



# Vedyn käyttö säätösähköongelman ratkaisuna ja sovellusten teknistaloudellinen tarkastelu

Nea Erämaa

OPINNÄYTETYÖ  
Marraskuu 2023

Biotuotetekniikan tutkinto-ohjelma

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Biotuotetekniikan tutkinto-ohjelma

ERÄMAA, NEA:

Vedyn käyttö säätösähköongelman ratkaisuna ja sovellusten teknistaloudellinen tarkastelu

Opinnäytetyö 50 sivua, joista liitteitä 3 sivua  
Marraskuu 2023

---

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Finno Exergy Oy. Työssä käsitellään yrityksen kehittämää teknologiaa, jonka avulla voidaan pienentää kaasuturbiinien polttoaineen kulutusta ja hiilidioksidipäästöjä sekä sähköntuotannossa että liikenteessä. Opinnäytetyön tavoitteena oli esitellä teknologiaan liittyvä sovellus sekä selvittää sen hyödyt laskelmien avulla.

Vetyä voidaan valmistaa uusiutuvia energianlähteitä tai fossiilisia polttoaineita hyödyntäen. Vety luokitellaan valmistustapojen mukaan eri väreihin, joista tässä opinnäytetyössä käsitellään vihreää, sinistä ja turkoosia vetyä. Vihreän vedyn tuotannossa käytetään uusiutuvia energianlähteitä, kuten tuulivoimaa. Vetyä voidaan käyttää esimerkiksi kaasuturbiinien polttoaineena. Yritys on kehittänyt kaasuturbiinin polttokammion, jolla vedyn hyödyntäminen voidaan mahdollistaa.

Työn tarkoituksena oli laskea tuulivoiman myynnistä saatu hinta vuosilta 2020–2023. Lisäksi työssä etsittiin tietoa elektrolyysilaitteistojen, kaasuturbiinien ja polttokennojen kustannuksista ja teknisistä käyttöajoista. Näiden tietojen avulla saatiin tehtyä ROI-laskelmat prosessille, jossa tuotetaan uusiutuvaa vetyä ja käytetään sitä sähköntuotantoon joko kaasuturbiinilla tai polttokennolla.

ROI-laskelmien tulosten perusteella investoinnit kaasuturbiiniin ovat kannattavia, jos elektrolyysiin tarvittava sähkö ostetaan halvalla ja myydään tuotettu sähkö hinnan ollessa korkea. Polttokennoon investoiminen ei ole tässä tapauksessa kannattavaa, koska sen kustannukset ovat korkeat ja laitos vaatisi useampia yksiköitä, kun kaasuturbiineja riittää yksi. Laskelmissa ei huomioitu elektrolyysissä käytettävän veden hintaa, vedyn kuljetusta tai varastointia eikä laitteistojen vaihtuvia käyttö- ja ylläpitokustannuksia.

---

Asiasanat: vety, kaasuturbiini, polttokammio, elektrolyysi, tuulivoima

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Bioproduct Engineering

ERÄMAA, NEA:

Use of Hydrogen as a Solution of Balancing Energy Problems and Technical and Economic Review of the Applications

Bachelor's thesis 50 pages, appendices 3 pages  
November 2023

---

This Bachelor's thesis was commissioned by Finno Exergy Oy. The thesis dealt with the combustion chamber technology developed by the company. The objective of this thesis was to present the application and to figure out benefits of it by calculations.

Hydrogen can be produced using renewable energy sources or fossil fuels. Hydrogen is classified into different colours, of which the thesis deals with green, blue, and turquoise hydrogen. Hydrogen can be used as fuel for gas turbines. The company has developed a combustor for the gas turbine to enable the utilization of hydrogen.

The purpose of this thesis was to calculate the price of wind power for the years 2020-2023 and to collect information about costs of electrolysis equipment, gas turbines and fuel cells. The data were used to calculate ROI for a power generation process using hydrogen produced by electrolysis.

The ROI-calculations shows that investment in a gas turbine is profitable if the electricity is purchased when it is cheap and sold when the price is high. The investment in the fuel cell is not profitable in this case. The calculations did not consider the price of water, the transport or storage of hydrogen, or the variable operating and maintenance costs.

---

Key words: hydrogen, gas turbine, combustor, electrolysis, wind power

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	FINNO EXERGY OY .....	7
3	VEDYN LUOKITTELU JA VALMISTUS .....	8
	3.1 Vedyn luokittelu .....	8
	3.2 Vedyn käyttö ja varastointi .....	9
	3.3 Vihreä vety .....	10
	3.3.1 Elektrolyysi .....	10
	3.3.2 AEL-elektrolyysi .....	12
	3.3.3 PEM-elektrolyysi .....	13
	3.3.4 SOEC-elektrolyysi .....	14
	3.3.5 AEM-elektrolyysi .....	16
	3.3.6 Elektrolyysitekniikoiden vertailu .....	17
	3.4 Sininen vety .....	17
	3.5 Turkoosi vety .....	19
	3.5.1 Pyrolyysi .....	19
	3.5.2 Biomassan kaasutus .....	20
4	KAASUTURBIININ JA POLTTOKENNON TOIMINTA .....	23
	4.1 Kaasuturbiini .....	23
	4.1.1 Kaasuturbiinien historia, perusajatus ja jaottelu .....	23
	4.1.2 Kaasuturbiiniprosessi .....	25
	4.1.3 Kompressori .....	27
	4.1.4 Polttokammio .....	27
	4.1.5 Sovelluksen esittely .....	29
	4.1.6 Turbiini .....	31
	4.2 Polttokenno .....	31
5	TUULISÄHKÖ .....	33
	5.1 Hinnanmuodostus .....	33
	5.2 Tuulivoiman tuotantokapasiteetti .....	34
6	LASKELMAT .....	35
	6.1 Tuulisähkölaskelmat .....	35
	6.2 Elektrolyysilaitteiston kustannukset .....	39
	6.3 Kaasuturbiinin ja polttokennon kustannukset .....	39
	6.4 ROI-laskelmat .....	40
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....	42
	LÄHTEET .....	44
	LIITTEET .....	48

Liite 1. Tuulivoimatuotanto ja aluehinnat taulukoituna .....	48
Liite 2. Kuvaajien laadinnassa käytetty laskentataulukko.....	49
Liite 3. ROI-laskelmissa käytetty laskentataulukko .....	50

## 1 JOHDANTO

Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa negatiivisesti lähes kaikkeen elämään maapallolla. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen on tärkeässä roolissa. Vety ei ole vielä tällä hetkellä suuressa osassa energiantuotannossa, mutta tulevaisuudessa sillä voitaisiin korvata fossiilisia polttoaineita tai ainakin vähentää niiden käyttöä. Vedyn ympäristövaikutukset riippuvat siitä, hyödynnetäänkö valmistuksessa fossiilisia raaka-aineita vai uusiutuvia energianlähteitä.

Uusiutuvaa vetyä voidaan valmistaa elektrolyysillä esimerkiksi tuulivoiman avulla. Lisäksi vedyn avulla voidaan vakauttaa säätösähkön hinnan vaihteluja. Esimerkiksi öisin on tuulisempaa kuin päivisin, mutta sähkön käyttö on vähäisempää kuin päiväsaikaan. Tällöin tuotettu energia voidaan varastoida vetyyn ja muuttaa taas takaisin energiaksi silloin, kun sitä on kulutukseen nähden saatavilla liian vähän.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on esitellä toimeksiantajayrityksen kehittämä teknologia ja sen hyödyt laskelmien avulla. Tarkoituksena oli kerätä tietoa elektrolyysilaitteistojen, kaasuturbiinien ja polttokennojen investointi- ja käyttökustannuksista sekä teknisistä käyttöajoista ja hyötysuhteista. Tietojen avulla tehtiin ROI-laskelmat kaasuturbiinille ja polttokennolle. Laskelmien avulla voidaan arvioida investointien kannattavuutta taloudellisesta näkökulmasta.

## 2 FINNO EXERGY OY

Finno Exergy on vuonna 2013 perustettu yritys, joka kehittää vedyn käyttöön pohjautuvaa polttokammiotekniikkaa nykyisiin käytössä oleviin kaasuturbiineihin asennettaviksi. Yrityksen kehittämä teknologia lupaa huomattavaa polttoainesäästöä ja päästöjen vähentämistä tavanomaiseen kaasuturbiinin polttokammioon verrattuna. (Finno Exergy Oy 2020.) Teknologia esitellään tarkemmin kappaleessa 4.

Finno Exergy Oy:n liikevaihto vuonna 2019 oli 64 000 € ja nettotulos -251 000 €. Vuonna 2022 liikevaihto oli 288 950 € ja liiketulos -347 969 €. Vaikka liiketoiminta on tähän mennessä ollut tappiollista, on tavoitteena saavuttaa 200 miljoonan euron liikevaihto vuoteen 2030 mennessä. (Pekkonen 2020; Tervola 2023a.)

Vuonna 2020 yritys voitti energiayhtiö Shellin eurooppalaisille ja israelilaisille energia-alan yrityksille järjestämän New Energy Challenge -innovaatiokilpailun. Yritys sai kilpailun voitosta palkkioksi 100 000 euroa ja pääsi lisäksi jatkamaan kehitystyötä Shellin GameChanger -ohjelman avulla. (Pekkonen 2020.)

### 3 VEDYN LUOKITTELU JA VALMISTUS

#### 3.1 Vedyn luokittelu

Vety on maailman yksinkertaisin ja yleisin alkuaine, jota voidaan valmistaa uusiutuvia energianlähteitä tai fossiilisia raaka-aineita käyttäen. Vedyn ympäristöystävällisyys riippuu sen valmistustavasta, mutta puhtaasti tuotetulla vedyllä arvelaan olevan huomattava rooli tulevaisuuden energiantuotannossa päästöjen vähentämisessä ja ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Vety on hyvä ratkaisu esimerkiksi ylimääräisen sähkön varastointiin, sillä vetyyn varastoidulla sähköllä pystytään vakauttamaan säätösähkön hinnan vaihteluja. Energian varastointi vetyyn on myös halvempaa kuin perinteisiin akkuihin. Lisäksi vedyn hyödyntäminen kasvattaa Suomen energiaomavaraisuutta. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpainen 2008, 292; Välimäki 2022; Vattenfall 2023.) Vety voidaan luokitella valmistustapojen mukaan eri väreihin (taulukko 1), joista tässä kappaleessa käsitellään vihreää, sinistä ja turkoosia.

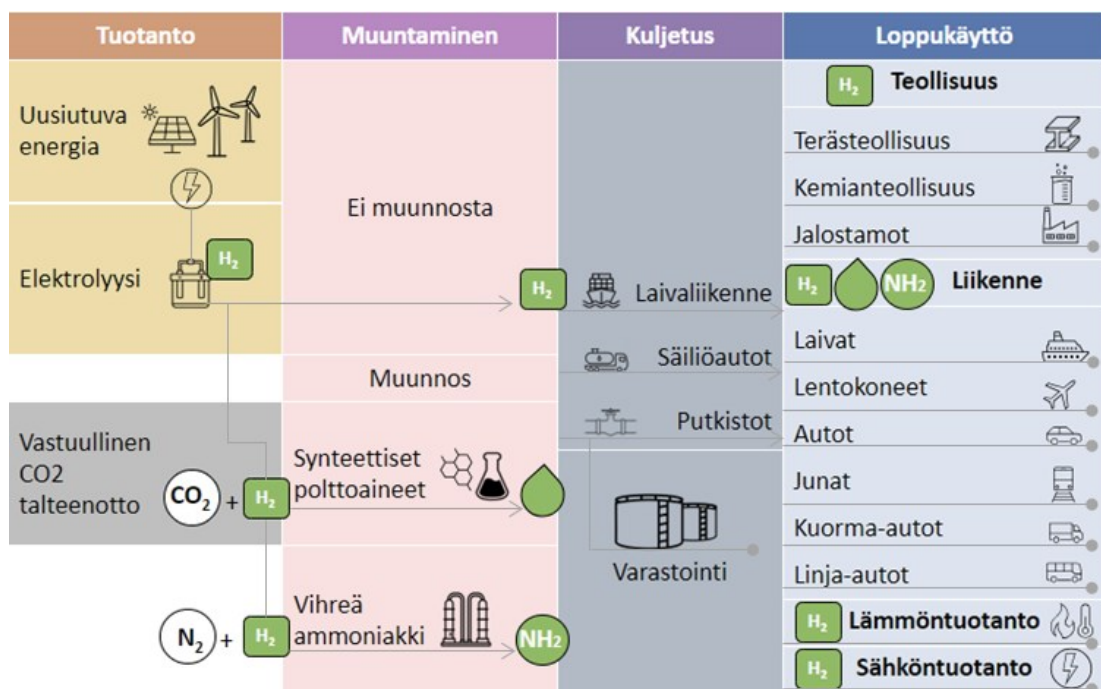
TAULUKKO 1. Vedyn luokittelu eri väreihin (Global Energy Infrastructure 2021).

Termistö		Valmistustapa	Lähtöaine / energianlähde	Kasvihuonekaasu-päästöt
Tuotettu sähköllä	Vihreä vety	Elektrolyysi	Tuuli-, aurinko- tai vesivoima	Minimaalinen
	Pinkki vety		Ydinvoima	
	Keltainen vety		Eri lähteistä saatava verkkosähkö	Keskisuuri
Tuotettu fossiilisilla polttoaineilla	Sininen vety	Maakaasun reformointi + CO <sup>2</sup> talteenotto	Maakaasu/hiili	Alhainen
	Turkoosi vety	Pyrolyysi	Maakaasu	Sivutuotteena hiilimustaa
	Harmaa vety	Maakaasun reformointi		Keskisuuri
	Ruskea vety	Kaasutus	Ruskohiili (ligniitti)	Korkea
	Musta vety		Kivihiihi	



### 3.2 Vedyn käyttö ja varastointi

Vedyn käyttökohteita nähdään kuviossa 1, jossa synteettisillä polttoaineilla tarkoitetaan tässä tapauksessa kemiallisilla prosesseilla tuotettuja vetypohjaisia polttoaineita, kuten metanolia, metaania ja muita hiilivetyjä, joiden valmistuksessa käytetään hiilidioksidia (IRENA 2022). Vedyn pääkäyttökohteisiin lukeutuu sähköntuotanto ja sähköverkon tasapainon ylläpitäminen sekä vedyn käyttö energiankantajana ja varastona. Lisäksi sitä hyödynnetään polttoaineena esimerkiksi maa-, meri- ja lentoliikenteessä päästöjen pienentämiseksi. Vetyä käytetään myös raaka-aineena erilaisissa teollisissa valmistusprosesseissa, kuten metanolin ja teräksen tuotannossa. Vedyntuotannon sivutuotteena syntyvää lämpöä hyödynnetään myös teollisuuden tarpeissa ja kaukolämpöverkoissa. (Fuel Cell & Hydrogen Energy Association n.d.b)



KUVIO 1. Vedyn kuljetus ja käyttökohteet (IRENA 2022).

Vedyn varastointiin ja kuljetukseen liittyy paljon haasteita. Sitä varastoidaan nestemäisenä, kaasuna, kemiallisina yhdisteinä tai metallihydrideihin imeytettynä. Alhaisen tiheyden takia varastoinnissa on oltava korkea paine. Vedyn tiheys normaalissa ilmanpaineessa (1 bar) on 0,09 kg/m<sup>3</sup>, mutta paineistettuna tiheyttä saadaan kasvatettua. Vedyn nesteytykseen taas tarvitaan huomattava määrä energiaa. Nestemäisen vedyn varastoinnissa tulee olla alhainen lämpötila, koska sen

kiehumispiste normaalipaineessa on vain  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lisäksi säiliön on oltava hyvin eristetty, jotta vety ei pääsisi haihtumaan tai lämpötila nousemaan ympäristön lämmön vaikutuksesta. (Huhtinen ym. 2008, 293–294.)

Vedyn varastoinnissa voidaan myös hyödyntää esimerkiksi metanolia ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), etanolia ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) ja ammoniakkia ( $\text{NH}_3$ ), sillä nämä yhdisteet ovat normaaliolosuhteissa (paine 1 bar, lämpötila 298 K) nestemäisiä ja ne sisältävät paljon vetyä. Tässäkin haasteeksi kuitenkin muodostuu suuri energiantarve, sillä vedyn kanssa reagoivan aineen valmistuksessa ja vedyn yhdisteestä erottamisessa käytetään paljon energiaa. Rungas energiankäyttö vaikuttaa myös alentavasti prosessin hyötysuhteeseen. (Huhtinen ym. 2008, 294.)

