

Kristina Vorobieva

VESINIKU TOOTMISE VÕIMALUSED EDASPIDISEKS RAKENDAMISEKS EESTI ENERGIASEKTORIS

LÕPUTÖÖ

Tehnoloogia ja ringmajanduse instituut
Keskkonnatehnoloogia ja -juhtimine õppekava
Juhendaja: Deniss Klauson

Tallinn 2023

Mina, Kristina Vorobieva, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teoste on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autori/te/le ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Deniss Klauson */allkirjastatud digitaalselt/*

Lõputöö on kaitsmisele lubatud tehnoloogia ja ringmajanduse instituudi direktori korraldusega.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kristina Vorobieva
sünnikuupäev: 19.01.2002

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Vesiniku tootmise võimalused edaspidiseks rakendamiseks Eesti energiasektoris

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas,

/allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1 ENERGIAOLUKORD JA SELLE POLIITIKA EESTIS	7
1.1 Riiklikud energiamajanduse arengukavad.....	7
1.2 Taastuvenergia liigid Eestis.....	9
1.2.1 Päikeseenergia.....	9
1.2.2 Tuuleenergia.....	10
1.2.3 Biomassi- ja jäätmeenergia	12
1.3 Iru elektrijaama jäätmepõletusplokk	12
2 VESINIKUSTRATEEGIA EESTIS	14
2.1 Strateegilised otsused vesiniku kasutuselevõtu suhtes	14
2.2 Eesti Vesinikuorg	15
2.3 Auve Tech vesinikusõiduk	16
3 VESINIKU ISELOOMUSTUS	18
3.1 Keemiline koostis	18
3.2 Keemilised omadused.....	18
4 VESINIKU TOOTMISE MEETODID	20
4.1 Metaani auruga reformimine	20
4.2 Nafta reformimine	22
4.3 Kivisöe ja põlevkivi gaasistamine	22
4.4 Elektrolüüs.....	23
4.4.1 Elektrolüsaator prootonivahetusmembraaniga.....	23
4.4.2 Leeliseline elektrolüsaator.....	24
4.4.3 Elektrolüüsi vee ettevalmistamine ja energiatarve.....	25
5 VESINIKU LADUSTAMISE TEHNOLOOGIAD.....	27
5.1 Gaasilise vesiniku ladustamine.....	28
5.2 Vedela vesiniku ladustamine	29
5.3 Vesiniku ladustamine metallhüdriidakudes.....	29
6 VESINIKU KASUTUSALAD	31
6.1 Vesinik energiakandjana kütuseelemendis	31
6.1.1 Vesinikmootori tööpõhimõte.....	31
6.2 Vesinik tööstuses	33
7 VESINIKU TOOTMISE VÕIMALUSED EESTIS	35

7.1	Tuuleenergia vesiniku tootmiseks	35
7.1.1	Energiakulud ja tootmismahud.....	36
7.1.2	Järeldus.....	37
7.2	Biometaani auruga reformimine	37
7.2.1	Energiakulud ja tootmismahud.....	38
7.2.2	Järeldus.....	39
7.3	Vesiniku ladustamine	39
7.3.1	Järeldus.....	41
7.4	Vesiniku maksumus.....	42
KOKKUVÕTE.....		44
SUMMARY		47
VIIDATUD ALLIKAD.....		50

SISSEJUHATUS

Majanduslikult arenenud riigid seadsid, vastavalt 2015. aasta detsembris toimunud Pariisi keskkonnakaitse tippkohtumise otsusele, ülesandeks täita kohustusi õhuheitlemete vähendamiseks. Üks selle eesmärgi saavutamise viise on asendada energiasektoris traditsioonilisel fossiilkütusel töötavad soojuselektrijaamad teistega, mille tööil kahjulike ainete emissioon on ebaoluline või üldse puudub. Viimaste hulka kuuluvad elektrijaamad, mis kasutavad kütusena vesinikku. [1]

Tänapäeval kaaluvad paljud majanduslikult arenenud riigid aktiivselt vesinikku mitte ainult selle traditsioonilistes kasutusvaldkondades, vaid ka tulevikuenergia alusena. Planeedi ökoloogilise seisundi katastroofilise halvenemise ja süsivesinike ressursside ammendumise taustal oleks tõepoolest õige kasutada vesinikku keskkonnasõbralikuma sõidukikütusena, vesinik sobib ka hoonete kütmiseks, samuti saab seda kasutada autonoomsetes ja statsionaarsetes sekundaarenergia allikates. [2]

Kaasaegsed energia saamise viisid on energia muundumiste ahel, mille viimane etapp on uue aine tekkimine. Uus aine on tavaliselt biosfäärile kahjulik, seda eripärasust võib nimetada energiatootmismeetodite ühiseks tunnusjooniks. Väljakutse on leida energiaallikas ja uued viisid energia tootmiseks, mis on keskkonnasõbralikud. Niikauaks kui nafta, kivisüsi ja maagaas on peamised energiakandjad ning asendust ei ole veel leitud, on nende põletamine energia saamiseks peamiseks keskkonnareostuse teguriks.

Keskkonnaohutuse probleemi lahendust nähakse vesiniku kasutamises energiakandjana. Vesinik on atraktiivne, kuna selle põletamisel tekib vesi, mis on oma olemuselt täiesti ohutu aine. Seetõttu puuduvad vesinikul keskkonnaohutuse osas konkurendid. Vesinikku saab toota erinevate meetoditega, kuid mitte kõik ei suuda toota täiesti puhast vesinikku. Pealegi on vesiniku vedelal kujul ladustamine ja transportimine väga kallis, kuna selle veeldamiseks on vaja peaaegu poolt selles sisalduvat energiat. Lisaks tuleb tagada torujuhtme ideaalne soojusisolatsioon, kuna vedela vesiniku temperatuur on väga madal – $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]. Vesinikul on standardtingimustes madal tihedus – $0,09\text{ kg/m}^3$. Ladustada ja transportida vesiniku gaasilisel kujul on lihtsam, kuna protsessid toimuvad ainult rõhu all, mis suudab suurendada vesiniku tihedust. Gaasilise vesiniku käitlemisprotsesside maksumus on endiselt kõrge, kuna väikese tiheduse tõttu on selle ladustamiseks ja transportimiseks vaja palju mahuteid, mistõttu on tegemist lisakuludega, [4]

Arvestades mõnede tootmise tehnoloogiliste etappide raskust ja kõrget maksumust, uuritakse käesolevas lõputöös erinevaid vesiniku tootmistehnoloogiaid ja võimalikke lahendusi meie riigis, suunatud Eesti Vabariigi energia- ning üldiselt keskkonnaolukorda parandamiseks. Käesolevas lõputöös vaadeldakse ka peamised traditsioonilised Eesti energiaallikad ja nende mõju keskkonnale, samuti antakse mõnede riiklike arengukavade ülevaade. Erilist tähelepanu pööratakse vesiniku kui energiakandja uurimisele, sealhulgas selle tootmisele riigi energiasektorile juurutamiseks. Töö eesmärk on vesiniku tootmismeetodite uurimine ja selle alusel kõige efektiivsemate võimaluste väljatoomine edaspidiseks rakendamiseks Eesti energiasektoris.

1 ENERGIAOLUKORD JA SELLE POLIITIKA EESTIS

Taastuvenergia saab maailmas ja Eestis rohkem tähelepanu. Euroopa Liidu pikaajaline energia- ja kliimapoliitika suunab liikmesriike vähendama oma CO₂ heitmeid ning suurendama taastuvenergia tootmist ja energiatõhusust. Energia on kliimaprobleemi alus ja selle lahendamise võti. Märkimisväärne osa atmosfääris sisaldavatest ja päikesesoojust kinni pidavatest kasvuhoonegaasidest tekib energiatootmisel, kui fossiilseid kütuseid põletatakse elektri ja soojuse tootmise eesmärgil, vastavalt sellele, annab see protsess suurima panuse ülemaailmsesse kliimamuutusse. Tulevase majandusarengu jaoks on oluline järkjärguline üleminek taastuvenergiale. [5]

Maailma Terviseorganisatsiooni (WHO) andmetel hingab umbes 99 % maailma elanikkonnast õhku, mille kvaliteediparameetrid ületavad ohutuspiire ning kahjustab inimeste tervist. Üle 13 miljonit surmajuhtumite aastas kogu maailmas on põhjustatud ennetatavatest keskkonnapõhjustest, sealhulgas õhusaastest. Peente tahkete osakeste ja NO_x tervistohustav tase on peamiselt tingitud fossiilkütuste põletamisest. [6]

1.1 Riiklikud energiamajanduse arengukavad

Eesti riiklik energia- ja kliimakava aastani 2030 (REKK 2030) ühendab Eesti energia- ja kliimapoliitika eesmärgid ning nende täitmiseks välja töötatud 71 meetet erinevate tööstussektorite jaoks. REKK 2030 vaadatakse regulaarselt üle ja uuendatud versioon valmib 30. juuniks 2023. REKK 2030 on koostatud Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi, Keskkonnaministeeriumi ning Maaeluministeeriumi ühistööna kehtivate arengudokumentidele alusel [7]:

- Eesti kliimapoliitika põhialused aastani 2050;
- Eesti energiamajanduse arengukava aastani 2030;
- Kliimamuutustega kohanemise arengukava aastani 2030;
- Transpordi arengukava 2014 – 2020;
- Metsanduse arengukava 2011– 2020;
- Riigi jäätmekava 2014 – 2020;
- Eesti maaelu arengukava 2014 – 2020.

REKK 2030 peamised eesmärgid [7]:

- Eesti kasvuhoonegaaside heite vähendamine 70 % aastaks 2030 ja 80 % aastaks 2050;

- Jagatud kohustuse määрусega kaetud sektorites (transport, väikeenergeetika, põllumajandus, jäätmemajandus, metsamajandus, tööstus) vähendada aastaks 2030 võrreldes aastaga 2005 kasvuhoonegaaside heidet 13 %;
- Taastuvenergia peab 2030. aastaks moodustama vähemalt 42% energia lõpptarbimisest;
- Energia lõpptarbitmine peab jääma 2030. aastaks praegusele tasemele – 32 – 33 TWh/a;
- Tagada energiajulgeolek, vähendades võimalikult palju sõltuvust imporditud energiast; Elektrivõrkude riikide vahelise ühendatuse miinimumkriteeriumitele vastamine;
- Kasutada teadusuuringuid, arendustegevusi ja innovatsiooni majanduse konkurentsivõime säilitamise meetmetena.

Riigikogu poolt kiideti 5. aprillil 2017. aastal heaks Kliimapoliitika põhialused aastani 2050 (KPP 2050). Dokumendi koostati Keskkonnaministeeriumi eestvedamisel ja huvigruppide kaasabil. Arengukavas esitletakse ja lepitakse esmakordselt kokku Eesti kliimapoliitika pikaajaline visioon ja teekond selle saavutamiseks. Eesti pikaajaline eesmärk on üleminek vähese CO₂- heitega majandusele, mis tähendab majandus- ja energiasüsteemi järkjärgulist sihipärast ümberkujundamist ressursitõhusamaks, tootlikumaks ja keskkonnasõbralikumaks. Eesti Vabariigi visioon on aastaks 2050 vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid tänaselt 21 miljonilt tonnilt aastas peaaegu 8 miljoni tonni CO₂ ekvivalendini aastas. [8]

Eesti Vabariigi Valitsuse poolt heaks kiidetud arengukava eelnõu kohaselt, sätestab Eesti energiamajanduse arengukava aastani 2030 (ENMAK 2030) tulevased meetmed elektri, soojuste ja kütuse säästmiseks, energia kasutamiseks transpordisektoris ja elamumajanduses. Arengukavas ENMAK 2030 kirjeldatakse Eesti energiamajanduse arenguvisiooni ja valitakse välja kõige soodsamaid tööstuslahendusi, lähtudes üldeesmärgist tagada tarbijatele turupõhise hinna ning kättesaadavusega energiavarustus. See on kooskõlas Euroopa Liidu pikaajaliste eesmärkidega energia- ja kliimapoliitika valdkonnas ning aitab kaasa majandusolukorra paranemisele ja Eesti pikaajalisele konkurentsivõimele. [9]

Pikaajalised kasvuhoonegaaside heitkogused, mis tekivad tööstustegevuse käigus, mõjutavad oluliselt kliimamuutusi. Arengudokument „Kliimamuutustega kohanemise arengukava aastani 2030“ esitab tegevusraamistiku, mille alusel on võimalik vähendada Eesti riigi haavatavust kliimamuutuste mõjude suhtes. Arengukava on koostatud ulatuslike uuringute ja analüüside põhjal. Selgitati välja kliimamuutuste mõju prioriteetsetele valdkondadele ning määratleti kohanemismeetmeid, mida on vaja rakendada lühiajaliselt kuni aastani 2030 ning mis on osa pikaajalisest visioonist aastani 2100.

Arengukava peamine eesmärk on suurendada valmisolekut kliimamuutuste mõjuga kohanemiseks riiklikul, piirkondlikul ja kohalikul tasandil. [10]

1.2 Taastuvenergia liigid Eestis

Taastuvenergia on energia liik, mis saadakse taastuvatest või ammendamatuses ressurssidest. Taastuvenergia kasutamise põhiprintsiip seisneb selle eraldamises keskkonnas pidevalt toimuvatest protsessidest või taastuvatest orgaanilistest ressurssidest ning selle edasiandmises tehniliseks kasutamiseks. Eestis hetkel kasutatavatest taastuvenergia allikatest saab nimetada tuule-, päikese-, bio- ja hüdroenergiat. [11]

Taastumatu energia on seevastu energia liik, mida ei toodeta ega täiendata lühiajaliselt ja mida sageli pole võimalik teisega asendada, kuna seda tarbitakse liigselt. Taastumatud energiaallikad võivad kasutamise tulemusena ammenduda. Taastumatu energiaallikate hulka kuuluvad fossiilkütused: kivisüsi, nafta, maagas, põlevkivi, turvas. [12]

Biokütused – bioloogiliste aineringete käigus taastuvad energiaallikad. Biokütuseid loetakse taastuvenergiaks, kuna nende põletamisel vabanev energia suunatakse tagasi aineringlusse. Eestis kasutatakse biokütusena biomassi, bioetanooli, biodiisli, samuti biogaasi. [13]

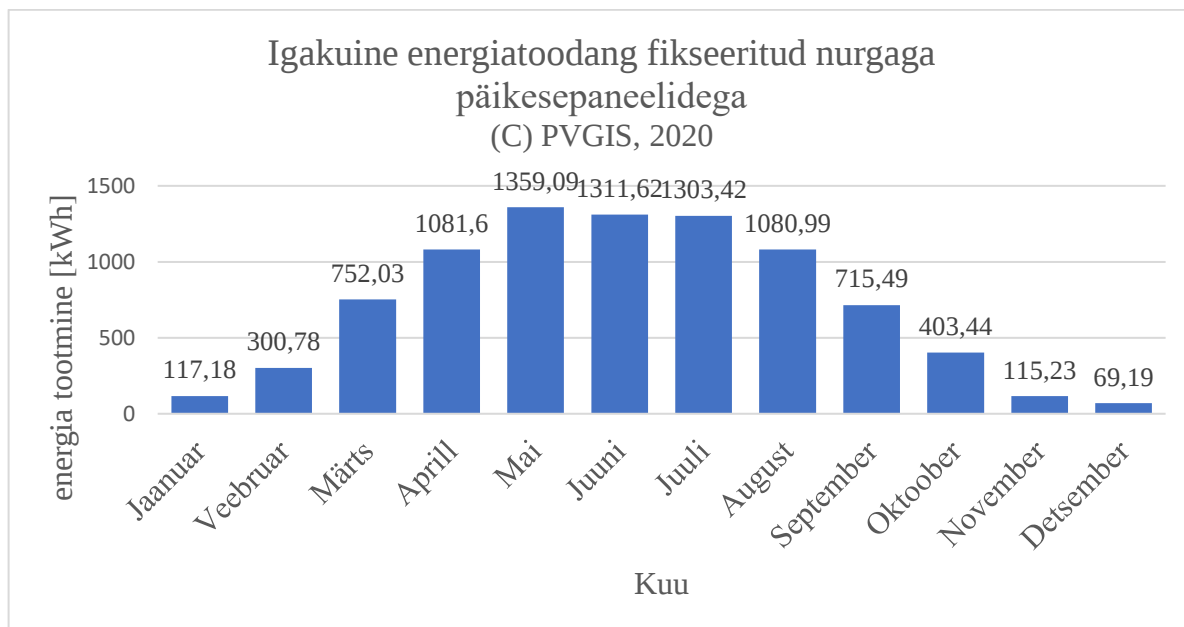
1.2.1 Päikeseenergia

Päikeseenergia muundatakse elektrienergiaks päikesepaneelide abil, mis ei vaja elektrivõrku ühendust ning päikeseenergia tootmisega ei kaasne kasvuhoonegaaside emissiooni keskkonda. Enefit Green peab päikesepargid Eesti jaoks tõhusaks energiaallikaks, kuna Eesti aasta keskmine temperatuur on üsna madal (ca 15 °C) ning madalamatel temperatuuridel töötavad päikesepaneelid tõhusamalt. Eesti kliimatingimustes võidavad polükristallilised paneelid maksumuse ja tootmisvõime poolest monokristallilisi paneele. Polükristallilised paneelid on odavamad ja paremini tajuvad hajutatud valgust. [14]

