

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

**METAANIN HÖYRYREFORMOINTIPROSESSI VE-  
DYNTUOTANNOSSA JA SEN TEKNISTALOUDELLINEN  
VERTAILU**

Lappeenrannassa 10.2.2023  
Aleksi Sopo

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Alexi Sopo

**Kandidaatintyö 2023**

Kirjallisuustyö 2023

Tarkastaja: TkT Antti Pitkäoja

Ohjaaja: TkT Antti Pitkäoja

26 sivua, 1 taulukkoa ja 5 kuvaa

Uusien energiantuotantomenetelmien kehittäminen sekä vanhojen optimointi ovat keskeisiä asioita, millä vedyntuotantoa saadaan tehostettua. Vety energianmuotona ei ole uusi asia, mutta sen tuottamiseksi pyritään jatkuvasti kehittämään uutta ja parempaa teknologiaa. Höyryreformointi on vanha tapa tuottaa vetyä ja prosessin saaminen mahdollisimman tehokkaaksi on tärkeää päästöttömän yhteiskunnan kannalta. Työn tavoitteina on selvittää kirjallisesti höyryreformoinnin prosessi ja vertailla höyryreformointiprosessin taloudellista kannattavuutta sekä ekologista näkökulmaa suhteessa toisiin vedyntuotantomenetelmiin. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jossa käydään läpi höyryreformointiprosessin eri vaiheet ja verrataan aineistoista löytyviä kustannuslukuja muihin vastaavanlaisien prosessien arvoihin.

Vedyntuotannon pääomakustannukset, tuottaessa vetyä höyryreformoinnilla suhteessa muihin työssä verrattuihin menetelmiin, osoittautui olevan kalliimmat, kuin esimerkiksi metaanin ATR-menetelmän vastaavat arvot. Varsinkin hiilikaappausmenetelmän sisältävä prosessi oli selkeästi kalliimpaa, mutta hiilen kaappaus teollisuuden prosesseista olisi tärkeää ilmastotavoitteita ajatellen. Lähteiden mukaan voidaan siis todeta, että on olemassa höyryreformointia edullisempi raaka-aineenaan metaania käyttävä vedyntuotantomuoto.

# SISÄLLYSLUETTELO

## TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	6
2	VETY ENERGIANTUOTANNOSSA .....	7
2.1	Historia .....	7
2.2	Vedyn lähteiden vaikutus .....	8
2.2.1	Ekologisia tekijöitä vedyn tuotannon kannalta .....	9
2.3	Vedyn tuotanto/kehitys tulevaisuudessa.....	11
3	VEDYN REFORMOINTI METAANISTA .....	12
3.1	Puhdistaminen .....	13
3.2	Höyryreformointi.....	13
3.3	Homogeeninen vesi-kaasureaktio.....	14
3.4	Painevaihtelu- ja kalvoerottelu .....	14
3.5	Hiilen kaappaus- ja varastointiteknologia .....	14
3.6	Katalyytit .....	16
4	MUITA VEDYN TUOTANTOMENETELMIÄ .....	16
5	HÖYRYREFORMOINNIN KUSTANNUSTEKIJÄT.....	18
5.1	Kustannustaulukko .....	20
6	TULOSTEN TARKASTELU .....	21
6.1	Taloudellinen tarkastelu .....	21
6.2	Ekologinen tarkastelu .....	22
7	YHTEENVETO .....	23
8	LÄHTEET.....	25

## 1 JOHDANTO

Viime vuosikymmeninä maailman energiantarve on kasvanut yhä voimakkaammin. Dominoivassa asemassa energiantuotannon raaka-aineina ovat edelleen uusiutumattomat luonnonvarat, jotka eivät ilmastolle haitallisine vaikutuksineen ole enää nykysäilyksen mukaan suotuisia maapallon luonnollisen tilan säilymisen kannalta. Uuden teknologian tutkiminen on edellytys, jotta myös uusia ratkaisuja voidaan kehittää ja hyödyntää energiantuotannossa korvaamaan epäedullisten energianlähteiden tuomat haittavaikutukset. Tällä hetkellä tutkimus- ja kehitystyö painottuu pitkälti uusiutuviin energianlähteisiin, joiden ilmastovaikutus on katsottu olevan oleellisesti pienempi, jopa hiilineutraali.

Yhtenä vaihtoehtoisena energiaratkaisuna tutkitaan vetyä. Vedyn olemassaolo energiamuotona ei ole aivan uusi asia, mutta vedyn muodostamiseen puhtaasti ja erilaisia puhdistavia välivaiheita käyttäen on alettu kiinnittää huomiota vasta myöhemmässä vaiheessa. Vaikka uusia teknologioita kehitetään, käytetään vedyn tuotannossa vielä toistaiseksi raaka-aineina suurimmaksi osaksi maakaasua ja öljyä. Vetyä voidaan pitää puhtaana energiamuotona, mikäli vetyä tuotetaan uusiutuvista raaka-aineista.

Vetyä on valmistettu jo usean vuosikymmenen ajan perinteisissä kemianteollisuusprosesseissa. Viime aikoina tutkimus ja tuotanto on siirtynyt enemmän myös perinteisistä prosesseista omiksi irrallaan oleviksi. Eniten käytetty vedyntuotantomenetelmä on höyryreformointi. Se on muotoutunut vuosien saatossa teollisuudesta irralleen ja on tullut yleiseksi. Höyryreformoinnin helppo toteutettavuus on yksi syy sen yleisyydelle.

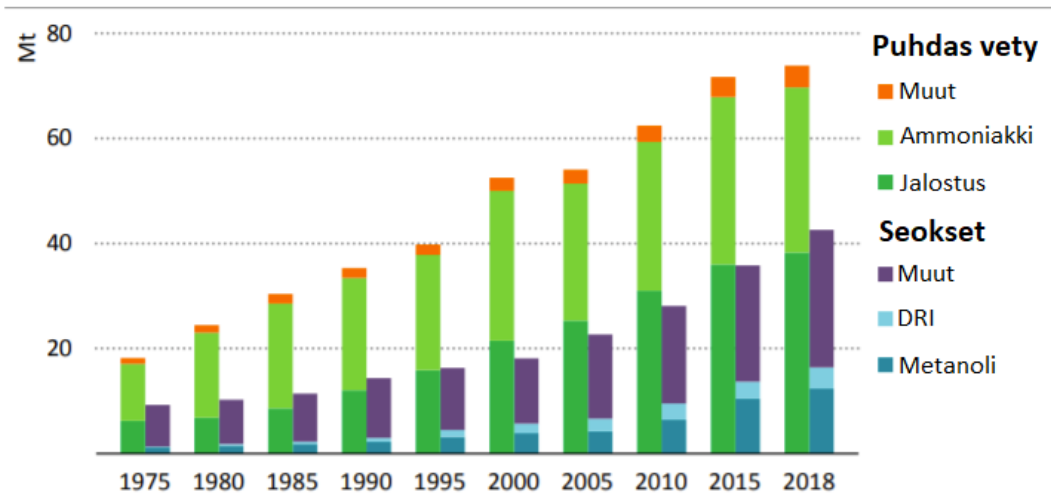
Vedyn käyttöä puhtaana energianlähteenä, ja sen muodostamistekniikoita, tutkitaan energia-alalla kokonaisvaltaisesti. Vetytutkimuksen tavoitteena on ilmastonmuutoksen ja kasvavan energiantarpeen tuomien ongelmien ratkaisemisen kehittäminen vedystä sähkön rinnalle tehokas ja toimiva vaihtoehtoinen energiankantaja. Tämä kandidaatintyö on katselmus, jossa käydään läpi höyryreformointitekniikka ja tehdään vedyntuotannon eri reformointiprosessien teknistaloudellista vertailua ja pohditaan keinoja ympäristö- ja kustannustehokkaampiin ratkaisuihin vedyntuotannossa.

