

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikka
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

VEDYN KÄYTTÖ KAASUTURBIINEISSA

Lappeenrannassa 10.2.2021
Matilda Orpana

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikka

Matilda Orpana
Vedyn käyttö kaasuturbiineissa
Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Tutkija Aki Grönman
Ohjaaja: Tutkija Aki Grönman

29 sivua, 2 taulukkoa, 5 kuvaa

Hakusanat: vety, vetypolttoaine, kaasuturbiini, kaasuturbiinit
Keywords: hydrogen, hydrogen fuel, gas turbine, gas turbines

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on käsitellä vedyn käyttöä kaasuturbiinien polttoaineena ja perehtyä teknologian nykytilaan, tulevaisuuden näkymiin ja mahdollisuuksiin. Kaasuturbiineilla on monia eri sovelluksia nyky-yhteiskunnassa, ja vetykäyttöiset kaasuturbiinit tarjoavat ekologisia ratkaisuja, joita voidaan tulevaisuudessa soveltaa näihin käyttökohteisiin. Työssä käsitellään kaasuturbiinien ja vedyn ominaisuuksia, kaasuturbiinien vaatimia rakenteellisia muutoksia vedyn hyödyntämiseksi sekä teknologian nykyistä tilannetta ja tulevaisuuden mahdollisuuksia esimerkiksi yritysten tavoitteiden kautta. Vetykäyttöisiä kaasuturbiineja on jo markkinoilla, ja niiden määrä ja käyttökohteet tulevat todennäköisesti lisääntymään tulevaisuudessa tutkimuksen ja kehitystyön sekä vetyinfrastruktuurin edistyessä.

Teknologian sovelluksissa keskitytään erityisesti lentoliikenteeseen, jolle vetykäyttöiset kaasuturbiinit ovat todennäköisesti potentiaalisin vaihtoehto ekologisuuteen pyrittäessä. Ensimmäisiä vetykäyttöisiä lentokoneita onkin tulossa markkinoille jo ensi vuosikymmenellä. Haasteita vetykäyttöisten kaasuturbiinien hyödyntämisessä aiheuttaa kuitenkin vedyn varastointi, joka vaatii erillisenä teknologiana erillistä kehitystyötä, sillä se on suuressa roolissa kaasuturbiinien hyödyntämisessä erityisesti liikennekäytössä, jossa vetytankkien on oltava kompakteja, riittävän kevyitä ja varastoitava riittävästi polttoainetta.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	4
2 VEDYN KÄYTTÖ KAASUTURBIINEISSA.....	6
2.1 KAASUTURBIINIEN OMINAISUUDET	6
2.2 VEDYN OMINAISUUDET	8
2.3 VETY KAASUTURBIINIEN POLTTOAINEENA.....	9
3 VETYTEKNOLOGIA	12
3.1 TEKNOLOGIAN HISTORIA JA NYKYTILA	12
3.2 TEKNOLOGIAN TULEVAISUUS.....	14
4 TEKNOLOGIA LENTOKONEKÄYTÖSSÄ.....	16
4.1 TEHOKKUUS.....	16
4.2 TURVALLISUUS	18
4.3 EKOLOGISUUS	20
4.4 TALOUDELLISUUS	22
5 TEKNOLOGIA MAAKÄYTÖSSÄ.....	24
6 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	27
LÄHTEET	30

1 JOHDANTO

Etsittäessä vähemmän saastuttavia tai kokonaan saastuttamattomia vaihtoehtoja esimerkiksi maa- ja lentoliikenteen tarpeisiin, vety nousee esiin potentiaalisena vaihtoehtona. Perinteisesti monissa kaasuturbiineissa käytettävien uusiutumattomien polttoaineiden varannot eivät kestä ikuisesti, ja ainakin niiden hinnan ja verotuksen voi olettaa nousevan tulevaisuudessa varantojen pienentyessä ja ympäristötietoisuuden ja ilmastomuutoksen ehkäisemisen roolin noustessa yhteiskunnassa. Esimerkiksi kaasuturbiineissa perinteisesti käytetyn maakaasu- ja öljyvarantojen arvioidaan kuluvan loppuun nykyisellä käytöllä jopa noin 55 vuodessa, ja ilmastotavoitteissa pysymiseksi kaikkia varantoja ei edes voida käyttää (Ecotricity, 2020). Vedyn käytöllä onkin tärkeä rooli tulevaisuuden energian tuotannossa ja käytössä, sillä sen polttamisesta ei suoraan synny hiilidioksidi- tai -monoksidipäästöjä (Cappelletti, A. & Martelli, F., 2017).

Tässä kandidaatintyössä käsitellään vedyn käyttöä kaasuturbiineissa. Työssä perehdytään kaasuturbiinien ja vedyn ominaisuuksiin sekä tutustutaan teknologian nykytilaan, tulevaisuuden näkymiin ja mahdollisuuksiin eri näkökulmista antaen hyvän yleisluontoisen kuvan vetykaasuturbiinien nykytilasta ja tulevaisuudesta, mutta perehtymättä kuitenkaan esimerkiksi turbiinin rakenteeseen tai materiaaleihin kovin tarkasti. Nykyisiä kaasuturbiineita voidaan muutamilla muutoksilla muokata vedyn käyttöön soveltuviksi, ja useat yritykset ovat jo julkaisseet omia tavoitteitaan vetykäyttöisten turbiinien kehittämiseksi ja käyttämiseksi.

Kaasuturbiinien mahdollisuuksia esitellään keskittyen erityisesti ilmailukäyttöön, tehokkuuden, turvallisuuden, ekologisuuden ja taloudellisuuden näkökulmista. Lisäksi maakäytön mahdollisuuksia, sovelluksia ja tulevaisuudennäkymiä käsitellään. Kaasuturbiinit ovat merkittävässä osassa myös erilaisessa laivaliikenteessä, johon vetyteknologiaa voidaan soveltaa, mutta näihin sovelluksiin ei tässä työssä perehdytä. Työssä tutustutaan vetykaasuturbiinien lisäksi myös muutamaaan vetypolttoaineen varastointimahdollisuuteen, jotka vaikuttavat olennaisesti vetykaasuturbiinien käytön mahdollistamiseen eri sovelluksissa, erityisesti liikenteessä, jossa polttoainetankkien olisi hyvä olla kevyitä ja kompakteja.

Vety palaa teoriassa puhtaasti tuottaen savukaasuna pelkkää vesihöyryä. Tämä tekee siitä ideaalissa tilanteessa täysin saastuttamattoman polttoaineen, varsinkin jos poltettava vety saadaan teollisuuden sivutuotteena tai tuotetaan uusiutuvilla energialähteillä. Lisäksi vedyn valmistusmateriaalia, vettä, on saatavilla käytännössä rajattomasti maapallolla. Vetykäyttöiset kaasuturbiinit ovatkin esimerkiksi sähkölentokoneita todennäköisempi vaihtoehto vihreämpään lentämiseen. Nämä turbiinit olisivat potentiaalinen vaihtoehto myös moneen teollisuuden sovellukseen, jossa vielä toistaiseksi käytetään fossiilisia polttoaineita. Vetykäyttöisillä kaasuturbiineilla onkin tulevaisuudessa mahdollisuus näytellä suurta osaa teollisuuden ja liikenteen muutoksessa kestävämpään ja ekologisempaan suuntaan.

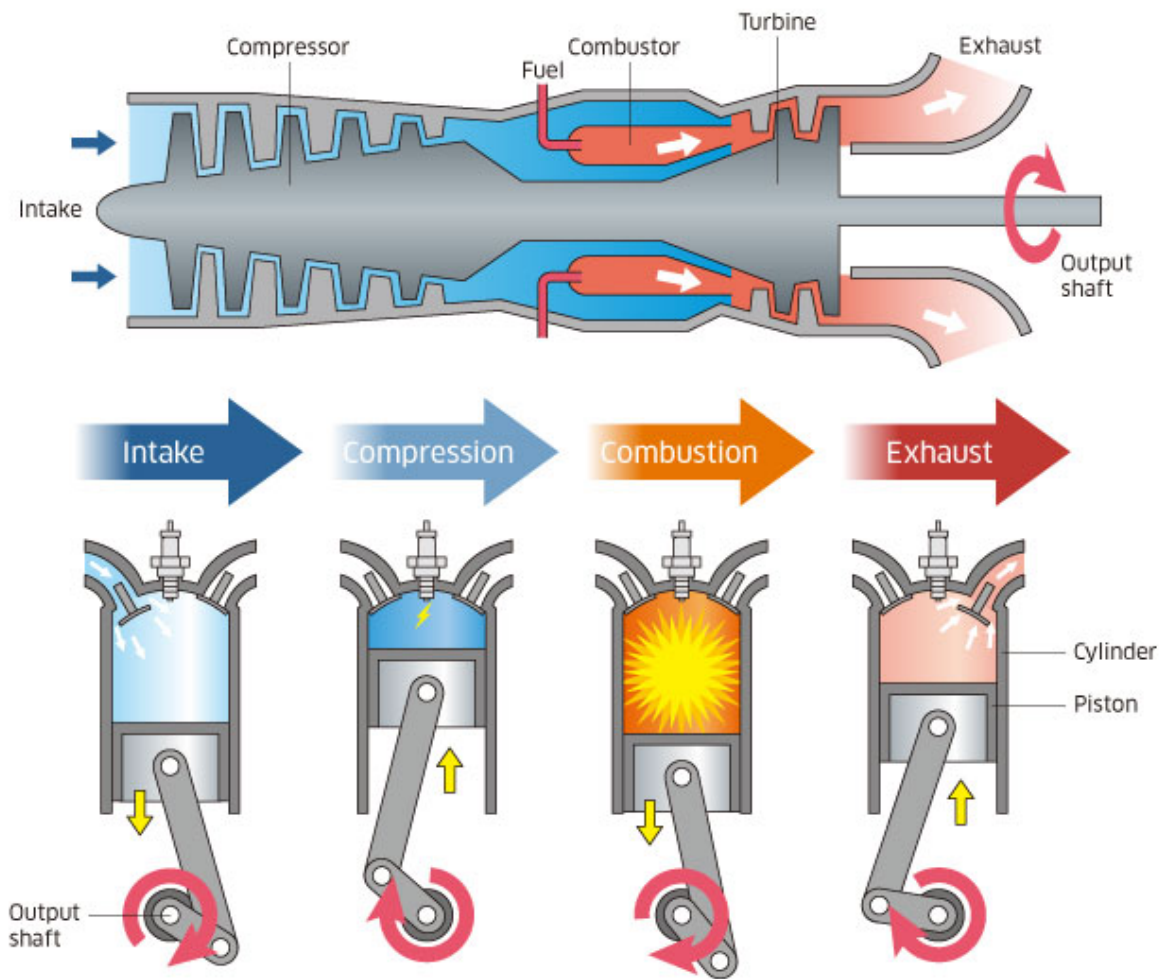
2 VEDYN KÄYTTÖ KAASUTURBIINEISSA

Vedyn käytössä kaasuturbiinien polttoaineena on kaasuturbiinin suunnittelussa otettava huomioon vedyn erityispiirteet. Kaasuturbiineita käytetään laajasti monissa sovelluksissa, ja muutamilla muutoksilla teknologia voidaan muokata vedyn käyttöön sopivaksi. Näin saadaan käyttöön teoriassa saastuttamattomia kaasuturbiineita, sillä vedyn palaessa ainoa savukaasu on vesihöyry.