Olulist rolli mängib ka paneelide asukoht. Reeglina paigaldatakse need lõuna poole ja maapinna suhtes umbes 35 – 40 ° nurga alla, kuna see tagab meie kliimapiirkonnas maksimaalse aastase tootlikkuse. Kuigi päikeseenergia potentsiaal on Eestis väiksem kui lõunamaades, on päikeseenergia siiski muutumas üha laialdasemalt kasutatavaks. [14]

Alates 2018. aastast on päikeseenergia kasutuselevõtuga seotud kulud vähenenud ning päikesepaneelide tehnoloogiate areng elektrienergia tootmiseks on kaasa toonud paneelide

maksumuse languse, suurendades samas nende efektiivsust. Eesti suurima päikesepargi võimsus, mis asub Paldiskis, on 989 kW [15]. Alloleval joonisel (Joonis 1) on näidatud Tallinnas katusel paigaldatava päikeseelektrijaama, mille võimsus on 12 kW, tootmisvõime 2020. aastal. [16]



Joonis 1. Tallinnas katusel paigaldatava päikeseelektrijaama, võimsusega 12 kW, tootmisvõime 2020. aastal [16]

Päikesepaneelide puudusteks on kõigepealt ilmastikutingimused ja sesoonsus. Suurem osa energiast toodetakse ainult päevavalguse korral, öösel ajal on saadaval ainult juba salvestatud energia. Talvel on päikesepaneelid vähemate valgete tundide tõttu vähem tõhusad, samuti tuleb arvestada lume ja jääga. [17]

1.2.2 Tuuleenergia

Tuuleenergia, mis on üks olulisemaid taastuvenergia liike Eestis, muundatakse elektrienergiaks spetsiaalsete labadega seadmete abil, mis moodustavad tuuleparke üle kogu Eesti. Eestis on looduslikult soodsad tingimused tuuleenergia tootmiseks, sest riigis puhub tavaliselt palju tuult ning tuuleparkide rajamiseks sobivaid alasid on piisavalt.

Eesti tuuleparkide koguvõimsus on umbes 300 MW, ja kõige võimsam neist on tuulepark Aulepa tootlikkusega 48 MW, mille koosseisu kuuluvad 16 tuuleturbiini. Enamik tuuleparke asuvad rannikualadel või sisemaal kõrgendikul, kus on paremad tuuleolud. Riigi eesmärgi saavutamiseks, et 2030. aastaks tooda 50 % energiat taastuvatest ressurssidest, plaanib Eesti suurim tööstuskontsern

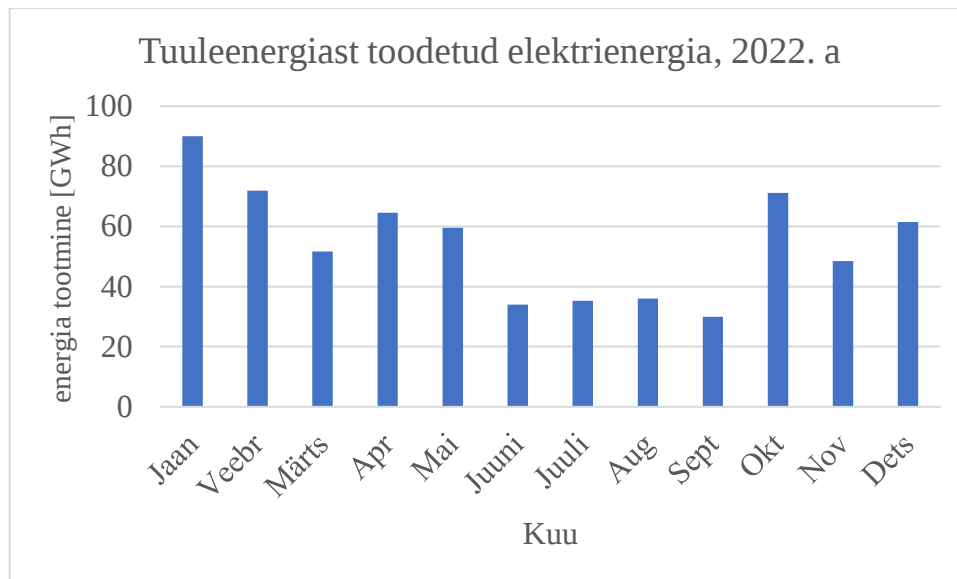
Eesti Energia rajada suuremahulise meretuulepargi ning teisi ettevõtteid arendavad erinevaid tuuleenergia projekte. [18]

Tuuleturbiinide töötamise käigus ei toimu atmosfääri CO₂ ja muude saasteainete eraldumist. Üks tuuleturbiin toodab oma eluea jooksul 40 – 80 korda rohkem energiat, kui selle tootmiseks kulub. Tuulikute kasuks räägib ka asjaolu, et erinevalt soojus- ja tuumaelektrijaamadest, mis kasutavad jahutamiseks märkimisväärsed kogused vett, tuuleenergia tootmiseks vett ei vaja. [19]

Vaatamata sellele, et tuuleenergia on taastuv ja puhas energiaallikas, on tuuleparkide rajamisel ka piirangud ja takistused [19]:

- Kohalikud elanikud seisvad vastu tuuleparkide rajamisele oma elukohtade lähedal, kuna kardavad liigset müra ja soovivad vältida varjutust, mis tekib labadest;
- Mõnede aladele, mis hästi sobivad tuuleparkide paigaldamiseks, kehtivad riigi poolt kehtestatud maakasutuse piirangud;
- Tuulepargid võivad kahjustada ökosüsteemi, kuna eluorganiismid võivad sattuda pöörlevale labadele ja surra. Öösiti tunnevad nahkhiired ainult õhuvoolude suunda, eksivad tuuleturbiinid puudega ja hukkuvad;
- Tuulepargid peavad olema ühendatud elektrivõrguga, et edastada elektrit linnadesse ja teistesse piirkondadesse. Võrguühenduse puudumine võib piirata tuulepargi toodetud energia kättesaadavust.

Alloleval joonisel (Joonis 2) on näidatud tuuleenergiast elektrienergia tootmine Eestis 2022. aastal kuu järgi, mille põhjal võib järeldada, et tuuleenergia tootmiseks soodsaimad tingimused on talvel, kevadel ja sügisel. Suvel tuuleparkide tootlikkus langeb tuule kiiruse vähenemise tõttu [20].



Joonis 2. Tuuleenergiast toodetud elektrienergia 2022. aastal [20]

1.2.3 Biomassi- ja jäätmeenergia

Biomassienergia on taastuvenergia liik, mis saadakse looduslike protsesside käigus saadud orgaaniliste ühendite põletamisel. Eesti kasutab biomassi peamiselt soojus- ja elektrienergia tootmiseks. Biomassi põlemisprodukt on CO₂ mille puud ja taimed taas tarbivad fotosünteesiks, ning atmosfääri süsihappegaasi tasakaal ei häiritata. Üldine põhimõte on selles, et biomassi kasvuks neeldunud CO₂ vabaneb selle põlemisel, kokkuvõttes selle sisaldus atmosfääris ei kasva. [21]

Eestis kasutatav biomass on toodetud madala kvaliteediga puidust või põõsastest, mis ei sobi puidu- või paberitööstusesse. Kasutatakse ka puidutööstuse jäätmeid. [22]

Biomassienergia tootmisel on olemas ka keskkonnariske. Kõigepealt bioenergia tootmine on tihedalt seotud muutuva maakasutusega. Laiendatud energiatootmine biomassist nõuab selle täiendavaks kasvatamiseks rohkem põlde. Puud neelavad õhust süsihappegaasi, mida need vajavad kasvamiseks ja metsade hävitamise korral süsihappegaasi enam ei imendu. Maakasutuse muutustega kaasneb ka eluorganismide looduslike elupaikade kadumise oht. Biomassist energia saamiseks nõutakse palju rohkem toorainet ja võimsust, kuna nt puidujäätmete energiatihedus on üsna madal, keskmiselt 17,5 MJ/kg, aga nt biogaasi energiatihedus on 37,5 MJ/kg. [23]

1.3 Iru elektrijaama jäätmepõletusplokk

Eesti suurim tööstuskontsern Eesti Energia alustas jäätmete kasutamist energia tootmiseks 2013. aastal Iru Elektrijaamas, kuhu rajati kaasaegne jäätmepõhine elektri ja soojuse koostootmisplakk. Iru

elektrijaama jäätmepõletusploki soojusvõimsus on 50 MW. Jäätmepõletuselektriplokk Iru jaamas on võimeline töötleva ligikaudu poole kogu Eestis tekkivatest segaolmejäätmetest ehk ligikaudu 220 000 tonni aastas. Elektri jaam muundab ligikaudu 82 % jäätmetes sisalduvast energiast elektriks ja soojuseks. Tänu eriti võimsatele suitsugaaside puhastusseadmetele ei avalda jäätmepõletusplokk negatiivset mõju keskkonnale. Vaatamata sellele, et jäätmeenergiat peetakse taastuvaks, jäätmed ei ole taastuvad ressursid. Jäätmete järkjärgulise vähenemisega hakkab kiiresti kahanema ka jäätmetest saadava energia potentsiaal. [24]

2 VESINIKUSTRATEEGIA EESTIS

Energiasüsteemid muutuvad üsna kiiresti. Energia üleminek saastavatelt fossiilkütustelt puhastele taastuvatele kütustele ja toorainetele on muutumas väga populaarseks, mis tähendab riikide, aga ka ettevõtete energiapoliitika ja tegevuste kohandamist üle maailma. Päikese- ja tuuleenergia hinnad langevad kiiresti koos iga uue põlvkonna tõhusamate seadmetega. Traditsioonilised nafta- ja gaasiettevõtted seisavad silmitsi valitsuste ja kogukondade kasvava kontrolli ning CO₂- ja keskkonnamaksudega. [25]

Eesti püüdleb koos teiste arenenud riikidega kliimaneutraalsuse poole, mistõttu vesinikutehnoloogiate kasutuselevõtt toetab selle eesmärgi saavutamist. Vesinik on oma keskkonnasõbraliku keemilise koostise tõttu üks perspektiivikamaid taastuvaid energiaallikaid fossiilkütuste asendamiseks energia- ja transpordisektoris. Vesinikenergiat ei ole Eestis veel arendatud, kuid riigis aktiivselt toodetakse üks perspektiivsemaid vesinikuallikaid – biogaas. Biogaas koosneb peamiselt metaanist ja süsihappegaasist, kuid seda on võimalik süsihappegaasist puhastada ja konverteerida metaani vesinikuks, mida saab kasutada vesinikkütuseelementides. Hetkel on olemas palju teadus- ja äriprojekte, mis on erinevates arenguetaappides. Enne vesinikuenergia kasutuselevõttu on vaja põhjalikumalt uurida selle potentsiaali, sealhulgas määratleda selle energia kasutamise sektorid, kavandada tehnoloogiate mahutamiseks vajalik infrastruktuur, uurida ladustamis- ja transpordimeetodeid, analüüsida kaasnevaid riske ja tuvastada raskusi arenguetaappides, samuti hinnata turu konkurentsivõimet. [26]

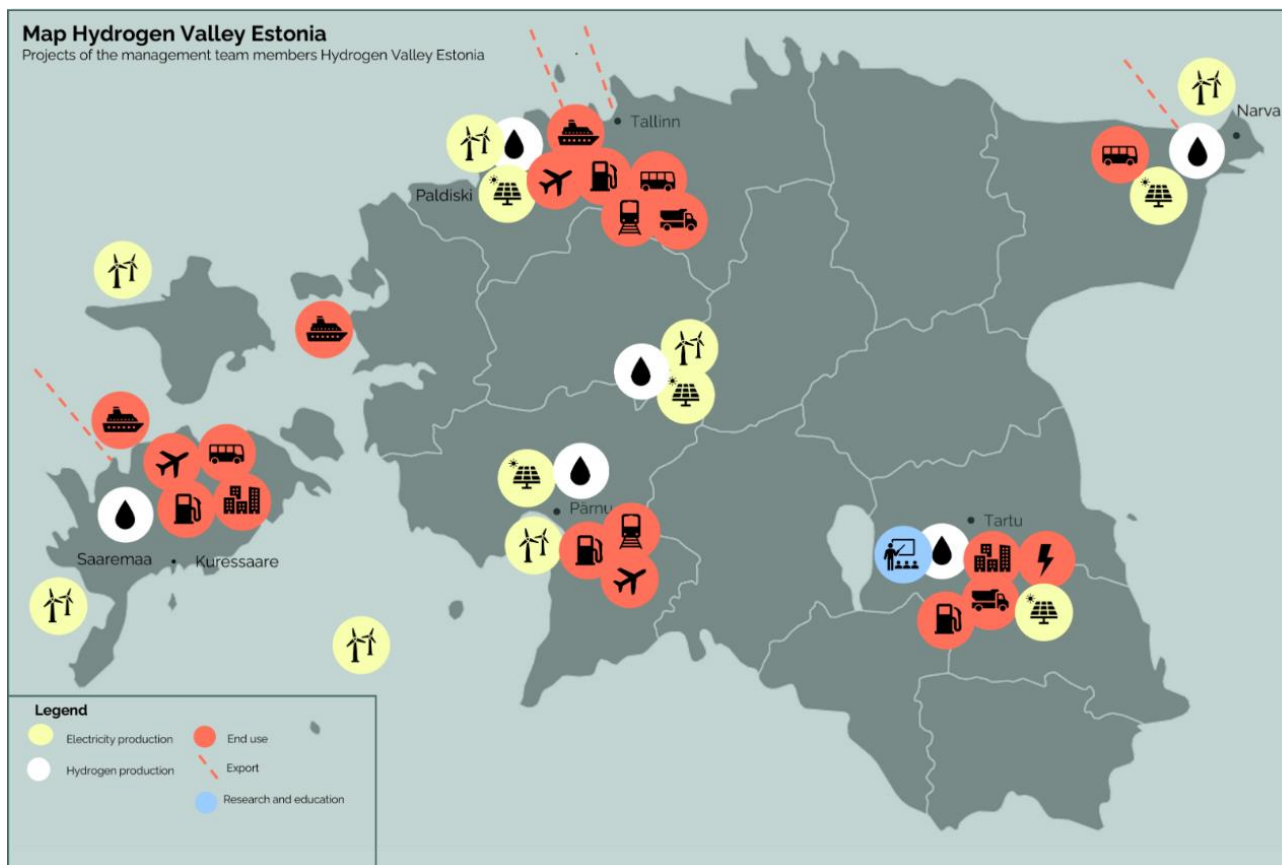
2.1 Strateegilised otsused vesiniku kasutuselevõtu suhtes

Eesti liikumine vesinikuenergia poole sai alguse juba 2016. aastal. Teekond algas Eesti Vesiniku Tehnoloogiate Ühingu rajamisest 18. märtsil 2016, mis ühendab erinevaid Eestis tegutsevaid vesinikutehnoloogiatega seotud isikuid, ettevõtteid, teadusasutusi ning huvigruppe. Organisatsiooni tegevus põhineb selle liikmete vabatahtlikul ja ühiskondlikul tegevusel. Loengute, seminaride, strateegilise kommunikatsiooni, lobitöö ja näidisprojektide kaudu suurendab ühing inimeste teadlikkust vesinikutehnoloogia arengust ja selle sotsiaalsest rakenduspotentsiaalist. Aastal 2018 Austrias toimunud konverentsil allkirjastasid Eesti ja teised Euroopa Liidu liikmesriigid vesinikualgatused dokumendi „The Hydrogen Initiative“, mille eesmärk on edendada programme ja projekte, mis kiirendavad vesiniku- ja kütuseelementide tehnoloogiate kasutuselevõttu kõigis majandusaspektides. Keskkonnaministeeriumi eestvedamisel loodi 25. oktoobril 2019. aastal töörühma, mille eesmärk on vesiniku- ja kütuseelementide tehnoloogiate rakendamine

kliimaeesmärkide saavutamiseks. Lisaks tööühma poolt on välja töötatud Eesti vesiniku teekaart. Eesti, Norra ja 22 Euroopa Liidu riiki 2020. aasta lõpus allkirjastasid IPCEI manifesti, mis koondab olulisi Euroopa ühist huvi pakkuvaid projekte vesinikusektoris. Aasta 2021 alguses avalikustati Vabariigi Valitsuse tegevusprogramm (VVTP) perioodiks 2021 – 2023, mille üks eesmärk on töötada välja vesinikkütuste strateegiat ja vesiniku pilootprojekti meede, et katsetada Eesti oludes vesiniku tervikahelat, mille raames tuleb vesinikku toota, tarnida ja tarbida. Konsultatsiooni-agentuur CIVILLA koostas 30. juunil 2021. aastal Eesti vesinikuressursside kasutuselevõtu analüüsi, mis põhineb Stockholmi Keskkonnaülikooli ja Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudi rakendusuringutel. [27]