## 2 VETY ENERGIAN TUOTANNOSSA

### 2.1 Historia

Vedyn valmistuksessa on kolme yleisesti käytettyä tekniikkaa ja niiden lisäksi muita vähemmän käytettyjä. Yleisin on vedyn höyryreformointi biomassasta, maakaasusta tai jostain hiilivetyjä sisältävästä yhdisteestä. Toinen päämenetelmä on vedyn erottaminen vesimolekyyleistä elektrolyysillä. Muita menetelmiä on vedyn erottaminen kaasutetun, kiinteän biomassan lopputuotekaasusta. Vety on välillinen energianlähde eli sitä ei suoraan voida hankkia mistään, vaan se täytyy jollakin menetelmällä tuottaa (Motiva 2020). Tällöin siitä on parempi käyttää nimitystä energiankantaja. Vedyn käyttö energia-alalla ei ole uusi keksintö. Vetyä on tuotettu ja käytetty jo 1920-luvulta lähtien teollisuudessa ammoniakkin synteesin yhteydessä. Myöhemmin vedyn käyttö on siirtynyt myös muualle kuin teollisuuteen. Käyttöä on niin energianlähteenä kotien keittiöissä ja lämmityksessä, kuin myös esimerkiksi kaupunkivalaistuksessa. Näissä vetyä sisällytetään polttoaineseokseen, joka sisältää jopa 50 %:iin asti vetyä sekä loput hiilidioksidia ja metaania. (Ball and Weeda 2015)

Tänä päivänä vety on tärkeä raaka-aine öljy- ja kemianteollisuudessa. Kemianteollisuudessa vetyä käytetään muun muassa vetykrakkauksessa eli hiilivetyjen pilkkomisessa, rasvojen ja öljyjen hydrolyysissä, metanolin tuotannossa sekä silikonin valmistuksessa. Ball ja Weeda (2015) mukaan lannoitetuotantoa varten tapahtuva ammoniakkin tuotanto kattaa noin 50 % vedyn käytöstä. Raakaöljyn prosessoinnissa tarvittavan vedyn osuus on lähellä 40 %. Maailman vetykaasubisnes on kokoluokaltaan merkittävää. Vedyn vuotuinen kysyntä on tällä hetkellä noin 70 megatonnia, joka on ekvivalenttina noin 330 MToe megaöljykvivalenttitonnia ja se tuotetaan lähes kokonaan fossiililla polttoaineilla. Havainnollistavna esimerkkinä maailman energiankulutukseksi on arvioitu noin 10 000 megaöljykvivalenttitonnia. Vain noin 0,7 % vedyntuotannosta tänä päivänä on vähäpäästöistä (*World Energy Outlook 2019* 2019). Noin puolet maakaasulla ja kolmasosa jalostamoissa raakaöljyn eri osilla. Vedyn elektrolyysi kattaa vain noin 4 % vedyntuotannosta. Vedyn kysyntä myös kasvaa, mikä voidaan todeta myös kuvasta 1.

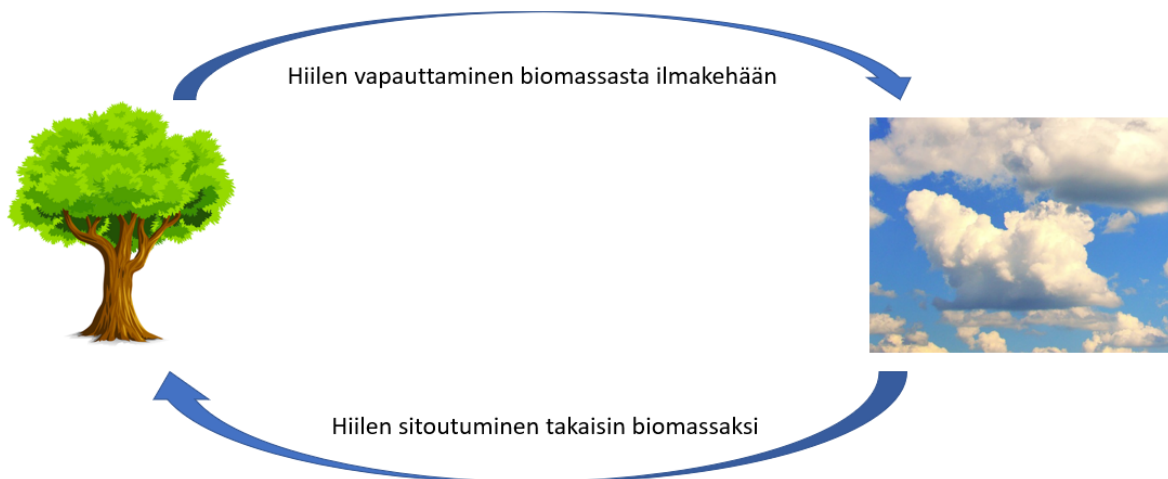


**Kuva 1.** Maailmanlaajuinen vedyn kysynnän kasvu. (WEO2019-IEA s.588, 2019)

## 2.2 Vedyn lähteiden vaikutus

Pyrittäessä kehittämään kestäväää energiajärjestelmää tulee ottaa huomioon kestävän kehityksen periaatteet. Energia-alalla painopistettä on siirrettävä kohti uusiutuvia energiamuotoja. Vedyn tuotannossa tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että tuotantomenetelmästä riippuen vedyn tuotanto tapahtuu joko uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko-, tuuli-, ja vesi- sekä ydinvoiman tai sen sivuvirtojen avulla, tai biomassalla tai -kaasulla tuotettuna. Höyryreformointiin liittyen viimeiset kaksi edellä mainituista ovat mahdollisia muutoksia, joilla saataisiin tuotanto hiilineutraalimmaksi. Yksi oleellinen höyryreformointiin liittyvä muutos olisi bioperäisistä raaka-aineista valmistettu metaani.

Yksinkertainen tapa ilmakehään vapautuvat ja kiertoon pääsevän hiilen taltioimiseksi tänä päivänä on hiilen kaappaustekniikka Carbon Capture and Storage (CCS). Lisäämällä vedyntuotantolaitteistoon tämä komponentti voidaan hiilijalanjälkeä pudottaa verrattuna ilman CCS-laitteistoa toimivaan tuotantolaitteistoon. CCS-laitteistolla kiertoon vapautuva hiili kaapataan ja säilötään maaperään. The Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) on arvioinut, että ilman CCS-teknologiaa ilmastotavoitteiden saavuttamisen kustannukset nousisivat noin 140 prosentilla. (Vizzaccaro et al. 2018)



**Kuva 2.** Lyhytkiertoisien hiilen kulkukaavio. Kiertokulun ikä esimerkiksi puiden tapauksessa on puun eliniän verran.

Tällä hetkellä höyryreformointiprosessia toteutetaan pääasiassa maakaasun avulla. Maakaasu on fossiilinen polttoaine eli siihen sitoutuneen hiilen kiertokulku ei tapahdu kuvan 2 mukaisesti nopeaan tahtiin. Hiilen sitoutuminen maakaasun muotoon on vienyt hyvin kauan aikaa. Puhutaan tuhansista vuosista. Hiilen vapauttaminen ilmakehään yhtä nopealla tahdilla, kuin tällä hetkellä maailmassa tapahtuu, on myötävaikuttava tekijä ilmaston lämpenemisen kannalta. Biokaasu on yksi vaihtoehto korvata fossiilisia polttoaineita höyryreformointiprosessissa. Biomassasta saatavan biokaasun raaka-aineena toimii sama hiiliyhdiste  $\text{CH}_4$  eli metaani, mutta sen hiilikierro on lyhyempi, jolloin uusien hiiliyhdisteiden kertymä ilmaan on pienempi. Esimerkiksi kuvan puun tapauksessa 60–100 vuotta. Pääpiirteittäin hiilen nopea kierto biomassan tapauksessa tapahtuu energiakäytössä siten, että biomassasta vapautetaan energiaa energiakäyttöön jollain prosessilla, jolloin hiiltä vapautuu ilmaan. Ilmasta hiili sitoutuu vuosien saatossa biomassan, kuten kuvan puun runkoon ja lehtiin rakennusaineeksi.

