



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut  
Soojusjõuseadmete õppetool

MSJ40LT

*Juri Fjodorov*

**VESINIKU KAASAEGSED  
TOOTMISTEHNOLOOGIAD JA NENDE  
RAKENDAMISE VÕIMALUSED EESTIS**

Bakalaureusetöö

Autor taotleb  
tehnikateaduste bakalaureuse  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2016

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis professor Andres Siirde juhendamisel

“.....”.....201....a.

Töö autor

.....

allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....201....a.

Juhendaja

.....

allkiri

Lubatud kaitsmisele.

.....

õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....201... a.

.....

allkiri

TTÜ soojustehnika instituut  
Soojusjõuseadmete õppetool  
**BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE**  
2015 aasta sügis semester

Üliõpilane: Juri Fjodorov, 041017.....(nimi, kood)

Õppekava: Soojusenergeetika.....

Eriala: Soojusenergeetika.....

Juhendaja: professor Andres Siirde.....(amet, nimi)

Konsultandid: .....(nimi, amet, telefon)

**BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:**

**(eesti keeles) Vesiniku kaasaegsed tootmistehnoloogiad ja nende rakendamise võimalused Eestis.**

**(inglise keeles) Hydrogen modern production technologies and their application possibilities in Estonia.**

**Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Vesinik kütus- tema tulevikuvaatelised kasutusvõimalused	
2.	Ülevaade tootmistehnoloogiatest- allikad	
3.	Millised võimalused oleksid Eestis	
4.	Vesiniku tootmine biomassist ja teistest allikatest võrreldes maagaasiga	
5.	Kui vesiniku toota puidust?	

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:**

**Täiendavad märkused ja nõuded:**.....

**Töö keel: Eesti**

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt .....**Töö esitamise tähtaeg**.....

**Üliõpilane:** Juri Fjodorov...../allkiri/ .....kuupäev.....

**Juhendaja :**Prof. Andres Siirde...../allkiri/ .....kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöörde

# SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON .....	2
SISUKORD .....	4
EESSÕNA .....	5
<b>SISSEJUHATUS .....</b>	<b>6</b>
<b>1. VESINIK KUI KÜTUS- TEMA TÄNAPÄEVANE KASUTUS.....</b>	<b>8</b>
1.1 Vesiniku tulevikuvaated taastuvast ookeanist tulevast energiast .....	9
1.2 Vesinik on võib olla tuleviku mootr kütus. ....	10
1.2.1 Vesiniku kui kütusena kasutamiseks on vaja teha suuri investeeringuid.....	11
<b>2. ÜLEVAADE KESKKONNASÕBRALIKEST TOOTMISTEHNOLOGIATEST JA ALLIKATEST.....</b>	<b>12</b>
2.1 Kütuseelemendi tööpõhimõte .....	18
2.2 Enamkasutatavad kütuseelemendid .....	20
<b>3. VESINIKU AUTOD.....</b>	<b>22</b>
3.1 H2 sisepõlemismootoriga sõidukid .....	22
3.2 Vesiniku kütuseelementidega sõidukid .....	23
3.2.1 Kütuseelemendi PEM tööpõhimõtte.....	24
3.2.2 Uued BMW kütuseelemendiga sõidukid.....	25
3.2.3.TOYOTA MIRAI .....	25
3.2.4 Hyundai Tucson FCEV .....	26
3.3 Euroopa vesiniku kiirtee.....	26
<b>4. VESINIKU TOOTMINE BIOMASSIST JA TEISTEST ALLIKATEST VÕRRELDES MAAGAASIGA.....</b>	<b>28</b>
4.1 Mõned biomassi gaasistamise silmapaistvamad tehnoloogiad.....	32
4.1.1 Great Point Energy ning nende hüdrometaneerimise protsess.....	32
4.1.2. Milena gaasistamise protsess.....	33
4.1.3 Kokkuvõtte erinevatest biomassi gaasistamise reaktoritest.....	35
<b>5. MAJANDUSLIK ANANLÜÜS VESINIKU TOOTMISEST EESTIS .....</b>	<b>37</b>
<b>KOKKUVÕTE .....</b>	<b>39</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>41</b>
<b>KASUTATUD KIRJANDUS .....</b>	<b>43</b>

## EESSÕNA

Käes olev töö on valitud tudengi omal soovil. Antud teema on väga aktuaalne meie looduse ning ümbruskonna jaoks.

Materjalide ning andmete kogumisel aitas kaasa prof. Andres Siirde

Ühtlasi üliõpilane on väga tänulik prof. Andres Siirdele igasuguse abi eest lõputöö koostamisel.

## SISSEJUHATUS

Lõputöö teemaks on valitud vesiniku tootmine ning kasutamine Eestis, sest see element ei eralda põletamisel süsihappegaasi ning on väga keskkonnasõbralik. Keskkonnanormid muutuvad aina rangemaks ning energiatootjad, kaas arvatud ka autotootjad, näevad palju vaeva, et olla neile vastav. Seetõttu väga hea alternatiiv olekski vesinik. Hetkel on vesinik autokütusena kallim, kui naftast tooted kütused ( bensiin või diisel ). Selline olukord on tekkinud lihtsal viisil. Inimesed hakkasid kasutama laiemalt naftatootmeid alates 19 sajandist, ja selle pikka ajaloo tulemusena ongi naftatooted igapäevases kasutuses määravaks. Lisaks sellele on toimunud suur ning kiire naftatööstuse kasv 20 sajandi teises pooles. Vesinik on aga suhteliselt „noor“ kütus, mis veel vajab tootmistehnoloogia arenemist. Hetkel on see element leidnud laiemat kasutamist kosmose tehnoloogiates. Samas kasutatakse vesinikkloriidi ja ammoniaaki sünteesiks, mida omakorda kasutatakse lämmastikhappe tootmiseks. Selleks, et vesiniku kütuseelemendil põhinevad mootorid leiaksid laiemat kasutamist autotööstuses, ilmselt on vaja Euroopa Liidu sekkumist ja seadusandluse muudatust käsutavas vormis. Siis tuleks kiirelt rajada igale poole tanklaid ning massiliselt hakata tootma vesiniku peal töötavaid autosid. Kogu projekt on väga mastaapne ja vajab väga suuri investeeringuid, millega naftatootjad on juba eelnevalt korda saanud. Samas võib olla see ongi „see sama“ lükke, mida maailm vajab oma majanduse ärgatuseks ja tuleviku päästmiseks. Sest veel ca. kakskümmend aastat tagasi ehituses ei olnud nõutud nii rangelt kiivreid ja ohutusnõudeid või transpordi valdkonnas ei olnud nõutud sõidumeerikud. Analüüsides inimesed said aru, et elementaarsed kaitsevahendid ja kontrollimise süsteemid päästavad inimeste elusid ning autojuhid ei sõida enam paar päeva järjest, ning ei jää rooli taga magama. Need olid sellised otsused, mida otsustati ja seaduse poolest võeti vastu. Võib olla vesinik, kui mootorkütus ongi see, mille abil ongi õige aeg nüüd abistada meie keskkonda. Kui hoolime iseendast, siis tuleb hoolitseda ka meie loodusest.

Töö teostamisel vaatame erinevaid põhilisi kütuseelementide tüüpe. Need on: leeliselektrolüüdiga-, protooni vahetusmembraaniga-, elektrolüüdi-, sulakarbonaat-elektrolüüdi-, tahkeoksiid- elektrolüüdiga kütuseelemendid. Proovime välja arvutada, millest oleks Eesti võimalik toota vesinikku ja mida see tähendaks meie jaoks. Samas tutvume ka juba vesiniku kasutatavatega tehnoloogiatega, nagu näiteks auto-, keemia-, metalli- ja energiatööstus. Positiivne uudis on, et viimase kümne aasta jooksul kütuseelementi sisaldava süsteemi hind on langenud ca 5 korda. See annab lootust, et tulevik on ikkagi

keskkonnasõbralik. Huvitav on ka see, et vesinik on tegelikult universumi kõige levinum element, mis esineb peaaegu kõikides orgaanilistes ühendites ning seotud kujul ka kõigis organismides.

# 1. VESINIK KUI KÜTUS- TEMA TÄNAPÄEVANE KASUTUS

Vesinik on maailmas kõige levinum element. Vesiniku kasutatakse väga mitmetes tööstuse valdkondades. Väga palju vesinikku kulub ammoniaaki tootmiseks ( $\text{NH}_3$ ). Sellest edasi toodetakse lämmastiku põhjal väetiseid, sünteetilisi kiudusid, plastmasse ning erinevad ravimeid. Vesinikust ja kloorist toodetakse vesinikukloriidi ( $\text{HCl}$ ). Vesiniku kasutatakse erinevate orgaaniliste ainete tootmiseks. Näiteks metüülpiirituse tootmiseks kasutatakse vesiniku ja vingugaasi segu- gaasi sünteesil. Toiduainete tööstuses kasutatakse vesinikku näiteks margariini tootmiseks.

1999 aastal Island kuulutas välja oma plaani saada esimeseks, kes toetab vesinikule suunatud majandustegevust järgmise 30-40 aasta jooksul. Valitsus ja kohalikud ettevõtted hakkasid väga põhjalikult uurima erinevaid toote ning tarbimise võimalusi. Aastal 2000, väike saar Vaikse ookeani lõuna osas, nimega Vanuatu, liitus Islandi mõttega, kasutada vesinikku, kui kütust ja saada enda jaoks vajalikku energiat 100 protsenti taastuvatest allikatest. Hawaii, on ka väga rikkas saar taastuvate energia allikatega nagu näiteks, geotermaalne ja tuuleenergia, aga ikkagi on tugevalt sõltuvuses imporditavatest nafta toodetest. Hawaii tegi ka oma panuse vesiniku uurimiseks lootes, et saab toota ja eksportida vesinikku teistesse riikidesse. California, USA suurim bensini tarbija, hakkas arendama „Vesiniku maanteed“ aastal 2004.

Vaatamata esialgse entusiasmile, mõnedel on areng parem, kui teistel. Freyr Sverrisson sõnul, kes on energiavaldkonna sõltumatu konsultant Islandis, arvab, et Islandi valitsus ei ole vastuvõtnud piisavalt korrektseid meetmeid vesiniku sihtmärgi jõudmiseks. Hetkel riik omab ainult ühte vesiniku tankimise jaama aga samal ajal on investeeritud ka väga arvestatav rahahulk alumiiniumi sulatamise ning tootmise tööstusesse. Konsultandi sõnul oleks olnud mõislik investeerida vesiniku tehnoloogiatesse, sest investeering tähendaks majanduse jaoks pikaajalist kasvu, mitte alumiiniumi sulatamise, kus suures osas tootev kõrval produkt on  $\text{CO}_2$ . Hetkeseisuga Island ei hakka olema esimene vesiniku energiat kasutatav riik, vaid pigem saab maailma kõige kiiremini kasvava  $\text{CO}_2$  gaasi tootja. Samal ajal Jon Bjorn Skulason, kes on Islandi New Energy juht, vastab, et tegelikult riik on plaanist maha jäänud ainult 6-12 kuud. Tema sõnul, lisaks vesiniku tanklale, nad omavad kolm bussiliini kütuseelemendiga, on tehtud seadusandluses seaduse muudatused vesiniku autode omanike jaoks, kelle puhul ei rakendata automakse. On läbiviidud elanike küsitlus, mis näitab, et 90 protsenti elanikest pooldavad vesiniku majandust. Skulasoni sõnul nad täitavad oma eesmärgi ning enam pole näha mingeid takistusi.



Californias tänapäeval on 29 vesiniku tanklat ning aastal 2016 on plaan välja ehitada veel 29 tükki, kus juures tanklate projektid on valmis [1]. Nõnda nimetatud „Vesiniku maanteel“ on kasutuses orienteeruvalt 140 vesiniku kütuseelementidega autot ja 10 liinibussi. See on kõige suurem kogus üle maailma vesiniku tanklaid ja kütuseelementidega autosi ühes piirkonnas, kinnitab Chris White, kes on California Fuel Cell-i juhataja.

Üleminek vesiniku majandusele ikkagi kergitas mõningaid probleeme. Vesinik ei oma lõhna ning põleb läbipaistva leegiga, mis tähendab seda, lekkeid on väga raske tuvastada, kuigi jõuti järeldusele, et gaas on niivõrd kerge ja hajub niivõrd kiiresti, et lahtise plahvatuse tõenäosus on minimaalne. Paljud arvavad, et vesinik on väga plahvatusohtlik, näiteks võib tuua Hindenburgi katastroofi, kus 1937 aastal läks põlema õhulaev. Tegelikult laeval läks põlema ümbritsev membraan ja alles siis vesinik, mis teda kandis. Võib olla kindel, et vesiniku kütuseelementidega autod hakkavad olema veel turvalisemad, kui tavalise sisepõlemismootoriga autod. Seda kinnitavad enamus suurtest autotootjatest. [2]

## **1.1 Vesiniku tulevikuvaated taastuvast ookeanist tulevast energiast**

Euroopa Mere Energia Keskus ( EMEK ) on maailma juhtiv keskus, kes tegeleb lainete ning mere tõusude ja mõõnade uurimise töödega. Nimelt uuritakse, kuidas efektiivselt saavutada energiat merest ning ookeanist. EMEK on teinud väga mitu ning huvitavat innovatiivseid seadmeid elektrienergia tootmiseks. Nende hulgas on veealused „tuulikud“, mis toodavad energiat ookeani loodete ajal ning ka „Lainetajad“ mis lainete peal võnkumise ajal toodavad elektrienergiat. Mere Keskus viib läbi oma katseid Orkney saare lähedal, Šotimaal ning enamasti katab saare elektrienergia vajaduse.

