

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND  
Ökoloogia ja maateaduste instituut  
Geograafia osakond

Martin Mäll

**TUULIKUTE ENERGIATOODANGU AJALISE MUUTLIKUSE  
KOMPENSEERIMINE VEE ELEKTROLÜÜSI JA KÜTUSEELEMENTI  
KASUTADES**

Bakalaureusetöö ökotehnoloogias

Juhendaja: PhD Ain Kull

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja: .....

Osakonna juhataja: .....

Tartu 2013

## Töös kasutatud lühendid

AFC – leeliselektrolüüdiga kütuseelement

AWE – leelises keskkonnas elektrolüüser

CHP – soojuse ja elektri koostootmisjaam

DC – alalisvool

DOE – Ameerika Ühendriikide Energeetikaministeerium

ESS – energiasalvestussüsteem

HHV – kõrgem kütteväärtus

HTE – kõrgtemperatuuriline elektrolüüser

HTT – horisontaalteljeline tuulik

KE – kütuseelement

KHG – kasvuhoonegaasid

M – molaarmass

MCFC – sulakarbonaat-elektrolüüdiga kütuseelement

MCFC/CHP – sulakarbonaat-elektrolüüdiga soojuse ja elektri koostootmise kütuseelement

NETL – National Energy Technology Laboratory – Riiklik Energiatehnoloogia Labor

PAFC – fosforhape-elektrolüüdiga kütuseelement

PAFC/CHP – fosforhape-elektrolüüdiga soojuse ja elektri koostootmise kütuseelement

PEM – prootonvahetusmembraaniga elektrolüüser

PEMFC – polümeerelektrolüütmembraaniga kütuseelement

SOFC – tahkeoksiid-elektrolüüdiga kütuseelement

SOFC/CHP – tahkeoksiid-elektrolüüdiga soojuse ja elektri koostootmise kütuseelement

$W_{H_2,HHV}$  – vesinikus sisalduv spetsiifiline keemiline energia massikaalu järgi

VTT – vertikaalteljeline tuulik

$\eta$  – energeetiline efektiivsus

# Sisukord

1	Sissejuhatus.....	5
1.1	Tuuleenergeetika maailmas ja Euroopas.....	7
1.2	Tuuleenergeetika Eestis .....	10
1.3	Tuuleenergia salvestamise ja ülekandeprobleemid.....	12
2	Andmestik ja metoodika .....	14
3	Tulemused.....	17
3.1	Tuulikute tehnoloogia .....	17
3.1.2	Horisontaalteljega tuuleturbiinid.....	17
3.1.3	Vertikaalteljega tuuleturbiinid .....	20
3.2	Vesiniku tootmise tehnoloogiad.....	21
3.2.1	Vee kvaliteet elektrolüüsi protsessis ja merevee kasutamine.....	24
3.2.2	Leeliselises keskkonnas elektrolüüs.....	25
3.2.3	Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüs.....	27
3.2.4	Kõrgtemperatuuriline elektrolüüs .....	29
3.3	Vesinikust elektrienergia tootmistehnoloogiad.....	30
3.3.1	Vesinikkütusel töötav sisepõlemismootor.....	30
3.3.2	Vesinikkütusel töötav gaasiturbiin.....	31
3.3.3	Kütuseelemendid .....	31
3.3.3.1	Polümeerelektrolüütmembraaniga kütuseelement .....	33
3.3.3.2	Leeliselektrolüüdiga kütuseelement.....	34
3.3.3.3	Fosforhape-elektrolüüdiga kütuseelement .....	35
3.3.3.4	Sulakarbonaat-elektrolüüdiga kütuseelement .....	36
3.3.3.5	Tahkeoksiid-elektrolüüdiga kütuseelement .....	37
3.4	Tuulikute energiatoodang Eestis.....	40
3.4.1	Elektrolüüs ja kütuseelement süsteemide energiatõhusused.....	40

3.4.2	Tuulikute potentsiaalse energiatoodangu tasakaalustamine toodangutippude äralõikamisega 75% tasemel.....	43
3.4.3	Tuulikute potentsiaalse energiatoodangu tasakaalustamine toodangutippude äralõikamisega 50% tasemel.....	45
3.4.4	Energeetilise kulukuse analüüs.....	47
	Kokkuvõte .....	48
	Tänuavaldused .....	50
	Summary .....	51
	Viidatud allikad .....	53

# 1 Sissejuhatus

Keskkonnasäästlikkus ja ressursside jätkusuutlik kasutamine on 21. sajandi võtmesõnad. Suur osa keskkonda mõjutavaid probleeme, nagu happevihmad, globaalne soojenemine ja osoonikihi hõrenemine, on põhjustatud eelkõige energia tootmisest, kasutamisest ning muundamisest. Viimastel aastatel on arendatud mitmeid perspektiivseid tehnoloogiaid, mis aitavad lahendada praeguseid keskkonnaprobleeme (Dincer, 2012).

Taastuvenergiad esindavad pöördepunkti, juhtides meie energiasüsteeme jätkusuutlikkuse suunas ja tagades kindlustunde. Tänapäeval eksisteerib suur hulk erinevaid taastuvenergia tehnoloogiaid ja vahendeid. Tuul taastuvenergia allikana on maailmas üks kiiremini arenev (Mostafaeipour, 2010) ning on ennast nüüdseks tõestanud laialdaselt leviva elektrienergia allikana ja sellel on keskne roll üha rohkemates riikides, praeguses ja pikaajalises energiakavas (GWEC<sup>b</sup>, 2013).

Suurem osa tuulejõuseadmeid toodavad elektrienergiat. Tuuleenergeetika üheks põhiprobleemiks on tuulejõujaamade tootmisgraafikute sobitamine energiasüsteemi tootmis- ja tarbimisgraafikuga (Liik et al., 2005). Lisaks tuleb prognoosida tuulepargi väljundvõimsust 24 tundi ette, et plaanida elektrivõrgus vajalikud muudatused ja reservid. Prognoosimisel tekivad vead. Kui lõigata tuulikute tootmisgraafikute tipud, väheneb ennustamisel tekkinud viga. Tootmisgraafiku lõigatud tippude energiat võiks kasutada vesiniku tootmisel. Selle tehnoloogiaga oleks võimalus energiat salvestada ning tuulevaiksel perioodil vesinikust jälle elektrienergiat toota (Toom & Annuk, 2010). Tulenevalt tuule juhuslikust iseloomust on toodetud tuuleenergia ajas ebahühtlaselt jaotatud. Uute tuuleturbiinide lisandumisega elektrivõrkudesse see probleem ainult suureneb ja teeb energiavoo haldamise keeruliseks (pinge ja kõikumise reguleerimine, tuuleparkide talitlemine jne). Ometi oleneb elektrivõrgu stabiilsus elektritarne ja nõudluse vahelisest tasakaalust. Seega liites üha enam tuuleturbiine elektrivõrguga, on suutlikkus reguleerida elektritarnet tähtis (Ibrahim et al., 2008) probleem, mille võib lahendada vesinikul põhinev elektrokeemiline energiasalvestussüsteem.

Chang et al. (2011) koostas uurimustöö, kus hinnati vesiniku tootmistehnoloogiaid Fuzzy Delphi meetodit kasutades. Uuriti seitset vesiniku tootmiste tehnoloogiat: maagaasi reformeerimine,

maagaasi reformeerimine CO<sub>2</sub> kinnipüüdmise ja salvestamisega, biomassi gaasistamine, fermentatsioon, elektrolüüs, kasutades avalikku elektrit, tuuleenergiat ja fotogalvaanilist elektrienergiat. Töö tulemused näitavad, et vesiniku tootmine tuuleenergiat kasutades saavutas seitsmest tehnoloogiast parima tulemuse. Põhjuseks on asjaolu, et tuuleenergia ei kasuta fossiilseid kütuseid ning sellel on väike CO<sub>2</sub> pääst (Chang et al., 2011). Tänapäeva tuuleelektrijaamade olelusringi heitkoguste intensiivsus on 5,0–8,2 g CO<sub>2</sub>/kWh toodetud elektri kohta. Arvestatud on heitkoguseid, mis tekivad elektrituulikute tootmise, transpordi, ülesseadmise, hoolduse ja maha võtmisega. Tuuleenergia toodab kõige vähem CO<sub>2</sub> emissioone kWh ühiku kohta võrreldes fossiilsete kütuste ja teiste taastuvenergiaallikatega (Wang & Sun, 2012). Võrdlusena jäävad fossiilkütusega elektrijaamade emissioonid vahemikku 500 kuni 1200 g CO<sub>2</sub>/kWh (Outlook 2012). Nii fossiilkütuste tarbimine kui ka CO<sub>2</sub> pääst on ekspertide hinnangul väga olulise tähtsusega. Võrreldes teiste tehnoloogiatega on tuuleenergia ohutum (kaitsemeetmete kriteeriumid) ning ühiskonna poolt heakskiidetud (Chang et al., 2011).

Vesinik suudab luua elektri tootmise ja nõudluse vahele puhvri. Seega võib elektrolüütiline vesiniku tootmine olla väga kasulik tuuleelektrijaamades, kus elektrienergia toodang on oleneb tuule juhuslikkusest (Chang et al., 2011). Vesiniku tootmine tuuleenergiast näib olevat atraktiivne energiasalvestuse võimalus, olles võimeline pakkuma tasakaalustavat teenust nii elektri tootmises kui ka tarnijale ning leevendades tuule juhuslikkusest tulenevat negatiivseid mõjusid (Beccali et al., 2013).

Käesoleva uurimistöö eesmärk on luua kirjandusel põhinev teoreetiline ülevaade tuuleenergia ja vesiniku tootmise tehnoloogiatest, reaalsete Eesti tuuleenergia toodangu andmete analüüsi kaudu selgitada tuuleenergia kasutamise võimalusi vesiniku tootmisprotsessis, kasutades vee elektrolüüsi ja kütuselemendil põhinevaid tehnoloogiaid ning leida nende potentsiaalne energeetiline efektiivsus Eesti tingimustes. Töö peamiseks hüpoteesiks on, et tuuleenergia juhusliku iseloomuga tipuenergia kasutamisel vesiniku tootmiseks ja vesinikust tuulevaiksel perioodil elektrienergia tootmise kaudu on võimalik olulisel määral kahandada Eesti elektrisüsteemile tuulikute poolt avaldatavat ebasoodsat mõju.

## 1.1 Tuuleenergeetika maailmas ja Euroopas

Tuuleenergia ajaloo üks kõige tähtsam pöördepunkt on Taani ja USA osalus tuuleenergeetika uurimis- ja arendustegevuses pärast 1973. aasta naftakriisi. Aastatel 1973–1986 arenesid tuuleturbiinid kodustest ja põllumajanduslikest (1–25 kW) seadmetest suurteks energiavõrguga ühendatud tuulikuteks (50–600 kW), mis moodustasid tuulikuparke. Esimesena rakendati tuuleenergiat laiaulatuslikult Californias, kus lisati aastatel 1981–1990 üle kuueteist tuhande masina (võimsus vahemikus 20–350 kW) koguvõimsusega 1,7 GW. Euroopas tõusis tuuleenergia osakaal 80ndatel ja 90ndatel stabiilselt, kõrgem elektri hind ning suurepärased tuuletingimused viisid väikese, kuid stabiilse turu loomiseni. Pärast 1990. aastat nihkus enamik arendus- ja turundustegevusest Euroopasse, tuues viimase kahekümne aastaga tuuleenergia rahvusvahelisel areenil esiliinile (Kaldellis & Zafirakis, 2011).

2011. aasta seisuga oli globaalne installeeritud tuuleenergia koguvõimsus 238 GW (joonis 1 ja 2) ning paigaldatud seadmete koguväärtus üle 50 miljardi euro. Edasiviivad riigid on olnud viimastel aastatel Hiina ja India. Kuigi Hiina tuuleenergia kasv ei ole enam kahe- ega kolmekordne, moodustas see siiski 43% globaalsest turust. Koos moodustasid need kaks riiki globaalsest turust natukene üle 50%. Prognooside järgi on kuni 2016. aastani maailma tuuleenergia rakendamise kasv keskmiselt 8% aastas, saavutades koguvõimsuse 500 GW (GWEC<sup>a</sup>, 2011).



Joonis 1. Globaalne tuuleenergia võimsuse aastane lisandumine (GWEC<sup>b</sup>, 2012).



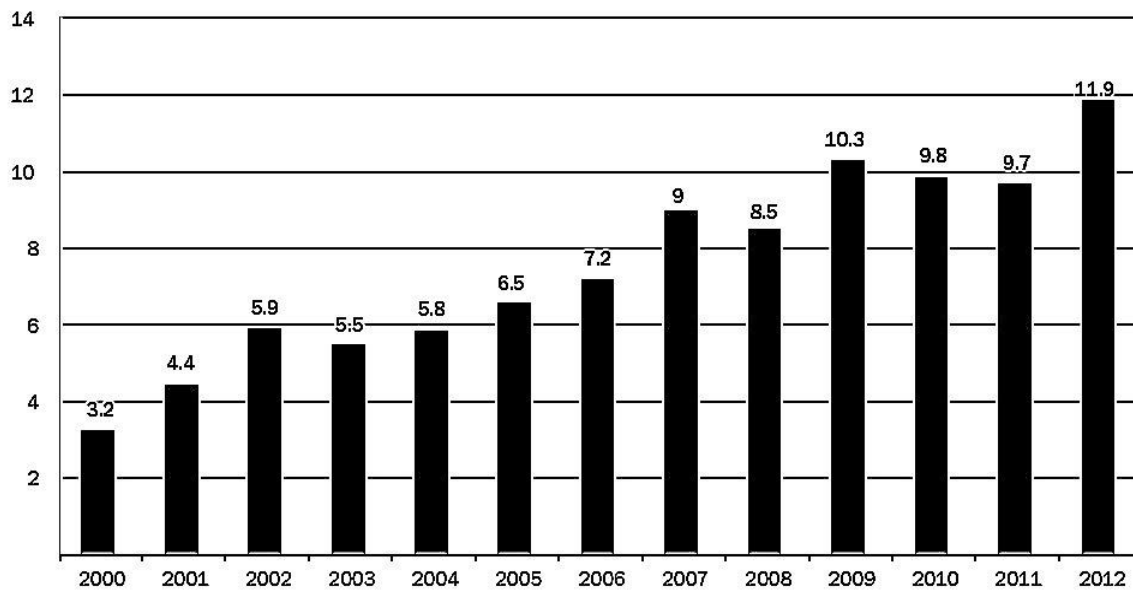
**Joonis 2.** Globaalne tuuleenergia installeeritud võimsuse kumulatiivne kasv (GWEC, Global Wind Statistics 2012, 2013).

Pärast 15 aastat kestnud umbes 28% keskmist kumulatiivset kasvutempot on kaheksakümnes riigis 2012. aasta seisuga installeeritud ligikaudu 240 GW võimsust, olles kasvanud rohkem kui 40 korda sama perioodi ulatuses. Kaksikümmend kaks riiki on lisanud enam kui 1000 MW väärtuses võimsust (Outlook, 2012).

Euroopa Komisjon esitas 2007. aasta jaanuaris hulga keskmise tähtajaga eesmärged, kiirendamiseks üleminekut vähem CO<sub>2</sub> heiteid tekitavasse majandusse, sealhulgas vähendamaks süsinikdioksiidi heitkoguseid 20% aastaks 2020 ja suurendamaks taastuvenergia osakaalu 20%-ni energia lõpptarbimises. Erinevate taastuvenergia allikate seast eeldatakse, et tuuleenergia areng moodustab suure osa 2020. aastaks vajaminevast taastuvelektri osakaalust. Tuuleenergia moodustas 2007. aastal ligikaudu 4% kogu Euroopa elektrivajadusest (Rogues et al., 2010).

Aastal 2012 paigaldati Euroopas tuuleenergia seadmeid võimsusega 12 744 MW, millest 11 895 MW paigaldati Euroopa Liidu liikmesriikides (joonis 3). Maismaatuulikuid paigaldati 10 729 MW ja avameretuulikuid 1166 MW. EL-i investeeringud tuuleparkidesse jäid vahemiku 12,8–17,2 miljardit eurot, millest maismaa ja avamere tuulikupargid said vastavalt 9,4–12,5 ja 3,4–4,7 miljardit eurot. Aastas lisatud seadmete seisukohalt juhtis tabelit Saksamaa, lisades 2415 MW võimsust, millest 80 MW (3,3%) lisati avamerele. Teisele kohale jäi Suurbritannia, lisades 1897 MW võimsust, millest 854 MW (45%) lisati avamerele, järgnesid Itaalia (1273 MW), Hispaania (1122), Rumeenia (923 MW), Poola (880 MW), Rootsi (845 MW) ja Prantsusmaa (757 MW). Esile kerkivates Kesk- ja Ida-Euroopa turgudest oli rekordaasta nii Poolal kui Rumeenial – mõlemad lisasid umbes 7,5% EL-i aastasest koguvõimsusest. Euroopa Liidus on tuuleenergia koguvõimsus 2012. aasta seisuga 106 GW. Saksamaa on jätkuvalt EL-is kõige suurema lisatud koguvõimsusega riik, millele järgnevad Hispaania, Itaalia, Suurbritannia ja Prantsusmaa.

Järgmised kümme riiki on lisanud üle 1 GW võimsust: Austria, Belgia, Taani, Kreeka, Iirimaa, Holland, Poola, Portugal, Rumeenia ja Rootsi. Saksamaal (31,3 GW) ja Hispaanial (22,8 GW) on suurim kumulatiivne lisatud tuuleenergia võimsus Euroopas. Koos nad esindavad 52% EL-i koguvõimsusest. Normaalsel tuuleaastal toodavad 2012. aasta seisuga lisatud tuuleelektrijaamad 231 TWh elektrit, mis moodustab 7% EL-i lõpptarbimisest. (The European Wind Energy Association, 2013 ). EL-i kogu elektritoodang 2011. aastal on 3279 TWh (Eurostat, 2013).



*Joonis 3. Märgitud aastatel lisandunud tuuleenergia võimsus (GW) EL-is (EWEA; 2013).*

## 1.2 Tuuleenergeetika Eestis

Tuuleenergia kasutamisele kaasaegsete tuulegeneraatoritega pani Eestis alguse Eesti ja Taani Keskkonnaministeeriumide ühisfinantseering. Koos biosfääri kaitseala Hiiumaa keskusega ning Taani firmadega püstitati 1997. aasta septembris 150 kW näidistuulejaam Hiiumaal Tahkuna neemel. Ebasobivate majandustingimuste tõttu andis järgmist tuulikut oodata kuni 2002. aastani, kui alustas tööd Virtsu tuulepark (Tõnsau, 2011). Alates 2002. aastast on tuuleenergia osakaal Eestis üha enam kasvanud ning 2012. aasta seisuga oli Eestis tööil 126 elektrituulikut (Tabel 2).

