

Gert Lombiots

**VESINIKKÜTUSEL TÖÖTAVA
AUTO HOOLDUS- JA
REMONDITÖÖKOJA
PROJEKTEERIMINE TOYOTA
ELKE NÄITEL**

DIPLOMITÖÖ

Tehnikainstituut

Õpperühm: KAE2020

Juhendaja: MSc Henri Vennikas

Tallinn 2023

Autori deklaratsioon ja lihtlitsents

Mina, Gert Lombiots, tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt. Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendaja Henri Vennikas /allkirjastatud digitaalselt/

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega nr.....
kuupäev

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Gert Lombiots, sünnikuupäev: 22.04.1989, annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

VESINIKKÜTUSEL TÖÖTAVA AUTO HOOLDUS- JA REMONDITÖÖKOJA PROJEKTEERIMINE TOYOTA ELKE NÄITEL

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

/kuupäev digiallkirjas/

/digitaalselt allkirjastatud/

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1 HOOLDUS- JA REMONDITÖÖKOJA VAJADUS.....	6
1.1 Regulatsioonid ja standardid	6
2 VESINIKSÕIDUKID.....	8
2.1 Vesinikautode müük maailmas.....	8
2.2 Toyota vs teised autotootjad	9
2.3 Toyota autod	11
3 VESINIKKÜTUSEELEMENDID	13
3.1 Vesinikkütusel töötavad sisepõlemismootoriga sõidukid (ICE)	13
3.2 Vesinikkütuseelemendiga elektrisõidukid (FCEV)	14
3.3 Kütuseelemendi tööpõhimõte	18
3.4 Enamkasutatavad kütuseelemendid	20
4 VESINIKKÜTUS.....	22
4.1 Vesinik kütusena.....	22
4.2 Vesinikkütuse plussid ja miinused	22
4.2.1 Vesinikkütusena kasutamise eelised	22
4.2.2 Vesiniku kütusena kasutamise puudused	23
4.3 Vesinik vs muud kütused.....	24
5 VESINIK.....	27
5.1 Vesiniku olemus ja ajalugu.....	27
5.2 Vesiniku omadused ja kasutusala	28
5.2.1 Looduslik vesinik	28
5.2.2 Toodetud vesinik	30
5.3 Vesiniku kasutamine tööstusharudes	31
5.4 Vesinikuressursside kasutamine Eestis	33
6 HOOLDUS- JA REMONDITÖÖKOHT	35
6.1 Toyota Elke tulevikuperspektiiv.....	35
6.2 Remondiala	35
6.2.1 Ventilatsioon	37
6.2.2 Vesinikutuvastussüsteemid	38
6.2.3 Valgustus	40
6.3 Ohutusnõuded.....	41

6.3.1	Ettevaatusabinõud enne auto remonttöid	42
6.3.2	Ettevaatusabinõud sõiduki süttimise korral.....	44
6.4	Hooldus- ja remonditöökohta asukoha võimalikud variandid.....	46
6.5	Hooldusplaan	50
KOKKUVÕTE.....		51
SUMMARY		52
VIIDATUD ALLIKAD.....		53

SISSEJUHATUS

Seistes silmitsi kliimamuutuste ja taastuvatest energiaallikatest juhitud energiasektori üldise jätkusuutlikkuse nõudlusega, tehakse praegu mitmeid alternatiivseid energiaallikaid ja kütuseid käsitlevaid uuringuid. Selle taustal tekkis vesinikustrateegia, vesinikku peetakse potentsiaalseks tuleviku kütuse- ja energiaallikaks. Kuid lisaks poliitilistele ja struktuurilistele takistustele toob uus tegevussuund kaasa ka tehnilisi väljakutseid.

Üks väljakutse, millega vesinikuenergia revolutsioon silmitsi seisab, on lisaks kütuse ladustamisele ja transpordile ka vesinikkütusel töötavate autode hooldus ja remont. Võidujooks alternatiivsete jõuallikate poole tõstatab võtmeküsimuse, mis on palju olulisem kui tavaline kütusevarustuse infrastruktuur: mida nõutakse neilt, kes peavad sõidukeid hooldama ja remontima? Vesinikumolekulid on väikesed ja kerged, mistõttu ei ole võimalik vesinikulekkeid palja silmaga tuvastada. Lekete tagajärjel võivad tekkida plahvatusohtlikud vesiniku-õhu segud. Seetõttu vajab vesinikkütuseelemendiga auto hooldus spetsiaalset ruumi, tööriistu ja tehnikute koolitust.

Diplomitöö eesmärgiks on projekteerida kehtivatele nõuetele vastav vesinikkütust kasutava auto hooldus- ja remonditöökoda Toyota Elke näitel. Töö olulisus seisneb selles, et kuigi Toyota on turule toonud vesinikkütusel töötavad autod Toyota Mirai, Toyota GR Yaris ja Toyota Corolla Sport, siis Eestis ei ole vesinikkütusel töötava auto hoolduseks ja remondiks vajalikke töökodasid.