### 2.2.1 Ekologisia tekijöitä vedyn tuotannon kannalta

Ekologisuuden kannalta siis määräytyy, minkälaisilla teknologioilla, ja minkälaisista raaka-aineista tuotettu vety valmistetaan. Tuotetulle vedylle on määritetty erilaiset värikoodit kuvaamaan tuotetun vedyn alkuperää ja ekologisuusastetta. Vedyn värejä ovat sininen, vihreä, harmaa, pinkki ja keltainen vety (Petrofac 2022).

Sinisestä vedystä puhutaan, kun maakaasu jakautuu vedyksi ja hiilidioksidiksi joko höyryreformoinnin (SMR) tai automaattisen lämpöreformoinnin (ATR) avulla, mutta hiilidioksidi kaapataan talteen ja säilötään maaperään. Sinisen vedyn yhteydessä tapahtuva hiilidioksidin kaappausteknologiaa kutsutaan hiilidioksidin kaappaus ja säilöntä (CCS) -menetelmäksi. Tekniikan idea on saada ilmakehään vapautuva hiili talteen hiilen biologisesta kierrosta ja säilöä se maaperään. Tällä teknologialla on vaikutus päästöjen vähentämisessä.

Vihreää vetyä tuotetaan hajottamalla vesimolekyylit vedyksi ja hapeksi elektrolyysin avulla. Muodostuneen vedyn voi käyttää energianlähteenä ja hapen voi vapauttaa ilmakehään ilman negatiivista vaikutusta. Elektrolyysin ylläpitämiseksi tarvitaan sähköä eli energiaa. Jotta prosessista saadaan vihreä eli ekologinen, on se tuotettava käyttäen uusiutuvia energianlähteitä, kuten tuuli- tai aurinkoenergiaa. Tämän takia vihreä vety on värikoodien vedyistä puhtaimmaksi määritelty.

Harmaata vetyä on tuotettu jo pitkään. Harmaan vedyn tuottaminen tapahtuu samalla keinolla kuin sinisen vedyn tuottaminen eli SMR tai ATR prosessien kautta. Erona siniseen vetyyn on kuitenkin muodostuneen hiilen kaappausteknologian (CCS) puuttuminen. Tällöin muodostunut hiilidioksidi pääsee vapautumaan suoraan ilmakehään. Tällä on negatiivinen vaikutus ympäristön kannalta.

Pinkki vety on verrattavissa vihreään vetyyn. Pinkki vety siis tuotetaan käyttäen elektrolyysia. Erona vihreään vetyyn on se, että pinkin vedyn elektrolyysiprosessin energianlähteenä käytetään ydinvoimaa ja sen sivuvirtoja.

Myös keltaisen vedyn valmistus tapahtuu elektrolyysiä käyttäen. Erona on, että elektrolyysiin tarvittava energia on vain aurinkoenergiaa. Vihreän vedyn muodostukseen käytetään uusiutuvien yhdistelmiä.



### 2.3 Vedyn tuotanto/kehitys tulevaisuudessa

Tällä hetkellä suurin osa vedystä tuotetaan vielä käyttämällä uusiutumattomia energianlähteitä, kuten maakaasua, öljyä ja hiiltä. Teknologiaa vedyn valjastamiseen käyttöön energiantuotannossa pyritään kehittämään, jotta saataisiin tuotettua vetyä puhtaasti sekä uusiutuvista raaka-aineista. Tulevaisuudessa vetyä tullaan mahdollisesti tuottamaan lämpökemiallisissa prosesseissa hajottamalla vesimolekyylejä käyttäen hyödyksi esimerkiksi ydin- ja aurinkovoimalaitosten korkeita lämpötiloja. Levillä ja bakteereilla toteutettava biologinen muodostaminen on myös tutkimustyön alla. (Ball and Weeda 2015)

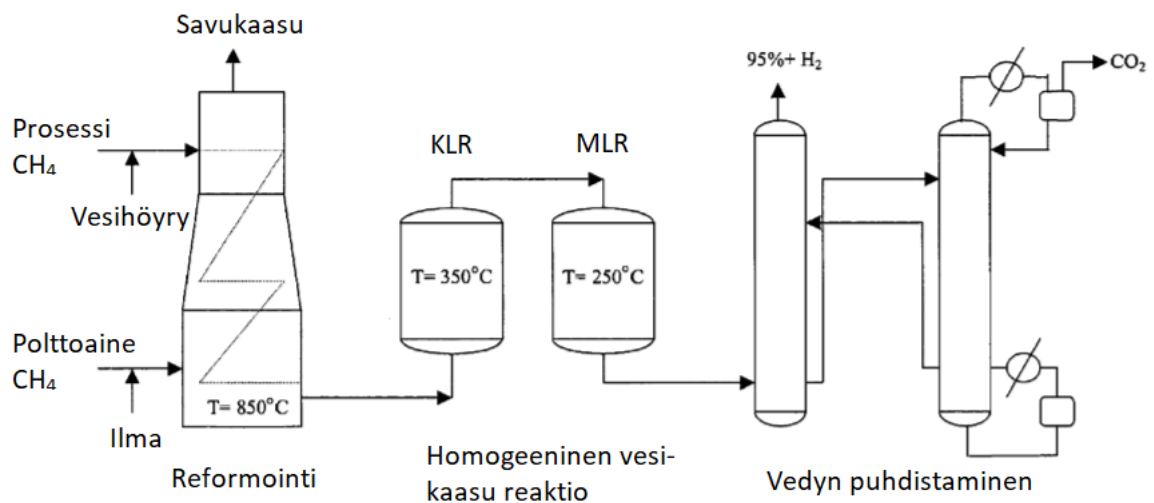
Kansainvälisen energiajärjestö IEA:n vuoden 2019 raportin mukaan hyvin suunnitellut ja toteutetut kaasuputkiverkostot voisivat toimittaa tuplasti energiaa nykyaikaisiin sähköverkkoihin verrattuna. Tämän takia kaasutalouden ja etenkin biokaasupohjaisten menetelmien oletetaan herättävän kiinnostusta. Arvioidaan, että tänä päivänä yli 730 miljoonaa tonnia öljykvivalenttia (Mtoe), joka on yli 20 % vuotuisesta maakaasun kysynnästä maailmanlaajuisesti, pystyttäisiin tuottamaan uusiutuvain keinoin. 2040-luvulla yli 80 miljoonaa tonnia öljykvivalenttia vähähiilistä vetyä arvioidaan olevan suoraan loppukäyttäjien eli yksityistalouksien tai asukkaiden käytössä. IEA:n vuoden 2019 raportti listaa skenaarioita tulevaisuuden raaka-aineen käyttömääristä. Erään skenaarion mukaan vuotuinen biometaanin kulutus olisi hieman alle 80 Mtoe vuonna 2040. Kestävän kehitys -nimisen skenaarion mukaan maakaasun käyttö kasvaisi 10 % 2020-luvun loppuun mennessä. Biometaanin käyttö kasvaisi yli 200 Mtoe:een vuoteen 2040 mennessä. Lisäksi yli 25 Mtoe:ta vähähiilistä vetyä pumpataan kaasuverkostoon energiankuljetuksen vuoksi. Uusiutuvasti tuotetut kaasut tulevat olemaan 7 % energiakäyttöön tarkoitettujen kaasujen kokonaistarjonnasta ja niiden käyttö kasvaa. Yli 15 % energiakaasuista on uusiutuvasti tuotettua Kiinassa sekä EU-alueella 2040. Kestävän kehityksen -nimisen arvion mukaan hiilidioksidipäästöjä tullaan vuotuisesti pienentämään noin 500 miljoonaa tonnia vuodessa vuonna 2040, mikäli maakaasun käyttöä siirretään kohti uusiutuvasti valmistettuja kaasuja.