Tänavu Euroopa Mere Energia Keskus otsustas teha investeeringu, mis majanduslikult pole otstarbekas, aga mis peaks andma uusi teadmisi ning võimalusi. Nimelt, keskus teeb 2 miljoni eurose investeeringu elektrienergia akumulatsiooniks. Avatud hanke võitis ettevõtte ITM Power, kes teeb Mere Keskuse jaoks 0,5 MW polümeerelektrolüüt membraan elektrolüüseri, mis saab hoiustada kuni 500 kilogrammi vesiniku. Põhimõtte on hoiustada elektri energiat vesiniku näol, siis kui saare vajadus on kaetud ning kui tekkib vajadus, siis kiirelt hakata vesiniku kütuseelemendi abil tootma elektrit. Elektrolüüser saab toota kuni 220 kg 24 tunni jooksul ning vesiniku puhtus hakkab ISO 14687 standardile vastav [ 3 ].



Joonis 1. EMEK Openhydro Loodete turbiin [4]

## 1.2 Vesinik on võib olla tuleviku mootori kütus.

Inimesed on leidnud vesinikule laia kasutamist, alates kosmosesse lendamiseset kuni igapäevaste toodete tegemiseks, nagu näites margariin või hambapasta. Ning kümme aastat hiljem vesinik leiab kasutamist ka pereautodes.

2015 aastal jõudis turule Hyundai Tucson koguses 1 000 sõidukit ja Toyota Mirai oma järgmise kütuseelemendi auto põlvkonnaga. Mitu teist autotootjad kinnitasid, et nemad tulevad kütuseelement autodega turule aastal 2017. Suur eelis kütuseelement autodel on see, et nad ei pea arendama gaaside heitmete vähendatavaid süsteeme, sest need heitmed lihtsalt puuduvad. Samas kütuseelement sõidukitel on suur eelis elektriautode vastu. Nende tankimine võtab palju vähem aega, kui viis minutit ja ühe paagitäiega saab läbida teekonda, mis on umbes 600 kilomeetrit. Seetõttu, et kütuseelement sõidukid on täiesti CO<sub>2</sub> gaasivabad, autotootjad on väga kindlad, et sellega võidavad tarbijate südameid. Ainuke puudus, vähemalt mõneks ajaks, on nende sõidukite puhul tanklate puudumine ning kallis tehnoloogia.

On olemas erinevaid võimalusi vesiniku tootmiseks. Saab teha puidust, kivisöest, tuulest, päikesest, aga kõige odavam hetkel toota ikkagi maagaasist, mis on ikkagi fossiilne kütus. Samas kui vaadata maailma kliima soojenemise probleeme, kui tervet pilti, siis lõppkokkuvõttes, võib olla toota vesiniku fossiilsetest kütustest on väga kallis, aga inimkond ei ole veel sellest aru saanud, sest tagajärjed on väga karmid [6].

## **1.2.1 Vesiniku kui kütusena kasutamiseks on vaja teha suuri investeringuid.**

Californias on plaanis saavutada aastaks 2035 1,5 miljonit sõidukit, mis hakkavad olema heitmegaasi vabad, ehk siis kütuseelementidega sõidukid. Lisaks sellele nad investeerivad ca 46 miljonit dollarit vesiniku tanklate välja ehitamiseks, ja seda aasta jooksul. Toyota kontsern oli ka liitunud selle kampaaniaga ning andis lisaks 7 miljonit dollarit. Aastal 2011 Shell Oil ja Toyota koos finantseerisid ühe vesiniku tankimise jaama ehitust, aga edaspidist koostööd välja ei tulnud, sest suured naftatootjad ei ole väga huvitatud alternatiiv kütusest. Algul California plaanis teha seaduse muudatust ning teostada nii nimetatud „vesiniku kiirteed“ nafta importijate ja rafineerimistehaste kulul. Nemad aga ähvardasid sellist muudatust kohtu asjaga. Siis California otsustas koguda raha autode arvele võtmise maksuga, mis loomulikult ei kehti vesiniku ja kütuse element autode puhul. Seadus oli vastuvõetud lõplikult septembris 2013. Lisaks valitsus toetab eraettevõtjaid, kes soovivad ehitada oma vesiniku tanklat kaasfinantseerimisega, kuni 30 tuhat dollarit. California Ülikooli uurimustöö näitab, et kui tankimise süsteemid hakkab olema hästi välja arendatud, siis aastaks 2020 Californias hakkab olema liikvel 50 000 – 100 000 kütuseelement või vesiniku autot. Taastuva vesiniku, ehk vee elektrolüüsil töötav tankla maksumus on aga ligilähedane 1,5 miljonit dollarit, kus saaks tankida umbes 100 sõidukid nädalas. See näitab ikkagi, et selline ettevõtmine on väga kulukas. USA-s kildagaasi buum tõi kaasa maagasi hinda langemise, mis oma korda tõstab vesiniku majandust. Ühendriikides iga aasta toodetakse orienteeruvalt 9 miljonit tonni vesiniku, mida kasutatakse nafta rafineerimiseks, metalli-, toidu- ja koduotstarvete töötuses. Enamus vesiniku toodetakse maagaasist. Vesiniku tanklate jaoks sama moodi, sest kui vesiniku toota taastuvast energiast, siis hind hakkab olema niivõrd kõrge, et seda turgu ei saagi lõpuks käivitada, arvas Bob Oesterreich, kes on juhatuse liige ühendriikide suurimas vesiniku tootmise ettevõttes. Californias on riigi-era ettevõtte nimega „Firstelement“, kellele kuulub enamus vesiniku tanklatest. Hetkel vesiniku tanklate jaoks toodetakse suurtes tehastes maagaasist ja tuuakse kohale tankimise autoga. Chris White, kes on „Esimese elementi“ pressiesindaja ütles „Hämmastav, kui palju me kasutame vesiniku juba praegu“. Sõiduk, mis sõidab vesiniku peal, mis on oma korda toodetud maagaasist, tekitab heitgaase 2 korda vähem, võrreldes sõidukiga, mis liigub bensiinkütuse abil. Ühendriikides toodetakse vesinikku Californias, Louisianas and Texas. Vesiniku tootmisel on nõutud, et vähemalt 33 protsenti toodangust oleks tehtud taastuvast energiast. Tootjad ise mõistavad, et maagaasi

varud on piiratud ning tuleb rohkem panustada alternatiivallikatele, aga hetkel see ei ole renthaabne [6].

## **2. ÜLEVAADE KESKKONNASÕBRALIKEST TOOTMISTEHNOLOGIADEST JA ALLIKATEST.**

Vesiniku võib toota nii taastuvatest allikatest, kui ka mitte taastuvatest. Esimene võimalus tootmiseks on keskkonnasõbralik, teisel tootmise võimalusel eraldub süsinikdioksiidi või mõni muu süsiniku jäägi vorm. Tänapäeval toodetakse vesiniku traditsionaalsetest allikatest, mis on kivisüsi, nafta ja maagaas ning samal ajal teostatakse uuringuid, kuidas toota vesiniku teistest allikatest ning mitte kahjustada meie keskkonda. Põhimõte on teha selline tehnoloogia, mis oleks renthaabne ning mis ei tekitaks kasvuhoonegaasi, ehk CO<sub>2</sub>. Üks sellistest võimalustest on näiteks toota vesinikku päikese energia abil, või mõnest muust taastuvast energiast, millist saaks ära kasutada keemilise reaktsiooni jaoks. Tabelis 1, on kokku võetud enamus võimalikest keskkonnasõbralikest viisidest vesiniku tootmiseks. Tabeli lugemisel selgub, et primaarne energia, mis on vajalik keemilise reaktsiooniks on tavaliselt elektri- või soojusenergia. Materjalid või kemikaalid vesiniku tootmiseks on põhimõtteliselt vesi või fossiilsed kütused. Vesiniku tootmiseks kasutatakse biomassi ning kemikaale, nagu näiteks vesiniksulfiidi. Tootmise puhul on väga tähtis teha selgeks, millist primaarenergiat saab kasutada, et see oleks keskkonnasõbralik. Tabelis 2 on kokkuvõetud primaarenergiat allikate taastuvatest tootmistehnoloogiad. Tabelist on näha, et soojusenergiat saab toota kontsentreeritud päikese energiast, biomassist, prügila gaasist jne., väheväärtusliku soojusenergiat saab toota geotermaalselt. Vesiniku tootmiseks vajatakse elektri- või soojusenergiat. Elektrit saab toota näiteks mingist taastuvast energiast ning elektrolüüdi abil toota vesiniku. Samas saab toota näiteks geotermaal energia abil soojust, mida saab ära kasutada termokeemilise reaktsioonis vesiniku tootmises [6].

Vajalik energia	Vesiniku tootmise meetod	Tooraine	Protsessi lühikirjeldus
Elektrienergia	Elektrolüüs	Vesi	Vee liigendamine O <sub>2</sub> ja H <sub>2</sub> alalis voolu abil, ning tekitab elektrokeemilise reaktsiooni
	Plasmaga lagundamine	Metaan	Puhas metaan läbib elektriga tekitatud plasma kaare ning moodustub vesiniku ning süsinik tahma
Soojusenergia	Termolüüs	Vesi	Aur on kuumutatud üle 2 500 K, mille puhul vee molekulid termiliselt lagunevad ise
	Termo- Katalüüs	H <sub>2</sub> S krakkimine	H <sub>2</sub> S eraldatakse mere veest või on toodetud muu tööstuliku protsessiga ning selle aine abil krakatakse termo-katalüütiliselt
		Biomassist moodustamine	Termo-katalüütiliselt biomassist vesiniku moodustamine
	Termokeemiline protsess	Vee lagundamine	Keemilised reaktsioonid (sealhulgas redoksreaktsiooni või mitte) tehakse tsükliliselt molekuli lagunemiseks
		Gaasistamine	Biomassist moodustatakse sünteetiline gaas; Vesiniku eraldatakse

		Reforming	Vedelatest biokütustest vesiniku tootmine
		H <sub>2</sub> S krakkimine	tsükliline reaktsioon vesiniksulfiidi molekulite krakkimiseks
Fotoni energia	Fotogalvaaniline elektrolüüs	Vesi	Päikese paneelide abil saadud elektrienergia kasutatakse elektrolüüsi jaoks
	Fotokatalüüs	Vesi	Kompleks homogeenestest katalüsaatoritest või molekulaarsed seadmed koos foto elektroon kogujaga on kasutuses vesiniku tootmiseks veest
	Foto elektrokeemiline meetod	Vesi	Hübriid raku abil saab luua fotogalvaanilise elektrienergia, mida kasutatakse vee elektrolüüsi protsessis
	Bio-fotolüüs	Vesi	Bioloogiline süsteem koosneb tsüanobakteritest
Biokeemiline energia	Pime kääritamine	Biomass	Anaeroobne kääritamine valguse puudumisel
	Ensümaatiline	Vesi	Kasutades polüsahhariide, et genereerida vajaliku energiat
Elektriline + soojus	Elektrolüüs kõrgel temperatuuril	Vesi	Kasutades soojusallikaid ja elektri energiad jagada vett tahke oksiid elektrolüüt rakude jaoks
	Hübriidiline termokeemiline tsükkel	Vesi	Kasutada sooja ja elektri energiad, et viia reaktsiooni tsükliliseks vee jagunemiseks
	Termo katalüütiline fossil kütuste krakkimiseks	Fossilised kütused	Termo- katalüütiline protsess on kasutuses fossiilsete süsivesinike krakkimiseks vesinikuks ja süsihappe gaasiks, kus süsihappe gaasi püütakse kinni

	Söe gaasistamine	Vesi	Kivisöest tehakse maagaas, vesiniku eraldatakse ning süsihappe gaasi sekvesteeritakse
	Fossiil kütuste reformeerimine	Fossilsed kütused	Fossiil kütusest tehakse maagaas, vesiniku eraldatakse ning süsihappe gaasi sekvesteeritakse
Elektri ja fotoni energia	Foto elektrolüüs	Vesi	Foto-elektroodid + väline elekteri energia
Biokeemiline + soojus energia	Termofiilne seedimine	Biomass	Kasutades biomassi käärimist tekkib soojusenergia, mida kasutatakse madala temperatuuri vajadusel
Fotoni + biokeemiline energia	Bio fotolüüs	Biomass, vesi	Kasutatakse bakteereid ja mikroobe vesiniku tootmiseks
	Foto käärimine	biomass	Kääritamist kiirendatakse valguse lisamisega
	Kunstlik fotosüntees	Biomass, vesi	Keemiliselt modifitseeritud molekulide ja nendega seotud süsteemide, et imiteerida fotosünteesi ja tekitada H <sub>2</sub>