Vedyn varastointiin metallihydrideinä voidaan käyttää apuna esimerkiksi Lantaani-Nikkeliä ( $\text{LaNi}_2$ ) tai Rauta-Titaania ( $\text{Fe-Ti}$ ). Prosessin säätö tapahtuu lämpötilaa muuttamalla. Prosessissa puhtaan vedyn säiliöön luodaan korkea höyrynpaine, joka saa vedyn imeytymään varastointisäiliössä oleviin metallihydrideihin. Tällöin syntyy ylimääräistä lämpöä, joka on kuljetettava pois säiliöstä, koska metallihydridien lämmön liiallinen nousu pysäyttää vedyn siirtymisen varastoon. Vetyä voidaan vapauttaa säiliöstä nostamalla säiliön höyrynpainetta lämmön avulla suuremmaksi, kuin kulutuskohteen säiliön paine. (Huhtinen ym. 2008, 294.) Metallihydrideihin imeytettynä varastointisäiliöstä tulisi kuitenkin varsin painava, sillä hydrideihin voidaan sitoa vetyä suurimmillaan vain 10 % niiden omasta massasta. Varastointimenetelmässä on tosin se etu, että vety ei pääse vuotamaan, sillä sen vapauttaminen hydrideista vaatii lämpötilan nostamista. Tämä tekee metallihydrideihin varastoinnista turvallisemman muihin vaihtoehtoihin nähden. (Motiva 2023.)

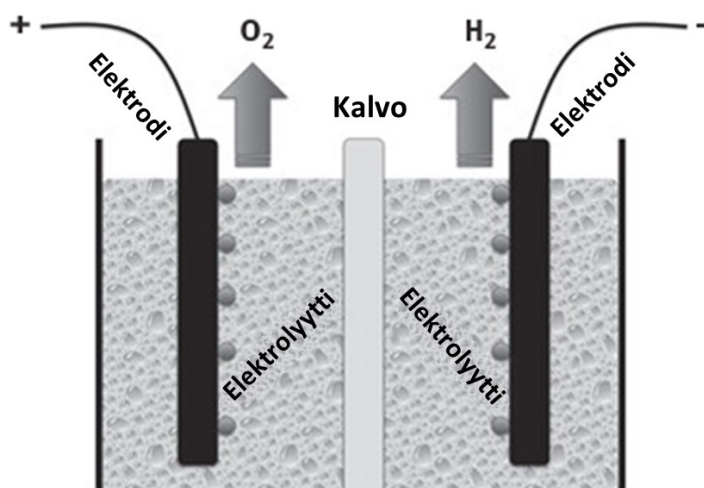
### **3.3 Vihreä vety**

#### **3.3.1 Elektrolyysi**

Vihreäksi eli uusiutuvaksi vedyksi kutsutaan vetyä, joka tuotetaan päästöttömästi uusiutuvilla energianlähteillä kuten aurinko-, vesi- tai tuulivoimalla. Uusiutuvan vedyn valmistuksen sivutuotteena ei synny lainkaan hiilidioksidia. (Vartiainen

2020.) Taskisen (2023) mukaan uusiutuvan vedyn osuus koko tuotannosta on tällä hetkellä alle 1 %, mutta määrän on tarkoitus nousta roimasti lähivuosien aikana.

Vihreä vety valmistetaan elektrolyysillä (kuvio 2), jossa vesi hajotetaan sähköenergian avulla vedyksi ja hapeksi. Hapetus- ja pelkistysreaktion avulla elektrolyytti hajoaa positiivisiksi ja negatiivisiksi ioneiksi. Ionit kulkeutuvat sähköisten vetovoimien ansiosta varatuille sauvoille eli elektrodeille, jolloin positiiviset ionit pelkistyvät ja negatiiviset hapettuvat. Tällöin elektrolyysikennossa muodostuu vetyä ja happea. (Huhtinen ym. 2008, 292.)



KUVIO 2. Elektrolyysin toimintaperiaate (Boudellal 2018, 64, muokattu).

Boudellalin (2018) mukaan vedyn elektrolyysin kemiallinen reaktio on kaavan 1 mukainen



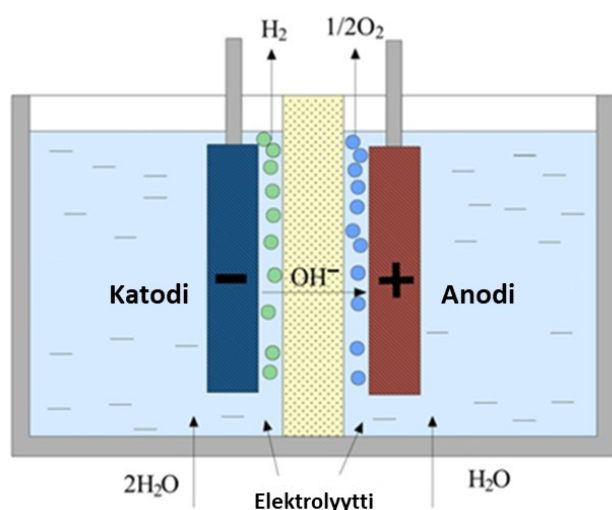
jossa  $\text{H}_2\text{O}$  on vettä,  $\text{H}_2$  vetyä ja  $\text{O}_2$  happea.

Elektrolyysi vaatii paljon sähköä, mikä on tällä hetkellä huomattavin tuotannon kustannuksiin vaikuttava seikka. Hyötysuhde vetyä tuottaessa elektrolyysillä on tänä päivänä 60–70 prosenttia. Prosessissa muodostuva lämpö voidaan kuitenkin hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkoissa, mikä parantaa tuotannon hyö-

tysuhdetta. Vihreän vedyn kustannukset tosin putoavat jatkuvasti elektrolyysilaitteiden lisääntyessä sekä tuuli- ja aurinkovoiman hintojen madaltuessa. Suomessa on myös hyvin saatavilla puhdasta sähköä, sillä maahan on valmistu-  
massa lisää tuulivoimaa ja lisäksi Suomessa on Euroopan alhaisimmat tuotanto-  
kustannukset. (Vartiainen 2020; Kostiainen 2023.)

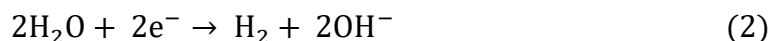
### 3.3.2 AEL-elektrolyysi

Alkalisesta elektrolyysistä käytetään usein lyhennettä AEL, joka tulee sanoista Alkaline Electrolysis. Tämä on vanhin ja yleisimmin käytetty elektrolyysitekniikka, jossa elektrolyysikemmo koostuu kahdesta emäksisessä liuoksessa olevasta elektrodista, eli anodista ja katodista sekä niitä erottavasta kalvosta. Rakennetta havainnollistaa kuvio 3. Elektrolyytinä käytetään tyypillisesti kaliumhydroksidia (KOH), joka saa aikaan liuoksen emäksisyyden. Toinen vaihtoehto on käyttää myös natriumhydroksidia (NaOH), mutta kaliumhydroksidiin verrattuna se on syövyttävämpää ja sillä on huonompi sähkönjohtavuus. Elektrodit on yleensä valmistettu nikkelistä (Ni) tai sen seoksista, kuten nikkeli/rauta, nikkeli/kupari/sinkki jne. Huokoisesta materiaalista, kuten asbestista tai kankaasta valmistettu kalvo päästää ionit kulkemaan lävitseen erottaen vedyn ja hapen toisistaan. (Boudellal 2018, 71–73.)

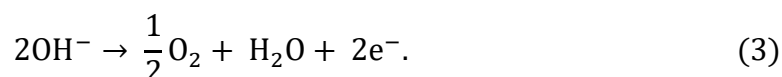


KUVIO 3. AEL- elektrolyysi (Gandia, Arzieguez & Diéguez 2013, 25, muokattu).

Gandian ym. (2013, 25) mukaan AEL-elektrolyserin katodilla tapahtuva kemiallinen reaktio on kaavan 2 mukainen



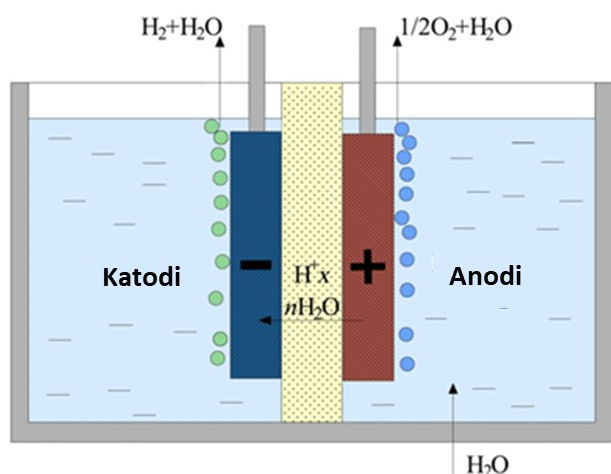
ja anodilla tapahtuva reaktio on esitelty kaavassa 3



AEL-elektrolyserin kokonaisteho lasketaan sähkövirran tiheyden, syöttöjännitteen ja kennojen määrän perusteella. Teollisuuslaitokset ovat useimmiten jatkuvatoimisia ja ne voivat tuottaa jopa 30 000 Nm<sup>3</sup> vetyä tunnissa. Laitteistossa kuuluvia osia ovat kalvot ja elektrodit, jotka on tarkastettava säännöllisesti. Laitoksen käyttöikä vaihtelee riippuen koosta ja toiminnasta. Toiminnalla tarkoitetaan sitä, toimiiko laitos panostoimisesti vai jatkuvatoimisesti. (Boudellal 2018, 78–79.)

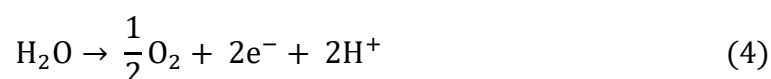
### 3.3.3 PEM-elektrolyysi

Protoninvaihtomembraanielektrolyysistä käytetään lyhennettä PEM, joka tulee sanoista Proton Exchange Membrane. PEM-elektrolyseri koostuu polymeerikalvosta ja sitä ympäröivistä katalyyteistä sekä elektrodeista. Rakennetta havainnollistaa kuvio 4, jossa keltainen osa on edellä mainittu kalvo. PEM-elektrolyysissä ei ole nestemäistä elektrolyyttiä, vaan kalvo, katalyytit ja elektrodit upotetaan veteen ja kalvo toimii tässä tapauksessa elektrolyytinä. Sen paksuus on 100–300 µm ja sen molemmilla puolilla olevat katalyytit koostuvat jalometalleista, kuten platina (Pt) tai iridium (Ir) ja niitä voidaan myös yhdistää muihin metalleihin. Kalvolle tärkeitä ominaisuuksia ovat hyvä johtavuus, alhainen kaasunläpäisevyys, hyvä kemikaalien kestävyys, hyvä terminen ja mekaaninen kestävyys sekä korkea vedenläpäisykyky. (Boudellal 2018, 63, 82, 85–86.)



KUVIO 4. PEM-elektrolyysi (Gandia ym. 2013, 29, muokattu).

Gandian ym. (2013, 29) mukaan PEM-elektrolyysin anodilla tapahtuva kemiallinen reaktio on kaavan 4 mukainen



ja katodilla tapahtuva reaktio on esitelty kaavassa 5

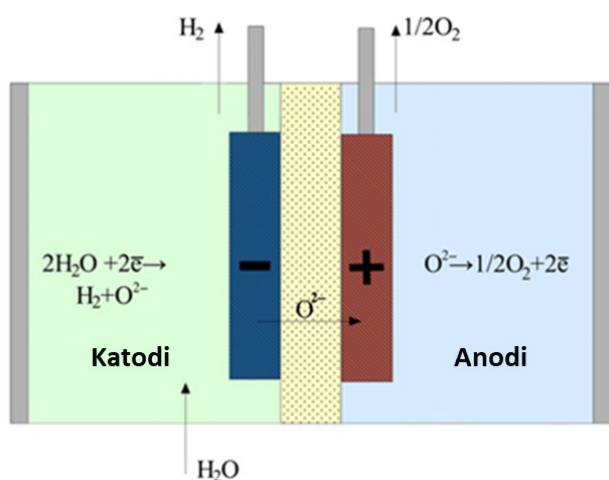


PEM-elektrolyysereillä voidaan tuottaa suurempia määriä vetyä kuin alkalisilla, sillä niitä voidaan käyttää suuremmilla virrantiheyksillä. Virrantiheys on optimoitava niin, että sekä tuotantomäärä että kuluvien osien enimmäisikä olisivat mahdollisimman korkeita. Kuluvia osia ovat kalvot ja katalyytit. PEM-elektrolyysin rakenne on tosin monimutkaisempi ja lisäksi laitteisto on kalliimpi kuin alkalisen elektrolyysin laitteisto. (Boudellal 2018, 86–87.)

### 3.3.4 SOEC-elektrolyysi

Kiinteäoksidi-elektrolyysistä käytetään lyhennettä SOEC, joka tulee sanoista Solid Oxide Electrolyser Cells. Kiinteäoksidi-elektrolyysi on korkean lämpötilan elektrolyysitekniikka (kuvio 5). Käyttölämpötila on satoja asteita ja prosessin edellytyk-

senä on ulkoinen lämmönlähde. Korkea lämpötila mahdollistaa alhaisemman jännitteen AEL- ja PEM-elektrolyyseihiin verrattuna. Elektrolyysin korkea lämpötila vaikuttaa myös laitteiston osien materiaaleihin. Katodi ja anodi on valmistettu metalleista, joilla on prosessin lämpötilaa korkeampi sulamispiste. Esimerkiksi nikkeli ja lantaani. Nämä metallit voidaan myös päällystää yttriumoksidin ja zirkoniumoksidin seoksella. Kiinteäoksidikennoa voidaan käyttää myös polttokennona käyttäen polttoaineena esimerkiksi vetyä tai maakaasua. (Boudellal 2018, 89–91.)



KUVIO 5. SOEC-elektrolyysi (Gandia ym. 2013, 36, muokattu).

Gandian ym. (2013, 36) mukaan katodilla tapahtuva reaktio on kaavan 6 mukainen



ja anodilla tapahtuva reaktio on esitelty kaavassa 7



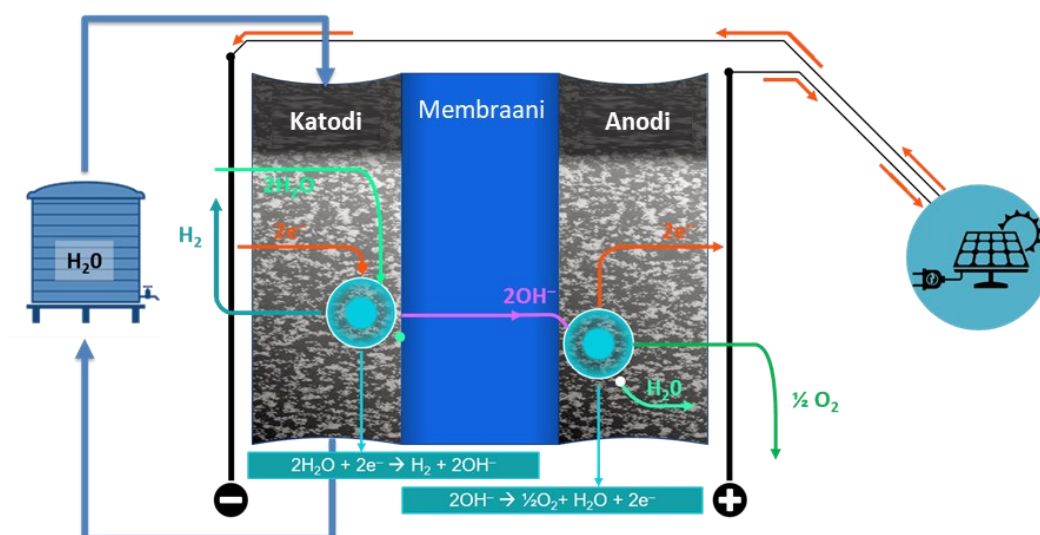
Muihin tekniikoihin verrattuna kiinteäoksidielektrolyysillä on korkein hyötysuhde ja lisäksi se voidaan muuntaa myös polttokennoksi. Toisen teollisen valmistusprosessin yhteydessä toimiessaan elektrolyysin sähköntarve pienenee, jos siinä voidaan hyödyntää toisesta prosessista saatavaa vesihöyryä. Esimerkiksi vuonna 2017 saksalainen elektrolyysilaitteiden valmistaja Sunfire toimitti erään

terästehtaan sulattamolle SOEC-elektrolyyserin, joka pystyi tuottamaan jopa 40 Nm<sup>3</sup> vetyä tunnissa sulattamolta saadun höyryn avulla. (Boudellal 2018, 92.)

### 3.3.5 AEM-elektrolyysi

Anioninvaihtomembraanista käytetään lyhennettä AEM, joka tulee sanoista Anion Exchange Membrane. Tämä on uusi elektrolyysitekniikka, joka on kaupallisena vain muutamalla yrityksellä ja jota on käytössä rajoitetusti. AEM-elektrolyysi on yhdistelmä PEM-elektrolyyserin yksinkertaisuutta ja tehokkuutta, sekä siinä on vähemmän ankarat olosuhteet kuin AEL-elektrolyysissä. AEM-elektrolyyserissä voidaan käyttää ei-jaloja metalleja katalyytteinä sekä titaanivapaita komponentteja. Elektrolyytinä toimii aromaattinen hiilivety divinyylibentseeni. (IRENA 2020, 12.) AEM-elektrolyyseriä voidaan käyttää myös polttokennona energiatuotannossa (Hydrolite 2023).

