

Lauri Pelkonen

VEDYN TUOTANTOTEKNOLOGIAT

VEDYN TUOTANTOTEKNOLOGIAT

Lauri Pelkonen
Opinnäytetyö
Kevät 2022
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Lauri Pelkonen

Opinnäytetyön nimi: Vedyn tuotantoteknologiat

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Methods of hydrogen production

Työn ohjaaja: Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: Kevät 2022

Sivumäärä: 18

Opinnäytetyön aiheena oli tehdä selvitys vedyn tuotantoteknologioista. Työn tavoitteena oli selvittää miten ja minkälaisista lähteistä vetyä nykypäivänä tuotetaan. Työn toimeksiantaja on Oulun ammattikorkeakoulu. Oulun ammattikorkeakoulu haluaa pysyä alan koulutuksessa ajan tasalla ja on kiinnostunut sisällyttämään vedyn energiatekniikan opetukseen lähitulevaisuudessa.

Työssä lähdettiin liikkeelle tarkastelemalla tämänhetkisiä vedyn tuotantomenetelmiä. Tarkastelun pohjalta valittiin tärkeimmät vedyn tuotannon raaka-aineet sekä niihin liittyvät tuotantomenetelmät niiden tämänhetkisen tai lähitulevaisuuden roolin kannalta. Valtaosa tämänhetkisestä vedyntuotannosta on peräisin fossiilisista polttoaineista. Uusiutuvista energianlähteistä tuotettu ns. puhdas vety on tällä hetkellä pienessä roolissa, mutta on suuressa energiapoliittisessa nosteessa eri tahojen ottaessa askelia kohti päästöttömämpää yhteiskuntaa.

Valtaosa tällä hetkellä tuotetusta vedystä tuotetaan maakaasusta erilaisin reformointiprosessein. Toiseksi suurin lähde on kivihiili, josta vetyä valmistetaan kaasutuksella. Pienin osuus tuotetusta vedystä on uusiutuvista energialähteistä. Näistä tähän työhön tarkasteluun on otettu vesi, josta elektrolyysillä tuotetaan päästötöntä, puhdasta vetyä. Tuotantoteknologioita on olemassa näiden lisäksi monia muita ja kehitteillä on jatkuvasti lisää. Tässä työssä tehtyä tutkimusta on mahdollista hyödyntää suunniteltaessa vedyn sisällyttämistä insinööriopintoihin sekä erilaisissa jatkotutkimuksissa.

Asiasanat: vety, elektrolyysi, kaasutus, reformointi

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	VEDYN TUOTANTOTEKNOLOGIAT	6
3	VETYÄ VEDESTÄ	8
3.1	Alkalinen elektrolyysi	8
3.2	Polymeerimembraani	9
3.3	Kiinteäoksidikenno	10
4	VETYÄ MAAKAASUSTA	12
4.1	Höyryreformointi	12
4.2	Autoterminen reformointi	13
4.3	Metaanin terminen hajoaminen	13
4.4	Metaanin kuivareformointi	14
5	VETYÄ HIILESTÄ	15
6	YHTEENVETO	16
	LÄHTEET	17

1 JOHDANTO

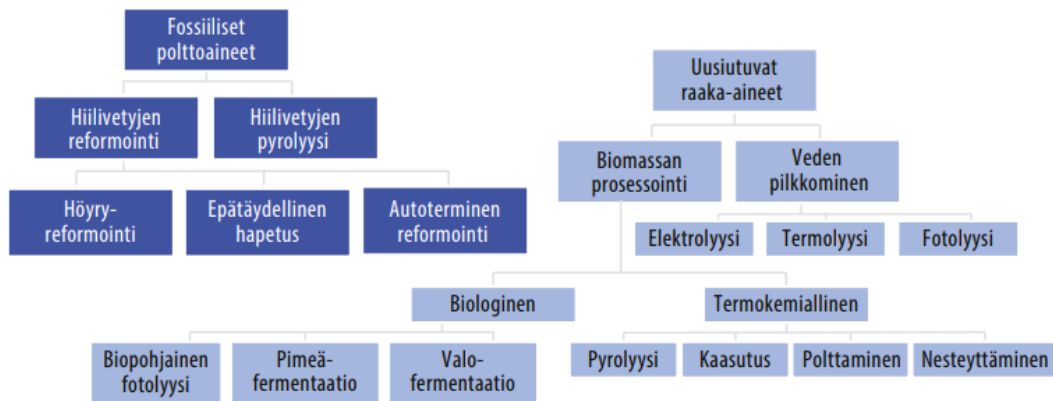
Valtaosa tänä päivänä tuotetusta vedystä on peräisin fossiilisista polttoaineista. Noin 60 % tuotetusta vedystä on peräisin laitoksista, jotka tuottavat päätuotteenaan vetyä. Suurin osa päätuotteena tuotetusta vedystä on peräisin maakaasusta, osa hiilestä ja murto-osa vedestä. Kolmannes maailmalla tuotetusta vedystä syntyy sivutuotteena laitoksista ja prosesseista, joiden päätuote on jokin muu kuin vety.