2.2 Eesti Vesinikuorg

Tänapäeval on kolme piirkonna, ühe ülikooli ning Eesti viia suurima energeetika- ja tööstusettevõtte tihedas koostöös väljatöötamisel esimene üleriigiline "Eesti Vesinikuorg". Eesti Vesinikuoru eesmärk on järgmise kuue aasta jooksul ehitada üles täisväärtuslik üleriigiline vesiniku väärtusahel, mis kiirendab riigi energeetika üleminekut ja energiasõltumatust tunnuslausega „nullist roheliseni“. Eesti Vesinikuoru asutajad on Tallinna Sadam, Tallinna Lennujaam, Alexela, Eesti Energia, Tartu linn, Tartu terminal, Tartu Ülikool, Pärnu vald ja Saaremaa. Need üheksa partnerit kuuluvad juht- ja koordineerimisrühma ning vastutavad vesinikustrateegia loomise, juhtimise ja rahvusvahelise tunnustamise eest, et Eesti saaks Põhjamere – Läänemere koridori osaks (koos Hollandi, Saksamaa ja Taaniga). See avardab majanduslikke võimalusi rahvusvaheliseks koostööks, vesiniku ekspordiks ja Euroopa Liidu toetusskeeme. Järgmise 6 aasta jooksul areneb roheline vesiniku tootmine vähemalt kuues Eesti Vabariigi piirkonnas (Joonis 3). [28]



Joonis 3. Vesinikuoru piirkonna esialgsed piirid [29]

Paralleelselt sellega areneb transpordi ja laonduse infrastruktuur, sealhulgas impordi- ja eksporditerminalide, tanklate, ning hoidlate infrastruktuur. Eestis toodetud vesinikku hakatakse kasutama ühistranspordi, raskeveokite, raudtee, laevanduse, lennunduse ja muude transpordiliikide tankimiseks. Lisaks hakatakse seda kasutama tööstuse toorainena. Eesti Vesinikuorul on umbes 30 projekti arendamisel. [28]

2.3 Auve Tech vesinikusõiduk

Eelmise 2022. aastal juulis võeti Eestis kasutusele autonoomne vesinikkütusel töötav sõiduk (Joonis 4). Sõiduki töötas välja kohalik ettevõtte Auve Tech koostöös Tartu Ülikooli teadlastega 2020. aasta alguses alanud koostöö raames. Ettevõtte on spetsialiseerunud mehitamata sõidukite ja autonoomsete süsteemide väljatöötamisele ja juurutamisele. Organisatsioon sai esimeseks kohaks maailmas, mis ühendas autonoomse sõidu ja vesinikuenergia sõidukis. [30]

Vesinikusõiduk on saanud Maanteeameti heakskiidu avalikuks liikluseks. Sõiduki jõuallikaks on madalatemperatuurilised vesinikuelemendid, mis töötati välja Tartu Ülikoolis ja toodavad energiat vesinikust otse sõiduki sees. Ainsateks kõrvalproduktideks on aurustunud vesi ja soojus, mistõttu

peetakse sõiduk keskkonnasõbralikuks alternatiiviks isiklikele autodele. Selle kiire laadimine võrreldes elektrisõidukitega võimaldab sõidukil kauem töötada, parandades tõhusust ja pakkudes võimalust integreerida autonoomset transporti igapäevaellu. Vesinikusõiduk mahub kuni kuus reisijat. Sõiduki liigutusi saab juhtida ja vajadusel korrigeerida kaugjuhtimispuldi abil. [30]

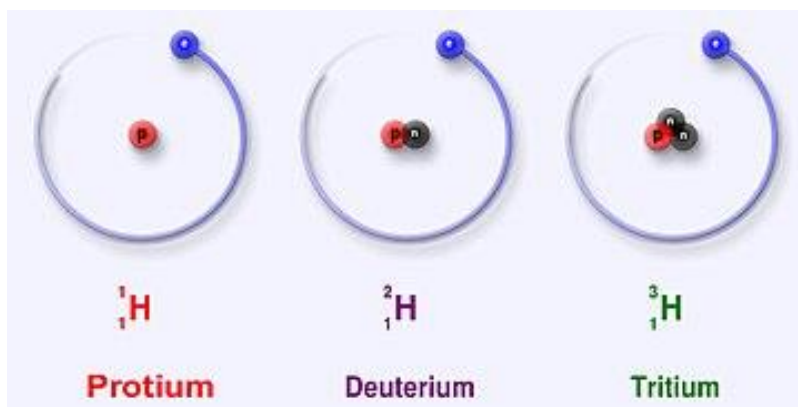


Joonis 4. Auve Tech vesinikusõiduk [30]

3 VESINIKU ISELOOMUSTUS

3.1 Keemiline koostis

Vesinik on D.I. Mendelejevi keemiliste elementide perioodilise süsteemi esimene element. Selle suhteline aatommass on 1,0079 a.m.ü. Vesinikul on 3 looduslikku isotoopi, millest kaks (vahetult vesinik e protium ja deuterium) on stabiilsed ja üks (tritium) on radioaktiivne, selle poolestusaeg on 12,3 aastat (Joonis 5). [31]



Joonis 5. Vesiniku looduslikud isotoobid: protium, deuterium ja tritium [31]

Protium (^1H) on looduses kõige levinud isotoop, mille tuum ei oma neutroni. Deuteriumi (^2H või D) aatomituum koosneb ühest protonist ja ühest neutronist. See isotoop moodustab 0,0026 – 0,0184 % kogu looduslikust vesinikust. Vett, milles „tavalise“ vesiniku aatomid on asendatud deuteriumiga, nimetatakse raskeks veeks. Tritium (^3H või T) on radioaktiivne isotoop, mille aatomituumas on kaks neutronit. [31]

Vesinikuaatomi väliskihis on ainult üks elektron, mis näitab tema reaktsioonivõimet, st võimet moodustada keemilisi sidemeid paljude elementidega. [31]

3.2 Keemilised omadused

Kuna vesinik on reaktiivne, esineb üsna harva kombineerimata elemendina. Vesinik esineb Maal tavaliselt mitte puhtal kujul, vaid keemilistes ühendites koos teiste elementidega, näiteks hapnikuga vees, süsinikuga metaanis ja teistes orgaanilistes ühendites. [32, p. 17]

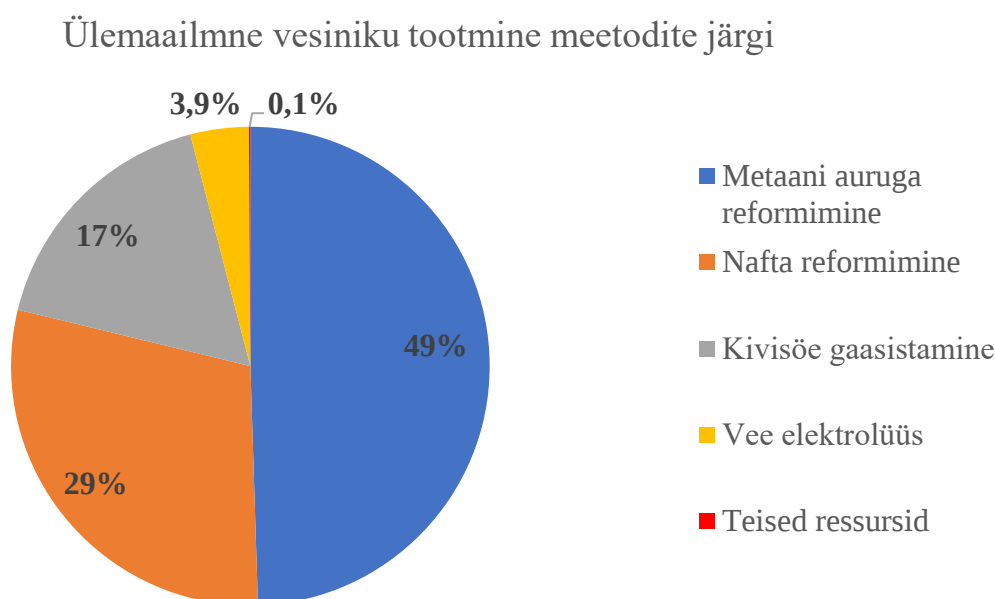
Vesinikul on hapnikuga ühendis suurim põlemissoojus massiühiku kohta, ca 120,7 GJ/t, mis on üks põhjusi, miks vedelat vesinikku kasutatakse kütusena raketites ja kosmoselaevade energetikas,

mille puhul on vesiniku madal molekulmass ja kõrge erienergiasisaldus ülimalt olulised. Puhas hapnikus põletamisel on ainsake reaktsiooniproduktiks vesi lisaks eraldub energia soojuse näol [32, p. 17]. Veeaur on kasvuhoonegaaside seas esikohal, kuid atmosfääri veeauru eraldumine mõjutab kasvuhooneefekti kõige vähem, kuna see langeb hiljem sademete kujul Maale. Seega ei teki vesiniku kasutamisel kasvuhoonegaase ega häirita isegi veeringet looduses. [33]

Vesinikul on gaasiliste ainete hulgas kõrgeim soojusjuhtivus. Selle põhjuseks on vesiniku molekulide kergus, nad liiguvad kiiremini kui mis tahes muu gaasi molekulid ja suudavad seda soojust kiiremini ühest kehast teisele üle kanda. Vesinik lahustub vähesel määral vees, kuid hästi lahustub paljudes metallides. Ühe pallaadiumi mahuosa kohta võib lahustada 900 mahuosa vesinikku. Vesinikul on väga kõrge põlemistemperatuur 2800 °C ning keemistemperatuur ca -250 °C. [32, p. 18]

4 VESINIKU TOOTMISE MEETODID

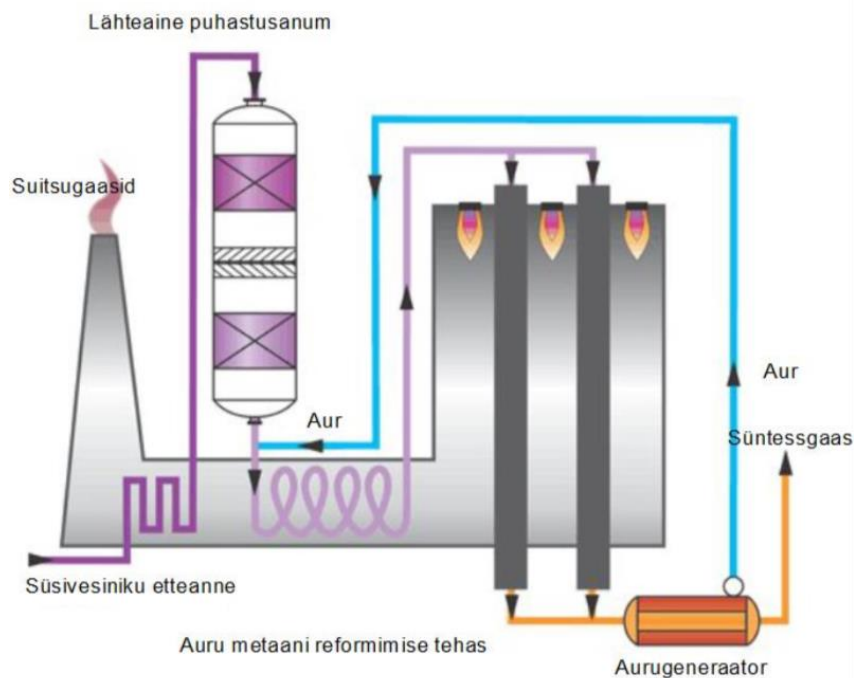
Vesiniku tootmine – on tööstuslike meetodite kogum gaasilise vesiniku saamiseks ja seejärel sellest energia ammutamiseks. Vesiniku kaubanduslikul tootmisel on neli peamist allikat: maagaas, nafta, kivisüsi ja elektrolüüs, mis moodustavad vastavalt 49 %, 29 %, 17 % ja 3,9 % ülemaailmsest vesinikutoodangust (Joonis 6). Arvestades, et maailma energiatootmises esikohal on fossiilkütused, statistiliselt suurem osa vee elektrolüüsil toodetud vesinik on samuti toodetud kasutades fossiilkütuseid. [34]



Joonis 6. Maailma vesiniku tootmise meetodid [34]

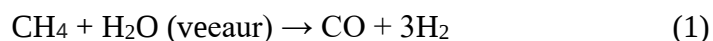
4.1 Metaani auruga reformimine

Metaani toodetakse peamiselt maagaasist, milles metaani sisaldus on 90%. Metaani aurureformimine on kõige tõhusam ja populaarsem vesiniku tootmismeetod, mis moodustub 49% ülemaailmsest vesinikutoodangust ning põhineb kuuma veeauru ja metaani vahelisel reaktsioonil. Lõpptulemusena toodetud vesinik pärineb metaani molekulidest. Metaani aurureformimise protsessi kasutegur on üle 70%. Samuti tehnoloogia on konkurentsivõimelise investeringukuluga, mille ühikmaksumuseks on Rahvusvahelise Energiaagentuuri (IEA) hinnangu kohaselt 0,34 – 0,51 €/W. Metaani auruga reformimise tootmise tööpõhimõtte on näidatud alloleval joonisel (Joonis 7). [35, p. 12]

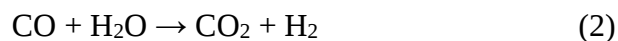


Joonis 7. Metaani auruga reformimise tehas [36, p. 19]

Metaani aurureformimise protsess algab auru tarnimisest ja selle kuumutamisest. Järgmisena juhitakse metaan reaktorisse, kus see reageerib veeauruga temperatuuril ca 1000 °C [37]:



Tavaliselt kasutatakse reaktsiooni kiirendamiseks nikkelkatalüsaatorit (hüdrogeenimiskatalüsaatorit). Lisaks kuumutatakse saadud segu spiraali abil enne selle kuumtöötlemise algust. Kuumtöötlemisel eraldub vesinikku sisaldav süngaas, mis koosneb süsinikmonooksiidist ja vesinikust. Teiseks etapiks on madalamal temperatuuril (ca 350 °C) toimuv vesiniku tootmine süngaasist. Süsinikmonooksiid astub veeauruga reaktsiooni, moodustades vesinikku ja CO₂ [37]:



Selline tehnoloogia võimaldab saada nn halli vesinikku, kuna lähteaineks on fossiilkütus. Hall vesinik on keskkonda kõige enam saastunud vesiniku vorm. Selle saamisprotsess on praktilisest küljest kergesti teostatav, kuid keemilise reaktsiooni käigus eraldub süsihappegaas. [38]

Biogaas on samuti metaani allikas. Võrreldes maagaasiga on biogaas taastuv energiaallikas, mis tekib orgaanilise materjali, nagu taimejäätmel, reovesi, põllumajandusjäätmel, jpt, bioloogilisel lagunemisel anaeroobsetes tingimustes. Biogaas koosneb 55 – 62 % metaanist ja 38 – 45 % süsinikdioksiidist, järelikult, ka biogaas võib olla metaani aurureformimise lähteaineks. [39]