Eestis püstitati 2012. aastal rekordarv elektrituuliku koguvõimsusega 86 MW, mis viis riigi tuuleenergia koguvõimsuse 269 MW-ni. Tuulikud tootsid eelneva aastaga võrreldes mullu 22,7 protsenti enam tuuleenergiat, mis ulatus ühtekokku 448 GWh-ni. Eesti eelmise aasta kasvule andsid pea kogu panuse kaks suurt uut tuuleparki – Eesti Energia tuhaväljadele püstitatud 39 megavattise võimsusega Narva tuulepark ning Eesti Energia ja Nelja Energia ühisprojekt Paldiskis, mis tõi senise Pakri tuulepargi kõrvale juurde 18 tuulikut koguvõimsusega 45 megavatti. Eelmisel aastal valminud tuuleparkide koguinvesteering ületas 122 miljonit eurot ning Eesti tuuleelektrijaamad said eelmisel aastal kokku 14,1 miljonit eurot taastuvenergia toetust, mis on 22,5 protsenti kogu taastuvenergia toetussummast, milleks on 62,7 miljonit eurot (Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon<sup>a</sup>, 2013).

Tabel 2. Eestis olemasolevate tuulikute ja tuuleparkide võimsus (Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon, 2013).

Installeeritud elektrituulikud	Võimsus MW	Tootja	Tuulikute arv	Tuulikute tootja
Tahkuna tuulegeneraator (ei tööta)	0.15	Eesti Energia AS		
<b>2002</b>				
Virtsu I tuulepark	1.8	Nelja Energia OÜ (1,2MW) / Eesti Energia AS (0,6MW)	3	Enercon
Torgu 2 tuulegeneraatorit	0.45	Meritreid OÜ	3	
<b>2005</b>				
Pakri tuulepark	18.4	Nelja Energia OÜ	8	Nordex
Esivere tuulepark	8	Nelja Energia OÜ	4	Enercon
Läätsa tuulepark	3	Telewind AS	6	Siemens
<b>2007</b>				
Nasva tuulepark	1.6	Baltic Wind Energy OÜ (1,2 võrku)	2	Vestas
Viru-Nigula tuulepark	24	Nelja Energia OÜ	8	Winwind
Ruhnu (Sjustana) tuulepark	0.15	Eesti Energia AS	2	Vestas
Sangla tuulik	0.3	Sangla Turvas AS	1	
Türju tuulikud	0.3	Rotorline OÜ	3	
<b>2008</b>				
Virtsu tuulepargi lisatuulik	0.8	Eesti Energia AS	1	Enercon
Virtsu II tuulepark	6.9	Nelja Energia OÜ	3	Enercon
Esivere I tuulepark I etapp	12	Skinest Energia AS	4	Winwind
<b>2009</b>				
Aulepa tuulepark I etapp	39	Eesti Energia AS	13	Winwind
Vanaküla tuulepark	9	Nelja Energia OÜ	3	Winwind
Tooma tuulepark	16	Nelja Energia OÜ	8	Enercon
<b>2010</b>				
Virtsu III tuulepark	6.9	Nelja Energia OÜ	3	Enercon
<b>2011</b>				
Nasva tuulik	2.3	Baltic Workboats	1	Siemens
Aulepa tuulepark II etapp	9	Eesti Energia AS	3	Winwind
Aseriaru tuulepark	24	Nelja Energia OÜ	8	Winwind
<b>2012</b>				
Narva tuhavälja tuulepark	39	Eesti Energia AS	18	Enercon
Paldiski tuulepark	45	Nelja Energia OÜ, Eesti Energia AS	18	GE Energy
Sikassaare	1.5	Stacey OÜ	3	Enercon
<b>KOKKU 06.11.2012 seisuga</b>	<b>269.4</b>			
<b>2013 (prognoos)</b>				
Ojaküla tuulepark	6.9	Nelja Energia OÜ	3	Winwind
Tamba	6	Tuuleenergia OÜ	2	Enercon
Mäli	12	Tuuleenergia OÜ	3	Enercon
<b>KOKKU 31.12.2013 (prognoos)</b>	<b>294.3</b>		<b>134</b>	

Direktiivi 2009/28/EÜ järgi tuleb Eestil tagada, et aastal 2020. moodustaks taastuvatest energiaallikatest toodetud energia osakaal energia summaarses lõpptarbimises 25% ning transpordisektoris moodustaks taastuvate energiaallikate osakaal 10% transpordisektori energiatarbimisest. Selle saavutamiseks nõutavaid tegevusi kirjeldab „Eesti taastuvenergia

tegevuskava aastani 2020”, mis kiideti heaks Vabariigi Valitsuse 26.11.2010 korraldusega nr 452. (Eesti Vabariigi aruanne... 2011).

Taastuvate energiaallikate kasutuselevõtt on oluliselt vähendanud põlevkivi osatähtsust elektritootmises. Statistikaameti andmetel suurenes 2011. aastal taastuvatest energiaallikatest elektrienergia toodang võrreldes varasemaga 13%. Viimase viie aasta jooksul (2012. aasta seisuga) on elektri tootmine põlevkivist vähenenud ligi kümnendiku. Samal ajal taastuvatest allikatest elektri tootmine on suurenenud kaheksa korda. Tuuleenergia toodang suurenes 2011. aastal varasema aastaga võrreldes ligi kolmandiku. Taastuvelektri osatähtsus elektrienergia kogutarbimises kasvas aastaga 11%-lt 13%-le. Kokku toodeti 2011. aastal 12 893 GWh elektrienergiat, mis on 1% vähem kui aasta varem. Eestis tarbiti mullu varasema aastaga võrreldes 4% vähem elektrit, kogutarbimine ulatus 7,1 TWh (Statistikaamet, 2012). Taastuenergia moodustas 2012. aastal Eestis elektrienergia kogutarbimisest 14,9% (uudised, 2013), millest ligikaudu 5,5% moodustas tuuleenergia (tuuleenergia Eestis, 2013). Tuulest toodetud taastuenergia kogused kasvasid 23 protsenti ehk 83 GWh, kuna lisandusid mitmed uued tuulepargid (Aseriaru tuulepark, Paldiski tuulepark ja Tuhavälja tuulepark) (Eesti tuuleenergia koguvõimsus... 2013).

### **1.3 Tuuleenergia salvestamise ja ülekandeprobleemid**

Tuule juhuslikkusest tingituna on võimalikud perioodid, kus elektrituulikute toodang on negatiivne ning perioodid, kus toodang ületab olulisel määral tarbimist. Seega ei saa tuuleolude juhuslikkuse tõttu arvestada tipuvõimsuse katmisel tuuleelektrijaamade toodanguga. Seejuures tuleb arvestada fakti, et eriti külma ilma (alla  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) korral lülituvad tuulikud ise välja, kuid just neis oludes on harilikult tarbimine eriti kõrge (Varustuskindlustuse aruanded... 2012), seega stabiilne energiaallikas on elektrivõrgule väga tähtis. Energiavarustus peab võrduma tarbijate nõudlusega päeva igal hetkel. Kõikumised ja ettearvamatud muutused tuulenergiast võivad põhjustada katkestusi energiatarbes, mis võib kesta mõnest sekundist kuni tundideni. Lisaks ei pruugi tuuleenergia maksimaalne tarne ühilduda energia maksimaalse nõudlusega. Arvestades neid probleeme võib tuuleenergia suurel skaalal ühildamine elektrivõrguga osutada keeruliseks (Sundararagavan & Baker, 2012).

Tulenevalt elektrikatkestuse ohust, mida kujutab tuuleenergiast saadud elektri üleküllus, liiguvad Kesk- ja Ida-Euroopa riigid suunas, et oma elektriliinid Saksamaast tuulisematel päevadel lahti ühendada. Taolise olukorraga seisavad silmitsi mitmed riigid, kuna üritatakse maailmas olevat 200 000 tuuleturbiini integreerida vananeva ja piirangutega infrastruktuuriga. Taastuvenergia põhjustab probleeme kogu maailmas, kuna erinevalt maagaasist või naftast ei saa seda lihtsalt säilitada, seega peab toodetava elektri kohe ära kasutama või riskima elektrikatkestusega. Mõnikord maksavad võrguettevõtted klientidele, et nad kasutaksid rohkem elektrit selleks, et vältida elektrivõrgu kokku kukkumist. Elektrivõrgustikud Ida-Euroopas töötavad oma maksimaalsel võimsusel ja on silmitsi potentsiaalsete elektrikatkestustega, kui neile elektriväljunditele saab osaks suur elektrihoorus, mis pärineb Põhja-Saksamaalt või piki Läänemerd olevatest tuuleturbiinidest. Saksamaa süsteemi uuendamine läheks maksma vähemalt 32,2 miljardit eurot ning peab mahutama rohkem kui 8885 MW tuuleenergiat, mis on lisatud alates 2007. aastast. Elektrikatkestuste oht võib suureneda talvel, kuna siis suurenevad tuule tugevused (Bauerova et al., 2012).

Lisaks plaanib Saksamaa aastaks 2050 saada 80% oma elektrist taastuvatest energiaallikatest. Selle tulemusena tõuseb vajadus bilansienergia järele, mistõttu Saksamaa rõhutab *power-to-gas* tehnoloogia uurimist, kus liigne elekter muudetakse vesinikuks kasutades vee elektrolüüsi, mida saab hoiundada ning vajaduse korral kütuseelementidega tagasi elektriks muuta (Gahleitner, 2013). Elektrolüüsi süsteemid on ESS. Nende lisamine tuuleturbiinidele võib kaasa tuua palju kasu nii elektrivõrkudele kui tuuleenergia arendajatele ning nad peaksid mängima tähtsat osa tuuleenergia rakendustes, kontrollides tuuleelektrijaamade väljundvõimsust ja tagama abiteenuseid elektrisüsteemidele ning seeläbi võimaldama tuuleenergia suuremat levikut (Rabiee et al., 2013). Suuremahulise ESS-i tehnoloogia integreerimine taastuvenergiaga, mis on seotud elektrivõrguga, suudab tagada elektri kvaliteedi ja ühtlustada elektrienergia tarne (Shafiullah et al. 2013).

## 2 Andmestik ja metoodika

Käesoleva töö analüüsi osa andmed on saadud Eleringi 2012 aasta andmete arhiivist. Kasutatud on andmebaasis olevat kogu 2012 aasta tuulikute tootmismahu (MW) andmerida. Kõik toodangu väärtused on esitatud tunniste vahedega ning andmerea perioodiks on 01/01/2012 00:00 – 31/12/2012 24:00, ehk kokku 8784 tundi. Suurim tootmisvõimsuse väärtus tunni kohta oli 15/11/2012 10:00–11:00.

Elektrolüüserite andmed on saadud kirjandusallikate analüüsi tulemusena. Konkreetsete tehnoloogiate valiku põhjuseks on nende enim levinud kasutus praktikas või HTE puhul on selle tehnoloogia paljulubav perspektiiv ja energiatõhususe näitajad. Tehnoloogiate energeetilise efektiivsuse väärtused varieeruvad sõltuvalt süsteemi seadistuse, kasutatud materjalide, kasutusvaldkonna ning neile rakendatava energia iseloomu/karakteristiku (pidev, kõikuv, jm) järgi. Lihtsustuse mõttes on käesolevas töös iga tehnoloogia puhul kasutatud keskmist energiatõhususe väärtust (va HTE, millel on kindel väärtus eeldusel, et töötab koos gaasiturbiiniga), mis on vastavalt:  $\eta_{PEM} = 74\%$ ,  $\eta_{AWE} = 60\%$ ,  $\eta_{HTE} = 53\%$ .

Kütuseelementide andmed on saadud kasutades kirjanduslikke allikaid ja Ameerika Ühendriikide Energeetikaministeeriumi interneti kodulehekülge. Uurimistöös valitud viis kütuseelementi on enim kasutatust leidnud ja arendatud tehnoloogilised lahendused. Lihtsustuse mõttes on valitud konkreetset energiatõhususe väärtused, mis on võetud DOE koduleheküljelt:  $\eta_{PEMFC} = 35\%$ ,  $\eta_{AFC} = 60\%$ ,  $\eta_{PAFC} = 40\%$ ,  $\eta_{MCFC} = 50\%$ ,  $\eta_{SOFC} = 60\%$ .  $H_{PAFC/CHP} = 85\%$ ,  $\eta_{MCFC/CHP} = 85\%$ ,  $\eta_{SOFC/CHP} = 83\%$ .

Nii elektrolüüserite kui ka kütuseelementide efektiivsuste väärtused on viidatud vastavalt vesiniku kõrgemale kütteväärtusele HHV (valem 1) (Kabza, 2012). See on minimaalne energia kogus, mis on vajalik vee lõhustamiseks vesinikuks ja hapnikuks. Elektrolüüseri energiatõhusus on defineeritud, kui vesiniku kõrgem kütteväärtus jagatud elektrolüüsi käigus kulutatud energiaga kilogrammi toodetud vesiniku kohta (valem 2) (Rajeshwar et al. 2008).

$$W_{H_2,HHV} = \frac{HHV}{M} = \frac{285,83 \frac{kJ}{mol}}{2,02 \frac{g}{mol}} = 141,79 \frac{kJ}{g} = 39,39 \frac{kWh}{kg}, \quad (1)$$

Kus

M – molarmass

HHV – vesiniku kõrgem kütteväärtus

$$\text{Süsteemi efektiivsus} = \frac{HHV \left( \frac{kWh}{kg} \right)}{\left( \frac{\text{Virnalemõjuvsisendenergia}(kWh)}{\text{Toiteallikaefektiivsus}} \right) + \text{Abiteenustekaod}(kWh)} \cdot \text{Toodetudvesinik}(kg), \quad (2)$$

Kus

HHV – vesiniku kõrgem kütteväärtus

Eleringi arhiivist saadud andmete alusel tootsid 2012. aastal tuulikud kokku 454164 MWh elektrienergiat. Eesmärk oli tuulikute toodangute tippude äralõikamine leidmaks, kui palju elektrienergiat saab saata elektrolüüsi süsteemi ja kui palju pärast kütuseelemendi rakendamist jõuab elektrivõrku, et toodangu varieeruvust kahandada. Selleks leidis autor Eleringi andmete alusel tuulikute kogutoodangu põhjal aasta ulatuses üle 50-protsentiili ja 75-protsentiili jääva tuuleenergia osa (valem 3).

Kasutatav energia = kogutoodang üle protsentiili väärtuse – tundide arv, mil toimus üle tootminexprotsentiili väärtus (3).

Süsteemi analüüsiks leiti erinevate elektrolüüsi ja kütuseelemendi süsteemide kombineeritud energiatõhusus. Kasutusel on kolm elektrolüüs tehnoloogiat ja kaheksa kütuseelement tehnoloogiat ehk kakskümmend neli erinevat kombinatsiooni.

Valiti üks konkreetne kombineeritud süsteem, millega leiti 50 ja 75 protsentiili alusel erinevad süsteemi energeetilised efektiivsused kolme kuu kaupa (valemid 4 ja 5). Süsteemi valik on toodud põhjendusena tulemuste peatükis. Aasta kaksteist kuud jaotati neljaks: jaanuar kuni märts, aprill kuni juuni, juuli kuni september, oktoober kuni detsember.

Elektrienergia elektrolüüsi MWh = tuulikute toodang tunni kohta kolme kuu jooksul – valitud protsentiili väärtus (4)

Pärast kütuseelementi süsteemist väljunud elektrienergia MWh = elektrienergia elektrolüüserisse  
\* kogu kombineeritud süsteemi energiatõhususega (5)

## 3 Tulemused

### 3.1 Tuulikute tehnoloogia

Tuuleturbiin muundab tuule kineetilise energia mehaaniliseks energiaks, mis omakorda muundatakse generaatori abil elektrienergiaks. Nüüdisaja tuuleelektrijaamades kasutatakse peamiselt kahte järgmist liiki tuuleturbiine (Risthein, 2007):

1. rõhtsa võlliga propellerturbiinid ehk horisontaalteljelised (üle 99% kõigist kasutusel olevatest tuuleturbiinidest);
2. püstvõlliga Darrieus' ja Savonius turbiinid ehk vertikaalteljelised.

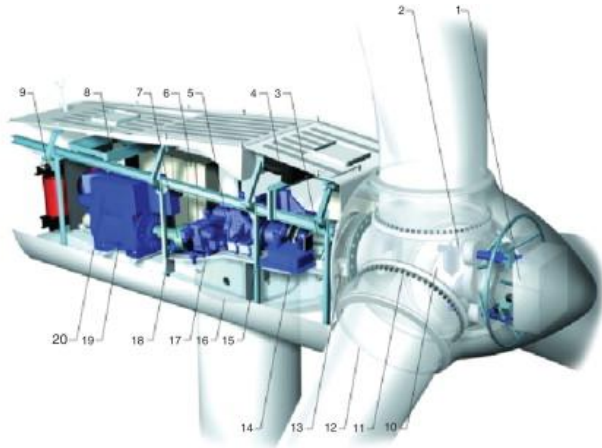
Alates 1980ndatest on edusammud aerodünaamikas, struktuuridünaamikas ja mikrometeoroloogias kaasa aidanud iga-aastasele ligi 5%-le kasvule turbiinide tootlikkuses. Praegu toodetakse tuuleturbiinidele tugevamaid, kergemaid ja efektiivsemaid labasid (Joselin Herbert et al., 2007). Lisaks on viimase 30. aasta jooksul tuuleturbiinide võimsus kasvanud sajakordseks ning samaaegselt on toodetava energia maksumus vähenenud rohkem kui 5 korda (Islam et al., 2013).

#### 3.1.2 Horisontaalteljega tuuleturbiinid

Praegusel ajal valmistatakse HTT võimsusega mõnekümnest vatist kuni mõne megavatini. Tuuleelektrijaamades on kasutusel enamasti turbiinid võimsusega 0,1- 6 MW. Võimsad (tuuleelektrijaamade) turbiinid koosnevad järgmistest osadest (joonis 4) (Risthein, 2007).

- Tiivik, mis omakorda koosneb tiibadest, nabast, võllist ja sageli ka tiibade pöörlemismehhanismist.
- Gondel, mille koosseisu kuuluvad tiiviku võlli laagerdus ja gondli pöörlemismehhanism; gondlis asuvad ka reduktor (kui see olemas on) ja elektrigeneraator koos vastavate abiseadmetega.