Vety on monikäyttöistä, nykypäivän teknologioilla voidaan tuottaa, säilöä ja siirtää vetyä monin eri tavoin. Vetyä voidaan tuottaa useista eri lähteistä, sitä voidaan siirtää kaasuna tai nesteenä ja siitä voidaan tehdä sähköä ja metaania lämmittämään koteja tai polttoaineeksi eri kulkuneuvoille. Puhtaalla vedyllä on ennennäkemätön poliittinen ja kaupallinen noste. Maailmalla esiintyy lukuisia projekteja ja linjauksia vetytalouteen liittyen. Vetytalous voi olla vastaus moniin energiahaasteisiin. Se mahdollistaa monien alojen, mm. raskaan liikenteen, kemikaali- ja rautateollisuuden, joissa päästöjen merkittävä vähentäminen on haastavaa, hiilijalanjälkien pienentämisen. Vetytalous myös auttaa parantamaan ilmanlaatua ja vahvistaa energiavarmuutta. (1.)

Tämä opinnäytetyö on selvitystyyppinen tutkimusraportti tämänhetkisistä vedyn tuotantoteknologioista. Opinnäytetyön tarkoituksena on luoda yleiskuva vedyn tuotantomenetelmistä, mistä raaka-aineista ja millaisin keinoin vetyä tuotetaan. Työssä selvitetään nykypäivän tärkeimmät tuotantoteknologiat sekä kyseisten prosessien toiminta pääpiirteisesti. Työn tilaaja Oulun ammattikorkeakoulu on kiinnostunut sisällyttämään vedyn aiheena Energiatekniikan opetussuunnitelmaan, mihin tämä opinnäytetyö toimii yhtenä pohjustuksena.

2 VEDYN TUOTANTOTEKNOLOGIAT

Vetyä voidaan valmistaa monin eri tavoin niin fossiilista kuin uusiutuvista lähteistä. Vetyä voidaan tuottaa päätuotteena, tai se voi olla sivutuote jostain toisesta teollisesta prosessista. Maakaasu on tällä hetkellä yleisin lähde vedyn tuotannolle. Maakaasun osuus päätuotteena tuotetusta vedystä maailmanlaajuisesti on n. 75 %. Toiseksi suurin lähde on kivihiili, jonka osuus on 23 %. Jäljelle jäävä osuus tuotetaan öljystä ja vedestä. (1.) Kuvassa 1 nähdään vedyn eri tuotantomenetelmiä, joista tärkeimpiin perehdytään tässä työssä.



KUVA 1. Vedyn tuotannon pääasialliset menetelmät (2)

Vetyä voidaan valmistaa fossiilisista polttoaineista kuten maakaasusta ja kivihiilestä. Kivihiilestä vetyä valmistetaan kaasutuksella. Fossiilisia lähteitä käytettäessä syntyy sivutuotteena hiilidioksidipäästöjä. Näitä päästöjä on kuitenkin mahdollista ehkäistä eri tavoin. Voidaan käyttää prosessia, jossa hiili ei pääse hapettumaan hiilidioksidiksi, esimerkiksi metaanin pyrolyysi. Toinen vaihtoehto on hyödyntää CCS ja CCU-teknologioita, eli hiilidioksidin talteenotto-, käyttö- ja varastointiteknologioita. (2.)

Vetyä voidaan valmistaa myös uusiutuvista energianlähteistä kuten biomassasta mm. bio- tai termokemiallisesti tai vedestä sähkön avulla. Veden elektrolyysi on sähkökemiallinen prosessi, joka hajottaa veden hapeksi ja vedyksi. Elektrolyysiteknologioita on olemassa neljää tyyppiä: alkalinen

(ALK) ja polymeerimembraani (PEM) sekä anionivaihtomembraani ja kiinteäoksidikenno (SOEC).
 (4.) Tällä hetkellä veden elektrolyysillä tuotettu vety vastaa alle 0,1 %:a päätuotteena tuotetusta vedystä. (2.)