Uusiutuvasti tuotettu vety on herättänyt kiinnostusta, koska sen on esitetty kykenevän auttamaan ilmastopäästöjen hallinnassa monilla aloilla, joilla päästövähennyksien toteuttaminen on haastavaa. Vedyn tuottaminen on vielä tänä päivänä kallista. Vähiten maksavat tuotantovaihtoehdot kustantavat noin 12–15 dollaria miljoonaa Britannian lämpöyksikköä (MBtu)

eli noin 1,055 megajoulea kohti. Uusiutuvasti tuotetun vedyn pumppaaminen kaasuputkilinjoihin oletetaan laskevan sen tuotantokustannuksia, mutta myös antavan mahdollisuuden kehittää vedynjakelujärjestelmää kokonaisuudessaan yhteiskuntainfrastruktuurissa. Tämän oletetaan lisäävän vedyn käyttöä asuinrakennus-, teollisuus- ja energiasektoreilla (*World Energy Outlook 2019* 2019).

### 3 VEDYN REFORMOINTI METAANISTA

Vedyn valmistaminen höyryreformoinnilla on tällä hetkellä yleisin tapa tuottaa vetyä. Perinteisen menetelmän tarkoitus on tuottaa jostain käytetystä hiilivedystä puhtaudeltaan jopa 99 % vetyä (Barelli et al. 2008). Höyryreformointi on työssä käsiteltävä pääaihe ja tässä luvussa käydään läpi sen prosessiin kuuluvat vaiheet.



**Kuva 3.** Höyryreformoinnin prosessikaavio (Barelli et al. 2008).

Kuvassa 3 kuvataan höyryreformointiprosessin eri vaiheet kokonaisuudessaan. Alkuun on varsinainen reformointivaihe, johon lähtöaine, yleensä metaani, viedään. Metaani reagoi vesihöyryn kanssa korkeassa lämpötilassa katalyytin avulla, jonka jälkeen lämpötilaa alennetaan homogeenista vesi-kaasureaktiota (Water-Gas Shift Reaction, WGS) varten. Vesi-kaasureaktiossa hyödynnetään reformointivaiheessa syntynyt hiilimonoksidi ja muodostetaan lisää vetyä. Yllä olevassa kuvassa lyhenteessä KLR puhutaan korkealämpötilareaktiosta ja

MLR matalalämpötilareaktiosta. Nimiensä mukaisesti KLR lämpötila on hieman korkeampi kuin MLR, pysyen kuitenkin melko alhaisena 200–450 °C lämpötilassa. Edeltävien vaiheiden jälkeen vety sisältää erinäisiä epäpuhtauksia, joiden poistaminen tapahtuu painevaihtelu- ja kalvotekniikoita hyödyntämällä. Prosessilaitteistoon voidaan myös lisätä aiemmin mainittu CCS-laitteisto.

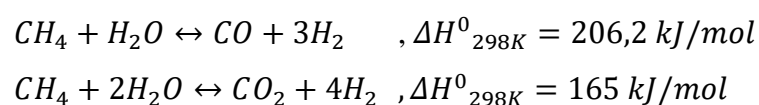
### 3.1 Puhdistaminen

Höyryreformoinnissa reaktioaineena käytettävä maakaasu koostuu 95 % metaanista, 1 % tyyppistä, 0,5 % hiilidioksidista ja sisältää ylimääräisenä ainesosana muun muassa rikkiyhdisteitä (Yukesh Kannah et al. 2021). Ennen reformointiaasiaan syöttämistä maakaasu puhdistetaan eli siitä poistetaan ylimääräiset ainesosat, jotka voivat olla haitallisia reaktiolle tai laitteistoille. Poistettavia ovat esimerkiksi rikkiyhdisteet.

### 3.2 Höyryreformointi

Vedyn valmistusprosessin ensimmäisessä työvaiheessa epäpuhtauksista puhdistettuun maakaasuun sekoitetaan vesihöyryä. Höyryreformoinnissa (Steam Methane Reforming) voidaan käyttää muitakin lähtöaineita kuin metaania, kuten etaania, metanolia, etanolia, asetonia sekä suurempiketjuisia hiiliyhdisteitä (LeValley et al. 2014). Reaktion lähtöaineet nostetaan korkeaan lämpötilaan ja paineeseen ja niiden annetaan reagoida keskenään. Reaktiossa on yleensä mukana jokin katalyytti, joka saa reaktion aikaan. Höyryreformoinnin reaktiolämpötila on tyypillisesti 800–1000 °C, ja reaktio on paineistettu 3–25 bar:n paineeseen (Yukesh Kannah et al. 2021). Esimerkiksi nikkelpohjaisen katalyytin reaktiopaine on 14–20 atm (Barelli et al. 2008).

Höyryreformointivaihe on endoterminen ja siksi reaktioon on syötettävä energiaa reaktion ylläpitämiseksi. Tämän vuoksi reaktiossa ylläpidetään edellä mainittua 800–1000 °C asteen lämpötilaa. Prosessissa tapahtuu seuraavia kemiallisia reaktioita sekä sitoutuu seuraavat entalpiamäärät:



Kuten yllä nähdään, höyryreformointivaiheessa korkealämpötilaiseen prosessiastiaan syötetään joko maakaasusta tai biomassasta saatavaa epäpuhtauksista puhdistettua metaania ja sen annetaan reagoida prosessiastiaan metaanin sekaan syötetyn vesihöyryn kanssa. Prosessin lopputuotteina syntyy hiilimonoksidia CO, happea O<sub>2</sub>, hiilidioksidia CO<sub>2</sub> ja vetyä H<sub>2</sub>.

### 3.3 Homogeeninen vesi-kaasureaktio

Seuraavassa vaiheessa höyryreformointivaiheen jälkeiset reaktiotuotteet käyvät läpi vesi-kaasu vaihtoreaktiovaiheen. Muistetaan, että höyryreformointivaiheen lopputuotteina syntyy vetyä, hiilidioksidia ja hiilimonoksidia. Vesi-kaasu vaihtoreaktiovaiheessa jäljellä oleva hiilimonoksidi reagoi veden kanssa seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:



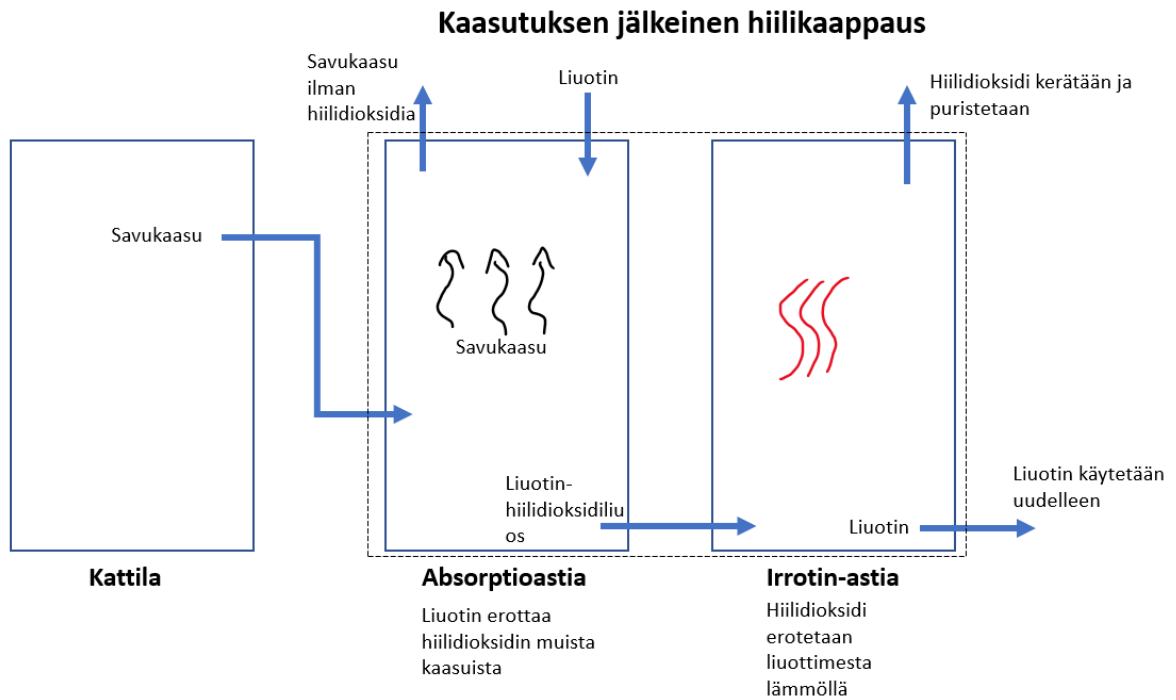
Lopputuotteena syntyy lisää vetyä sekä hiilidioksidia. Huomataan, että reaktion entalpiamuutos on eksoterminen eli reaktiosta vapautuu energiaa.

### 3.4 Painevaihtelu- ja kalvoerottelu

PSA-tekniikka (Pressure swing absorber) eli paineenvaihteluun perustuva absorbaattori on tuotekaasun puhdistamiseen tarkoitettu vaihe, jossa vedyn puhtaus saavuttaa jopa 99 % ja jopa hieman enemmänkin (Barelli et al. 2008). Puhdistuksen jälkeen vety varastoidaan siihen tarkoitettuihin säiliöihin.

### 3.5 Hiilen kaappaus- ja varastointiteknologia

Hiilen kaappaus- ja varastointi (CCS eli Carbon Capture and Storage) on teknologia, jonka on ilmoitettu pystyvän ottamaan talteen jopa 90 % hiilipohjaisia polttoaineita poltettaessa syntyviä CO<sub>2</sub>-päästöjä sähköntuotannossa ja teollisissa prosesseissa. Prosessin alussa hiilidioksidi erotetaan, jonka jälkeen se siirretään säilöntäpaikkaan ja säilötään. Säilöntäpaikat ovat köyhdytettyjä öljy- ja kaasukenttiä tai syväsuolaliuos pohjavesimuodostumia, jotka IPCC:n mukaan voivat säilyttää 99 % säilötystä epäpuhtaudesta yli 1000 vuoden ajanjaksolla (IPCC 2005).



**Kuva 4.** Polton jälkeinen hiilidioksidin talteenotto prosessi.

Hiilidioksidin talteenottoon on kolme käytettyä pääteknologiaa. Yleisin niistä on kuvassa 4 näkyvä polton jälkeinen hiilidioksidin talteenotto (Post-combustion capture). Tässä kaasutuksesta puhuttaessa tarkoitetaan mitä tahansa teollista polttoaineprosessia, jolla polttoaine muuttuu savukaasuksi. Työn kannalta puhutaan höyryreformoinnista. Reformointiprosessin tai jonkin muun polttoaineen muutosprosessin jälkeen syntynyt savukaasu ohjataan liuotinta sisältävään absorptioastiaan. Yleisesti liuottimena käytetään ainetta, joka sitoo hiilidioksidin itseensä. Hiilidioksidi jää reaktioastiaan liuottimeen sitoutuneena, kun muu savukaasu poistuu reaktioastian yläosasta. Hiilidioksidin sisältävä liuotinlineos menee seuraavaksi irrotin-astiaan, jossa lämmön avulla saadaan irrotettua hiilidioksidi kaasumuotoon ja kerättyä astian yläosasta. Liuotin kerätään astian pohjalta ja käytetään uudelleen.

Pakkaamisen jälkeen hiiliyhdisteet kuljetetaan laivalla, kuorma-ajoneuvolla tai kaasuputkella lopulliseen sijoituspaikkaan. Loppusijoitettava aine pumpataan putkilla syväälle maan alla sijaitseviin geologisesti sopiviksi valittuihin paikkoihin. Soveltuvia paikkoja ovat esimerkiksi vanhat kaasu- ja öljykentät. (Todd 2019) (Vizzaccaro et al. 2018)

### 3.6 Katalyytit

Höyryreformointiprosessissa ja vesi-kaasureaktioissa käytetään katalyytteja madaltamaan reaktion käynnistymisen kynnyksiä. Katalyyttien käyttämiseen liittyy myös joitain ongelmia, jotka ovat haitallisia reaktion kannalta. Käytettyjä katalyytteja on monenlaisia, mutta yksi yleisimmistä höyryreformointiprosessissa käytettävistä katalyyteistä ovat muun muassa nikkelipohjaiset katalyytit (Sehested 2006).

Höyryreformointiin ja vesi-kaasureaktioihin vaikuttaa useita tekijöitä. Reaktio-olosuhteet, kuten lämpötila ja paine, S/C-suhde (steam to carbon ratio) eli syöttösuhde vesihöyrylle ja hiilelle, syötetty raaka-aine, reaktorityyppi ja kaasun viipymäaika reaktorissa. Fysikaalisia tekijöitä ovat katalyytin toimintaan vaikuttavat katalyytin koostumus, douppausaineen hajautuminen, sintrautuminen ja myrkyttyminen.

Yleisiä ongelmia, mitä SMR ja WGS prosessien ja katalyyttien kanssa on koksautuminen eli hiilen muodostuminen kuumennuksessa korkeassa lämpötilassa happisaturaation ollessa vähäinen. Koksautumisessa hiilivedyt kertyvät huokoiseksi massaksi reaktiolaitteiden pintaan. Toiseksi, reaktorien kuumissa kohdissa tapahtuu sintrautumista. Sintrautuessa partikkelit liittyvät toisiinsa kuumuuden ansiosta muodostaen isompia massoja. Kolmanneksi, useimmat reformointiprosesseissa käytettävät katalyytit eivät siedä reaktiutilavuuteen joutuvaa rikkiä. Rikin vaikutuksesta katalyytin aktiivisuus laskee, koska liittyessään katalyytin aktiivisiin kohtiin se estää katalyyttia toimimasta. Toisaalta pieni määrä rikkiyhdistettä voi myös vähentää koksautumista. (LeValley et al. 2014)

## 4 MUITA VEDYN TUOTANTOMENETELMIÄ

Vetyä voidaan tuottaa lähes kaikesta hiilivetyjä sisältävistä molekyyleistä. Vety ei suoraan ole energianlähde, vaan vedystä puhutaan energiankantajana eli vety on tuotettava jollakin menetelmällä. Valmistusmenetelmiä tunnetaan tällä hetkellä muutamia pääsuuntauksia. Näissä pääteknologioissa on vaihtelua sisäisesti, koska aiheet ovat jatkuvan tutkimuksen alla. Yleisimmin käytetty teknologia vedyn tuotannossa on höyryreformointi. Tässä työssä perehdymme tarkemmin höyryreformointiin ja jätämme muut menetelmät vähemmälle

huomiolle. Vedyntuotantomenetelmiä on olemassa useampia, kuin mitä tässä työssä ja kapaleessa käytävä muutama yleinen tuotantotapa.