Eesmärgi täitmiseks püstitas autor järgnevad ülesanded:

- ✓ uurida vesiniku tehnoloogiat;
- ✓ välja selgitada, millised nõuded on vesinikkütusel töötavale autole ning selle auto hooldus- ja remonditöökojale;
- ✓ projekteerida vesinikkütusel töötava auto hooldus- ja remonditöökoda.

Toyota Elke Eesti esindus on nõus tegema kõik vajaliku, et autoril oleks ligipääs töö teostamiseks vajalikele andmetele ja töövahenditele ning toetab igati töö valmimist.

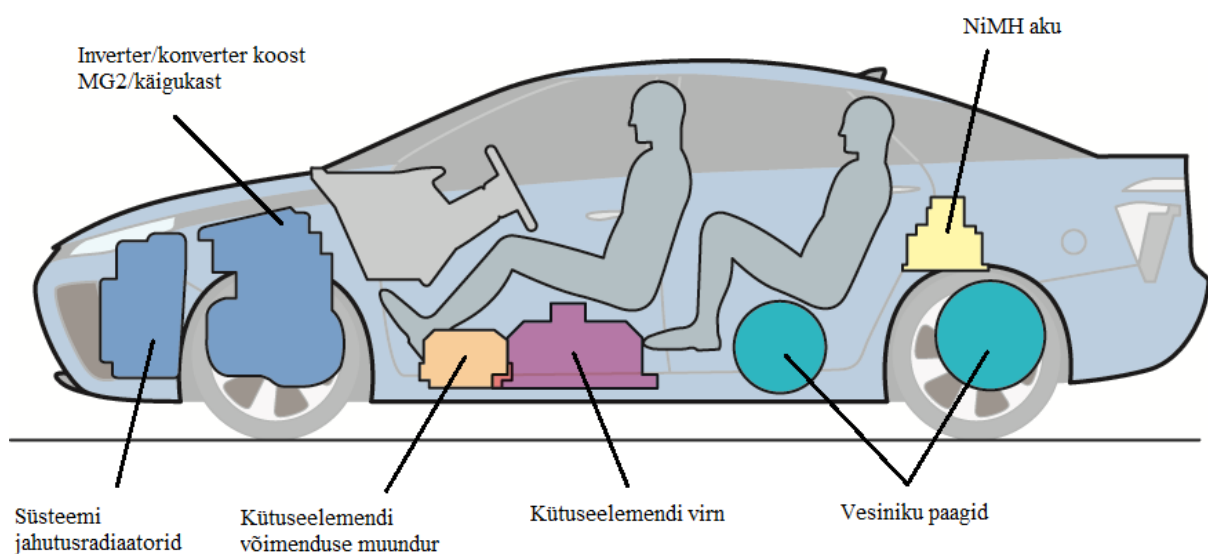
Töö jaguneb kaheks osaks – teoreetiline ja empiiriline. Praktilise töö teoreetilise osa eesmärk on anda ülevaade vesinikust, selle kasutamise võimalustest ning tutvustada Toyota poolt toodetud vesinikkütusega autosid ja nende tööpõhimõtet. Empiirilise töö eesmärk on projekteerida kehtivatele nõuetele vastav hooldus- ja remonditöökoda.

Töö autor tänab juhendajat MSc Henri Vennikast igakülgse abi eest töö valmimisel.

1 HOOLDUS- JA REMONDITÖÖKOJA VAJADUS

Vesinikütuseelemendiga sõidukite remonditöökoja infrastruktuuri kättesaadavus muutub tööstuse tulevase kasvu jaoks üha olulisemaks. Lisaks kütusetaristu loomisele on väga oluline ka vesinikütusel töötavate autode hooldus ja remont. Vesinikautod on juba mitu aastat kasutusel, kuid nende hooldamiseks ja remontimiseks ei ole nõuetekohaseid remonditöökodasid.

Vesinikütuseelemendiga autode remondiprotsessi mõistmiseks on oluline aru saada, kuidas autod töötavad (Sele 1). Nendel autodel on vesinikku sisaldavad kütuseelemendid, kus vesiniku molekulid keemilise protsessi käigus segunevad õhust saadava hapnikuga. See protsess toodab elektrit, mida seejärel kasutatakse sõidukis. Ainus toodetav kõrvalsaadus on vesi, mis lubab antud autod liigitada saastevabaks. Vesinik pumbatakse ja hoiustatakse selleks ettenähtud mahutites. Kui soovida sõidukit kiirendada, toodetakse kütuseelemendiga elektrienergiat, mida kasutatakse kohe ka veomootori(te) toiteks. Gaasiline vesinikütus liigub mahutist kütuseelemendi, seal läbib vesinik keemilise reaktsiooni, milles osaleb õhus olev hapnik – luues elektrienergia, mis sõidukit toidab. [1], [2]



Sele 1. Vesinikauto süsteem

1.1 Reguleerimis- ja standardid

Eestis ei ole täpselt määratletud vesiniku seadusandlikku raamistikku ega reguleerivaid nõudeid vesiniku ohutusega seotud küsimuste toetamiseks. 2021. aasta maikuus avaldatud vesinikustrateegias alles visandatakse tegevuskava, mida valitsus loodab vesiniku tootmise ja kasutamise osas aastate jooksul näha. See viitab sellele, et võrku reguleerivat raamistikku ei suudeta koostada enne 2025.