Vedystä puhuttaessa käytetään usein värikoodeja sen perusteella, miten vety on tuotettu. Harmaa tai harvemmin musta ja ruskea vety viittaa fossiilista lähteistä, kuten hiilestä tai maakaasusta tuotettuun vetyyn. Sininen vety on myös fossiilisista lähteistä, mutta sen tuotannossa on hyödynnetty CCUS (Carbon capture, utilisation and storage) -teknologiaa eli hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia. Vihreä vety on tuotettu uusiutuvasta sähköstä eli sähköstä, joka on tuotettu uusiutuvista energianlähteistä. (1.) Yleisimmin käytetyt värikoodit ovat harmaa, sininen ja vihreä mutta käytössä on myös muita riippuen käytetystä tuotantoteknologiasta tai raaka-aineen alkuperästä. Vedyn väriluokittelu nähdään kuvasta 2.

	Terminology	Technology	Feedstock/ Electricity source	GHG footprint*
PRODUCTION VIA ELECTRICITY	Green Hydrogen	Electrolysis	Wind Solar Hydro Geothermal Tidal	Minimal
	Purple/Pink Hydrogen		Nuclear	
	Yellow Hydrogen		Mixed-origin grid energy	Medium
PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS	Blue Hydrogen	Natural gas reforming + CCUS Gasification + CCUS	Natural gas coal	Low
	Turquoise Hydrogen	Pyrolysis	Natural gas	Solid carbon (by-product)
	Grey Hydrogen	Natural gas reforming		Medium
	Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (lignite)	High
	Black Hydrogen		Black coal	

KUVA 2. Vedyn väriluokittelu (3)

3 VETYÄ VEDESTÄ

Elektrolyysissä vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi sähkön avulla. Yksinkertaistettuna elektrolyyseri koostuu anodista, katodista ja elektrolyytistä. Elektrolyysissä positiivisesti varautuneet ionit ja kationit liikkuvat varatulle katodille ja pelkistyvät. Negatiivisesti varautuneet ionit ja anionit liikkuvat positiivisesti varatulle anodille ja hapettuvat. Elektrolyysiprosessi on pakotettu hapetus-pelkistysreaktio, jossa vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi. (4.)

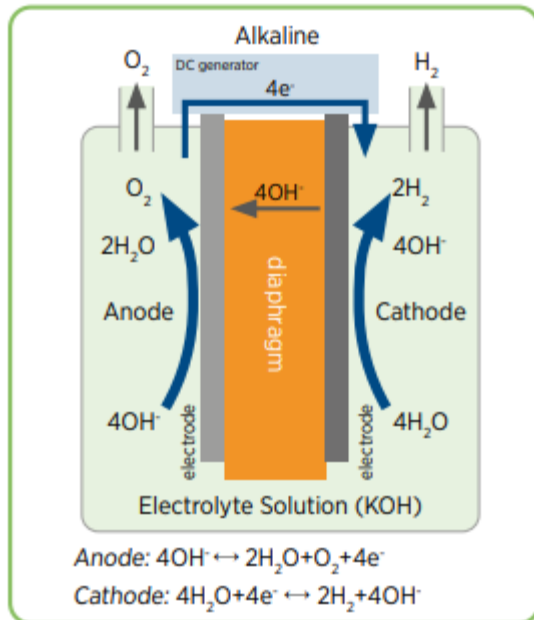
Vettä tarvitaan n. 9 litraa jokaista tuotettua vetykiloa kohden. Prosessin häviöt huomioiden veden tarve voi olla jopa 24 litraa tuotettua vetykiloa kohden. (1.) Jos kaikki päätuotteena tuotettu vety (70Mt) tuotettaisiin elektrolyysin avulla, tarkoittaisi se 617 miljoonan kuutiometrin kysyntää vedelle, joka nykypäivän energiasektorin vedenkulutuksesta vastaisi 1,3 %:a. Sähkön kannalta vastaava skenaario tarkoittaisi 3600 TWh:n kysyntää sähkölle, mikä on enemmän kuin Euroopan unionin vuotuinen sähköntuotanto. (2.) Elektrolyysiprosessin sivutuotteena syntyy happea. Happea voidaan hyödyntää erilaisissa teollisuuden prosesseissa, mm. metalli-, kemian-, lasi- sekä sementtiteollisuus tarvitsevat happea prosesseihinsa. Happea voidaan hyödyntää myös voimalaitos- ja lämpökattiloissa. (1.) Pienemmällä skaalalla sivutuotteena syntynyttä happea voidaan käyttää myös terveydenhuollon sektorilla (2).