Eräs tunnettu menetelmä vedyn tuotannossa on elektrolyysi, jossa sähkövirran avulla hajotetaan vesimolekyyli vedyksi ja hapeksi ja vapautunut vety kerätään talteen. Elektrolyysin hyviä puolia ovat yksinkertainen prosessi ja toteutus sekä vedyn korkea puhtausaste. Elektrolyysi on tunnettu jo 100 vuotta sitten, mutta sitä on nyt alettu laajemmin ottamaan käyttöön vedyn tuotannon sovellutuksia varten.

Hiilipohjaisten kiinteiden materiaalien tai kiinteän biomassan kaasutus on prosessi, jossa muunnetaan ilman polttamista, mutta korkeassa lämpötilassa, hiilivedyt hapen ja vesihöyryn avulla hiilimonoksidiksi, -dioksidiksi ja vedyksi. Tämän jälkeen hyödynnetään homogeenista vesi-kaasureaktiota, jossa syntynyt hiilimonoksidi reagoi vesihöyryn kanssa muodostaen lisää vetyä ja hiilidioksidia.

Termisessä krakkauksessa erotetaan korkean lämpötilan, ja mahdollisen katalyytin, avulla metaanin sisältämät hiili ja vety eli pyrolyysin lopputuotteena syntyy energiakäyttöön haluttun vedyn lisäksi hiiltä. Esimerkiksi nikkelpohjaisen katalyytin kanssa lämpötila on hieman yli 500 °C (Muradov and Veziroğlu 2005). Ilman katalyyttia tarvitaan yli 700 °C lämpötila termisen krakkauksen tapahtumiseksi (Steinberg 1999). Mikäli halutaan tehokkaammin reaktiota, tulee lämpötilan olla huomattavasti korkeampi. Katalyyttisille prosesseille yli 800 °C ja ilman katalyyttia tapahtuville prosesseille yli 1000 °.

Autothermal Reforming eli ATR on katalyyttipohjainen vedyn tuottamiseen lähtöainekaasusta osittaisen hapetuksen ja myöhemmän reformoinnin avulla käytetty tekniikka. Alkuun rikkiyhdisteet poistetaan. Tämän jälkeen kaasu esilämmitetään ja se viedään ATR-reaktorin 30–100 baarin paineistettuna. Ensimmäisessä vaiheessa kaasu hapetetaan osittain ja annetaan reagoida vesihöyryn kanssa. Syntyy synteetikaasua. Seuraavaksi synteetikaasu viedään uudestaan reaktoriin reagoimaan katalyyttien kanssa saavuttaakseen termodynaamisen tasapainon. Lopulta synteetikaasuvirta jäähdytetään. Synteetikaasukomponentit erotellaan, jolloin vety saadaan talteen. ATR voidaan toteuttaa omana teknologianaan tai yhdistettynä

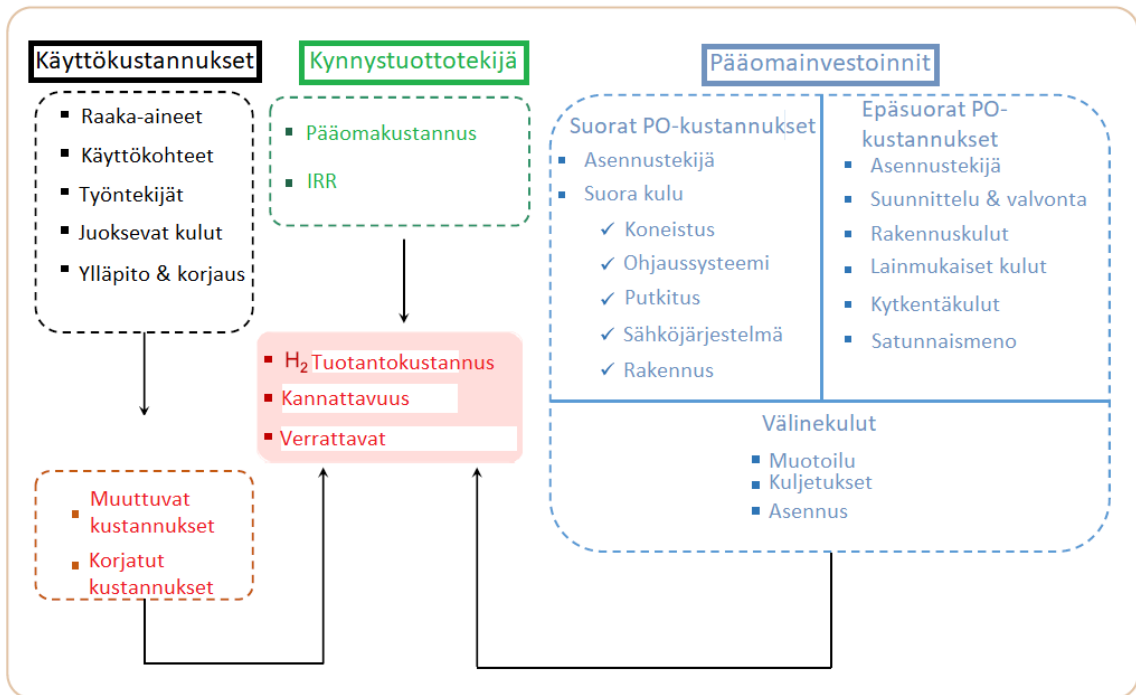
SMR kanssa. Tämä tunnetaan nimellä yhdistetty reformointi. (Autothermal Reforming (ATR) - Syngas Generation 2022)

Elektrolyysissä lähtöaineena on vesi ja energianlähteenä aurinko ja auringosta tuotettu sähköenergia. Sähkövirran avulla vesi pilkkotaan molekyylihinsä eli hajotetaan vedyksi ja hapeksi. Vety vapautuu kaasuna, jolloin se voidaan kerätä putkella talteen. Elektrolyysi on nykypäivänä yleistymässä oleva tekniikka.

## **5 HÖYRYREFORMOINNIN KUSTANNUSTEKIJÄT**

Uutta energiantuotantoon soveltuvaa teknologiaa tulee kehittää, jotta pystyttäisiin vastaamaan ilmastotavoitteisiin. Huomattavaa on kuitenkin, että valmistus- ja prosessisuunnittelussa tulee ottaa huomioon myös kustannustekijöitä taloudellisen optimoinnin kannalta. Vedyn valmistukseen kuuluvista vaiheista aiheutuu tuotantotavasta huolimatta erilaisia vakio-kustannuksia. Taloudellisen analyysin kannalta tulee luokitella eri parametrit tuotannon eri vaiheista. Vuonna 2020 tehty, taloudellisesti eri vedyntuotantomenetelmiä vertaileva, artikkeli (Yukesh Kannah et al. 2021) muodosti kustannusanalyysissa kustannustekijät alla olevan kuvan mukaisesti.





**Kuva 5.** Tutkimuksen kustannusanalyysin sisältämät parametrit. Muokattu Yukesh Kannah et al. 2021

Kuvasta nähdään, että vedyn tuotantokustannukset ja tuotannon kannattavuuden muodostavat laitoksen käyttökustannukset, jotka voivat olla muuttuvia tai korjattuja, toimintaan sidottava pääomainvestointi ja pääomakustannuksien eli WACC päälle haluttava oletettu tuotto-prosentti IRR (Internal Rate of Return). Yleisesti ottaen, mitä korkeampi on IRR, sitä haluttavampi investointi on toteuttaa.