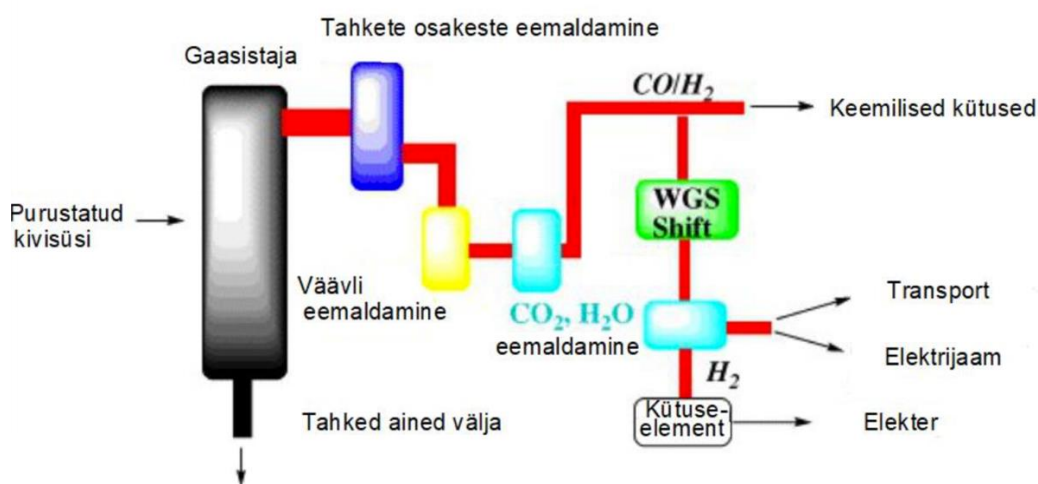
4.2 Nafta reformimine

Katalüütilise reformimise protsess on ette nähtud mootoribensiini kõrge oktaanarvuga aromaatses komponendi – reformaadi – tootmiseks. Lisaks moodustub reformimise käigus märkimisväärne kogus vesinikku sisaldavat gaasi, mis on vajalik kõigepealt hüdrotöötluste ning samuti teiste tootmisprotsesside, nagu isomerisatsiooni ja hüdrokrakkimise jaoks. [40]

Katalüütiline reformimise protsess toimub vesiniku sisaldava gaasi mõjul, spetsiaalses reaktoris, kus nafta või gaas segunevad katalüsaatoriga ja osalevad temperatuuril ca 500 °C reas kemilises reaktsioonis, mis muudavad naftasaaduste molekulaarstruktuuri. Katalüsaatoriks on plaatina ja teised metallid: raud, ruteenium, osmium, hassium. Protsessi tulemuseks on isomeriseeritud ahelaga süsivesinikke, mis tagavad bensiini kõrgemat oktaanarvu ja muidprodukte, nagu aromaatilised süsivesinikud ja vesinik. Selles protsessis vabanev vesinikgaas kasutatakse osaliselt ringleva vesinikgaasi kadude täiendamiseks ja lähteaine hüdrotöötlusteks, kuid suurem osa vesinikust eemaldatakse protsessist. Selline vesinik on palju odavam kui spetsiaalselt toodetud, kuid samuti ei ole keskkonnasõbralik, kuna see on fossiilkütuse töötlemise produkt. [41]

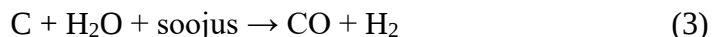
4.3 Kivisöe ja põlevkivi gaasistamine

Vesiniku tootmiseks kasutatakse laialdaselt ka kivisöe gaasistamine (Joonis 8). Protsess hõlmab süsiniku oksüdatsiooni. Oksüdeerijateks on hapnik, veeaur, süsinikdioksiid CO_2 või nende kombinatsioon. [42, p. 14]

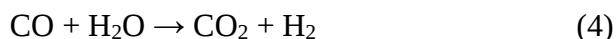


Joonis 8. Kivisöe gaasistamise protsess [36, p. 20]

Purustatud kivisüsi juhitakse gaasigeneraatorisse, milles toimub keemiline reaktsioon temperatuuril ca 1200 °C. Kivisöe gaasistamist veeauruga saab kirjeldada järgmiselt [42, p. 14]:



Pärast seda siseneb kivisüsi tahkete ainete separaatorisse, kus söejäägid eraldatakse gaasist. Seejärel toimub väävli eraldamise protsess, st gaasi puhastamise protsess. Seejärel eraldub süsinikdioksiid CO₂ ja moodustub sügaas. Järgmisena töödeldakse süngaasi veeauruga, mille tulemusena saadakse vesiniku [42, p. 14]:

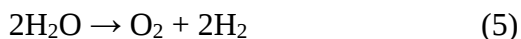


Käesoleva protsessi tulemusena saadakse nn sinist vesinikku. Sinine vesinik erineb hallist ainult selle poolest, et protsessi käigus püütakse süsihappegaasi kinni ja seda ladustatakse enne selle atmosfääri sisenemist. Püüdmisprotsessi nimeks on „Süsiniku sidumine ja säilitamine“ (*ingl. k. Carbone Capture and Storage e CCS*), mille abil muudetakse halli vesiniku siniseks. [43]

Eestis ei ole oma kivisöevarusid, kuid on suured põlevkivivarud. Põlevkivi saab samuti gaasistada. Vaatamata sellele, nõuab gaasistamise protsess eritingimusi, nagu kõrged temperatuurid, spetsiaalsed seadmed, puhastussüsteemid ning infrastruktuur. Võrreldes kivisöega, mis sisaldab kuni 90 % süsivesinikke, sisaldab põlevkivi 20 – 50 % süsivesinikke. Suhteliselt väike kogus süsivesinikke ei anna piisavalt suurt süngaasi tootmist, et hüvitada käitise kulusid ja tagada piisavat kasumlikkust. Põlevkivi gaasistamine samuti põhjustab tugevat atmosfäärisaastet.

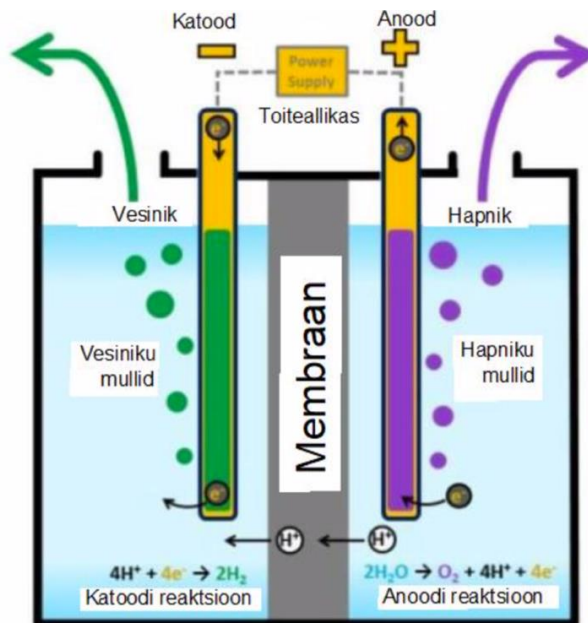
4.4 Elektrolüüs

Tänapäeval on vesiniku tootmiseks kõige perspektiivsem tehnoloogia standardne elektrolüüs, mille käigus lagundatakse vett elektrivoolu mõjul komponentideks [42, p. 15]:



Elektrolüüs jaguneb kaheks tüübiks. Esimese all mõistetakse prootonivahetusmembraani kasutamist elektrolüüdina. Teise all mõistetakse leelise vesilahuse kasutamine elektrolüüdina ning elektrolüüdiks on tavaliselt kas naatrium- või kaaliumhüdroksiid. Mõlema elektrolüsaatori tüübi kasutegur on keskmiselt 75 % [42, p. 15].

4.4.1 Elektrolüsaator prootonivahetusmembraaniga



Joonis 9. Elektrolüüsisüsteemi tööpõhimõte [36, p. 21]

Elektrolüsaator koosneb veemahutist, mis sisaldab prootonivahetusmembraani (elektrolüüti) ja kahte elektroodi: katood ja anood. Kui mõlemale elektroodile rakendatakse elektripinget, toimub keemiline reaktsioon mõlemal membraani poolel. Anoodil eraldub hapnik ja prootonid, prootonid liiguvad omakorda läbi prootonivahetusmembraani katoodile (membran laseb läbi ainult prootoneid), kus need ühinevad elektronidega, moodustades vesiniku molekule (Joonis 9). [42, p. 15]

Vee elektrolüüs eristub oma keskkonnasõbralikkuse poolest, kuid ainult tingimusel, et primaarenergia on taastuv (hüdro-, päikese-, biomassi või tuuleenergia). Elektrolüüsitehnoloogial on võimalus luua erineva võimsusega tootmisi (tootlikkusega mõnest liitrist kuni sadade kuupmeetriteni vesinikku tunnis), samuti elektrolüüsi on lihtne kasutada. Negatiiveks küljeks on protsessi suur energiamahukus, sh vajadus suurtes kogustes taastuvenergia järele, mille tootmine on aga võrreldes taastumatute energiaallikatega madalama kasuteguriga. Elektrolüsaatorid ionivahetusmembraaniga paistavad silma oma kõrge hinna poolest. Kui elektrolüüsi protsessis ei kasutata energiat fossiilkütustest, kasvuhooonegaaside emissioonid sellisel vesiniku tootmisel puuduvad. Sellisel juhul väljundtooteks on kõige puhtam vesiniku vorm – roheline. Kõrvalsaaduseks on ka väärtuslik ja puhas hapnik. [42, p. 15]

4.4.2 Leeliseline elektrolüsaator

Leeliselise elektrolüüsi seadmete tööpõhimõte on täpselt sama. Ainus erinevus seisneb selles, kuidas elektrolüüt protsessi kaasatakse. Leeliselistes süsteemides elektrolüüdiks kasutatakse naatrium- või

kaaliumhüdroksiidi vesilahuseid. Leeliselise elektrolüüsi oluliseks eeliseks on selle suhteliselt madal hind, kuna see meetod ei nõua kalleid katalüsaatoreid, kasutatavad elektrolüüdid on kättesaadavad (eriti NaOH) ja ionivahetusmembraaniga võrreldes odavad. Vaatamata sellele, ei suuda leeliseline elektrolüüs gaaside segunemist täielikult takistada, kuna, erinevalt membraanelektrolüüsist, leeliseline veelahus ei eralda anoodikambri katoodikambrist. Näidiseks alloleval joonisel on kujutatud autonoomne vesinikutehas (Joonis 10). Tehase paigaldamine on ülilihtne ning töö alustamiseks on vaja vaid betoonalust, elektri- ja veeühendust. Tehas, mis on paigutatud konteinerisse mõõtmetega 40x2,5 m, on võimeline tootma 84 m³ vesinikku tunnis rõhul 173 baari. Selline tootlikkuse maht võimaldab tehase kasutada tööstuses, eelkõige elektrijaamades, metallitöötlemises jne. [44]



Joonis 10. Autonoomne tehas vesiniku tootmiseks leeliselise elektrolüüsi teel [44]

4.4.3 Elektrolüüsi vee ettevalmistamine ja energiatarve

Elektrolüüsiks on lisaks elektrile vaja ka puhast vett. Elektrolüsaatoris kasutatav vesi peab olema eelnevalt puhastatud, sealhulgas erinevatest mineraalsetest ja orgaanilistest lisanditest, mikrobioloogilistest saasteainetest, raskmetallidest jne. Elektrolüüsi vee puhastamiseks kasutatakse tavaliselt pöördosmoosi ja destilleerimist.

Pöördosmoos on üks membraanprotsessidest, millega toimub vee puhastamine molekulaarsel tasemel. Kõrge rõhu (keskmiselt 0,4 MPa) toimel toitevesi läbib poolläbilaskva membraani kusjuures membraan hoiab kinni vees sisalduvaid lisandeid ning laseb läbi ainult veemolekule. Sellise puhastamise läbinud vesi (permeaat) on ülipuhas. Poolläbilaskva membraani funktsioone saab täita elektrolüsaatoris juba olemasolev prootonivahetusmembran [45]. Pöördosmoosi korral keskmiselt 50 % toitevee kogusest ei läbi membraani (retentaat), st ühe liitri puhta vee samiseks on vaja vähemalt

kaks liitrit toitevett [46]. Elektrolüsaator vajab keskmiselt üheksa liitrit puhastatud vett selleks, et toota 1 kg vesinikku [47, p. 1]. Järelikult, võttes arvesse veekadusid, 1 kg vesiniku tootmiseks on vaja vähemalt 18 liitrit vett.

Pöördosmoosi protsessi energiatarve sõltub paljudest teguritest, nagu tekitatav rõhk, membraani efektiivsus, permeaadi kulu (mida määrab omakorda elektrolüsaatori võimsus) jne [48]. Pöördosmoosi protsess kulutab u 0,005 kWh energiat ühe liitri puhta vee tootmiseks [48]. Järelikult, on pöördosmoosi energiatarve üheksa liitri puhastatud vee saamiseks (1 kg vesiniku tootmiseks) u 0,045 kWh.

Vee destilleerimise all mõistetakse vee puhastamine selle keetmise teel ning seejärel auru kondenseerimine tagasi vedelasse vormi jahutamise teel. Ühe liitri destilleeritud vee tootmiseks kulub keskmiselt kaks liitrit toitevett. Elektrolüsaator vajab keskmiselt üheksa liitrit destilleeritud vett selleks, et toota 1 kg vesinikku. Järelikult, võttes arvesse destilleerimisprotsessi kadusid, 1 kg vesiniku tootmiseks on vaja 18 liitrit vett. Mis puudutab elektrikulu, siis ühe liitri destilleeritud vee saamiseks on vaja u 0,717 kWh elektrienergiat [47, p. 1]. Järelikult, üheksa liitrit destilleeritud vee saamiseks on vaja u 6,5 kWh elektrienergiat.

5 VESINIKU LADUSTAMISE TEHNOLOOGIAD

Lisaks gaasilise vesiniku tootmisele on selle laialdaseks kasutuseks vaja ka tõhusat ja ohutut ladustamise ja transportimise tehnoloogiat. Vesiniku ladustamine ja transportimine on üsna keeruline tehnoloogiline protsess, mis on tingitud aine füüsikalistest omadustest ja nendest tulenevatest vajalikest tingimustest. Gaasilisel vesinikul atmosfäärirõhul ja temperatuuril 0 °C on väga madal tihedus – 0,09 kg/m³. Järelikult, nõuab gaasiline vesinik ladustamist tavatingimustes palju ruumi. Seetõttu vesinikku atmosfäärirõhul gaasilisel kujul praktiliselt ei ladustata ega transpordita, kuna see on ebaefektiivne. [49]

Vesiniku tihedus sõltub temperatuurist ja rõhust. Kuumutamisel vesiniku tihedus väheneb ja rõhu tõustes suureneb. (Joonis 11) [50]:

↓ t, °C / P, 6ap →	1	10	20	40	60	80	100
0	0,0870	0,8654	1,720	3,398	5,033	6,627	8,181
100	0,0637	0,6342	1,232	2,499	3,712	4,900	6,064
300	0,0415	0,4136	0,824	1,637	2,431	3,229	4,009
500	0,0308	0,3068	0,612	1,219	1,820	2,416	3,007
700	0,0244	0,2439	0,487	0,970	1,450	1,927	2,400
1000	0,0187	0,1865	0,373	0,743	1,111	1,478	1,842

Joonis 11. Gaasilise vesiniku tiheduse sõltuvus (kg/m³) temperatuurist 0 °C kuni 1000 °C ja rõhust 1 kuni 100 baarini [50]

Rõhu tõusmisel 10 baarini suureneb ka vesiniku tihedus temperatuuril 0 °C umbes 10 korda ja on 0,8654 kg/m³. Vesiniku maksimaalne tihedus, mis on 8,181 kg/m³, saavutatakse temperatuuril 0 °C ja rõhul 100 baari. Vesiniku ladustamine gaasilises olekus kõrgel rõhul on lihtne ja odav, kõrgel temperatuuri tõustes väheneb vesiniku tihedus oluliselt. [50]

Vesinikku võib ladustada ka jahutatult, s.t vedelal kujul. Temperatuuril -250 °C muutub vesinik atmosfäärirõhul gaasilisest olekust vedelaks. Vesiniku ladustamise vedelal kujul eelis on see, et ladustamisviis ei nõua kindlat rõhku anuma sees, kuna atmosfäärirõhk on vedelal kujul vesiniku ladustamiseks üsna sobiv, määravaks teguriks on vaid paagi madal temperatuur ja soojusisolatsioon. [51]

5.1 Gaasilise vesiniku ladustamine

Gaasilise vesiniku ladustamine rõhu all on üks lihtsamaid ja kulutõhusamaid meetodeid, kuna see ei nõua täiendavaid energiakulusid. Gaasilise vesinikku on kõige parem ladustada mitmekihiliste seintega ning roostevabast terasest keevitatud anumates, mis peavad taluma kõrget rõhku. Arvutused näitavad, et 1 kg vesinikku võtab standardtingimustes üsna suure mahu, ca 11,2 m³. Kui sama kogus vesinikku ladustatakse vesinikuballoonis rõhul kuni 20 MPa, võtab see juba 0,05 m³ ehk 50 l. Vesinikuballooni valik sõltub rõhust, mida anum peaks taluma, kuna just rõhk mõjutab gaasilise vesiniku tiheduse suurenemist. Vesinikuballoonid mahuga 50 l on kujutatud alloleval joonisel (Joonis 12). [52, pp. 2-3]



Joonis 12. Vesinikuballoonid mahuga 50 l [53]

Tänu vesiniku võimele kiiresti teistesse ainetesse tungida, vesiniku difusioon läbi metalli oluliselt raskendab selle ladustamist metallmahutites. Vesinik kui väga väike aatom on võimeline molekulaarsel tasemel läbistama metalse kristallvõre, mis võib põhjustada vesiniku kadusid selle ladustamiseks kasutatavatest metallmahutitest, ja mahuti seinte mehhaanilist nõrkust. Vesinik võib põhjustada metalli korrosiooni. Metallis vesiniku korrosioon tähendab vesiniku tungimist metallkonstruktsiooni, mis põhjustab metalli hävimist. Korrosiooni tõenäosust saab vähendada, valides korrosioonikindlaid metalle või sulameid: roostevaba teras, titaan, alumiinium või vask. [54]

5.2 Vedela vesiniku ladustamine

Vedelal kujul vesinikku ladustatakse ainult krüogeensetes konteinerites, mis on valmistatud kõrge kvaliteetsest terasest, mis talub madalaid temperatuure ja millel on tõhus soojusisolatsioon. Krüogeenseid konteinereid tuleks eeljahutada vesiniku keemispunkti lähedasele temperatuurile ($-250\text{ }^{\circ}\text{C}$) ning alles siis võib neid täita vedela vesinikuga. Vedela vesiniku energiatihedus liitri kohta on ca 8 MJ. Vedela vesiniku ladustamine nõuab palju energiat, kuna 1 kg vesiniku veeldamiseks kulub 10 – 14 kWh elektrit. Veeldatud vesinik, saavutades keemistemperatuuri, kipub atmosfääri aurustuma, mistõttu seda ei ladustata väikestes kogustes [52, pp. 3-4].