Tabel 1. „Rohelise“ vesiniku tootmise jaotused [6]

Vesiniku tootmise meetodit		Roheline energia allikas	Muundamis võimalused
Elektrolüüs (rohelist viisil toota elektrienergiat vee elektrolüüsi jaoks) või plasmakaarega lagunemine (rohelist viisil toota elektrienergiat maagaasi plasmakaarega lagunemiseks)		Päikese energia	Fotogalvaaniline energia jaam elektri energia tootmiseks
		Geotermaalne	Jõujaam [ organic Rankini tsükkel]
		Biomass	Biomassi jõujaam, sisepõlemismootorid, kütuseelement jaamad
		Tuul	Tuulikute pargid( Ühendatud jaotus võrkku või autonoomsed)
		Ookeani soojus energia	Ookeani termalse energia kasutamine

		Teised taastuvad allikad	Tõusu ja mõõna, lainete energia muundamine elektriks
		Tuuma energia	Tuuma elektri jaamad
		Taastuvad	Prügilagaaside põletamine sise põlemismootoris, veel rohkem vähendada soojuse kaod, põletamisel välistada saasteainete heitmeid.
Termolüüsis		Päikese energia	Kontsentreeritud päikese soojus, selleks et toota kõrg temperatuuri auru
Termo- katalüüs	H <sub>2</sub> S krakkimine	Päikese energia	Kontsentreeritud päikese soojus, selleks et viia läbi protsesse kõrgel temperatuuril
		Biomass	Madala kütteväärtusega biomassi põletamine sooja energia saavutamiseks
		Taastuvad	Prügilagaaside põletamine sise põlemismootoris, veel rohkem vähendada soojuse kaod.
	Biomassi teiseldamine	Päikese energia	päikese energia kontsentreerimie ning protsesside läbiviimine kõrgetel temperatuuridel
		Biomass	Auto-termaalne protsess: reaktsiooni soojus tuleb biomassi põletamisest.
Termokeemiline protsess	Vee lagundamine	Päikese energia	Kontsentreeritud päikeseenergia toodab kõrge temperatuuriga soojus
		Geotermaalne	Geotermaalselt genereeritud elekter, mis viib kõrge temperatuuriga protsessini
		Biomass	Kuivatatud biomassi põletatakse selleks, et luua kõrge temperatuuriga soojus
		Tuuma energia	Tuuma elektri jaamad
		Taastuvad	Prügilagaasi põletamine
	Gaasistamine	Päikese energia	päikese energia kontsentreerimie ning protsesside läbiviimine kõrgetel temperatuuridel
		Biomass	Auto-termaalne protsess: reaktsiooni soojus tuleb biomassi põletamisest.



		Bio Kütused	Auto-termaalne protsess: reaktsiooni soojus tuleb biomassi põletamisest.
	H <sub>2</sub> S krakkimine	Päikese energia	päikese energia kontsentreerimise ning protsesside läbiviimine kõrgetel temperatuuridel
		Geotermalne	kõrge temperatuuriga geotermalse soojusega, ühes 200 °C
		Biomass	Madala kütteväärtusega biomassi põletamine soojaks energia saavutamiseks
		Taastuvad	Prügilagaasi põletamine
Fotogalvaaniline elektrolüüs		Päikese energia	Päikese kiiruse moodustavad elektrid läbi fotogalvaanilise paneeli
Foto- katalüüs		Päikese energia	UV päikese kiirguse abil protsessi läbiviimine
Foto-elektrokeemiline		Päikese energia	Kogu päikese energia on kasutuses
Bio- fotolüüs		Päikese energia	Kogu päikese energia on kasutuses
Tume fermentatsioon		Biomass	Biogaasi reaktorid on kasutuses vesiniku tootmiseks
Ensümaatiline		Biomass	Polüsahhariide kasutatakse eriliste ensüümide puhul vesiniku eraldamiseks
Kõrg temperatuuriga elektrolüüs		Päikese energia	Kogutud päikese energia, millest toodetakse kõrget temperatuuri ja elektrit
		Geotermalne	Geotermalne elekter ühendatud kõrg
		Biomass	Biomassi põletamisel tekitab elekter ja kõrgtemperatuuriga soojus
		Tuuma energia	Tuuma elektri jaamad
		Taastuvad	Prügilagaasi põletamine

Hübriid termokeemilised tsüklid		Päikese energia	Kogutud päikese energia, millest toodetakse kõrget temperatuuri ja elektrit
		Geotermaalne	Geotermaalne elekter ühendatud kõrg temperatuur soojuspumpadega
		Biomass	Biomassi põletamisel tekkib elekter ja kõrgtemperatuuriga soojus
		Tuuma energia	Tuuma elektri jaamad
		Taastuvad	Prügilagaasi põletamine
Foto- elektrolüüsis		Päikese energia	Fotogalvaanika + elektrolüüsi vann koos foto elektroodidega
Termofiilne sedimine		Biomass+ teised	Tekkib soojus energia biomassist või päikesest
Bio fotolüüs		Biomass+ päikese energia	Biomassi + fotoni energia juhivad protsessi
Foto-fermentatsioon		Biomass+ päikese energia	Biomassi + fotoni energia juhivad protsessi
Kunstlik fotosüntees		Päikese energia	Päikese energia abil toodetakse vesiniku

Tabel 2. „Rohelise“ vesiniku tootmise meetodit ja energia muundamise võimalused [6]

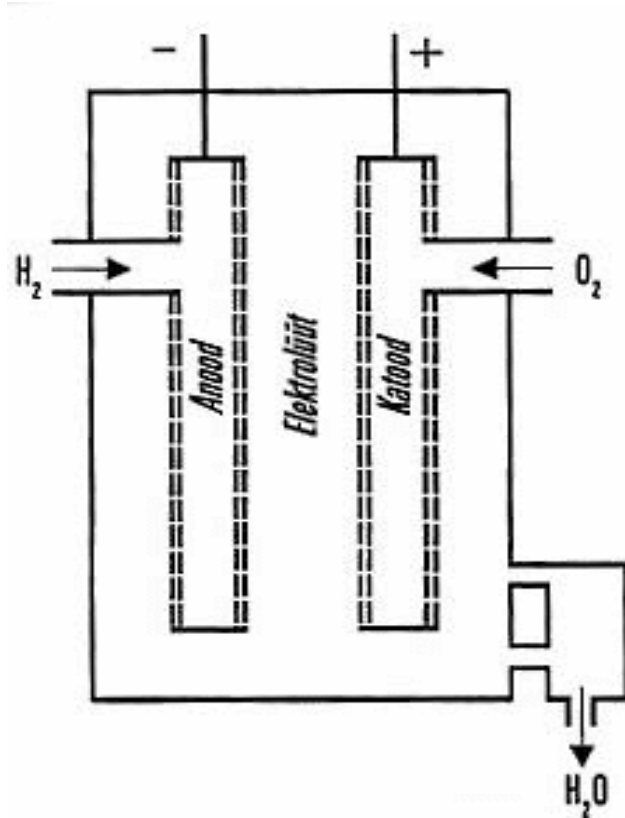
Kokkuvõtteks, peale esitatud tabelite analüüsimist selgub, et meie riigis vesiniku tootmise võimalused on väga piiratud. Päikese energia ei ole piisavalt tõhus. Puudub geotermaalne ja tuuma energia. Ei oma ka naftavarusid. Teisest küljest vaadates meil on palju biomassi, mida saaks ära kasutada vesiniku tootmiseks, aga hetke seisuga odava nafta hinna tõttu, see ei pole renthaabne. Mingil määral taastuvatest energiatest saaksime ära kasutada tuult ja merd.

## 2.1 Kütuseelemendi tööpõhimõte

Vesiniku põlemisreaktsioonis peavad vesinik ja hapnik kontakteeruma ja vahetama elektrone. Kütuseelemendis on elektronide vahetus eraldatud aatomite kontaktist. Kahte elementi eraldav elektrolüüt lubab ühte kahest, kas vesiniku või hapniku ioonil läbida elektrodidevaheline vahemik. Reaktsiooniks vajalik elektronide vahetus vesiniku ja hapniku vahel ei toimu mitte läbi elektrolüüdi, vaid välist elektriringi pidi. Tekib alalisvool. Sobiva elektrolüüdi leidmine, mis lubaks liikuda hapniku või vesiniku aatomitel, kuid väldiks elektronide liikumise on üheks võtmeküsimuseks kütuseelementide väljatöötamisel.

Kütuseelemente liigitatakse kasutatava elektrolüüdi järgi. Elektrolüütideks kasutatakse: leelist, fosforhapet, vedelaid karbonaate, tahkeid okside, polümeermembraane. Vastavalt sellele on erinevad ka kütuseelementide töötemperatuurid  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  kuni  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kütuseelement koosneb katalüsaatorit (plaatina, nikkel) sisaldavatest poorsetest elektrodidest, mille vahel on elektrolüüt - ionmembraan. Väga kõrgel temperatuuril töötavatel kütuseelementidel võib katalüsaator ka puududa. Anoodile juhitakse vesinik (või vesinikku sisaldavad ained) ja katoodile hapnik (õhk).

Elektroodid absorbeerivad ja aktiveerivad nii kütust kui oksüdeerijat. Keerukate redutseerumisoksideerimisreaktsioonide tulemusena elektrolüüdi ja kütuse (anoodil) ning elektrolüüdi ja oksüdeerija (katoodil) vahel tekib elektrodidel potentsiaalide vahe ( $0,5\text{--}1,2\text{ V}$ ). Pinge on võrdeline välise koormusega. Kütuseelementide volt-amperekarakteristikud on paremad polümeer-membraan ja tahkeoksiid elektrolüüdiga kütuse-elementidel. Kasutatakse kütuseelemendi patareisid, kus üksikud kütuseelemendid on ühendatud järjestikku. Tüüpiline kütuseelement on umbes 5 mm paksune plaat (on ka silindrilisi kütuseelemente).



Joonis 2. Vesinik-hapnikelemendi skeem

400 üksikust kütuseelemendist 230 V pinget andev patarei on kuni 3 meetri paksune (kaasa arvatud ka plaate kinni hoidvad ja üksteise vastu suruvad rakised. Reaktsiooniks kütuseelemendisse gaase sisse- ja ärajuhtivad kanalid kinnitatakse kütuseelemendi külge tihenditega. Peab olema tagatud kanalite elektriline isoleerimine ja soojuspaisumine. Võib olla ka, et gaasid juhitakse sisse- ja ära kütuseelemendi siseste kanalite kaudu.

Kütuse sellisel oksüdatsioonil ehk nn külmpõlemisel on keemilise energia elektriks muundamise kasutegur kõrgem ( $40\text{--}90\%$ ) kui soojuselektrijaamades ( $25\text{--}40\%$ ), kus kütuse keemiline energia muundub kõigepealt soojuseks ja alles siis mehaanilise töö vahendusel elektrienergiaks. Suureks plussiks on müra ning heitainete puudumine, samuti väiksem mass

ja mõõtmel kui teistel keemilistel elektrienergiaallikatel.

## 2.2 Enamkasutatavad kütuseelemendid

**AFC** (alkaline fuel cell)- leeliselektrolüüdiga kütuseelement. Töötemperatuur  $60...90^{\circ}\text{C}$ . Elektrolüüdiks on 30% kontsentratsiooniga KOH lahus. Regentideks on puhas hapnik ja vesinik. Kasutatakse kosmosesõidukites. Vajab ülipuhast vesinikku ja hapnikku.

**PEMFC**, ka **PEM** (polymer electrolyte membranes fuel cell) – tahke orgaanilise polümeer elektrolüüdiga - membraaniga kütuseelement. Elektrolüüdiks on õhuke plaat – polümeermembraan (Nafion®), mis asetseb kahe peenikesi plaatinaosakesi kui katalüsaatorit sisaldavate poorsete grafiitelektroodide vahel. Elektroodidele juhitakse hapnik ja vesinik. Maagaas peab eelnevalt reformeris olema muudetud vesinikuks. Töötemperatuur  $60...100^{\circ}\text{C}$ . Kuna kütuseelement ei sisalda agressiivseid aineid on ta eelistatavim kasutuseks transpordivahendeis.

**PAFC** (phosphoric acid fuel cell) – fosforhappe ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) elektrolüüdiga kütuse element. Vesinikku toodetakse maagaasist või metanoolist väljaspool kütuseelementi asetsevas reformeris. Oksüdeerijaks on õhk. Praegusel ajal on ta kõige enamarendatud tehnoloogia statsionaarsetes seadmetes kasutamiseks. Euroopas, Ameerika Ühendriikides ja Jaapanis on kasutusel 25 kW- 11 MW demonstratsioonseadmed. Kuni  $200^{\circ}\text{C}$  töötemperatuuri tõttu on sobiv kasutada elektrienergia ja soojust koostootmiseks.