Toiminnan aloittamiseen kuluu pääomakustannuksia. Näitä on suoraan esimerkiksi materiaaleihin ja tavaroihin liittyvät kustannukset. Epäsuoria kustannuksia on mm. asennus, suunnittelu sekä valvonta ja erilliset lainmukaiset menot. Myös välineisiin liittyy pääomakustannuksien sitomista. Käyttökustannuksiksi taas mielletään valmiin laitoksen toiminnasta aiheutuvat kulut ja menot. Näitä ovat esimerkiksi raaka-aine ja materiaalikustannukset, työntekijöiden palkkaus, ylläpito- ja korjauskulut sekä muut juoksevat kustannukset, kuten vesi tai sähkö.

## 5.1 Kustannustaulukko

Tässä työssä tarkastellaan höyryreformointia vedyntuotantoprosessina. Taloudellisessa vertailuosiossa pohdimme prosessin kustannustekijöitä ja vertaamme prosessia muihin samankaltaisiin. Työn tarkoituksena on vertailla eri metaania raaka-aineena käyttäviä vedynmuodostustekniikoita taloudelliselta ja ekologiselta kannalta ja löytää mahdollisia eroavaisuuksia ja syitä niille.

Löytyneestä kirjallisuudesta valittiin vertailtaviksi soveltuvat prosessit. Lähtökohtaisesti näitä ovat metaanista vedyksi -muotoiset, mutta vertailun vuoksi mukaan on otettu myös suosiotaan kasvattava elektrolyysiperusteinen menetelmä. Taulukosta valittuja arvoja vertailuun ovat tuotetun vedyn hinta kilogrammaa tuotettua vetyä kohti ja tuotantoon tarvittavat pääomakustannukset kappaleessa 4 kuvatun kaavion mukaisesti.

**Taulukko 1.** Eri vedyntuotantomenetelmien kustannustaulukko.

Prosessi		Energia-lähde	Raaka-aine	Pääomakustannus [M€]	Vedyn hinta [€/kg]
SMR +CCS		Fossiiliset polttoaineet	Metaani	207.33	2.08
SMR ilman CCS		Fossiiliset polttoaineet	Metaani	165.48	1.90
Metaanin +CCS	ATR	Fossiiliset polttoaineet	Metaani	168.31	1.36
Elektrolyysi kosähköllä	aurin-	Aurinko	Vesi	10.99–49.91	5.23–21.05

Taulukossa 1 (Kayfeci et al. 2019) on esitetty eri metaanille käytettyjä prosesseja vedyn muodostamiseksi. Lisäksi taulukkoon vertailuun on otettu mukaan elektrolyysi, joka on tänä päivänä yleistymässä ollut tekniikka.

## 6 TULOSTEN TARKASTELU

### 6.1 Taloudellinen tarkastelu

Edellisen kappaleen kustannustaulukosta on huomattavissa, että vaikka SMR- ja ATR-laitteistot vastaavat pitkälti toisiaan, niiden pääomakustannuksissa on suuri ero. ATR-laitteiston hinta CCS kanssa vastaa noin SMR-laitteistoa ilman CCS:ää. CCS-laitteiston lisäys nostaa pääomakustannuksia ja samalla kilomääräisiä kustannuksia, mutta se on oleellinen osa kohti päästövähennyksiä. Tuleeko yrityksen kannalta halvemmaksi poistaa hiiltä suoraan prosesseista CCS:n avulla ilmasta? Eli tuleeko yritykselle halvemmaksi kustantaa laitteisto, kuin maksaa hiilikompensaatiokustannuksia?

ATR-menetelmällä tuotetun vedyn kilohinta on selkeästi matalampi kuin höyryreformointiprosessissa. ATR todennäköisesti voisi olla halvempi sen takia, että operaation kaksi ensimmäistä lämpöprosessia suoritetaan samassa prosessiastiassa, johon jäähdytysvaiheen lämpö myös tuodaan. Tällöin prosessiin käytettäviä energiakustannuksia on vähemmän ja myös materiaalikustannuksia tulee huomattavasti vähemmän ajatellen pääomakustannuksia. Kilohinta ja pääomakustannukset yhdistettynä nämä ominaisuudet voisivat tehdä ATR-menetelmästä selkeästi edullisimman.

Metaanista vedyksi -teknologiasta poikkeavana mukana oleva elektrolyysi osoittautuu laitteistona selkeästi edullisimmaksi. Prosessin raaka-aineena käytettävä vesi on hyvin edullista ja prosessiin tarvittava energia tulee auringosta eli on käytännössä hyvin halpaa. Kuitenkin elektrolyysin tuotettavan vedyn kilohinta on hyvin korkea verrattuna metaanista vedyksi -prosessien vastaaviin. Maksaako prosessilaitteisto kuitenkin sen verran paljon? Toisaalta tuotantohinnat voivat vaihdella sen mukaan, missä paikassa elektrolyysillä tuotetaan vetyä. Siinä käytetty sähkö maksaa ja varsinkin eri maissa sähkön hinnat vaihtelevat huomattavastikin. Luonnollisesti aurinkoisilla alueilla aurinkosähkön tuottaminen on kannattavampaa tiettyssä ajassa, kuin vaikkapa napa-alueilla, joissa talvet ovat pitkiä ja pimeitä. Vaikka reformointilaitteisto on kalliimpi toteuttaa, on elektrolyysillä vedyn tuottaminen selkeästi hinnaikkaampaa. Negatiivisena puolena on, että elektrolyysi tarvitsee prosessiinsa makeaa vettä eli merivesi ei käy.

Yleisiä prosessien kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi maakaasun eli raaka-aineen hinnat, laitoksen sijainti kaasuverkostoon nähden, eri teknologioiden hinnat sekä laitteistojen kuljetus muualta. Myös CCS-prosessin jälkituotteesta hiilidioksidista on hankkittava eroon kuljettamalla se loppusijoituspaikoille. Myös katalyyttien valinta vaikuttaa kustannuksiin ja siten katalyyttien aktiivisuus/kustannussuhde täytyy huomioida.

## 6.2 Ekologinen tarkastelu

Kuten aiemmasta kustannustaulukosta huomataan, SMR- ja ATR-tekniikat käyttävät raaka-aineenaan fossiilisia polttoaineita. Kun alkuun puhuttiin hiilen lyhyestä kierrosta, ei se tässä toteudu. Tekniikkaan täytyisi lisätä joko CCS tai raaka-aineen täytyisi olla biopohjainen uusiutuvasta biomassasta valmistettu. Fossiilisten polttoaineiden käyttöä tulisi siis vähentää ja siirtyä yhä enemmän hiilen lyhytkiertoisiin biopolttoaineisiin.

Biomassasta valmistettu raaka-aine tarvitsee mädättämön biokaasun tuotantoa varten. Jos mietitään paikkoja, mihin tällaisia laitteistoja voitaisiin sijoittaa esimerkiksi kustannustehokkaasti ja mahdollisimman ekotehokkaasti ajateltuna, voitaisiin harkita jätelaitosten yhteyteen rakennettavia yhdistelmälaitoksia. Jätelaitosten yhteydessä on paljon mädätystä sisältävää prosessia. Myös esimerkiksi sekajätteestä vapautuu paljon metaania. Ekologisuuden kannalta tämä metaani olisi hyvä kerätä talteen ja käyttää energiaprosessiin. Tällä saataisiin hiilijalanjälkeä pienemmäksi.