Kuviossa 6 on esitetty anioninvaihtomembraanielektrolyysin toimintaperiaate ja prosessissa tapahtuvat kemialliset reaktiot. AEM-elektrolyyserissä on muiden tekniikoiden tapaan katodi ja anodi sekä niitä erottava kalvo. Kuviossa näkyy myös katodilla ja anodilla tapahtuvat kemialliset reaktiot.



KUVIO 6. AEM-elektrolyysi (Hydrolite 2023, muokattu).



### 3.3.6 Elektrolyysiteknikoiden vertailu

Taulukkoon 2 on koottu erityyppisten elektrolyysilaitteiden teknisiä tietoja. Taulukosta nähdään laitteistojen käyttölämpötilat (°C) ja -paineet (bar) sekä tekniikassa käytettävä elektrolyytti, laitteiston elinikä tunteina ja kylmäkäynnistyksestä nimellisarvon saavuttamiseen kuluva aika minuutteina. Taulukossa on edellä mainitut tiedot vuodelta 2020 ja vuodelle 2050 asetetut tavoitearvot.

TAULUKKO 2. Laitteistojen teknisten tietojen vertailu (IRENA 2020, 32, 65–66).

Elektrolyyseri	AEL		PEM		SOEC		AEM	
Elektrolyytti	Kaliumhydroksidi (KOH)		Membraani		Yttriumstabiloitu zirkonia		Divinyylibentseeni (C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> )	
Käyttöpaine (bar)	1–30		< 70		1		< 35	
Vuosi	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
Käyttölämpötila (°C)	70–90	> 90	50–80	80	700–850	< 600	40–60	80
Laitteiston elinikä (1000 h)	60	100	50–80	100–120	< 20	80	> 5	100
Kylmäkäynnistys nimellisarvoon (min)	< 50	< 30	< 20	< 5	> 600	< 300	< 20	< 5

Elektrolyysin kaikissa teknologioissa on siis sama yksinkertainen periaate. Kenno koostuu kahdesta elektrodista, joita erottaa elektrolyytti. Elektrolyytin tehtävä on kuljettaa katodeita ja anioneita elektrodista toiseen. Teknologioiden elektrolyytit ja toimintalämpötilat vaikuttavat laitteistojen materiaalien ja komponenttien valintaan. (IRENA 2020, 31–32.)

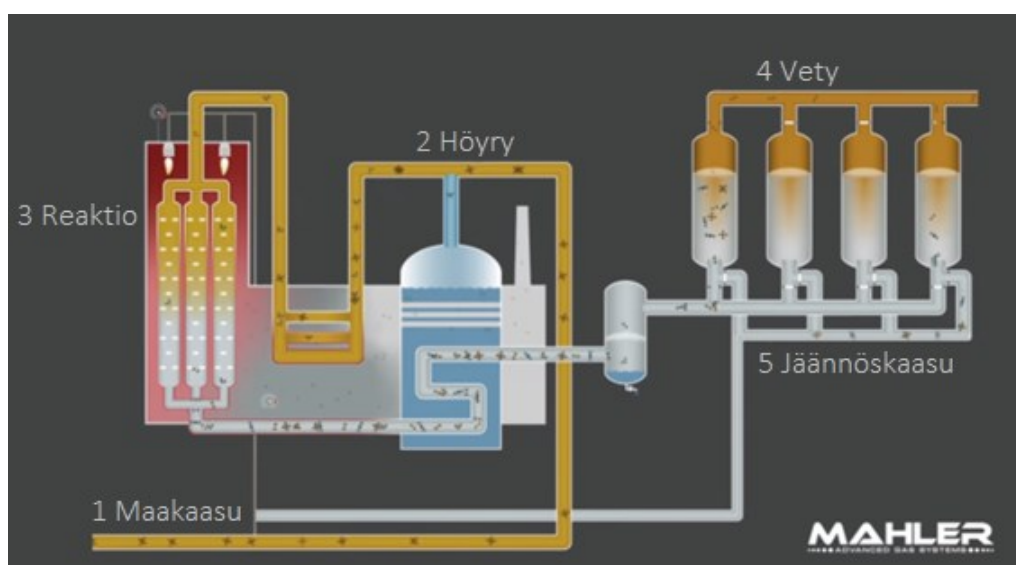
### 3.4 Sininen vety

Siniseksi vedyksi kutsutaan vetyä, joka tuotetaan käyttäen fossiilisia polttoaineita. Valmistustapa on sama kuin harmaalla vedyllä eli maakaasun reformointi. Ero harmaan ja sinisen vedyn valmistuksessa on se, että sinistä vetyä tuotettaessa

syntyvä hiilidioksidi pyritään ottamaan talteen ja varastoimaan. Näin voidaan vähentää tuotannosta aiheutuvia päästöjä ja saadaan tuotannosta hiilineutraali. Hiilidioksidin talteenotto- ja varastointimenetelmästä käytetään usein lyhennettä CCS, joka tulee sanoista Carbon Capture and Storage. CCS-teknologia voidaan ottaa käyttöön myös jo olemassa olevissa tuotantolaitoksissa. (Noussan, Raimondi, Scita & Hafner 2020, 2–3, 6.)

Höyryreformointi on yleisin vedyn tuotantotapa. Höyryreformoinnissa metaanista koostuva maakaasu sekoitetaan kuuman höyryn kanssa ja reaktio aktivoidaan katalyytin avulla. Näin maakaasun sisältämä metaani saadaan pilkottua vedyksi ja hiilidioksidiksi. Lopuksi hiilidioksidi ja vety erotetaan toisistaan. (Motiva 2023.)

Höyryreformoinnin vaiheet on kuvattu tarkemmin kuviossa 7. Kohdassa 1 syötetään raaka-aineena ja reformointiuunin polttoaineena käytettävä maakaasu. Kohdassa 2 syntyy höyryä reaktorin hukkalämmön talteenottoyksikössä, kun prosessissa syntyneet savukaasut ja prosessikaasu jäähdytetään. Kohdassa 3 maakaasu ja höyry reagoivat katalyytin avulla tuottaen vetyä ja hiilidioksidia. Lopuksi kohdassa 4 vety ja hiilidioksidi erotetaan toisistaan adsorptioerotuksella, jolloin saadaan puhdasta vetyä. Kohdassa 5 saadaan jäännöskaasua, joka käytetään uudelleen polttimien polttoaineena. (Mahler AGS GmbH 2019, 0:15–1:17.) Lisäksi sinisen vedyn tuotantoon kuuluu myös aikaisemmin mainittu hiilidioksidin talteenotto- ja varastointijärjestelmä (CCS).



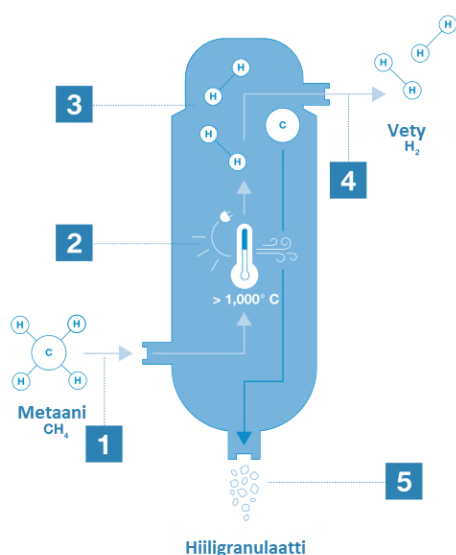
KUVIO 7. Kuvakaappaus höyryreformointiprosessista (Mahler AGS GmbH 2019, 1:24, muokattu).

## 3.5 Turkoosi vety

### 3.5.1 Pyrolyysi

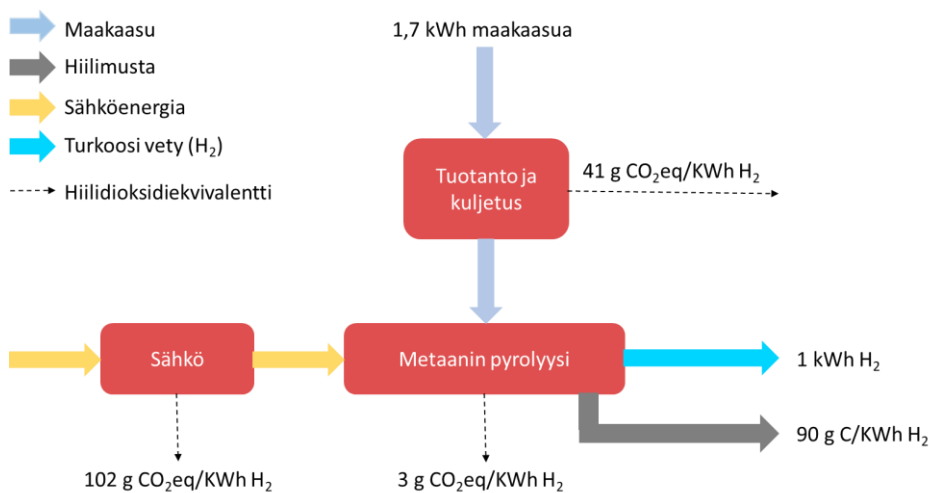
Turkoosi vety valmistetaan pyrolyysillä. Sana pyrolyysi juontaa juurensa muinaisen kreikan kieleen ja se tarkoittaa orgaanisten yhdisteiden termokemiallista hajoamista ilman happea. Prosessi voidaan toteuttaa hiilidioksidivapaana, mikäli metaanin hajottamiseen käytettävän reaktorin lämmitykseen tarvittava sähkö tuotetaan uusiutuvilla energianlähteillä. Turkoosin vedyn tuotannon ainoa sivutuote on hiilimusta, jota voidaan hyödyntää muiden teollisten valmistusprosessien raaka-aineena. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi autonrenkaiden tai teräksen valmistamiseen sekä rakennusteollisuuden materiaalina. Lisäksi hiilimustan erottaminen, kuljetus ja varastointi on helpompaa kuin hiilidioksidikaasun, jota syntyy monissa muissa vedyn tuotantotavoissa. Tuotettaessa 1 kilogramma vetyä saadaan noin 3 kg hiilimustaa. (Hydrogen Europe & DVGW 2022, 5–6, 14, 16–17.)

Pyrolyysissä käytetään raaka-aineena maakaasua, jonka sisältämä metaani viehdään kuvion 8 mukaisesti reaktoriin, jossa se pilkotaan korkean lämpötilan avulla vedyksi ja hiilimustaksi. Vetykaasu poistuu reaktorin yläpäästä ja hiili poistuu granulaaattina reaktorin pohjasta. Pyrolyysin sähköntarve on noin 80 prosenttia pienempi kuin elektrolyysillä. (BASF 2021.) Tuottaakseen saman verran vetyä metaanimolekyyli tarvitsee seitsemän kertaa vähemmän energiaa kuin vesimolekyyli (Hydrogen Europe & DVGW 2022, 18).



KUVIO 8. Metaanin pyrolyysi (BASF 2021, muokattu).

Kuviossa 9 on esitetty erään saksalaisen tuotantolaitoksen pyrolyysin massa- ja energiavirrat sekä vuonna 2020 syntyneet kasvihuonekaasujen määrät hiilidioksidiekvivalenttina. EU:n komission suunnitelmien mukaan kaikkien alojen metaanipäästöjä on vähennettävä 30 prosentilla vuoteen 2030 mennessä. Tavoitteen saavuttamiseksi voitaisiin siirtyä käyttämään tuotannossa ainoastaan uusiutuvia energianlähteitä. Tämä laskisi sähkönkäytöstä aiheutuvien päästöjen määrän nykyisestä 102 grammasta vain 30 grammaan CO<sub>2</sub>eq/KWh vuoteen 2045 mennessä. Tällöin tietysti myös tuotannon kokonaispäästöt pienenisivät. (Hydrogen Europe & DVGW 2022, 13.)



KUVIO 9. Turkoosin vedyn valmistuksen massa- ja energiavirrat sekä kasvihuonekaasujen määrät (Hydrogen Europe & DVGW 2022, 13).

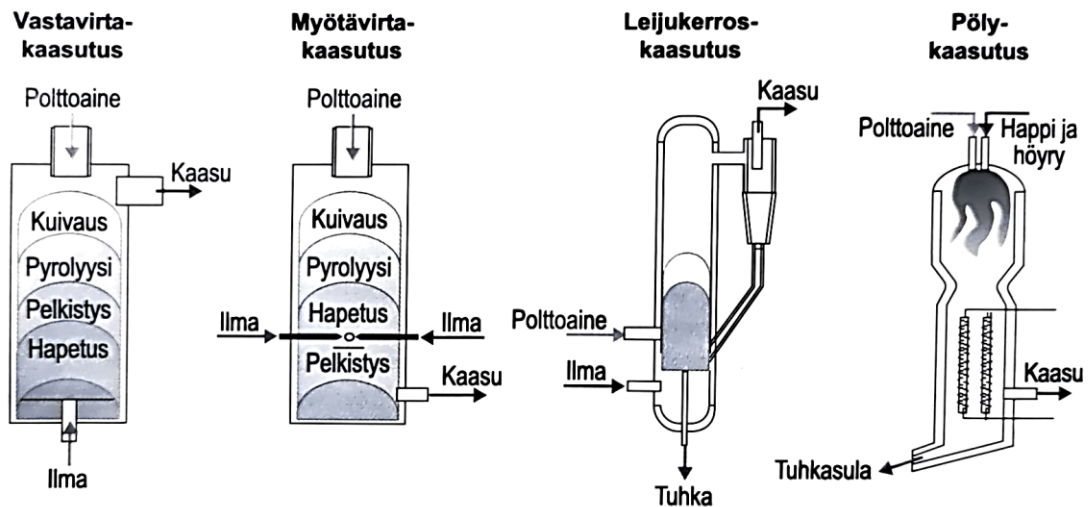
### 3.5.2 Biomassan kaasutus

Kaasutuksessa biomassa muutetaan korkeassa lämpötilassa ilman, hapen, höyryn tai muun hapen kantajan avulla kaasuksi. (Helynen ym. 2004, 244). Kasvaessaan biomassa sitoo hiilidioksidia ilmakehästä, joten kaasutuksen hiilidioksidipäästöt ovat matalat varsinkin, jos prosessissa syntyvä hiili otetaan talteen varastointia ja mahdollista myöhempää käyttöä varten (U.S Department of Energy n.d.).

Biomassan kaasutusprosessi koostuu tyypillisesti 3–4 vaiheesta, jotka ovat kuivaus, pyrolyysi ja/tai palaminen ja kaasutus. Biomassan kosteusprosentti ennen

kaasutusprosessia voi olla yli 90 %. Massan kosteus lisää kaasutuksen energiantarvetta, minkä vuoksi se on kuivattava ennen pyrolyysiä. Kuivatuksen jälkeen kosteuspuitoisuus on 10–20 %. Pyrolyysissä biomassa hajotetaan pienemmiksi kaasumolekyyleiksi. (Basu 2013, 200–203.)

Kaasutusreaktorit jaetaan kolmeen eri tyyppiin (kuvio 10), jotka ovat kiinteäkerroskaasutin (FXBG), leijukerroskaasutin (FBG) ja pölykaasutin (EFG). Kiinteäkerroskaasutin voi toimia joko vasta- tai myötävirtaperiaatteella. Vastavirtakaasutuksessa biomassa syötetään kaasuttimeen ylhäältä ja ilma pohjasta, jolloin ne kulkevat kaasuttimessa vastakkaisiin suuntiin. Myötävirtakaasuttimessa biomassa syötetään prosessiin ylhäältä ja ilma myös ylhäältä tai sivusta, jolloin ne liikkuvat kaasuttimessa samansuuntaisesti. Kiinteäkerroskaasutuksessa polttoainekerros valuu hitaasti alaspäin reaktorissa, ja kaasut taas virtaavat polttoainekerroksen läpi. (Helynen ym. 2004, 245.)



KUVIO 10. Kaasutusreaktiotyypit ja toimintaperiaatteet (Helynen ym. 2004, 246).

Leijukerroskaasuttimessa on polttoainepartikkelien muodostama patja, jota leijutetaan reaktorin pohjasta virtaavalla kaasutusaineella. Tuotettava kaasu poistuu reaktorin yläosasta. Kaasun mukana poistuu myös runsaasti osittain reagoimutta kiintoainesta, jota palautetaan takaisin reaktoriin. Leijukerroskaasutuksen etuna on hyvä sekoittuminen, minkä takia lämmön- ja aineensiirto kaasujen ja polttoainepartikkelien välillä on erinomainen. Tämä aiheuttaa sen, että kaasuttimesta

saadun kaasun lämpötila on vastavirtakaasuttimen lämpötilaa korkeampi. Tuotettavalla kaasulla on tällöin matalampi tervapitoisuus verrattuna vastavirtaperiaatteella toimivaan kaasuttimeen. (Helynen ym. 2004, 245–246.)