Nykypäivän elektrolyysereiden hyötysuhteet vaihtelevat 60 %:n ja 81 %:n välillä teknologiasta ja kuormasta riippuen. Pääteknologiat tänä päivänä ovat alkalinen, polymeerimembraani ja kiinteäoksidikenno. Näistä alkalinen ja polymeerimembraani ovat jo kaupallisessa käytössä, kun kiinteäoksidikenno on vielä kehitysvaiheessa.

3.1 Alkalinen elektrolyysi

Alkalielektrolyysi on kehittynyt, kaupallinen teknologia. Se on ollut käytössä jo 1920-luvulta. Prosessissa anodi ja katodi ovat upotettuna elektrolyyttiliuokseen. Elektrolyytinä käytetään vesipohjaisia kalium- ja natriumhydroksiliuoksia. Tähän johdetun tasajännitevirran vaikutuksesta vetyä muodostuu katodille ja happea anodille. Alkalielektrolyysissä elektrodit erotetaan toisistaan huokoisilla kalvoilla, millä pyritään välttämään vedyn ja hapen reagointi, joka voi johtaa

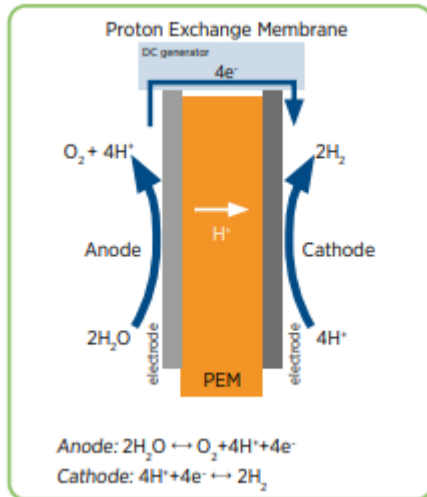
räjähdykseen (5). Alkalielektrolyysin reaktiot ja kennon rakenne nähdään kuvassa 2. Alkalielektrolyysikennon hyötysuhde on tavallisesti 63–70 % sekä prosessin käyttölämpötila 60–80 °C. Alkalielektrolyysikennon kuormitus on 10 % minimikuormasta täyteen nimelliskapasiteettiin (1).



KUVA 3. Alkalinen elektrolyysi (4)

3.2 Polymeerimembraani

Polymeerimembraanielektrolyysit (Proton Exchange Membrane, PEM) otettiin käyttöön 1960-luvulla. Polymeerimembraanielektrolyysissä elektrolyytinä toimii polymeerikalvo. Polymeerikalvon molemmiin puolin sijaitsevat katalyyttiset kerrokset, joiden pinnoille elektrodit on kiinnitetty. Vetyionit kulkevat polymeerikalvon läpi muodostaen vetyä katodilla. Vetyionit eli protonit nostavat polymeerikalvon happamuusasteen todella korkeaksi, minkä takia katalyytteinä voidaan käyttää vain jalometalleja korroosion ehkäisemiseksi. (5.) Prosessi ja kennon rakenne nähdään kuvassa 3.



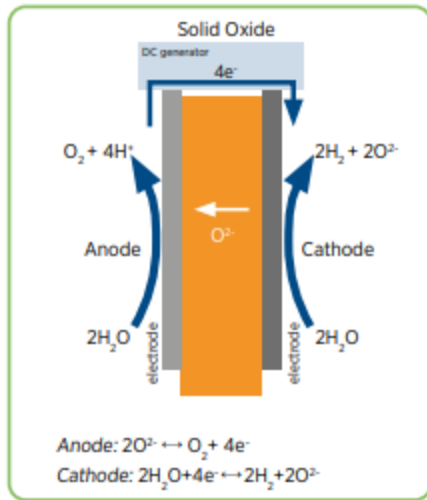
KUVA 4. Polymeerimembraani (4)

Kiinteän elektrolyytin johdosta polymeerimembraanikeno on kooltaan alkalielektrolyysikennoa pienempi (6). Polymeerimembraanielektrolyysin hyötysuhde on 56–60 % ja käyttölämpötila 50–80 °C. PEM-elektrolyysin kuormitusalue on 0–160 % eli sitä on mahdollista ylikuormittaa hetkellisesti olosuhteiden salliessa. Polymeerimembraanikennot vaativat kalliita materiaaleja ja niiden elinikä on tällä hetkellä alkalikenoja lyhyempi, joten ne ovat harvinaisempia. (1.)