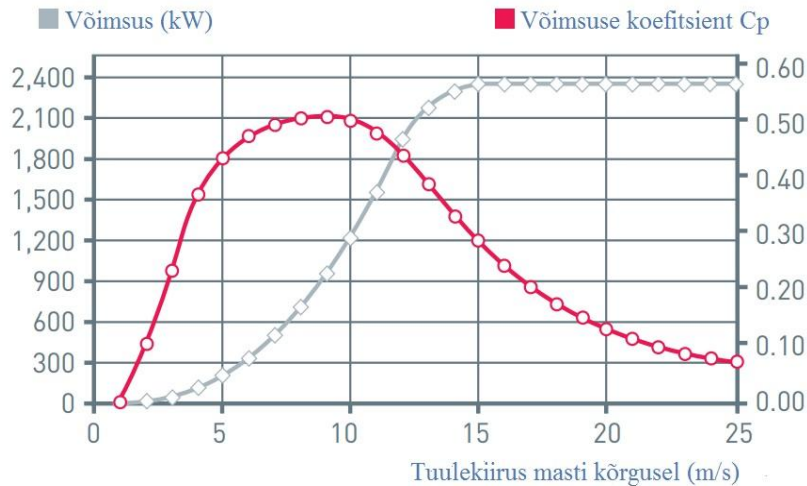
- Mast, mis enamasti on torutaoline ja valmistatakse terasest või raudbetoonist; masti sisemuses nähakse ette lift või redel; väiksemate turbiinide korral (võimsusega kuni umbes 100 kW) võidakse kasutada ka sõrestikmaste.



- |                       |                        |                           |
|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| 1. Hub controller     | 2. Pitch cylinder      | 3. Main shaft             |
| 4. Oil cooler         | 5. Gearbox             | 6. VMP-top controller     |
| 7. Parking brake      | 8. Service crane       | 9. Transformer            |
| 10. Blade hub         | 11. Blade bearing      | 12. Blade                 |
| 13. Rotor lock system | 14. Hydraulic unit     | 15. Hydraulic shrink disk |
| 16. Yaw ring          | 17. Machine foundation | 18. Yaw gears             |
| 19. Generator         | 20. Generator cooler   |                           |

**Joonis 4.** Horisontaalteljega tuuleturbiini üldskeem (Kapsali & Kaldellis, 2012).

Tiivik koosneb üldiselt kolmest labast, kuid on valmistatud ka kahe- ja harva ühelabaga tiivikuid. Tiiva tipu liikumiskiirus on kaasaegsetel võimsatel tuuleturbiinidel 6–8 korda suurem kui tuule liikumiskiirus, mistõttu propellerturbiine nimetatakse kiirekäigulisteks. Enamasti kasutatakse tuuleturbiine kohtades, kus aasta keskmine tuule kiirus on vähemalt 5 m/s. Enamik turbiine saavutab nimivõimsuse, kui tuule kiirused küündivad 12–16 m/s, kusjuures turbiin käivitub kiiruste juures 2–4 m/s ja lülitub välja, kui tuule kiirus tõuseb üle 25–35 m/s (joonis 5) (Risthein, 2007).



**Joonis 5.** Enercon E-70 E4 (2300 kW) tuuleturbiini võimsuskõver (Enercon, 2012).

Tiiviku kuju on aerodünaamiliselt kindlaks määratud. Samuti on rootori disain kontrollimeetoditest, vältimaks suurte tuule kiiruste juures tiivikute liiga kiiret pöörlemist, mis võib põhjustada kahjustusi konstruktsioonile. Tiiviku kiiruse reguleerimiseks on kaks peamist viisi (Breeze et al., 2009).

- 1) *Pitch control*– mehhanism, kus erinevate tuule kiiruste juures on rootor koos labadega võimelised pöörama, et suurendada või vähendada aerodünaamilist efektiivsust. Lisaeelisena suudab süsteem mõningal määral kontrollida ka väljundvõimsust, mis võib töötamise efektiivsust paremaks muuta. See süsteem on kujunenud enim kasutatavaks kiiruse kontrollimeetodiks.
- 2) *Stall control* – süsteem kasutab kindla kuju ja suunaga fikseeritud labasid. See seadistus põhjustab suurte tuule kiiruste juures aerodünaamilisel kandepinnal (sisuliselt laba ja selle kuju) õhuvoolu rebenemise ning seeläbi vähendab laba pöörlemiskiirust. Seda tüüpi masinad on üldjuhul vastupidavaks ehitatud ja seetõttu on alternatiividest raskeimad. Kasutatakse enamasti suurte tuuleturbiinidel (>1 MW).

Tiiviku diameeter on sellest, kui võimsat masinat soovitakse ehitada (tabel 2). Tiiviku ehitamisel on tähtsaks teguriks pöörlemiskiirus. Üldiselt on oluline hoida laba tipu pöörlemiskiirust madalamal kui 70 m/s, et vähendada aerodünaamilist müra, mis võib kujuneda keskkonnaprobleemiks. Praeguste 2–3 MW tuulikute tippude pöörlemiskiirused on 5 kuni 20 pööret minutis (Breeze et al., 2009).

**Tabel 2.** Tuuleturbiini võimsus tiiviku läbimõõdu suhtes (Risthein, 2007).

<b>Horisontaalteljega tuuleturbiinide mõõtmed</b>		
<b>Turbiini nimivõimsus MW</b>	<b>Tiiviku läbimõõt m</b>	<b>Tuuliku torni kõrgus m</b>
0,5–0,6	~ 40	40–65
1,5–2	~ 70	65–115
4,5–6	112–126	120–130

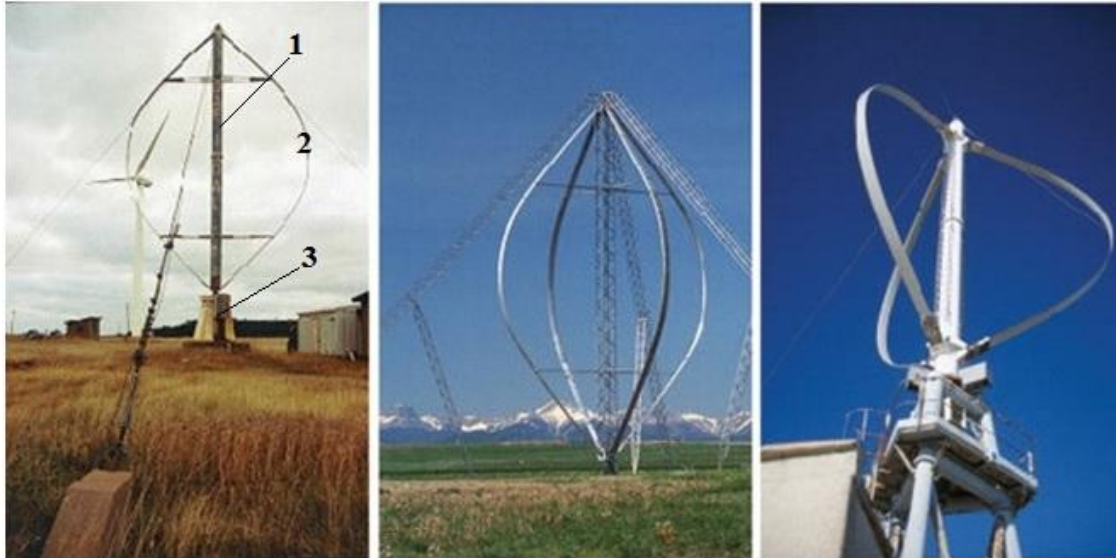
### 3.1.3 Vertikaalteljega tuuleturbiinid

Vertikaalteljega tuuleturbiinide puhul kasutatakse enamasti kahe või kolme aheljoonekujulisi tiivuga turbiine, mille leiutas prantsuse elektriinsener Darrieus 1925. aastal. Erinevalt HTT-st suudab VTT püüda tuult igast ilmakaarest, ilma et peaks muutma rootori nurka, tuule suunast olenemata. Turbiinil on aheljoonekujulised labad, mille otsad on ühendatud vertikaalse võlli külge (joonis 6). Kasutusel olevatest VTT-dest on Darrieus' turbiinid kõige enam tehnoloogiliselt täiustatud (Boyle, 2004). Kuigi horisontaalteljega tuuleturbiin (HTT) on levinum, hinnatakse maailmas üha enam väikseid vertikaalteljega tuuleturbiine (VTT). Eriti sirgete labadega VTT mudelite korral, mille eelisteks on madal maksumus, kerge paigaldamine ja lihtne hooldamine (Islam et al. 2013). Teisalt on Darrieus' tüüpi turbiinidel ka mitmeid olulisi puudusi (Risthein, 2007):

- Kiiruse mittereguleeritavus
- Väiksem kiirekäigulisus (~5)
- Väiksem võimsussuhe (~0,4)
- Tiivikule mõjub väiksem tuule kiirus, kuna tiivik asetseb maapinnale lähemal, kui masti otsas paiknev propellertiivik
- Keerukam toetus (seda eriti suure nimivõimsuse juures)

- Suurem materjalimahukus ja erimaksumus

Nimetatud puudused on põhjuseks, miks ei ole vertikaalteljega tuuleturbiine laialdaselt kasutusele võetud ning seetõttu sobivad nad paremini kasutuseks kohalike energiaallikatena (võimsusega kuni mõnikümmend kilovatti).



*Joonis 6. Darrieus' tüüpi verikaalteljega tuuleturbiinid, kus 1 – völl, 2 – tiib, 3 – generaator (Kaldellis & Zafirakis, 2012) järgi.*

### 3.2 Vesiniku tootmise tehnoloogiad

Vesinikku kasutatakse enamasti metanooli ja ammoniaagi tootmiseks ning rafineerimistööstuses. Aastane toodang on umbes 55 miljonit tonni, ning selle tarbimine kasvab aastas ligikaudu 6%. Vesiniku saab toota esmastest toorainetest mitmel erineval viisil (Bicakova & Straka, 2012). Vesinikku sisaldavad paljud looduses esinevad ained. Kõige rikkalikumalt leidub vesinikku vees. Vesinikku saab samuti eraldada fossiilsetest süsivesinikest, biomassist, vesiniksulfiididest ja muudest ainetest, kuid vähendamaks kasvuhoonegaaside emissioone, peab rakendama vesiniku tootmist taastuvatest energiaallikatest. Praegu toodetakse vesiniku peamiselt aurufaasis maagaasi lagundamisel, mis on viinud kasvuhoonegaaside emissiooni kõrgele. Ligikaudu 50% globaalselt kasutatavast vesinikust toodetakse aurufaasis oleva maagaasi lagundamisel, 30%

naftatöötlemistehaste ja keemiatööstuse heitgaasidest, 18% söe gaasistamisest, 3,9% vee elektrolüüsist ja 0,1% muudest allikatest (Dincer, 2012).

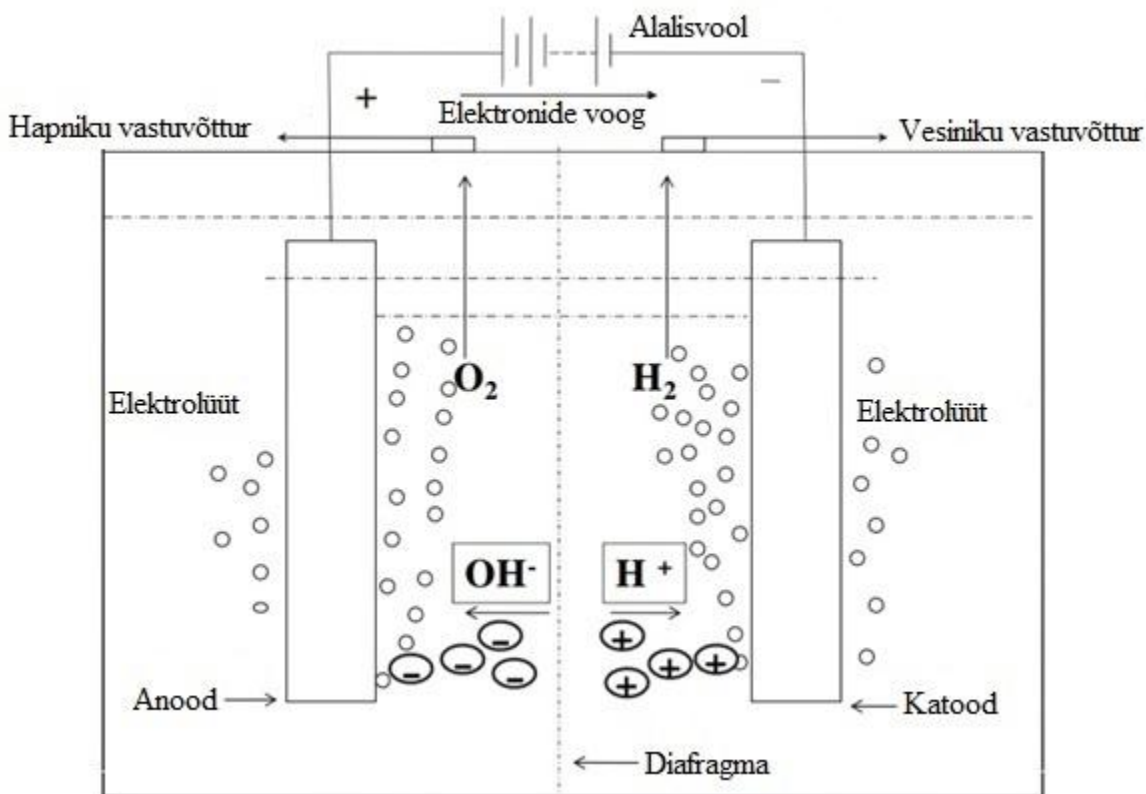
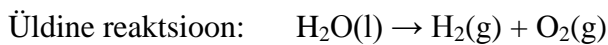
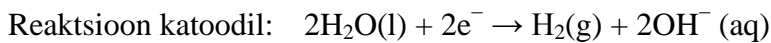
Vesiniku tootmisprotsessid on soojuslikud, elektrokeemilised ja bioloogilised ja olemas on üheksa peamist protsessi (Lisa 1). Nendeks on auru reformatsioon, osaline oksüdatsioon, termokeemiline vee lõhustamine, termolüüs/gaasistamine, fotolüüs, fotobioloogiline, mikroorganismide fermentatsioon, elektrolüüs ja kõrgtemperatuuriline elektrolüüs (Demirci & Miele, 2013).

Vesiniku tootmisel eraldatakse ja isoleeritakse vesinik iseseisva molekulina, mille soovitud puhtuse tase on sõltuvuses hiljem kasutatavast rakendusest. Protsess oleneb lähtekohast ja praegusel ajal on domineeriv metaanist lähtuv tootmisskeem. Seega fossiilsete kütuste puhul on maagaasi muundamine vesinikuks suhteliselt lihtne. Nafta puhul on see keerulisem ning söe korral on vaja kõrgtemperatuurilist gaasistamist. Kuid energia puhul, mis on juba elektriks muundatud on elektrolüüs kaasajal enim kasutatud meetod vesiniku tootmiseks (Sørensen, 2012).

Vee elektrolüüs, termokeemiline ringlus/tsükkel ja fotokatalüütilised protsessid on mõningad kõige olulisemad mittefossiilkütustel baseeruvad protsessid tootmaks vesiniku. Praegu on nii termokeemiliselt kui fotokatalüütiliselt vesiniku tootmise meetodid majanduslikult liiga ebaefektiivsed. Seega on vee elektrolüüsi tehnoloogiad nagu leelises keskkonnas elektrolüüs (ingl k *alkaline water electrolysis*; AWE), kõrgtemperatuuriline elektrolüüs (ingl k *high-temperatur electrolysis*; HTE) ja prootonvahetusmembraaniga elektrolüüs (ingl k *proton exchange membrane*; PEM) paljulubavad tehnoloogiad, kui neid kasutatakse koos taastuvenergiaga (Zhang et al., 2010). Käsitatud elektrolüüsi süsteemide võrdlus on esitatud tabelis 3.

Elektrolüüs tundub olevat ainukene kaasaegne väljatöötatud laiaulatuslik vesiniku tootmise meetod fossiilkütustele järgneval ajastul. Vesiniku tootmine kasutades vee elektrolüüsi on arenenud tehnoloogia, mis põhineb fundamentaalselt lihtsal protsessil – see on väga efektiivne ja ei sisalda liikuvaid osi (Kreith & Goswami, 2007). Vee elektrolüüsi seade koosneb anoodist, katoodist, toiteallikast ja elektrolüüdist (joonis 7). Rakendatakse alalisvoolu säilitamiseks elektri tasakaalu ja elektronide liikumist alalisvoolu allika miinusklammilt katoodile, kus elektronid

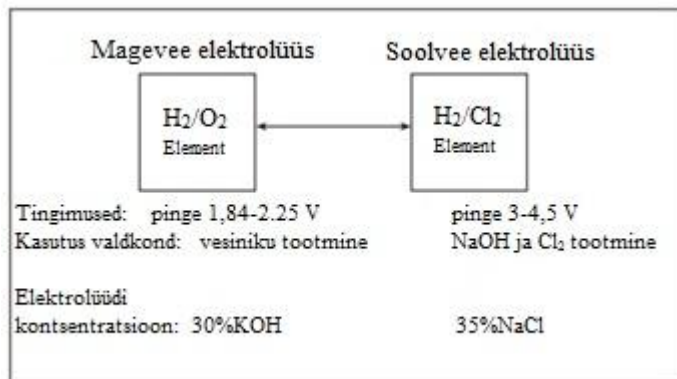
tarbitakse vesinikioonide (prootonite) poolt, et moodustada vesinikku ( $H_2$ ). Selleks et hoida elektrilaengut (ja valentsi) tasakaalus, toimub hüdroksiidionide (anioonid) ülekanne läbi elektrolüüdi lahuse anoodile, kus hüdroksiid ionid annavad ära elektronid ja need elektronid liiguvad tagasi alalisvooluallika plussklemmidele. Et parandada lahuse juhtivust kasutatakse elektrolüüseris elektrolüüte, mis enamasti koosnevad suure liikuvusega ionidest. Kaaliumhüdroksiid on enim kasutatud vee elektrolüüsis, vältides suuri korrosiooni põhjustatud kahjusid, mida tekitavad happelised elektrolüüdid (Zeng & Zhang, 2010). Järgmised reaktsioonid kirjeldavad elektrolüüsis läbiviidavat vesiniku tootmise protsessi.