Pölykaasutin toimii siten, että reaktorin polttimeen syötetään kaasutusainetta ja hienoksi jauhettua polttoainetta, joko veteen lietettynä tai kuivana. Pölykaasutuksessa on korkea lämpötila ja tuhka saadaan poistettua prosessista sulana. Kaasutuslämpötila riippuu polttoaineen reaktiivisuudesta ja tuhkan sulamispisteestä. Yleinen polttoaine pölykaasutuksessa on kivihiili ja tällöin lämpötila on yleensä 1300–1700 °C. (Helynen ym. 2004, 246.)

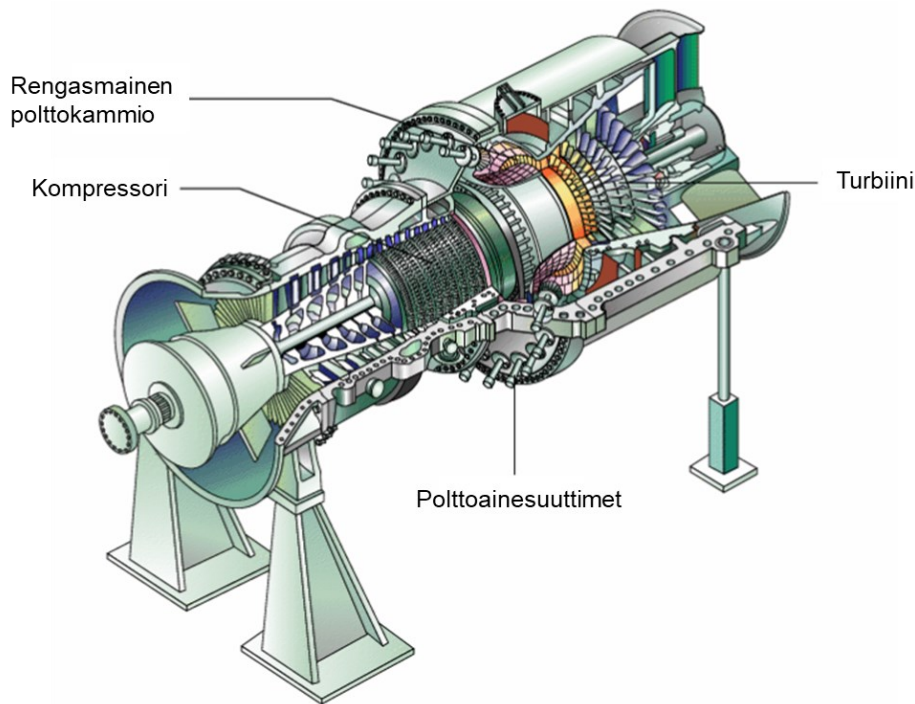
## 4 KAASUTURBIININ JA POLTTOKENNON TOIMINTA

### 4.1 Kaasuturbiini

#### 4.1.1 Kaasuturbiinien historia, perusajatus ja jaottelu

Kaasuturbiini on voimakone, jonka tehtävä on tuottaa energiaa (Kauppinen 2018, 219). Kaasuturbiinien historia ulottuu vuoteen 1791, jolloin englantilainen John Barber patentoi ensimmäisen kaasuturbiinin. Ensimmäinen nettotehoinen kaasuturbiini rakennettiin vasta 1903. Se kykeni tuottamaan 8,2 kilowatin tehon. Lentokoneissa ja sotilasaluksissa kaasuturbiineita otettiin käyttöön toisen maailmansodan jälkeen, ja ensimmäinen kaasuturbiinivoimalaitos perustettiin Sveitsiin vuonna 1939. (Huhtinen ym. 2008, 204.)

Ensimmäisen jatkuvatoimisen polttomoottorin kehitti George Brayton. Sen suunnittelussa käytettiin termodynaamisia prosesseja, joita nykypäivänä kutsutaan Brayton-sykleiksi. Brayton-sykli on termodynaaminen sykli, joka kuvaa kaasuturbiinin toimintaa. Kuvio 11 havainnollistaa kaasuturbiinin rakennetta. Perusajatus on se, että polttoaineen ja paineistetun ilman seoksen palamisesta syntyvää energiaa hyödynnetään turbiinin pyörittämiseen. Pyörivää liikettä voidaan käyttää esimerkiksi ajoneuvojen voimanlähteenä antamaan niille työntövoimaa. John Barberkin käytti kaasuturbiinissaan Brayton-sykliä, vaikkakaan sitä ei ollut vielä tuolloin keksitty. Barberin keksinnöllä on edelleen suuri merkitys, vaikka 1700-luvulla teknologia ei ollut vielä tarpeeksi kehittynyttä, eikä kaasuturbiinin energia riittänyt paineistamaan kaasuja ja tuottamaan tarpeeksi voimaa samanaikaisesti. (Nguyen n.d.)



KUVIO 11. Rengasmaisen Siemens V94.2 -kaasuturbiinin rakenne (Boyce 2012, 27, muokattu).

Kaasuturbiinin osat ovat koetuksella korkeiden lämpötilojen takia. Lämpötila ja lämmönvaihtelut aiheuttavat vikoja ja vaurioita eniten polttokammiossa ja turbiinin alkupäässä. Osien elinikään ja kunnossapidon kustannuksiin vaikuttaa merkittävimmin käytettävä polttoaine, käynnistystiheys, kuorman vaihtelu ja käyttötapa, ympäristö, käynnistysnopeus, pikasulut ja kunnossapidon taso. (Kauppinen 2018, 226.)

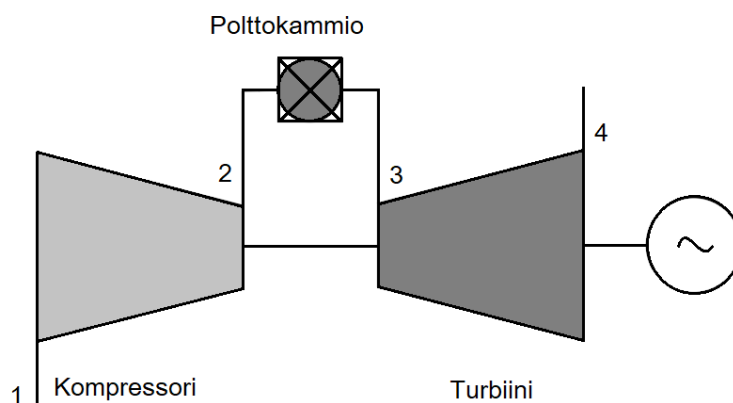
Kaasuturbiineja käytetään muun muassa sähköntuotannossa, petrokemianteollisuudessa sekä lentokoneissa, laivoissa, junissa ja panssarivaunuissa. Kaasuturbiinit jaotellaan tehon ja toimintaperiaatteen mukaan kuuteen kategoriaan, jotka ovat

- raskasrunkoiset kaasuturbiinit
- ilmailujohdannaiset kaasuturbiinit
- teollisuuskaasuturbiinit
- pienikokoiset kaasuturbiinit
- ajoneuvokaasuturbiinit
- kaasuturbiiniveturit. (Kauppinen 2018, 223.)



#### 4.1.2 Kaasuturbiiniprosessi

Kaasuturbiinin pääosat ovat kompressori, polttokammio ja turbiini. Kuviossa 12 esitetään **avoin kaasuturbiiniprosessi**. Siinä kompressoriin tuodaan ilmaa (kohta 1), jonka painetta ja virtausnopeutta kasvatetaan, minkä jälkeen ilma kulkeutuu polttokammioon (2). Polttokammiossa ilmaan sekoitetaan polttoainetta, esimerkiksi vetyä, joka sytytetään. Tällöin syntyy lämpöä ja savukaasuja. Muodostuneet savukaasut viedään turbiiniin (3), missä ne laajenevat ja saavat turbiinin pyörimään. Prosessissa syntyneet pakokaasut poistuvat turbiinista kohdassa 4. Turbiinista poistuvien pakokaasujen lämpötila on yleensä vähintään 450 °C. Lämpöä voidaan ottaa talteen lämmöntalteenottokattilassa, josta saadaan höyryä tai vettä, joita voidaan hyödyntää edelleen muissa teollisuusprosessien tarpeissa. (Huhtinen ym. 2008, 204–205, 208.)



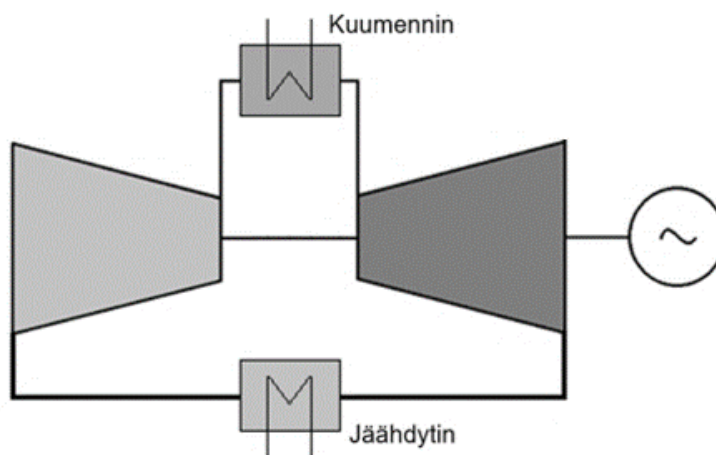
KUVIO 12. Avoin kaasuturbiiniprosessi (Huhtinen ym. 2008, 204).

Taulukossa 3 on esitetty kaasuturbiiniprosessin tyypillisiä arvoja. Näiden arvojen avulla voidaan tarvittaessa laskea prosessin hyötysuhde. Taulukossa mainitut pisteet viittaavat kuvioon 12. Helysen ym. (2004, 254) mukaan kaasuturbiinin hyötysuhde sähköntuotannossa on tyypillisesti 25–35 %. Kauppisen (2018, 219) mukaan kaasuturbiinien kehittyessä kompressorien paineluokkaa on nostettu, jolloin hyötysuhde on saatu nostettua parhaimmillaan 40 prosenttiin. Käyttöikä puolestaan on esimerkiksi Siemens SGT-800 kaasuturbiinilla 60 000 tuntia. Kyseisen kaasuturbiinin teho on 45–62 megawattia. (Siemens Energy n.d.)

TAULUKKO 3. Prosessin tyypillisiä arvoja (Huhtinen ym. 2008, 206).

Piste	Lämpötila $T$ (°C)	Paine $p$ (kPa)	Ominaisentalpia $h$ (kJ/kg)
1	10	100	10
2	400	1500	430
3	1200	1500	1380
4	600	100	650

**Suljetussa kaasuturbiiniprosessissa** (kuvio 13) on suljettu järjestelmä, jossa ilma kiertää jatkuvasti eikä poistu prosessista missään vaiheessa. Se on avoimeen prosessiin verrattuna monimutkaisempi ja kalliimpi. Laitteistossa on kuumennin, joka tuo lämmön järjestelmään. Suljetussa järjestelmässä pakokaasut eivät kulje turbiinin läpi, jolloin turbiini ei pääse likaantumaan. Siksi siinä voidaan hyödyntää myös kiinteitä polttoaineita. (Huhtinen ym. 2008, 207.)



KUVIO 13. Suljettu kaasuturbiiniprosessi (Huhtinen ym. 2008, 207).

**Moniakselisessa kaasuturbiiniprosessissa** voimaturbiini ja kompressoria käyttävä turbiiniosa ovat eri akseleilla, jolloin kompressoria pyörittävä turbiiniosa ei ole riippuvainen voimaturbiinin nopeudesta. Näin saadaan aikaan korkeampi hyötysuhde yksiakselisiin kaasuturbiineihin verrattuna. Voimaturbiinin antamaa tehoa voidaan parantaa käyttämällä ilmalle useita puristusvaiheita, joiden välillä ilmaa jäähdytetään. Jäähdytys saa ilmatilavuuden pienenemään, jolloin korkeapainekompressori käsittelee pienempää tilavuutta ja ottaa turbiinilta vähemmän tehoa. Kaasuvirtaan jää tällöin enemmän mekaanista työtä luovutettavaksi voimaturbiinille. (Huhtinen ym. 2008, 207.)

### 4.1.3 Kompressorit

Kompressorin tehtävä on paineistaa kaasuturbiiniin syötettävä ilma. Ilman puristamiseen käytetään jatkuvatoimista aksiaali- tai keskipakovirtauskompressoria. Yli 5 MW:n kaasuturbiinien kompressorit ovat pääasiassa aksiaalisia. **Aksiaalivirtauskompressorissa** on roottori, jossa on pyöriviä siivekkeitä tai teriä, jotka kiihdyttävät ilmaa sekä staattori, jossa on paikallaan olevia teriä, jotka saavat ilman leviämään kompressorissa. Tämä aiheuttaa ilman paineen nousun. Aksiaalisessa kompressorissa on useita vaiheita, joista jokainen nostaa ilman painetta hieman. (Boyce 2012, 51–54.)

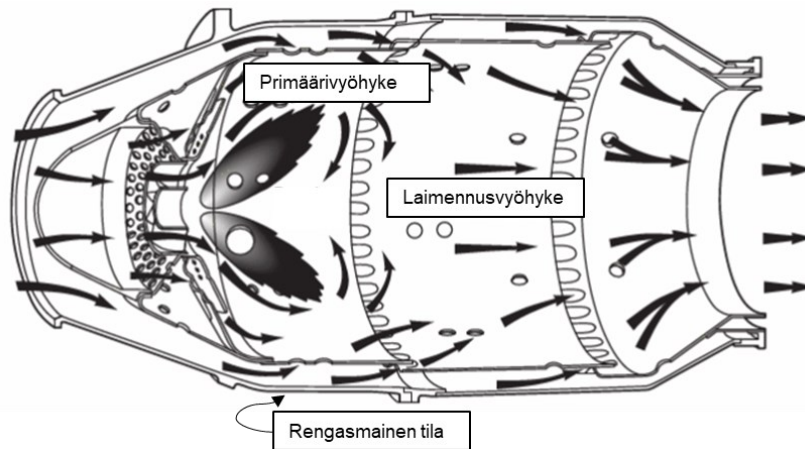
**Keskipakokompressoreja**, toiselta nimeltään **radiaalikompressoreja** käytetään pienemmän kokoluokan kaasuturbiineissa muun muassa petrokemianteollisuudessa. Keskipakokompressorin toiminta perustuu siihen, että ilma kulkee juoksupyörän keskiosan läpi, jolloin sen pyörivä liike kasvattaa ilman nopeutta, mikä saa ilman paineen nousemaan. Ilma kulkeutuu kompressorin aksiaalisuunnassa ja siirtyy juoksupyörästä diffuusoriin säteittäisessä suunnassa. Diffuusorilla ilman kineettinen energia muuttuu paine-energiaksi. Keskipakokompressorit ovat sujuvatoimisia ja niillä on muihin kompressoreihin verrattuna suurempi prosessivaihteluiden sietokyky ja parempi luotettavuus. (Boyce 2012, 55–56.)

### 4.1.4 Polttokammio

Polttokammiossa kompressorin paineistama ilma ja käytettävän polttoaineen seos sytytetään palamaan ja siitä aiheutuvat palokaasut ohjataan eteenpäin turbiinille. Polttokammio voi olla putkimainen, rengasmainen tai niiden yhdistelmä. Polttokammion tyyppi valitaan kaasuturbiinin yleisen rakenteen sekä käytettävissä olevan tilan perusteella. (Kauppinen 2018, 221.)

Polttokammioon syötettävä ilma jakautuu kolmeen alueeseen (kuvio 14): Primäärivyöhyke, laimennusvyöhyke ja rengasmainen tila kotelon ja vuorauksen välillä. Poltto tapahtuu kammion primäärivyöhykkeellä. Ihanteellisessa poltossa kaikki

polttoaine saadaan käytettyä, joten laimennusvyöhykkeen tehtävänä on ainoastaan sekoittaa palamisesta jäljelle jäänyt ilma laimennusilmaan ja syöttää seos sopivassa lämpötilassa turbiinille. (Boyce 2012, 61, 64.)



KUVIO 14. Kaasuturbiinin polttokammion rakenne (Boyce 2012, 64).

Polttokammioon syötettävän ilman sisääntulolämpötilaan vaikuttaa moottorin painesuhde, kaasuturbiinin tyyppi, käytetty kuorma ja se, onko käytössä regeneraattori. Sisääntulolämpötila vaihtelee 370–650 °C:een välillä. Polttokammion palamislämpötila on 1800–1920 °C:een välillä. (Kauppinen 2018, 221.) Polttokammion suorituskykyä mitataan tehokkuudella, paineen alenemisella ja ulostulon lämpötilaprofiilin tasaisuudella. Polttoaineen palamiseen vaikuttaa sen lämpöarvo. Lämpöarvolla ilmaistaan polttoaineen täydellisessä palamisessa syntyvä lämpömäärä polttoaineen massaa kohden. (Boyce 2012, 61.) Huhtisen ym. (2008, 292) mukaan ”vedyn lämpöarvo on 120 MJ/kg, joka on noin kolme kertaa suurempi kuin kevyellä tai raskaalla polttoöljyllä. Vedyn alhaisesta tiheydestä (0,083 kg/m<sup>3</sup>) johtuen tilavuusyksikköä kohti laskettu lämpöarvo on vain n. 10 MJ/m<sup>3</sup>, kun se maakaasulla on 36 MJ/m<sup>3</sup>.”