Krüogeensete konteinerite mahud ulatuvad 250 m^3 – ni. Krüogeenne konteiner mahuga 100 m^3 vedela vesiniku ladustamiseks ja transportimiseks on näidatud joonisel (Joonis 13). [55]



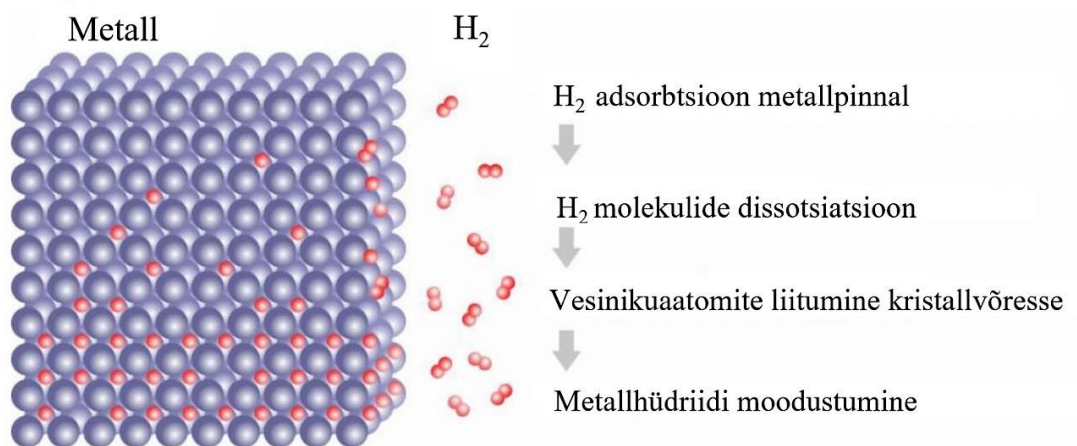
Joonis 13. Krüogeenne mahuti mahuga 100 m^3 vedela vesiniku ladustamiseks ja transportimiseks [55]

5.3 Vesiniku ladustamine metallhüdriidakudes

Peamiselt ladustatakse vesinikku kõrge rõhu all roostevabast terasest balloonides. Ükskõik milline vesiniku reservuaar on, on siiski võimalus, et see plahvatusohtlik gaas lekib või difundeerub molekulaarsel tasemel läbi metalli. Seoses sellega uuritakse alternatiivseid ja ohutumaid vesiniku säilitamise meetodeid.

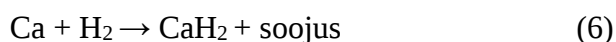
Üheks alternatiivseks viisiks on vesiniku keemiline sidumine metallhüdriidide abil. Gaasiline vesinik on võimeline astuma keemilisse reaktsiooni leelis- ja leelismuldmetallidega, samuti ka teiste metallidega (Mg, Ca, Ti, Ni jne), moodustades tahkeid ühendeid (metallhüdriideid). Gaasilise

vesiniku seondumisega metallhüdriidi moodustamiseks kaasneb soojuste eraldumine (eksotermiline protsess) ning reeglina toimub see ümbritseva õhu temperatuuril ja rõhul ca 40 MPa. Alloleval joonisel (Joonis 14) on skemaatiliselt näidatud metallhüdriidi moodustumise protsess. [56]



Joonis 14. Metallhüdriidi moodustumise protsess [56]

Pärast metalli pinnale adsorptsiooni vesiniku molekul dissotsieerub. Seejärel vesiniku aatomid dissotsieeruvad omakorda prootoniteks ja elektronideks. Elektronid ühinevad metalse kristallvõre elektrongaasiga, ja prootonid difundeeruvad metalli kristallvõresse. Mingil hetkel toimub lokaalne küllastumine, mis viib metallhüdriidi faasi kasvuni. Metallhüdriidi moodustumise protsessi saab kirjeldada järgmiselt [56]:



Dehüdratsioon on pöördprotsess, mille käigus eraldub metallhüdriidist gaasiline vesinik. Protsess nõuab piisava soojuste tarnimist (endotermiline protsess). Kuna metallhüdriidi moodustumise keemilise reaktsiooniga kaasneb soojuste eraldumine, on võimalik akumulierida ja kasutada seda soojust järgneva gaasilise vesiniku vabastamiseks metallhüdriidist. [56]

Metallhüdriidi moodustumine ja sellele järgnev vesiniku vabanemine sellest toimub metallhüdriidakus, mille põhielement on metall, mis moodustab hüdriidi. Vesiniku adsorptsiooni ja metallhüdriidi moodustumise protsessi nimetatakse metallhüdriidaku laadimiseks. Dehüdratsiooni protsessi, mille käigus metallhüdriidist eraldub gaasiline vesinik, nimetatakse metallhüdriidaku mahalaadimiseks. Metallhüdriidakud võimaldavad ohutult säilitada kõrge puhtusastmega vesinikku rõhu all kuni 40 baarini väga suure tihedusega – 150 kg/m³. Kui võrrelda seda meetodit gaasilise vesiniku ladustamisega balloonides rõhu all 700 baari, siis sellistes tingimustes on vesiniku tihedus palju väiksem – 39 kg/m³. [56]

6 VESINIKU KASUTUSALAD

6.1 Vesinik energiakandjana kütuseelemendis

Vesiniku kasutamine kütusena on väga perspektiivne suund. Vesinikkütust kasutatakse vesinik- ja hübriidautodes, rongides, bussides, lennukites ja veetranspordis [57, p. 6]. Vedel vesinik, kombineerituna vedela hapnikuga, on võimeline kosmoseraketi käivitamiseks tootma tohutut energiat [57, p. 6].

Hoolimata asjaolust, et tänapäeval pole seda tehnoloogiat veel laialdaselt arendatud, tutvustas prantsuse leiutaja François Isaac de Rivaz juba 1806. aastal esimest vesinikkütusega mootorit. Leiutaja tootis vesinikku vee elektrolüüsi teel. [57, p. 4]

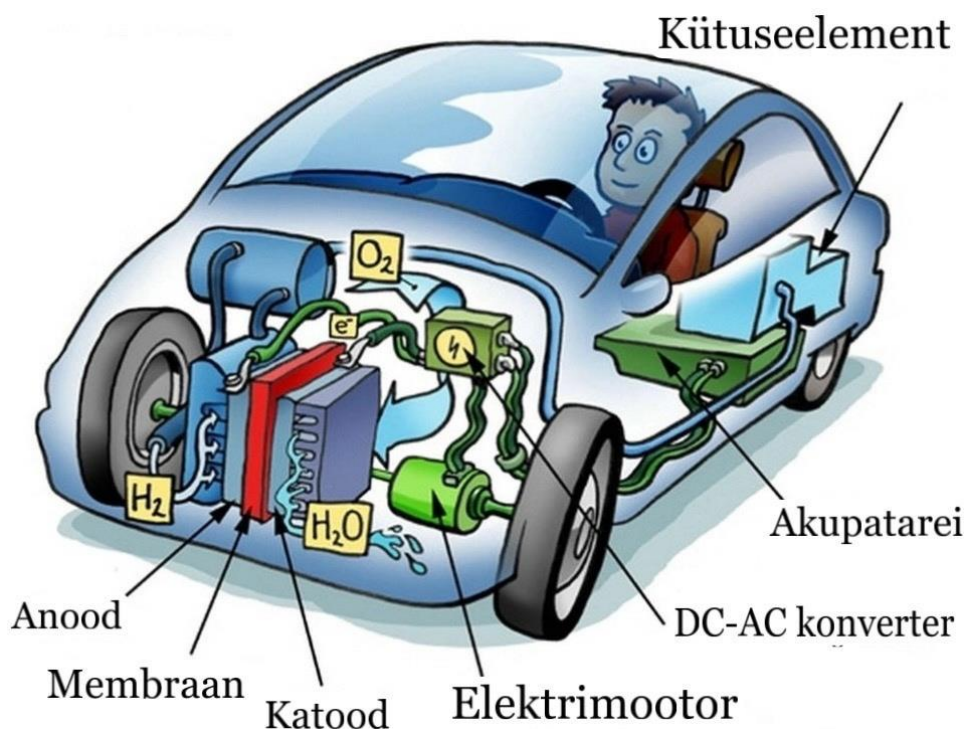
Esimene vesinikmootoriga sõiduauto BMW ilmus 1979. aastal. Esimene vesinikmootoriga seeriamudel ilmus 2014. aastal ning see oli Toyota Mirai (Joonis 15). Tänapäeval sarnased mudelid on saadaval paljudelt suurematelt tootjatelt.: Honda, Hyundai, Audi, BMW, Ford jne. [57, p. 4]



Joonis 15. Toyota Mirai [58]

6.1.1 Vesinikmootori tööpõhimõte

Vesinikmootoriga sõiduautode jaoks peavad olema varustatud spetsiaalsed suruvesinikuga tanklad [57, p. 4]. Vaatleme vesinikmootori tööpõhimõtet Toyota Mirai näitel (Joonis 16). [59]

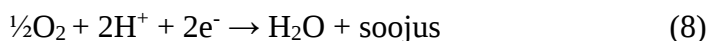


Joonis 16. Toyota Mirai vesinikmootori tööpõhimõte [59]

Kokkusurutud vesinik siseneb kütuseelemendi, kus on membraan, mis eraldab anoodikambri katoodikambri. Vesinik siseneb anoodikambrisse ja hapnik õhulõõrist siseneb katoodikambrisse. Kõik membraani elektrodid on kaetud katalüsaatorikihi (plaatina), mille tulemusena vesinik dissotsieerub selle pinnal anoodikambris aatomiteks, -ja seejärgi vesiniku aatomid – prootoniteks ja elektronideks. [57, p. 4]. Protsessi kirjeldatakse järgmiselt [60]:



Seejärel läbivad prootonid (positiivselt laetud osakesed) membraani [57, p. 4]. Vesiniku molekulidest eraldatud elektronid membraani läbida ei saa, vaid lähevad katoodile läbi elektrimootori, andes selle tööks elektrivoolu. Katoodile jõudnud elektronid, prootonid ja hapnik astuvad keemilisse reaktsiooni, moodustades veeauru (eksotermiline reaktsioon) [60]:



Kütusepaak, mahuga 5 l, täidetakse gaasilise vesinikuga kolme minutiga ning ja sellest piisab umbes 500 km läbimiseks. [57, p. 4]

Vesinikmootori positiivsed küljed [57, p. 7]:

- Keskkonnasõbralikkus, tingimusel et vesinik toodetakse taastuvatest energiaallikatest;

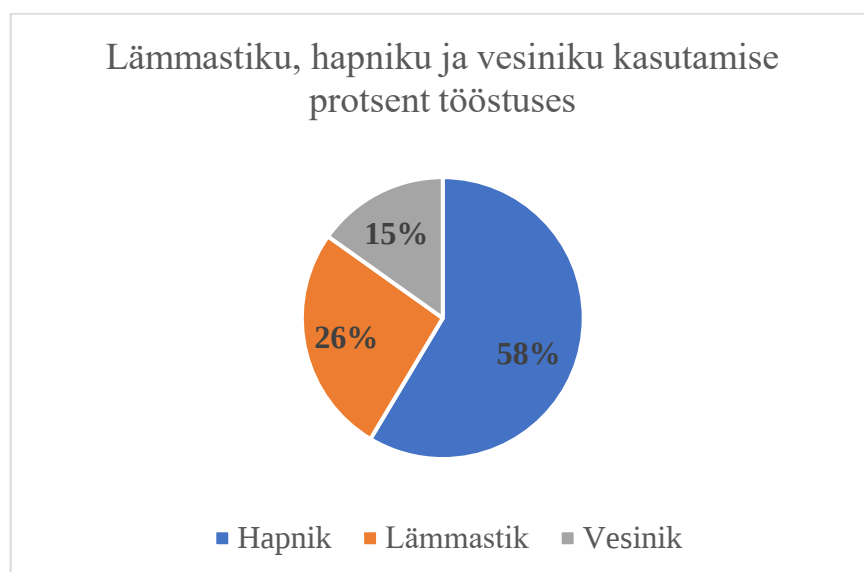
- Kõrge efektiivsus. Vesinikauto suudab 1 kg vesinikuga läbida ca 80 km, bensiinimootoriga auto aga kuni 20 km 1 liitri bensiiniga (sõltuvalt mootori võimsusest);
- Mootori vaikne töö;
- Väga kiire tankimine võrreldes elektriautodega.

Vesinikmootori negatiivsed küljed [57, p. 7]:

- Kõrge hind. Eestis on keskmine bensiini liitri hind 1,7 eurot. Lähim vesiniku tankla asub Lätis, kus 1 kg kokkusurutud vesinikku (toodetud metaani aurureformeerimise teel) ca 16 eurot. Katalüsaatorina kasutatav plaatina on üks kalleimaid metalle maailmas. Lisakulude hulka kuuluvad ka kütusepaagid, mis peavad plahvatuse vältimiseks olema süsinikkiust;
- Infrastruktuuri probleemid. Vesinikutanklate paigaldamine toob kaasa suuri kulutusi;
- Hetkeseisuga vesinik pole just kõige keskkonnasõbralikum kütus. Tänapäeval saadakse 95 % vesinikkütuse fossiilsest toorainest metaani aurureformimise teel, kuna see on odavam kui näiteks elektrolüüsi teel;
- Gaasi isesüttimisoht kõrgel temperatuuridel. Mootorites kasutamiseks surutakse vesinik kokku 850 korda, mille tõttu ulatub gaasirõhk 700 atm (70 MPa).