3.3 Kiinteäoksidikeno

Kiinteäoksidikennot (Solid Oxide Electrolyser Cell, SOEC) on yleisimmin käytetyistä teknologioista varhaisimmassa kehitysvaiheessa eikä niitä ole vielä kaupallistettu (1). Kiinteäoksidielektrolyysin reaktio on sama kuin alkalisisessä, mutta käyttölämpötila on 700–1000 °C (7). Korkea lämpötila tarkoittaa, että prosessissa käytetään veden sijasta höyryä. Kiinteäoksidikenoissa elektrolyytinä

toimii keraaminen materiaali, kuten stabiloitu zirkoniumoksidi. (1.) Kiinteäoksidikennon reaktiot ja rakenne nähdään kuvassa 4.



KUVA 5. Kiinteäoksidielektrolyysi (4)

Toisin kuin alkali- ja polymembraanikenoissa, kiinteäoksidikenna on mahdollista käyttää toiseen suuntaan polttokennana muuttaen vetyä takaisin sähköksi. Kiinteäoksidielektrolyysin hyötysuhde on 74–81 % ja kuormitusalue 20–100 %. (1.) Kiinteäoksidielektrolyysin lyhyttä käyttöikää pidetään sen keskeisempänä ongelmana (6). Eri elektrolyysiteknologioiden ominaisuuksia on vertailtu taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Elektrolyysiteknologioiden ominaisuuksia

	Alkaline electrolyser			PEM electrolyser			SOEC electrolyser		
	Today	2030	Long term	Today	2030	Long-term	Today	2030	Long term
Electrical efficiency (% LHV)	63–70	65–71	70–80	56–60	63–68	67–74	74–81	77–84	77–90
Operating pressure (bar)	1–30			30–80			1		
Operating temperature (°C)	60–80			50–80			650 – 1 000		
Stack lifetime (operating hours)	60 000 – 90 000	90 000 – 100 000	100 000 – 150 000	30 000 – 90 000	60 000 – 90 000	100 000 – 150 000	10 000 – 30 000	40 000 – 60 000	75 000 – 100 000
Load range (% relative to nominal load)	10–110			0–160			20–100		
Plant footprint (m ² /kW _e)	0.095			0.048					

4 VETYÄ MAAKAASUSTA

Reformointi on yleisin tuotantotapa maakaasusta tuotetulle vedylle. Vedyn tuotantoon kuluu vuosittain n. 205 miljardia kuutiometriä maakaasua, mikä vastaa 6 %:a maailmalla käytetystä maakaasusta. (1.)

4.1 Höyryreformointi

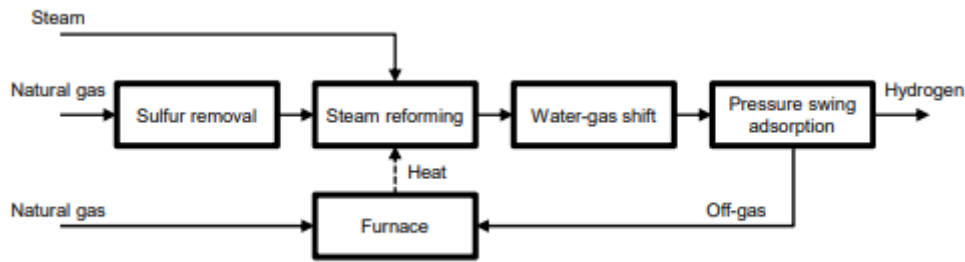
Höyryreformointi (Steam Methane Reforming, SMR) on vedyn tuotantoteknologioista yleisin käytössä oleva, sillä tuotettu vety vastaa 48 % vedyn tuotannosta (8). Reformointiprosessissa käytetään lähes kokonaan metaanista koostuvaa maakaasua. Maakaasu toimii prosessissa sekä raaka-aineena että polttoaineena, n. 30–40 % syötetystä maakaasusta poltetaan lämmönlähteeksi. (1.) Höyryreformoinnin olennaisin reaktioyhtälö nähdään kaavasta 1 (9).