Kaasuturbiinin polttokammiossa syntyy monenlaisia päästöjä, kuten savua, palamatta jääneitä hiilivetyjä (CH<sub>x</sub>), hiilimonoksidia (CO), hiilidioksidia ja typpioksideja (NO<sub>x</sub>). Savua muodostuu etenkin kaasuturbiinin käynnistyksessä. Palamatta jääneitä hiilivetyjä ja hiilimonoksidia muodostuu joutokäynnillä epätäydellisessä palamisessa. Typen oksidit ovat merkittävimpiä päästöjä nykyisissä kaasuturbiineissa. Kaasuturbiinin hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää tehokkuutta kasvatamalla, eli toisin sanoen käyttämällä pienempi määrä polttoainetta tuotettua te-

hoa kohti. (Boyce 2012, 62.) Mikäli polttoaineena käytetään päästöttömästi tuotettua vetyä tai siitä jalostettuja tuotteita, ei palamisessa synny lainkaan hiilidioksidipäästöjä (Tervola 2023b).

Polttoaineena voidaan käyttää nestemäisiä tai kaasumaisia aineita. Nestemäisiä polttoaineita on esimerkiksi bensiini, dieselöljy ja raskas polttoöljy. Mikäli raskaita polttoaineita, kuten polttoöljyä käytetään esikäsittelemättä, se aiheuttaa turbiinille korroosiota ja likaantumista. Lisäksi polttoaineella on oltava sopiva lämpötila, jotta sen viskositeetti pysyy oikeana. Kaasumaisia polttoaineita voivat olla esimerkiksi maakaasu, nestekaasu ja vety. Kaasumaiset polttoaineet ovat yleensä puhtaita eivätkä siten aiheuta ongelmia prosessissa. (Huhtinen ym. 2008, 220.)

Palamisen hyötysuhde saadaan pidettyä korkeana säätämällä palamisreaktio mahdollisimman tasaiseksi, jolloin saavutetaan paras mahdollinen lopputulos. Ilman ja polttoaineen suhde on siis pidettävä stabiilina pitämällä ilma/polttoainesuhde rikkaan seoksen rajan ja laihan seoksen rajan välissä. Rikkaassa seoksessa polttoainetta on liikaa suhteessa ilmaan. Laihassa seoksessa taas tilanne on päinvastainen, eli ilmaa on liikaa suhteessa polttoaineeseen. Suuremmalla polttokammion tilavuudella saavutetaan helpommin pieni paineen lasku, hyvä savukaasujen lämpöjakauma, stabiilisuus ja korkea hyötysuhde. (Kauppinen 2018, 221–222.)

#### **4.1.5 Sovelluksen esittely**

Finno Exergy Oy on kehittänyt PGC-tekniikan, joka mahdollistaa kahdenkymmenen prosentin polttoainesäästön sekä kaksikymmentä prosenttia pienemmät hiilidioksidipäästöt tavanomaiseen kaasuturbiiniin verrattuna. PGC tulee englannin kielen sanoista Pressure Gain Combustion. Tekniikka perustuu paineistetun polttoon, jossa kaasuturbiinin polttoa tehostetaan paineen ja pulssituksen avulla. Paineistettu poltto voidaan ottaa käyttöön vaihtamalla turbiinin olemassa oleva polttokammio Finno Exergy Oy:n kehittämään polttokammioon. Siinä on mahdollista käyttää polttoaineena vetyä, maakaasua ja kaikkia niiden sekoituksia. Lisäksi polttoaine pystytään tarvittaessa vaihtamaan toiseen portaattomasti turbiinin käydessä. Vedyn hyödyntäminen mahdollistuu siis esimerkiksi sähkön

ja lämmön tuotannossa sekä muilla teollisuuden aloilla, joilla päästöjen vähentäminen on haastavaa. (Finno Exergy Oy 2020.)

Tavanomaisessa kaasuturbiinissa käytetään termodynaamista ja jatkuvaa Brayton-sykliä, joka aiheuttaa painehäviötä polttokammiossa. Perinteisen kaasuturbiinin paine laskee polttotapahtuman edetessä, kun taas pulssittainen palaminen saa aikaan paineen nousua polttokammion jälkeen. Poltossa voidaan myös hetkellisesti käyttää korkeampia lämpötiloja turbiinin komponentteja vaurioittamatta, sillä lämpötilan nousu ei ole jatkuva. Kaksivaiheisessa polttotapahtumassa ei synny haitallisia NO<sub>x</sub>-yhdisteitä. (Tervola 2021.)

Teknologiaa on kehitetty yli kymmenen vuoden ajan ja ensimmäinen testilaitteisto tehtiin vuonna 2016. Testilaitteisto rakennettiin polttomoottorien osista, ja sen rakenne oli nykyistä laitteistoa monimutkaisempi. Nykyisen testilaitteiston rakentamiselle ja tehdyille testeille saatiin rahoitus Shelliltä ja Business Finlandilta. Laitteistolla suoritettiin noin 600 testiä. Testien avulla on voitu todeta turbiinin toimivuus maakaasulla ja vedyllä sekä niiden kaikilla sekoituksilla. (Tervola 2023a.)

Nykyisen testilaitteiston ahdin on korvattu paineilmasyötöllä ja turbiini kammion jälkeisellä kuristuksella. Testilaitteiston yhteydessä on mittauslaitteisto, jolla voidaan tarkkailla olosuhteita ja määrittää ne turbiinin olosuhteita vastaaviksi. Testilaitteistossa on kaksiosainen polttokammio, joista toinen kammio täydentää palamisen. Kammioon ohjattavien imu- ja huuhteluilman syöttöä ohjataan venttiileillä. Kun venttiilit sulkeutuvat, ilman ja polttoaineen seos sytytetään kipinällä. Kammioon johdetaan huuhteluilmaa paineen laskiessa. Tämän jälkeen sykli alkaa alusta. Testeissä syklejä ajettiin tyypillisesti 15–20 Hertzin taajuudella. (Kiuainen 2023.)

Yrityksen tavoitteena on tehdä seuraavaksi polttokammion testilaitteistosta megawattiluokan versio, jolla kaasuturbiinivalmistajat voisivat tehdä testejä aluksi pienikokoisemmissa turbiineissa. Myöhemmin polttokammio voitaisiin ottaa käyttöön suuremmissa turbiineissa, joissa polttokammioita on useita. Yritys neuvotelee parhaillaan kaasuturbiinivalmistajien kanssa. Ensimmäinen tuote olisi valmis jo vuonna 2024 ja suurempia kaasuturbiineja alettaisiin tuottaa sarjatuotantona 2026–2027. (Tervola 2023a.)

#### 4.1.6 Turbiini

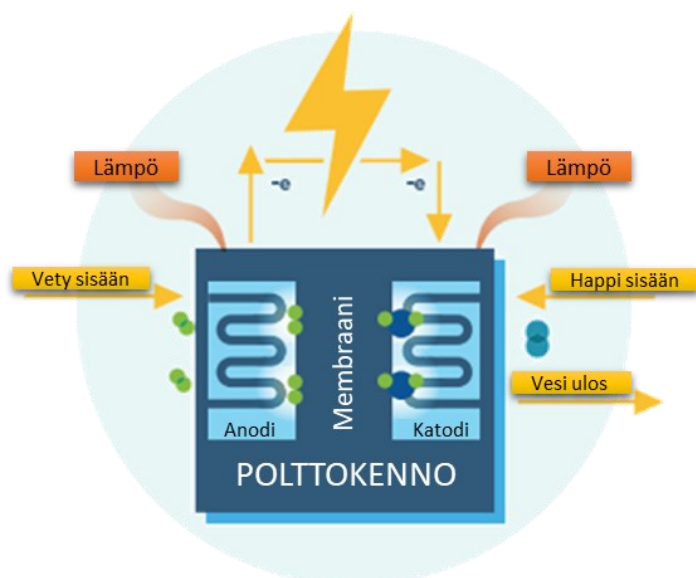
Turbiinin tehtävä on tuottaa poltossa muodostuneista savukaasuista hyötytehoa ja kaasuturbiinin käyttöön tarvittavaa tehoa. Turbiiniin johdetun kaasun virtausnopeus saa turbiinin siivet pyörimään. Siivistössä myös kaasun paine ja lämpötila laskevat ja paineen laskiessa kaasun ominaistilavuus kasvaa. Polttokammioista turbiiniin tulevat savukaasut ovat 800–1700 °C lämpötilassa. Korkean lämpötilan takia turbiinin siipien materiaalin tulee olla lämmönkestävää. Turbiinin lämpötilat saadaan pidettyä kohtuullisina jäähdyttämällä siipiä kompressorilta turbiinin alkupäähän johdettavan ilman avulla. Näin myöskään turbiinin rungon lämpötila ei nouse kovin suureksi. (Huhtinen ym. 2008, 204–205, 218; Kauppinen 2018, 222.)

Kaasuturbiineissa käytetään kahdenlaisia turbiineja, radiaalisia ja aksiaalisia. Radiaalisia turbiineja käytetään pienemmän mittakaavan kaasuturbiineissa ja aksiaalisia turbiineja on käytössä esimerkiksi lentokoneteollisuudessa. 95 % kaasuturbiineiden turbiineista on aksiaalisia. (Boyce 2012. 76–77.)

#### 4.2 Polttokenno

Polttokennolla muutetaan polttoaineen kemiallinen energia sähköksi. Toiminta perustuu kaasun ja hapen väliseen pelkistymis-hapettumisreaktioon, joka saa aikaan elektronien vapautumisen. Polttokennossa ei siis tapahdu polttoprosessia. Vedyn käytöstä polttokennon polttoaineena ei suoraan synny haitallisia päästöjä, vaan ympäristövaikutukset riippuvat vedyn tuotantotavasta. (Fuel Cell & Hydrogen Energy Association n.d.a.)

Kennossa (kuvio 15) on positiivisesti varautunut elektrodi, eli anodi ja negatiivisesti varautunut elektrodi, eli katodi. Happi kulkeutuu katodille ja vety anodille. Vety molekyyli hajoaa anodilla protoneiksi ja elektroneiksi. Elektronit kulkevat virtapiiriin läpi, mikä saa aikaan jännitteen elektrodien välille. Tällöin polttokennossa syntyy sähkövirtaa ja sivutuotteena lämpöä ja vettä. (Fuel Cell & Hydrogen Energy Association n.d.a.)



KUVIO 15. Polttokennon toimintaperiaate (Fuel Cell & Hydrogen Energy Association n.d.a, muokattu).

Polttokennoilla on hyvä hyötysuhde ja niitä voidaan myös liittää toisiinsa, jolloin saadaan aikaan suurempia järjestelmiä. Polttokennoilla voidaan tuottaa sähköä eri kokoisille rakennuksille, kuten kotitalouksille, sairaaloille ja päivittäistavara-kaupoille. Lisäksi niitä voidaan käyttää liikenteessä erilaisten ajoneuvojen, kuten autojen, junien, linja-autojen ja kuorma-autojen energianlähteenä. Yleisimmin käytetty polttokennotyyppi on PEM-polttokenno. Sen hyötysuhde on 40–60 %. (Fuel Cell & Hydrogen Energy Association n.d.a.)

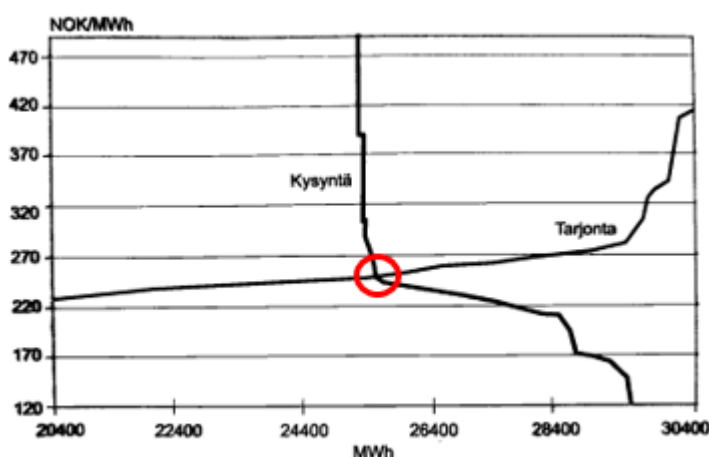
Polttokennoihin liittyy myös haasteita. Polttokennojärjestelmien hinnat ovat korkeita ja niiden kestävyys on heikko. Esimerkiksi fosforihappopolttokennon (PAFC) arvioitu käyttöaika on noin 40 000 tuntia ja sulakarbonaattipolttokennon (MCFC) käyttöaika vain 20 000 tuntia. Man ym. (2021, 3) mukaan PEM-polttokennon (PEMFC) käyttöaika voi olla yli 20 000 tuntia. Polttokennon käyttö on myös haasteellista silloin, kun laitteistolle on rajallinen määrä tilaa. Kenno nimitäin tarvitsee ohjausjärjestelmän prosessinohjausta ja valvontaa varten sekä joukon muita apulaitteita toimiakseen. (Helynen ym. 2004, 277–278.)



## 5 TUULISÄHKÖ

### 5.1 Hinnanmuodostus

Pohjoismaissa on yhteinen sähkömarkkina-alue, johon kuuluu Suomi, Ruotsi, Norja ja Tanska. Markkina-alueella on vapaa kilpailu ja sen tarkoituksena on tehostaa markkinoiden toimintaa. Lisäksi sähköä voidaan tuottaa aina kulloinkin edullisimmalla tavalla. Markkina-alue jakautuu tarjousalueisiin, joista muodostetaan erillisiä hinta-alueita. Sähkön aluehintaa muodostuu pohjoismaisen sähköpörssin Nord Poolin spot-markkinoilla ja siihen vaikuttaa kysynnän ja tarjonnan määrä. Hinta muodostuu kysynnän ja tarjonnan käyrien leikkauspisteessä, mikä on ympyröity punaisella värillä kuvioon 16. (Ruska ja Piri 2004, 194–198.)



KUVIO 16. Sähkön hinnanmuodostus (Ruska ja Piri 2004, 199, muokattu).

Hinta määräytyy erikseen vuorokauden jokaiselle tunnille. Kun kulutus on pientä, sähkö voidaan tuottaa pääsääntöisesti perusvoimalaitoksissa alhaisilla kustannuksilla. Lisääntyvien kulutusmäärien kattamiseksi on otettava käyttöön muita voimalaitoksia, jolloin sähkön hinta nousee. Hinta voi tosin olla korkea myös silloin, kun kulutus on vähäistä. Lisäksi hintaan vaikuttaa tuonnin ja viennin määrä naapurimaiden välillä. (Fingrid n.d.b.) Tyynellä säällä ei tuoteta lainkaan tuulivoimaa, sillä tuulivoimalaitoksen käynnistämiseen tarvittava tuulen nopeus on 3–5 metriä sekunnissa. Tuulivoimalaitoksia ei myöskään pidetä käynnissä tuulen nopeuden ollessa yli 25 m/s, jotta estetään voimalan rikkoutuminen ja ylisuuret tehot. (Helynen ym. 2004, 270.)

## 5.2 Tuulivoiman tuotantokapasiteetti

Tuulisähkön tuotantokapasiteetti on Suomessa jatkuvassa kasvussa, mikä lisää puhtaasti tuotetun sähkön osuutta ja Suomen energiaomavaraisuutta. Kapasiteetin lisääminen siis vähentää maamme riippuvuutta tuontienergiasta. (Fingrid n.d.b.) Taulukossa 4 on vuosina 2020–2022 rakennettujen tuulivoimaloiden määrät sekä niiden tuotantokapasiteetit ja kapasiteetin kasvu prosentteina edellisvuoteen verrattuna. Suurin osa vuonna 2022 rakennetuista voimaloista otettiin käyttöön vasta vuoden lopussa, joten tuotantomäärät näkyvät vasta vuoden 2023 tilastoissa (Tuulivoimayhdistys 2023a). Vuoden 2023 syyskuun loppuun mennessä Suomeen oli rakennettu 1508 tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu tuotantokapasiteetti on 6351 megawattia (Tuulivoimayhdistys 2023b).

TAULUKKO 4. Tuulivoimatuotannon kapasiteetti vuosina 2020–2022 (Tuulivoimayhdistys 2021, 2022, 2023a).

Vuosi	Rakennetut tuulivoimalat (kpl)	Tuotantokapasiteetti (MW)	Tuotantokapasiteetin kasvu (%)
2020	67	302	32
2021	141	671	26
2022	437	2430	75

Vuonna 2022 Suomen sähkönkulutuksesta 14 % katettiin tuulisähköllä. Tuulivoimayhdistys arvioi, että vuonna 2026 tuulisähköllä tuotetaan kolmannes sähkönkulutuksesta ja vuoteen 2030 mennessä luku nousisi jo yli 50 prosenttiin. Tuulisähkön tuotantokapasiteetin kasvulla mahdollistetaan Suomeen mittavia teollisia investointeja ja uusia työpaikkoja. (Tuulivoimayhdistys 2023b.)