2.1 Kaasuturbiinien ominaisuudet

Kaasuturbiini on lämpövoimakone, jonka toiminta perustuu Brayton -prosessiin. Sen rakenne koostuu kolmesta pääkomponentista; yhdestä tai useammasta kompressorista, polttokammioista ja turbiinista. Näiden lisäksi kaasuturbiinissa on muita osia, kuten esimerkiksi voiteluöljyjä, suodattimia, säätö-, sytytys-, käynnistys-, ruiskutus- ja jäähdytysjärjestelmiä, sekä mahdollisia muita suorituskykyä parantavia järjestelmiä. (Giampaolo, 2003)

Kaasuturbiinissa ilma puristetaan kompressorissa haluttuun, ympäristön painetta korkeampaan paineeseen. Tämän jälkeen ilmaan sekoitetaan energiaa, eli lisätään polttoainetta ruiskuttamalla, jonka jälkeen syntynyt seos sytytetään ja poltetaan kaasuturbiinin polttokammiossa, jolloin syntyy hyvin kuumia savukaasuja. Nämä kuumat savukaasut ajetaan turbiiniin, jossa ne paisuessaan pyörittävät turbiinin akselia, joka voi käyttää esimerkiksi generaattoria. Pyöritettyään turbiinia ja luovutettuaan sille osan energiastaan, kuumat savukaasut ja ylimääräinen energia poistuvat turbiinista, ja tässä yhteydessä niitä voidaan käyttää esimerkiksi työntövoiman tuottamiseen, kuten suihkumoottoreissa tehdään. Kaasuturbiinin rakenne ja toimintaperiaate ovat nähtävillä alla olevasta kuvasta. (Giampaolo, 2003)



Kuva 1. Kaasuturbiinin rakenne sekä toimintaperiaate verrattuna polttomootoriin. (Kawasaki, 2020)

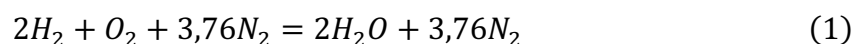
Kaasuturbiineita käytetään moniin eri tarkoituksiin, aina suihkumootoreista ja yksinkertaisista mekaanisista moottoreista yksityiskohtaisiin kaasulasereihin. Kaasuturbiineilla on sovelluksia niin maalla, merellä kuin ilmassakin. Kaasuturbiineita käytetään muun muassa generaattoreissa, yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa, ja sähköntuotannon piikkien tasoituksessa sekä maa-ajoneuvoissa, kuten henkilöautoissa, kilpa-autoissa, kuorma-autoissa ja tankeissa. Kaasuturbiineja käytetään merillä erittäin monilla erilaisilla aluksilla, esimerkiksi lautoilla, jahdeilla, ilma-alusten laskeutumislautoilla sekä erityyppisissä sukellusveneissä. Ilmailussa kaasuturbiineita käytetään kaiken tyyppisissä lentokoneissa aina matkustajakoneista yksityiskoneisiin ja helikoptereihin. Ilmailussa kaasuturbiineista puhutaan usein suihkumootoreina. Kaasuturbiineita on paljon erilaisia, joten eri sovelluksiin käytetään niihin parhaiten soveltuvia turbiineita kokoluokan, tehon ja muiden ominaisuuksien perusteella. (Soares, 2015)

Kaasuturbiinin tyyppisiä koneita on ideoitu jo vuonna 130 BC, sekä myöhemmin renessanssin aikana esimerkiksi da Vincin toimesta. Kaasuturbiinia on kuitenkin lähdetty käytännössä rakentamaan vasta 1800-luvulla, ja ensimmäisiä toimivia laitteita on saatu rakennettua vasta 1800- ja 1900-lukujen vaihteessa. Käytännössä toimivien kaasuturbiinien aikakausi on siis kestänyt vasta hiukan yli sata vuotta, mutta niitä käytetään jo lukemattomissa eri sovelluksissa niin maalla, merellä kuin ilmassakin. Kaasuturbiini on siis nyky-yhteiskunnassa tärkeässä roolissa monilla eri osa-alueilla, ja sen ekologisen käytön mahdollistaminen voisi auttaa ottamaan suuren askeleen kohti ympäristöystävällistä yhteiskuntaa kasvavan ilmastokriisin keskellä. (Giampaolo, 2003)

2.2 Vedyn ominaisuudet

Vety on universumin kevyin ja yleisin alkuaine. Sen atomirakenteen muodostaa yksi protoni ja yksi elektroni. Vety kuuluu siis alkalimetallien pääryhmään, koska sen ulkokuorella on vain yksi elektroni, joten se on rakenteensa puolesta hyvin reaktiivinen alkuaine. Tämän takia vetyä ei löydykään maapallolta luonnosta puhtaana alkuaineena, vaan se on aina sitoutunut molekyyliin jonkin toisen alkuaineen kanssa, esimerkiksi vedessä hapen kanssa.

Vetyä voidaan tuottaa elektrolyysin avulla vedestä paikallisesti monilla eri tavoilla, esimerkiksi ydinenergialla, aurinko- ja tuulivoimalla tai fossiilisilla polttoaineilla. Näin ollen vedyn raaka-ainetta olisi lähes rajattomasti saatavilla merissä. Lisäksi vety on monien voimalaitosprosessien sivutuote, joten näiden prosesseiden hukkavety voitaisiin saada käyttöön niin sanotusti ilmaiseksi. Vetyä poltettaessa lopputuotteena on vettä, joten vetypolttoaine saastuttaisi vain vedyn tuottovaiheessa. Jos myös vedyn tuotto tapahtuu uusiutuvalla energialla, polttoaine on teoriassa täysin saastuttamaton. Vedyn energiasisältö massaan verrattuna on kolmesta neljään kertaa suurempi kuin öljyn, ja vedyn energiasisältö massaan suhteutettuna onkin suurempi kuin minkään muun polttoaineen, jonka vuoksi sitä käytetään esimerkiksi avaruusrakettien polttoaineena. Vety reagoi palaessaan teoreettisesti ilman kanssa yhtälön 1 mukaisesti. Yhtälössä on oletettu, että vedyn tilavuus vety-ilmakeksesta on noin 30%. (Hordeski, 2012)



Puhdas vetykaasu on erittäin herkästi syttyvää, ja myös altis erilaisille vuodoille, jos sitä säilytetään vääränlaisissa tankeissa. Vety-ilmaseos, jossa vetyä on 4-74 %, on syttyvää. Sen sytyttämiseksi tarvitaan noin 20 mikrojoulen suuruinen energia, joka on prosentuaalisesti huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi bensiini-ilmaseoksen sytyttämiseen tarvittava 240 mikrojoulen energia (Hordeski, 2012). Vedyn kuljetus ja säilytys onkin turvallisempaa nestemäisessä muodossa, jolloin myös energiatiheys on luonnollisesti suurempi. Vety tiivistyy nesteeksi normaalissa ilmakehän paineessa kuitenkin vasta -253 °C:ssa, eli melko lähellä absoluuttista nollapistettä, ja tämä luo haasteita vedyn nesteyttämisessä ja nestemäisen vedyn säilytyksessä.

Nestemäistä vetyä on kuitenkin käytetty rakettien polttoaineena jo vuosikymmeniä, ja sitä on onnistuttu varastoimaan hyvin suuria määriä kryogeenisissä, hyvin eristetyissä tankeissa. Vedyn nesteyttäminen vaatii kuitenkin paljon energiaa ja on hyvin kallista. Toinen, halvempi vaihtoehto on vedyn puristaminen kaasumaisessa olomuodossa pienempään tilavuuteen ja suurempaan, esimerkiksi noin 600 barin, paineeseen. Puristaminen lisää energiatheyttä ja vähentää säilytystilan tarvetta. Korkeat paineet kuitenkin aiheuttavat haasteita säilytykselle vaatien erityisiä materiaaleja ja venttiileitä. Myös vedyn puristaminen kaasumaisessa olomuodossa vaatii melko paljon energiaa ja erityiset säilytystankit, ja energiatiheys jää nykyteknologialla silti pienemmäksi kuin esimerkiksi bensiinin. Näiden säilytysvaihtoehtojen lisäksi tutkitaan erilaisia ratkaisuja, kuten metallihybrideitä ja nanohiiliputkia. Erilaiset käyttötarkoitukset vaativat myös erilaisia ratkaisuja, joten esimerkiksi lentokoneen, kuorma-auton ja henkilöauton vetytankeissa saatetaan päätyä erilaisiin ratkaisuihin. (Hordeski, 2012)

2.3 Vety kaasuturbiinien polttoaineena

Vedyn käyttö kaasuturbiinien polttoaineena vaatii muutamia muutoksia kaasuturbiinin rakenteeseen. Muutokset rakenteessa eivät kuitenkaan ole kovin suuria verrattuna muita polttoaineita käyttäviin kaasuturbiineihin. Muutoksia pitää tehdä polttokammioon, jotta se kykenee polttamaan vety-ilmaseosta, vaikka vetypolttoaine tulisi kammioon hyvin kylmässä lämpötilassa ja suuressa paineessa, tai todennäköisesti ainakin toisessa näistä (Cappelletti & Martelli, 2017). Vedyn käyttö voi vaatia myös jonkinlaisen lämmönvaihtimen lisäämistä,

sillä lämmönvaihtimella vedyn tulolämpötilaa ja -olomuotoa voitaisiin säädellä ennen polttokammiota. Vedyn käyttö aiheuttaa muutoksia myös esimerkiksi polttoaineen syöttöjärjestelmään, johon vaikuttaa esimerkiksi se, onko vetypolttoaine kaasumaisessa vai nestemäisessä olomuodossa. Lisäksi vedyn palamisnopeus on hyvin korkea ja syttymisviive pieni, mikä aiheuttaa muutoksia ja haasteita, sillä esimerkiksi liekin sammumisen ja sitä kautta polttimen vahingoittumisen estämiseksi polttoaine-ilmaseoksen syöttönopeuden täytyy olla suuri (Lindstrand, 2019).