aastat. Kuni selle ajani kohaldatakse kehtivaid standardeid ja eeskirju. Eeldatakse, et vesinikul on järgmistel aastakümnetel oluline roll Eesti süsinikdioksiidivabas energiasüsteemis. [3]

Puudub konkreetne reguleeriv asutus, millel oleks vesiniku reguleerimise täielik omandiõigus. Selle asemel on mitmetel reguleerivatel asutustel kohustused sõltuvalt vesinikualasest tegevusest. Praegu puuduvad spetsiaalselt vesiniku jaoks loodud ohutusstandardid. Üldised juhised vesinikusüsteemide ohutuse kohta on võimalik leida Rahvusvahelise Standardiorganisatsiooni tehnilisest aruandest ISO/TR 15916:2004 või ISO 22734-1:2008. Sama kehtib ka selliste standardite rakendamise kohta, mis on otseselt üle võetud tööstusstandarditest, kuid ei ole seetõttu täielikult sobivad. Peale selle ei ole vesiniku koode, standardeid ega eeskirju välja töötatud nii, et need hõlmaksid konkreetset vesiniku ohutust kinnistes ruumides. Seega laenatakse olemasolevaid õigusakte ja üldisi tavasid, et seda puudujääki katta – näiteks vesiniku kasutamisel kinnistes ruumides on vesinikutuvastussüsteemi kasutamine lekete varajaseks avastamiseks hädavajalik, et hõlbustada häirete aktiveerimist, ohutustoiminguid ja vajaduse korral inimeste ohutut evakueerimist. [3]

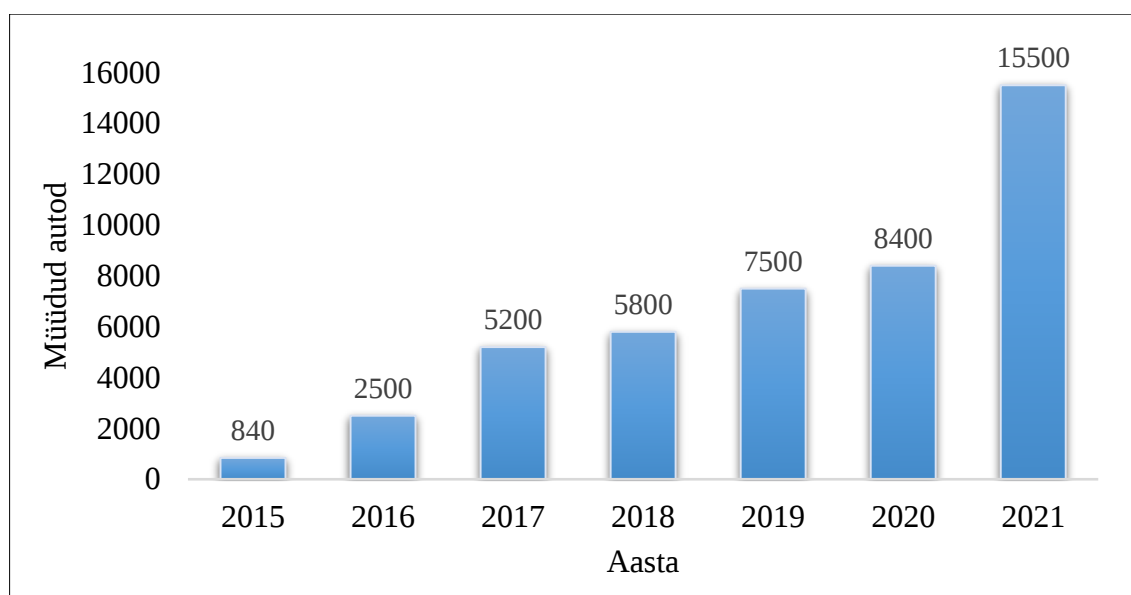
Ohutusnõuded on reguleeritud ohtlike õnnetuste määrusega ja need kehtestatakse tööohutuse- ja töötervishoiu määruse alusel tehtud riskianalüüsi alusel. Nii sise- kui ka välised ohutusnõuded ei ole fikseeritud ja sõltuvad kohalikest tingimustest ja konkreetse objekti riskihinnangust. Vesinikautode hooldusega seotud reeglid on sarnased tavakütuste reeglitega. Tootjad peavad koostama vesinikkütusega sõidukitele spetsiaalsed hooldusjuhendid. Sõiduki üksikud osad peavad läbima Euroopa ja riiklike raamistike kohaselt ranged katsed. See kehtib nii autode, veoautode, busside, jalgrataste kui ka mootorrataste kohta. Riskianalüüs tuleb algselt läbi viia enne loa andmist ja seejärel regulaarselt vastavalt tööohutuse ja töötervishoiu määrusele. Riskianalüüs määrab selle loa suhtes kohaldatavad konkreetsed ohutusnõuded ja vahemaad. [4]

Toyota on koostanud vesinikkütusel töötava auto hoolduseks ja remondiks remondijuhendi – *Toyota MIRAI fuel cell vehicle dismantling manual* – kus on kirjas nõuded kütuseelemendiga sõidukite ohutuks käsitlemiseks [5]. Peatükis 6.3 annab autor põhjalikuma ülevaate Toyota poolt esitatud vesinikkütusel töötavate autode remontimisel järgitavatest ohutusnõuetest.