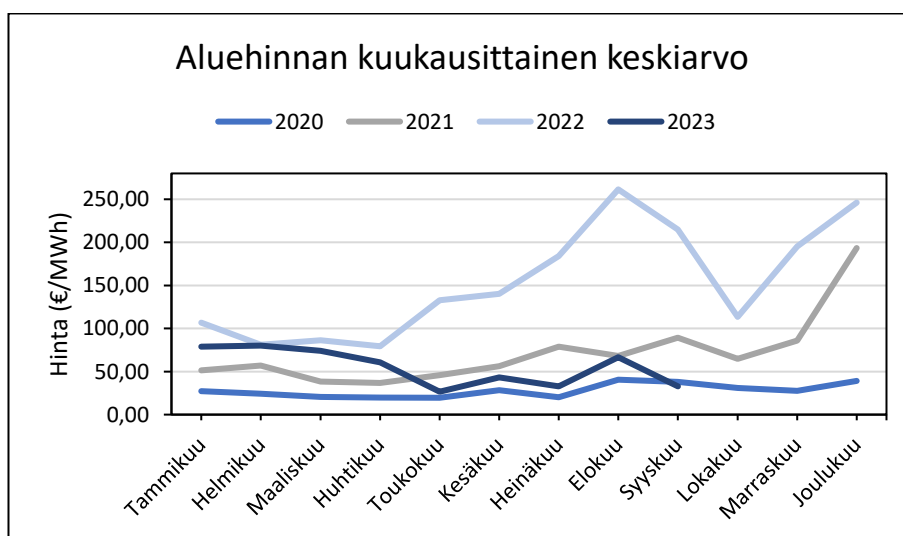
Tuulivoiman kannattavuus huononee kapasiteetin lisääntyessä, sillä kun tarjontaa on paljon, niin hinta laskee. Tällöin tuottajien saama hinta ei ole yhtä korkea kuin tuotannon ollessa vähäisempää. Tuulivoiman lisääntyminen on myös kasvattanut sähkön hinnan vaihteluja. (Ilmatieteen laitos 2023.)

## 6 LASKELMAT

### 6.1 Tuulisähkölaskelmat

Tässä kappaleessa esitellään tuulisähkön tuotantomäärä ja tuulisähkön myynnistä saatu hinta vuosille 2020–2022 sekä vuodelle 2023 syyskuun loppuun saakka. Laskemista varten kerättiin dataa tuulivoiman toteutuneista tuotantomääristä tunneittain sekä sähkön aluehinnat Suomessa tunneittain valituilta vuosilta. Tuulivoiman tuotantomäärät saatiin Fingridiltä ja aluehinnat Nord Poolilta. Näiden tietojen avulla saatiin laskettua tuulisähkön arvo (€) kertomalla toteutunut tuotantomäärä (MWh) aluehinnalla (€/MWh). Liitteenä 1 on vuoden 2023 laskuista tehdyn laskentataulukon 30 ensimmäistä riviä, joista voidaan nähdä, miten laskemiseen tarvittavat tiedot on taulukoitu.

Aineiston perusteella laskettiin myös keskimääräinen tuotantomäärä, tuntihinta ja näiden avulla toteutunut arvo sekä tuulisähkön myynnistä saatu keskimääräinen hinta kuukausittain ja vuosittain. Myynnistä saatu hinta (€/MWh) laskettiin jakamalla arvo (€) kuukauden yhteenlasketulla tuotantomäärällä (MWh). Lisäksi jokaiselle vuodelle laskettiin korrelaatiokerroin Excelin korrelaatiofunktioilla. Korrelaation avulla voidaan tarkastella tuotantomäärien ja hintojen välistä yhteyttä. Kuvioista 17 nähdään valittujen vuosien keskimääräiset aluehinnat kuukausittain. Hinta on selvästi ollut korkein vuonna 2022 ja alhaisin vuonna 2020.



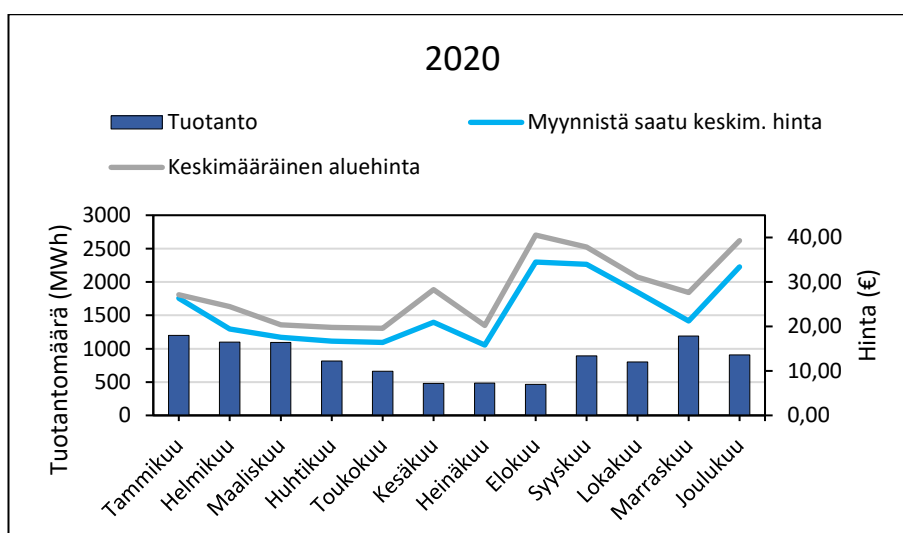
KUVIO 17. Keskihinta kuukausittain vuosina 2020–2023 (Nord Pool 2023).

Kuviossa 18 on Suomen tuulivoiman vuosittainen tuotantokapasiteetti megawatteina ja laskennallinen keskimääräinen aluehinta euroina. Kuvioista voidaan havaita tuotantokapasiteetin lisääntyminen ja huomattavat hinnan muutokset.



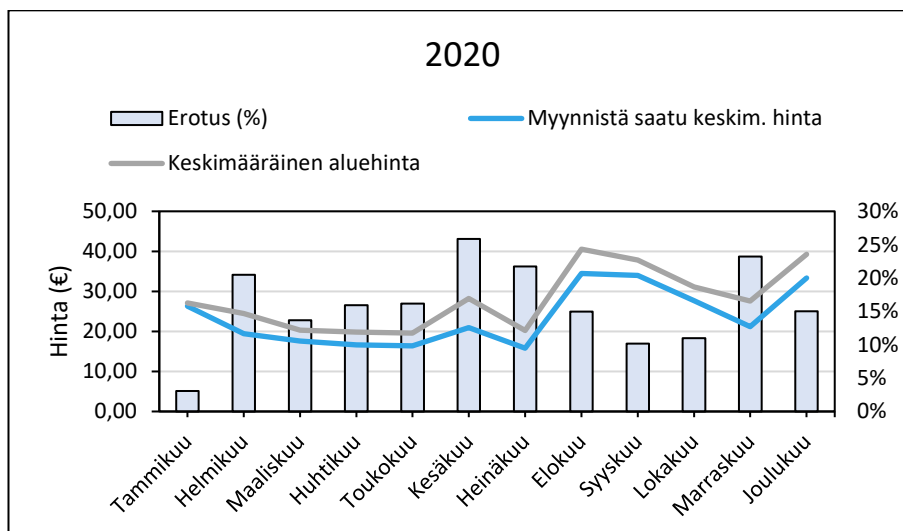
KUVIO 18. Kapasiteetti ja aluehinta (Energiateollisuus ry 2023; Nord Pool 2023).

Kuviossa 19 on vuoden 2020 toteutuneet tuulivoiman tuotantomäärät ja hinnat. Tuotantoa on ollut eniten tammikuun ja maaliskuun välisenä aikana sekä marraskuussa. Hinoissa on havaittavissa pieniä eroja, mutta käyrät kulkevat pääasiassa rinnakkain. Korrelaatiokertoimeksi vuodelle 2020 saatiin -0,31.



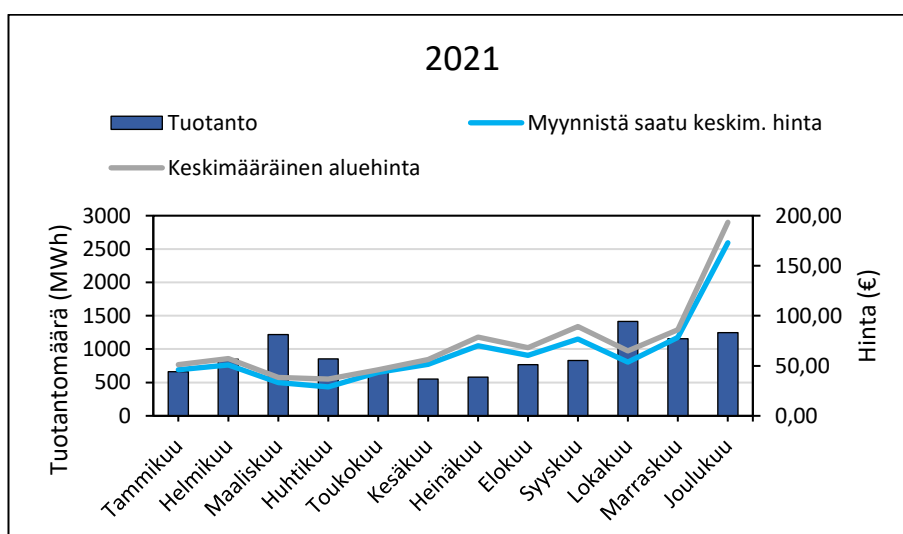
KUVIO 19. Vuoden 2020 tulokset kuukausittain (Fingrid n.d.a).

Kuviossa 20 on vuoden 2020 keskimääräiset hinnat ja niiden erotus prosentteina. Kuvaaja havainnollistaa hintojen erojen suuruutta. Hinnoissa ollut ero on suurimmillaan kesäkuussa ja pienimmillään tammikuussa. Vuosien 2021–2023 hintojen erotukset nähdään liitteestä 2.



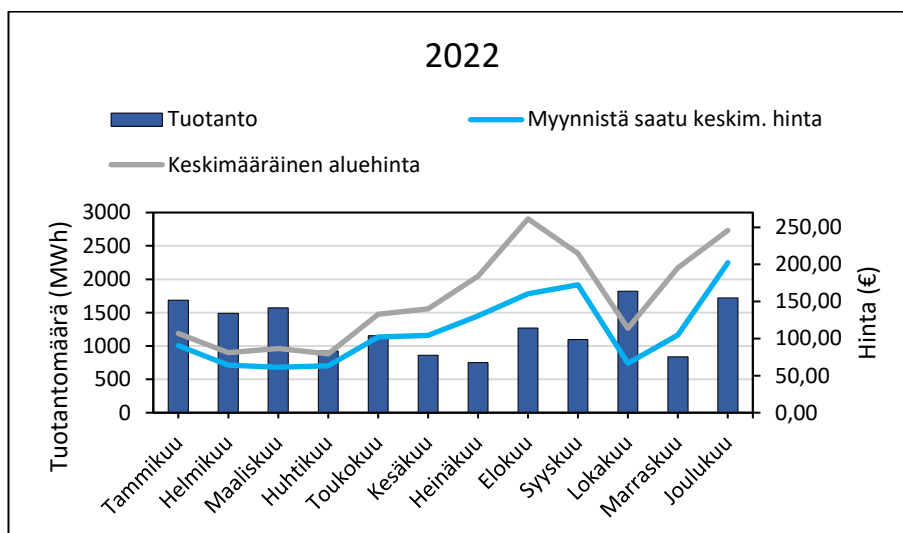
KUVIO 20. Vuoden 2020 keskimääräiset hinnat ja niiden erotus prosentteina.

Kuviossa 21 on vuoden 2021 tuulivoiman tuotantomäärät ja hinnat. Tuotantomäärät ovat korkeimmillaan maaliskuu- ja lokakuussa. Aluehinta on ollut melko tassaissa nousussa marraskuuhun asti, minkä jälkeen tapahtuu jyrkkä nousu. Myynnistä saadun hinnan käyrä kulkee rinnakkain aluehinnan käyrän kanssa. Korrelaatiokerroin on -0,1.



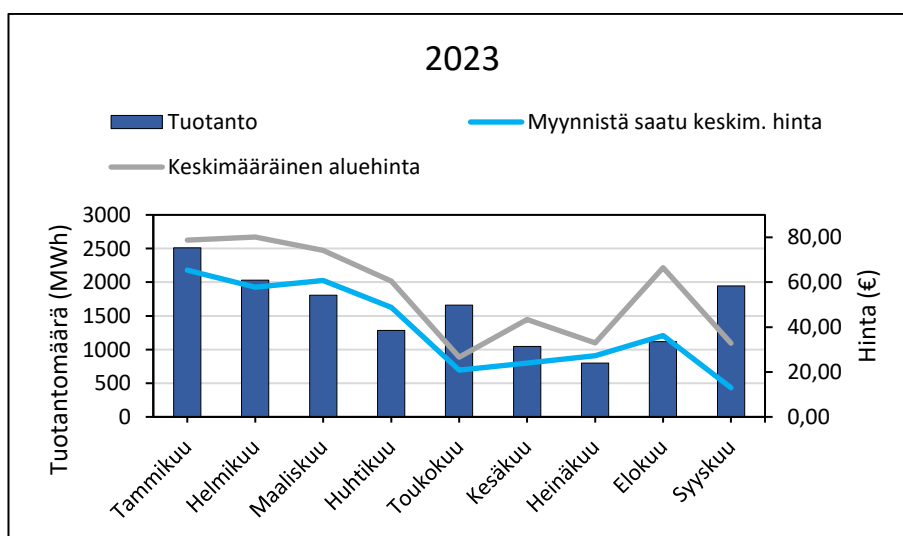
KUVIO 21. Vuoden 2021 tulokset kuukausittain (Fingrid n.d.a).

Kuviossa 22 on vuoden 2022 tuotantomäärät ja hinnat. Kaikissa arvoissa on selvää vaihtelua. Tuotantomäärä on ollut suurimmillaan lokakuussa. Sekä tuotannossa että aluehinnassa ja myynnistä saadussa hinnassa näkyy huomattava nousu lokakuun jälkeen. Aluehinnassa on myös selkeää vaihtelua koko vuoden ajan. Hintoilla myös eroavat toisistaan melko paljon. Korrelaatiokerroin on -0,46.



KUVIO 22. Vuoden 2022 tulokset kuukausittain (Fingrid n.d.a).

Kuviossa 23 on tuotantomäärät ja keskimääräiset hinnat vuoden 2023 tammi-kuun ja syyskuun väliseltä ajalta. Käyrät laskevat toukokuuhun asti, minkä jälkeen kaikissa arvoissa on selkeää vaihtelua. Kun tuotantomäärä on lähtenyt nousuun viimeisten kahden kuukauden aikana, hinta puolestaan on laskenut. Kuvioissa näkyy myös tuotantomäärän kasvu. Korrelaatiokerroin on -0,33.



KUVIO 23. Vuoden 2023 tulokset kuukausittain (Fingrid n.d.a).

## 6.2 Elektrolyysilaitteiston kustannukset

Työssä etsittiin hintatietoja alkalisista elektrolyysilaitteistoista, jotka ovat yleisimpiä elektrolyysilaitteita. Tietoja haettiin netistä, lähettämällä tarjouspyyntöjä laitteistoja valmistaville yrityksille ja sähköpostin välityksellä muutamilta kontaktihenkilöiltä sekä tiedustelemalla eräiltä suomalaisilta yrityksiltä, jotka suunnittelevat tuotantolaitosten perustamista.

IEA:n (2023) mukaan alkalisen elektrolyysilaitteiston investointikustannukset ovat 470–1320 €/kW ja tekninen käyttöikä 60 000 tuntia. Taulukkoon 5 on koottu alkalisen elektrolyysilaitteiston investointi- ja käyttökustannuksia sekä vuosittaiset kokonaiskustannukset. ROI-laskelmissa ei huomioitu vaihtuvia käyttö- ja ylläpitokustannuksia tai vuosittaisia kokonaiskustannuksia.

TAULUKKO 5. Alkalisen elektrolyysin kustannuksia (Aurecon 2022, 77).

Kustannustyyppi	Alkalinen elektrolyysi
Investointikustannukset (capex)	
Suhteelliset kustannukset (€/kW)	1 870
Käyttökustannukset (opex)	
Kiinteät käyttö- ja ylläpitokustannukset (€/MW)	56 000
Vaihtuvat käyttö- ja ylläpitokustannukset (€/MWh)	-
Vuosittaiset kokonaiskustannukset (€)	560 090

## 6.3 Kaasuturbiinin ja polttokennon kustannukset

Kaasuturbiinien ja polttokennojen hintatietoja haettiin netistä, lähettämällä tarjouspyyntöjä laitteistoja valmistaville yrityksille sekä Suomessa toimivilta yrityksiltä, joilla on kyseisiä laitteistoja käytössään ja alan kontaktihenkilöiltä tiedustelemalla.

Taulukossa 6 on kaasuturbiinin ja polttokennon investointi- ja käyttökustannuksia, joita hyödynnettiin ROI-laskelmien tekemisessä. Laskuissa ei huomioitu vaihtuvia käyttö- ja ylläpitokustannuksia tai vuosittaisia kokonaiskustannuksia.