Kustannuksellisesti ajateltuna biomassalla tehtävät prosessit saattavat vaatia erillisiä lisälaitteistoja biomassan muuntamiseen kaasuksi ja täten laitokseen tulee lisäkustannuksia. Eli kustannuksellisuuden mielessä fossiilisten käyttäminen on edullisempaa, mutta toisaalta kuitenkin, jos biolaitteistoja pystyttäisiin yhdistämään ottaen huomioon ekologisuus, biopohjaiset laitokset voisivat kokonaiskuvassa olla edullisempia ratkaisuja myös tiukentuvien päästömääräysten kannalta. Sijoittamalla niitä esimerkiksi juuri jätelaitosten yhteyteen tai kehittämällä keinoja, miten laitteet saataisiin suoraan kuluttajien lähetyville, voitaisiin saada luotua ekotehokkaita ja myös samalla kustannustehokkaita ratkaisuja.

Ekologisuuteen vaikuttavat myös prosesseissa käytettävät aineet ja materiaalit sekä niiden valmistus ja valmistukseen käytettävän energian puhtaus. Katalyyttien valinta vaikuttaa

aiemmin mainitun tavoin kustannustekijöihin, mutta sillä on myös ekologisia vaikutuksia. Jotkut katalyytteina käytetyt aineet ovat ympäristölle sellaisenaan haitallisia, joten niiden käyttämisessä ja hävittämisessä täytyy olla huolellinen. Myös CCS-menetelmää käytettäessä on huomioitava esimerkiksi hiilidioksidia sitovan liuottimen osalta ympäristöasioita.

Biopohjaiset tekniikat yhdessä esimerkiksi elektrolyysin kaltaisten tekniikoiden rinnalla ovat tulevaisuudessa todennäköisesti merkittävässä roolissa päästökysymysten ratkaisussa. Jo olemassa olevien, fossiilisilla polttoaineilla käyvien reformointilaitteistojen muuttaminen biopohjaisiksi on todennäköisesti kustannuksellisesti helpompi, kuin rakentaa kokonaan uusia laitoksia prosesseja varten. Elektrolyysilaitteistojen rakentaminen voisi sijoittua paikkoihin, joissa esimerkiksi auringosta saatavaa energiaa on runsaasti saatavilla. Tällöin voitaisiin hyödyntää puhdas energia puhtaasti tuotettavaksi vedyksi.

## **7 YHTEENVETO**

Tässä työssä esiteltiin perinteinen höyryreformointiprosessi ja siihen liittyvä hiilen kaapaustekniikka. Näiden lisäksi sivuttiin vedyntuotannon historiaa, nykyhetkeä ja myös mitä tulevaisuus pitää sisällään. Lopuksi suoritettiin eri metaanista vedyksi -tekniikoiden taloudellista ja ekologista vertailua ja pohdintaa aiheeseen liittyen.

Koska tulevaisuuden tavoite ja trendi on saavuttaa päästötön eli hiilivapaa yhteiskunta, tarkasteltiin työn aihetta kestävän kehityksen periaatteiden mukaisesti. Hiilivapaa yhteiskunta edellyttää fossiilisista polttoaineista luopumista ja siirtymistä uusiutuviin lähteisiin. Reformointiprosessissa tämä tarkoittaa siirtymistä fossiilisesta maakaasusta biovalmisteiseen kaasuun. Toisaalta biokaasuun siirtymisen lisäksi voitaisiin käyttää CCS-menetelmää lyhytkiertoisenkin hiilen varastoimiseksi takaisin maaperään. Tällöin päästöt pienenisivät entisestään. On huomioitava, että itse prosessit vaativat energiaa, jolloin negatiivispäästöisiä niistä ei saada, ellei prosessin käyttöenergiaa tuoteta puhtaalla energialla.

Kustannusvertailussa elektrolyysi osoittautui pääomakustannuksellisesti halvimmaksi. Toisaalta elektrolyysiin tarvitaan isoja määriä uusiutuvaa sähköä. Sitä ei tällä hetkellä ole vielä paljon saatavilla, joten elektrolyysiin käytettävä sähkö on mahdollisesti peräisin halvemmista, uusiutumattomista lähteistä. Metaanista vedyksi -teknologioista taas ATR-menetelmä

on edullisin. Vertaillen tuotantohintoja kilogrammaa kohti, huomattiin, että elektrolyysin hinnat asettuvat korkeimmalle ja reformointiprosessien ja tässäkin ATR on alimpana. Ekologisuutta ajatellessa täytyisi kustannuksissa ottaa huomioon myös esimerkiksi päästökompensaatioiden määrä, jotka mahdollisesti puuttuvat tulosten laskennasta. Näitä ei vielä nykyisin ole, mutta on tulevaisuudessa mahdollisesti yksi huomioon otettava osa-alue.

## 8 LÄHTEET

Autothermal Reforming (ATR) - Syngas Generation 2022 - last update [Homepage of Air Liquide], [Online]. Cited 10.2.2023. Available: <https://www.engineering-airliquide.com/autothermal-reforming-atr-syngas-generation>.

*World Energy Outlook 2019*, p. 587-88. 2019. Paris: OECD Publishing.

BALL, M. and WEEDA, M., 2015. The hydrogen economy – Vision or reality? Compendium of Michael Ball, Angelo Basile and T. Nejat Veziroglu Hydrogen Energy Volume 4: Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy. Published by Elsevier in 2015, ISBN: 978-1-78242-364-5. Available: <http://www.elsevier.com/books/compendium-of-hydrogen-energy/ball/978-1-78242-364-5>.

BARELLI, L., BIDINI, G., GALLORINI, F. and SERVILI, S., 2008. Hydrogen production through sorption-enhanced steam methane reforming and membrane technology: A review. *Energy (Oxford)*, **33**(4), pp. 554-570.

IPCC, 2005. *Carbon Dioxide Capture And Storage*.

KAYFECI, M., KEÇEBAŞ, A. and BAYAT, M., 2019. Chapter 3 - Hydrogen production. In: F. CALISE, M.D. D'ACCADIA, M. SANTARELLI, A. LANZINI and D. FERRERO, eds, *Solar Hydrogen Production*. Academic Press, pp. 45-83.

LEVALLEY, T.L., RICHARD, A.R. and FAN, M., 2014. The progress in water gas shift and steam reforming hydrogen production technologies – A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**(30), pp. 16983-17000.

MOTIVA, 2020-last update, Vety. Available: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/nain\\_liikut\\_viisaasti/valitse\\_auto\\_viisaasti/energiالاhteet/vety](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/energiالاhteet/vety) [Aug 30, 2021].

MURADOV, N.Z. and VEZIROĞLU, T.N., 2005. From hydrocarbon to hydrogen–carbon to hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, **30**(3), pp. 225-237.

PETROFAC, 2022-last update, The difference between green hydrogen and blue hydrogen. Cited 10.2.2023. Available: <https://www.petrofac.com/media/stories-and-opinion/the-difference-between-green-hydrogen-and-blue-hydrogen/>.

SEHESTED, J., 2006. Four challenges for nickel steam-reforming catalysts. *Catalysis today*, **111**(1), pp. 103-110.

Vizzaccaro, M., Spagakos, M., Loizou, S. and Chen, K., 2018. *Carbon capture and storage technologies for the sustainable use of fossil fuels*. Cited 10.2.2023. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=wRIghxK-7rg&t=5s>

STEINBERG, M., 1999. Fossil fuel decarbonization technology for mitigating global warming. *International Journal of Hydrogen Energy*, **24**(8), pp. 771-777.

TODD, F., 2019-last update, What is carbon capture and storage technology and how does it limit CO2 emissions?. Cited 23.5.2022. Available: <https://www.nenergybusiness.com/features/carbon-capture-storage-technology-co2-emissions/>.

YUKESH KANNAH, R., KAVITHA, S., PREETHI, PARTHIBA KARTHIKEYAN, O., KUMAR, G., DAI-VIET, N. and RAJESH BANU, J., 2021. Techno-economic assessment of various hydrogen production methods – A review. *Bioresource technology*, **319**, pp. 124175.