2 VESINIKSÕIDUKID

2.1 Vesinikautode müük maailmas

JATO Dynamicsi kogutud andmed (Sele 2) näitavad, et 2021. aastal müüdi vesinikkütuseelemendiga autosid üle maailma kokku 15 500 ühikut. Kuigi see on teiste kütuseliikide müügiga võrreldes väga väike, kasvas nõudlus 2020. aastaga võrreldes 84%, mil müüdi 8400 autot. Veelgi muljetavaldavam on tõus võrreldes pandeemiaeelse tasemega, mis on 103%. Rahvusvahelise Energiaagentuuri (*International Energy Agency IEA*) uue *Global EV Outlook 2023* aruande kohaselt kasvas vesinikkütuseelemendiga elektrisõidukite (FCEV) arv maailma teedel 2022. aastal võrreldes 2021. aastaga 40%, moodustades kokku üle 72 000 sõiduki. IEA ei esita täpseid arve, kuid see tähendab, et 2022. aastal müüdi umbes 20 500 uut FCEV-d, kusjuures aruandes lisatakse, et 15 000 neist olid autod. [6], [7]



Sele 2. Vesinikautode müük maailmas 2015-2021

2023. aasta esimese nelja kuuga langes vesinikkütusega sõidukite müük maailmas 11,5% (Tabel 1). Jaanuari algusest aprilli lõpuni müüdi ülemaailmselt vaid 4699 kütuseelemendiga sõidukit, võrreldes eelmise aasta sama perioodiga, kus müüdi 5307 autot. Suurim langus toimus Jaapanis, kus müük langes 2022. aasta esimese nelja kuu 551 ühikult 2023. aasta vastavate kuude 138-le, mis on 75% langus. Vaid Hiinas oli aastane kasv, kasvades 438 sõidukilt 2022. aasta jaanuaris-aprillis 1145-le ehk 161,4%. Kuigi FCEV-de müük Koreas langes eelmise aasta sama perioodiga võrreldes 17,8%, hoiab Korea tänu müügile endiselt FCEV-müügi[de] edetabelis esikohta oma 47,9% turuosaga. [8]

Tabel 1. FCEV ülemaailmsed müüginumbrid 2023. aasta jaanuarist aprillini riigiti

Riik	Jaanuar-Aprill 2022	Jaanuar-Aprill 2023	Kasvumäär	Turuosa 2022	Turuosa 2023
Lõuna-Korea	2736	2250	-17,80%	51,60%	47,90%
USA	1254	943	-24,80%	23,60%	20,10%
Hiina	438	1145	161,40%	8,30%	24,40%
Jaapan	551	138	-75%	10,40%	2,90%
Euroopa	286	207	-27,60%	5,40%	4,40%
Muud riigid	42	16	-61,90%	0,80%	0,30%
Kokku	5307	4699	-11,50%	100%	100%

Nagu allolevast tabelist 2 näha, tootis Hyundai tänavu esimese nelja kuuga enam kui pooled kõigist müüdud FCEV-dest, kuigi müüdi 2022. aasta sama perioodiga võrreldes 21,6% vähem [8].

Tabel 2. FCEV ülemaailmsed müüginumbrid 2023. aasta jaanuarist aprillini (tootja järgi)

Tootja	Jaanuar-Aprill 2022	Jaanuar-Aprill 2023	Kasvumäär	Turuosa 2022	Turuosa 2023
Hyundai	3068	2405	-21,60%	57,80%	51,20%
Toyota	1599	1149	-28,10%	30,10%	24,50%
Foton	111	201	81,10%	2,10%	4,30%
Muud tootjad	529	944	78,40%	10%	20,10%
Kokku	5307	4699	-11,50%	100%	100%

Kuna Toyota müüs Mirai kütuseelemendiga sõiduaautosid 1149 ühikut vähem, mis on 28,1% langust eelneva aastaga võrreldes, oli Hyundai Motorsi ja Toyota turuosa vahe 26,7%. Need Hiina tootjad, kes on keskendunud vesinikuga tarbesõidukitele, näitasid end tõusutrendis. Hyundai loodab, et vesinikkütuseelementidega (FCEV) sõidukite kasutuselevõtt Hiinas kasvab, eriti busside ja veoautode puhul. [8]

Vesinikunõukogul, kuhu kuuluvad suurimad autotootjad ja gaasitarnijad, on pikas perspektiivis optimistlik vaade, öeldes, et 2030. aastaks võib olla toodetud umbes 10–15 miljonit vesinikkütusega autot. Aastaks 2050 võib see arv kasvada 400 miljoni vesinikuautoni. [9]