Polttoaineen syöttöjärjestelmään vaikuttaa se, onko polttoaineena käytettävä vety nestemäisessä vai kaasumaisessa olomuodossa. Vedyn nesteyttäminen on hyvin kallista, joten osassa sovelluksissa voitaisiin käyttää korkeampaan paineeseen puristettua kaasumaista vetyä, mutta esimerkiksi Airbus suunnittelee kuitenkin käyttävänsä polttoaineena nestemäistä vetyä. Monet kaasuturbiinit käyttävät polttoaineenaan nestemäistä ainetta, kuten esimerkiksi bensiiniä tai biodieseliä. On myös kaasuturbiineita, jotka käyttävät polttoaineenaan kaasuja, esimerkiksi biokaasua tai maakaasua. Lisäksi on kehitetty kaksoispolttoainekaasuturbiineita, jotka käyttävät polttoaineenaan yhtä aikaa tai vuorotellen sekä kaasumaista, että nestemäistä polttoainetta, esimerkiksi biodieseliä ja maakaasua (Chong, 2020). Teknologioita eri olomuodossa olevien polttoaineiden käyttöön kaasuturbiineissa siis on jo olemassa, joten niistä voidaan vain kehittää edelleen vedylle sopivia. Tulevaisuudessa sama kaasuturbiini kykenee ehkä jopa käyttämään polttoaineenaan joko kaasumaista tai nestemäistä vetyä tilanteesta riippuen. Lisäksi esimerkiksi nestemäisenä säilytetty vety voisi niin haluttaessa höyrystyä melko helposti turbiiniin syötettäessä hyvin alhaisen höyrystymislämpötilan takia. Eri sovelluksiin tullaan todennäköisesti löytämään tulevaisuudessa yhä niille sopivampia, parempia ja tehokkaampia vaihtoehtoja tutkimuksen edistyessä ja vetykaasuturbiinien käyttökokemuksen lisääntyessä.

Vetyä poltetaan kaasuturbiinin polttokammiossa, jolloin syntyy korkeassa paineessa ja lämpötilassa olevaa kaasua, joka syötetään turbiiniin, jossa se tekee työtä pyörittäen turbiinia. Kalliista savukaasujen suodatusmenetelmistä voitaisiin luopua säästäten tilaa ja rahaa, koska esimerkiksi saastuttavien typpiyhdisteiden sijaan savukaasuna syntyy vesihöyryä. Savukaasujen suodatus on suuri menoerä esimerkiksi voimalaitoksissa. Tällä hetkellä vetyä polttoaineena käyttävät ICE -moottorit ovat tutkimusten mukaan noin 25%

bensiinimoottoreita tehokkaampia, mutta vedyn toistaiseksi korkeamman hinnan vuoksi esimerkiksi ajoneuvon vuosittaiset kustannukset olisivat noin kolmasosan suuremmat, ja toiminta-alue voisi olla pienempi vedyn varastointitilasta riippuen. (Hordeski, 2012)

Myös vedyn varastointi käyttöä varten, esimerkiksi lentämisen ja autoilun yhteydessä, luo omat haasteensa vedyn reaktiivisuuden vuoksi. Muutoksia pitäisi todennäköisesti tehdä myös suuremman kokoluokan polttoaineiden kuljetusjärjestelmiin, sillä jos vetyä haluttaisiin käyttää yleisesti esimerkiksi henkilöautojen polttoaineena, sitä tulisi olla saatavilla esimerkiksi bensiinin tapaan. Muut esimerkiksi liikennekäytössä käytettävät polttoaineet ovat yleensä nestemuodossa, mutta polttoaineena käytettävä vety olisi mahdollisesti joissakin sovelluksissa kaasumaisessa olomuodossa hyvin alhaisen nesteytymislämpötilansa ja tästä aiheutuvien kalliiden nesteytyskustannusten vuoksi. Myös nestemäinen vety loisi haasteita alhaisen nesteytymislämpötilan vuoksi. Vedyn kuljetus voitaisiin tulevaisuudessa hoitaa esimerkiksi kattavalla putkistolla (Cappelletti & Martelli, 2017). Koko vetypolttoaineen kuljetuksen ja varastoinnin osa-alue vaatii kehitystyötä ja tutkimusta, sillä sen toimivuus on myös edellytys vetykaasuturbiinien laajamittaiselle hyödyntämiselle.

Siirtymävaihe vedyn laajamittaiseen käyttöönottoon kaasuturbiinien polttoaineena tulee kestämään todennäköisesti vuosikymmeniä, mutta toistaiseksi toimivia vetykaasuturbiineita on jo kehitetty, ja niiden monille uusille sovelluksille tavoitteita on asetettu jo 2030-luvulle, eli runsaan kymmenen vuoden päähän. Näitä eri yritysten tavoitteita käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.2.

3 VETYTEKNOLOGIA

Vedyn hyödyntämiseen kaasuturbiineissa vaadittavaa teknologiaa on kehitetty ja tutkittu useiden eri yritysten ja tutkijoiden toimesta. Vetyä polttoaineenaan käyttäviä kaasuturbiineita on jo markkinoilla, ja moni yritys on asettanut tavoitteita niiden määrän lisäämiseksi ja laajemmaksi hyödyntämiseksi 2030-luvulle. Itse kaasuturbiinien lisäksi kehitystä vaativat myös vedyn kuljetus- ja säilytysjärjestelmät, sillä erityisesti liikennekäytössä vetytankkien ominaisuudet korostuvat.

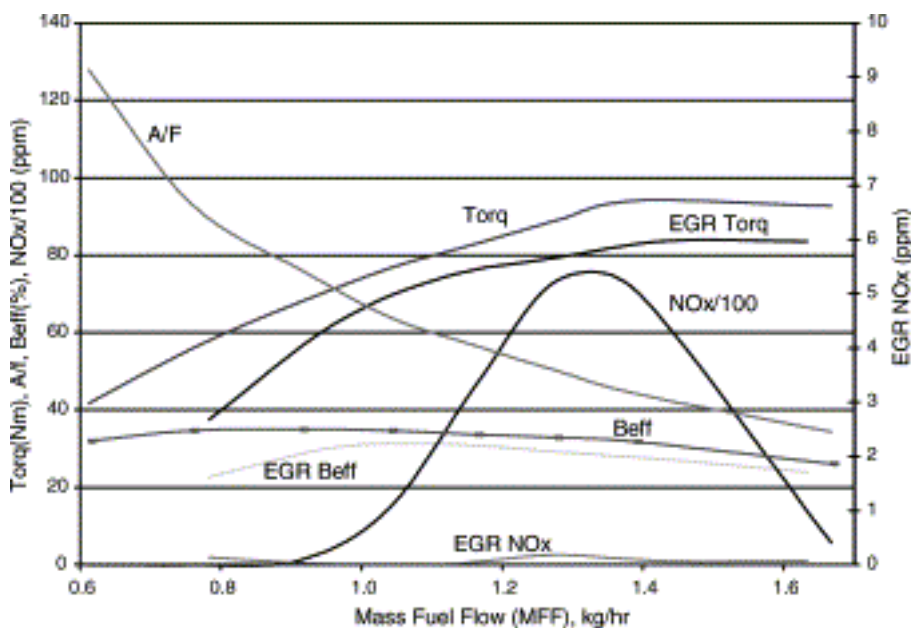
3.1 Teknologian historia ja nykytila

Francois Isaac de Rivaz suunnitteli ensimmäisen vety-ilmaseosta polttoaineenaan käyttävän ICE-moottorin vuonna 1806 (Eckermann, 2001). Vuonna 1970 Paul Dieges patentoi polttomoottoriin tehtävän muutoksen, joka mahdollisti bensiinikäyttöiseksi suunnitellun moottorin toimimisen vetyä polttoaineenaan käyttäen (Bulla, 2017). Tokyo City University on kehittänyt vetykäyttöisiä ICE-moottoreita 1970-luvulta lähtien, kehittäen esimerkiksi vetyä polttoaineena käyttävän linja-auton (Furuhama, 1978). Linja-auto oli lähes nollapäästöinen, ja yhdellä kymmenen kilogramman vetytankkauksella se kulki noin 200 kilometriä (Yamane & Takiguchi, 2009). Myös useat automerkit, kuten Mazda, BMW ja Aston Martin ovat kehittäneet erilaisia automalleja, joiden ICE-moottorit käyttävät polttoaineenaan vetyä.

NASA käyttää vetyä avaruusrakettien polttoaineena sen massaansa nähden suuren energiatiheyden vuoksi, joten se on joutunut kehittämään vedyn säilytykseen, kuljetukseen ja polttoon sopivan kaluston, kuten putkistot, varastointitankit ja kuljetusajoneuvot. NASA on tullut tutkimustensa ja kokemustensa pohjalta siihen tulokseen, että vety voi olla polttoaineena yhtä turvallista tai jopa turvallisempaa kuin bensiini tai tavanomaiset lentopolttoaineet (Hordeski, 2012). Lisäksi esimerkiksi Siemens Energyllä on jo käytössä monia vetyä polttoaineenaan käyttäviä eri kokoluokan kaasuturbiineita, ja kehitystyötä tehdään jatkuvasti niiden määrän lisäämiseksi (Lindstrand, 2019). Myös Turbotec ilmoittaa tuottavansa kahta vetyä polttoaineenaan käyttävää kaasuturbiinia, The TURBOTEC HyTG 550 ja The TURBOTEC HyTG 100, jotka tuottavan 550 kW ja 100 kW sähkötehoa. Turbotecin turbiinit on suunniteltu merikäyttöön ja generaattoreiksi, ja yhdistetyssä sähkön

ja lämmön tuotannossa niistä saatava lämpöteho voi olla jopa 950 ja 170 kilowattia (Turbotec, 2020).