Endoterminen prosessi vaatii korkean käyttölämpötilan (700–900 °C) tasaiseen vedyn tuottoon. Reformointiprosessi tapahtuu jalometallisissa reformointiputkissa, joissa on nikkelipohjainen katalyytti. (9.) Maakaasu reagoi höyryn kanssa muodostaen vetyä ja hiilimonoksidia. Reaktiossa syntynyt hiilimonoksidi reagoi höyryn kanssa vesikaasuprosessissa (Water Gas Shift, WGS) tuottaen lisää vetyä sekä hiilidioksidia. (8.) Hieman eksoterminen vesikaasuprosessi on kaksiosainen, ensimmäinen, nikkelipohjaista katalyyttiä hyödyntävä osa käyttää hyväksi korkeammassa lämpötilassa (300–450 °C) tapahtuvaa korkeampaa reaktionopeutta. Toisessa osassa lämpötila on 200–250 °C ja katalyytti on kuparipohjainen. Vesikaasuprosessin reaktioyhtälö nähdään kaavasta 2. (9.)



Vety erotellaan syntyneestä kaasusta paineenvaihteluadsorptiolla (Pressure Swing Adsorption, PSA). Tästä ylijäävä kaasu poltetaan maakaasun mukana lämmöksi prosessille. (8.) Yksinkertaistettu prosessikaavio nähdään kuvasta 6.



KUVA 6. Maakaasun höyryreformointiprosessi (10)

4.2 Autoterminen reformointi

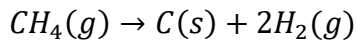
Osittaishapetus on yksi keino vähentää reformointiprosessin energiavaatimusta. Osittaishapetus perustuu eksotermiseen reaktioon, joka käynnistyy ilman katalyyttiä. Katalyytitön prosessi vaatii korkean käyttölämpötilan (1100–1500 °C) joka aiheuttaa suuria lämpötilaeroja reaktorissa. Osittaishapetusprosessin käyttökustannukset ovat pienemmät kuin höyryreformoinnissa mutta tarve ilmanerotusyksikölle hapentuottoon nostaa kuitenkin pääomakustannuksia. Osittaishapetusta voidaan käyttää yhdessä höyryreformoinnin kanssa. Tätä prosessia kutsutaan autotermiseksi reformoinniksi (Autothermal reforming, ATR). Autoterminen reformointi on termisesti neutraali, eli osittaishapetusreaktion tuottama lämpö vastaa höyryreformointiprosessin tarvetta. Prosessin lämpötila on matalampi verrattuna pelkkään osittaishapetukseen. Osittaishapetuksen reaktioyhtälö nähdään kaavasta 3 ja autotermisen reformoinnin reaktioyhtälö kaavasta 4. Autoterminen reformointi yhdistää osittaishapetuksen matalammat käyttökustannukset ja höyryreformoinnin tehokkaamman vedyntuotannon. (9.)



4.3 Metaanin terminen hajoaminen

Metaanin terminen hajoaminen voidaan jakaa kahteen kategoriaan: katalyyttinen (Thermocatalytic decomposition of methane, TCD) ja ei-katalyyttinen (Thermal decomposition of methane, TDM). Prosessissa metaani hajotetaan hiileksi ja vedyksi korkeassa lämpötilassa. Molemmissa

prosesseissa sivutuotteena syntyy kiinteää hiiltä, joka voidaan hyötykäyttää. Molemmat prosessit ovat hiilidioksidivapaita. (11.) Jotta TDM-prosessissa päästäisiin teollisen käytön kannalta järkeviin reaktioaikoihin, vaatii se yli 1000 °C:n lämpötilan (10). Katalyytin avulla prosessin käyttölämpötila saadaan pienemmäksi. Metaanin termisen hajoamisen reaktioyhtälö nähdään kaavasta 5 (12).

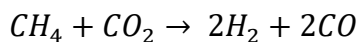


KAAVA 5

TDM-prosessiin voidaan soveltaa kaasutusta (Thermal decomposition of methane with gasification, TDMG). Tällöin sivutuotteena syntynyt hiili kaasutetaan tuottaen lisää vetyä. Metaanin termisen hajoaminen on vielä kehitysvaiheessa oleva teknologia (8). TCD-prosessi on jäänyt laboratoriotasolle pääosin katalyytin deaktivoitumisen takia (11).

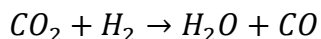
4.4 Metaanin kuivareformointi

Metaanin kuivareformoinnissa (Dry Methane Reforming, DMR) hiilidioksidi reagoi metaanin kanssa muodostaen synteettistä kaasua. Prosessin reaktioyhtälö nähdään kaavasta 6. (12.)



KAAVA 6

Kuivareformoinnissa vedyn ja hiilimonoksidin suhde on alle 1:n, sillä sivureaktion tapahtuvassa käänteisessä vesikaasureaktiossa (kaava 7) muodostuu lisää hiilimonoksidia. Vastaava suhde esim. höyryreformointiprosessissa on 3:1. (12.)