6.2 Vesinik tööstuses

Kaasaegse tööstuse all mõistetakse tööstusgaaside kasutamine erinevates tööstusharudes ja tootmise erinevates etappides. Vesinik on tööstuses üks enimnõutud gaase, mis on hapniku ja lämmastiku järel kolmandal kohal (Joonis 17). [61]



Joonis 17. Lämmastiku, hapniku ja vesiniku kasutamise protsent tööstuses [61]

Vesinik on vajalik ammoniaagi tootmiseks, mis on omakorda hädavajalik komponent lämmastikväetiste, lõhkeainete, ravimite ja plastide tootmisel. Selle kombineerimine klooriga võimaldab saada vesinikkloriidi ja viimase lahustumisel vees – vesinikkloriidhapet. [62]

Vesiniku abil on võimalik taandada palju metalle nende oksiididest (volfram), kuna vesinikku iseloomustab võime kergesti tungida teistesse ainetesse (difusioon). Samuti, kui vesinik põleb hapnikus, saavutatakse kõrget temperatuuri (keskmiselt 3000 °C), mis võimaldab sulatada ja keevitada ka väga kõrge sulamistemperatuuriga metalle. [62]

Katalüütilise reformimise protsessi käigus moodustunud vesinikku sisaldavat gaasi kasutatakse süsiveenikude hüdrotootluse protsessides. Hüdrotootluse all mõistetakse süsivesinike toorainete töötlemist vesinikuga kõrge temperatuuril ja rõhul, et vähendada lisandite sisaldust aga ka väävli ja lämmastiku sisaldust kütustes. [62]

Tänu kõrgele soojusjuhtivusele kasutatakse vesinikku energiatööstuses võimsate turbogeneraatorite jahutamiseks soojus- ja tuumaelektrijaamades. [61]

Vesinikku võib pidada üheks tõhusaks viisiks liigse elektrienergia salvestamiseks, nt hüdroenergeetikas ja tuuleenergeetikas. Kui elektrit toodetakse parajasti rohkem kui tarbimiseks vaja (nt hüdroelektrijaama töö öösel, või sooja ja tuulise ilmaga suvel), siis elektri hind langeb. Seda nõu üleliigset ja odavat energiat saab kasutada vesiniku kuluefektiivseks tootmiseks elektrolüüsi teel ja ladustamiseks, mis on samuti energiamahukas. Seejärel saab kasutada selliselt toodetud vesiniku energianõudmiste katteks tipptarbimise ajal, või nt tuulevaikse ilma korral. [63]

Vesiniku kasutatakse kordsete sidemete küllastamiseks mitmes tööstusharus. Näiteks toiduainetööstuses kasutatakse vesinikku margariini valmistamisel, mis kujutab endast taimse päritoluga kõvade rasvade segu. Hüdrogeenimisel toimub kaksiksidemete reaktsioon vesinikuga, mille tulemusel kaksiksidemetest saavad üksiksidemed, mis võimaldab muuta vedelad taimeõlid tahkeks rasvade seguks. [62]

7 VESINIKU TOOTMISE VÕIMALUSED EESTIS

Eesti on küllalt suure potentsiaaliga riik vesiniku kasutamisel alternatiivkütusena energeetika- ja transpordisektoris. Riigis aktiivselt arendatakse arengukavasid vesiniku kasutuselevõtu suhtes, luuakse töörühmi, selleks et tõsta ühiskonna teadlikkust vesinikutehnoloogiast, samuti tehakse esmaseid strateegilisi otsuseid.

Eesti asub Euroopa põhjaosas, Läänemere rannikul, mistõttu on ilmad aasta läbi üsna jahedad ning kliima iseloomustavad suhteliselt tugevad, kuid ebapüsivad tuuled ja suur sademete hulk. Tänu sellele pööratakse palju tähelepanu taastuenergia, sealhulgas tuule- ja päikeseenergia arendamisele. Seoses sellega, et Eesti ilmastikutingimused on muutlikud, tuuled ei puhu alati piisava kiirusega, et tuuleenergia oleks usaldusväärne energia tootmise põhiallikana, ja samas päevavalgustundide pikkus ning UV-indeks varieeruvad oluliselt, sõltuvalt aastaajast, mis ei saa tagada päikesepaneelide stabiilse ja piisava aastaringse tootlikkuse. Probleemi lahendusena nähakse ületoodetud energia salvestamine, eesmärgiga kasutada seda aegadel, mil seadmed ei suuda ilmastikuolude tõttu energiat tarbimiseks vajalikus mahus toota. Ületoodetud energiat saab salvestada vesinikuna, mida omakorda on võimalik toota selleks otstarbeks üsna keskkonnasõbralikumal meetodil – vee elektrolüüsil. Selle meetodi vesiniku allikaks on puhas vesi, mis ei sisalda saastavaid lisandeid. Elektrolüüs on üsna energiakulukas protsess, mis nõuab ka spetsiaalseid seadmeid.

Vesiniku tootmiseks on erinevaid meetodeid. Tänapäeval metaani auruga reformimine on kõige levinum ja tõhusam vesiniku tootmismeetod. Metaani allikaks on tavaliselt maagaas. Samas, maagaasi saab kergesti asendada biogaasiga, mida Eestis saab toota üsna tõhusalt. Biogaas tekib orgaanilise materjali biolagundamise teel anaeroobsetes tingimustes, maagaasi aga ammutatakse maa sügavustest. Biogaas koosneb keskmiselt 60 % metaanist ja 40 % süsihappegaasist [26]. Maagaasis on metaani sisaldus suurem – keskmiselt 85 %. Biogaasi puhastamisel eralduva süsihappegaasi suudavad täielikult neelata taimed, kuna tooraine pärineb orgaanilisest materjalist. Biogaasi kasutamine metaani allikana aurureformimisel on kõige keskkonnasõbralikum alternatiiv, mis võimaldab toota puhast ehk rohelist vesinikku.

7.1 Tuuleenergia vesiniku tootmiseks

Tänu sellele, et Eestis on tuuleenergia suur potentsiaal, on võimalik seda kasutada energiaallikana elektrolüsaatori tööks. Elektrolüüdina võib kasutada nii prootonivahetusmembraani kui ka naatrium- või kaaliumhüdrosiidi vesilahust. Membraanelektrolüüsi puhul kasutatakse erinevalt leeliselisest

spetsiaalset prootonivahetusmembraani, mis eraldab katoodikambri anoodikambrist, ning täielikult takistab gaaside segunemist. Järelikult, membraanelektrolüüsi tulemusena on palju kvaliteetsemad vesinik ja hapnik

7.1.1 Energiakulud ja tootmismahud

Elektrolüsaator kulutab 1 kg vesiniku tootmiseks keskmiselt 50 kWh elektrit, kuid samas tuleb arvestada selle energia tootmise kasuteguriga [64]. Kaasaegsete elektrolüsaatorite kasutegur on keskmiselt 75 % [42, p. 15]. Järelikult, on võimalik arvutada 1 kg vesiniku tootmiseks energiakulu:

$$50 \text{ kWh} / 0,75 = 66,7 \text{ kWh}$$

Lisaks on vaja arvestada energiakulu elektrolüsaatori vee puhastamiseks. Veekaod puhastamisel on keskmiselt 50 %, st ühe liitri puhta vee saamiseks on vaja kaks liitrit toitevett [46]. Elektrolüsaator vajab üheksa liitrit puhastatud vett 1 kg vesiniku tootmiseks [47, p. 1]. On teada, et pöördosmoosi energiatarve üheksa liitrit puhta vee saamiseks on 0,045 kWh [48]. Samuti on teada, et destilleerimise energiatarve üheksa liitrit destilleeritud vee saamiseks on 6,5 kWh [47, p. 1].

Vee puhastamise energiakulusid tuleb arvestada. See energia lisatakse 1 kg vesiniku tootmise energiakuludele. Järelikult, on võimalik arvutada energiakulu 1 kg vesiniku tootmiseks, kui elektrolüsaatori vett puhastatakse pöördosmoosi teel:

$$66,7 \text{ kWh} + 0,045 \text{ kWh} = 66,745 \text{ kWh}$$

Samuti on võimalik arvutada energiakulu 1 kg vesiniku tootmiseks, kui vett puhastatakse destilleerimise teel:

$$66,7 \text{ kWh} + 6,5 \text{ kWh} = 73,2 \text{ kWh}$$

Aulepa on Baltimaade võimsam tuulepark Eestis, mis koosneb 16 tuulegeneraatorist. Ühe tuulegeneraatori võimsus on 3MW ja keskmine aastatootlikkus 5 GWh (5 000 000 kWh) elektrienergiat [65]. Eeldatame, et ühe tuulegeneraatori saab kasutada elektrolüüsisüsteemi energiatarbijaks, ja arvutame vesiniku aastatoodangu, kui elektrolüsaatori vett puhastatakse pöördosmoosi teel:

$$(5\,000\,000 \text{ kWh} * 1 \text{ kg}) / 66,745 \text{ kWh} = 74\,912 \text{ kg}$$

Seega, aasta jooksul ühe tuulegeneraatori abil on võimalik toota u 75 tonni vesinikku.

Samuti on võimalik arvutada vesiniku aastatoodangu, kui elektrolüsaatori energiatarbijaks on üks tuulegeneraator ning elektrolüsaatori vett puhastatakse destilleerimise teel:

$$(5\,000\,000\text{ kWh} * 1\text{ kg}) / 73,2\text{ kWh} = 68\,306\text{ kg}$$

Ühe kilogrammi vesiniku kütteväärtus on 33 kWh, st 1 kg toodetud vesinikku sisaldab keskmiselt 33 kWh energiat [64]. Järelikult, on võimalik arvutada 74 912 kg vesiniku energiasisalduse:

$$(74\,912\text{ kg} * 33\text{ kWh}) / 1\text{ kg} = 2\,472\,096\text{ kWh}$$

Samuti on võimalik arvutada 68 306 kg vesiniku energiasisalduse:

$$(68\,306\text{ kg} * 33\text{ kWh}) / 1\text{ kg} = 2\,254\,098\text{ kWh}$$

7.1.2 Järeldus

Vastavalt arvutustele, vesiniku tootmiseks elektrolüüsi teel kulutakse 2 – 2,2 korda rohkem energiat, kui saadud vesinik sisaldab. Käesoleva vesiniku tootmismeetodit iseloomustavad ka suured veekaod. Ülaltoodud vesiniku aastamahtude saamiseks tuleks kulutada ca 600 000 l puhast vett. Arvestades, et veepuhastusprotsesside kaod on ca 50 %, oleks veekulu ca 1 200 000 l vett aastas.

Ülaltoodud tuginedes, on kõige soodsam kasutada vesinikku tuuleenergia kandjana. Tuuleenergiat on kõige tõhusam suunata elektrolüüsi teel vesiniku tootmiseks aegadel, kui energiatootmine kasvab ja elektrivajadus väheneb, nt suvel, kui mugavate ilmastikutingimuste korral pole kütet ega konditsioneerimist vaja, ja ka öösel. Salvestatud elektrienergiat saab kasutada hiljem, kui nõudlus suureneb tipptarbimise ajal, samuti tuulevaikse ilma või taastumatute energiaallikate kõrgema turuhinna korral.

Tuuleparkide tootlikkuse tõstmiseks on võimalik neid rajada avamerele. Avamere tuulepargid annavad pidevat ja stabiilset energiat, kuna tuule kiirus on avamerel suurem kui maismaal ja muutub vähem. Avamere tuuleparkide ehitamine elektri tootmiseks ja seejärel vesinikusnasalvestamiseks nõuab suuri investeeringuid, kuid on paljutõotav suund, mis võib tulevikus puhtale energiale üleminekul suure tähtsusega olla.

7.2 Biometaani auruga reformimine

Eestis ei ole maagaasi varusid, seda saadakse ainult impordi kaudu. Vaatamata sellele, Eestis toodetakse aktiivselt biogaasi, mis puhastatakse ja muudetakse biometaaniks, milles metaani sisaldus on sama, kui maagaasis (96 – 98 %) [66]. Samuti on biogaasi tootmise suurendamiseks mitmeid võimalusi, nt põllumajandus- ja biojäätmete kasutamine, roostikud, jt. Järelikult, biogaas on keskkonnasõbralik alternatiiv maagaasile, mida ei ole vaja importida. Puhastatud biogaasist ehk

biometaanist on võimalik saada puhta vesinikku. Nii biometaani, kui ka sellest toodetavat vesinikku saab kasutada kütusena.

7.2.1 Energiakulud ja tootmismahud

Selleks, et toota 1 kg vesinikku biometaani auruga reformimise teel, on vaja põletada 4 kg biometaani ning põletamise käigus eraldub ca 55,6 kWh energiat [64]. Järelikult, 1 kg biometaani kütteväärtus on ca 13,9 kWh. [64]

Biometaani aurureformimiseks on reagentiks vaja vett. Biometaani aurureformimise üldine reaktsioon kirjeldatakse järgmiselt:



Reaktsioonivõrrand näitab, et ühe mooli metaani jaoks on vaja ühte mooli vett. Metaani molaarmass on 16 g/mol ja vee molaarmass on 18 g/mol [67]. Seega on võimalik arvutada, mitu mooli sisaldub 4 kg metaanis:

$$4000 \text{ g} / 16 \text{ g/mol} = 250 \text{ mol}$$

Kuna ühe mooli metaani jaoks on vaja ühte mooli vett, tuleb kasutada 250 mooli vett. Atmosfäärirõhul ja toatemperatuuril (ca 20 °C) hõivab üks mool vett ca 18 ml mahust [67]. Järelikult, on võimalik arvutada 4 kg biometaani aurureformimiseks vajaliku veekoguse:

$$250 \text{ mol} * 18 \text{ ml/mol} = 4500 \text{ ml} = 4,5 \text{ l}$$

Vee erisoojus 100 °C juures on ca 40,7 kJ/mol ehk 2257,92 kJ/kg. Järelikult, on võimalik arvutada 4,5 l vee aurustamiseks kuluva energia:

$$4,5 \text{ kg} * 2257,92 \text{ kJ/kg} \sim 10160,64 \text{ kJ} = 2,82 \text{ kWh}$$

Energiat, mis kulub 4,5 l vee aurustamiseks, tuleb arvestada. See energia lisatakse 1 kg vesiniku tootmise energiakuludele. Järelikult, on võimalik arvutada energiakulu 1 kg vesiniku tootmiseks:

$$55,6 \text{ kWh} + 2,82 \text{ kWh} = 58,42 \text{ kWh}$$

Aasta 2023 aprillis sai EKT Ecobio biometaani tehas tegevusloa. Biometaani plaanitakse kasutada Tallinna busside kütusena. Tehase võimsus näeb ette 20 000 t biojäätmete töötlemist aastas ja nendest ca 1312 t biometaani tootmist [68]. Lisaks sellele tehasele toodetakse biometaani veel viies tehases Eestis, kuid internetis puudub info biometaani aastatootlikkuse kohta nendes tehastes. Seetõttu võetakse järgnevatiks arvutusteks EKT Ecobio tehase ootuspärane biometaani aastatootlikkus (ca 1312 t).

On teada, et 1 kg biometaani kütteväärtus ca 13,9 kWh. Järelikult, on võimalik arvutada 1312 t biometaani energia sisalduse

$$1\,312\,000\text{ kg} * 13,9\text{ kWh} = 18\,236\,800\text{ kWh}$$

Arvestades energiakulu 1 kg vesiniku tootmiseks (koos energiakuluga vee aurustamiseks), on võimalik arvutada EKT Ecobio tehase vesiniku võimaliku aastatoodangu:

$$(18\,236\,800\text{ kWh} * 1\text{ kg}) / 58,42\text{ kWh} = 312\,167\text{ kg}$$

On teada, et 1 kg toodetud vesiniku kütteväärtus ca 33 kWh [64]. Järelikult, on võimalik arvutada 312 167 kg vesiniku energiasisalduse:

$$312\,167\text{ kg} * 33\text{ kWh} = 10\,301\,511\text{ kWh}$$

7.2.2 Järeldus

Vastavalt arvutustele, biometaani aastane tootmimaht ühes tehases (ca 1 312 000 kg) on ca 4 korda suurem, kui sellest toodetava vesiniku aastane tootmiskaht (ca 312 167 kg). Ülaloodud tuginedes, vesiniku tootmiseks biometaani aurureformimise teel kulutakse ca 1,8 korda rohkem energiat, kui saadud vesinik sisaldab.

Vesiniku tootmine biometaanist muutuks tulusamaks, pidades silmas kasvavat nõudlust keskkonnasõbraliku vesiniku kui kütuseallika järele. Tarbijanõudlus aitab kaasa seadmete ja elektrienergia tootmiskulude katmisele. Infrastruktuuri arendamine (nt vesiniku tanklate rajamine) toob kaasa gaasilise vesiniku laialdast kasutamist transpordisektoris. Tootmistehnoloogia optimeerimine aitaks vähendada energiakulusid ja suurendada vesiniku tootmiskahtu: see hõlmaks protsessi mõjutavate tegurite, sh tooraine, seadmete, tehnoloogiliste režiimide ja muude tegurite detailne uurimine. Vesinikuenergia sektori arenguga muutub vesiniku puhtus kütuseelementidega töötamisel eriti oluliseks. Lisandite sisaldus vesinikus ei mõjuta negatiivselt mitte ainult keskkonda, vaid võib kahjustada ka seadmeid.

7.3 Vesiniku ladustamine

Gaasiline vesinik atmosfäärirõhul ja temperatuuril 0 °C on väga väikese tihedusega - 0,09 kg/m³ [49]. Vesiniku säilitamine sellistes tingimustes on ebaefektiivne, seega eristatakse ladustamistehnoloogiates gaasilise vesiniku säilitamist roostevabast terasest balloonides kõrgel rõhul (kuni 700 baari) ja keemiliselt seotud olekus [56]. Mõlemad ladustamisviisid suurendavad vesiniku tihedust.

Üks meetodeid gaasilise vesiniku säilitamiseks keemiliselt seotud olekus on selle ladustamine metallhüdriidakudes. Vesinik on võimeline moodustama metallihüdriide paljude leelis- ja leelismuldmetallidega. Kõige tõhusam on MgH_2 metallhüdriidaku, mis on võimeline tagama suurima vesiniku tiheduse – ca 150 kg/m^3 .