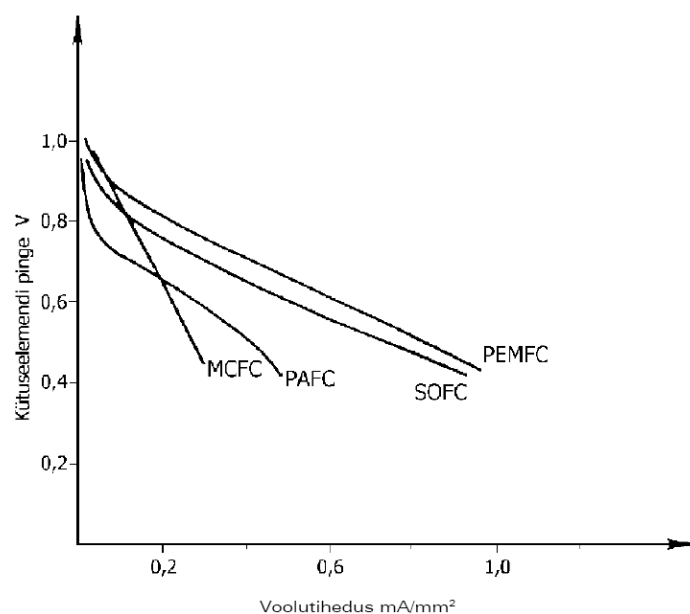
**MCFC** (molten carbonate fuel cell) –sula karbonaat elektrolüüdiga kütuse element. Elektrolüüdiks on eutektiline segu 68 %  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  ja 32 %  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , mis töötemperatuuril  $650...800^{\circ}\text{C}$  on vedelas olekus. Kütuseks on gaaside  $\text{H}_2$ , CO ja  $\text{CO}_2$  segu, mis saadakse maagaasi või ka kivisöe gaasi reformimisel. Ei ole vaja kasutada kallist katalüsaatorit. Kõrge töötemperatuuri tõttu on võimalik kütuseelemendi sisene kütuse reformimine. Seega kasutab kütuseelement osaliselt ka ise vabanevat soojust. Kütuseelement on sobiv elektri ja soojust koostootmiseks.

**SOFC** (solid oxide fuel cell) tahke oksiid elektrolüüdiga kütuse element. Elektrolüüdiks on tahke keraamiline materjal – üüratum oksiidiga stabiliseeritud tsirkooniumoksiid ( $\text{Y}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ ). Kütuseks kasutatakse  $\text{H}_2$  ja CO segu, mis saadakse hüdrokarbonaatide kütuseelemendi välise reformimisega. Head tehnilised näitajad (võimsustihedus,ioonjuhtivus) on saavutatud kõrgematel temperatuuridel ( $800...900^{\circ}\text{C}$ ). Kõrged temperatuurid välistavad odavate

konstruktsioonmaterjalide (roostevaba teras) kasutamise. Kogu konstruktsioon peab olema valmistatud kalleid keraamilisi materjale kasutades. Kõrgel temperatuuril on piiratud termiliste tsüklite arv. Kütuseelement on kasutatav suure võimsusega ( mitukümmend megavatti ) energeetilise seadmena. Süsteemist saab kõrgetemperatuurilist jääksoojust, mida võib kasutada elektrienergia tootmiseks gaasi või aurutsükli või ka soojusvarustuseks.

Tüüp	Töötemperatuur °C	Kütus	Oksüdant	Elektriline kasutegur, % teor./prakt	Kasutamine
Leelis AFC	60...90	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	83/60	Kosmos, sõjandus
Poltümeer-membraan PEMFC	80...90	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> , õhk	83/60	Väikese võimsusega elektri tootmine (transport)
Fosforhape PAFC	160...200	Maagaas H <sub>2</sub>	Õhk	80/55	Elektri ja soojuse koostootmine 100 kW <sub>e</sub> kuni 1 MW <sub>e</sub>
Sulakarbonaat MCFC	650...700	Maagaas, kiviõõgaas	Õhk	78/55...	Elektri ja soojuse koostootmine Kõrgetemp. soojus kuni 100 kW <sub>e</sub>
Tahkeoksiid SOFC	800...1000	Maagaas, kiviõõgaas	Õhk	73/60...65	Elektri ja soojuse koostootmine Kõrgetemp. soojus 10..100 kW <sub>e</sub>

Tabel 3. Kütuseelementide põhitüüpide näitarve ja kasutusvaldkonnad



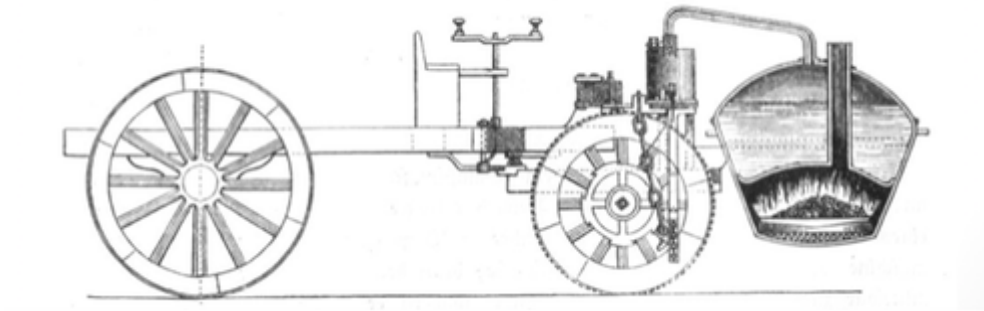
Joonis 3. Kütuseelementide elektrilised tunnusjooned [11]

## 3. VESINIKU AUTOD

### 3.1 H<sub>2</sub> sise põlemismootoriga sõidukid

Mõned inimesed arvavad, et vesiniku kütusega sõitvad autod on samad, mis vesiniku kütuseelemendiga autod. See ei ole nii. Mõned autod ongi sise põlemismootoriga, aga kütuseks kasutatakse vesiniku, nagu teiste puhul on näiteks bensiin, diisel või gaas.

Autod vesiniku sise põlemismootoriga saavad oma alguse 1807 aastast, kuna Francois Isaac de Rivaz Šveitsis ehitas välja esimese töötava mudeli. Järgmine samm oli aastal 1966, siis kui kontsern General Motors tegi oma eksperimentaalse sõiduki kütuseelemendiga, mille nimi oli Electrovan. Mõned enamus tuntumad tänapäeval vesiniku sise põlemismootoriga autod on BMW Hydrogen 7 ning mõned Mazda ja Fordi mudelid



Joonis 4. Esimene maailmas sise põlemise mootoriga liiklusvahend [8]

BMW Hydrogen 7 on luksuslik auto, mis omab sise põlemise mootorit ja saab liikuda nii bensiini, kui ka vesiniku peal. Kütuse valik on automaatne ning primaar kütuseks on vesinik.

Mazdal vesiniku sise põlemise mootoriga on kaks mudelit. Need siis on RX8 Renesis RE Hydrogen ja Premacy RE Hydrogen. Mõlemal mudelil on kasutuses rootori tüüpi mootor. Neid sõidukeid katsetati Norras HyNor ( Norra vesiniku kiirtee ) projekti raames, kus ilmastiku olud on karmid.

Fordil on Superchief F250 mudel, mis tegelikult saab sõita kolme kütusega. Need on siis kokkusurutud vesinik, bensiin ja etanool E85. Ford oli teinud selliseid mudeleid orienteeruvalt 20 tükki. Mõned vähesed on endiselt USA-s, enamus on aga kasutuses Kanadas. Lisaks Ford oli teinud Focuse mudeleid, mis said olema vesiniku sise põlemise mootoriga. Need leidsid kasutamist Inglismaal.

Enamus inimesi, kes hoolivad keskkonnast ja omavad vähegi võimalusi, hakkavad aina rohkem eelistama keskkonnasõbralike tehnoloogiad ning liiklusvahendeid [7].

### 3.2 Vesiniku kütuseelementidega sõidukid

Hetkeseisuga tundub, et kütuseelementidega sõidukid omab tulevikku. Sõidukid on elektrimootoriga ja kasutavad vesiniku oma akude laadimiseks. Tänapäeval enamus kütuse elemendiga sõidukid on ehitatud PEM ( elektrolüüs prooton membraaniga ) tehnoloogiaga, erandiks on Volkswageni kontsern, kes on katsetanud toota kütuseelement sõidukit, mis kasutab elektrolüüdiks tahked oksiidi (SOFC).

Viimastel aastatel kõige populaarsemad vesiniku kütuseelementidega sõidukid Ameerikas on Honda FCX Clarity ja Chevy Equinox Fuel cell. Honda on võitnud endale päris mitu tiitlit, nende hulgas aastal 2009 ka “Maailma rohelisem auto”. Honda katsetamiseks renditi 200 sõidukit välja 600 dollari eest kuus, kaheks aastaks. Enamus sõidukitest katsetati Los Angeleses, sest seal on kõige paremini arenenud H2 tanklad.

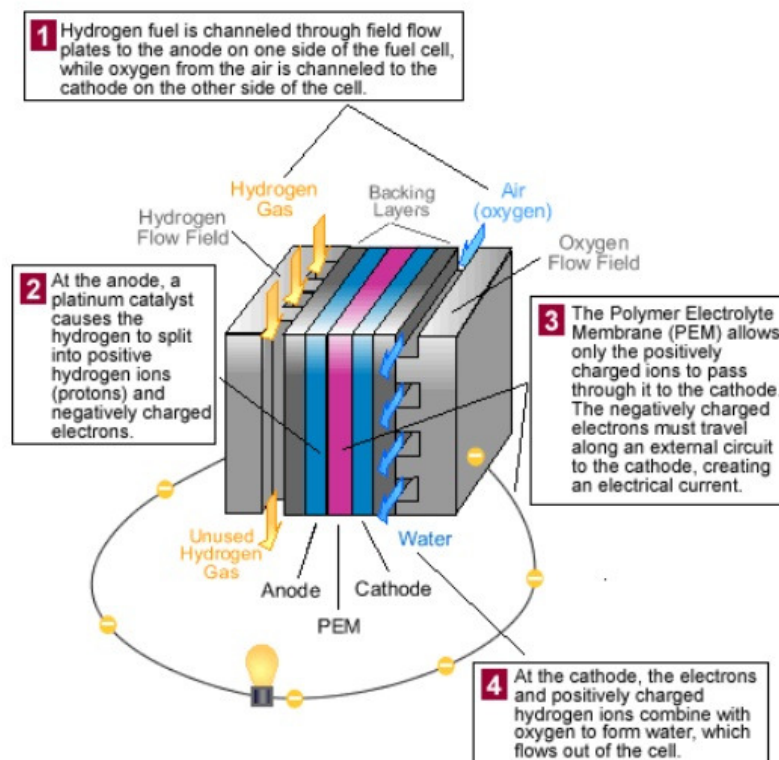
Autode tööprintsip on suhteliselt lihtne. Kütuse paaki surutakse vesinikku kuni 700 bar, peale seda vesinik koos hapnikuga, mis on õhus, läbib kütuseelemendi ja tekitab elekter, mis paneb sõidukid liikuma. Vaatamata sellele, et väga paljud autotoojad toodavad vesiniku kütuseelementidega sõidukeid USA jaoks, ikkagi väga paljud kasutavad tavalisi elektriautosi. Probleemid on tingitud vesiniku kütuseelement sõidukite kõrge maksumusest ning tanklajaamade puudumisest. Hetkel Ameerikas kõige paremini arenenud tanklate kett on Californias. On olemas ka paar tanklat New-Yorgis ja Kolumbias. Autotootjad ei soovi investeerida suuri summasi tanklate välja ehitamiseks, sest see tõstaks vesiniku kütuseelement autode maksumust, mis on praegugi üpris kõrge. Hetkel sellised suured ettevõtted nagu Honda, ITM Power ja Hydrogenics proovivad välja töötada väikseid tankimise jaamasid, mida saab kasutada kodutingimustes. Siis, kui seda tüüpi sõidukeid tekitab rohkem, siis suurema tõenäosusega ikkagi hakatakse investeerima ka tanklatesse.

Kokkuvõtteks võib öelda seda, et vesinik kütuseelement sõidukitel on tulevikku. Sest kunagi arvati seda, et elektriautod on mõttetud, aga tänapäeval nad on kasutuses ja juba tehakse ka luks variante nagu näiteks Teslo. Sama on ka siin, autotootjatel tuleb sõiduki hinda odavamaks saada ja teistel tuleb välja mõelda odavamad kontseptsioonid sõidukite tankimiseks. Kütuseelement sõidukitel on suur eelis tavaliste sisepõlemismootoriga autode ees, sest nad ei tekita kasvuhoonegaasi efekti, ehk nende CO<sub>2</sub> on null. Elektriautodest, kütuse

element sõidukite eeliseks on see, et neid saab tankida kuni viie minutiga ja läbitav teekond on ka pikem. Puudus on tankimise puudumise võimalus[9].