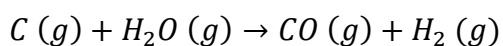
KAAVA 7

Kuivareformointi on vielä kehityksessä oleva teknologia. Sen suurimpia haasteita on endotermisen reaktion vaatimat korkeat energiakustannukset sekä nikkelpohjaisen katalyytin deaktivoituminen prosessissa muodostuvan kaksin johdosta. Prosessi vaatii myös jatkuvan hiilidioksidivirran, joka vaatii hyvin erityiset olosuhteet. (9.)

5 VETYÄ HIILESTÄ

Vedyn tuottaminen hiilestä kaasutuksella on hyvin kehittynyt teknologia, joka on ollut käytössä vuosikymmeniä kemikaaliteollisuudessa ammoniakkin tuotannossa. Vedyn tuottaminen hiilestä aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä n. 19 tonnia vetytonnia kohden eli melkein kaksinkertaisen määrän maakaasuun verrattuna. (2)

Kaasutus on prosessi, jossa hiilipohjainen materiaali muutetaan synteettiseksi kaasuksi. Kaasutuksen materiaalina voidaan käyttää eri raaka-aineita kuten hiiltä, biomassaa tai muovijätettä. Kaasutusprosessissa raaka-aine, happi ja vesihöyry reagoivat korkeassa lämpötilassa. Kaasutusprosessissa syntyvästä synteettisestä kaasusta erotellaan vesikaasuprosessin avulla vety. Kaasutus on kehittynyt teknologia ja sen raaka-ainekustannukset ovat höyryreformointiprosessia pienemmät. Hiilen käyttö raaka-aineena tarkoittaa kuitenkin huomattavia hiilidioksidipäästöjä. Kaasutus ei ole saavuttanut höyryreformoinnin kaltaista suosiota suurten päästöjen ja pääomakustannusten sekä matalan energiatehokkuuden johdosta. Kaasutuksessa prosessin käyttölämpötila (500–1400 °C) sekä paine riippuvat käytetystä kaasutusteknologiasta. (6.) Hiilen kaasutusteknologioita ovat mm. kiintopetikaasutus, leijupetikaasutus ja plasmakaasutus (13). Prosessin reaktioyhtälö nähdään kaavasta 8 (6).



KAAVA 8

Plasmakaasutusprosessi on jopa 19 % muita kaasutusprosesseja tehokkaampi. Plasmakaasutuksessa raaka-aine hajotetaan synteettiseksi kaasuksi korkeassa lämpötilassa plasmasoihdun avulla. Synteesikaasu menee lämmönsiirtimen läpi puhdistusprosessiin. Puhdistetusta kaasusta erotellaan vety paineenvaihteluadsorptiolla. Plasmakaasutusprosessi tuottaa yhdestä hiilikilosta n. 0,1–0,17 kg vetyä. Korkean lämpötilan takia prosessissa syntyviä jätteitä voidaan hyödyntää paremmin muihin kaasutusteknologioihin verrattuna. Tämä tarkoittaa, että prosessissa syntyvä synteesikaasu on korkeampilaatuista ja sen vetypitoisuus korkeampi. (13.)

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tehdä selvitys vedyn tämänhetkisistä tuotantoteknologioista. Työn tilaaja Oulun ammattikorkeakoulu on kiinnostunut sisällyttämään vedyn energiatekniikan opetussuunnitelmaan. Tässä työssä tehtyä selvitystä voidaan käyttää hyödyksi, kun suunnitellaan sisällytettävää sisältöä.

Työhön valittiin kolme tärkeintä lähdettä vedyn tuotannolle tämänhetkisen tai lähitulevaisuuden suosion perusteella. Fossiilisista polttoaineista, tässä tapauksessa maakaasusta ja kivihiilestä tuotettu vety vastaa vedyn tuotannon suurimmasta osuudesta. Maakaasusta vetyä valmistetaan pääosin erilaisin reformointiprosessein, joihin tässä työssä perehdyttiin. Reformointiprosesseissa maakaasu ja vesihöyry reagoivat keskenään muodostaen vetyä sisältävää synteetikaasua Metaanin höyryreformointi on prosesseista kehittynein ja yleisin. Autoterminen reformointi on höyryreformoinnin sovellutus. Metaanin terminen hajoaminen ja kuivareformointi ovat vielä kehitteillä olevia tuotantomenetelmiä.