Allolevas tabelis (Tabel 1) on toodud roostevabast terasest balloonis ja MgH_2 metallhüdriidakus gaasilise vesiniku ladustamise võrdlusomadused. Ballooni täitumine gaasilise vesinikuga ja metallhüdriidi moodustumine toimub ümbritseva õhu temperatuuril. Balloonis ladustamiseks on vaja tagada u 700 baari rõhku ning sellistes tingimustes gaasilise vesiniku tihedus oleks ca 39 kg/m^3 . Metallhüdriidaku moodustumiseks tuleb tagada u 400 baari rõhku ning sellistes tingimustes gaasilise vesiniku tihedus oleks ca 150 kg/m^3 . Ballooni täitmiseks gaasilise vesinikuga kulub vaid 3 – 5 minutit. Metallhüdriidi moodustumise protsess toimub ümbritseva õhu temperatuuril ja rõhul 400 baari kestab ca 24 tundi. Protsessi saab oluliselt kiirendada temperatuuri tõstmisega. Gaasiline vesinik eraldub balloonest peaaegu koheselt ümbritseva õhu temperatuuril. Vesiniku eraldumine metallhüdriidakust (dehüdratsioon) toimub temperatuuril 300°C ja atmosfäärirõhul ning võtab rohkem aega – ca 10 – 15 minutit. Vesiniku vabanemisega metallhüdriidakust kaasneb soojuse eraldumine, mida saab omakorda koguda ja kasutada järgneva dehüdratsiooniks [56]. Gaasilise vesiniku lekkeoht balloonest on hinnanguliselt keskmine, kuna ladustamisviis nõuab kõrget rõhku. Gaasilise vesiniku lekkeoht metallhüdriidakust on hinnanguliselt madal, kuna see ladustamisviis nõuab suhteliselt madalat rõhku ja vesinik on keemiliselt seotud. Tuleb märkida, et iga vesinikuhooldla võib lekkida mehaaniliste kahjustuste, ebaõige kasutamise või ohutuseeskirjade mittejärgimise tõttu. Vesinikuballooni kasutusega on hinnanguliselt pikk, tänu vastupidavale materjalile, millest on see valmistatud. Metallhüdriidaku kasutusega on piiratud, kuna selle omadused kaovad aja jooksul: metallisulamid võivad regulaarsel kokkupuutel vesinikuga korrodeeruda, katalüsaator muutub aegamööda kasutuskõlbmatuks. [69, pp. 7-25]

Tabel 1. Roostevabast terasest balloonis ja MgH_2 metallhüdriidakus gaasilise vesiniku ladustamise võrdlusomadused

Ladustamise tingimused	Ladustamisviis	
	Roostevabast terasest balloon	Metallhüdriidaku MgH_2
H_2 säilitustemperatuur, $^\circ\text{C}$	Ümbritseva õhu temperatuur	Ümbritseva õhu temperatuur
H_2 säilitusrõhk, baar	700	400
H_2 -ga täitmine, min	3 – 5	1440 (24 tundi)
H_2 tihedus, kg/m^3	39	150

Ladustamise tingimused	Ladustamisviis	
	Roostevabast terasest balloon	Metallhüdriidaku MgH_2
H ₂ vabastamise temperatuur, °C	Ümbritseva õhu temperatuur	300
H ₂ vabastamise rõhk, baar	700	1
H ₂ vabanemine, min	Kohe	10 – 15
Lekkeoht	Keskmine	Madal
Kasutusiga kestvus	Pikk	Keskmine

7.3.1 Järeldus

Ülaltoodud tuginedes, võib järeldada, et gaasilist vesinikku on kõige parem ladustada balloonis, näiteks auto pardal. Vesinikuballooni täitmine gaasilise vesinikuga toimub üsna kiiresti. Vesiniku vabanemine toimub ilma kõrgete temperatuuride vajaduseta. Hoolimata asjaolust, et gaasilise vesiniku ladustamistihedus balloonis on suhteliselt madalam, võtab auto pardal asuv vesinikuballoon vähem ruumi. Reeglina kasutatakse autodes 5-liitriseid vesinikuballoone, millest piisab kuni 500 km läbimiseks. Metallhüdriidaku aga vajab suure tõhususe ja mahutavuse saavutamiseks palju materjali (metalli või metallisulamit). Järelikult, on metallhüdriidaku võrreldes vesinikuballooniga materjalimahukam, mis võib oluliselt raskendada metallhüdriidaku ladustamist sõiduki pardal. Gaasiline vesinikku ladustatakse balloonis väga kõrge rõhu all. Vesinikuballoon ei ole varustatud ohutussüsteemidega, mis reguleerivad automaatselt rõhu anuma sees, nii et maksimaalse lubatud rõhu ületamisel võib balloon kahjustuda ja lekkida.

Metallhüdriidakudel on suur energiatihedus ja need suudavad väikeses mahus salvestada märkimisväärse koguse energiat vesinikuna, muutes need atraktiivseks võimaluseks tuuleenergia salvestamiseks. Tuuleenergia salvestamise jaoks ei ole metallhüdriidi moodustumise kiirus nii oluline kui metallhüdriidi moodustumise kiirus autos. Metallhüdriidi faasi kasv on suhteliselt aeglane. Metallhüdriidis olev vesinik on vähem lekkimisohtlik, kuna seda ladustatakse keemiliselt seotud kujul ja vesinikuballooniga võrreldes madalamal rõhul. Metallhüdriidakud on tavaliselt varustatud ohutusmehhanismidega, mis reguleerivad automaatselt rõhku paagi sees, vältides gaasi leket või liigset rõhu suurenemist.

7.4 Vesiniku maksumus

Allolevas tabelis (Tabel 2) on toodud 1 kg vesiniku hinnad 2023. aasta seisuga ja selle hinnamuutus pikemas perspektiivis aastaks 2030, olenevalt tootmisviisist. [70]

Tabel 2. 1 kg vesiniku hinnad 2023. aasta seisuga ja selle hinnamuutus pikemas perspektiivis aastaks 2030, olenevalt tootmisviisist [70]

	2023				2030	
Vesiniku tootmise tehnoloogia	Fossiilne	CCS/U	Roheline maailmas	Roheline Eestis (teoreetiline)	Roheline maailmas	Roheline Eestis
1 kg hind	1 €	5–8 €	4–8 €	4,5–5,5 €	1,2–4,1 €	3,4–4,2 €

Tabeli (Tabel 2) põhjal saab tuvastada mitu tegurit, mis mõjutavad vesiniku hinda:

- Tootmisviis. Puhta vesiniku hind on palju kõrgem kui fossiilse vesiniku hind. Rohelist vesinikku toodetakse vee elektrolüüsil, kasutades rohelisi energiaallikaid. Vee elektrolüüsi töötamiseks nõutakse spetsiaalseid seadmeid (nt kallis prootonivahetusmembraan), puhast vett ja taastuvenergiat, millega kaasnevad nii energiakulud kui ka veekaod. Sinist vesiniku toodetakse peamiselt kivisöe gaasistamisel, kuna tootmisprotsessi käigus toimub CO₂ sidumine ja säilitamine (*ingl. k. Carbene Capture and Storage e CCS*), selle kõrvaldamiseks tootmisprotsessist. Sidumise protsessiks nõutakse täiendavat infrastruktuuri, ning absorbente (nt leeliselist) [71]. Seejärel transporditakse CO₂ maa-alustesse geoloogilistesse formatsioonidesse ja ladustatakse seal [71]. Järelikult, CO₂ sidumise ja säilitamisega kaasnevad nii energia- kui ka finantskulud;
- Allikate kättesaadavus ja hind. Näiteks, kui vesinikku toodetakse metaanist, mis pärineb biogaasist, ning biogaas muutub mingil põhjusel vähem kättesaadavaks või selle hind tõuseb, siis mõjutab see ka vesiniku hinda ja kättesaadavust;
- Transportimise ja ladustamise energia- ja finantskulud. Nii vesiniku kokkusurumine kui ka veeldamine nõuavad täiendavaid energiakulusid. Transportimisega kaasnevad ka finantskulud.

Tänapäeval peetakse vesinikku teiste energiaallikatega võrreldes üsna kalliks kütuseks. Vesiniku tootmistehnoloogiate arendamise ning nende kasuteguri suurendamise, samuti tootmismahu suurendamisega kaasneb vesiniku hinna langust 2030. aastaks. Oluliseks teguriks on ka nõudluse

kasv vesiniku järele ja selle kasutamine erinevates tööstusharudes nagu elektritootmine, autotööstus jm.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli vesiniku tootmismeetodite uurimine ja selle alusel kõige efektiivsemate võimaluste väljatoomine edaspidiseks rakendamiseks Eesti energiasektoris. Lõputöö kirjutamise käigus anti ülevaade Eesti energiastrateegiast, sh erinevatest riiklikest arengukavadest, mis on suunatud kliimanetraalsuse saavutamiseks, samuti vesinikualaste strateegilistest otsustest. Lõputöös pöörati suurt tähelepanu vesinikule kui potentsiaalsele energiaallikale. Põhjalikult uuriti vesiniku levinumaid tootmismeetodeid, ladustamistehnoloogiaid ning selle kasutamist transpordi-, energeetika- ja tööstussektoris. Viimases, seitsmendas peatükis käsitleti vastavalt lõputöö eesmärgile vesiniku tootmise võimalusi Eestis, sh tehti energiakulu arvutusi gaasilise vesiniku tootmiseks elektrolüüsil ja biometaani auruga reformimisel, tehti gaasilise vesiniku potentsiaalsete tootmismahutuste arvutusi, võrreldi kaks peamist gaasilise vesiniku ladustamisviisi, samuti uuriti gaasilise vesiniku hinnakujundust ning sellele mõjutavaid tegureid.

Eestis on suur potentsiaal vesiniku tootmiseks vee elektrolüüsi teel. Riigis aktiivselt arendatakse tuuleenergeetikat ning selle kasutamine elektrolüüsisüsteemi tööks on atraktiivne, kuna võimaldab saada kõige keskkonnasõbralikumal vesinikuvormi. Päikeseenergia võib ka olla energiaallikaks elektrolüsaatori tööks, kuid Eesti suhteliselt lühikeste päevavalgustundide ja tuulegeneraatoritega võrreldes madala efektiivsuse tõttu ei tagaks päikesepaneelid piisavat energiatootlikkust elektrolüüsi tööks, et toota suurtes kogustes vesinikku.

Vastavalt arvutustele, vesiniku tootmisel elektrolüüsi teel toimuvad vältimatud nii energia- kui ka materjalikaod. Elektrolüüsiks minevat vett tuleb eelnevalt puhastada ning puhastusprotsesside kaod on u 50 %. Vesiniku elektrolüütiliseks tootmiseks vajalik energiakulu on kaks korda rohkem, kui toodetava vesiniku kütteväärtus (33 kWh/kg). Samas, tuuleenergiat on otstarbekas suunata vesiniku tootmiseks elektrolüüsi teel just aegadel, kui energiatootmine on suur ja samas elektrivajadus on väike, nt suvel, kui mugavate ilmastikutingimuste korral pole kütet ega konditsioneerimist vaja, ja ka öösel. Vesiniku kujul salvestatud energiat saab kasutada siis, kui nõudlus elektrienergia järele suureneb tipptarbimise ajal, samuti tuulevaikse ilma või taastumatute energiaallikate kõrgema turuhinna korral. Avamere tuuleparkide rajamine muudaks tuulikuid veelgi tootlikumaks ja lubaks suurendada vesiniku tootmist, kuna avamere tuulekiirused on suuremad ja mutuvad vähem, samuti puuduvad takistused nagu kõrgustikud või kõrged hooned.

Kõige levinum vesiniku tootmismeetod on metaani auruga reformimine. Metaani allikana kasutatakse tavaliselt maagaasi, mis on Eestis kättesaadav vaid impordi kaudu. Imporditud toorainest sõltumatuse

eesmärgil, metaani allikaks saab olla Eestis toodetud biogaas. Biogaasist eralduva süsihappegaasi suudavad täielikult neelata taimed, kuna seda toodetakse orgaanilisest materjalist. Puhastatud biogaasis ehk biometaanis on metaani sisaldus sama, kui maagaasis (96 – 98 %). Biometaanist pärinev vesinik on kõrge puhtusastmega, mida saab kasutada keskkonnasõbraliku transpordikütusena. EKT Ecobio biometaani tehase prognooseeritud biometaani aastamaht (1312 t) suunamisel vesiniku tootmiseks metaani aurureformimisel saab toota u 312 t vesiniku aastas. Käesoleva tehnoloogia kasutuselevõtuga Eestis sõltuks vesiniku tootmiskaht tarbijanõudlusest. Tulevikus kasvav tarbijanõudlus keskkonnasõbraliku vesiniku järele ja tootmisprotsessi optimeerimine suudaksid tervikuna katta nii elektrienergia kui ka vajalike paigaldiste ja infrastruktuuri (vesiniku tanklate) rajamise kulusid.

Vesinikku saab ladustada gaasilisel ja veeldatud kujul, samuti keemiliselt seotud olekus. Vesinikku ladustatakse veeldatud kujul üsna harva, kuna selle vedeldamiseks tuleb tagada temperatuuri $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$, ning 1 kg gaasilise vesiniku vedeldamiseks kulub u 12 kWh elektrienergiat, millega võib kaasneda vesiniku hinnatõus. Vesiniku ladustamine gaasilises olekus on energiasäästlikum, kuna selleks nõutakse ainult teatud rõhku anumas, mis suudab vesiniku tihedust suurendada. Rõhul 700 baari on gaasilise vesiniku tihedus u 39 kg/m^3 . Keemiliselt seotud olekus – metallhüdriidakus MgH_2 – on vesiniku tihedus u 150 kg/m^3 . Gaasilise vesiniku ladustamine rõhu all roostevabast terasest balloonis on kõige tõhusam auto pardal, kuna vesinikuballoon ei võta palju ruumi (5-liitriteline), täitub vesinikuga 3-5 minuti jooksul ning vajadusel vabaneb balloonest koheselt. Metallhüdriidaku MgH_2 omab suurt energiatihedust ning on atraktiivne võimalus tuuleenergia vesinikuna salvestamiseks. Vesiniku vabastamine toimub temperatuuril $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja kestab u 10 – 15 minutit. Metallhüdriidaku, erinevalt vesinikuballoonist, on varustatud ohutusmehhanismidega, mis reguleerivad rõhku paagi sees, vältides leket ning vähendades seeläbi plahvatusohtu.

Vastavalt arengudokumendile „Eesti vesiniku teekaart“, aasta 2023 seisuga keskkonnasõbraliku gaasilise vesiniku hind maailmaturul varieerub 4 – 8 eurot/kg, ning teoreetiline hind Eesti turul hetkeseisuga võiks olla vahemikus 4,5 – 5,5 eurot/kg. Kuna Eestis ei ole veel vesiniku tootmistehnoloogiad arendatud, eeldatakse nende kasutuselevõttu aastaks 2030 ning keskkonnasõbraliku vesiniku hinnalangust kuni 3,4 – 4,2 eurot/kg. Fossiilse vesiniku hind on küll madalam, hetkeseisuga selle hind maailmaturul on u 1 eurot/kg, kuid süsinikuneutraalsuse poole püüdlemiseks on kõige parem kaaluda keskkonnasõbralikke vesiniku tootmismeetodeid. Keskkonnasõbraliku vesiniku tootmise tehnoloogiad nõuavad arengu algtasemel suuri investeeringuid. Tarbijanõudluse kasv tulevikus aitaks katta seadmete paigaldamise kulusid. Samuti

toimuks aja jooksul tehnoloogiliste protsesside optimeerimine, seadmete efektiivsuse tõus, mis suurendaks toodetava vesiniku mahtu ning selle hind muutuks taskukohaseks.

SUMMARY

The purpose of the thesis *Possibilities of hydrogen production for future implementation in the Estonian energy sector* was to study hydrogen production methods and, based on this, identify the most effective ways for its future implementation in the Estonian energy sector. The thesis provided an overview of the Estonian energy strategy, including various national development plans aimed at achieving climate neutrality, as well as strategic decisions regarding hydrogen. In this work much attention is paid to hydrogen as a potential source of energy. The most common methods of hydrogen production, storage technologies and its use in transport, energy and industrial sectors have been studied in detail. In the last, seventh chapter, according to the purpose of the thesis, the possibilities of hydrogen production in Estonia were considered, including calculations of energy costs for the production of hydrogen gas by electrolysis and steam reforming of biomethane, calculations of the potential annual volume of hydrogen gas, a comparison was made of two main methods of storing hydrogen gas, as well as the pricing of hydrogen gas and the factors affecting it.