### 3.2.1 Kütuseelemendi PEM tööpõhimõtte

PEMFC, teisisõnu ka PEM (proton exchange membrane fuel cell, ka polymer electrolyte membrane fuel cell) - prootonivahetusmembraaniga (polümeerelektrolüütmembraaniga) kütuseelement (tööpõhimõtte toodud joonisel 5). Tahkest polümeerelektrolüüdist õhuke plaat asetseb kahe peenikese plaatinaosakesi katalüsaatorina sisaldavate poorsete grafiitelektroodide vahel. Elektroodidele juhitakse hapnik ja vesinik. Kasutades kütuseks maagaasi, peab see olema eelnevalt reformeris vesinikuks muudetud. Töötemperatuuriks on 60...100 °C. Kuna antud tehnoloogia ei sisalda agressiivseid aineid, siis on ta eelistatuum transpordivahendites kasutamiseks. [10]



Hydrogen Fuel Cell depicted by Department of Energy

Joonis 5. PEM kütuseelemendi töötamise põhimõtteline skeem.

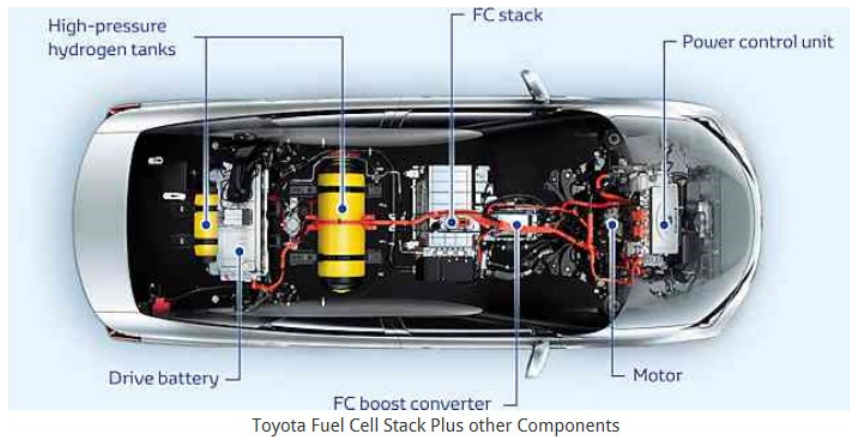


### **3.2.2 Uued BMW kütuseelemendiga sõidukid**

BMW on demonstreerinud oma viimast kütuseelement sõidukit see aasta Miramas Prantsusmaal. Sõiduk oli 5 seeria Grand Turismo baasil. Näitus oli korraldatud R&D kõrge tehnoloogia ja efektiivsuse saavutamiseks. Kontsern BMW teostab uurimise töid juba peaaegu 30 aastat. Aastal 2006, nagu oli juba varem mainitud, kontsern tegi luksusliku sõiduki BMW Hydrogen 7, mis on nii vesiniku kui ka bensiini sise põlemismootoriga. Aastal 2010 BMW esitas oma 1 seeria mudelit kütuseelemendiga, PEM tehnoloogiaga, mis oli välja töötatud koos UTC Power. Ainult kütuseelement sõidukite arendamiseks, BMW on juba töötanud üle 15 aasta. Oma uuest Grand Turismo mudelist tahtis tootja näidata suurt koostööd BMW ja Toyota vahel. Mõlemas ettevõttes peaaegu sada inimest on koostöös saavutanud kõrgeid tulemusi. Kusjuures nende koostöö jätkub. Koos on soov arendada nii tankimise jaamasid kui ka kütuse elementi ennast. BMW oma tehnoloogiaga näeb ette kütusepaaki, mis on paigaldatud auto keskele. Paagis on kokkusurutud vesinik 700 baarini, samas on olemas ka krüogeeniline surveanum, mis annab hoida vesiniku madalal temperatuuril rõhul kuni 350 baari. See annab ühe teekonna pikkuseks ca 500 km

### **3.2.3. TOYOTA MIRAI**

„Mirai“ jaapani keeles tähendab tulevik. See on uus ning väga suur edusamm kütuseelement sõidukites. Sõiduki baas hind hakkab olema 58 325 dollarit, mis on iseenesest väga vastuvõetav hind tänapäeval. See hind on kujunenud 23 uurimis aasta töö tulemusena ning ligilähedaselt sisaldab 5680 patenti. Toyota Mirais on kasutuses kütuseelement ning hübriid tehnoloogia. Lisaks on kasutuses ka FC Stark tehnoloogia, mis ei vaja elementi pidevat juhtimist 3D võrgu abil, Toyota poolt patenteeritud tehnoloogia, ning ka kõrgsurve vesiniku paagid. Sõidukil puuduvad CO<sub>2</sub> gaasid ning juht võib ennast tunda peaaegu täpselt nagu sise põlemismootoriga sõidukis.



Joonis 6. Toyota Mirai töö põhimõte [13]

Mirais koosneb kõigest. Alates elegantsest vaatest, hea juhtivusest ning madalast kliirensist, kuni innovatiivsete süsteemideni ja võimsast mootorist, mis on 114 kW.

Vesinik kütuseelement sõidukitel asendab suuri akusi. Kokkuvõttest tehnoloogia on kallim kui akud, aga see on seda väärt. Tankimine toimub 3 minutiga ja teekond moodustab 500 kilomeetrit.[13].

### 3.2.4 Hyundai Tucson FCEV

Hyundail uus tulija on ix35 või Tucson, selline on selle mudeli nimi Põhja Ameerikas. Auto tootja plaanib valmistada 1000 masinat aastaks 2017. Juhul kui selleks ajaks on olemas ka tankimise võimalused, siis on plaan hakata massiliselt tootma. Sõiduk saab ühe paagitäiega läbida ca 600 kilomeetrit, mille heitgaasi kogus on null. Hyundail on juba tehtud lepingud sõidukite tarnimiseks Rootsi ja Taani. Sõidukid lähevad munitsipaalteenistuste kasutusse. Korporatsiooni visioon on selline, et valitsused hakkavad seadma aina karmimad nõudmised gaasilistele emisioonidele, ning Hyundai on selleks valmis. Praeguseks mõned sõidukid on katsetamisel USA-s, Koreas ja Euroopas. Kokku on läbinud sõidukid üle 2 miljoni kilomeetri. IX35 mootori võimsus on 100 kW, mis on märkamatult madalam kui Toyotal [14].

## 3.3 Euroopa vesiniku kiirtee

Joonisel nr 7 on näha, kus on olemas vesiniku tanklad üle Euroopa. Kokku tanklaid on umbes 60 tükki, nendest 30 asub Saksamaal. Saksamaa, kui juhtiv euroopa autotootja, positsioneerib

ennast ka vesiniku tarbitavate sõidukite pooldaja. Saksamaad Euroopas saab võrrelda Californiaga USAs. Toetudes kirjanduse andmetele [16], on Euroopas orienteeruvalt 500 vesiniku/ kütuseelement sõidukit. Lisaks sellele on käimas suur projekt nimega “Hydrogen Mobility Europe” [17]. Projekti raames aastaks 2019, ambitsioonikamad Euroopa riigid (Austria, Belgia, Taani, Inglismaa, Prantsusmaa, Saksamaa, Holland, Island, Norra ja Rootsi) teostavad investeeringuid ca 68 miljon eurot. Investeeringu abil rajatakse juurde 29 tanklat ning toodetakse kohalike valitsuste jaoks 200 kütuseelement sõidukid ja 29 kaubiku tüüpi sõidukit. Projekti raames selgitatakse majanduslikkust ja tutvustatakse inimestele heitgaasi vaba tehnoloogiad ning võimalusi. Konsortsiumi liikmeteks kütuseelement sõidukite tarnimisel on Daimler, SymbioFCCell, Hyundai, Honda, Intelligent Energy, Nissan. Konsortsiumi liikmed tanklate rajamisel on Air Liquide, BOC, H2Logic, ITM Power, Linde, McPhy Energy, OMV, Areva ja mõned teised.

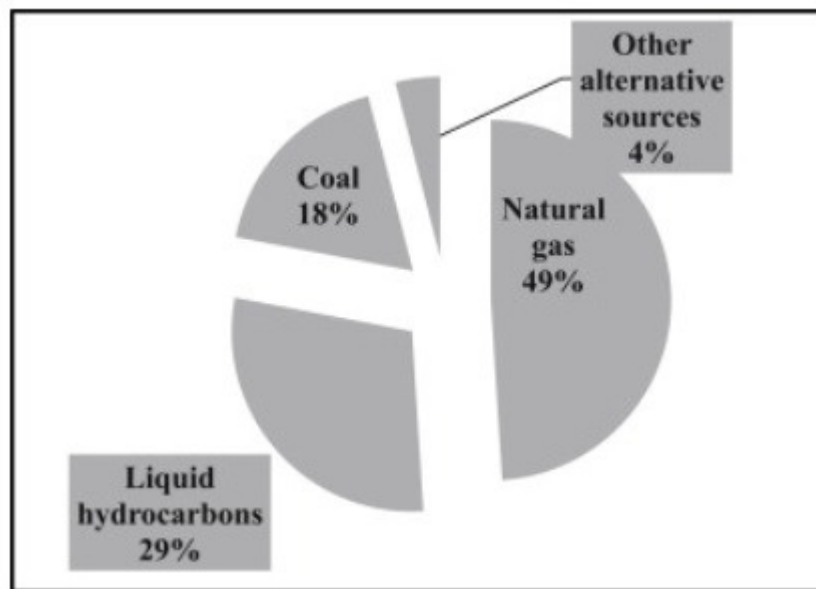
Kokkuvõtteks võib tõdeda fakti, et hetkel turuliidrid kütuseelement sõidukite tarnijatest on Honda, Toyota ning suures osas ka Hyundai. Vesiniku võrgustiku loomises on kõva tegelane ITM Power, kes teeb koostööd nii Euroopas, kui USAs ja projektid on suured. Arvestades seda, et kütuseelemendi sõiduki hind on saanud vastuvõetavaks, võib arvata, et see ongi meie tulevik.



Joonis 7. Euroopas vesiniku tanklate asukohad [14]

#### 4. VESINIKU TOOTMINE BIOMASSIST JA TEISTEST ALLIKATEST VÕRRELDES MAAGAASIGA

Suurem osa vesiniku toodetakse maailmas fossiilsetest kütustest, nagu näiteks: maagaas, kivisüsi ning nafta toodetest. Ainult 4 % kogu toodetud vesinikust tehakse taastuvast energiast. Nagu meile on teada 2050 aastaks nafta varud peaksid saama otsa, nii et tegelikult praegu peaks olema viimane aeg uute tehnoloogiate leiutamiseks ja juurutamiseks.



Joonis 8. Protsentuaalne allikate kasutamine vesiniku tootmiseks[18]

Taastuv energia vesiniku tootmiseks võiks olla biomass, päikese, tuule või mere energia. Nendest allikatest ainult biomassist saab toota vesinikku otseselt. Teised allikad peaksid läbima elektrolüüsi, vesiniku kätte saamiseks. Vahest puidu hind langeb niivõrd, et inimesed jätavad puidu üldse metsa mädanema, silmas peetakse oksa ja juuri. Seetõttu puidust vesiniku tootmine on hea nii loodusele, kui ka keskkonnale. Biomass ja kütused, mis on tehtud biomassist, nagu näiteks hakkepuit, sobivad ideaalselt vesiniku tootmiseks. Biomass on süsiniku neutraalne allikas, millist aurutamisel saab eraldada CO<sub>2</sub> gaasi. On olemas päris mitu huvitavat tehnoloogiat, mille abil biomassist saab toota puhast vesinikku. Potentsiaal vesiniku tootmiseks biomassist on hämmastav. Biomassist vesiniku tootmine rahuldaks nii käesolevaid, kui ka tuleviku vajadusi. Erinevate vesiniku tootmise tehnoloogiad on välja toodud tabelis nr 4. Hinnad on võetud toetudes järgmistele allikatele [19].