2.2 Toyota vs teised autotootjad

Lisaks Toyotale on süsinikuheitevaba tehnoloogia pälvinud mitmete teiste autotööstuste tähelepanu (Tabel 3). Saksa autotootja BMW tõi turule vesinikkütuseelemendiga BMW iX5. [10]–[12]

Tabel 3. Vesinikkütusel toodetud autod üle maailma

Tootja	Mudel	Võimsus HJ(kW)	Suurim kiirus km/h	Sõiduulatus km	Kiirendus 0-100 km/h
Toyota	Mirai	182 hj(136 kW)	175 km/h	647 km	9.2 s
	Yaris H2 (ICE)	-	-	-	-
	Hilux	182 hj(135.7 kW)	-	500 km	-
BMW	iX5	401 hj(300 kW)	190 km/h	818 km	6 s
Hyundai	NEXO	152-161 hj(113-120kW)	178 km/h	612 km	9.2 s
	N Vision 74	670 hj(500 kW)	250 km/h	598 km	4 s
	XCIENT	241 hj(180kW)	85 km/h	400 km	-
Honda	CR-V	-	-	-	-
Riversimple	Rasa	13.4 hj(10kW)	96 km/h	480 km	9.7 s
Land Rover	Defender FCEV	197 hj(147kW)	-	-	-
NamX	HUV	300 -550 hj(220-410kW)	200 km/h	800 km	4.5 s
Hyperion Motors	Hyperion XP-1	2038 hj(1520 kW)	356 km/h	1635 km	2.2 s

Lõuna-Korea autotootja Hyundai plaanib 2024. aastal oma Hyundai Nexo jaoks olulisi täiustusi. Plaanitakse kasutusele võtta kolmanda põlvkonna kütuseelemendid, mille sõiduulatus on peaaegu 800 km. Lisaks plaanitakse veel Hyundai N Vision 74 vesiniku hübriidkontseptsiooni, mis on uus versioon 1974. aasta Pony Coupe kontseptsioonist. Jõuallikas ühendab liitiumioonakut ja vesinikkütuseelementi, mis tagab muljetavaldava kiirenduse. 2020. aastal lasi Hyundai välja XCIENT Fuel Cell veoauto – mida nimetatakse maailma esimeseks masstoodanguna toodetud vesinikkütuseelemendiga raskeveokiks. XCIENT on saastevaba kaubaveok, mille sõiduulatus on üle 400 km. [10], [12]–[14]

Aastatel 2017–2021 tõi Jaapani autofirma Honda Ameerika turule oma vesinikkütusel töötava Clarity, kuid lõpetas selle müügi ebapiisava huvi tõttu. 2022. aasta novembris teatas Honda oma elektrifitseerimise plaanidest, milles kavatseb hakata tootma USA-le suunatud vesinikkütuseelemendiga autosid 2024. aastast. [10], [12]

2019. aastal Londonis toimunud vesinikukonverentsil tutvustas Walesi idufirma Riversimple oma vesinikelemendiga kahekohalist, liblikatiibsete ustega pisiautot Riversimple Rasa. Rasa on ideeauto, mis suudab läbida 480 km kõigest 1,5 kg vesinikuga ja kiirendab 0 kuni 100 km/h 9,7 sekundiga. Pärast debüteerimist 2016. aastal jõudis auto lõpuks tootmisesse 2023. aastal, seda plaanitakse toota 5000 ühikut aastas. [10], [12], [15]

Briti rahvusvahelise autotootja Jaguar Land Rover Automotive PLC eesmärk on 2036. aastaks väljalasketoru heitgaaside nullimine. Keskendutakse Land Rover Defenderi maasturil põhineva

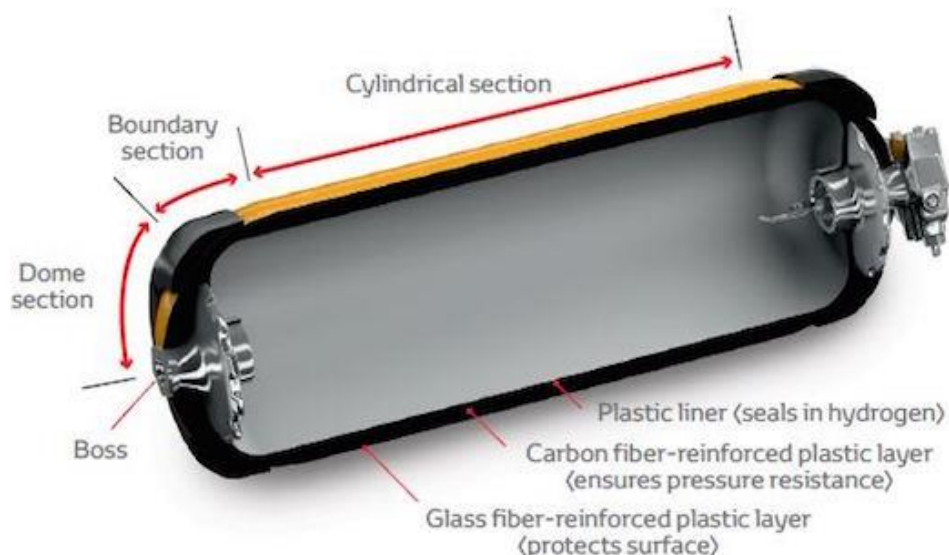
vesinikkütuseelemendiga sõiduki loomisele. Kuigi konkreetseid sõiduulatus ja võimsuse üksikasju ei avalikustata, on sõidukil elektriajamid, kütuseelemendiplokk, suur aku ja vesinikupaak. [10], [12]