TAULUKKO 6. Kaasuturbiinin ja polttokennon kustannuksia (Aurecon 2022, 36–37, 81–82).

Kustannustyyppi	Kaasuturbiini	Polttokenno
Investointikustannukset (capex)		
Investointikustannukset (€/kW)	1 284	122 000
Käyttökustannukset (opex)		
Kiinteät käyttö- ja ylläpitokustannukset (€/MW)	11 770	489 000
Vaihtuvat käyttö- ja ylläpitokustannukset (€/MWh)	11,2	-
Vuosittaiset kokonaiskustannukset (€)	7 943 150	58 220

#### 6.4 ROI-laskelmat

Tuulisähkön laskentatuloksien ja laitteistojen kustannusten avulla tehtiin ROI-laskelmat tavanomaiselle ja Finno Exergy Oy:n polttokammioille sekä PEM-polttokennolle. Lisäksi laskettiin ROI sekä uudelle, että käytetylle kaasuturbiinille, joissa on Finno Exergyn kehittämä polttokammio. Laitteistojen tehoiksi valittiin 30 MW ja energianlähteenä on tuulivoima. Sähkön ostohintana käytettiin aikaisemmin laskettua tuulisähkön myynnistä saatua keskimääräistä hintaa ja myyntihintana keskimääräistä aluehintaa. Hinnat laskettiin vuosilta 2020–2023 kerätyn aineiston perusteella. Lisäksi tehtiin laskelmat käyttämällä sähkön ostohintana vuosien 2020–2023 halpojen hintojen keskiarvoa, ja myyntihintana kalliiden hintojen keskiarvoa. Nämä saatiin hakemalla kerätystä aineistosta tunnit, jolloin hinta on ollut alle 50 €/MWh ja yli 85 €/MWh. ROI-laskelmat tehtiin kaavalla 8

$$ROI = \frac{\text{Voitto}}{\text{Investointikustannukset}} * 100 \quad (8)$$

jolloin tulokseksi saatiin prosenttiluku.

Laskelmien teko aloitettiin selvittämällä aluksi polttokennolla tuotetun sähkön määrä kertomalla teho polttokennon käyttöajalla. Samalla tavalla laskettiin sähkön tuotantomäärä myös muissa tapauksissa huomioiden laitteiden hyötysuhteet ja käyttöajat. Polttokennolla tuotettavan sähkön määrän avulla saatiin laskettua



tuotetun vedyn määrä jakamalla tuotantomäärä polttokennon hyötysuhteella. Osettavan sähkön määrä saatiin selvitettyä jakamalla vedyn tuotantomäärä elektrolyyserin hyötysuhteella.

Kun kullakin laitteistoilla tuotettavan sähkön määrä oli saatu selvitettyä, laskettiin, kuinka paljon sähkön myynnistä saataisiin tuloa. Tämä saatiin kertomalla sähkön tuotantomäärä sähkön myyntihinnalla. Näin saatiin laskettua ROI-laskelmassa käytettävä voitto. Laitteistojen kustannusten yksiköt muutettiin euroiksi kertomalla kustannukset kyseisen laitteiston teholla. Esimerkiksi polttokennon tapauksessa laskettiin polttokennon käyttökustannusten, sähkön ostohinnan ja elektrolyyserin käyttökustannusten summa, joka vähennettiin sähkön myynnistä saaduista tuloista. Lopuksi laskettiin yhteen polttokennon ja elektrolyyserin investointikustannukset, jolloin aluehinnan ja laskennallisen myyntihinnan avulla ROI saatiin laskettua kaavalla 8.

$$ROI = \frac{-143\,394\,462 \text{ €}}{(366\,000\,000 + 30\,000\,000) \text{ €}} * 100 = -36,210 \dots \% \approx -36 \%$$

Kaikkien ROI-laskelmien tulokset on koottu taulukkoon 7, jossa lyhenne FE on Finno Exergy. Taulukon vasemmanpuoleisessa sarakkeessa olevat tulokset on laskettu keskimääräisen aluehinnan ja sähkön myynnistä saadun keskimääräisen hinnan avulla. Oikeanpuoleisen tulokset on laskettu samalla tavalla, mutta sähkön hintoina käytettiin kerätystä aineistosta haettujen hintojen keskiarvoja. Tulokset nähdään myös liitteestä 3.

TAULUKKO 7. ROI-laskelmien lopputulokset.

Laitteisto	ROI	
	Aluehinnan ja sähkön myyntihinnan perusteella	Aineistosta haettujen hintatietojen perusteella
Kaasuturbiini	-153 %	126 %
FE polttokammio	-267 %	315 %
Uusi kaasuturbiini FE polttokammiolla	-129 %	151 %
Käytetty kaasuturbiini FE polttokammiolla	-205 %	109 %
Polttokenno	-36 %	-1 %

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tuulisähkön tuotannon ja aluehinnan perusteella tehtyjen laskelmien avulla laadituista kuvaajista nähdään, että ero aluehinnan ja sähkön myynnistä saadun hinnan välillä on ollut selvässä kasvussa. Tässä havaitaan hyvin se, että tuulivoiman kannattavuus laskee tuotannon lisääntyessä. Mitä enemmän on tarjontaa, sitä pienempää hintaa tuulivoiman tuottajat saavat myymästään sähköstä. Korrelaatiokerroin vaihtelee -1 ja +1 välillä. Mitä lähempänä nollaa luku on, sitä merkityksettömämpi korrelaatio. Korrelaatiokertoimista siis voidaan päätellä, että tuotannon ja aluehinnan välillä ei ole merkitsevää yhteyttä.

Elektrolyysilaitteistojen, kaasuturbiinien ja polttokennojen investointi- ja käyttökustannusten tiedonhankinta osoittautui melko haastavaksi. Tietoa etsittiin usealla eri tavalla, mutta esimerkiksi laitteistoja valmistavat yritykset eivät luovuttaneet tietoja opinnäytetyön tekemistä varten. Laskennat tehtiin verkkolähteissä saatavilla olevien tietojen perusteella. Tällaisia tietoja voisi myös yrittää tiedustella esimerkiksi alan messuilla tai ekskursion kautta.

ROI-laskelmien tuloksista nähdään, että polttokennon hankinta ei tässä tapauksessa olisi kannattavaa. Sillä on korkeat kustannukset ja lisäksi 30 megawatin tehon saavuttamiseen tarvittaisiin useampia yksiköitä, kun kaasuturbiineja riittää yksi. Tässä haasteeksi saattaa muodostua myös laitteiston käytettävissä oleva tila. Lisäksi sähkön tuotantomäärä polttokennolla on vähäisempää kaasuturbiiniin verrattuna. Kaasuturbiiniin investoiminen puolestaan on kannattavaa, mikäli sähkö ostetaan silloin kun se on halpaa ja myydään hinnan ollessa korkea. Tavanomaisella kaasuturbiinilla ei voida polttaa vetyä, mutta laskelmien tuloksia voidaan käyttää vertailukohtana investoinnin kannattavuudelle sellaiselle turbiinille, jossa vetyä voidaan käyttää polttoaineena. Mikäli kaasuturbiini ostetaan käytettynä, sen investointikustannukset ovat arviolta puolet uuden turbiinin hinnasta. Tällöin säästetään kustannuksissa, mutta käyttöaika on luonnollisesti pienempi. Käyttökustannukset ovat myös hieman korkeammat, tässä laskelmassa 10 % enemmän kuin uudella kaasuturbiinilla.

Työn tavoitteena oli esitellä yrityksen kehittänyt teknologia ja selvittää sen hyödyt laskelmien avulla. ROI-laskelmat osoittavat, että investoinnilla saavutettaisiin enemmän tuottoa kuin tavanomaiseen kaasuturbiiniin sijoittamalla. Tulosten laskennassa ei huomioitu elektrolyysissä tarvittavan veden hintaa, laitteistojen vaihtuvia käyttökustannuksia tai vedyn kuljetusta ja varastointia. Nämä tiedot huomioidulla saataisiin tarkempia ja todenmukaisempia tuloksia. Myös hyötysuhteita, käyttöaikoja ja tehoa muuttamalla voidaan vaikuttaa tuloksiin. Elektrolyysin käyttöajaksi mainittiin kahdessa lähteessä sama 60 000 tuntia, joten sitä voidaan pitää todenmukaisena. Laskuissa myös käytettiin sähkön osto- ja myyntihintoina laskennallisia keskiarvoja. Todellisuudessa hinnat kuitenkin vaihtelevat tunneittain, eikä hintoja tai niiden vaihtelua voida tarkasti ennustaa.

## LÄHTEET

Aurecon. 2022. 2022 Costs and Technical Parameter Review. Julkaisu 12.12.2022. Viitattu 20.11.2023. [https://aemo.com.au/-/media/files/stakeholder\\_consultation/consultations/nem-consultations/2022/2023-inputs-assumptions-and-scenarios-consultation/supporting-materials-for-2023/aurecon-2022-cost-and-technical-parameter-review.pdf](https://aemo.com.au/-/media/files/stakeholder_consultation/consultations/nem-consultations/2022/2023-inputs-assumptions-and-scenarios-consultation/supporting-materials-for-2023/aurecon-2022-cost-and-technical-parameter-review.pdf)

Basf. 2021. Climate Protection with Carbon Management. Raportti. Viitattu 5.10.2023. <https://report.basf.com/2020/en/managements-report/responsibility-along-the-value-chain/environmental-protection-health-and-safety/carbon-management.html>

Basu, P. 2013. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. E-kirja. Toinen painos. San Diego: Elsevier. Viitattu 24.10.2023. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?pq-origsite=primo&docID=1319046>

Boudellal, M. 2018. Power-To-Gas: Renewable Hydrogen Economy for the Energy Transition. E-kirja. Berliini: Walter de Gruyter GmbH. Viitattu 4.10.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=5157882&pq-origsite=primo>

Boyce, M. 2012. Gas Turbine Engineering Handbook. E-kirja. Neljäs painos. San Diego: Elsevier. Viitattu 18.10.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=832451>

Energiateollisuus ry. 2023. Sähkötilastot. Verkkosivu 12.1.2023. Viitattu 1.11.2023. <https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/>

Fingrid. n.d.a. Hae tietoaaineistoja. Viitattu 3.10.2023. [https://data.fingrid.fi/open-data-forms/search/fi/?selected\\_datasets=181](https://data.fingrid.fi/open-data-forms/search/fi/?selected_datasets=181)

Fingrid. n.d.b. Miten sähkön hinta muodostuu?. Verkkosivu. Viitattu 27.10.2023. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/miten-sahkon-hinta-muodostuu/>

Finno Exergy Oy. 2020. Solving the Green Transition Challenges with a Unique Innovation. Verkkosivu. Viitattu 26.9.2023. <https://www.finoexergy.com>

Fuel Cell & Hydrogen Energy Association. n.d.a. Fuel Cell Basics. Verkkosivu. Viitattu 18.10.2023. <https://www.fchea.org/fuelcells>

Fuel Cell & Hydrogen Energy Association. n.d.b. Hydrogen In Industrial Applications. Verkkosivu. Viitattu 5.10.2023. <https://www.fchea.org/hydrogen-in-industrial-applications>

Gandia, L., Arzamendi, G. & Diéguez, P. 2013. Renewable Hydrogen Technologies. Production, Purification, Storage, Applications and Safety. E-kirja. San Diego: Elsevier. Viitattu 6.10.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?pq-origsite=primo&docID=1187143>

Global Energy Infrastructure. 2021. Hydrogen – data telling a story. Verkkosivu. Viitattu 13.9.2023. <https://globalenergyinfrastructure.com/articles/2021/03-march/hydrogen-data-telling-a-story/>

Helynen, S., Hongisto, M., Hämäläinen, J., Korhonen, M., Kurkela, E., Kytö, M., Laurikko, J., Mattila, L., Mäkinen, T., Peltola, E., Rosenberg, R., Sipilä, K., Viinikainen, S & Vanttola, T. 2004. Energian käytön ja tuotannon teknologiset näkymät. Kara, M., Helynen, S., Mattila, L., Viinikainen, S., Ohlström, M. & Lahnamäki, M. (toim.) Energia Suomessa. Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 3. painos. Helsinki: Edita Prima Oy, 211–309.

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpainen S. 2008. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Opetushallitus.

Hydrogen Europe & DVGW. 2022. Pyrolysis – Potential and Possible Applications of a Climate-Friendly Hydrogen Production. Raportti 27.10.2022. Bonn: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH. Viitattu 22.9.2023. <https://www.hydrogeneurope.eu/he-dvgw-pyrolysis-report/>

Ilmatieteen laitos. 2023. Tutkimuksessa selvitettiin tuuli- ja aurinkoenergian vaikutusta sähkön hintaan ja investointien tuottoon. Tiedote 26.10.2023. Viitattu 7.11.2023. <https://www.stinfo.fi/tiedote/70045945/tutkimuksessa-selvitettiin-tuuli-ja-aurinkoenergian-vaikutusta-sahkon-hintaan-ja-investointien-tuottoon?publisherId=69820042&lang=fi>

IEA. 2023. Electrolysers. Verkkosivu 10.7.2023. Viitattu 1.11.2023. <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolysers>

IRENA. 2020. Green Hydrogen Cost Reduction. Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. Raportti 17.12.2020. Viitattu 12.10.2023. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_cost\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf)

IRENA. 2022. Hydrogen. Verkkosivu. Viitattu 4.10.2023. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>

Kauppinen, J. 2018. Turbiinitekniikka. Käyttö, huolto ja kunnossapito. 1. painos. Tampere: Tammertekniikka.

Kiukainen, P. 2023. Testilaitteiston erityispiirteitä. Sähköpostiviesti 15.11.2023.

Kostiainen, J. 2023. Vetytalous. Nordea Corporate 8.3.2023. Viitattu 13.9.2023. <https://corporate.nordea.com/article/80926/vetytalous>

Ma, S., Lin, M., Lin, T-E., Lan, Tian, Liao, X., Maréchal, F., Van Herle, J., Yang, Y., Dong, C. & Wang, L. 2021. Fuel cell-battery hybrid systems for mobility and off-grid applications: A review. Artikkel. Viitattu 19.11.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1016/j.rser.2020.110119>

Mahler AGS GmbH. 2019. Hydrogen generation by steam reforming (Mahler AGS GmbH). YouTube-video. Julkaistu 5.4.2019. Viitattu 22.9.2023. [https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=xAjHJ49VOUM&ab\\_channel=MahlerAGSGmbH](https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=xAjHJ49VOUM&ab_channel=MahlerAGSGmbH)

Motiva. 2023. Vety. Verkkosivu 9.6.2023. Viitattu 20.9.2023. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/valitse\\_auto\\_viisaasti/energia-lahteet/vety](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energia-lahteet/vety)

Nguyen, K. n.d. Brayton Cycle. LibreTexts. Viitattu 6.10.2023. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Thermodynamics/Thermodynamic\\_Cycles/Brayton\\_Cycle](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Thermodynamics/Thermodynamic_Cycles/Brayton_Cycle)

Nord Pool. 2023. Market data for media. Viitattu 23.10.2023. <https://www.nordpoolgroup.com/en/market-data-for-media/>

Noussan, M., Raimondi, P., Scita, R. & Hafner, M. 2020. The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition – A Technological and Geopolitical Perspective. Tieteellinen aikakausjulkaisu. Basel: MDPI. Viitattu 20.9.2023. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/1/298>

Pekkonen, S. 2020. Öljyjätti Shell palkitsi suomalaisyrityksen keksinnön – Lupaa tehostaa kaasuturbiinien polttoaineenkulutusta merkittävästi. Talouselämä 30.11.2020. Viitattu 26.9.2023. <https://www.talouselama.fi/uutiset/oljyjatti-shell-palkitsi-suomalaisyrityksen-keksinnon-lupaa-tehostaa-kaasuturbiinien-polttoaineenkulutusta-merkittavasti/3eb687ac-c1f7-4041-a935-02e5073e7565>

Ruska, M. & Pirilä, P. 2004. Energiamarkkinat. Kara, M., Helynen, S., Mattila, L., Viinikainen, S., Ohlström, M. & Lahnalampi, M. (toim.) Energia Suomessa. Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 3. painos. Helsinki: Edita Prima Oy, 177–210.