Vedyn käytöstä kaasuturbiinin polttoaineena on tehty lukuisia tutkimuksia, ja esimerkiksi erilaisia polttoaine-ilmasuhteita ja polttoaineenannostelumenetelmiä on tutkittu. Näissä tutkimuksissa osa vetyä polttoaineenaan käyttävistä kaasuturbiineista on kuitenkin tuottanut jopa suurempia määriä NO_x -päästöjä, kuin esimerkiksi biokaasulla toimivat kaasuturbiinit (Cappelletti & Martelli, 2017). Kehitystyötä on siis vielä jäljellä ennen puhtaasti toimivaa, tehokasta ja taloudellista vetykaasuturbiinia. Kuitenkin esimerkiksi Fordin 4-sylinterisellä, 2-litraisella ZETEC -vetymootorilla tehdyssä tutkimuksessa, jossa tutkittiin vedyn poltosta aiheutuvia NO_x -päästöjä, huomattiin, että päästöjä syntyy vain tietyissä olosuhteissa, eli oikeassa lämpötilassa ja tietyn vääntömomentin tuotossa vedyn polttaminen on saastuttamatonta. Lisäksi päästöihin ja arvoihin vaikutti syötetty polttoaineen määrä. Myös pakokaasujen takaisinkierrätysjärjestelmän eli EGR-järjestelmän todettiin mahdollistavan suuremman vääntömomentin ilman NO_x -päästöjä. Alla kuvaaja Heffelin tuloksena saamista NO_x -päästöistä verrattuna lämpötilaan ja saatuun vääntömomenttiin, sekä EGR-järjestelmän käytöllä että ilman. Kuvasta 2 huomataan, että päästöt vaihtelevat suuresti vääntömomentin ja polttoaineensyötön vaihdellessa. (Heffel, 2003)



Kuva 2. 4-sylinterisen, 2-moottorisen vetykäyttöisen moottorin (1500 rpm) aiheuttamat NO_x-päästöt suhteessa vääntömomenttiin ja polttoaineensyöttöön. EGR-järjestelmää käytettäessä saadut tulokset merkitty etuliitteellä EGR. Huomaa, että ylempi NO_x-käyrä on jaettu sadalla, jotta se mahtuisi kuvaajaan. (Heffel, 2003)

Myös vetypolttoaineen säilytys ja jakelu on tärkeä kehityskohde vetykaasuturbiinien sovelluksissa, koska polttoainetta on oltava saatavilla turbiinien toimimiseksi. Vetypolttoaineasemia onkin jo olemassa ainakin Islannissa ja Kaliforniassa. Islannissa vetypolttoaineasema sijaitsee lähellä maan pääkaupunkia Reykjavikia, jossa vetyä käyttää polttoaineenaan pieni määrä linja-autoja. Nämä linja-autot kuitenkin käyttävät vetyä polttokennoissa kaasuturbiinien sijaan, mutta vedyn jakelu- ja säilytysjärjestelmää voisi olla mahdollista hyödyntää myös kaasuturbiinisolvelluksissa. (Hordeski, 2012)

3.2 Teknologian tulevaisuus

Tavoiteltavaa on kehittää tulevaisuudessa vetyä polttoaineenaan käyttävä kaasuturbiini, joka aiheuttaisi päästönä ainoastaan vesihöyryä, sekä saada sovellettua sen käyttöä mahdollisimman moneen erilaiseen tilanteeseen, kuten lento-, maa- ja vesikäyttöön. Lentokonealan asiantuntijat arvioivat, että teknologian kehittämiseen toimivaksi lentokonekäyttöön kuluu aikaa n. 10-15 vuotta (Anon 1, 2020). Tämä on linjassa myös Airbusin tavoitteen kanssa. Airbus julkaisi 21.9.2020 tiedotteen, jonka mukaan se aikoo tuoda markkinoille maailman ensimmäiset päästöttömät, kaupalliset lentokoneet, eli ZEROe-konseptin kolme eri mallia, vuoteen 2035 mennessä (Airbus, 2020). Yksi malleista, Turbofan, on nähtävillä kuvassa 3. Airbus ilmoittaa aikovansa käyttää lentokoneiden kaasuturbiinien polttoaineena nestemäistä vetyä.

Siemens Energy on allekirjoittanut tammikuussa 2019 sitoumuksen, jonka mukaan sen kaasuturbiinit pystyvät toimimaan täysin vetypolttoaineella vuoteen 2030 mennessä. Yrityksen tavoitteena on, että samat kaasuturbiinit pystyisivät käyttämään polttoaineenaan eri vahvuisia vety-ilmaseoksia ja vihreää eli puhdasta vetyä, sekä ruskeaa eli teollisuusprosesseista sivutuotteena saatavaa epäpuhdasta vetyä. Lisäksi tavoitteena on, että jo olemassa olevat kaasuturbiinit saadaan sisäisillä muutoksilla jälkiasennettua niin, että myös ne pystyvät toimimaan pelkkää vetyä polttoaineenaan käyttäen. (Lindstrand, 2019)

Näyttää siis siltä, että ainakin näiden yritysten tutkimus- ja kehitystyön toimesta vetykaasuturbiineille saadaan kehitettyä uusia toimivia sovelluksia jo 2030-luvulla. Myös monet muut yritykset ja yliopistot tulevat varmasti kiinnostumaan vetykäyttöisten kaasuturbiinien ja vedyn kuljetus- ja varastointimahdollisuuksien kehittämistä ja niihin liittyvästä tutkimustyöstä tulevaisuudessa. Kehitystyötä jatkettaessa vetyä polttoaineenaan käyttäviä kaasuturbiineita saadaan todennäköisesti hyödynnettyä suurimmassa osassa kaasuturbiinien nykyisissäkin käyttökohteissa. Todennäköisesti ensimmäiset vetylentokoneet ja muutkin sovellukset saadaan markkinoille jo seuraavalla vuosikymmenellä, mutta kehitystyö tehokkaampien, käytännöllisempien ja turvallisempien laitteiden valmistamiseksi tulee varmasti jatkumaan vielä pitkälle tulevaisuuteen.



Kuva 3. Airbusin ZEROe -konseptin Turboprop -vetylentokone, jonka kapasiteetti on 120-200 matkustajaa, ja kantama yli 2000 merimailia. Vetytankit on sijoitettu takapainelaipion taakse. (Airbus, 2020)

4 TEKNOLOGIA LENTOKONEKÄYTÖSSÄ

Lentäminen on nykyaikainen liikkumismuoto, joka on saavutettavissa lähes kaikille hyvinvointivaltioiden asukkaille. Lentoliikenne on tärkeässä osassa niin liikemaailmassa, työelämässä, kuin vapaa-ajan vietossakin jatkuvan globalisaation myötä. Kaupallisen lentoliikenteen tulot ovat kasvaneet 274 miljardia USA:n dollaria vuodesta 2010 vuoteen 2019, ja vaikka COVID-19 onkin aiheuttanut lentoliikenteen käytössä taantuman vuoden 2020 aikana, alan odotetaan jatkavan kasvuaan, kun pandemia on saatu hallintaan (Mazeraneu, 2020).

Ilmastonmuutoksen edetessä ja tietoisuuden lisääntyessä kuluttajat ovat entistä kiinnostuneempia ekologisuudesta, ja valmiita myös maksamaan siitä. Näin ollen myös lentoala kaipaa vihreämpiä vaihtoehtoja. Vedyn käyttö polttoaineena näyttää tällä hetkellä yhdeltä lupaavimmista vaihtoehdoista. Lisäksi vedyn käytön tehokkuus, turvallisuus ja taloudellisuus ovat tärkeitä näkökulmia teknologian soveltamisessa lentoliikenteeseen.

4.1 Tehokkuus

Airbusin julkaisemat kolme kaksimoottorista ZEROe -mallin matkustajakonetta kykenevät 0,5 - 0,78 Machin nopeuteen. Airbusin nopein matkustajakone A380 taas kykenee 0,89 Machin nopeuteen. A380 on tosin nelimoottorinen, mutta myös ZEROe -malleja suurempi. ZEROe -mallin kahden tehokkaamman koneen kantama on 3700+ kilometriä, kun taas A380 kantama on 14 800 kilometriä (Airbus, 2020). Ainakaan vuoteen 2035 mennessä kaupallisten lentoyhtiöiden kehitystyöllä vetykäyttöisiä lentokoneita ei siis todennäköisesti tuoda perinteisiä polttoaineita käyttävien koneiden tasalle tehokkuudessa ja suorituskyvyssä, eikä niitä voida vielä myöskään käyttää pitkän matkan lennoissa esimerkiksi mantereiden välillä.

Vedyn käytöllä polttoaineena on tehokkuuden ja suorituskyvyn kannalta etuna suuri energiamäärä massaa kohden, kuten taulukosta 1 voidaan huomata, joten se tarjoaa paljon mahdollisuuksia näiden ominaisuuksien kehittämiseen. Kuitenkin nykyteknologialla vedyn säilytykseen tarvittavat tankit ovat kerosiinitankkeja painavammat. Tulevaisuudessa tulee kuitenkin olemaan mielenkiintoista nähdä, miten vedyn polttoon tarkoitettujen kaasuturbiinien ja säilytykseen tarkoitettujen tankkien kehittyvät. Jos tankkien ja moottorien paino saataisiin

minimoitua, samoin kuin polttoainetankin tarvitsema tilavuus, olisi mielenkiintoista nähdä, saadaanko tuotettua esimerkiksi nykyisillä lentopolttoaineilla toimivia hävittäjiä tehokkaampia vetypolttoaineella toimivia hävittäjiä. Hävittäjät myös kuluttavat paljon polttoainetta, eli tuottavat paljon päästöjä, joita voitaisiin vetypolttoaineen käytöllä vähentää. Kerosiinikäyttöistä tehokkaammalla vetykäyttöisellä koneella luotaisiin samalla painetta päivittää myös maanpuolustuskalustoa ekologisempaan suuntaan. Hävittäjäteknologiassa huomioon otettavia asioita tulee kuitenkin lisää verrattaessa matkustajaliikenteeseen, kuten esimerkiksi polttoaineen räjähdysherkkyys korostuu ja kantama, tankkien koko ja ilmatankkausmahdollisuudet vedyllä on otettava erityisen tarkasti huomioon.