Itaalia autodisainifirma Pininfarina vesiniku ideeauto NamX HUV eesmärk on muuta autojuhtimine revolutsiooniliseks. Sellel on püsiv H₂ paak ja kuuest eemaldatavast paagist koosnev seadistus, mis võib oluliselt suurendada vesinikkütusega sõidukite kasutuselevõttu. NamX kavatseb pakkuda lisapaakide kojuvedu. Arendus peaks algama 2023. aastal, valmis autot oodatakse 2025. aasta lõpuks, hinnaga 73 000–92 000 eurot. NamX HUV-l on ainulaadsed omadused, mis võivad tuua uue vesiniksõidukite ajastu. [10], [12]

Ohio osariigis Columbuses asuv Ameerika tootja Hyperion Motors lõi tähelepanuväärse vesinikkütusega auto nimega Hyperion XP-1. See hüperauto jõudis uudistesse pärast selle esitlemist 2020. aasta augustis. Sellel on täiustatud tehnoloogia ja tiptasemel vesinikumootori moodul koos NASA-lt saadud salvestustehnoloogiaga. Hyperion XP-1 pakub hämmastavat üle 1600 km ulatust ja toodab hämmastavat koguvõimsust üle 2000 hobujõu. [10], [12], [16]

2.3 Toyota autod

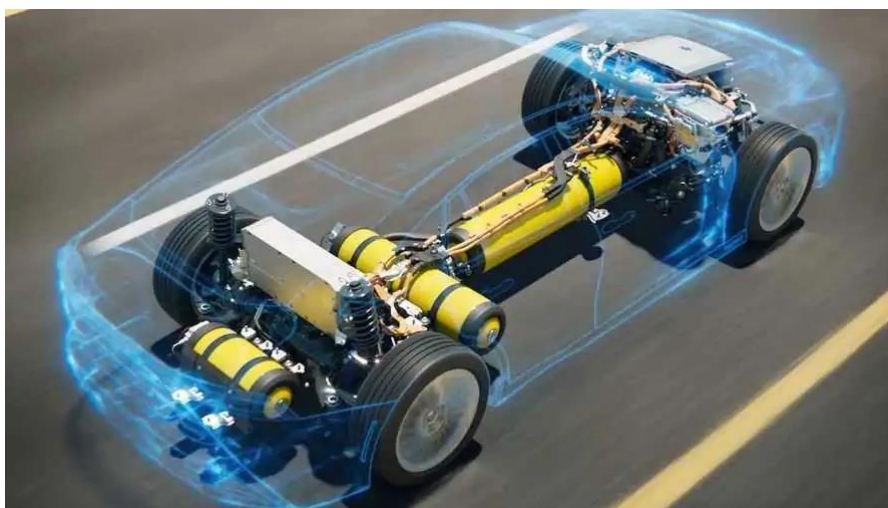
Jaapani autotootja Toyota Motor Corporation on tootnud vesinikkütusel töötavad autod: Toyota Mirai, Toyota Yaris GR ja Toyota Corolla GR.



Sele 3. Vesinikupaagi läbilõige [17]

Toyota Mirai on keskmise suurusega vesinikkütuseelemendiga sõiduk (FCEV) ning see on esimene FCEV, mida hakati massiliselt tootma ja kaubanduslikult müüma. Teise põlvkonna Mirail on 3

vesinikupaaki (Sele 3) kogumahuga 142,2 liitrit. Toyota insenerid töötavad paakide disaini kallal ja täiustavad neid pidevalt, et paagid vastaksid kõrgetele tugevus- ja ohutusstandarditele. Paakide tugevus tuleneb süsinikkiust kestast, mida ümbritseb klaaskiudkiht. Kui Mirai satuks õnnetusse, oleksid kõik sellest tulenevad kahjustused klaaskiul kergesti nähtavad ja katsetega saab kontrollida, kas ka süsinikkiust kest on kahjustatud. Paagid on vesiniku tihendamiseks vooderdatud plastikuga ja need on kavandatud taluma kuni 225% nende tavapärasest töö rõhust. Võimalike lekete tuvastamiseks on rakendatud täiendavad ohutusmeetmed. Andurid, mis suudavad tuvastada vesiniku jälgi, on paigutatud strateegiliselt paakide ümber ning lekke tuvastamisel sulguvad kaitseklapid ja auto lülitub ise välja. Kolmanda turvakihina on kabiin vesinikuruumist eraldatud. Lekke korral leviks vesinik atmosfääri, mitte auto sisemusse. Kõrgsurve vesinikupaake hoitakse T-kujuliselt kandkere põhja all (Sele 4). [17]



