i bränsleceller för att generera el till eldrivna propellrar.

Väte är särskilt lämpat för flyget eftersom det har tre gånger högre energiinnehåll per kg än konventionella fossila flygbränslen. Det låga energiinnehållet per liter gör dock att vätet måste lagras i gasform under högt tryck, eller i flytande form vid extremt låg temperatur (-253°C). För flyget är flytande väte det enda alternativet, eftersom högtryckstankar kräver tjocka väggar och blir alltför tunga.

Kraven på flygets bränsletankar är att de är tillräckligt täta och har låg vikt. Vätgasmolekyler är extremt små och diffunderar långsamt genom alla material, men läckaget ökar drastiskt om materialet har mikroskopiska sprickor. Tankar för väte måste därför göras så gott som sprickfria.

Kolfiberförstärkt plast (kompositer) har betydligt lägre vikt än metalltankar med motsvarande hållfasthet och har länge använts för tillverkning av portabla gastankar. En begränsning är dock att sprickor mellan fibrerna kan uppstå redan vid relativt låga spänningar. Ur säkerhetssynpunkt är det en fördel, eftersom det orsakar läckage snarare än att tanken sprängs, men materialet utnyttjas dåligt. Komposittankar har därför normalt försetts med ett invändigt ”gastätt” foder (”liner”) av metall eller plast. Nackdelen är en ökad vikt, samt att fodret kan utmattas eller släppa från tankväggen om tanken regelbundet utsätts för stora ändringar i tryck eller temperatur.

I praktiken orienteras fibrerna i de olika lagren av en komposittank i flera (minst två) olika riktningar för att hantera de fleraxliga laster som uppstår i tanken. Tillsammans bildar de olika lagren ett så kallat laminat. Temperaturändringar orsakar mycket olika töjningar längs och tvärs fibrerna, vilket ger upphov till stora temperaturspänningar i ett laminat med fibrer i flera riktningar. Risken för sprickor i komposittankar ökar väsentligt vid kryogena temperaturer (-150°C eller lägre) på grund av den stora skillnaden mellan tillverkningstemperatur (+60°C eller högre) och användningstemperatur.

Genom att använda laminat med mycket tunna kompositskikt kan sprickbildning mellan fibrerna före slutbrott (där fibrerna går av) fördröjas eller förhindras. Oxeon är ett svenskt SMF och är en ledande tillverkare av tunnskiktskompositer. Fördelarna med sådana material har studerats internationellt i flera projekt och studerades av RISE och Oxeon i ett svenskt projekt 2012-2014 och i ett svenskspanskt projekt 2013-2015.

I det tidigare europeiska projektet CHATT studerades komposittankar för flytande väte och RISE använde tunnskiktskompositer från Oxeon för att dimensionera och tillverka en rörformig demonstrator. Rörets ändrar pluggades igen och röret provades vid FOI under temperaturlast (-196°C) samtidigt med axiell dragning för att simulera de axiella spänningarna vid inre övertryck. Spänningarna i ringled är dock dubbelt så stora och kunde inte simuleras.

Syftet med LH2-Tanks var att fortsätta arbetet i CHATT genom att dimensionera, tillverka och prova ett kompositrör med tunna skikt vid det spänningstillstånd och den temperatur som uppstår i en verklig tank för flytande väte. Till skillnad från CHATT skulle dimensioneringen baseras på omfattande mätningar av materialets egenskaper vid både rumstemperatur och vid -253°C. Det långsiktiga målet var att öka industrins förtroende för att tunnskiktskompositer kan användas för att tillverka kommersiella tankar för flytande väte, utan behov av invändigt foder.

Detta skulle kunna öka marknaden för Oxeons produkter inom flyg- och rymdindustrin samt öka möjligheterna för RISE, Chalmers och Linköpings Universitet för deltagande i framtida svenska och europeiska projekt inom vätagasområdet. Erfarenheterna från projektet skulle också öka kompetensen hos KonveGas som leverantör och tillverkare av fiberlindade gastankar. Verkliga tankar för flytande väte tillverkas som termosflaskor med en innertank omgiven av vakuum och en yttertank. Dessutom krävs ett flertal hjälpsystem för kontroll av tryck och temperatur. LH2-Tanks har dock helt fokuserat på innertanken.

Projektet har genomförts under två år, med Energimyndigheten som huvudfinansiär och med företagen Oxeon och KonveGas (båda SMF) som medfinansiärer.