Taulukko 1. Nestemäisen vedyn ominaisuuksia sen kiehumispisteessä verrattuna kerosiinin ominaisuuksiin. (Bensmann et al., 2018).

Parametri	Yksikkö	LH₂	Jet-A (CH_{1,93})
Moolimassa	kg/mol	2,016 x 10 ³	168 x 10 ³
Lämpötila	K	20,369	439,817
Lämpöarvo	J/kg	120 x 10 ⁶	42,798 x 10 ⁶
Tiheys	kg/m ³	70,9	810,53
Ominaislämpökapasiteetti	J/kgK	9,747 x 10 ³	1,968 x 10 ³

Kokonaisuudessaan vielä nykyteknologialla ja ainakin Airbusin ilmoittamien ominaisuuksien mukaan myös ensi vuosikymmenellä vetykäyttöisillä kaasuturbiineilla toimiva lentokone ei ole yhtä suorituskykyinen kuin perinteisiä lentopolttoaineita käyttävä. Lisäksi kehitystä kaippaa vetykäyttöisen lentokoneen kantama, joka ei vielä saavuta kerosiinikäyttöisen koneen kantamaa eikä siksi sovellu esimerkiksi pitkille mannerten välisille lennoille. Kehitystyötä tarvitaan siis itse kaasuturbiinin lisäksi paljon myös vedyn varastointimenetelmissä. Vedyn energiatiheys on kuitenkin massaa kohden huomattavasti suurempi kuin bensiinin, joten mahdollisuuksia pienemmillä ja kevyemmällä polttoainetankeilla toimivaan lentolaitteeseen on (Hordeski, 2012). Vedyn palamisnopeus on myös suuri, joten energiaa vapautuu nopeasti, mikä mahdollistaisi suuret nopeudet sekä nopeat kiihdytykset ja nousut. Onkin mielenkiintoista nähdä, onko vetykaasuturbiineilla

toimivaa lentokonetta mahdollista kehittää historian suorituskykyisimmäksi lentolaitteeksi, ja kauanko tähän kehitystyöhön ja testauksiin tulee menemään aikaa.

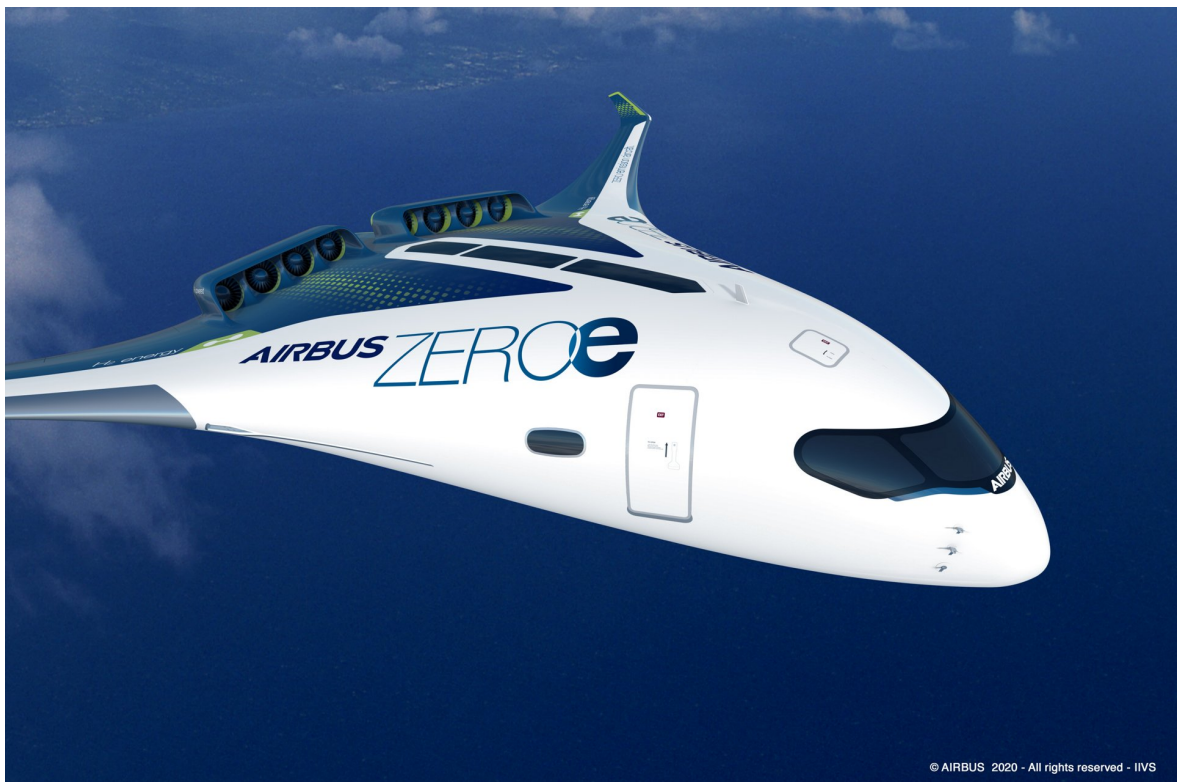
4.2 Turvallisuus

Vety on herkästi reagoivaa ja palamisreaktio käynnistyy pienemmällä sytytysenergialla kuin esimerkiksi bensiinin tai maakaasun palamisreaktio ja lisäksi vety-ilmaseos syttyy hyvin laajalla konsentraatiovälillä. Tämä ei kuitenkaan tee vedystä polttoaineena vaarallisempaa, jos järjestelmät on suunniteltu sen ominaisuuksille. Lisäksi vedyn tekee jopa joitakin muita polttoaineita turvallisemmaksi se, että se ei ole aineena myrkyllistä, ja esimerkiksi tankkivuodon sattuessa se hajoaa ilman sekaan nopeasti, eikä jää saastuttamaan ympäristöä öljyvuodon tavoin. Syttyvyyden vuoksi vuotoja on kuitenkin seurattava tarkkaan, ja ne on pyrittävä estämään oikeanlaisen teknologian käytöllä. Lisäksi jotkin metallit voivat haurastua joutuessaan kosketuksiin vedyn kanssa, joten käytettävien metallien valintaan on kiinnitettävä huomiota. Vety myös palaa lähes huomaamattomalla liekillä, joten erityisten liekintunnistimien käyttö voi olla tarpeellista. (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2020)

Isona kysymyksenä ilmailussa on vedyllä käyvien kaasuturbiinien luotettavuus, eli se, että moottorit pysyvät käynnissä. Ilmassa moottoreiden sammuminen aiheuttaa suuren riskin, vaikka useimmissa lentokoneissa moottoreita onkin kaksi. Vedyllä käyvä kaasuturbiini ei kuitenkaan vaikuta olevan muita kaasuturbiineita herkempi sammumaan, jos vain polttoaineen syöttönopeus on vedylle suunniteltu, eli tarpeeksi suuri. Kehitystyön ollessa siinä vaiheessa, että vetylentokoneet alkavat operoimaan, tutkimuksia ja testejä vetykaasuturbiinien luotettavuudesta on varmasti tehty ja ne on kehitetty yhtä lailla toimiviksi, kuin muitakin polttoaineita käyttävät kaasuturbiinit. Tietenkin esimerkiksi polttoaineensyötön häiriöt ovat aina mahdollisia, mutta ne ovat mahdollisia myös muita polttoaineita käytettäessä. Lisäksi useimpia kaksimoottorisia koneita pystyy operoimaan turvallisesti laskuun myös toisen moottorin sammuttua tai vioituttua.

Vetytankit pitää suunnitella erityisesti vedylle sopiviksi, sillä vety vuotaa helposti. Tankkeihin vaikuttaa se, onko vety kaasumaisessa vai nestemäisessä olomuodossa. Toistaiseksi nestemäistä vetyä pidetään ainoana sopivana muotona ilmailuun, ja ainakin

Airbusin suunnitelmien mukaan vetytöltoaine tulisi ilmailukäytössä olemaan nestemäisessä olomuodossa. Esimerkiksi Airbusin uusi Blended-Wing konemalli antaisi lisää vapautta vetytankkien muotoilussa. Malli on nähtävissä kuvassa 4. Perinteisen mallisissa matkustajalentokoneissa tankit ovat yleensä siivessä tai siiven alla. Osana runkoa, eli integroituina, tankkien pitää polttoaineen ja sisäisen paineen lisäksi kestää myös koneen runkoon kohdistuvia voimia. Rungon ulkopuolelle sijoitettujen tankkien ei puolestaan tarvitse kestää kuin polttoaineen ja sisäisen paineen aiheuttamat voimat. Integroitu tankki on kuitenkin parempi lentolaitteen painon ja aerodynamiikan kannalta. Hyvältä ratkaisulta vedylle näyttävät kryogeeniset tankit, jotka ovat kilpailukykyisiä kerosiinitankkien painon kanssa, ja yhä kehitettävissä paremmiksi. Toistaiseksi tankin painon kanssa on kuitenkin tehtävä kompromisseja muiden tarpeellisten ominaisuuksien takaamiseksi. Tarkasti suunnitellun ja rakennetun vetytankin ei pitäisi olla perinteistä kerosiinitankkia räjähdysherkempi tai epäluotettavampi. (Bensmann et al., 2018)



Kuva 4. Airbusin ZEROe -konseptin Blended-Wing Body (BWB) vetylentokone, jossa vetytankit on sijoitettu rungon sisälle. (Airbus, 2020)

NASA, joka on käyttänyt vetyä avaruusrakettien polttoaineena jo pitkään, on tullut siihen tulokseen, että vety voi olla polttoaineena yhtä turvallista tai jopa turvallisempaa kuin bensiini tai tavanomaiset lentopolttoaineet (Hordeski, 2012). Kun vedyn käyttö lisääntyy ja suunnittelutyö etenee, vedyn käsittelyyn tulee varmuutta ja teknologiat kehittyvät. Tämä lisää vedyn käyttöturvallisuutta jatkuvasti, ja tulevaisuudessa käyttö tulee varmasti olemaan ainakin yhtä turvallista, kuin perinteisten polttoaineiden käyttö ja käsittely.