**Joonis 7.** Vee elektrolüüsi baassüsteemi skeem (Zeng & Zhang, 2010) järgi.

### 3.2.1 Vee kvaliteet elektrolüüsi protsessis ja merevee kasutamine

Leeliselektrolüüs kasutab madala soolasisaldusega magevett ja seetõttu lisapuhastamine ning magestamine tõstavad toodetava vesiniku maksumust. Joonis 8 näitab leelis ja soolvee elektrolüüsi. Esimese puhul on põhitoodang vesinik, kuid teise puhul naatriumhüdroksiid/seebikivi ja kloor ning vesinik on kõrvalprodukt. Magevee elektrolüüsis olevat elementi teatakse  $H_2/O_2$  elemendina ning soolvee elektrolüüsis kui  $H_2/Cl_2$  elementi. Toodetud vesiniku-hapniku suhe on 2:1 ja vesiniku-kloori suhe 1:1. Mis puudutab soolast vett, kui toorainet elektrolüüsiks, siis sellel oleks suur eelis, eeldusel, et elektrolüüseri element suudab käituda kui  $H_2/O_2$ . Kuid normaalsete töötingimustega merevee elektrolüüsis kombineeruvad massiülekanne piirangud ja reaktsiooni kineetika, et moodustada elemendis  $H_2/Cl_2$ -te.



**Joonis 8.** Väljakujunenud leelises keskkonnas ja soolases keskkonnas elektrolüüsi tehnoloogia (Abdel-Aal et al. 2010) järgi.

Selleks et kasutada merevett toorainena vesiniku tootmiseks läbi elektrolüüsi, on olemas kaks võimalust.

Esimene variant on soolvee täielik magestamine eemaldamiseks kõik lahustunud soolad ning toota põhimõtteliselt destilleeritud vett, mida saab seejärel elektrolüüsi protsessides kasutada. Puuduseks on veepuhastus- ja magestamissüsteemidega kaasnevad lisainvesteeringukulud ning keskkonnaprobleemid, mis tekivad magestamise käigus tekkinud jääksoolade käitlemisega.

Eeliseks on selle tehnoloogia kasutamisel mageveetoodang, mida saab elektrolüüsis kasutada.

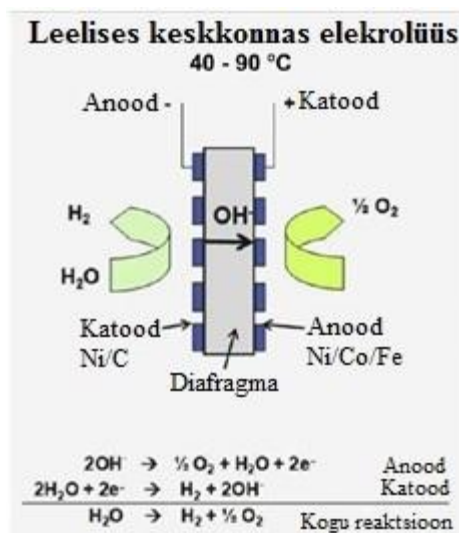
Teine võimalus on disainida elektrolüüsi süsteem, mis on suuteline kasutama merevett otse elektrolüüsis. Tõenäoliselt töötaksid sellised süsteemid madala energiatihedusega ning oleksid elektrodidega kokku puutudes võimelised elektrolüüsi käigus kasutama väikestes kogustes vett. Puudusi on palju: tuleb arendada uus tehnoloogia, mis oleks suuteline kõrvaldama võimalikud probleemid, mis kaasnevad korrodeerumise ja saastumisega ning soovimatute gaaside eraldumine (nt kloor), mis tekivad elektrokeemiliste protsesside käigus. Võimalikeks eelisteks oleksid madalamad investeerimiskulud ning soolase vee jääkide loomulik kõrvaldamine, mis on vaid pisut sooladega rikastatud. Lisaks on võimalik mereveest saada majanduslikult suurtes kogustes metalle, eriti magneesiumi magneesiumhüdroksiidi kujul.

Ainukesed raporteeritud kommertsrakendused soolavee elektrolüüsile tulenevad naftamaardlatest. Seal kasutatakse seda, et vähendada protsessi jahutusvee saastatust ja lisaks töödelda ning steriliseerida vett. Nendel juhtudel pakkus huvi anoodil aset leidev kloori toodang, mis tagas niinimetatud kohapeal hüpokloriid rakenduse (Abdel-Aal et al., 2010).

### **3.2.2 Leeliselises keskkonnas elektrolüüs**

Leeliselises keskkonnas elektrolüüsimine arendati 20. sajandi esimesel poolel. AWE kasutab vedelat aluselist elektrolüüti, milleks on enamasti kaaliumhüdroksiidi 25–30 wt.%-line lahus, kuna sellise kontsentratsiooni juures onioonjuhtivus kõige kõrgem (Ursua & Sanchis, 2012). Tööpõhimõtte skeem on esitatud joonisel 9. Samuti on kasutatud ka teisi elektrolüüte (NaOH ja NaCl). Vedel elektrolüüt võimaldab ioonidel liikuda elektrodide vahel ning seda ei kasutata protsessi käigus ära, kuid teiste süsteemi kadude pärast peab seda perioodiliselt uuesti täitma (Rajeshwar et al., 2008). AWE rakendusliku võimsuse vahemik on 20–100% nimivõimsusest. Praegustel *power-to-gas* pilootjaamadel on leeliselelektrolüüseri keskmine võimsus 98 kW (max 500 kW Saksamaal Enertragi hübriidjõujaamas). Töötab rõhkude juures 1–200 baari, ning enamasti esinev efektiivsus on 60–71% (HHV) . Kaubanduslikult kättesaadavatel mudelitel on

tootlikus kuni 760 Nm<sup>3</sup>/h. Leelistehnoloogia on kõige enam arendatud ja odavam (Gahleitner, 2013).



**Joonis 9.** Leelises keskkonnas elektrolüüsi (AWE) tööpõhimõte (Carmo et al., 2013) järgi.

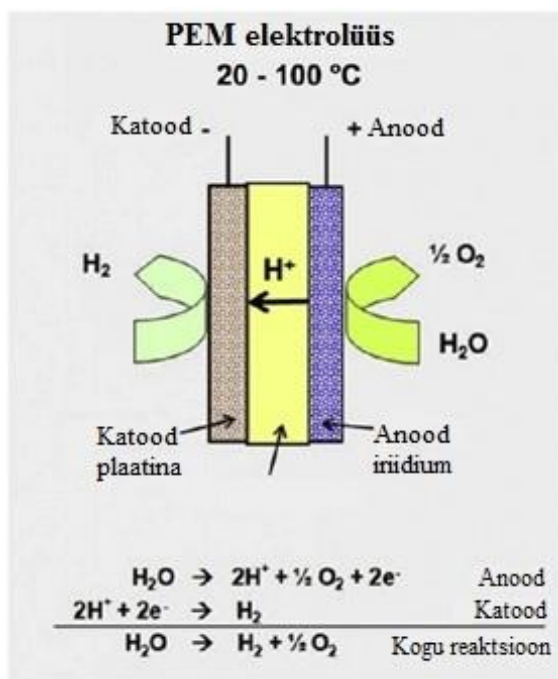
Esimesed vee elektrolüüserid kasutasid paagipõhist disaini ja leeliselisi elektrolüüte. Neid elektrolüüsereid saab seadistada unipolaarselt ja bipolaarselt. Unipolaarsel seadistusel anoodid ja katoodid ripuvad mahutis vaheldumisi. Sellise lahenduse korral on iga element paralleelselt ühendatud ja kogu süsteem töötab pinge vahemikus 1,9–2,5 V<sub>dc</sub>. Käsitleva süsteemi eelised on järgmised: see vajab suhteliselt vähe osasid, seda on äärmiselt lihtne toota ja parandada, kuna iga elementi saab eraldada ent järelejäänud elemendid suudavad edasi töötada. Puuduseks on tootlikkus madalamatel volutihedustel ja temperatuuridel (Rajeshwar et al., 2008).

Bipolaarsel konfiguratsioonil paiknevad elektroodid ja eraldusdiafragma kihtidena, mis on kokku kinnitatud. Elemendid on ühendatud seeriatena, mille tulemusel saavutatakse süsteemis kõrgem pinge. Kuna elemendid on suhteliselt õhukesed, siis üldine kogum võib olla oluliselt väiksem kui unipolaarsel disainil. Eeliseks on virna vähendatud jälgpind, kõrgemad energiatihedused ning omadus toota suurema rõhuga gaasi. Puuduseks on parandustööd, mille korral peab tervet virna hooldama, kuid õnneks peab seda harva tegema (Rajeshwar et al., 2008).

### 3.2.3 Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüs

Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüs arendati 1970ndatel. Esimene demonstratiivne uurimus PEM-i ja kõikuva energiaallikaga sai alguse 1994. aastal projekti *Clean Air Now* raames. PEM elektrolüüseri eeliseks on lihtne disain (joonis 10). Tüüpiliselt saavutavad nad kõrgeid efektiivsusi vahemikus 65–83% (HHV) ning on ideaalsed äkilise loomuga koormuste muutustes. Probleemideks aga on nendes oleva membraanide lühikene eluiga, madal tootlikkus, mis on kuni  $30 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , kõrge maksumus, mis tuleneb katalüsaatoris olevast väärismetallist nagu plaatina ja kallihinnalisest membraanist (Gahleitner, 2013).

Polümeerelektrolüütmembraan (Nafion<sup>®</sup>, fumapem<sup>®</sup>) vastutab ülesannete täitmiseks vajaliku kõrge prooton juhtivuse, madala gaasi ülemineku, kompaktsesüsteemi disaini ja kõrgrõhulise tootlikkuse. Väike membraani paksus (~20–300  $\mu\text{m}$ ) on osaliselt põhjuseks tahkepolümeer elektrolüüdi mitmetele eelistele (Carmo et al. 2013). PEM põhilisel elektrolüüsil on vajalik kõrge puhtusastmega deioniseeritud vesi. Tootjad soovitavad üldiselt kasutada vett, mille miinimum takistus on  $1 \text{ M}\Omega\text{-cm}$ , et pikendada virna eluiga (Rajeshwar et al., 2008).



**Joonis 10.** Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüs (PEM) tööpõhimõte (Carmo et al., 2013) järgi.

PEM-i eelised (Carmo et al., 2013):

1. Tahke elektrolüüdi kasutamine, võimaldab ehitada struktuuriliselt tugevaid ja vastupidavaid elektrolüüsereid, milles saab saavutada kõrgeid töö rõhkusid. (mõnedes kommertssüsteemides koguni kuni 350 baari). Kõrge töö rõhuga elektrolüüseriist eraldub ka vesinik suurema rõhu all (elektrokeemiline kompressioon) ning seetõttu kulub vähem energiat vesiniku edasiseks komprimeerimiseks ladustamis rõhuni. Samuti kiirendab see vesiniku eraldumist elektrolüüsi gaasilises faasis.

2. Takistuskad limiteerivad maksimaalset saavutatavat voolutihedust. Õhukese membraaniga PEM süsteemidel on prootonite läbilaskvus hea ( $0,1 \pm 0,02 \text{ S cm}^{-1}$ ), mistõttu on ka elektrivoolutihedus kõrgem kui vee-leelise elektrolüüseriistes. See omakorda vähendab operatsioonikuluseid ja elektrolüüsi potentsiaalset kogumaksumust.

3. Madal gaaside üleminekukiirus läbi polümeer membraani võimaldab PEM elektrolüüsidel töötada laias võimsusvahemikus (10–100% nimivõimsusest). Vee-leelise elektrolüüseriistes madala võimsuse juures hapniku ja vesiniku tootlikkus väheneb, samas vesiniku läbilaskvus membraanist jääb konstantseks, tekitades anoodi poolel kõrge vesiniku kontsentratsiooniga keskkonna ja seeläbi ohtlikud ning vähemefektiivsed tingimused.

PEM puudused (Carmo et al., 2013).

1. Kõrge töö rõhk toob endaga kaasa ka probleeme. Nimelt suureneb rõhuga polümeer membraani läbilaskvus, mis omakorda soodustab vesiniku ja hapniku segunemist ja võib viia plahvatuslike segude tekkimiseni. Seetõttu kasutatakse rõhkudel üle 100 baari paksemaid membraane, või täiteaineid membraanis et hoida vesiniku kontsentratsiooni hapnikus alla ohtliku taseme ( $C\%, \text{vol}(\text{H}_2) < 4\% \text{ hapnikus}$ ).

2. PEM elektrolüüseri materjalid peavad taluma madala pH-ga korrodeerivat keskkonda (pH~2) ning kõrget ülepinget (~2V), seda eelkõige kõrgete voolutiheduste juures. See nõuab haruldaste ja kallite materjalide (platinametallid: plaatina, iriidium ja ruteenium) ning komponentide (titaanil baseeruvad voolukollektorid) kasutamist.

### 3.2.4 Kõrgtemperatuuriline elektrolüüs

Kõrgtemperatuuriline elektrolüüs arendati 1980-ndatel, antud süsteem töötab 800°C juures tahkeoksiid membraani abil, membraan põhineb keraamilise elektrolüüdiioonjuhi tööpõhimõttel. Sellel tehnoloogial on suur potentsiaal energia säästlikkuses võrreldes madala temperatuuriliste elektrolüüsi protsessidega, kuna kõrgemal temperatuuril on termodünaamilised ja kineetilised protsessid rohkem soodustatud. HTE eeldatav vesiniku tootmisesefektiivsus 800°C juures on 53% (Herring et al., 2003). Koormuse vahemik on 0–100% maksimaalsest võimsusest, mis on teoreetiliselt 1,6 V piires, kuid madalam pinge on soovitatav selleks, et vähendada elemendi degradatsiooni. HTE peamine puudus on tema küpsus (suhteliselt uus tehnoloogia ja vähe arendatud). Eelised on kõrge efektiivsus suurel koormusel, madal eeldatav hind, kõrge eeldatav eluiga ja kõrge eeldatav töövahemik. Seega on HTE paljulubav tehnoloogia kasutamaks nii madala- kui suuremahulistes rakendustes (Petipas et al., 2013). Tabelis 3 ja 4 on vastavalt välja toodud leelise, PEM-i ja HTE põhilised eelised ja puudused.

*Tabel 3. AWE, PEM ja HTE elektrolüüsi eelised (Carmo et al., 2013) järgi.*

Leeliselektrolüüs	PEM elektrolüüs	SOEC elektrolüüs
<b>Eelised</b>		
Väljakujunenud tehnoloogia	Kõrged volutihedused	Efektiivsus kuni 100%; termoneutraalne
Ei kasuta väärismetalle katalüsaatorites	Kõrge pingefektiivsus	Efektiivsus > 100%; koos kuuma auruga
Pikajaline stabiilsus	Hea osalise koormuse ulatus	Ei kasuta väärismetalle katalüsaatorites
Suhteliselt madal maksumus	Süsteemi kiire reageerimine	Kõrgrõhul toimiv
Virnad MW ulatuses	Kompaktne süsteemi disain	
Kuluefektiivne	Gaasi kõrge puhtusaste	
	Dünaamiline töötlikus	

**Tabel 4.** AWE, PEM ja HTE elektrolüüsi puudused (Carmo et al. 2013) järgi.

Leeliselektrolüüs	PEM elektrolüüs	SOEC elektrolüüs
<b>Puudused</b>		
Madalad voolutihedused	Osade kõrge maksumus	Laboratoorses faasis
Gaaside ülejuhtimine (puhtusaste)	Happeline korrodeeriv keskkond	Kogukas disain
Madal osalise koormuse ulatus	Tõenäoliselt madal vastupidavus	Vastupidavus (habras disain)
Madal dünaamika	Kommertsialiseerimine	Puudub usaldusväärne maksumuse informatsioon
Madal töötlikuse rõhk	Virnad alla MW ulatuse	
Korrodeeriv vedel elektrolüüt		

### 3.3 Vesinikust elektrienergia tootmistehnoloogiad

Vesiniku saab muuta kasulikuks energiaks mitmel erineval viisil. Mõningad vesiniku muundamise tehnoloogiad on ainulaadsed vesinikule, kuid kõik on efektiivsemad ja vähem saastaneid tekitavad, kui traditsiooniline kütuste muundamine (Barbir, 1999). Vesinikku võib põletada, et toota soojust, kasutada turbiinides või sisepõlemismootorites tootmaks elektrienergiat. Paljud neist tehnoloogiatest vajavad täiendamist materjalides ja tootlikkuses, et parandada efektiivsust ja vastupidavust. Kütuseelemendid pakuvad olulisi eeliseid traditsioonilistel põlemisel baseeruvate soojusenergia muundamise protsesside ees. Põhjus seisneb kütuseelementide efektiivsustes, mis on vahemikus 35–55% ning samas tekitavad väga vähe heitkoguseid (European Commission, 2013).

#### 3.3.1 Vesinikkütusel töötav sisepõlemismootor

Vesinik on äärmiselt hea kütus sisepõlemismootorites. Võrreldes bensiinimootoritega on vesiniksisepõlemismootorid ligikaudu 20% efektiivsemad. Üks tähtsamaid eeliseid vesiniku kasutamisel kütusena bensiinimootorite ees on palju madalam saasteainete emissioon. Vesiniku põletamisel õhuga on ainukesteks kõrvalproduktideks veeaur ja väikestes kogustes

lämmastikoksiidi. Lisades süsteemi rohkem õhku saab vähendada NO<sub>x</sub>-ide moodustamist. Samuti saab NO<sub>x</sub> emissioone viia madalamale tasemele, vähendades põlemiskeskonna temperatuuri kasutades tehnikaid nagu vee sissepritset, heitgaasitagastus või vedelat vesinikku (Barbir, 1999).