**TABEL 4 Vesiniku tootmis meetodid ja toodetud vesiniku kilo hind dollarites**

Method	Energy efficiency	H <sub>2</sub> production cost	Production scale size/current trend	Major advantages	Major disadvantage
Steam methane reforming (SMR)	83%	\$0.75/kg (without CO <sub>2</sub> sequestration)	Large/currently available	Proven technology, High Efficiency, Economical	CO <sub>2</sub> by-product, Limited methane supply, Global warming, dependence of fossil fuel
Partial oxidation	70–80%	\$1.39/kg (residual oil)	Large/available	Established, cost-effective	CO <sub>2</sub> by-product, Lower efficiency than SMR, Global warming
Autothermal reforming	71–74%	\$1.93/kg	Large/currently available	Proven technology, Less capital costs	CO <sub>2</sub> by-product, Limited methane supply, Less efficient efficiency than SMR
Coal gasification	63%	\$0.92/kg (without CO <sub>2</sub> sequestration)	Large/currently available	Established, cost-efficient	CO <sub>2</sub> by-product, Low quality hydrogen
Biomass gasification	40–50%	\$1.21–2.42/kg	Mid-size/currently available	Renewable, indigenous	Seasonal availability, operational difficulties, Transportation problems, Varying H <sub>2</sub> content

Biomass pyrolysis	56%	\$1.21–2.19/kg	Mid-size/currently available	Renewable, indigenous	Seasonal availability, operational difficulties, Transportation problems, Varying H <sub>2</sub> content
Electrolysis	25% Electrical efficiency included	\$2.56–2.97/kg (Nuclear source)	Small/currently available	Proven technology, Emission free	Low overall efficiency, High cost
Thermo-chemical	42% (850 °C)	\$2.01/kg (Sulphur–Iodine cycle)	Under research	Emission free, alternate source	High capital costs, extreme operating conditions, Highly corrosive
Photocatalytic	10–14% (theoretical)	\$4.98/kg	Under research	alternate source	Pricy, Low efficiency
Biological	24% (speculative)	\$5.52/kg	Under research	Renewable, alternate source	Low efficiency, High capital cost
Bio-photolysis of water by algae			Under research	Renewable, sustainable, CO <sub>2</sub> consumed	Strong inhibition effect of generated oxygen on hydrogenase enzyme, Low H <sub>2</sub> production, No waste utilization
Dark fermentative hydrogen production			Under research	simultaneous waste treatment and generation of H <sub>2</sub>	Low energy conversion efficiency

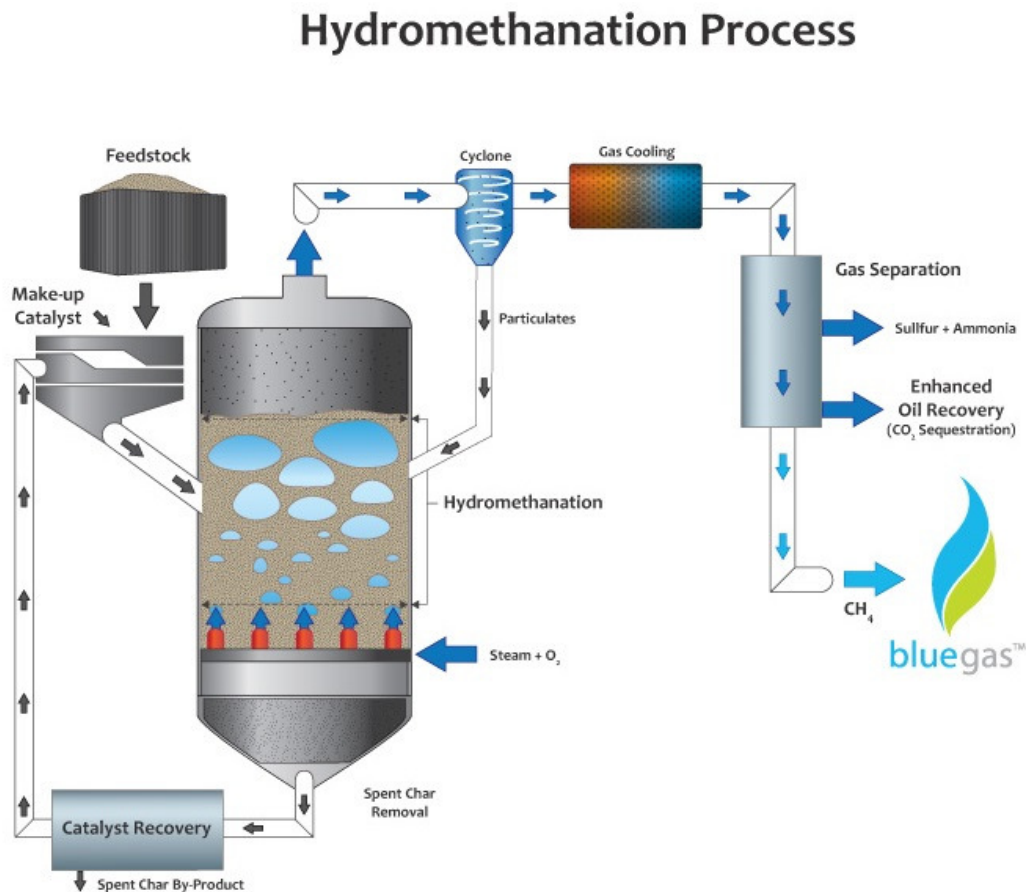
Photo fermentative hydrogen production			Under research	High theoretical conversion yield, absence of oxygen which reduces the potential for inhibition (Biological Processes for Hydrogen Production from Biomass)	Uses nitrogenase enzyme with high-energy demand, low solar energy conversion efficiency, accommodates large areas for the anaerobic photo bioreactors
--	--	--	----------------	---	---

Efektiivsus on defineeritud kui suhe: vesiniku alumine kütteväärtus gaasi olekus, kogu protsessile kulunud energiaga. Maailmas on tehtud päris mitu initsiatiivi selleks, et toota vesiniku biomassist. Aastal 2004, Rahvusvaheline Energeetika Agentuur on alustanud programmi vesiniku tootmiseks ja hoiustamiseks süsiniku sisalduvatest materjalidest. Kõik need asjaolud pööravad veelkord tähelepanu, maailm saab toota ja kasutada vesiniku süsihappegaasi tekitamata. Allpool tabelis nr 5 on toodud plussid ja miinused vesinikku tootmisel biomassist. [18]

Tabel 5.
Põhilised plussid ja miinused vesiniku tootmisel biomassist
<b>Plussid</b>
Tekitab vähem sõltuvust fossilsetest kütustest
Tekitab püsivad energia allikat
Ei tekita süsinikdioksiidi gaasi
Tekitab vajadust põllumajanduses
Vähendab nii põllumajandus, kui ka prügi jääki
<b>Puudused</b>
Madalam kütuse tihendus
Intensiivsem töö seoses vesiniku kogumisega, käitlemisega ja transportimisega
Hooajaline tegemise võimalus
Tõrva ja tuha tekitamine, kui kõrval produkt

## 4.1 Mõned biomassi gaasistamise silmapaistvamad tehnoloogiad.

### 4.1.1 Great Point Energy ning nende hüdrometaneerimise protsess.



Joonis 9. Great Point Energy hüdrometaneerimise protsessi skeem[20]

Esimene samm hüdrometaneerimise protsessis on süsiniku sisaldusega kütuse purustamine ja kuivatamine selleks, et reaktsioon oleks maksimaalselt efektiivne. Järgmisena paigaldatakse ettevalmistatud kütust reaktorisse. Reaktorisse antakse survega auru, mis tekitab „keevkihi“ reaktsiooni, mille abil saavutatakse ühtlane reaktsioon süsiniku sisalduvate ainete ja katalüsaatorite vahel. Tekib keemilise reaktsiooni, kus eraldub vesinik, vingugaas ja lend osakesed. Kuumad lendosad tsükloni abil eraldatakse gaasist ja saadetakse tagasi reaktorisse. Keemilised protsessid, mis on näidatud allpool, toimivad püsival madalal temperatuuril, ning tulemuseks on enamasti metaan ja CO<sub>2</sub>.

Hüdrometaneerimise reaktsioonid:

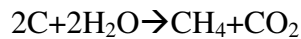
Auru ja süsiniku reaktsioon:  $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$



Vee ja gaasi segunemise reaktsioon:  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$

Metaaniseerimine:  $\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$

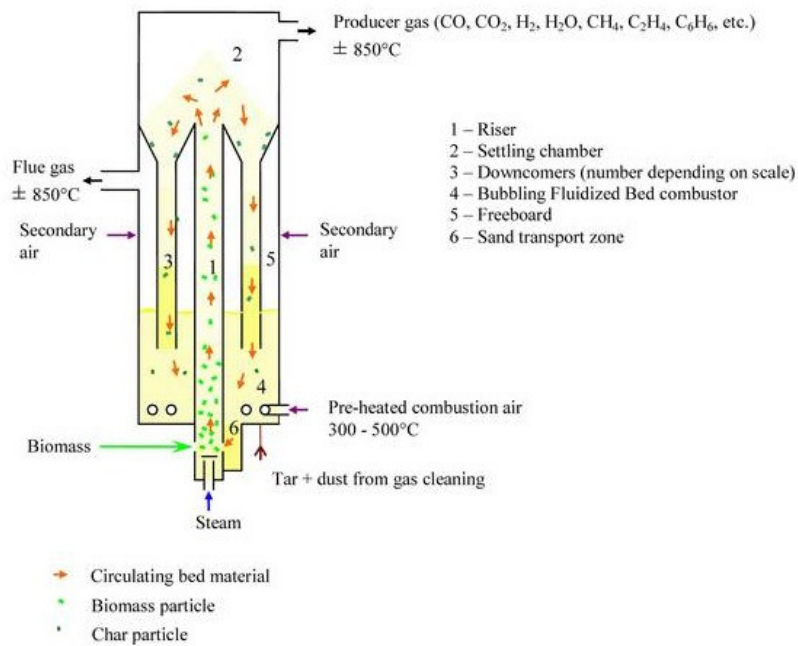
See tehnoloogia on efektiivne, sest ta on soojus energia neutraalne reaktsioon. Pole vaja lisada ega eemaldada energiat, mis tõstabki efektiivsust. Üldine protsessivalem on allpool.



Just madalal temperatuuril väävl kinnipüüdüval reaktoril, on väga lihtne ülesehitus ning materjalideks on kasutatud täiesti tavalist metalli, mis võimaldab madalat hinda valmistamisel ja kasutamisel. Katalüsaator on taaskasutatav kogu protsessi ajal. Lisaks katalüsaator annab võimalust kasutada selliseid tooraineid nagu nafta koks, ligniiti ja loomulikult põllumajanduse biomass. „Blugas“ tehnoloogia võimaldab toota hüdrometaneerimise abil, puhta maagaasi, mida võib kasutada gaasi tsentraal võrgustikus. Samas tehnoloogia näeb ette, ka eraldi kõrval produktide kätte saamist [20].

#### **4.1.2. Milena gaasistamise protsess.**

Hollandi Teadusuuringute Energia Keskus (HTEK), on 12 aasta jooksul välja töötanud oma gaasistamise tehnoloogia. Kogu projekt algas 500 kW tootmisjaamast, kus teostati uurimus töid ja MILENA gaasistaja juurutamisest. Reaktor koosnes eraldi sektoritest, kus olid gaasistamise ja põletamise kamber. Gaasistamise kamber oma korda koosnes veel eraldi kolmest osast: gaasistamise püstak, sadestuskambrist ja äravoolust. Põletamise kamber koosnes ainult ühest osast. Nooled joonisel 10 näitavad keevkihi liikumist



Joonis 10. HTEK gaasistaja töö põhimõtte.[21]

Biomassi (näiteks puit) juhitakse reaktorisse koos väikse kogusega ülekuumendatud auruga. Auru võib asendada ka õhuga, kui lämmastiku sisaldus saadud gaasis ei sega hiljem. Keevkihi materjali, mis on tavaliselt liiv, mille temperatuur on orienteeruvalt  $925^{\circ}\text{C}$ , juhitakse reaktorisse põletamise kambri, läbi ava, mis asub biomassi etteandmise püstaku vastas. Keevkiht kuumutab biomassi gaasistajas kuni  $850^{\circ}\text{C}$ . Biomassi gaas hakkab käima ringi reaktoris kiirusega umbes 6 m/s. Lõppkokkuvõtteks tekib rahutu keevkiht, mis viib vertikaalselt ülesse tahma ja tekitatud gaasi. Üleval pool on olemas sette kamber, kus eralduvad gaasist keevkihi- ning tahked lendosad, need suunatakse tagasi reaktorisse. Edasi toodetud gaas läbib jahutamise kambri ja suundub puhastamise kambrisse. Tavaliselt puhastamise käik võtab paar sekundit aega. Põletamise kambr toimib nagu mulliv keevkiht. Settekambritest tõrva, tolmu, keevkihi osi ja ka šlakki suunatakse tagasi põlemiskambrisse. Tuhka, tõrva ja tolmu põletatakse hapniku etteandmisel keevkihi materjali soojendamiseks umbes  $925^{\circ}\text{C}$ . Lisaõhku lisatakse CO ja  $\text{C}_x\text{H}_y$  emissiooni vähendamiseks. Suitsugaas väljub reaktorist jahutamiseks ja lendosakeste eemaldamiseks. Keevkihi materjal aga läheb tagasi reaktorisse. Sellise tehnoloogia puhul puudub vajadus energia lisamiseks põletamise kambrisse keevkihi kuumutamiseks. Mehhaaniline kujundus MILENA reaktorist on patenteeritud. Reaktor on tehtud tavapärasest süsinikterasest peegelduvate seintega, temperatuuri mitte kaotamise eesmärgil. Tehnoloogia põhi erinevus koosneb mullitavast keevast kihist põletamise kambri. Prioriteet sellise tehnoloogia puhul on biomassi ja auru

etteandmise püstak keskel. Sellega kaasne väiksemas koguses auru ja keevkihi vajadus. Sellise tehnoloogia puhul on pikem ekspluatatsiooni aeg ning ei nõua suures mahus reaktori puhastamist [21].