Sele 4. Toyota Mirai kütuseelementide süsteemi paigutus [17]

Eksperimentaalse sõiduki Toyota GR Yaris vesinikkütus, kütusepaagid ja tankimisprotsess on samad, mis Toyota müügiloleval kütuseelemendiga elektrisõidukil Toyota Mirai. Kui Mirai kasutab energia tootmiseks kütuseelementides keemilist reaktsiooni, siis eksperimentaalsel GR Yarisel on sisepõlemismootor, mille kütuseks on vesinik. [18]

Vesinikkütusel töötaval eksperimentaalsel GR Yarisel ja Corolla Sportil on sama 1,6-liitrine G16E-GTS, 1,6-liitrine, 3-silindriline turbomootor, mis on auhinnatud GR Yarisel, kuid muudetud kütusevarustusega ja sissepritsesüsteem kasutamiseks kütusena vesinikuga. Eksperimentaalne vesiniku jõul töötav Corolla Sport on juba alates selle aasta maist võistelnud Jaapanis Super Taikyu võistlussarjas Toyota GAZOO Racingu ROOKIE Racing käe all, kus meeskond on võtnud vastu väljakutse katsetada eksperimentaalset vesinikpõlemismootorit mootorispori karmides tingimustes. [19]

3 VESINIKKÜTUSEELEMENDID

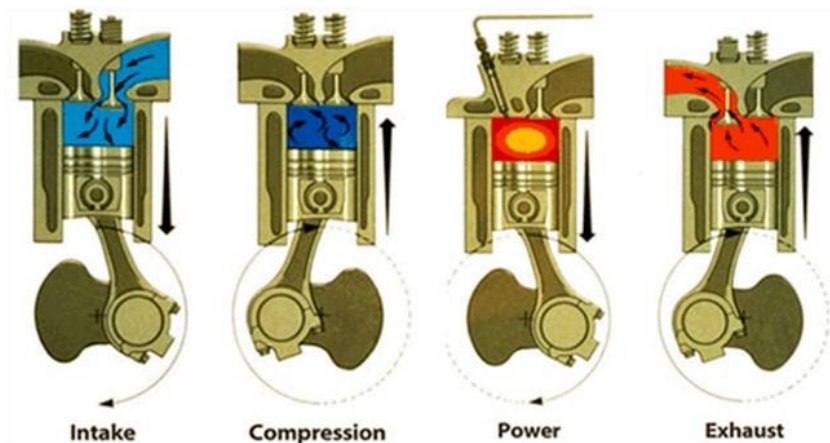
3.1 Vesinikkütusel töötavad sisepõlemismootoriga sõidukid (ICE)

Vesinik-sisepõlemismootoriga sõidukid toodavad energiat vesiniku põlemisel, kasutades kütuse- ja sissepritsesüsteeme, mis sarnanevad sisepõlemismootoritele. Sel põhjusel on vesinikkütusel töötavad sõidukid alternatiiv fossiilkütustest loobumiseks autotööstuses. Vesinikkütusel töötav ICE-sõiduk on väga sarnane tavalise autoga. Tänu põlemisomadustele võib arvestada väga kõrge kasuteguri ja madala saasteheitega, võimaldades kasutada üllilahjasid (õhk-kütuse) segusid. [20]–[22]

Vesinikkütuse vaieldamatu eelis on asjaolu, et tänu kütuse gaasilisele olekule pakub see suurepäraselt külmkäivitusvõimet. Vesiniku kasutamine kütusena sisepõlemismootoris nõuab aga mitmeid olulisi muudatusi, mis on seotud süüte, kütuse sissepritse ja kompressiooniga. Esimene puudutab kütusesegu, nimelt süüteküünalde süütamist. Vesinik- sisepõlemismootoris on vaja kasutada külma nimiväärtusega süüteküünlaid, et süüteküünla elektroodi temperatuur ei ületaks isesüttimispiiri ja ei põhjustaks tagasilööke. Samal ajal ei ole soovitatav kasutada plaatina elektrodidega süüteküünlaid, kuna plaatina on oksüdatsiooni katalüsaator. [23], [24]

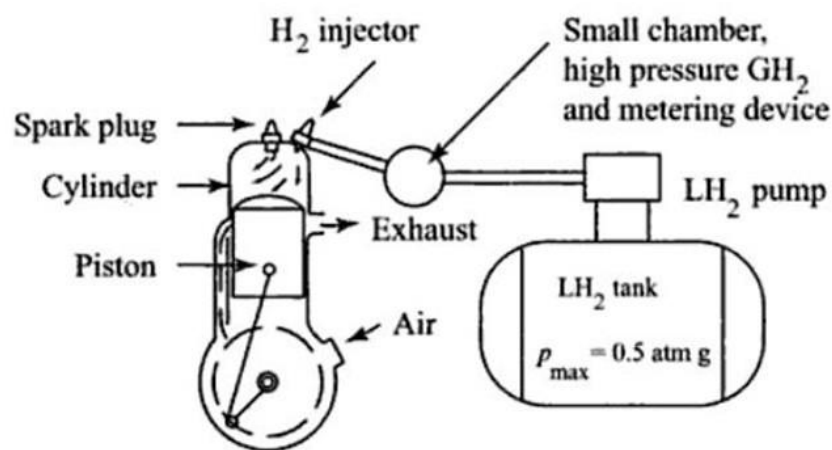
Vesinikkütusel CE töötab täpselt samamoodi nagu bensiinil põhinev ICE. Mootoris on neli erinevat etappi, sellest ka mõiste „neljatahtiline” mootor. (Sele 5)