Estonia has a great potential for hydrogen production through water electrolysis. Wind energy is actively developing in the country, and its use for the operation of the electrolysis system is attractive, as it allows you to get the most environmentally friendly form of hydrogen. Solar power can also be a source of power to run an electrolyzer, but due to the country's relatively short daylight hours and low efficiency compared to wind turbines, solar panels cannot provide enough power output for the electrolysis process to produce large amounts of hydrogen.

According to calculations, both energy and material losses are inevitable in the production of hydrogen by electrolysis. Water for electrolysis must be pre-purified, and the losses during the purification process are about 50 %. The energy consumption required for the electrolytic production of hydrogen is twice the calorific value of the produced hydrogen (33 kWh/kg). At the same time, it is advisable to direct wind energy to produce hydrogen by electrolysis precisely during periods when energy production is high and at the same time the need for electricity is low, for example, in summer, when there is no need for heating or air conditioning, under favorable weather conditions, and also at night. Energy which is stored in the form of hydrogen can be used when demand for electricity increases during peak demand, as well as during periods of calm weather or rising market prices for non-renewable energy sources. Building offshore wind farms will make wind turbines even more productive and allow more hydrogen production because offshore wind speeds are higher and less variable and there are no obstructions such as hills or tall buildings.

The most common method for producing hydrogen is the steam reforming of methane. The source of methane is usually natural gas, which is only available in Estonia through imports. In order to be independent of imported raw materials, Estonia produces biogas as a source of methane. The carbon dioxide that we get from biogas can be completely taken up by plants because it is produced from organic material. The content of methane in purified biogas, or biomethane, is the same as in natural gas (96 – 98 %). Hydrogen from biomethane has a high degree of purity, which allows it to be used as an environmentally friendly transport fuel. By diverting the predicted annual volume of biomethane (1312 tons) from the EKT Ecobio biomethane plant to hydrogen production using a method such as steam reforming of methane, it is possible to produce about 312 tons of hydrogen per year. With the introduction of this technology in Estonia, the volume of hydrogen production will depend on consumer demand. In the future, the growing consumer demand for environmentally friendly hydrogen and the optimization of the production process can fully cover the costs of both electricity and the necessary installations and infrastructure (hydrogen filling stations).

Hydrogen can be stored in gaseous and liquid form, as well as in a chemically bound state. Hydrogen is rarely stored in a liquefied form, since a temperature of $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ must be provided for its liquefaction, and approximately 12 kWh of electricity is required to liquefy 1 kg of hydrogen gas, which can lead to an increase in the cost of hydrogen. Storing hydrogen in gaseous form is more energy efficient as it only requires a certain pressure in the vessel, which can increase the hydrogen density. At a pressure of 700 bar, the density of hydrogen gas is approximately 39 kg/m^3 . In the chemically bound state, metal hydride MgH_2 , the density of hydrogen is about 150 kg/m^3 . Storage of hydrogen gas under pressure in a stainless-steel cylinder is the most effective on a board of a car, since a hydrogen cylinder does not take up much space (5 liters), can be filled with hydrogen in 3 – 5 minutes and, if necessary, is released immediately from the cylinder. The MgH_2 metal hydride battery has a high energy density and is an attractive option for storing wind energy in the form of hydrogen. Hydrogen evolution occurs at a temperature of $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ and lasts approximately 10 – 15 minutes. A metal hydride battery, unlike a hydrogen tank, is equipped with safety mechanisms that regulate the pressure inside the tank, preventing leakage and thereby reducing the risk of explosion.

According to the state “Estonian Hydrogen Roadmap” (2023), the price of environmentally friendly gaseous hydrogen on the world market ranges from 4 to 8 euro/kg, while the theoretical price on the Estonian market at the moment it could be from 4.5 to 5, 5 euro/kg. Since hydrogen production technologies have not been developed in Estonia yet, they are expected to be introduced by 2030, and the price of environmentally friendly hydrogen will drop to 3.4 – 4.2 euro/kg. Although the price of

fossil hydrogen is comparatively lower on the world market (about 1 euro/kg), the best way to achieve carbon neutrality is to consider environmentally friendly methods of hydrogen production. Environmentally friendly technologies for the production of hydrogen require large investments at the initial stage of their development. The future growth in consumer demand will help cover the cost of installing the equipment. Also, over time, technological processes will be optimized, equipment efficiency will increase, which will increase the volume of hydrogen produced, and its price will become affordable.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] United Nations, „Adoption on the Paris Agreement,“ Paris, 2015.
- [2] G. Kaleis, *Vesinik kui energiakandja. Kütuseelemendid*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2021, p. 9.
- [3] V. Petrov ja J. Sinjak, „Прогнозные оценки стоимости водорода в условиях его централизованного производства,“ *Отраслевые и межотраслевые комплексы*, p. 1, 2008.
- [4] M. Dusalimov, S. Valiullina, I. Gundorova ja V. Aleksejev, „Основные проблемы транспорта и хранения водорода,“ *Neftegaz*, p. 4, 30. august, 2022.
- [5] Европейская комиссия, „Европейский зеленый курс,“ 2019. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 11. jaanuar, 2023].
- [6] Meditsiiniuudised, „WHO: miljardid inimesed hingavad ebatervislikku õhku,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mu.ee/uudised/2022/04/07/who-miljardid-inimesed-hingavad-ebatervislikku-ohku>. [Kasutatud 15. jaanuar, 2023].
- [7] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Riiklik energia- ja kliimakava,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mkm.ee/energeetika-ja-maavarad/energiamaajandus/energia-ja-kliimakava>. [Kasutatud 22 jaanuar, 2023].
- [8] Keskkonnaministeerium, „Kliimapoliitika põhialused aastani 2050,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://envir.ee/kliimapoliitika-pohialused-aastani-2050>. [Kasutatud 22. jaanuar, 2023].
- [9] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Energiamajanduse arengukava aastani 2030,“ 2017. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 23. jaanuar, 2023].
- [10] Keskkonnaministeerium, „Kliimamuutustega kohanemise arengukava,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://envir.ee/kliimamuutustega-kohanemise-arengukava>. [Kasutatud 23. jaanuar, 2023].
- [11] Elering AS, Taastuvenergeetika: elektrituru käsiraamat, Tallinn: Elering AS, 2012, p. 90.
- [12] Edu-Arctic, „Non-renewable energy,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://polarpedia.eu/en/non-renewable-energy/>. [Kasutatud 24 jaanuar, 2023].
- [13] Jääaja Keskus, „Energiaallikad,“ 2020. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 27. jaanuar, 2023].

- [14] A. Timofejev, „Солнечная энергетика в Эстонии,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://evas.ee/ru/news/solnechnaya-energetika-v-estonii>. [Kasutatud 28. jaanuar, 2023].
- [15] Eesti Energia, „Numbrid näitavad: Millised on Eesti suurimad päikesepargid?,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://rohe.geenius.ee/blogi/eesti-energia-blogi/numbrid-naitavad-millised-on-eesti-suurimad-paikesepargid/>. [Kasutatud 28. jaanuar, 2023].
- [16] M.-A. Kautsi, „Puust ja punaseks: Mis mõjutab päikesest elektri tootmist ja millal on parim aeg päikesejaama rajamiseks?,“ *Kodugenius*, p. 2, 29. aprill, 2020.
- [17] S. Velling ja T. Vaasma, „Energiaallikas päikeseenergia,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Available: https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/28239/eelised_ja_puudused.html. [Kasutatud 30. jaanuar, 2023].
- [18] Enefit Green, „Tuuleenergia,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://enefitgreen.ee/tuuleenergia/tootmine>. [Kasutatud 30. jaanuar, 2023].
- [19] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Tuuleenergia ressurs,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: https://energiatalgud.ee/Tuuleenergia_ressurss. [Kasutatud 30. jaanuar, 2023].
- [20] Statistikaamet, „ELEKTRIENERGIA TOOTMINE, IMPORT, EKSPORT JA MÜÜK (KUUD),“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus__energeetika__energia-tarbimine-ja-tootmine__luhiajastatistika/KE21/table/tableViewLayout2. [Kasutatud 30. jaanuar, 2023].
- [21] Gigavat, „Энергетическое использование биомассы,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.gigavat.com/netradicionnaya_energetika_biomassa_1.php. [Kasutatud 31. jaanuar, 2023].
- [22] J. JALVI, „Biomass – millised on võimalused Eestis?,“ 2021. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 2. veebruar, 2023].
- [23] European Environment Agency, „Ülemaailmsed mõjud – toiduainete hinnad ja maakasutuse muutumine,“ *Kui bioenergia kasvab buumiks – Üleminek naftalt bioenergiale ei ole riskideta*, p. 3, 2009.
- [24] Enefit Green, „Электричество и тепло из мусора,“ 2022. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 2. veebruar 2023].
- [25] Port of tallinn, „Hydrogen strategy,“ 2021. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 5. veebruar, 2023].

- [26] CIVITTA, „Analysis of the hydrogen resources usage in Estonia,“ 2021. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 7. veebruar, 2023].
- [27] Stockholm Keskkonnainstituudi Tallinna Keskus, „Eesti vesiniku teekaardi 2021 – 2050 ettepanek,“ 2021. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 7. veebruar, 2023].
- [28] G. Plijev, *В Эстонии планируют создать первую общенациональную "Водородную долину"*, Jekaterinburg: Energyland.info, 2022.
- [29] „Hydrogen Valley Estonia,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://vesinikuorg.ee>. [Kasutatud 8. veebruar, 2023].
- [30] Auve Tech, „The first autonomous fuel cell shuttle is Estonian (by Auve Tech),“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sustainable-bus.com/its/auve-tech-autonomous-hydrogen-shuttle-estonia/>. [Kasutatud 8 veebruar, 2023].
- [31] „Vesiniku isotoobid,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://et.wikipedia.org/wiki/Vesiniku_isotoobid. [Kasutatud 8. veebruar, 2023].
- [32] R. Radchenko, A. Mokrushin ja V. Tyulpa, Водород в энергетике, Jekaterinburg: Uraali Föderaalne Ülikool, 2014, p. 229.
- [33] J. Aniskov, „Парниковый эффект: для чего он нужен и как влияет на изменение климата,“ *РБК Тренды*, p. 4, 6. juuni, 2021.
- [34] „Hydrogen production,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_production. [Kasutatud 12. veebruar, 2023].
- [35] H. Agabus, J. Suvalova, H. Koduvere, A. Siirde ja E. Latõsov, „Vesiniku ja sünteetilise gaasi kasutamise potentsiaal ja üheditest tulenev mõju ülekandetorustikele ja lõpptarbijate seadmetele,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2020.
- [36] A. Rem, *Vesiniku tootmise, hoiustamise ja kasutamise modellerimine energypro tarkvara abil*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2022.
- [37] Demaco, „From steam methane reforming to green hydrogen,“ 2021. [Võrgumaterjal]. Available: <https://demaco-cryogenics.com/blog/steam-methane-reforming-to-green-hydrogen/>. [Kasutatud 21. veebruar, 2023].
- [38] „Классификация водорода по цвету,“ *Neftegaz*, p. 1, 24. märts, 2021.
- [39] Минскэнерго, „Биогаз - универсальный возобновляемый источник энергии,“ 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://web.minskenergo.by/news/novosti-predpriyatiya/biogaz-universalnyj-vozobnovlyaemyj-istochnik-energii/>. [Kasutatud 3. märts, 2023].

- [40] „Установка каталитического риформинга“, *PRONPZ*, pp. 3-6, 2019.
- [41] „Каталитический риформинг“, *Neftegaz*, pp. 5-9, 26. jaanuar, 2013.
- [42] O. Kulik ja L. Chernyshev, „Основные направления развития водородной энергетики (Обзор)“, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, Kiev, 2004.
- [43] „Зелёный, синий и серый водород — действительно ли это имеет значение?“, *THE EPOCH TIMES*, p. 2, 6. oktoober, 2022.
- [44] G. Hollingshead, M. Icard ja V. Nadonenko, „Щелочной электролиз в противовес электролизу с использованием ионно-обменных мембран“, 2011. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 28. märts, 2023].
- [45] Гейзер, „Обратный осмос: вред и польза“, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://geizer.com/facts/poleznaya-informaciya/obratnii-osmos/#:~:text=Обратный%20осмос%20представляет%20собой%20очистку,вода%20получается%20очень%20высокого%20качества.> [Kasutatud 25. märts, 2023].
- [46] K. Albner, *Membranprotsesside kasutamine veetehnoloogias*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2021, p. 66.
- [47] „Проблема зеленого водорода, о которой никто не говорит“, *РусКабель*, pp. 1-2, 10. detsember, 2020.
- [48] I. Nikolenko, J. Kotovskaya ja I. Korol, „Пути повышения энергетической эффективности при опреснении морской воды по технологии обратного осмоса“, *Cyberleninka*, p. 2, 2017.
- [49] Demaco, „The energy density of hydrogen: a unique property“, 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://demaco-cryogenics.com/blog/energy-density-of-hydrogen/>. [Kasutatud 29. märts, 2023].
- [50] „Теплопроводность, плотность и теплофизические свойства водорода H₂“, *Thermalinfo.ru*, p. 1.
- [51] Toshiba, „Как собирать, хранить и поставлять водород“, *Хабр*, p. 5, 2021.
- [52] „Методы хранения водородного топлива“, *Neftegaz*, pp. 2-4, 20. september, 2021.
- [53] Sinoma Science & Technology, *SINOMA ISO 9809 GAS CYLINDER*, Jiangxi: Alibaba.

- [54] „Водород,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4>. [Kasutatud 30. märts, 2023].
- [55] Криогенмаш, „Водородное оборудование,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://cryogenmash.ru/catalog/vodorodnoe-oborudovanie/>. [Kasutatud 31. märts, 2023].
- [56] Сигм плюс инжиниринг, „Технология хранения водорода в металлогидридных накопителях,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: Хранение водорода с использованием металлогидридных накопителей (massflow.ru). [Kasutatud 14. aprill, 2023].
- [57] A. Zuikova, „Как работает водородный двигатель и какие у него перспективы,“ *РБК Тренды*, pp. 4-7, 14. november, 2022.
- [58] Toyota Baltic, „Mirai: Puhtam tulevik on nüüd tegelikkus,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.toyota.ee/new-cars/mirai>. [Kasutatud 2. aprill, 2023].
- [59] Zap-Online.ru, „Почему водородные автомобили проигрывают электромобилям?,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://zap-online.ru/info/avtonovosti/vse-cto-nuzhno-znat-o-vodorodnom-toplive-budushchego#g>. [Kasutatud 31. märts, 2023].
- [60] S. John, „Hydrogen Fuel Cell,“ 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <http://butane.chem.uiuc.edu/pshapley/Environmental/L11/2.html>. [Kasutatud 13. aprill, 2023].
- [61] УралКриоГаз, „ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://kriogen.ru/stati/primeneniye-vodoroda-v-promyshlennosti/>. [Kasutatud 3. aprill, 2023].
- [62] ОХУМАТ А/С, „Применение водорода в промышленности,“ 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.oxymat.ru/primeneniye/primeneniye-vodoroda-v-promyshlennosti/>. [Kasutatud 1. aprill, 2023].
- [63] N. D’Souza, „Водород в электрогенерации,“ *Argusmedia*, p. 4, 27. mai, 2021.
- [64] M. Savitenko ja B. Rybakov, „Энергия из водорода для удаленных территорий,“ *Энергетика и промышленность России*, p. 2, 14. oktoober, 2022.
- [65] A. Alvela, „Tuulikud siirduvad merele ja muutuvad järjest võimsamaks,“ *Maaleht*, p. 2, 23. oktoober, 2017.
- [66] Eesti Biogaasi Assotsiatsioon, „Tootmine ja kasutamine,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <http://eestibiogaas.ee/tootmine-ja-kasutamine/>. [Kasutatud 27. aprill, 2023].

- [67] A. Manuilov ja V. Rodionov, „Количество вещества. Моль. Молярная масса.,“ %1 *Основы химии*, Новосибирск, Новосибирский государственный университет, 2001, p. 104.
- [68] „Завод по производству биогаза в Маарду получил разрешение на эксплуатацию,“ Андрей Крашевский, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://rus.err.ee/1608939257/zavod-po-proizvodstvu-biogaza-v-maardu-poluchil-razreshenie-na-jekspluataciju>. [Kasutatud 28. aprill, 2023].
- [69] D. Karpov ja V. Litunovsky, *Водородная энергетика: хранение водорода в связанном состоянии*, St Petersburg: Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им.Д.В. Ефремова, 2016, p. 95.
- [70] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium; Keskkonnaministeerium, „Eesti vesiniku teekaart,“ 2023. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 1. mai, 2023].
- [71] „Carbon capture and storage,“ 2023. [Võrgumaterjal]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_storage. [Kasutatud 2. mai, 2023].