### **3.3.2 Vesinikkütusel töötav gaasiturbiin**

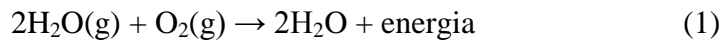
Vesinikku sisaldavad gaasid viivad põlemisel temperatuurideni, mis on liiga kõrged tavalistele gaasiturbiinidele. Sel põhjusel on vajalik taoliste turbiinide edasine arendus. Turbiine, mis on suutelised põletama vesinikurikkaid gaase on samuti vajalik kombineerida gaaside ja auruturbiinide protsessides, mida kasutatakse söe gaasistamise protsessides, kus on vaja töödelda ja puhastada maagaasi. Buggenum ja Puertollano IGCC elektrijaamades (Integrated gasification combined cycle) kasutatakse Siemensi gaasiturbiine, millede väljundvõimsused on vastavalt 190 ja 200 MW, sisendtemperatuurid on ligikaudu 1160 ja 1230. Siemens koos DOE toetusega tegelevad vesinikul töötavate turbiinide arendamisega, milles on võimalik kasutada nii süngaasi, kui ka vesinikku. Prognooside kohaselt on Siemens valmis teenuseid pakkuma alates 2017. Aastast (Hydrogen gas turbines, 2011). Samuti töötab NETL (National Energy Technology Laboratory) koos General Electricu ja Siemens Power Groupiga, et välja töötada paindlik (süngaasil või vesinikul töötav) gaasiturbiini tehnoloogia, mis on sobilik kasutamaks koos IGCC-ga. Eesmärk on saavutada jõujaam, mille efektiivsus on vahemikus 45–50% HHV, nulli lähedane heitgaaside emissioon ja konkurentsivõimelised kapitalikulud/investeeringukulud (Technologies and Turbines, 2013).

### **3.3.3 Kütuseelemendid**

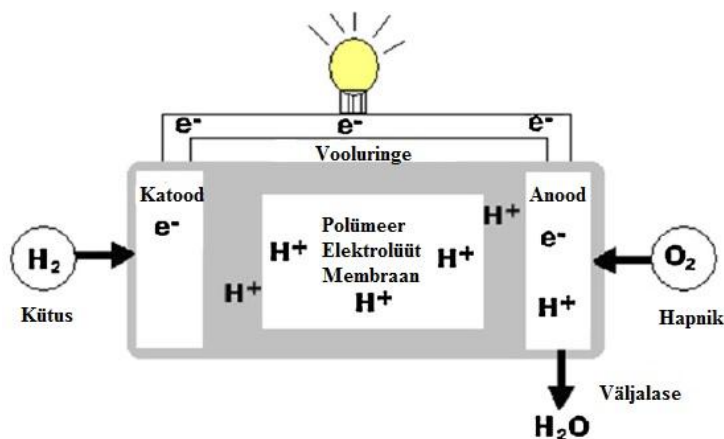
Kütuseelement on sarnane patareiga, milles läbi elektrokeemilise reaktsiooni toodetakse elektrit. KE-d muudavad keemilise potentsiaalse energia elektrienergiaks ning kõrvalsaadusteks on soojus ja puhas vesi. Kütuseks kasutatakse vesinikku ja lisaks oksüdanti (puhas hapnik või õhk), kuid puudub põlemine. Selle asemel toimub elektrokeemiline vesiniku oksüdeerumine. Oksüdatsioon ajal reageerivad vesiniku ja hapniku aatomid, et moodustada vett; protsessi käigus vabanevad elektronid ning liiguvad elektrivooluna läbi välise vooluringi. KE suurus võib

varieeruda väikestest seadmetest (tootlikkus mõni W) kuni suurte elektrijaamadeni (tootlikkus mega vattides). Seadmete ehitus koosneb põhiliselt kahest elektroodist, mida eraldab tahke või vedel elektrolüüt, mis kannab elektroodide vahel elektriliselt laetud osakesi. Tihti kasutatakse katalüsaatoreid, et kiirendada elektroodidel aset leidvaid reaktsioone. KE-d tüübid liigitatakse neis kasutatava elektrolüüdi alusel (About fuel cells, 2013). Põhiliseks eeliseks on kõrge elektrienergia muundamise kasutegur, millel puudub Carnot-limit (mis esineb soojusmootoritel) ning ideaalis suudab vesinik-hapnik kütuseelement saavutada efektiivsusi kuni 83% (HHV). Praktilises seadmes on võimalik kuni 60% (HHV) vesinikus olevat energiat muundada elektrienergiaks, ülejäänud hajub soojusena (Rajeshwar et al. 2008).

Kütuseelement süsteemid on ehitatud üksikutest elementidest, mis on võimelised tootma 100 W kuni 2 kW elemendi kohta. See annab süsteemidele erakordse tootmisvõimsuse paindlikkuse . Arendustegevuses olevate süsteemide rakendusulatus kohapealseks tootmiseks on 5 kW kuni 2 MW. Mitu süsteemi korraga on võimelised ühes kohas töötama, tagades lisa võimsust (Energy and Environmental... 2008). All esitatud võrrand näitab kütuseelemendis aset leidvat elektrokeemilist reaktsiooni ja joonis 11 kirjeldab kütuseelemendi tööpõhimõtet (Mekhilef et al., 2012). Kütuseelement süsteemide võrdlus on esitatud tabelis 5.



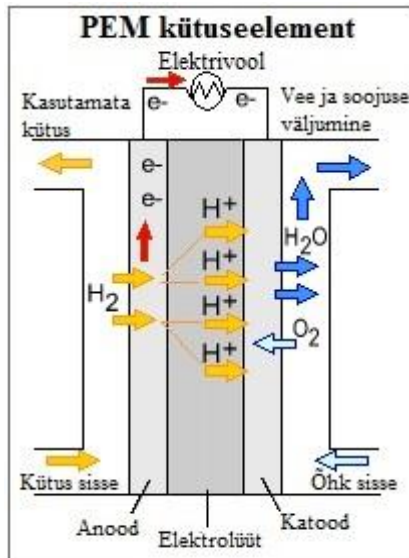
vesinik + hapnik → vesi + (elektrienergia + soojus)



Joonis 11. Kütuseelemendi tööpõhimõtte skeem (Rayment & Sherwin, 2003) järgi.

### 3.3.3.1 Polümeerelektrolüütmembraaniga kütuseelement

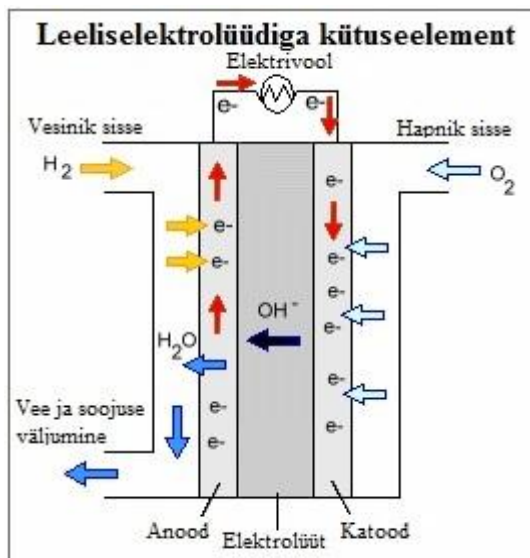
Kütuseelementidest toimub kõige kiirem tehnoloogia arendamine Polümeerelektrolüütmembraaniga kütuseelementide valdkonnas, seda nimelt huvi pärast transpordisektoris. Tahkest polümeerelektrolüüdist õhuke plaat asetseb kahe peenikese elektroodi vahel (joonis 12). Elektroodidel kasutatakse katalüsaatorina Pt-Ru sulamit, mis anoodil lõhub vesiniku molekulid prootoniteks ja negatiivselt laetud elektronideks. Reaktsiooni tulemusena on prootonid võimelised liikuma läbi membraani katoodile. Samaaegselt on elektron sunnitud liikuma välisesse vooluringi tootmaks elektrit ning seejärel liigub tagasi katoodile, kus ta ühineb hapniku ja prootoniga ning moodustavad vee, järjekordselt platinaga kaetud katalüsaatori abiga. Kuna kogu konstruktsioon on tahke, siis on võimalik elementide tihe paigutamine ja kuhjamine/virnastamine. PEMFC elektriline kasutegur on 40–50% (HHV) ning on madaltemperatuuriline (50–100°C) kütuseelement. PEMFC süsteemid on kerge kaalulised ja kiirelt käivituivad (Sørensen, 2012).



*Joonis 12. Polümeerelektrolüütmembraaniga kütuseelemendi (PEMFC) tööpõhimõte (Types of Fuel Cells, 2011) järgi.*

### 3.3.3.2 Leeliselektrolüüdiga kütuseelement

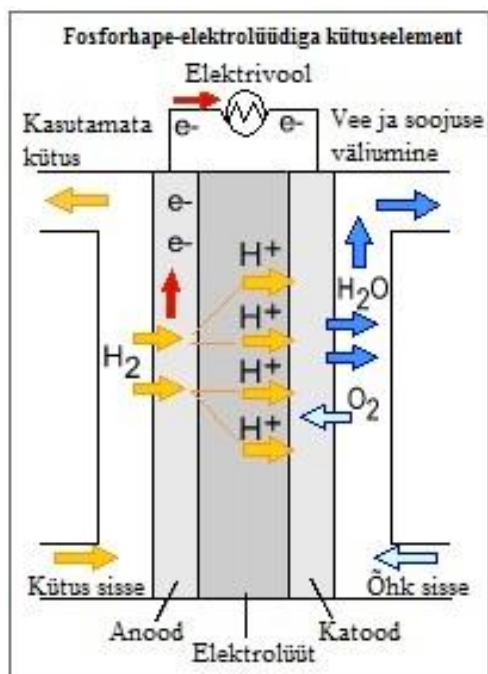
Leeliselektrolüüdiga kütuseelement toodab elektrit kasutades leeliselist elektrolüüti kaaliumhüdroksiid (KOH) vesilahuses. Hüdroksüülionide liikumine läbi elektrolüüdi võimaldab vooluringi tekkimise ning elektrienergia saab eraldada (joonis 13). Üldiselt töötab temperatuuride vahemikus 60–90°C, kuid uuemad AFC-d on võimelised töötama ka vahemikus 23–70°C. AFC-d on liigitatud kui madalatemperatuurilised kütuseelemendid, mille katalüsaator on madalate kuludega. Kõige enam kasutatav katalüsaator anoodil ja katoodil on nikkel. Elektriline kasutegur on ligikaudu 60% (HHV). Elektritootlikkus võib ulatuda kuni 20 kW. AFC-d peetakse kütuseelementidest kõige kuluefektiivsemaks, kuna kasutatav elektrolüüt on standard kemikaal KOH. Samuti katalüsaatoris kasutatav nikkel on suhteliselt odav võrreldes teistega (nt plaatina). Puuduvad KHG emissioonid ja on kõrge efektiivsusega. Kuid kõigi eeliste juures on suureks puuduseks kergelt esinev CO<sub>2</sub> mürgitus. Veepõhine leeliseline lahus (KOH) haarab endasse CO<sub>2</sub>, kui toimub KOH muutumine kaaliumkarbonaadiks (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ja seeläbi mürgitab kütuseelementi. Sellest tulenevalt kasutatakse puhastud õhku või puhast hapnikku, mis tõstab süsteemi kulusid (Mekhilef et al. 2012).



**Joonis 13.** Leeliselektrolüüdiga kütuseelemendi (AFC) tööpõhimõte (*Types of Fuel Cells*, 2011) järgi.

### 3.3.3.3 Fosforhappe-elektrolüüdiga kütuseelement

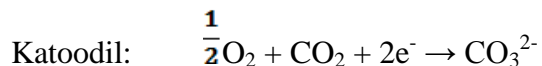
Fosforhappe-elektrolüüdiga kütuseelement kasutab elektroodidena kopeerpaberit ja vedelat fosforhappe ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) elektrolüüti.  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (3,09% H 31,6% P 65,3% O) on puhas värvitu vedelik, mida kasutatakse väetistes, puhastusvahendites, toidu maitsestamises ja ravimites. Fosforhappe ioonjuhtivus madalatel temperatuuridel on väike, seega saab PAFC töötada temperatuuride vahemikus 150–220°C. Sellist tüüpi kütuseelemendil on laengukandjaks vesinikioon. Elektronide, prootonite ja hapniku vahelisel reaktsioonil moodustub katoodi poolel vesi, millele aitab kaasa platinast katalüsaator (joonis 14). PAFC ei vaja töötamiseks puhast hapnikku, kuna  $\text{CO}_2$  ei mõjuta elektrolüüti ega elemendi töövõimet. Süsteem töötab õhuga ning võib raskusteta töötada kasutades reformeeritud fossiilkütuseid. Lisaks on fosforhappel madal lenduvus ja pikaajaline stabiilsus. PAFC alimaksumus on kõrge kuna kasutab puhta hapniku asemel õhku hapniku sisaldusega ~21%, mille tulemuseks on kolmekordne voolutiheduse vähenemine. Seega on PAFC konstrueeritud bipolaarsete plaatide kogumina, et saavutada kõrgem energia tootlikkus, mis asetab sellele tehnoloogiale kõrge alimaksumuse. Praegused kaubanduslikult kätte saadavad PAFC süsteemide võimsused on kuni 200 kW ning süsteemide kõrgemate võimsustega (11 MW) on juba testitud. Selle tehnoloogia tootmine on kallid, kuna on vajalik elektroodide katmine peenelt hajutatud platinaga. Erinevalt AFC-st ei mõjuta vesinikgaasis leiduvad lisandid ( $\text{CO}_2$ ) PAFC-d. Sellist tüüpi tehnoloogia elektriline kasutegur on 40–50% (HHV) ja soojusjääkide kasutamisel kuni 85% (HHV) (Mekhilef et al., 2012).

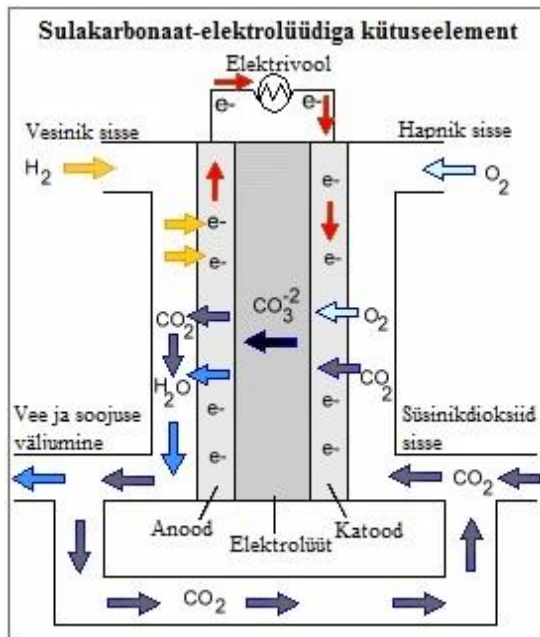


**Joonis 14.** Fosforhappe-elektrolüüdiga kütuseelemendi (PAFC) tööpõhimõte (Types of Fuel Cells, 2011) järgi.

### 3.3.3.4 Sulakarbonaat-elektrolüüdiga kütuseelement

Sulakarbonaat-elektrolüüdiga kütuseelement kasutab elektrolüüdina sulakarbonaat soola. Selleks et elektrolüüt püsiks vedelas olekus peab element töötama üle 500°C (standard töötemperatuur on 650°C). Erinevalt teistest kütuseelementidest peab MCFC-is katoodi varustama CO<sub>2</sub>-ga (joonis 15). Seega on seade tavaliselt varustatud CO<sub>2</sub> ülekandevahendiga. Elektriline efektiivsus jääb vahemikke 45–50% (HHV) (Tomczyk, 2006), kui jääsoojus kinni püüda ja kasutada, siis üldkasutegur võib ulatuda kuni 85% HHV. MCFC-d ei ole alati CO ega CO<sub>2</sub> mürgitustele – nad võivad isegi süsinikoksiide kasutada kütusena, mis võimaldab kasutada söest saadud gaase kui kütusena. Põhiline puudus praeguse MCFC tehnoloogial on vastupidavus. Elemendis aset leidvad kõrged töötemperatuurid ja korrodeeriv elektrolüüt kiirendavad koostisosade lagunemist ja korrosiooni, vähendades elemendi eluiga (Types of Fuel Cells, 2011). MCFC-s aset leidvad elektrokeemilised reaktsioonid on:

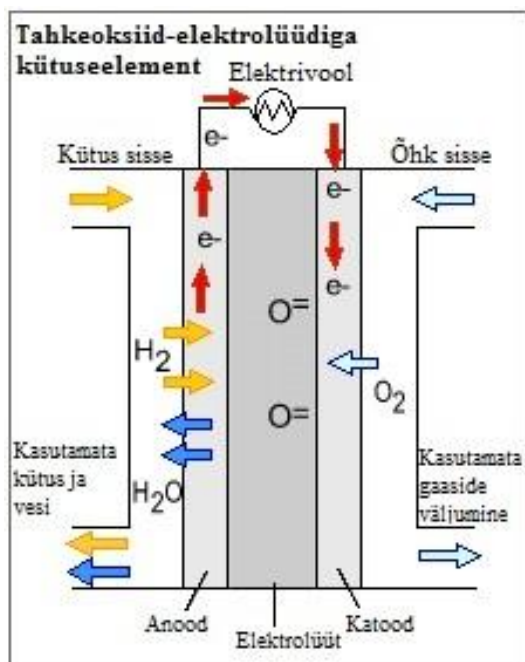




**Joonis 15.** Sulakarbonaat-elektrolüüdiga kütuseelemendi (MCFC) tööpõhimõte (Types of Fuel Cells, 2011) järgi.

### 3.3.3.5 Tahkeoksiid-elektrolüüdiga kütuseelement

Tahkeoksiid-elektrolüüdiga kütuseelemendid kasutavad elektrolüüdina kõva, mitte poorset keraamilist ühendit (joonis 16). Kuna elektrolüüt on tahke, siis ei pea elemente paigutama plaadisarnaselt. SOFC eeldatav elektriline kasutegur on 50–60% (HHV). Süsteemid, kus püütakse ja kasutatakse jääsoojust, võivad saavutada efektiivsuse kuni 80–85% (HHV). SOFC töötemperatuur on 1000°C läheduses. Kõrgtemperatuuriline töötamine välistab kallite katalüsaatorite vajalikkuse ja seega vähendab maksumust. Puudusteks on aeglane käivitumine ja vajab soojuskaitset, et kuumust tagasi hoida ning kaitsta personali. Lisaks on vajalikud kõrge töötemperatuuri tõttu ranged vastupidavuse nõuded materjalidele. Madala maksumusega materjalide väljatöötamine, millel on kõrge vastupidavus elemendis aset leiduvatele temperatuuridele, on selle tehnoloogia peamiseks väljakutseks (Types of Fuel Cells, 2011).