Vedestä vetyä tuotetaan elektrolyysillä. Elektrolyysissä vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi. Yleisimmät elektrolyysiteknologiat ovat alkalinen elektrolyysi ja polymeerimembraani, jotka ovat olleet käytössä jo vuosikymmeniä sekä kiinteäoksidikenno, joka on vielä kehitysvaiheessa. Puhtaan vedyn tuotanto on tällä hetkellä vielä pienessä roolissa veden osuuden ollessa alle prosentin vedyn tuotannosta.

Kivihiili on toiseksi suurin lähde vedyn tuotannolle: se vastaa n. neljänneksen päätuotteena tuotetusta vedystä. Hiilestä vetyä valmistetaan kaasuttamalla, joka on pitkälle kehittynyt teknologia. Kaasutusprosessin käyttökustannukset ovat matalat mutta sen energiatehokkuus on heikko, ja hiilipohjaisen materiaalin käyttäminen tarkoittaa korkeita hiilidioksidipäästöjä.

Tilaaja voi hyödyntää tässä työssä tehtyä tutkimusta, kun vetyä aletaan sisällyttämään energiatekniikan koulutusohjelmaan. Työssä käsiteltävät tuotantoteknologiat ovat tällä hetkellä hallitsevassa roolissa ja voin hyvin kuvitella niiden olevan isossakin roolissa tulevien opiskelijoiden opinnoissa olettaen, että vety on niissä esillä.

LÄHTEET

1. International Energy Agency 2019. The Future of Hydrogen, Paris. Hakupäivä 12.5.2022. https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf.
2. Valtioneuvosto 2022. Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet. Hakupäivä 12.5.2022. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163901/VNTEAS_2022_21.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
3. Global Energy Infrastructure 2021. Kuvakaappaus. Artikkelissa Hydrogen – data telling a story. Hakupäivä 16.5.2022. <https://globalenergyinfrastructure.com/articles/2021/03-march/hydrogen-data-telling-a-story/>.
4. International Renewable Energy Agency 2020. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up the Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal. Hakupäivä 12.5.2022. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf.
5. Sankir, Mehmet & Sankir, Nurdan Demirci 2017. Alkaline Water Electrolysis. Hydrogen Production Technologies. Hakupäivä 12.5.2022. ProQuest Ebook Central. Vaatii käyttöoikeuden.
6. Abraham, Martin 2017. Encyclopedia of Sustainable Technologies. Saint Louis. Elsevier.
7. Calise, Francesco, D'Accadia, Massimo Dentice, Santarelli, Massimo, Lanzini, Andrea & Ferrero, Domenico 2019. High-Temperature Electrolysis. Solar Hydrogen Production. Processes, Systems and Technologies. Hakupäivä 16.5.2022. Elsevier.
8. Keipi, Tiina, Tolvanen, Henrik & Konttinen, Jukka 2018. Economic analysis of hydrogen production by methane thermal decomposition: Comparison to competing technologies. *Energy Conversion and Management*, 159, 264-273. Hakupäivä 16.5.2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.063>.
9. Carapellucci, Roberto & Giordano, Lorena 2020. Steam, dry and autothermal methane reforming for hydrogen production: A thermodynamic equilibrium analysis. *Journal of Power Sources* 469, 228391. Hakupäivä 16.5.2022. Elsevier ScienceDirect -tietokanta. Vaatii käyttöoikeuden. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228391>.
10. Keipi, Tiina 2017. Technology Development and Techno-Economic Analysis of Hydrogen Production by Thermal Decomposition of Methane. Tampereen teknillinen yliopisto.

https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/114321/keipi_1519.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

11. Välimäki, Emmi, Yli-Varo, Lasse, Romar, Henrik & Lassi, Ulla 2021. Carbons Formed in Methane Thermal and Thermocatalytic Decomposition Processes: Properties and Applications. Hakupäivä 20.5.2022 <https://doi.org/10.3390/c7030050>.
12. Abdullah, Bawadi, Ghani, Nur Azeanni Adb Ghani & Vo, Dai-Viet N. 2017. Recent advances in dry reforming of methane over Ni-based catalysts. Journal of Cleaner Production 169, 170-185. Hakupäivä 20.5.2022. Elsevier ScienceDirect -tietokanta. Vaatii käyttöoikeuden.
13. Midilli, Adnan, Kucuk, Haydar, Topal, Muhammed Emin, Akbulut, Ugur & Dincer, Ibrahim 2021. A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. Hakupäivä 20.5.2022. Elsevier ScienceDirect -tietokanta. Vaatii käyttöoikeuden.