4.3 Ekologisuus

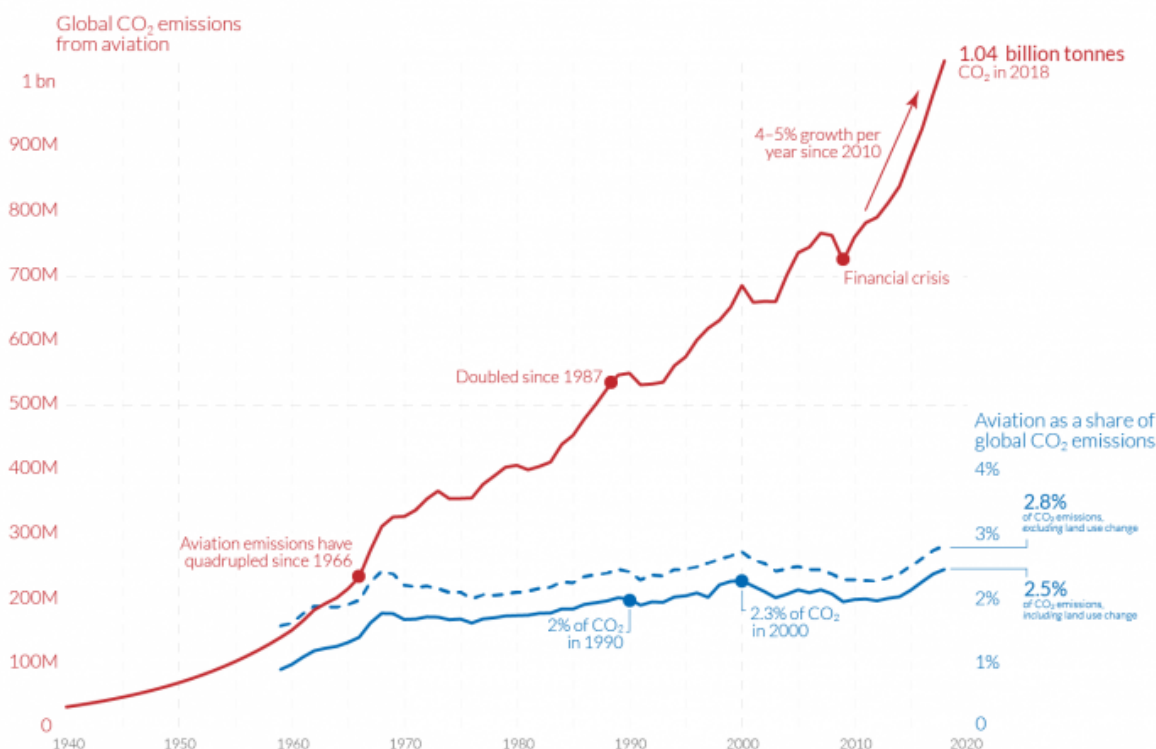
Lentämisen merkitys ja määrä kasvaa globalisoituvassa yhteiskunnassa koko ajan, COVID-19:n aiheuttamaa taantumaa lukuun ottamatta. Lentoliikennettä käytetään niin matkustaja-, rahti- kuin sotilasliikenteessäkin, ja se on merkityksellisessä roolissa nykyihmisen elämässä lyhentäen matkustusaikoja merkittävästi maaliikenteeseen verrattuna. Lentäminen on kuitenkin myös melko saastuttavaa, ja se jättää lennon aikana saasteet yläilmakehään, josta ne pääsevät suoraan vaikuttamaan kasvihuoneilmiötä lisäävästi ilmastomuutokseen. Näin ollen lentämiseen tarvitaan ekologisempia vaihtoehtoja, joita vety voi polttoaineena tarjota.

Vuonna 2019 matkustajaliikenteen ja rahtiliikenteen lennot muodostivat 915 miljoonaa tonnia hiilidioksidipäästöjä. Koko ihmiskunnan hiilidioksidipäästöt olivat yhteensä 43 miljardia tonnia, eli lentoliikenne muodosti 2,13 % kaikista hiilidioksidipäästöistä. Koko liikenteen päästöistä lentoliikenne oli vuonna 2019 vastuussa 12 prosentista. Vuonna 2019 lentoyhtiöt kuljettivat 4,5 miljardia matkustajaa. (ATAG, 2020). Vuonna 2011 lentoliikenteestä aiheutuvat päästöt muodostivat 14 % koko liikennesektorin hiilidioksidipäästöistä (Fontes, Coelho & Ramos Pereira, 2014). Vuonna 2018 lentoliikenne tuotti 1,9% kaikista kasvihuonekaasupäästöistä ja vuonna 2016 2,5% kaikista hiilidioksidipäästöistä. Vuonna 2016 lentoliikenteen merkitys ilmaston lämpenemiseen oli 3,5%. Tämä luku on suurempi johtuen päästöjen vapautumisesta yläilmakehässä. (Richie, 2020). Huomataan, että eri lähteistä saatavat luvut ovat hyvin lähellä toisiaan myös eri vuosina. Alla olevasta kuvasta 5 nähdään, että lentoliikenne on tuottanut 2000-luvun puolella tasaisesti noin 2 - 2,5% maailman hiilidioksidipäästöistä.

Global carbon dioxide emissions from aviation

Aviation emissions includes passenger air travel, freight and military operations. It does not include non-CO₂ climate forcings, or a multiplier for warming effects at altitude.

Our World
in Data



OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Source: Lee et al. (2020). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018; based on Sausen and Schumann (2000) & IEA.

Share of global emissions calculated based on total CO₂ data from the Global Carbon Project.

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie.

Kuva 5. Punaisella lentoliikenteen hiilidioksidipäästöt vuosittain tonneina. Sinisellä lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjen osuus maailman hiilidioksidipäästöistä prosentteina. (Ritchie, 2020)

Lentämisen ilmastovaikutus on prosentuaalisesti suurempi kuin sen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen osuus, koska saasteet jäävät suoraan yläilmakehään, jossa niiden ilmaston lämpenemistä edistävä vaikutus on suurempi kuin maan pinnan läheisyydessä syntyvillä päästöillä. Jos vetyä puhtaasti polttavilla kaasuturbiineilla käyvät lentokoneet saadaan markkinoille ja yleiseen käyttöön, hiilidioksidipäästöjä saataisiin siis vähennettyä yli 900 miljoonaa tonnia vuodessa, ja suoraan yläilmakehään jäävien päästöjen määrä vähenisi merkittävästi. Vedyllä lentävät koneet tuottaisivat ideaaltilanteessa savukaasuna vain vesihöyryä, ja niillä lentäminen olisi teoriassa päästötöntä. Tietenkin käytännössä koneet saastuttaisivat yhä rakennusvaiheessa, korjausvaiheessa, lentokenttien ylläpidon osalta ja hävitys- tai kierrätysvaiheessa, kuten nykyisetkin lentokoneet. Lisäksi myös vetyä polttoaineenaan käyttävät kaasuturbiinit voivat tuottaa joitakin epäpuhtauksia, kuten kappaleessa 3.1 mainittiin. Kehittämällä ilmailukäyttöön sopivia vetyä polttoaineenaan

käytettäviä kaasuturbiineita ihmiskunta voi kuitenkin vähentää hiilidioksidipäästöjään noin 2,5% vuodessa, ja ilmastovaikutustaan sitäkin enemmän.

4.4 Taloudellisuus

Vedyn käyttö lentokoneiden polttoaineena lisäisi lyhyehkön lentomatkan hintaa alle 18 euroa matkustajaa kohden vähentäen lentämisen negatiivista ilmastovaikutusta 50-90% (Anon, 2020). Jos lentoyhtiö niin sanotusti maksattaa matkasta aiheutuvat lisäkustannukset kuluttajalla, joka todennäköisesti valitsee mielellään ympäristöystävällisen vaihtoehdon hieman kalliimmalla hinnalla, lentoyhtiölle jäävät kustannukset koostuvat lähinnä kaluston ja polttoainejärjestelmien uudistamisesta. Lisäksi vetylentokoneiden pioneereille kuluja tuo lentolaitteiden kehitystyö ja siihen liittyvä tutkimus, sekä mahdollisesti lentohenkilöstön koulutus uuteen konetyyppiin. Kalusto kuitenkin vaatii joka tapauksessa päivitystä tasaisin väliajoin, samoin kuin henkilöstö lisäkoulutusta, joten näihin luonnollisiin vaihtoihin yhdistettynä koneiden hankintakustannuksia ja ohjaajien, mekaanikkojen ja muun henkilökunnan koulutuskustannuksia saataisiin pienennettyä.

Matkustajalle lisäkuluja aiheuttaa lentoyhtiön päätöksen ja kulujen lisääntymisen mukainen matkalippujen hinnannousu. Tämä kuitenkin voi tasaantua ajan mittaan lentoyhtiön kulujen tasaannuttua. Kuitenkin noin 18 euron lisä lyhyehkön matkan lentolipun hinnassa olisi prosentuaalisesti noin 7-25 % luokkaa, eli ei kovin merkittävä. Lisäksi tulevaisuudessa öljypohjaisten ja fossiilisten polttoaineiden hinnat todennäköisesti nousevat niiden rajallisuudesta johtuen, ja lisäksi on erittäin todennäköistä, että fossiilisten polttoaineiden verotusta tullaan nostamaan ainakin Suomen ja Euroopan Unionin tasolla, jolloin vedyn käytöstä polttoaineena tulee tulevaisuudessa teknologian kehittyessä jopa edullisempi vaihtoehto.

Tarkkoja kokonaiskustannuksia vetylentokoneisiin siirtymiseen on vielä vaikea ennustaa, mutta jos ekologisten koneiden hinnat ja vedyn varastointilaitteistojen sekä itse polttoaineen hinta saadaan kilpailukykyiselle tasolle, monet lentoyhtiöt tulevat varmasti siirtymään hiljalleen perinteisiä polttoaineita käyttävien koneiden rinnalla vetylentokoneisiin. Kuluttajat ovat nykyaikana tietoisia ja valmiita maksamaan ekologisuudesta, joten

matkustajalentoliikenteenkin on seurattava kysynnän ja tarjonnan lakia ympäristöystävällisten vaihtoehtojen lisääntyessä.

5 TEKNOLOGIA MAAKÄYTÖSSÄ

Vetyä voidaan käyttää kaasuturbiinien polttoaineena myös maakäyttöisissä ajoneuvoissa. Bensiini- ja dieselkäyttöisten autojen polttoainekustannukset ja verot nousevat jatkuvasti, ja myös autoliikenne tarvitsee ekologisempia ja taloudellisempia vaihtoehtoja. Näitä tarjoavat toistaiseksi sähkö-, kaasu- ja hybridautot, mutta bensiini- ja dieselautot ovat edelleen silti autotyypeistä yleisimpiä. Tällä hetkellä saatavissa olevat vetyautot ja vedyllä toimivat prototyyppit ovat lähinnä polttokennolla toimivia, eivätkä siis polta vetyä kaasuturbiinissa.