#### **4.1.3 Kokkuvõte erinevatest biomassi gaasistamise reaktoritest.**

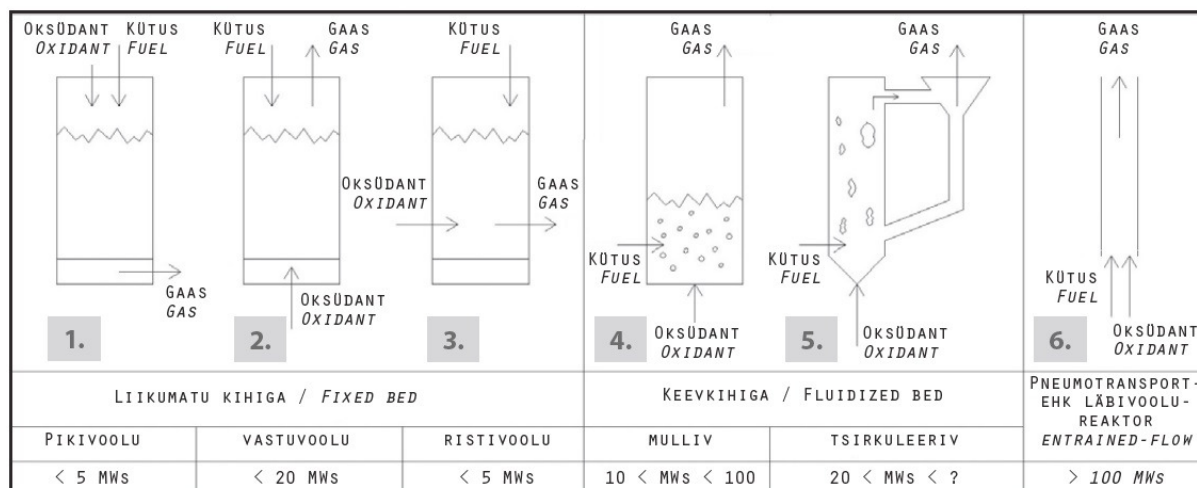
Gaasistussüsteem tavaliselt koosneb reaktorist, kuhu juhitakse biomass ja õhkpiiratud koguses. Tuntuimad reaktorite tüübid on toodud joonisel 11. Kütuse gaasistamise protsess koosneb tinglikult järgmistest etappidest:

- kütuse kuivamine;
- kütuse pürolüüs (tahke kütuse muundamine gaasiks, kondenseeritavateks aurudeks ja tõrvaks ning vaikudeks);
- järgnev aurude termiline krakkimine veeauru või süsinikdioksiidi toimele gaasiks, tõrvaks ning vaikudeks;
- tõrva ning vaikude gaasistamine veeauru või süsinikdioksiidi toimele;
- põletatava gaasi, aurude ja tõrva ning vaikude osaline oksüdeerumine.

Pürolüüsietapp on kergelt endotermiline ja temperatuuridel üle 500 °C saadakse 75–90 massiprotsenti lendainetest. Saadava gaasi saagised, kondenseerimisvõimelise auru (sh tõrvad ja vaigud) ja järelejääva tahke jäägi kogused sõltuvad peamiselt kuumutamise määrast ja lõpptemperatuurist. Protsessi kõrge temperatuur on sõltuvalt reaktori tüübist saavutatav mitmeti:

- osa toodetud gaasist suunatakse tagasi reaktorisse ja põletatakse koos ligilähedaselt stöhhiomeetrilise koguse hapnikuga;
- pürolüüsil jäägina saadud tõrvad ning vaigud põletatakse kohapeal või eraldi;

Gaasistusreaktorist lõpp-produktina saadav gaas sisaldab soovitatavate komponentidena süsinikmonooksiidi, vesinikku ja metaani, lisaks veel veeauru, süsinikdioksiidi ja lämmastikku (juhul kui reaktorisse on lisatud õhku aga mitte puhast hapniku).



Joonis 11. Tuntuimad biomassi gaasistamise reaktorite tüübid [22]

Gaasistamisel ei ole olemas sellist ühte reaktorit, mis sobiks korraga kõikide biomasside jaoks. Iga biomassi jaoks tuleb kasutada sobiliku lahendust. Gaasistamist võivad mõjutada erinevad tingimused, nagu näiteks:

- biomassi niiskus ( suure niiskuse puhul on saadud gaasil madal kütteväärtus, mis omakorda mõjutab halvasti terved gaasistamis protsessi ning tekitab gaasis kõrget tõrva sisaldus )
- suur tuha sisaldus biomassis võib põhjustada reaktori šlakkimist.
- suur lendosakeste sisaldus halvendab toodetud gaasi kvaliteeti ning enne tarbimist vajab puhastamist
- Biomassi etteandmisel reaktorisse, fraktsioon ja selle mahukaal. Reaktorite ülesehitus on erinev ning vale kütusena kasutamisel võib reaktor ummistuda [22].

Kokkuvõtteks Eestis tulevikus võiksime kasutada rohkem nõnda nimetatud puugaasi koostootmisjaamasid. Puugaasi oleks võimalik kasutada tsentraalvõrgustikus, olla imporditavast gaasist sõltumatu ja ise toota vesiniku, nii oma tööstuse otstarbeks, kui kütuselement sõidukite jaoks. Sest tegelikult uuringud näitavad, et oma puidu varuga, saaksime toota enda jaoks kogu vajaliku primaar elektrienergia ja ka kogu vajaliku soojusenergia ning ressurss oleks 100 protsenti taastuv [23].

## 5. MAJANDUSLIK ANANLÜÜS VESINIKU TOOTMISEST EESTIS

Meile on kõikidele teada, et Eestis on suur metsavaru, millega saaksime toota oma jaoks vajaliku sooja- ja elektrienergia ning olla süsinikdioksiidi gaasidest vaba. [23]. Oma igapäevases elus liikumiseks saaksime kasutada kütuseelement sõidukeid. Vajaliku vesiniku saaksime toota hakkepuidust auru gaasistamise abil. Viime läbi umbkaudse analüüsi Eestis vesiniku tootmise maksumusest.

Laboratoorsed katsetused näitasid, et kõige efektiivsem viis vesiniku tootmiseks on auruga või hapnikuga ning „downdraft“ reaktoriga, ehk altpõhise printsiibil. Sellise eksperimendi tulemusena saavutati keskmiselt ühest puidu kilogrammist 29 grammi  $H_2$  / puidu kilogrammi kohta ning 4 grammi  $CH_4$  / puidu kilogrammi kohta [24].

Teeme oma arvutuse selliselt, gaasistamise tehnoloogia maksab 3 000 €/ kWh [25]. Gaasisti võimsus hakkab olema 1 MWh. Auru hakkepuidu gaasistamiseks saame Eesti Energia AS Iru Elektri jaamast. Arvutus andmed on järgmised [27]:

Tehnoloogia maksumus - 3 000 000 eurot

Jaama maksumus aastas koos amortisatsiooniga, laenu maksudega, kommunaal maksudega, ettenägemata kuludega ja inflatsiooniga – 255 000 €/ aastas

Jaama eluiga -20 aastat

Aastas töötundide arv- 7000 töö tunde/ aastas

Hooldus ja remont- 51 000 €/ aastas

Personali maksumus aastas- 153 000 € / aastas

Hakkepuidu maksumus aasta- 364 000 €/aastas, 13 €/m<sup>3</sup>, mis võrdub 52 € / tonn [26].

Selliste lähte andmete puhul saavutame. Vesiniku aasta toodang hakkab olema 203 000 kilogrammi ning puhta metaani kogus hakkab olema 28 000 kilogrammi. Jaama oma kulu aastas on 823 000 €/aastas, mis teeb vesiniku hinnaks orienteeruvalt 4,05 €/ kilogramm. (Arvestus on tehtud ilma CO<sub>2</sub> kvoodi-, auru-, kinnistu maksumuseta ning jäätmete utiliseerimiseta). Sellegi poolest Eestis hetke hind on orienteeruvalt 1,85 €/ kilogramm. Mille alusel saab tõdeda fakti, et biomassis vesiniku tootmine pole renthaabne. Samas selle laborikatse andmetel [24] sai fikseeritud vesiniku alumine kütteväärtus 11,11 MJ/ Nm<sup>3</sup>, tavaline vesiniku alumine kütteväärtus on aga 10,78 MJ /Nm<sup>3</sup>. Mille alusel võib arvestada, et biomassist on võimalik saada puhta, kõrgema alumise kütteväärtusega vesiniku.

Eestis puidu maht on orienteeruvalt 8 miljonit tihumeetrit, mille sees pole arvestatud puidujäätmeid ega raidmeid. Kui võtta arvesse, et sõidukeid Eestis arvel on orienteeruvalt 673

041 tükki ( koos peatatud registrikandega ), ning sellest sõidab tegelikult 70 %, mis on 471 128 ühikut ja inimene läbib päevas teekonda umbes 20 km. Siis tuleb välja, et Eestis päevas läbitakse 9 422 574 kilomeetrid. Kui arvestada seda, et kütuseelemendiga sõidukil on kütuse kulu 1 kg / 100 kilomeetri kohta, siis aastas meil oleks vaja 34 392 395 kilogrammi vesiniku liikumiseks. 8 miljoni tihumeetrist oleks võimalik saada 139 200 000 kilogrammi, mida kasutaksime ära orienteeruvalt nelja aastaga. Nende sõidukite hulgas pole arvestatud liiklusvahendeid mis on suurem või väiksem kui B kategooria

Tulemused pole sugugi rahuldavad. Fakt on see, et peame ikkagi jääma fossiilkütuste juurde. Aga samal ajal peame aru saama et ressursid on piiratud ning tuleb rohkem panustada nii tuule, kui ka mere taastuvale energiale. Samas, meie meri on suhteliselt „rahulik“, ning meil ei ole võimalik toota enda jaoks vajaliku elektrienergiat tõusude ja mõõnade ning lainete abil. Kõik need negatiivsed asjaolud rõhutavad, et on vaja otsida uusi tehnoloogiad nii energia tootmiseks, kui ka energia efektiivsemaks kasutamiseks.

## KOKKUVÕTE

Mõned suurimad riigid on võtnud endale eesmärgi hakata kasutama vesiniku kütusel töötavaid sõidukeid, selleks, et vähendada süsinikdioksiidi gaasi heitmeid. Kahjuks ei arene see nii kiiresti, nagu neil riigid on planeerinud. Mõned, nagu näiteks USA –s California, on teinud suuri edusamme, ning on välja arendatud vesiniku tankimise infrastruktuur, nii sisepõlemismootori jaoks, kui ka kütuseelement sõidukitele. Saab olla väga uhke Euroopa Mere Energia Keskus üle, kes panustab suuri investeeringuid selleks, et teha uurimistöid ning juba projekti alguses on teada, et projekt majanduslikult hakkab olema mitte rentaabel, aga on usku saada uusi ning vajalike teadmisi.

Kütuseelement sõidukitele ja tankimise struktuurile panustavad nii valitsused, kui ka autotootjad ise. Nende hulgas on näiteks HyNor projekt, mis on meile kõige lähem, kus Norra, Taani, Rootsi ja Soome ehitavad nõnda nimetatud „vesiniku kiirteed“. Projekti raames rajatakse uusi tanklaid ning sooritatakse kütuseelement sõidukeid.

On olemas erinevad tehnoloogiad „roheline“ vesiniku tootmiseks. Lahendusena saab kasutada päikese-, tuule-, geotermaal- ja ka biomassi energiat. Meie puhul Eestis saaks kasutada enamasti biomassi ning mingil määral tuule ja mere energiat.

Suureks kütuseelement sõidukite edusammuks on saanud vesiniku kõrgsurve paagid, mis kannatavad rõhku kuni 700 bar. Mõned juhtivad autotootjad teevad omavahel koostööd, kiirema arengu jaoks. Silmas peetakse BMW ja Toyota kontserne. See aasta on tulnud turule Toyota Mirai, mis on hinna ja mugavuse poolest suure tõenäosusega number üks. Samas tuleb pidada meeles, et vesiniku pealt töötavad sõidukid võivad olla nii sisepõlemismootoriga, kui ka kütuseelemendiga. Eestis kahjuks pole ühtegi kütuseelemendiga sõidukid, sest lähim tankimise jaam on Rootsis. Samas suurimad kütuseelement sõidukite tootjad on ka selle peale mõtelnud ning otsivad odavaid lahendusi, kuidas saaks toota väikseid vesiniku tootmisjaamasid, et inimesed saaksid oma kodus teha kütust oma otstarbeks. Hetkel aga kütuseelement sõidukite hind jääb ikkagi kalliks. Praegu keskmise sisepõlemismootoriga sõiduki hind on orienteeruvalt 125 €/kW, Toyota Mirai oma on aga 465 €/kW. Mis näitab seda, et on vaja veel kõvasti näha vaeva selleks, et saada tehnoloogiaid veel odavamaks. Tuleb leida võimalus kuidas saaks metalle asendada odavamate komposiit materjalidega. Selle probleemi lahendamise tegeletakse ka Eestis, nimelt Tartu Ülikoolis kui ka Tehnikaülikoolis.