**Joonis 16.** Tahkeoksiid-elektrolüüdiga kütuseelemendi (SOFC) tööpõhimõte (Types of Fuel Cells, 2011) järgi.

**Tabel 5. Kütuseelemendi tehnoloogiate võrdlus (Hydrogen and Fuel Cells, 2011) järgi .**

<b>Kütuse- elemendi tüüp</b>	<b>Üldkasutatav elektrolüüt</b>	<b>Töötemperatuur</b>	<b>Keskmine võimsus</b>	<b>Efektiivsus</b>	<b>Kasutus valdkond</b>	<b>Eelised</b>	<b>Puudused</b>
<b>PEM</b>	Perfluoro sulfoonhape	50-100 C ° 122-212 C Enamasti 80 C	<1 kW-100 kW	60% transport 35% statsionaarne	·Varutoiteallikas ·portatiivne energiaallikas ·Hajaenergeetika ·Tranpordisektor ·Erisõidukid	Tahke elektrolüüt vähendab korrodeerumist ja elektrolüüdi haldamisega kaasnevaid probleeme · Madal temperatuur · Kiire käivitumine	Kallis katalüsaator · Kütuse lisandite suhtes tundlik · Madalal temperatuuril jääksoojus
<b>AFC</b>	Kaaliumhüdroksiidi vedel lahus	90-100 C	10-100 kW	60%	·Sõjandus ·Kosmonautika	AFC katoodil toimuvad kiiremad reaktsioonid, mis viib kõrgema töövõimeni · Madala maksumusega komponendid	Tundlik kütuses ja õhus oleva CO2 suhtes · Keerukas elektrolüüdi käitlemine
<b>PAFC</b>	Fosforhape	150-200 C	400 kW 100 kW moodul	40%	·Hajaenergeetika	Kõrge temperatuur võimaldab soojusjääkide kasutamist · Vastuvõtlikum kütuse lisanditele	Plaatinast katalüsaator ·Pikk käivitusae · Väikese voolutugevusega ja võimsusega
<b>MCFC</b>	Liitiumi, naatriumi ja/või kaaliumkarbonaadi lahus	600-700 C	300 kW-3 MW 300 kW moodul	45-50%	·Elektriettevõtte ·Hajaenergeetika	Kõrge efektiivsus · Kütuse paindlikkus · Võib kasutada erinevaid katalüsaatoreid · Sobib soojusjääkide kasutamiseks	Kõrgetel temperatuuridel korrosioon ja elemendi riknemine · Pikk käivitusae · Madal energiatihedus
<b>SOFC</b>	Ütriumoksiidiga stabiliseeritud tsirkooniumoksiid	700-1000 C	1 kW-2MW	60%	·Omatarve ·Elektriettevõtte ·Hajaenergeetika	Kõrge efektiivsus · Kütuse paindlikkus · Võib kasutada erinevaid katalüsaatoreid · Võib rakendada soojusjääkide kasutamist · Hübrid/gaasiturbiini tsükkel	Kõrgetel temperatuuridel korrosioon ja elemendi riknemine · Kõrgel temperatuuril töötamine nõuab pikka käivitusae

### **3.4 Tuulikute energiatoodang Eestis**

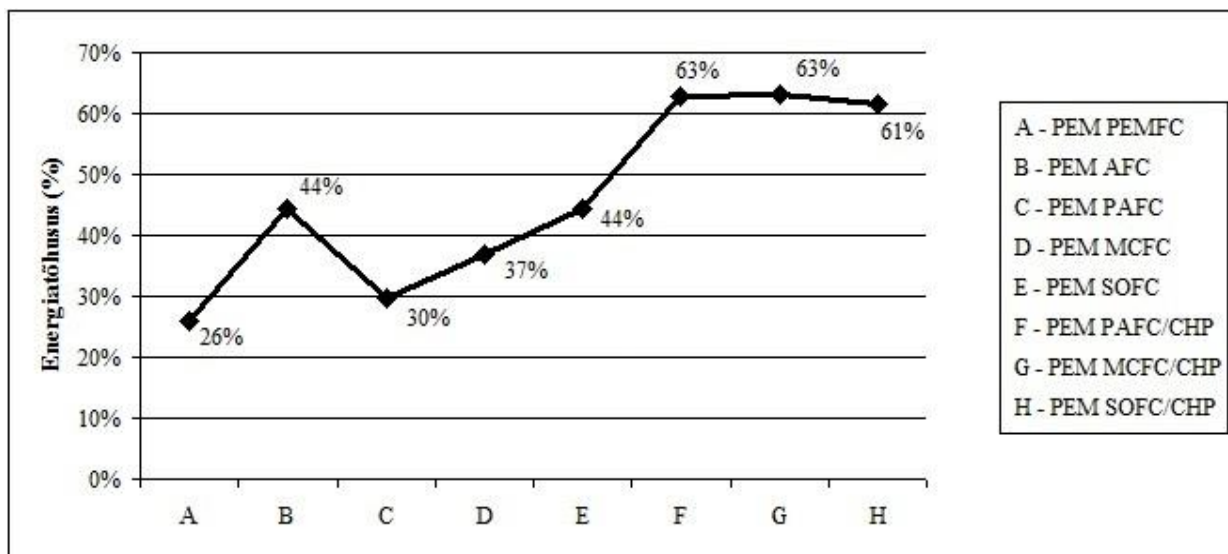
Primaarenergiaallikana on tuulepotentsiaal Eestis suur. Hinnanguliselt on võimalik aastast energiatoodangut arvestades katta elektrituulikute toodanguga kogu Eesti elektritarbimine (Eesti varustuskindlustuse aruanne... 2012).

Eesti elektrisüsteemiga oli 2012. aastal ühendatud elektrituulikuid netovõimsusega 258 MW (Eesti elektrisüsteemi tarbimisnõudluse... 2012). Eleringi andmete alusel tootsid 2012 aastal tuulikud elektrienergiat kokku 454 164 MWh, kus maksimaalne toodang oli 200 MWh 15/11/2012 kell 10:00-11:00.

#### **3.4.1 Elektrolüüs ja kütuseelement süsteemide energiatõhusused**

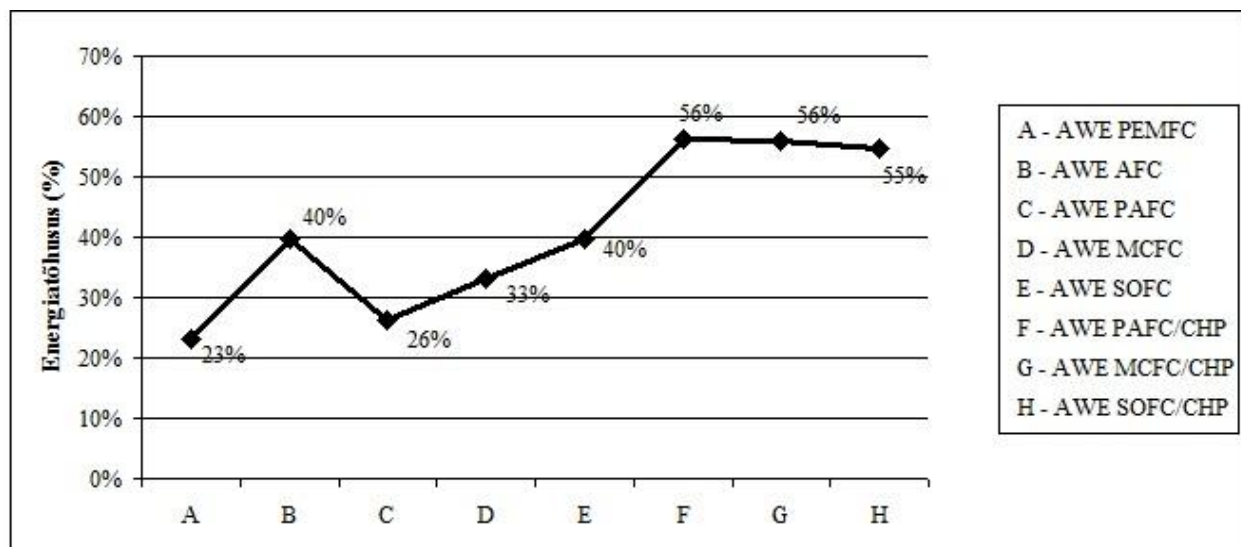
Elektrolüüsi tehnoloogiaid saab kasutada koos kütuseelementidega. Kuna iga tehnoloogia efektiivsus on varieeruv, siis on kasutatud erinevate süsteemide kombinatsioone, et leida nende energiatõhusus. Iga elektrolüüsi tehnoloogia kohta kasutati kaheksa erinevat kütuseelemendi tehnoloogiat.

Esimesel joonisel kajastatud energiatõhususe näitajad põhinevad prootonvahetusmembraaniga elektrolüüsil (joonis 17). Suurimad energiatõhusused saavutati, kui PEM-i kasutati koos fosforhape ja sulakarbonaat-elektrolüüdiga kütuseelemente, mis kasutasid efektiivselt ära ka protsessis käigus toodetud soojust. Energiatõhusused antud konfiguratsioonidel olid 63%. Madalaim väärtus langes fosfor-hape kütuselemendile, kuna antud süsteemi enda efektiivsus oli 40%.



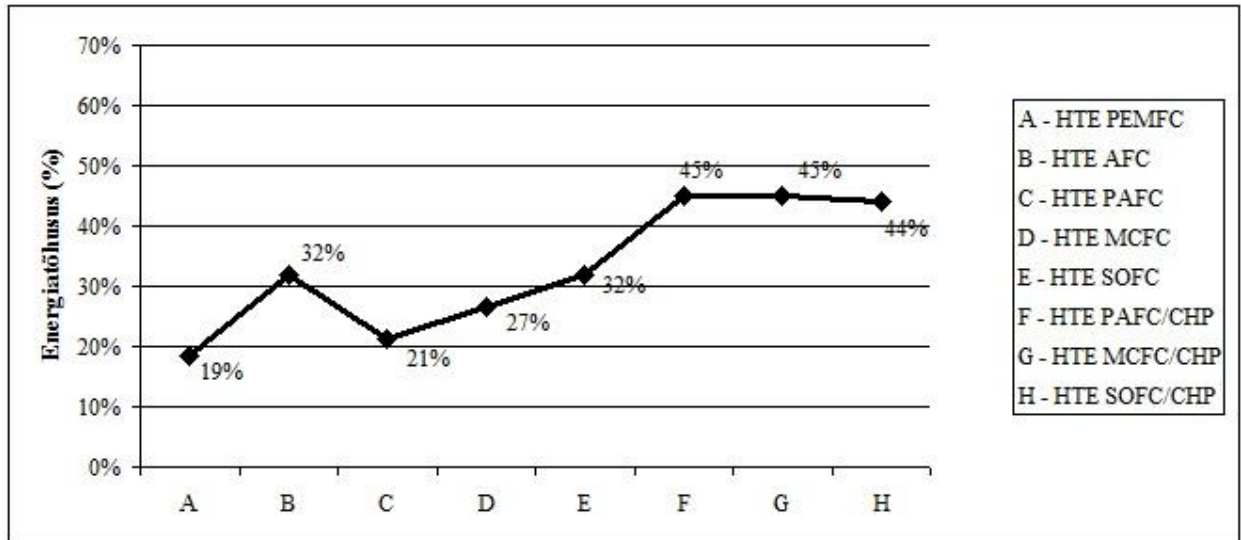
**Joonis 17.** Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüserja erinevate kütuseelement tehnoloogiatekombineeritud süsteemide energiatõhusused. Lühendite viited on esitatud lehel „Töös kasutatud lühendid”.

Süsteemid, mis põhinevad leelises keskkonnas elektrolüüsiga on vähem efektiivsed kui PEM kombineeritud süsteemid (joonis 18). Põhjuseks on AWE madalam efektiivsus, mis on 66%. Antud süsteemi suurimad efektiivsused olid 56%. Nendeks olid samuti protsessi käigus soojust ära kasutavad fosforhappe ja sulakarbonaat kütuseelemendid kombineerituna AWE-ga.



**Joonis 18.** Leelises keskkonnas elektrolüüserja erinevate kütuseelement tehnoloogiate kombineeritud süsteemide energiatõhusused. Lühendite viited on esitatud lehel „Töös kasutatud lühendid”.

Kõrgtemperatuur elektrolüüsi ja sellega kombineeritud kütuseelementide energiatõhusused on esitatud joonisel 19. Antud süsteemide konfiguratsioonid on elektrolüüseritest madalaimad. Põhjuseks on HTE efektiivsus, mis on käsitletud elekter-vesinikus tehnoloogiatest kõige madalam.

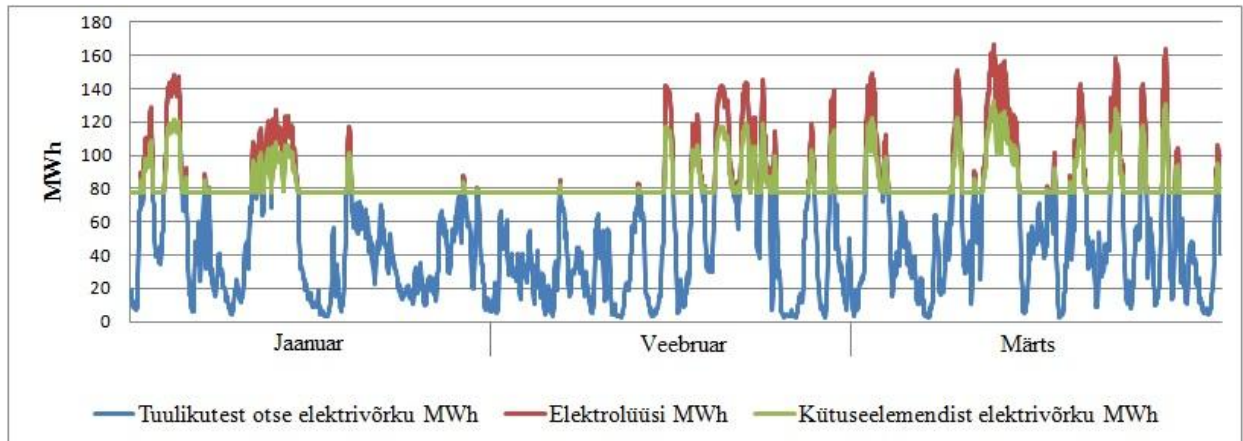


**Joonis 19.** Kõrgtemperatuuriline elektrolüüserja erinevate kütuseelement tehnoloogiate kombineeritud süsteemide energiatõhusused. Lühendite viited on esitatud lehel „Töös kasutatud lühendid”.

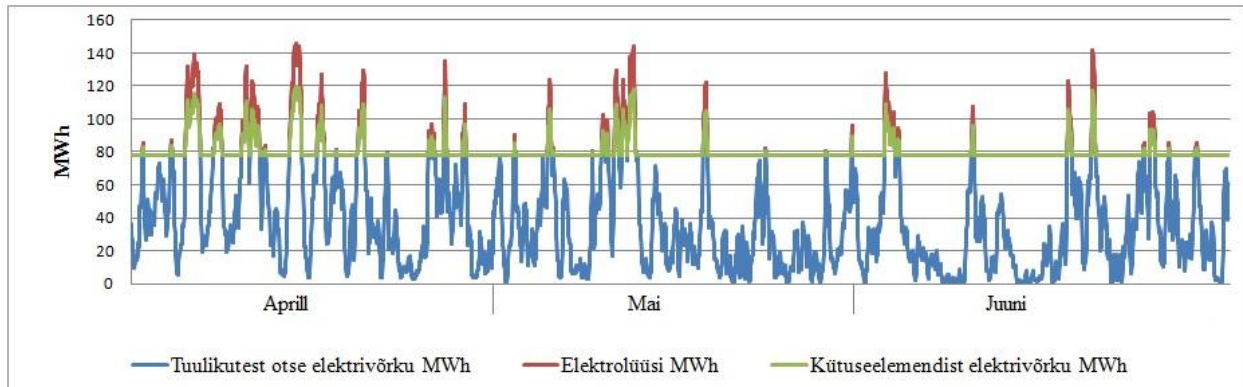
Kahekümne neljast erinevast konfiguratsioonist tundub parim tehnoloogiline lahendus olevat PEM SOFC/CHP ehk prootonvahetusmembraaniga elektrolüüs süsteem, mis töötab koos efektiivselt soojust ära kasutavad sulakarbonaat-elektrolüüt kütuseelemendiga. Antud süsteemi energiatõhusus on kasutatud andemete puhul 2% madalam, kui teistel kõrgtemperatuur kütuseelementidel, kuid praktikas antud süsteemi potentsiaalselt tasuvam. Üheks suurimaks eeliseks kõrgetel temperatuuridel töötamise juures väärismetallide välistamine katalüsaatorites. PEM SOFC/CHP süsteemi kasutati toodangutippude äralõikamisel.

### 3.4.2 Tuulikute potentsiaalse energiatoodangu tasakaalustamine toodangutippude äralõikamisega 75% tasemel

Tuulikute energiatoodangu tippude äralõikamine 75% tasemelt võimaldab elektrivõrku anda suurema osa tuulikute toodangust ja seekaudu kahandada elektrolüüsi protsessis kaduma minevat energia osa ja samas võimaldab vesiniku arvel osaliselt kompenseerida nõrga tuulega perioodide madalat tuuleenergia toodangut.