Genomförande

Figur 1 ger en översiktlig bild av projektets syften och olika steg.

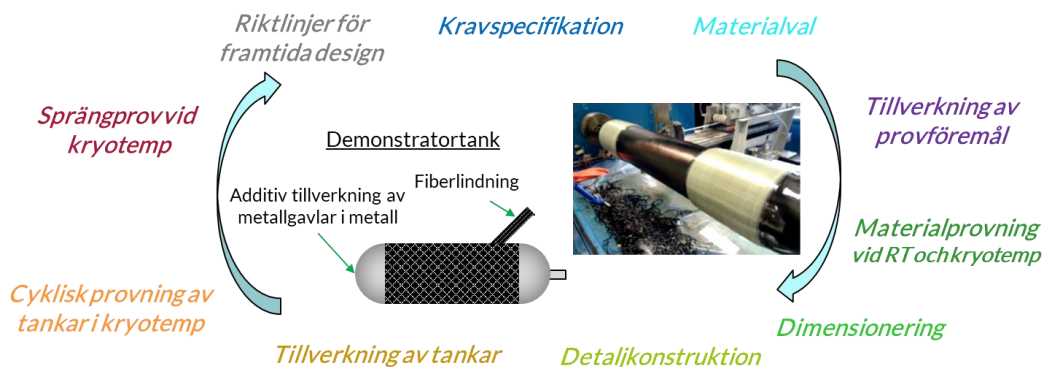


Fig. 1. Projektcykel med projektets olika deluppgifter.

Projektet har bestått av följande sju arbetspaket (AP). Inom parenteser anges arbetspaketsledare (understrukna) och övriga deltagare i varje arbetspaket.

AP1 - KRAVSTÄLLNING OCH KOMPLETTERANDE STUDIER

(Oxeon, RISE, Chalmers)

- a) Oxeon utvecklade en förenklad kravspecifikation baserad på kundkontakter med civila flygplanstillverkare vad gäller laster, säkerhetskrav, miljö, tankningscykler och livstid för tankar med flytande väte.
- b) RISE och Oxeon har genomfört begränsade litteraturstudier om komponenter och uppbyggnad av system för lagring av vätgas.
- c) Chalmers har i samarbete med universitetet i Bologna genomfört experimentella och teoretiska studier av vätgasdiffusion genom kompositmaterial, samt genomfört litteraturstudier av temperaturens inverkan. Oxeon har bistått med tillverkning av provföremål.

AP2 - MATERIALMODELL

(RISE, LiU)

- a) RISE har modifierat befintliga modeller genom att beakta de mekaniska egenskaperna (styvhet och styrka) både vid montage temperaturen (+22°C) och vid drifttemperaturen för flytande väte (-253°C). Dessutom har modellerna modifierats för att beakta uppmätt variation i temperaturutvidgningskoefficienter (CTE) för hela intervallet -253°C till +100°C. För mellanliggande temperaturer har de mekaniska egenskaperna uppskattats genom linjär interpolation, och CTE genom medelvärdesbildning av den olinjära variationen i det temperaturintervall som är av intresse.
- b) RISE har även modifierat befintliga modeller för tunna skiktets hållfasthet i laminat med olikriktade skikt ("in-situ-hållfastheten") genom att ta hänsyn till uppmätta egenskaper vid temperaturen för flytande väte. Nödvändiga mätningar av intralaminär brottseghet har genomförts, men bara vid rumstemperatur. Spänningar på grund temperaturlast kan sedan förutsägas med hjälp av uppmätta CTE. Modellerna kan verifieras genom LiU:s mätningar av sprickinitiering efter dopping i flytande kväve (-253°C), men sådana jämförelser har inte hunnit göras under projektet.
- c) LiU har sammanställt kriterier för tillväxt av matrissprickor vid utmattning, samt uppmätt tillväxt av sådana sprickor vid termisk och mekanisk utmattning. Spricktillväxten efter 100 temperaturchocker var dock liten eller försumbar, vilket tyder på att rena temperaturlaster kanske inte ger upphov till utmattningssprickor. Utmattningsmodellen förutsäger tillväxt av existerande sprickor och när tillväxten ökar, och kan därför inte ange hur många cykler som kan tillåtas innan de första sprickorna uppstår.