Vesiniku tootmiseks on mitu erinevat võimalust. Saab toota nii taastuvast, kui ka mitte taastuvast energiast. Ühendriikides on isegi seadusandlusega paika pandud, et vähemalt 30

protsenti kogu toodetud vesinikust peab olema tehtud taastuvatest allikatest. Siiski enamus vesiniku toodetakse maagaasist auru reformimise teel. Protsessi jooksul eraldub süsinikdioksiidi rohkem, kui tema põletamise ajal. CO<sub>2</sub> kokkukorjamiseks on välja töötatud mitu erinevat tehnoloogiat, aga saja protsendi tulemust ei ole veel saavutatud.

Mõnedes riikides toodetakse vesinikku ka elektrolüüsi teel. Seda saab tasuvalt toota siis, kui elektri eest ei pea tasuma, ehk kui mingil rohelisel viisil toodetud elekter jääb üle. Sellised riigid on näiteks Norra ja Kanada, kus on ehitatud suuri jaamasid ning vesiniku ja hapniku toodetakse hüdroelektrijaamade ülejäägist.

On olemas ka puidu gaasistamise tehnoloogia, mille abil saab toota „rohelist“ vesinikku. On erinevaid biomassi gaasistamise reaktoreid, erinevate kütuste jaoks ning erinevate kasuteguritega. Töös on kirjeldatud Great Point Energy ning Hollandi Teadusuuringute Energia Keskuse tehnoloogiat. Mõlemad on teinud suuri edusamme. Tehakse efektiivsemaks tehnoloogiat, millega tõstetakse ka majanduslikke näitajaid. Peab märkida ka seda, et on olemas ka majanduslikult otstarbekaid projekte, kus on kasutuses gaasistamise koostootmisjaamad. Selliseid jaamasi leidub ka Eestis, aga nad orienteeritud tootmise hoonetele, kus puudub keskkütte ja gaas.

Vaadates orienteeruvat arvutust Eestis vesiniku tootmiseks biomassist on väga kurb fakt, kus peame tõdema, et võrreldes maailma hinnaga on see liiga kallis ja teiseks, kui soovime olla imporditavast fossiilkütustest vabad, siis nelja aasta pärast meie rikkalik loodus muutub kõrbeks.

Aga sellegipoolest tuleb otsida edasi teisi lahendusi, et vähendada kasvuhuone gaaside tekitamist, sest fossiil kütuste ressurss on piiratud, ning kui jätkame samas vaimus keskkonna reostamist, siis suure tõenäosusega sajab lõpuks mere tasapind tõuseb 95 cm, mis tähendab seda, et üle poole Eestimaad hakkab olema veel all.

Kokkuvõtteks on töö eesmärk saavutatud. On olemas ülevaade maailma erinevatest tehnoloogiatest „rohelise“ vesiniku tootmiseks. On ka kirjeldatud viimastest saavutustest kütuseelement sõidukite puhul. Sai läbiviidud analüüs Eestis vesiniku tootmise võimalustest. Selleks, et toota majanduslikult otstarbekalt vesinikku Eestis, tuleb teha palju uurimistöid ning leida võimalust kuidas saaks elektrolüüsi tehnoloogiat ja protsessi teostada odavamalt, kui praegu. Ning leida sellist taastuvad energia allikaid, millest ka jaguks vesiniku tootmiseks.



## SUMMARY

Some major countries had a plan to start using a hydrogen - powered vehicles, in order to reduce carbon dioxide gas emissions. Unfortunately, some of them are not progressing as fast as they had planned. Others, such as California, have made great progress, which is ultimately developed a hydrogen refueling infrastructure for both, internal combustion engine and also fuel cell vehicles. We can be proud of the European Marine Energy Centre over, who contributes to the large investments in order to carry out a research project. At the beginning of the work already knows that the project will be economically not rentable, however, have the confidence to acquire new knowledge which is necessary.

For Fuel cell vehicles and refueling structure contribute governments and car manufacturers also. Among them is a project "HyNor" which is closest to us, where Norway, Denmark, Sweden and Finland are building a so-called "hydrogen highway". By the project will be built new hydrogen refueling stations and will be purchased more fuel cell vehicles for government needs.

There are different technologies for "green" hydrogen production. The solution is solar, wind, geothermal and biomass energies. In our case, could be used in some extent, biomass, wind and marine energy.

A major step forward in fuel cell vehicles has become a high-pressure hydrogen tank, which are supports pressure up to 700 bars. Some of the leading car makers are making a close cooperation for more rapid development. These are BMW and Toyota groups. This year come at the market Toyota Mirai, which price and comfort makes probability it the best. However, it should be borne in mind that, from hydrogen-fueled vehicles may be both, internal combustion engine and fuel cell. Unfortunately, we do not have any hydrogen powered vehicles because the nearest refueling station is in Sweden. However, the largest fuel cell vehicle manufacturers have also been thinking about it and are looking for low-cost solutions to be able to produce small hydrogen generation plant, so that people can make fuel for their own needs at home. However, the price of fuel cell vehicles is still very high. Currently, the average price of an internal combustion engine of the vehicle is approximately 125 €/ kW, Toyota Mirai price is 465 €/ kW. What shows, that we will have make a lot of effort to get technology more cheaply. It is necessary to find a way how precious metals substitute by composite materials. This problem is also resolved dealt with in Estonia, namely the

University of Tartu.

There are several different ways to produce hydrogen. It could be produced from renewable and nonrenewable sources. The United States has even in legislation that minimum 30 percent of the total hydrogen production must be made from renewable sources. However, the majority of the hydrogen production is made by natural gas steam reforming process. During the process, makes carbon dioxide gas more than its burning time. To collect CO<sub>2</sub> emission has been developed different technologies, but a hundred percent results are not yet reached.

In some countries hydrogen is produced by electrolysis. It can be produced cost-effective only if you do not have to pay for electricity, or if some green electricity production is over than you need. Such countries like Norway and Canada, which has built the largest plants of the hydrogen and oxygen production by hydro-electric power surplus.

There is also a wood gasification technology, which can be used to produce "green" hydrogen. Types of biomass gasification reactors are for different fuels and different efficiencies. The work is described a Great Point Energy and the Netherlands Energy Research Centre gasification technologies. Both have made great progress. Technologies makes more effective, which increase the economic indicators. It should also be noted that there is also an economically feasible projects, which are in use with gasification plants. Such a station can also be found in Estonia, but they are driven for production buildings, where there is no central heating and gas.

Looking at the rough calculation of the production hydrogen from the biomass is a very sad fact, which we have to admit. Compared to the world price it is too expensive, and secondly, if we want to be imported fossil fuels is free, then after four years of our rich nature becomes a desert.

But, nevertheless, must look forward in other ways of reducing greenhouse gas, because fossil fuels is a limited resource, and if we continue same way of environmental pollution, most likely in the end of the century the ocean level rises up to 95 cm. This means that more than half of the Estonian lands will be under water.

At summary the work has been performed all tasks. There is an overview of the different technologies in the world of "green" hydrogen production. There is also described the latest developments in fuel cell vehicles. Made analysis: hydrogen production in Estonia. In order to produce hydrogen in an economically expedient, we have to make a lot of work and research to find a way how to carry out the process of electrolysis technologies cheaper than it is now. And also find such renewable energies, which would enough for production.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. California Fuel Cell Partnership kodulehekülg [WWW] <http://www.cafcp.org/stationmap> ( 15.10.2015 )
2. Worldwach instituute kodulehekülg [WWW] <http://www.worldwatch.org/node/4516> (16.10.2015 )
3. ITM Power kodulehekülg [WWW] <http://www.itm-power.com/news-item/0-5mw-electrolyser-sale-to-emec> ( 16.10.2015)
4. Sea Vision kodulehekülg [WWW] <http://www.seavision.org.uk/article/new-technologies/openhydros-tidal-technology-being-tested-emec> (17.10.2015 )
5. Scientific America ajakirja kodulehekülg [WWW] <http://www.scientificamerican.com/article/hydrogen-may-prove-fuel-of-the-future/?mobileFormat=true> (18.10.2015 )
6. Dincer, Ibrahim, Joshi, Anand S. Solar Based Hydrogen Production Systems: Chapter 2 Hydrogen Production Methods. Ameerika Ühendriigid, Springer, 2013
7. Hydrogen Cars Now kodulehekülg [WWW] <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/h2ice-cars/> (19.10.2015 )
8. Sustainable Cars kodulehekülg [WWW] <http://sustainablecarila.weebly.com/history.html> (19.10.2015 )
9. Hydrogen Cars Now kodulehekülg [WWW] <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/fuel-cell-cars/> (20.10.2015)
10. Energiatalgud kodulehekülg [WWW] <http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=K%C3%BCtuselement> Energiatehnoloogiad, kütuselement ( 23.10.2015 )

11. Hydrogen Cars Now kodulehekülg [WWW] <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/hydrogen-fuel-cells/>. Artikkel: Hydrogen Fuel Cells ( 24.10.2015)
12. Professor Andres Siirde, [WWW] <http://staff.ttu.ee/~asiirde/Loengud/autodiagnostika/auto8.doc> Loeng: Kütusekulu vähendamine (efektiivsuse suurendamine) Auto ehitiste tehnoloogiliste lahenduste kaudu. (25.10.2015)
13. Toyota Global Newsroom kodulehekülg [WWW] <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/4198334> (25.10.2015)
14. Hydrogen Cars Now kodulehekülg [WWW] <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/hyundai-tucson-fcev/> (27.10.2015)
15. Hydrogen Cars Now kodulehekülg [WWW] <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/european-union-hydrogen-highway/> (27.10.2015)
16. Inside EVs kodulehekülg [WWW] <http://insideevs.com/less-than-500-hydrogen-fuel-cell-cars-are-in-all-of-europe-today-250-hyundai-ix35-fuel-cell-vehicles/> (6.11.2015)
17. Hydrogen Mobility Europe pressi teade [WWW] <http://h2me.eu/H2ME-launch-Press-release-EN.pdf> (6.11.2015)
18. Prakash Parthasarathy,K. Sheeba Narayanan, June 2014. Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield [Online] A review- Elsevier
19. Jan, Erik, Hanssen, Elisabet, Fjermestad, Hagen, June 2006 Prospects for hydrogen from biomass. Annex 16, Subtask B, Final Report. IEA Hydrogen Implementing Agreement, [Online] <http://ieahia.org/pdfs/Annex-Reports/Task16B.aspx>,
20. Great Point Energy kodulehekülg [WWW] <http://www.greatpointenergy.com/ourtechnology.php> ( 10.10.2015 )

21. Energy research Center of the Netherland [WWW] <http://www.milenatechnology.com/home/> (15.10.2015 )
22. Ülo Kask, Villu Vares, Termokeemiline muundamine. "Eesti põlevloodusvarad ja jäätmed" 2013 a. 22-26. [Online] <http://www.eby.ee/ajakiri2013.pdf>
23. Rene Tammist, Taastuenergia 100% – puidu roll taastuenergiade üleminekul. "Eesti põlevloodusvarad ja jäätmed" 2013 a. 10-11 [Online] <http://www.eby.ee/ajakiri2013.pdf>
24. Pengmei Lva, Zhenhong Yuana, Longlong Maa, Chuangzhi Wua, Yong Chena, Jingxu Zhub, Hydrogen-rich gas production from biomass air and oxygen/steam gasification in a downdraft gasifier. Elsevier 12 January 2007 Renewable Energy 32 (2007) 2173–2185
25. Tobias Heffels, Russel McKenna, Wolf Fichtner, Energy Conversion and Management. An ecological and economic assessment of absorption-enhanced-reforming (AER) biomass gasification. Elsevier September 2013 [Online] [Http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041300544X](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041300544X)
26. Lelde Vilkriste, Marja Gustafsson, Jaanus Uiga, Alo Allik, Maris Pütsepp, Puiduenergia väljaanne metsaomanikule, 2012 Tartu, Eesti Maaülikooli Tehnikainstituut
27. Sebastian Fendt, Alexander Tremel, Matthias Gaderer, Hartmut Spliethoff, The potential of small-scale SNG production from biomass gasification, Biomass Conv. Bioref. (2012) 2:275–283. 21 märts 2012
28. Maanteeameti kodulehekülj [WWW] <http://www.mnt.ee/?id=10797> ( 7.12.2015 )