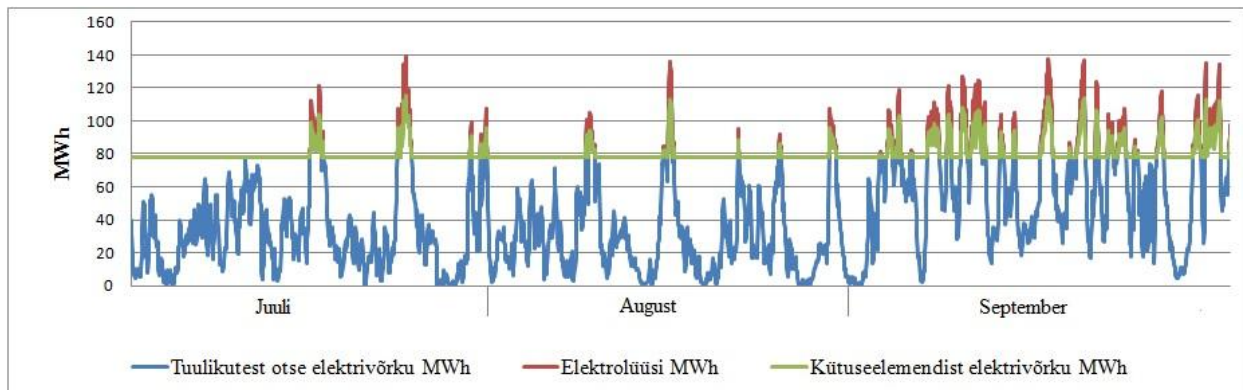
*Joonis 20. Tuulikute 75% toodangutippude äralõikamine vahemikes jaanuar – veebruar.*



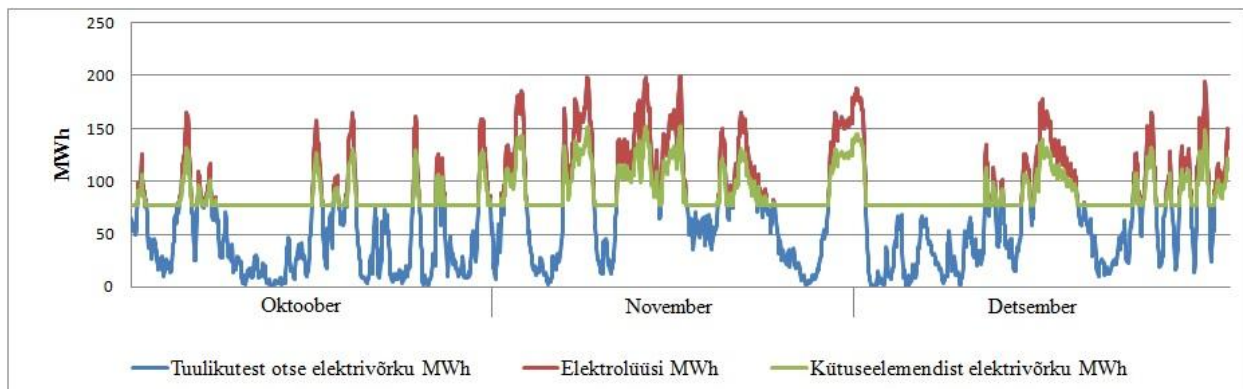
*Joonis 21. Tuulikute 75% toodangutippude äralõikamine vahemikes aprill – juuni.*

Kogu aasta peale läheb 75% tasemelt toodangutippude äralõikamisega elektrolüüserisse 78431,3 MWh elektrienergiat, millest 49411,7 MWh on kasutatav süsteem võimeline tagasi elektrivõrku saatma. Aasta esimeses kvartalis (joonis 20) läks vesiniku tootmiseks 20598,5 MWh elektrienergiat ning tagasi võrku saab saata 12651,6 MWh. Teises kvartalis (joonis 21) läks

vesiniku tootmiseks 8294,8 MWh ja tagasi võrku 5094,7 MWh, mida on üle kahe korra vähem võrreldes aasta esimeste kuudega.



**Joonis 22.** Tuulikute 75% toodangutippude äralõikamine vahemikus juuli – september.

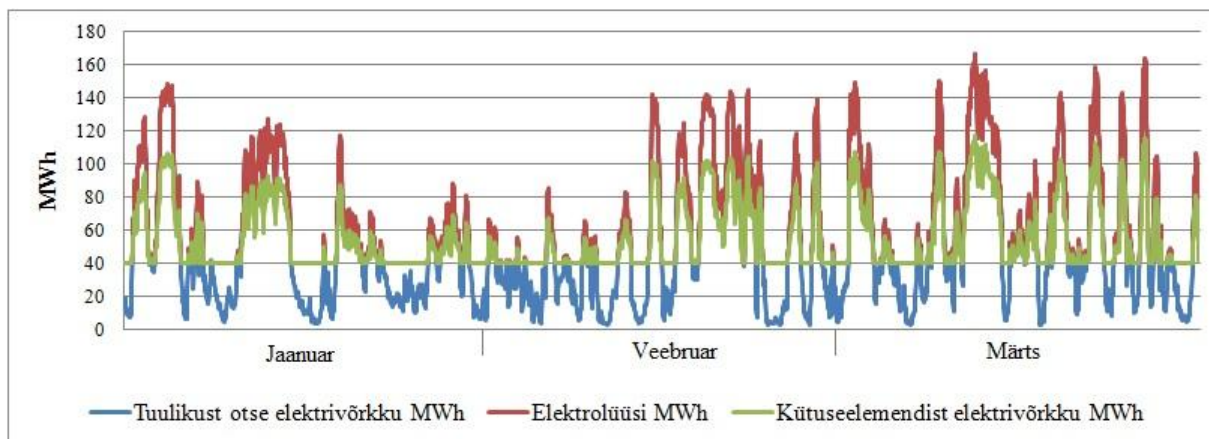


**Joonis 23.** Tuulikute 75% toodangutippude äralõikamine vahemikus oktoober – detsember.

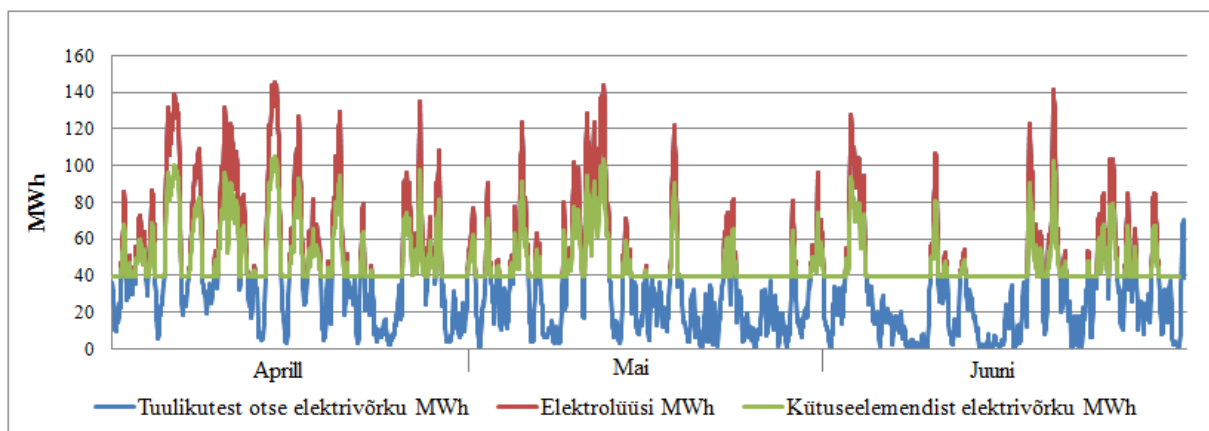
Kolmandas kvartalis kasutas elektrolüüser 8030,7 MWh elektrienergiat, millest oli kogu süsteem võimeline elektrivõrku saatma 4932,5 MWh. Antud ajavahemikul on tegemist kõige madalama tootmise tulemustega. Neljandas kvartalis tõuseb elektrienergia tootlikkus hüppeliselt, mille tõttu saadetakse elektrolüüserisse viis korda rohkem energiat ehk 41423,2 MWh. Sellise toodanguga suudab energiasalvestussüsteem tagasi elektrivõrku saata 25442,1 MWh elektrienergiat. Viimases kvartalis on tuuleenergia toodang kõige suurem, mille üheks põhjuseks on antud aastal lisandunud Narva tuulepargi võimsus ja Paldiski tuulepargi täiendamine.

### 3.4.3 Tuulikute potentsiaalse energiatoodangu tasakaalustamine toodangutippude äralõikamisega 50% tasemel

Erinevalt 75% toodangutippude äralõikamisest läheb 50% puhul energiasalvestussüsteemi kaks ja pool korda rohkem tuuleenergiat ehk 198311,3 MWh.

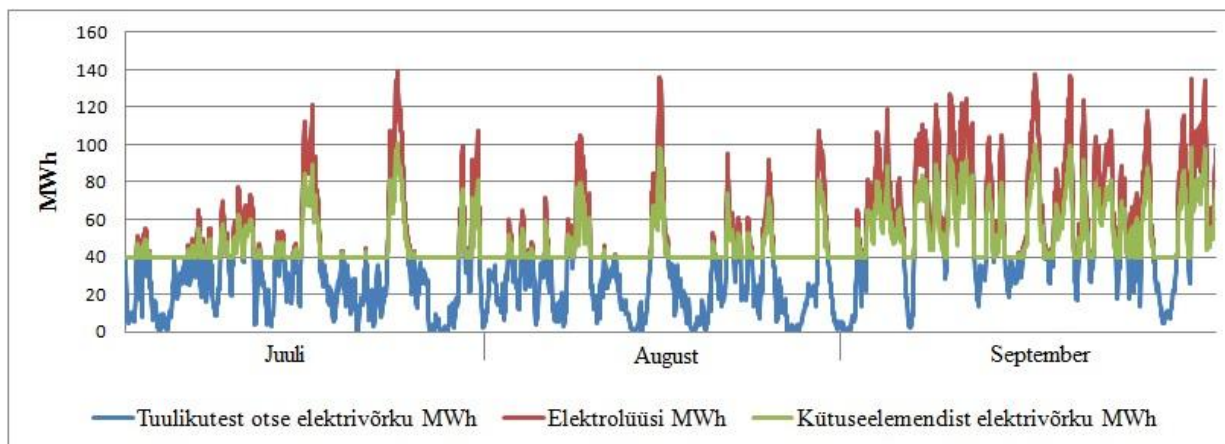


*Joonis 24. Tuulikute 50% toodangutippude äralõikamine vahemikus jaanuar – märts .*

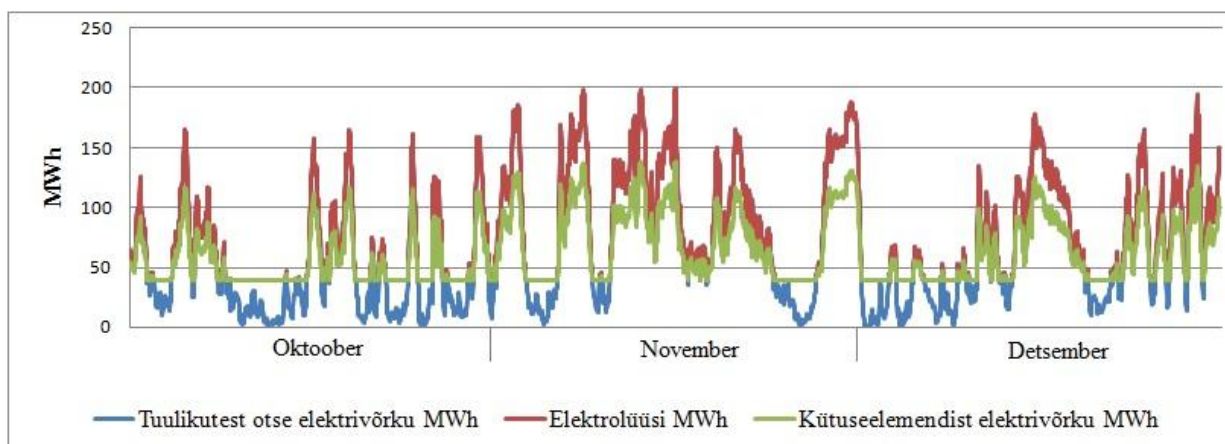


*Joonis 25. Tuulikute 50% toodangutippude äralõikamine vahemikus aprill – juuni.*

Esimeses (joonis 24) ja teises (joonis 25) kvartalis läheb elektrolüüserisse vastavalt 52132,9 MWh ja 29505,8 MWh elektrienergiat. Kütuseelemendist tagasi elektrivõrku läheb vastavalt 32020 MWh ja 181122,4 MWh.



**Joonis 26.** Tuulikute 50% toodangutippude äralõikamine vahemikus juuli – september.



**Joonis 27.** Tuulikute 50% toodangutippude äralõikamine vahemikes oktoober – detsember.

Kolmandas (joonis 26) ja neljandas (joonis 27) kvartalis suunatakse elektrolüüsi vastavalt 32569 MWh ja 83529,8 MWh elektrienergiat. Tagasi võrku saadetakse vastavalt 20003,9 MWh ja 51304 MWh elektrienergiat. Viimases kvartalis energiasalvestussüsteemi suunatud elektrienergia moodustab terve aasta peale kasutatavast energiast 42%.

Toodetud vesiniku koguseid analüüsidest võib tõdeda, et 50% ulatuses tuulikute toodangu elektrolüüserisse suunamisel oleks aasta tuulisematel perioodidel vaja väga suuri vesiniku säilitamise mahuteid ja see osutuks ebamõistlikult kulukaks. Otstarbekam oleks elektrolüüserisse suunatavat energiakogust optimeerida sügistalvise suurema ja kõikumava tuuleenergia toodanguga perioodi alusel.

### 3.4.4 Energeetilise kulukuse analüüs

Töös leitud 50% ja 75% toodangutippude äralõikamisel suunati vastavalt 198311,8 MWh ja 78431 MWh elektrienergiat vesiniku tootmiseks elektrolüüsi. Vastavad väärtused moodustavad kogu tuulikute poolt toodetud elektrienergiast esimese puhul ligikaudu 44% ja teisel ligikaudu 17%. Arvestades kasutatud energiasalvestussüsteemi PEM SOFC/CHP töötamise käigus esinevate energeetiliste kadudega, on võimalik süsteemist 50% tuuliku toodangumahu elektrolüüserisse suunamise korral maksimaalselt kätte saada 120970,2 MWh ja 75% korral 47842,9 MWh. Seega arvestades, et Eesti tuuleenergeetikas ei ole tuulikute energiatoodang nii suur, et oleks vajalik talletada 44% kogu tuulikute toodangust energiasalvestussüsteemi, et seda pärast elektrivõrku saata, siis ei oleks selline süsteem energeetiliselt efektiivne.

Tuulikute toodang on talvistel perioodidel kõige suurem ning soojematel perioodidel toodang väheneb. Samuti on külmematel perioodidel kogu energia tarbimine tunduvalt suurem kui soojematel kuudel. Seega külmematel aegadel, kui esinevad suuremad tuule kiirused ja/või tippkoormusevälistel perioodidel (kellaajad 20:00–06:00) on 75% tuulikute toodangutippude äralõikamine vesiniku tootmiseks perspektiivikas võimalus. Kui süsteemis tekib nõudlus (tipptundide ajal) on võimalus kütuseelementi kasutades muuta vesinik elektrienergiaks ning saata elektrivõrku. Seeläbi toimib kogu elektrisüsteem efektiivsemalt ning muudab tuulikute väljundvõimsuse prognoosimine ja kontrollimise tõhusamaks, mis toob kasu elektrisüsteemi haldajatele ning tarbijatele. Lisaks tuleb arvestada, et tuulikute väljundvõimsus kõigub tuulekiiruste väiksematelgi muutustel äärmiselt kiirest ning, muudab elektrisüsteemi mineva elektrienergia prognoosimise keeruliseks.

Seega tuulikute toodangu 75% tippude äralõikamisega on potentsiaalselt võimalik muuta elektrivõrku ja -süsteemi oluliselt efektiivsemaks.

## Kokkuvõte

Tuuleenergeetika on maailmas taastuenergia allikatest kõige kiiremini arendatav ning omab üha tähtsamat rolli erinevate riikide energiakavas, kaasarnvatud Eestis. Maailma summaarne tuuleenergia võimsus oli 2012 aasta lõpul 282,4 GW ning Eesti tuuleenergia osakaal kasvas samal ajal 269 MW-ni. Tuule juhuslikust iseloomust tingituna võib tekkida tuulikute väljundvõimsuses kõikumisi, mille tõttu ei saa arvestada tipuvõimsuse katmisel tuuleelektrijaamade toodanguga. Lisaks mõjutab tuule kõikumine elektrisüsteeme ja tarbijaid. Seega üha enamate tuuleturbiinide lisamine elektrivõrku toob endaga kaasa probleeme. Suurimateks väljakutseteks on tuulikute integreerimine vananeva infrastruktuuriga.

Tuulepargid kasutavad suure võimsusega horisontaalteljelisi tuuleturbiine, mida võib ühildada vesinikku tootva tehnoloogiaga. Tehnoloogiaid on mitmeid ning kasutatakse vastavalt otstarbele. Kõikuvate energiaallikate nagu tuul sobib kõige paremini vee elektrolüüs. Elektrolüüsi tehnoloogia on juba kaua kasutusel olnud, kuid viimastel aasta kümnetel on see saanud suurt tähelepanu nii riigi organisatsioonidelt kui eraettevõtelt. Elektrolüüs muudab elektrienergia keemiliseks energiaks, lõhustades vee hapnikuks ja vesinikuks. Toodetud vesinik ei ole mitte energiaallikas vaid energiakandja. Elektrolüüsi süsteemid jaotatakse nendes kasutatava elektrolüüdi alusel. Enim arendatud ja kasutust leidnud tehnoloogiad on leelises keskkonnas elektrolüüs ja prootonvahetusmembraaniga elektrolüüs. Mõlemal tehnoloogial on eelised ja puudused. Leelises elektrolüüsi süsteemid on kõige enam arendatud ja odavam, kuid on vähem efektiivsem kui PEM elektrolüüs. Lisaks töötab PEM paremini kõikuvate energiaallikatega. Vähem arendatud, kuid lähitulevikus palju lubav elektrolüüsi süsteem on kõrgtemperatuuriline elektrolüüs, millele eeldatakse kõrget efektiivsust.

Vesiniku elektrienergiaks muundamine tehnoloogiaid on hakatud viimasel kümnendil ühe enam arendama. Vesinikku võib põletada vastavates mootorites kui ka gaasiturbiinides. Suurim efektiivsus saavutatakse kütuseelementides, kus muudetakse keemiline potentsiaalne energia elektrienergiaks ja kõrvalproduktiks on soojus ning vesi. Kütuseelemendi tööpõhimõte on vastupidine elektrolüüdi omale. Eristatakse elektrolüüdi alusel. Viis kõige enam kasutatud

kütuseelemendi tehnoloogiat on: polümeerelektrolüütmembraaniga, leeliselektrolüüt, fosforhapelektrolüüt, sulakarbonaat-elektrolüüt ja tahkeoksiid-elektrolüüt. Viimased kolm on kõrgtemperatuuridel töötavad ja kui rakendada efektiivselt nende poolt toodetud soojust, siis süsteemi efektiivsus võib tõusta kuni 85%-ni. Kõrgtemperatuuridel tehnoloogiad on sobilikud kasutamaks koos suuremate energiatootmisjaamadega nagu tuulepargid.

Töös leiti erinevate elektrolüüserite ja kütuseelementide tehnoloogiate kombineeritud süsteemide energiatõhusused. Suurimad energiatõhususe näitajad esinesid PEM PACF/CHP-1 ja PEM MCFV/CHP-1, mis olid 63%. Madalaim väärtus oli HTE PEMFC-1, milleks oli 19%. Lisaks uuriti potentsiaalset, kui palju elektrienergiat saab saata elektrolüüs-kütuseelement süsteemi ja tagasi, rakendades tuulikute energiatoodangu 50% ja 75% toodangutippude äralõikamisega. Suurim elektrienergia toodang oli neljandas kvartalis ja väikseim kolmandas kvartalis. Üldine trend on, et vastu talve tootlikkus tõuseb ja kevade saabudes väheneb.