AP3 - KONSTRUKTION & DIMENSIONERING

(RISE)

På ett tidigt stadium valdes att tillverka tankens cylindriska del genom fiberlindning av tunna kolfiberband indränkta i epoxi och de halvfariska gavlarna

genom additiv tillverkning med titan. Huvudsyftet var att demonstrera att sprickor och läckage i kompositcylindern kan förhindras genom att använda tunna skikt, samt att tillverka en cylinder med låg vikt.

Valet av fiberlindning grundades på den begränsade projekttiden och att RISE hade stor erfarenhet av denna metod. Syftet med gavlarna var att medge tillverkning av ett komplett tryckkärl snarare än att minimera vikten. Additiv tillverkning ansågs lämpligt för att snabbt tillverka gavlarna med komplex form. Titan valdes på grund av sin förhållandevis låga vikt och för att CTE ligger närmare kompositen än t. ex. stål och aluminium.

Arbetet i AP3 har sedan omfattat följande delar:

- a) Definition av lämpliga fibervinklar i kompositcylindern samt dimensionering av erforderlig laminattjocklek. Vid normalt drifttryck (cirka 5 bar) är temperaturspänningarna i kompositskikten helt dominerande. Fibervinkeln valdes därför för att minimera skillnader mellan kompositrörets och titangavlarnas CTE i omkretsled.
- b) En tillförlitlig och effektiv lösning utvecklades för att sammanfoga den cylindriska kompositdelen med titangavlarna, med förhindrat läckage. Detta skedde genom att komplettera med en yttre stödring i titan som förhindrade fläkning av limförbandet och gav en dubbel limfog mellan kompositröret och metalldelarna. Figur 2 visar en detalj av fogen i genomskärning.
- c) En analytisk modell användes för att dimensionera kompositrörets tjocklek för att motstå dubbla drifttrycket. En detaljerad finit elementanalys (FEA) genomfördes också för att säkerställa att spänningarna i och kring limfogen var acceptabla.

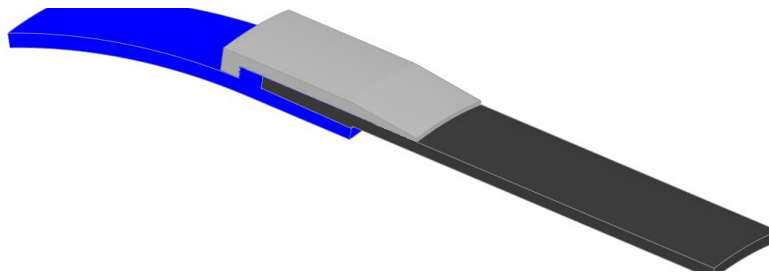


Fig. 2. Detalj av fogen i genomskärning, med tankgavel i titan (blå), yttre stödring (grå), samt del av kompositcylinder (mörkgrå).

AP4 - TILLVERKNING

(RISE, Oxeon)

RISE har genomfört all tillverkning, medan Oxeon har ansvarat för alla materialleveranser och kompletterande rådgivning vid tillverkningen.

- a) Lindning av ett antal plana laminat, följt av utskärning av provstavar för att mäta de materialegenskaper som behövs i modellering och dimensionering.

b) Lindning av korta cylindrar genomfördes för att studera avvikelser i geometri och egenskaper jämfört med plana laminat. Därefter har två demonstratortankar tillverkats genom våtlindning av en cylindrisk kompositdel och genom sammanfogning med halvsfäriska gavlar av titan. Titangavlarna tillverkades vid RISE genom additiv tillverkning med en nyinköpt utrustning.

Figur 3 visar den kompletta tanken, som även försetts med en ”skyddsbur” för att förhindra att gavlarna skjuts loss vid ett eventuellt brott i limfogen under slutproven. ”Skyddsburen” monterades med visst glapp och tar ingen last under normal funktion hos tanken.