Auto alkoi yleistyä 1900-luvun alussa, jolloin markkinoilla oli höyry-, bensiini- ja sähköautoja (Hordeski, 2012). Bensiiniä polttoaineenaan käyttävät autot eivät siis suinkaan olleet ainoa alkuperäinen vaihtoehto, vaikka veivätkin lopulta voiton yleisyydessä. 1900-luvun alussa kuitenkin esimerkiksi ajoneuvon päästöt eivät vielä olleet asia, johon olisi kiinnitetty huomiota. Voi siis olla, että ekologisempien vaihtoehtojen yleistyessä bensiinikäyttöisen ajoneuvon aika jää varsin lyhyeksi, runsaan vuosisadan mittaiseksi.

Tieliikenne aiheuttaa 74% kaiken liikenteen hiilidioksidipäästöistä (ATAG, 2020). Muuttamalla tieliikenneajoneuvokantaa saastuttamattomaksi saataisiin siis aikaan paljon suurempia muutoksia kuin esimerkiksi lentoliikenteen muuttamisella saastuttamattomaksi. Autoille on olemassa monenlaisia päästörajoituksia, jonka vuoksi auton suunnittelussa ja rakennusvaiheessa on käytettävä rahaa ja resursseja pienempien päästöjen saavuttamiseksi. Lisäksi ainakin Suomessa ajoneuvovero perustuu osittain ajoneuvon päästöihin Vetyä polttoaineenaan käyttävällä autolla näitä ongelmia ei olisi, koska vedyn polton jälkituote on puhdas vesi.

Yleisten maa-ajoneuvojen keskimääräiset tehokokoluokat ovat verrattain pieniä, noin sadasta kilowatista hieman alle 600 kilowattiin. Alla olevassa taulukossa 2 verrataan kaasuturbiinin, kaasumoottorin ja polttokennon hyötysuhteita näissä kokoluokissa. Henkilöautolla viitataan Euroopassa yleisesti käytössä oleviin henkilöautoihin, pienellä kuorma-autolla 3,5 – 4 tonnia painavaan kuorma-autoon, ja suurella kuorma-autolla noin 40 tonnia painavaan kuorma-autoon. Linja-autolla viitataan 50 -paikkaiseen linja-autoon. Taulukosta huomataan, että kaasuturbiinin hyötysuhde ei vielä näillä tehotasoilla kilpaile kaasumoottorin eikä polttokennon hyötysuhteen kanssa ainakaan nykyisellä teknologialla.

Kaasuturbiinin hyötysuhde on lähteistä ja tehosta riippuen noin 30-35 %, kuten taulukosta voidaan huomata. Polttokennon hyötysuhde on kuitenkin huomattavasti korkeampi, noin 50-60% ja kaasumoottorinkin hyötysuhde, joka on noin 40%, voittaa kaasuturbiinin vertailussa. Näin ollen maa-ajoneuvojen vetyteknologia tulee todennäköisesti keskittymään kaasuturbiinien sijaan muihin vaihtoehtoihin. Hyötysuhteisiin tarvittavaa dataa oli verrattain vaikea löytää, eivätkä eri valmistajien arvot ole välttämättä keskenään täysin vertailukykyisiä, joten taulukko on ennen kaikkea vertailun pohjaksi suuntaa antava.

Taulukko 2. Teknologioiden hyötysuhteita (η) eri tehoilla. Viiva tarkoittaa, että dataa hyötysuhteesta ei ollut saatavilla luotettavasta lähteestä. (Ajoneuvojen tehot: Statista Research Department, 2020; Volvo, 2020; Autowiki, 2020. Teknologioiden hyötysuhteet: Siemens Energy 1, 2 & 3, 2020; MWM, 2021; Claverton Energy, 2014; U. S. Department of Energy, 2015; Ekdunge, 2017; Fuell Cells Works, 2019; Benjamin, Curtin, & Gangi, 2017)

Ajoneuvo	Keskimääräinen	Kaasuturbiini	Kaasumoottori	Polttokenno
	teho (kW)	η [%]	η [%]	η [%]
Henkilöauto	100	30,2	32,8	52-60
Kuorma-auto, pieni	110	30,2	32,8	52-60
Kuorma-auto, iso	560	33,6	42	-
Linja-auto	320	30,6	36	50

Vetykaasuturbiinilla toimivan kulkuneuvon tavoite on olla yhtä turvallinen ja helposti ajettava kuin perinteisillä polttoaineilla toimiva kulkuneuvo. Lisäksi ajosäde tulisi pyrkiä saamaan samoihin lukemiin. Kuitenkin lähinnä vedyn varastoinnin vaikeuksien vuoksi ajosäde ei ole yhtä suuri, ja joissakin tapauksissa esimerkiksi kuljetustilasta joudutaan joustamaan. Siltana kokonaan vedyllä toimiviin ajoneuvoihin voivat toimia esimerkiksi vetyä ja jotakin perinteistä polttoainetta, kuten bensiiniä, käyttävät hybriditurbiineilla toimivat ajoneuvot. Tämänkaltaiset ajoneuvot voisivat olla käytössä esimerkiksi vetyinfrastruktuurin rakentuessa ja kaasuturbiinien kehittyessä entisestään. (Verhelst & Wallner, 2009)

Viime vuosikymmenten aikana useita vetypolttomootoreilla toimivia maa-ajoneuvoja, kuten kaksipyöräisiä, henkilöautoja, kuorma-autoja ja linja-autoja on suunniteltu, rakennettu ja testattu. Vetyajoneuvot on voitu joko suunnitella alun perin vetyajoneuvoiksi, tai muokata jo valmista teknologiaa vedyllä toimivaksi valmistajan tai jälleenmyyjän toimesta. Lisäksi vetyajoneuvot voidaan jakaa vetytankin perusteella painetankissa puristettua kaasumaista vetyä tai kryogeenisessä tankissa nestemäistä vetyä käyttäviksi. Näitä erilaisia vetyajoneuvoja ovat kehittäneet esimerkiksi Quantum Tecstar, Mazda ja BMW. (Verhelst & Wallner, 2009)

Tietoa tai tutkimuksia vetykaasuturbiinilla käyvästä autosta tai sen kehityksestä ei löydy yhtä paljon kuin vetypolttoainekenoilla toimivista, koska vetykäyttöisten maa-ajoneuvojen kehitystyö on toistaiseksi keskittynyt polttokennoteknologiaan sen tarjoaman paremman hyötysuhteen vuoksi. Tällä hetkellä polttokennolla toimivia vetyautoja tarjoavat ainakin Toyota, Hyundai ja Honda. Nähtäväksi jää, yleistyvätkö vetyä kaasuturbiineissa käyttävät ajoneuvot myös maaliikenteessä tulevaisuudessa kaasuturbiinien kehitystyön jatkumisen ja vetyinfrastruktuurin rakentumisen myötä. Toistaiseksi kuitenkin vetymaa-ajoneuvojen kokoluokassa järkevämpiä vaihtoehtoja ovat polttomootoreilla ja polttokennoilla toimivat ajoneuvot, kuten vertailussa huomattiin. Myös näiden teknologioiden hyödyntämiseen tarvitaan kuitenkin kehitystyötä vetypolttoaineen säilytyksen ja kuljetuksen parantamiseksi, ja tätä samaa kehitystyötä voidaan hyödyntää myös vetykaasuturbiinien eri sovelluksissa tarvittavissa polttoaineen säilytys- ja kuljetusmenetelmissä.

6 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin vedyn käyttöä kaasuturbiinien polttoaineena. Työssä perehdyttiin vedyn ja kaasuturbiinien ominaisuuksiin ja vedyn polttoaineena käytön vaatimiin muutoksiin kaasuturbiinien rakenteissa. Lisäksi käsiteltiin teknologian nykytilaa ja tulevaisuutta sekä eri yritysten kehitystavoitteita. Vetyä polttoaineena käyttävien kaasuturbiinien mahdollisuuksia tarkasteltiin eri näkökulmista erityisesti lentoliikenteessä, mutta myös maakäytössä.

Kaasuturbiinit ovat lämpövoimakoneita, jotka tuottavat tehoa polttamalla polttoaineen ja ilman seosta polttokammiossa, ja ohjaamalla kuumat savukaasut pyörittämään turbiinia. Niiden rakenne koostuu kolmesta pääkomponentista, kompressorista, polttokammioista ja turbiinista, ja toiminta perustuu Brayton -prosessiin. Kaasuturbiineilla on hyvin monia erilaisia sovelluksia niin maa-, meri- kuin ilmakäytössäkin, ja niitä on olemassa eri kokoisia ja tehoisia riippuen käytön vaatimuksista.

Vety on hyvin potentiaalinen tulevaisuuden polttoaine, jolla on massaan nähden suuri energiatiheys ja joka palaa hapen kanssa tuottaen savukaasuna vain vesihöyryä. Vety on atomirakenteensa vuoksi hyvin reaktiivinen, eikä sitä esiinny luonnossa puhtaana alkuaineena. Vedyn raaka-ainetta, vettä, on kuitenkin tarjolla lähes rajattomasti merissä. Vetyä voidaan valmistaa vedestä saastuttamattomasti uusiutuvien energianlähteiden avulla, ja lisäksi vetyä syntyy monien teollisuuden prosessien sivutuotteena.

Vedyn käyttö kaasuturbiinien polttoaineena vaatii muutamia muutoksia kaasuturbiinin rakenteeseen, erityisesti polttokammioon. Vetyä polttoaineenaan käyttäviä kaasuturbiineita on kehitetty ja kehitetään eri yritysten toimesta, ja ainakin muutamia malleja on jo markkinoilla. Sovelluksia vetykäyttöisille kaasuturbiineille on mahdollista olla tulevaisuudessa yhtä paljon kuin perinteisiä polttoaineita käyttäville kaasuturbiineillekin. Haasteita aiheuttaa kuitenkin vedyn varastointi sen hyvin alhaisen tiheyden, alhaisen tiivistymislämpötilan ja suuren reaktiivisuuden vuoksi.