50% tasemel tuulikute energiatoodangu kärpimine: energiasalvestussüsteemi saadeti 44% tuulikute kogutoodangust, mis on Eesti kontekstis liiga palju, kui soovitakse toodetud vesinikust ainult elektrienergiat toota. Seega antud süsteem ei oleks nii majanduslikult kui energeetiliselt efektiivne.

75% tasemel tuulikute energiatoodangu kärpimine: tuulikute kogutoodangust saadeti 17% elektrienergiast vesinik-kütuseelement süsteemi. Antud protsent vastab 78431 MWh-le ning on potentsiaalselt võimalik aidamaks tasakaalustada elektrisüsteemi. Suurim kasu esineks külmadel perioodidel, kui tõuseb nii energia tarbimine kui tuulikute energiatoodang ning jääksoojust saaks kasutada ka kütte eesmärgil.

Edasine ja põhjalikum uurimine on soovitatav läbi viia, et saada detailseid andmeid vesinik-kütuseelement ja muude tehnoloogiate kohta Eestis kontekstis ja viia läbi majanduslikud tasuvusarvutused.

## **Tänuavaldused**

Soovin tänada oma juhendajat Ain Kulli, kelle kasulikud nõuanded olid suureks abiks selle töö kirjutamisel.

## **Summary**

### **Compensating fluctuating wind turbines energy output by use of water electrolysis and fuel cell**

Wind power is the fastest growing industry among the renewable energy sources and has an increasingly bigger role in different countries for long- and mid-term energy plans, which also implies to Estonia. Global cumulative wind power at the end of 2012 was 282,4 GW and Estonias wind power capacity reached 269 MW. Given the nature of winds stochasticity, it may cause fluctuations on wind power output, which means it is not reliable to depend on its peak power output. In addition, fluctuations affect the quality of power grid and also consumers. Hence, given that more wind turbines are integrated with the power grid, it also reveals more issues. The biggest challenges are integrating wind turbines/farms with old and ageing infrastructure.

Wind farms use horizontal wind turbines with large power capacities, which can be integrated with hydrogen production technologies. Technologies differ and are used based on their purpose. With fluctuating power sources such as wind energy, the best technology on the market is water electrolysis. Electrolysis technology has been used, studied and developed for a long time. But during the recent decades it has drawn a lot of attention and many R&D programs have been launched. Electrolysis converts electrical energy into chemical energy by splitting water molecules into hydrogen and oxygen. Hydrogen is not an energy source but an energy carrier. Current electrolysis technologies however are not capable for efficient electrolysis of brine water. Electrolyzer technologies are defined by the electrolyte they use. Most developed and mature technologies are alkaline water electrolysis and proton exchange membrane electrolysis. Both technologies have advantages and disadvantages. Alkaline systems are most developed and low-price, but less efficient than PEM. In addition PEM operates better with fluctuating power sources. Less developed, but highly prospective technology is high-temperature electrolysis.

Technologies that convert hydrogen into electrical energy have been studied and developed in an increasing rate during last decades. Hydrogen can be used in a hydrogen combustion engine or in hydrogen gas turbines. However, the most efficient technologies are fuel cells, which convert potential chemical energy in hydrogen into electrical energy and by-products are pure water and heat. The operating principal of fuel cell is the opposite of electrolysis. They are defined by the electrolyte they use. Five most commonly used fuel cells include: polymer electrolyte FC, alkaline FC, phosphoric acid FC, molten carbonate FC and solid oxide FC. Last three are operating at elevated temperatures and if used with combined heat and power the efficiencies may rise high as 85% HHV. High temperature fuel cells are suitably for medium to large scale utilities, in this case wind farms.

In this paper different electrolysis and fuel cell technologies were combined to find their energy efficiency. Highest ranking were PEM PACF/CHP and PEM MCFC/CHP, which got values up to 63% HHV. The lowest operating efficiency found was for HTE PEMFC, with 19% HHV. In addition, the potential of using electrolysis-fuel cell technologies with wind power was valued by cutting of produced wind power and feed into electrolysis-fuel cell system that exceeded 50% and 75% of production peaks. Highest energy production occurred in the fourth quarter and lowest in the third quarter. Overall trend is that highest energy production takes place before winter and abates before spring. It is also important to note that the higher energy production during fourth quarter is also due to added Narva tuhavälja wind farm and additional installations to Paldiski wind farm.

Results given for 50%: Electricity feed to energystoragesystem was 44% from total generated wind power, which is too large of a percentage when only grid stabilization is in mind. Therefore it is not economical nor energy efficient.

Results given for 75%: From total wind power generated 17% was feed into energystorage system. Which corresponds to 78431 MWh and has the potential to mitigate problems such as power grid stabilization that comes from stochastic nature of wind. Highest use would be during the colder months (eg. october – february).

Further and more detailed research is recommended to get better overview of wind power combined with electrolysis-fuel cell and other technologies in Estonia.

## Viidatud allikad

Abdel-Aal, H., Zohdy, K. M., & Kareem, M. A. (2010). Hydrogen Production Using Sea Water Electrolysis. *The Open Fuel Cells Journal* (3), 1-7.

Barbir, F. (1999). Engineering at Illinois: Internetist kättesaadav: [http://courses.engr.illinois.edu/npre470/web/readings/H2\\_Conversion.pdf](http://courses.engr.illinois.edu/npre470/web/readings/H2_Conversion.pdf) (05/14/2013)

Bauerova, L., & Andersen, T. Bloomberg, Windmills Overload East Europe's Grid Risking Blackout: Energy. (10/26/2012) Internetist kättesaadav: <http://www.bloomberg.com/news/2012-10-25/windmills-overload-east-europe-s-grid-risking-blackout-energy.html> (04/20/2013)

Beccali M et al. Method for size optimisation of large wind-hydrogen systems with high penetration on power grids. *Appl Energy* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.037>

Bicakova, O., & Straka, P. (2012). Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. *International Journal of Hydrogen Energy* , 11563-11578.

Boyle, G. (2004). *Renewable Energy: Power for a sustainable future* (2nd Edition ed.). Oxford: Oxford University Press. p. 452

Breeze, P., da Rosa, A. V., Doble, M., Gupta, H., Kalogirou, S., Maegaard, P., et al. (2009). *Renewable Energy Focus Handbook* (First Edition ed.). Oxford: Elsevier. p. 519

Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy* (38), 4901-4934.

Chang, P.-L., Hsu, C.-W., & Chang, P.-C. (2011). Fuzzy Delphi method for evaluating hydrogen production technologies. *International Journal of Hydrogen Energy* (36), 14172-14179.

Demirci, U.B., Miele, P. ((2013). Overview of the relative greenness of the main hydrogen production processes, Journal of Cleaner Production, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.025>).

Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy (37), 1954-1971.

Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon<sup>a</sup>, Eesti uudised, Eesti tuuleenergia koguvõimsus kasvas mullu 47 protsenti. (02/11/2013). Internetist kättesaadav: <http://www.tuuleenergia.ee/2013/02/eesti-tuuleenergia-koguvoimsus-kasvas-mullu-47-protsenti/> (04/04/2013)

Eesti Tuuleenergia Assotsiatsioon<sup>b</sup>, statistika. (2013). Internetist kättesaadav: <http://www.tuuleenergia.ee/about/statistika/> (18/04/2013)

Elering. (2012). Eesti elektrisüsteemi tarbimishõudluse rahuldamiseks vajaliku tootmisvaru hinnang. Tallinn: Elering. Internetist kättesaadav: [http://elering.ee/public/Infokeskus/Aruanded/Elering\\_tootmispiisavuse\\_aruanne\\_2012.pdf](http://elering.ee/public/Infokeskus/Aruanded/Elering_tootmispiisavuse_aruanne_2012.pdf) (22/04/2013)

Elering, Infokeskus, Eleringi toimetised. 2012. Eesti varustuskindlustuse aruanne 2012. Internetist kättesaadav: [http://elering.ee/public/Infokeskus/Aruanded/Elering\\_Varustuskindlustuse\\_aruanne\\_2012.pdf](http://elering.ee/public/Infokeskus/Aruanded/Elering_Varustuskindlustuse_aruanne_2012.pdf)

Elering, Uudised. (01/28/2013). Internetist kättesaadav: Elering: <http://elering.ee/taastuvenergia-osakaal-kasvas-kogutarbimises-mullu-ligi-15-protsendini/>

Enercon, Brochure. (Aprill, 2012). Internetist kättesaadav: [http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON\\_PU\\_en.pdf](http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON_PU_en.pdf) (18/05/2013)

Energy and Environmental Analysis Inc. (2008, detsember). Technology Characterization: Fuel Cells. Retrieved Mai 14, 2013, from United States Environmental Protection Agency: [http://www.epa.gov/chp/documents/catalogchptech\\_fuelcells.pdf](http://www.epa.gov/chp/documents/catalogchptech_fuelcells.pdf) (29/04/2013)

Energy Efficiency & Renewable Energy, U.S. Department of Energy. Types of Fuel Cells. Internetist kättesaadav: [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc\\_types.html#fc](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/fc_types.html#fc) (12/05/2013)

European Commission, Fuel Cell and Hydrogen. (04/03/2013) Internetist kättesaadav: [http://ec.europa.eu/research/energy/eu/index\\_en.cfm?pg=research-fch-background](http://ec.europa.eu/research/energy/eu/index_en.cfm?pg=research-fch-background) (14/05/2013)

Eurostat. (26/02/2013). Internetist kättesaadav: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&plugin=0&language=en&pcode=ten00087> (09/04/2013)

Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, Newsroom, Fact Sheets, Hydrogen production. Internetis kättesaadav: [http://www.fchea.org/core/import/PDFs/factsheets/Hydrogen%20Production%20Overview\\_NEW.pdf](http://www.fchea.org/core/import/PDFs/factsheets/Hydrogen%20Production%20Overview_NEW.pdf) (01/05/2012)

FuelCellToday, About Fuel Cells. Internetist kättesaadav: <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/technologies> (05/14/2013)

Gahleitner, G. (2013). Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *International Journal of Hydrogen Energy* (38) , 2039-2061.

GWEC<sup>a</sup>. (2011). Global Wind Report Annual market update. Internetist kättesaadav: <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2010-2/> (01/05/2013)

GWEC<sup>b</sup>. (11/02/2013). Global Wind Statistics 2012. Internetist kättesaadav: [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2013/02/GWEC-PRstats-2012\\_english.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2013/02/GWEC-PRstats-2012_english.pdf) (01/05/2013)

Herring, S., Anderson, R., O'Brien, J., Lessing, P., Stoots, C. (05/20/2003). Development of a High Temperature Solid Oxide Electrolyser System. Internetist kättesaadav: [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/merit03/40\\_inel\\_j\\_stephen\\_herring.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/merit03/40_inel_j_stephen_herring.pdf) (19/04/2013)

Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (12), 1221-1250.

Islam, M., Mekhilef, S., & Saidru, R. (2013). Progress and recent trends of wind energy technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (21) , 456-468.

Joselin Herbert, M., Iniyar, S., Sreevalsan, E., & Rajapandian, S. (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (11), 1117–1145.

Kabza, A. (2012). Internetist kättesaadav: [http://www.zswbw.de/fileadmin/ZSW\\_files/Infoportal/Vorlesungen/Universitaet\\_Ulm/docs/EST\\_III\\_WS\\_12\\_13/FCF\\_Smart\\_14.11.2012.pdf](http://www.zswbw.de/fileadmin/ZSW_files/Infoportal/Vorlesungen/Universitaet_Ulm/docs/EST_III_WS_12_13/FCF_Smart_14.11.2012.pdf) (14/04/2013)

Kaldellis, J. K., & Zafirakis, D. (2011). The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. *Renewable Energy* (36), 1887-1901.

Kaldellis, J. K., & Zafirakis, D. P. (2012). 2.21 - Trends, Prospects, and R&D Directions in Wind Turbine Technology. Oxford: Elsevier.

Kapsali, M., & Kaldellis, J. K. (2012). 2.14 - Offshore Wind Power Basics. Oxford: Elsevier.

Kraftwerkforschung, Hydrogen gas turbines. (01/07/2011). Internetist kättesaadav: <http://www.kraftwerkforschung.info/en/hydrogen-gas-turbines/> (13/05/2013)

Kreith, F., & Goswami, D. Y. (Eds.). (2007). 27.3 Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. CRC Press.

Liik, O., Oidram, R., Keel, M., Ojangu, J., Landsberg, M., & Dorovatovski, N. (2005). Co-operation of Estonia's Oil Shale based Power System with Wind Turbines. *Oil Shale* (22), 127-142.

Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, Eesti Vabariigi aruanne Euroopa Komisjonile taastuvatest energiaallikatest toodetud energia kasutamise ja edendamise edusammude kohta. (2011). Internetist kättesaadav: <http://www.mkm.ee/nreap-2/> (05/05/2013)

Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (16), 981-989.

Mostafaepour, A. (2010). Productivity and development issues of global wind turbine industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (14) , 1048-1058.

Outlook, GWEO (2012). Global Wind Energy Outlook. Internetist kättesaadav: [http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/11/GWEO\\_2012\\_lowRes.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/11/GWEO_2012_lowRes.pdf) (27/03/2013)

Petipas, F., Fu, Q., Brisse, A., & Chakib, B. (2013). Transient operation of a solid oxide electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy* (38) , 2957-2964.

Rabiee, A., Khorramdel, H., & Aghaei, J. (2013). A review of energy storage systems in microgrids with wind turbines . *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (18) , 316-326.

Rajeshwar, K., McConnell, R., & Licht, S. (Eds.). (2008). *Solar Hydrogen Generation: Toward a Renewable Energy Future*. New York: Springer Science+Business Media, LLC.

Rayment, C., & Sherwin, S. (02/05/2003). *Introduction to Fuel Cell Technology*. Notre Dame, U.S.A.

Risthein, E. (2007). *Sissejuhatus energiatehnikasse*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

Rogues, F., Hiroux, C., & Saguan, M. (2010). Optimal wind power deployment in Europe—A portfolio approach. *Energy Policy* (38), 3245-3256.

Shafiullah, G., Oo, M. A., Ali, A. S., & Wolfs, P. (2013). Potential challenges of intergrating large-scale wind energy into the power grid - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (20), 306-321.

Sørensen, B. (2012). *Hydrogen and Fuel Cells* (2nd Edition ed.). Elsevier. p. 492

Statistikaamet. (07/7/2012). Internetist kättesaadav: <http://www.stat.ee/57641> (28/03/2013)

Sundararagavan, S., & Baker, E. (2012). Evaluating energy storage technologies for wind power integration. *Solar Energy* (86), 2707-2717.

The European Wind Energy Association, *Wind in power 2012 European Statistics* .(2013). Internetist kättesaadav: [http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/Wind\\_in\\_power\\_annual\\_statistics\\_2012.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/Wind_in_power_annual_statistics_2012.pdf)

Tomczyk, P. (2006). MCFC versus other fuel cells—Characteristics, technologies and prospects. *Journal of Power Sources* (160), 858-862.

Tõnsau, K. (2011). Tuuleenergeetika areng Eestis. *Lõputöö*. lk 53

Toom, K., & Annuk, A. (2010). Tuulegeneraatorite väljundvõimsuse kõikumiste leevendamine. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine. Kaheteistkümnenda konverentsi kogumik , 93-100. (E. Vollmer, & A. Normak, Compilers) Tartu: Eesti Maaülikool.

U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy, Hydrogen and Fuel Cells. (veebuar 2011). Internetist kättesaadav: [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/fc\\_comparison\\_chart.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/pdfs/fc_comparison_chart.pdf) (05/05/2013)

U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory, Technologies and Turbines (05/05/2013) Internetist kättesaadav: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/program.html> (12/05/2013)

Ursua, A., & Sanchis, P. (2012). Static-dynamic modelling of the electrical behaviour of a commercial advanced alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy* (37), 18598-18614.

Wang, Y., & Sun, T. (2012). Life cycle assessment of CO<sub>2</sub> emissions from wind power plants: Methodology and case studies. *Renewable Energy* (43), 30-36.

Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science* (36), 307-326.

Zhang, H., Lin, G., & Chen, J. (2010). Evaluation and calculation on the efficiency of a water electrolysis system for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* (35), 10851-10858.

# Lisad

Lisa 1. Põhilised vesiniku tootmise protsessid (Fuel Cell & Hydrogen Energy Association) järgi.

Põhimeetodid	Töötlemine	Tooraine	Energia	Emssioonid
Soojuslikud	Auru reformimine	Maagaas	Kõrgtemperatuuriline aur	Mõningad heitkogused, süsiniku sekvesteerimine võib vähendada nende mõju
	Termokeemiline vee lõhustamine	Vesi	Kõrgtemperatuuriline soojus gaasijahutiga tuumareaktoritest	Puuduvad
	Gaasistamine	Kivisüsi, biomass	Aur ja hapnik kõrgel temperatuuril ja rõhul	Mõningad heitkogused, süsiniku sekvesteerimine võib vähendada nende mõju
	Pürolüüs	Biomass	Mõõdukalt kõrgtemperatuuriline aur	Mõningad heitkogused, süsiniku sekvesteerimine võib vähendada nende mõju
Elektrokeemilised	Elektrolüüs	Vesi	Elekter tuule-, päikese-, hüdro- ja tuumaelektrijaamast	Puuduvad
	Elekrolüüs	Vesi	Elekter kivisöest ja maagaasist	Mõningad heitkogused elektri tootmisest
	Fotoelektrokeemiline	Vesi	Otsesest päevavalgusest	Puuduvad
Bioloogilised	Fotobioloogiline	Vesi ja vetikad tüved	Otsesest päevavalgusest	Puuduvad
	Anaeroobne lagundamine	Biomass	Kõrgtemperatuuriline soojus	Mõningad heitkogused
	Fermenteerivad mikroorganismid	Biomass	Kõrgtemperatuuriline soojus	Mõningad heitkogused

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina

Martin Mäll

sünnikuupäev:

07/11/1989

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

### **TUULIKUTE ENERGIATOODANGU AJALISE MUUTLIKUSE KOMPENSEERIMINE VEE ELEKTROLÜÜSI JA KÜTUSEELEMENTI KASUTADES**

mille juhendaja on

Ain Kull,

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus,

20/05/2013