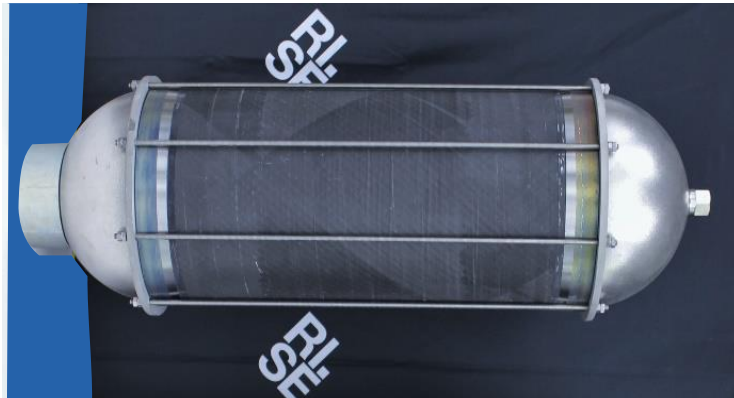


Fig. 3. Färdig tank med kompletterande ”skyddsbur”

AP5 - PROVNING

(RISE, LiU + INTA i Spanien som hyrdes för kryogen provning av material och tankar)

Detta arbetspaket har varit det mest omfattande i tid och kostnader, eftersom en grundlig materialkaraktisering och prov vid kryogena temperaturer var nödvändiga för dimensioneringen av tankarna.

a) RISE har genomfört och koordinerat provning av de valda materialens styvhet, styrka och CTE längs och tvärs fibrerna vid rumstemperatur och vid temperaturen (-253°C) för flytande väte. På grund av tillämpningen (tryckkärl) begränsades proven till dragprov. Proven vid -253°C genomfördes vid INTA i Madrid, som är ett av få laboratorier i Europa som kan genomföra sådana prov.

b) RISE har ansvarat för kombinerad cyklisk temperatur- och tryckbelastning av två demonstratortankar genom upprepad fyllning med flytande kväve, följt av ett framgångsrikt sprängprov. Proven genomfördes i Spanien vid en anläggning för högriskprov vid INTA i Leon. Den planerade provningen med flytande väte kunde ej genomföras på grund av kostnads- och säkerhetsskäl.

c) LiU har genomfört experimentella studier av matrisprickors uppkomst och tillväxt upp till 100 cykler från +70°C till -196°C (termisk chock) samt genom mekanisk utmattningslast vid rumstemperatur. Man har också sammanfattat en

modell för sprickornas tillväxt under sådana utmattningslaster. Målsättningen att bestämma utmattningsgränsen för komposittankar med flytande väte kunde ej uppnås på grund av begränsningar i budget och tid, men en grundläggande utmattningsmodell finns tillgänglig och experimentella data för användning i modellen har samlats in.

AP6 - FÖRSTUDIE AV SERIEPRODUKTION

(Oxeon, Konvegas)

- a) Oxekon ersatte på ett tidigt stadium det planerade samarbetet med en hartstillverkare för utveckling av ett lämpligt harts för kryogena tillämpningar med en marknadsundersökning och direkt inköp av ett lämpligt befintligt harts. RISE bidrog med inledande provning av ett antal kandidatmaterial.
- b) Studier och utvärdering av olika alternativ för framtida kommersiell serieproduktion. Dessa alternativ har inkluderat våtlindning av kolfiberband, uppläggning av förimpregnerade band med lindningsmaskin eller genom automatisk fiberutläggning (AFP), vakuumformning av impregnerade förformar med diskontinuerliga fiberband, samt tillverkning genom rullning av förimpregnerade kolfiberark. Dessutom har Oxekon vidareutvecklat tekniken för spridning av kolfiberbuntar till tunna och breda band i tillverkningsprocessen. Kostnader, hastighet och produktionskvalitet hos de olika metoderna har studerats av Oxekon, som också tagit del av erfarenheter från tillverkningen vid RISE. KonveGas har utvecklat erfarenheter kring körning och programmering av en nyinköpt lindningsmaskin för tryckkärl, och även genomfört vissa studier av dess användning i samarbete med Oxekon.

AP7 - PROJEKTLEDNING

(RISE, Chalmers, Oxekon, Konvegas, LiU)

Detta arbetspaket har koordinerat arbetet i övriga arbetspaket, och inkluderat kallelser till och dokumentation av projektmöten, hantering av uppkommande problem och justeringar av tidplanen, samt ekonomisk och administrativ rapportering till Energimyndigheten.

Resultat

Projektet har givit stora framsteg från det tidigare arbetet med komposittankar för flytande väte, som gjordes genom deltagande av RISE (SICOMP) i det europeiska projektet CHATT. Resultaten kan sammanfattas i följande punkter:

- Tanken tillverkades genom fiberlindning av tunna kompositband som impregnerades med flytande epoxi under lindningen. Fiberhalt och egenskaper beror på lindningsprocessen och behövde därför mätas upp efter tillverkning.
- Kompositmaterialets mest väsentliga egenskaper (styvhet, hållfasthet och temperaturutvidgningskoefficienter) har karakteriserats både vid rumstemperatur och vid temperaturen för flytande väte (-253°C).