Siemens Energy. n.d. SGT-800 gas turbine. Verkkosivu. Viitattu 19.11.2023. <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/sqt-800.html#tabs-632d15bf06-item-220bb95e80-tab>

Taskinen, E. 2023. Vetytalous muuttaa energiajärjestelmää. Sähköviesti. Blogikirjoitus 27.6.2023. Viitattu 20.9.2023. <https://www.sahkoviesti.fi/paikalliset/vetytalous-muuttaa-energiajarjestelmaa.html>

Tervola, J. 2021. Suomessa kehitettiin mullistava kaasuturbiini, joka säästää 20% polttoainetta – ”maaginen hetki, kun saimme moottorin käymään kotitallissa” (video). Tekniikka & Talous 19.1.2021. Päivitetty 20.1.2021. Viitattu 19.10.2023. <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/suomessa-kehitettiin-mullistava-kaasuturbiini-joka-saastaa-20-polttoainetta-maaginen-hetki-kun-saimme-moottorin-kaymaan-kotitallissa-video/e8ff3a78-00df-475f-9626-78d30d7940e9>

Tervola, J. 2023a. Mullistava suomalainen kaasuturbiinikeksintö läpäisi testit – säästää polttoainetta 20 %, takaisinmaksuaika 1 vuosi. Tekniikka & Talous 13.11.2023. Viitattu 20.11.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/mullistava-suomalainen-kaasuturbiinikeksinto-lapaisi-testit-saastaa-polttoainetta-20-takaisinmaksuaika-1-vuosi/e72c8f75-aad4-411a-b090-a3ad4ef7a952>

Tervola, J. 2023b. Palamistuloksena ei synny hiilidioksidia, mutta miten aggressiivinen vety toimii polttoaineena? Wärtsilä ja kumppanit tutkivat asiaa 1,7 miljoonan hankkeessa. Tekniikka & Talous 10.3.2023. Viitattu 7.11.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://www.tekniikkatalous-fi.libproxy.tuni.fi/uutiset/palamistuloksena-ei-synny-hiilidioksidia-mutta-miten-aggressiivinen-vety-toimii-polttoaineena-wartsila-ja-kumppanit-tutkivat-asiaa-1-7-miljoonan-hankkeessa/1a57abc8-3e12-4623-88ce-d7147f8f9c24>

Tuulivoimayhdistys. 2021. Tuulivoimalla katettiin noin 10 % Suomen sähkönkulutuksesta vuonna 2020. Tiedote 2.2.2021. Viitattu 27.10.2023. <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimalla-katettiin-noin-10-suomen-sahkonkulutuksesta-vuonna-2020>

Tuulivoimayhdistys. 2022. Tuulivoimatilastot 2021: Tuulivoiman rakentamisessa takana ennätysellinen vuosi. Tiedote 12.1.2022. Viitattu 27.10.2023. <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimatilastot-2021-tuulivoiman-rakentamisessa-takana-ennatysellinen-vuosi>

Tuulivoimayhdistys. 2023a. Tuulivoimavuosi 2022: Tuulivoimakapasiteetti kasvoi 75 % ja toi Suomeen yli 2,9 miljardin investoinnit. Tiedote 10.1.2023. Viitattu 27.10.2023. <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimakapasiteetti-kasvoi-75-ja-toi-suomeen-yli-29-miljardin-investoinnit>

Tuulivoimayhdistys. 2023b. Tuulivoimasta kasvaa Suomen suurin sähköntuotantomuoto 2027 mennessä – Wind Finland täytti salin kaapelitehtaalla. Tiedote 4.10.2023. Viitattu 27.10.2023. <https://tuulivoimayhdistys.fi/ajankohtaista/tiedotteet/tuulivoimasta-kasvaa-suomen-suurin-sahkontuotantomuoto-2027-mennessa-wind-finland-taytti-salin-kaapelitehtaalla>

U.S Department of Energy. n.d. Hydrogen Production: Biomass Gasification. Viitattu 24.10.2023. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biomass-gasification>

Vartiainen, E. 2020. Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin. Fortum. Blogikirjoitus 4.9.2020. Viitattu 13.9.2023. <https://www.fortum.fi/tietoameista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>

Vattenfall. 2023. Fossiilivapaa vety tulee – näin vetytalous muuttaa yhteiskuntaa. Viitattu 13.9.2023. <https://www.vattenfall.fi/fokuksessa/fossiilivapaa/fossiilivapaa-vety/>

Välimäki, M. 2022. Vety mullistaa energia-alan. Fingrid-lehti 9.10.2022. Viitattu 13.9.2023. <https://www.fingridlehti.fi/vety-mullistaa-energia-alan/>

## LIITTEET

Liite 1. Tuulivoimatuotanto ja aluehinnat taulukoituna (Fingrid n.d.a & Nord Pool 2023).

Alkuaika UTC+03:00	Lopetusaika UTC+03:00	Tuulivoimatu otanto (MW)	Hinta (€/MWh)
1.1.2023 0.00	1.1.2023 1.00	3688	2,01
1.1.2023 1.00	1.1.2023 2.00	3485	1,38
1.1.2023 2.00	1.1.2023 3.00	3449	0,09
1.1.2023 3.00	1.1.2023 4.00	3559	0,08
1.1.2023 4.00	1.1.2023 5.00	3634	0,05
1.1.2023 5.00	1.1.2023 6.00	3628	0,08
1.1.2023 6.00	1.1.2023 7.00	3500	0,09
1.1.2023 7.00	1.1.2023 8.00	3353	0,53
1.1.2023 8.00	1.1.2023 9.00	3391	2,03
1.1.2023 9.00	1.1.2023 10.00	3233	3,1
1.1.2023 10.00	1.1.2023 11.00	3214	4,43
1.1.2023 11.00	1.1.2023 12.00	3213	6,06
1.1.2023 12.00	1.1.2023 13.00	3249	6,06
1.1.2023 13.00	1.1.2023 14.00	3416	5,68
1.1.2023 14.00	1.1.2023 15.00	3416	17,71
1.1.2023 15.00	1.1.2023 16.00	3255	24,11
1.1.2023 16.00	1.1.2023 17.00	3490	36,54
1.1.2023 17.00	1.1.2023 18.00	3600	46,03
1.1.2023 18.00	1.1.2023 19.00	3503	54,23
1.1.2023 19.00	1.1.2023 20.00	3541	53,63
1.1.2023 20.00	1.1.2023 21.00	3620	48,05
1.1.2023 21.00	1.1.2023 22.00	3676	44,68
1.1.2023 22.00	1.1.2023 23.00	3604	45,96
1.1.2023 23.00	2.1.2023 0.00	3335	35
2.1.2023 0.00	2.1.2023 1.00	3298	57,91
2.1.2023 1.00	2.1.2023 2.00	3263	51,67
2.1.2023 2.00	2.1.2023 3.00	3264	52,86
2.1.2023 3.00	2.1.2023 4.00	3166	44,16
2.1.2023 4.00	2.1.2023 5.00	3143	50,08



## Liite 2. Kuvaajien laadinnassa käytetty laskentataulukko.

2020											
Keskiarvo				Yhteensä							
	Tuotanto	Hinta	Arvo		Tuotanto	Hinta	Arvo	Myyntistä saatu	Keskimääräinen	Erotus	Erotus (%)
Tammikuu	1197	27,15	31485	Tammikuu	891642	20224,3	23456355,42	26,31	27,15	0,84	3 %
Helmikuu	1097	24,43	21186	Helmikuu	759110	17006,42	14745336,85	19,42	24,43	5,01	21 %
Maaliskuu	1095	20,35	19217	Maaliskuu	813375	15121,79	14288338,21	17,57	20,35	2,78	14 %
Huhtikuu	816	19,82	13578	Huhtikuu	586813	14270,79	9776516,59	16,66	19,82	3,16	16 %
Toukokuu	662	19,58	10858	Toukokuu	1028326	30437,96	16876141,71	16,41	19,58	3,17	16 %
Kesäkuu	477	28,26	10057	Kesäkuu	345656	20346,05	7242715,67	20,95	28,26	7,30	26 %
Heinäkuu	486	20,21	7685	Heinäkuu	361643	15034,02	5717641,95	15,81	20,21	4,40	22 %
Elokuu	463	40,55	15977	Elokuu	344809	30166,06	11887106,35	34,47	40,55	6,07	15 %
Syyskuu	892	37,83	30306	Syyskuu	642037	27234,16	21820322,33	33,99	37,83	3,84	10 %
Lokakuu	803	31,11	22220	Lokakuu	597105	23145,48	16531382,45	27,69	31,11	3,42	11 %
Marraskuu	1191	27,62	25259	Marraskuu	857458	19889,1	18186182,09	21,21	27,62	6,41	23 %
Joulukuu	904	39,25	30167	Joulukuu	672646	29205,71	22444249,28	33,37	39,25	5,89	15 %
				Yht.	7900620	262081,84	182972288,9				
2021											
Keskiarvo				Yhteensä							
	Tuotanto	Hinta	Arvo		Tuotanto	Hinta	Arvo	Myyntistä saatu	Keskimääräinen	Erotus	Erotus (%)
Tammikuu	661	51,22	30419	Tammikuu	491714	38109,73	22631913	46,03	51,22	5,20	10 %
Helmikuu	851	57,13	43125	Helmikuu	571938	38390,9	28980304,75	50,67	57,13	6,46	11 %
Maaliskuu	1220	38,35	40418	Maaliskuu	907901	28493,04	30070757,36	33,12	38,35	5,23	14 %
Huhtikuu	856	36,76	24758	Huhtikuu	616287	26469,55	17825400,6	28,92	36,76	7,84	21 %
Toukokuu	674	45,94	29219	Toukokuu	501219	34181,39	21738658,61	43,37	45,94	2,57	6 %
Kesäkuu	552	56,16	28365	Kesäkuu	397365	40432,34	20422591,02	51,40	56,16	4,76	8 %
Heinäkuu	579	78,76	40549	Heinäkuu	430875	58595,45	30168562,3	70,02	78,76	8,74	11 %
Elokuu	767	68,20	46359	Elokuu	570734	50738,86	34490796,87	60,43	68,20	7,77	11 %
Syyskuu	828	89,27	63511	Syyskuu	596311	64276,6	45727960,86	76,68	89,27	12,59	14 %
Lokakuu	1417	64,85	76128	Lokakuu	1053921	48245,56	56639393,34	53,74	64,85	11,10	17 %
Marraskuu	1156	85,90	90616	Marraskuu	832567	61845,59	65243206,32	78,36	85,90	7,53	9 %
Joulukuu	1249	193,38	216038	Joulukuu	929441	143876,43	160732595,6	172,93	193,38	20,45	11 %
				Yht.	7900273	633655,44	534672140,6				
2022											
Keskiarvo				Yhteensä							
	Tuotanto	Hinta	Arvo		Tuotanto	Hinta	Arvo	Myyntistä saatu	Keskimääräinen	Erotus	Erotus (%)
Tammikuu	1687	106,71	152412	Tammikuu	1255217	79388,79	113394157,3	90,34	106,71	16,37	15 %
Helmikuu	1490	81,04	95461	Helmikuu	1001323	54460,59	64149981,42	64,07	81,04	16,98	21 %
Maaliskuu	1570	86,48	96469	Maaliskuu	1167879	64258,13	71676313,39	61,37	86,48	25,11	29 %
Huhtikuu	925	79,36	58542	Huhtikuu	666191	57137,08	42150459,61	63,27	79,36	16,09	20 %
Toukokuu	1153	132,66	117675	Toukokuu	857669	98701,08	87550562,38	102,08	132,66	30,58	23 %
Kesäkuu	860	140,10	89605	Kesäkuu	619435	100873,73	64515632,51	104,15	140,10	35,95	26 %
Heinäkuu	751	184,13	98032	Heinäkuu	558653	136996,32	72935582,18	130,56	184,13	53,58	29 %
Elokuu	1271	261,49	204147	Elokuu	945855	194551,91	151885162,1	160,58	261,49	100,91	39 %
Syyskuu	1098	214,98	189430	Syyskuu	790481	154783,81	136389865,5	172,54	214,98	42,44	20 %
Lokakuu	1822	113,61	121307	Lokakuu	1355476	84527,9	90252075,33	66,58	113,61	47,03	41 %
Marraskuu	837	195,35	87751	Marraskuu	602841	140649,15	63180719,34	104,80	195,35	90,54	46 %
Joulukuu	1721	245,98	348094	Joulukuu	1280215	183010,7	258981924,9	202,30	245,98	43,69	18 %
				Yht.	11101235	1349339,19	1217062436				
2023											
Keskiarvo				Yhteensä							
	Tuotanto	Hinta	Arvo		Tuotanto	Hinta	Arvo	Myyntistä saatu	Keskimääräinen	Erotus	Erotus (%)
Tammikuu	2512	78,76	164255	Tammikuu	1869186	58596,99	122205833,4	65,38	78,76	13,38	17 %
Helmikuu	2029	80,13	117358	Helmikuu	1363694	53847,23	78864421,18	57,83	80,13	22,30	28 %
Maaliskuu	1807	74,17	109905	Maaliskuu	1344273	55106,7	81659625,95	60,75	74,17	13,42	18 %
Huhtikuu	1283	60,55	62533	Huhtikuu	923933	43598,46	45023694,29	48,73	60,55	11,82	20 %
Toukokuu	1661	26,61	34626	Toukokuu	1236020	19796,8	25761501,74	20,84	26,61	5,77	22 %
Kesäkuu	1047	43,37	25132	Kesäkuu	753931	31228,34	18095361,99	24,00	43,37	19,37	45 %
Heinäkuu	800	32,92	21766	Heinäkuu	595086	24495,73	16194251,09	27,21	32,92	5,71	17 %
Elokuu	1119	66,44	40564	Elokuu	832736	49428	30179887,34	36,24	66,44	30,19	45 %
Syyskuu	1945	32,81	25260	Syyskuu	1400300	23622,57	18187373,06	12,99	32,81	19,82	60 %

## Liite 3. ROI-laskelmissa käytetty laskentataulukko.

	€/MWh		€/MWh		
Nord Poolin hinta	78,66	Sähkön ostohinta	23,40		
Tuulisähkön myyntihinta kesk	60,58	Sähkön myyntihinta	185,52		
Teho (MWh)	30				
Elektrolyyseri		Polttokennolla tuotettu sähkö		600000	MWh
	€/MW	Tuotettu vety		1200000	MWh
Investointikustannus	1000000	Ostosähkön määrä		1846153,85	MWh
Käyttökustannukset	56000	Sähkön hinta ostettaessa		145218462	43191107,92 €
		Investointikustannus		30000000	€
Käyttöaika (h)	60000	Käyttökustannukset		1680000	€
Hyötysuhde (%/100)	0,65				
Kaasuturbiini		Tuotettu sähkö		707400	MWh
	€/MW	Sähkön myyntitulo		42854292	131234650,9 €
Investointikustannus	1280000	Investointikustannus		38400000	€
Käyttökustannukset	11700	Käyttökustannukset		351000	€
		Voitto		-104395170	86012542,94 €
Käyttöaika (h)	60000	ROI		-1,526	1,257
Hyötysuhde (%/100)	0,393	ROI (%)		-153 %	126 %
FE Kaasuturbiinin polttokammio		Tuotettu sähkö		848880	MWh
	€/MW	Sähkön myyntitulo		51425150,4	157481581 €
Investointikustannus	192000	Investointikustannus		5760000	€
Käyttökustannukset	1800	Käyttökustannukset		54000	€
		Voitto		-95527311	112556473,1 €
Käyttöaika (h)	60000	ROI		-2,671	3,148
Hyötysuhde (%/100)	0,472	ROI (%)		-267 %	315 %
Uusi kaasuturbiini FE polttokammioilla		Tuotettu sähkö		848880	MWh
	€/MW	Sähkön myyntitulo		51425150,4	157481581 €
Investointikustannus *	1472000	Investointikustannus		44160000	€
Käyttökustannukset *	13500,0	Käyttökustannukset		405000	€
		Voitto		-95878311	112205473,1 €
Käyttöaika (h)	60000	ROI		-1,29	1,51
Hyötysuhde (%/100)	0,472	ROI (%)		-129 %	151 %
Käytetty kaasuturbiini FE polttokammioilla		Tuotettu sähkö		565920	MWh
	€/MW	Sähkön myyntitulo		34283433,6	104987720,7 €
Investointikustannus	832000,0	Investointikustannus		24960000	€
Käyttökustannukset	14670,0	Käyttökustannukset		440100	€
		Voitto		-113055128	59676512,76 €
Käyttöaika (h)	40000	ROI		-2,06	1,09
Hyötysuhde (%/100)	0,472	ROI (%)		-206 %	109 %
Polttokenno		Tuotettu sähkö		300000	MWh
	€/MW	Sähkön myyntitulo		18174000	55655068,22 €
Investointikustannus	12200000	Investointikustannus		366000000	€
Käyttökustannukset	489000	Käyttökustannukset		14670000	€
		Voitto		-143394462	-3886039,7 €
Käyttöaika (h)	20000	ROI		-0,362	-0,010
Hyötysuhde (%/100)	0,5	ROI (%)		-36 %	-1 %
Nord Poolin hinta = Suomen aluehinnan keskiarvo 1/2020-9/2023					
Tuulisähkön myyntihinta = Tuulisähkön myynnistä saatu keskihinta, laskettu tuulisähkön arvon avulla					
Sähkön myyntihinta = Keskihinta niillä tunneilla, kun sähkön hinta 1/2020-9/2023 on yli 85 €/MWh (9582 tuntia)					
Sähkön ostohinta = Keskihinta niillä tunneilla, kun sähkön hinta 1/2020-9/2023 on alle 50 €/MWh (9546 tuntia)					
* Laskettu yhteen kaasuturbiinin ja Finno Exergy Oy:n polttokammion kustannukset					
** Uuden kaasuturbiinin kustannukset puoliksi + Finno Exergy Oy:n polttokammion kustannukset					