Lentokonekäytössä vetykaasuturbiinit vaikuttavat todennäköisimmältä ratkaisulta ekologisempaan lentämiseen. Ensimmäisiä vetykaasuturbiineilla toimivia

matkustajalentokoneita suunnitellaan tuotavan markkinoille vuonna 2035. Vetylentokoneet eivät kuitenkaan vielä silloin tule olemaan tehokkuudessa ja lentomatassa kerosiinikäyttöisten koneiden tasolla. Vedyllä kaasuturbiinien polttoaineena on kuitenkin paljon mahdollisuuksia, joita osataan todennäköisesti tulevaisuudessa hyödyntää yhä paremmin.

NASA on käyttänyt vetyä polttoaineena jo pitkään, ja todennut sen olevan oikein käytettynä yhtä turvallista kuin perinteisten polttoaineiden. Ilmailussa turvallisuudesta tuskin tingitään, eli vetylentokoneet tulevat olemaan yhtä turvallisia kuin perinteiset, kun ne tuodaan markkinoille. Vedyn käytön myötä päästöjen oletetaan putoavan lähes nolnaan, koska vedyn polton lopputuote on vesihöyry. Lentoliikenteen päästöt muodostavat noin 2,5 % maailman koko hiilidioksidipäästöistä, ja yläilmakehään vapautuessaan niiden merkitys ilmaston lämpenemiselle on suurempi. Näin ollen ilmailulle on tärkeää löytää ekologisia vaihtoehtoja, joista vety näyttää lupaavimmalta. Myös taloudellisista näkökohdista vetykaasuturbiinit näyttävät lupaavilta. Ne vaikuttaisivat matkustajan lentolipun hintaan noin 7-25 %, ja teknologian kehittyessä ja uusiutumattomien polttoaineiden hinnan ja verotuksen noustessa tulisivat tulevaisuudessa mahdollisesti jopa edullisemmiksi alkuinvestointien jälkeen.

Maakäytössä erityisesti vetykäyttöiset autot keskittyvät enemmän polttokennoteknologiaan, mutta myös ICE-moottoreilla toimivia vetyautoja on jo kehitetty ja kehitetään jatkuvasti. Tälle haasteita tuo esimerkiksi vetyinfrastruktuurin kehittymättömyys. Vedyn infrastruktuurin ja varastoinnin kehityksen rinnalla voitaisiin käyttää esimerkiksi hybridiajoneuvoja, jotka toimivat kaasuturbiineilla, jotka kykenevät käyttämään polttoaineenaan vetyä ja esimerkiksi bensiiniä. Kaasuturbiinit eivät kuitenkaan maa-ajoneuvojen tehokoluokassa voi kilpailla hyötysuhteessa polttokennojen ja kaasumoottoreiden kanssa, joten kaasuturbiinit eivät vaikuta todennäköiseltä valinnalta maaliikenteen käyttöön. Myös maa-ajoneuvojen tulevaisuudessa vetytankkien kehitys on suuressa roolissa.

Vedyn käyttö kaasuturbiinien polttoaineena tarjoaa nyt ja erityisesti tulevaisuudessa monia sovelluksia ympäristöystävällisempiin laitteisiin. Niitä voidaan käyttää niin teollisuudessa, ilmailussa kuin muussakin liikenteessä. Erityisesti lentoliikenteen kohdalla

vetykaasuturbiinit vaikuttavat todennäköisimmältä ja parhaalta tieltä ekologiseen, päästöttömään lentämiseen. Ilmastonmuutoksen hillitseminen tulee todennäköisesti olemaan yksi ihmiskunnan suurimmista haasteista, joten tulevaisuudessa tarvitaan päästöttömiä ratkaisuja ihmiskunnan erilaisiin tarpeisiin. Vedyllä toimivien kaasuturbiinien kehitys ja käyttö erilaisissa sovelluksissa tarjoavat juuri näitä tärkeitä ratkaisuja matkalla kohti kestävämpää yhteiskuntaa.

LÄHTEET

Anon (2020) FCH2 JU, Clean Sky 2 study on hydrogen powered aviation. [Online] 2020 (7), 5–6.

Airbus (2020). Airbus reveals new zero-emission concept aircraft. [Online] 2020 (9). Saatavissa: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html>

Air Transport Action Group ATAG (2020). Facts & Figures. [Online]. Luettu 19.11.2020. Saatavissa: <https://www.atag.org/facts-figures.html>

Autowiki, 2020. Kuorma-auto. [Online]. Luettu 6.1.2021. Saatavissa: <http://www.autowiki.fi/index.php/Kuorma-auto>

Benjamin, T., Curtin, S. & Gangi, J. (2017). The Business Case for Fuel Cells: Delivering Sustainable Value. [Online]. Luettu: 7.1.2021. Saatavissa: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2017/08/135862.pdf>

Bensmann, B., Hanke-Rauschenbach, R., Kadyk, T., Krewer, U. & Winnefeld, C. (2018). Modelling and designing cryogenic hydrogen tanks for future aircraft applications. *Energies*, 11(1), 105. doi:<http://dx.doi.org.ezproxy.cc.lut.fi/10.3390/en11010105>

Bulla, Evangeline (2017). The Design and Testing of Hydrogen Fueled Internal Combustion Engine. International Academy of Engineering and Medical Research. [Online] Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/327655678_The_Design_and_Testing_of_Hydrogen_Fueled_Internal_Combustion_Engine

Cappelletti, A. & Martelli, F. (2017) Investigation of a pure hydrogen fueled gas turbine burner. *International journal of hydrogen energy*. [Online] 42 (15), 10513–10523.

Chong, C. (2020) Dual-Fuel Operation of Biodiesel and Natural Gas in a Model Gas Turbine Combustor. *Energy & fuels*. [Online] 34 (3), 3788–3796.

Claverton Energy (2014). Finning Caterpillar Gas Engine CHP Ratings. [Online]. Luettu: 17.2.2021. Saatavissa: <https://claverton-energy.com/finning-caterpillar-gas-engine-chp-ratings-and-thermal-outputs.html>

Eckermann, Erik (2001). *World History of the Automobile*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

Ecotricity (2020). When will fossil fuels run out? [Online]. Luettu 6.12.2020. Saatavissa: <https://www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/energy-independence/the-end-of-fossil-fuels>

Ekdunge, P. (2017). PowerCell Sweden AB. [Online]. Luettu 7.1.2021. Saatavissa: <https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Per%20Erkunge-PowerCell.pdf>

Fontes, Coelho & Ramos Pereira (2014). Can hydrogen or natural gas be alternatives for aviation? – A life cycle assessment. [Online] 2014 (6).

Fuell Cells Works (2019). Horizon Automotive PEM Fuel Cells to Set 300 kW Benchmark. [Online]. Luettu 7.1.2021. Saatavissa: <https://fuelcellsworks.com/news/horizon-automotive-pem-fuel-cells-to-set-300kw-benchmark/>

Furuhama, Shouichi (1978). *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 3, Issue 1, 1978. Pages 61-81.

Giampaolo, T. (2003) *The gas turbine handbook : principles and practices* . 2nd ed. Lilburn (GA): Fairmont Press.

Heffel, J. (2003) NO_x emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500 rpm using exhaust gas recirculation. International journal of hydrogen energy. [Online] 28 (8), 901–908.

Hordeski, Michael F. (2012) Alternative Fuels : The Future of Hydrogen. The Fairmont Press, Inc.

Kawasaki. (2020). About gas turbines. [Online]. Read 16.11.2020. Saatavissa: http://global.kawasaki.com/en/energy/equipment/gas_turbines/outline.html

Lindstrand Nils (2019). This Swedish scientist works towards fulfilling Siemens Energy's 2030 hydrogen pledge. Article. [Online]. Read 18.11.2020. Saatavissa: <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2019/hydrogen-capable-gas-turbine.html>

Mazeraneu, E. (2020). Revenue of airlines worldwide 2003-2021. [Online] 2020 (6). Saatavissa: <https://www.statista.com/statistics/278372/revenue-of-commercial-airlines-worldwide/>

MWM (2021). Gas engine TCG 3016. [Online]. Luettu: 17.2.2021. Saatavissa: <https://www.mwm.net/mwm-chp-gas-engines-gensets-cogeneration/gas-engines-power-generators/gas-engine-tcg-3016/>

Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (2020). Safe Use of Hydrogen. [Online]. Luettu 28.11.2020. Saatavissa: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/safe-use-hydrogen>

Ritchie, Hannah (2020). Climate change and flying: what share of global CO₂ emissions come from aviation? [Online]. Luettu 19.11.2020. Saatavissa: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation>

Siemens Energy 1, 2020. SGT-100. [Online]. Luettu 7.1.2021. Saatavissa:
<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines/sgt-100.html>

Siemens Energy 2, 2020. SGT-300. [Online]. Luettu 7.1.2021. Saatavissa:
<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines/sgt-300.html>

Siemens Energy 3, 2020. SGT-600. [Online]. Luettu 7.1.2021. Saatavissa:
<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-turbines/sgt-600.html>

Soares, C. (2015) Gas turbines : a handbook of air, land and sea applications . 2nd ed. Oxford, England ;: Butterworth-Heinemann.

Statista Research Department (2020). EU car sales: average engine power 2018, by country. [Online]. Luettu 5.1.2021. Saatavissa:
<https://www.statista.com/statistics/425334/eu-car-sales-average-engine-power-by-country/>

Takiguchi M. & Yamane K. (2009). Hydrogen Fuel ICE Bus developed by TCU. [Online]. Luettu 17.11.2020. Saatavissa: <http://www.hess.jp/Search/data/34-02-041.pdf>

Turbotec (2020). Hydrogen Gas Turbine. [Online]. Luettu 30.11.2020. Saatavissa:
<https://www.turbotec.be/hydrogen-gas-turbine/>

U. S. Department of Energy (2015). Fuell cell technologies office. [Online]. Luettu 7.1.2021. Saatavissa:
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/fcto_fuel_cells_fact_sheet.pdf

Verhelst, S. & Wallner, T. (2009) Hydrogen-fueled internal combustion engines. Progress in energy and combustion science. [Online] 35 (6), 490–527.

Volvo, 2020. Volvo 9700. [Online]. Luettu 6.1.2021. Saatavissa:
<https://www.volvobuses.fi/fi-fi/our-offering/coaches/volvo-9700/specifications.html>