- Mätningarna genomfördes med plana provstavar som fiberlindats på liknande sätt som kompositcylindern i tankarna. Vid dimensioneringen behövde dock resultaten från provstavarna korrigeras för att ta hänsyn till en något lägre fiberhalt i cylindrarna.
- Kompositens permeabilitet för väte före och efter belastning har undersökts vid temperaturer mellan +5°C och +45°C. Detta medger viss extrapolation till lägre temperaturer, men ger också en övre gräns för permeabiliteten vid -253°C. Inverkan av mikrosprickor efter belastning var liten.
- Tillväxt av mikrosprickor under cyklisk temperaturlast (100 temperaturchocker från +22°C till -196°C) var mycket liten, vilket tyder på att tanken kan uthärda ett stort antal temperaturcykler.
- Tanken tillverkades genom att medelst limning sammanfoga en kompositcylinder med två metallgavlar av titan.
- Beräkningar visade att temperaturspänningar i kompositen och i limfogen mellan komposit och titangavlar dominerade och att hållfastheten hos limfogen verkade vara mest kritisk. Kompositrörets fiberorientering och fogens utformning valdes för att minimera dessa spänningar.
- Två färdiga tankar utsattes för 20 cykler med fyllning/tömning av flytande kväve (-196°C) utan några tecken på läckage eller skador.
- Sprängprov genomfördes därefter på en tank genom att den fylldes och tillslöts, varefter temperatur och tryck tilläts stiga tills tanken sprängdes vid nästan 30 bar, vilket var tre gånger mer än minimikravet i dimensioneringen.
- Skadorna tydde på att limfogen var betydligt starkare än väntat och att sprängningen skedde genom brott i kompositcylindern.
- Oxeon har praktiskt och ekonomiskt studerat alternativa metoder för framtida serietillverkning med deras tunnskiktmaterial. Metoderna inkluderar tillverkning av kompositgavlar genom vakuumbildning av förformar med förimpregnerade fibrer, automatisk uppläggning av förimpregnerade fiberband samt uppläggning av cylindrar med vävar.
- KonveGas har skaffat erfarenheter av användning och programmering av en nyinköpt maskin för fiberlindning av gastankar.

Diskussion

Projektet har visat att en tank av god kvalitet kunde tillverkas och provas till ett betydligt högre tryck än förväntat, vilket visar oväntat hög styrka hos limfogen. Tillförlitligare modellering av framtida limfogar kräver förbättrade brottkriterier och mer omfattande materialdata för limmet vid låga temperaturer.

Metoden med våt fiberlindning av tunna kompositband är snabb och ger relativt god kvalitet, men har nackdelar som oönskad ökning i skiktjockleken och ojämnheter i fiberfördelningen. Nackdelarna kan minskas, men ej elimineras, genom fortsatt justering av olika parametrar i tillverkningen.

Kombinationen av en cylindrisk kompositdel och sammanfogning med färdigtillverkade gavlar kan vara kostnadseffektiv och flexibel genom att den medger att samma dimensioneringslösning anpassas till tankar med olika längd och volym. Metallgavlar tillverkade genom additiv tillverkning har många fördelar men ger också högre vikt och utmaningar kopplade till skillnader i temperaturutvidgning hos metallen och kompositcylindern. Skillnaden kan minskas kraftigt genom att använda kompositgavlar, men inte helt elimineras om optimala fiberuppläggningar skall väljas för både cylinder och gavlar.

En säker dimensionering kräver kompletterande mätningar av materialegenskaper. Bland annat bör metoder utvecklas för att mäta brottsegheten vid kryogena temperaturer. Dessutom krävs vidare studier av giltigheten hos teorin för ”in-situ-hållfasthet” för mycket tunna skikt och låga temperaturer, genom att jämföra den uppmätta brottsegheten med den skenbara segheten vid initiering av sprickor. Byte av material eller tillverkningsmetod kommer också kräva nya mätningar av egenskaperna hos varje nytt material vid normala och kryogena temperaturer.

Utveckling av fungerande tanksystem för flytande vätgas i kommersiellt flyg kommer att bli tidsödande och kräver fortsatt omfattande arbete under många år. Fungerande tankar för flytande vätgas kräver bland annat lösningar för yttertanken och hur denna skall byggas samman med innertanken. Detta inkluderar frågor som lastöverföring mellan inner- och yttertank, samt hur vakuum och täthet skall säkerställas mellan dessa delar av tanken. Ökad förståelse krävs även för övriga delar i systemet (styr- och reglersystem, pumpar och anslutningar) samt samverkan med parter med erfarenhet inom detta område.

För dimensionering av kommersiella tankar krävs också en bättre specifikation av belastningar och dimensioneringskrav samt klara normer för certifiering.

Projektet har visat att Sverige har stark kompetens vad gäller komposittankar för flytande vätgas, men det är också tydligt att flera av de ovanstående uppgifterna bara kan ske i samverkan med europeiska parter.

Publikationslista

Artiklar

- A.1 Katsivalis I, Singorini V, Ohlsson F, Langhammer, C, Minelli C, Asp LE (2023). Hydrogen permeability of thin-ply composites after mechanical loading. Submitted to *Composites Part A*.
- A.2 Loukil MS, Xu J, Marklund E, Merzkirch M, Moreau F, Ohlsson F (2023). Thermal and mechanical cycling of thin-ply composites for cryogenic applications. To be submitted to *Mechanics of Composite Materials*.
- A.3 Merzkirch M, Marklund E, Olsson R, Ramantani D (2023). Mechanical characterization at room and cryogenic temperature of thin-ply CFRP laminates manufactured by filament winding. Submitted to *Composites Science and Technology*.
- A.4 Olsson R, Cameron C, Moreau F, Marklund E, Merzkirch M, Pettersson J (2023). Design, manufacture, and cryogenic testing of linerless composite tanks for liquid hydrogen. Submitted to *Composite Structures*.

Konferensbidrag

- C.1 Katsivalis I, Signorini V, Ohlsson F, Minelli M, Asp LE (2023). Hydrogen diffusion through thin-ply composites. 11th International Conference on Composites Testing and Model Identification. 31 May–2 June. Girona, Spain.
- C.2 Olsson R, Marklund E, M. Merzkirch M, Ramantani D (2023). Characterization of a filament wound thin-ply composite for a cryogenic tank for liquid hydrogen. 11th International Conference on Composites Testing and Model Identification. 31 May–2 June. Girona, Spain.

Offentliga presentationer

- P.1 Olsson R (2023). Tankar för flytande vätgas (LH2-Tanks). Webinar on fossil free aviation. Swedish Energy Agency. 13th Jan 2023.

Rapporter

- R.1 Martsman A (2022). Tank Requirements. LH2-Tanks, Report D1.1. Oxeon AB, Borås. (*Confidential report*)
- R.2 Merzkirch M (2022). DCB and ENF testing of filament wound laminates. CR22-010. RISE AB, Mölndal. (*Confidential report*)
- R.3 Merzkirch M, Ramantani D, Bäcklund A (2022). Temperature dependency of material properties of a filament wound laminate. CR22-010. RISE AB, Mölndal. (*Confidential report*)
- R.4 Moreau F, Ohlsson F (2023). Serial production pre-study - WP6 D6.2. Oxeon AB, Borås. (*Confidential report*)

Beskrivning av innehåll

- A1, C1 Beskrivning av de prov med vätgasdiffusion genom materialet som gjorts
- A2 Mätningar av spricktillväxt i materialet under termisk och mekanisk last
- A3, C2 Mätning av temperaturens inverkan på materialegenskaperna
- A4 Beskrivning av dimensionering, tillverkning och provning av tankarna
- P1 Kort populärvetenskaplig presentation om projektets innehåll och mål.
- R1-R4 Interna (konfidentiella) rapporter om tekniska detaljer i projektarbetet.

Referenser, källor

-

Bilagor

1. Administrativ bilaga
2. Konferensbidrag C.1 (extended abstract)
3. Konferensbidrag C.2 (extended abstract)
4. Presentation P.1 (bilder från föredrag)

Övriga publikationer innehåller känslig information (R.1-R.4) eller genomgår fortfarande vetenskaplig granskning före beslut om publicering (A.1-A.4).

Kopior på dessa kan på begäran lämnas till Energimyndigheten men får inte göras offentliga.