- ✓ Sisselaskmine: kolb algab ülalt ja liigub allapoole. Sisselaskeklapp avaneb, võimaldades kütusel vabasse ruumi voolata. Kütus on helesinise värviga
- ✓ Kokkusurumine: Kolb liigub ülespoole, et kütuse/õhu segu kokku suruda. Segu kokku surudes muudab see põlemise võimsamaks. Tumesinine kütus näitab kokkusurumisetappi.
- ✓ Võimsus: kui kolb liigub kolvi ülaossa, kiirgab süüteküünal sädet, mis süütab kütuse. Kambris olev kütus plahvatab, surudes kolvi tagasi alla. Plahvatus on punane/oranž/kollane.
- ✓ Heitgaas: kui kolb on jõudnud oma kolvi põhja, avaneb väljalaskeklapp ja ülejäänud heitgaas väljub mootorist. Väljalase on punast värvi. [22]



Sele 5. ICE tsükli 4 etappi [22]

Sele 6 on kujutatud sama tüüpi kolb ja võll, kuid seekord on näidatud, kuidas see ühendub vedela vesiniku paagiga [22].

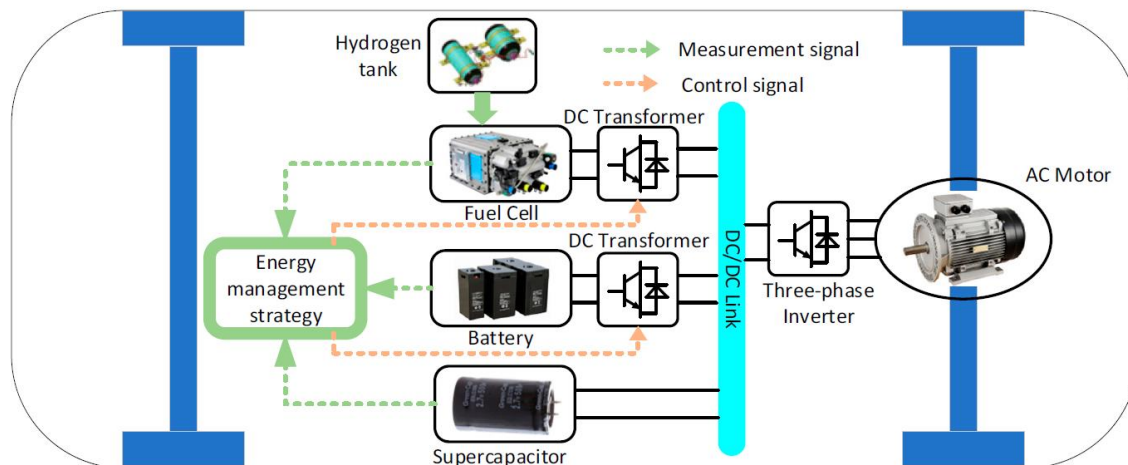


Sele 6. Vesinikkütusel töötav ICE [22]

3.2 Vesinikkütuseelemendiga elektrisõidukid (FCEV)

FCEV on kõrgtehnoloogiline sõiduk, mis kasutab elektri tootmiseks kütuseelementi. See kasutab vesinikkütust, et toota sõidukit liikumapanevat elektrienergiat. FCEV-d on elektriautodega sarnased saastevabad sõidukid. FCEV-d toodavad aga sõiduki elektrimootori käitamiseks elektrit vesinikust, mitte aga elektrisõidukite laadimisjaamast laetud akust. FCEV-i elektrienergia tootmine toimub seadmes, mis on FCEV-i, kütuseelemendi süda. Kütuseelement töötab mõnevõrra nagu aku, niikaua kui kütuseelementi voolab vesinik, toodab see pidevat elektrivoolu, kõrvalsaadusena eraldub ainult soojus ja veeaur. Soojus hajub kütuseelemendist, FCEV-d sisaldavad ka liitiumakut (sarnaselt elektrisõidukitega), mida kasutatakse kütuseelemendi toodetud üleliigse elektrienergia ja sõiduki regeneratiivpidurisüsteemi toodetud võimsuse salvestamiseks. [20], [25]

Võrreldes teiste kütuseelementide tüüpidega on PEMFC FCEV-de jaoks sobivam, kuna sellel on 60–80°C juures töötamisel eeliseks suur võimsustihedus ja madal korrosioon. FCEV skemaatiline diagramm on näidatud Sele 7. [20], [25]

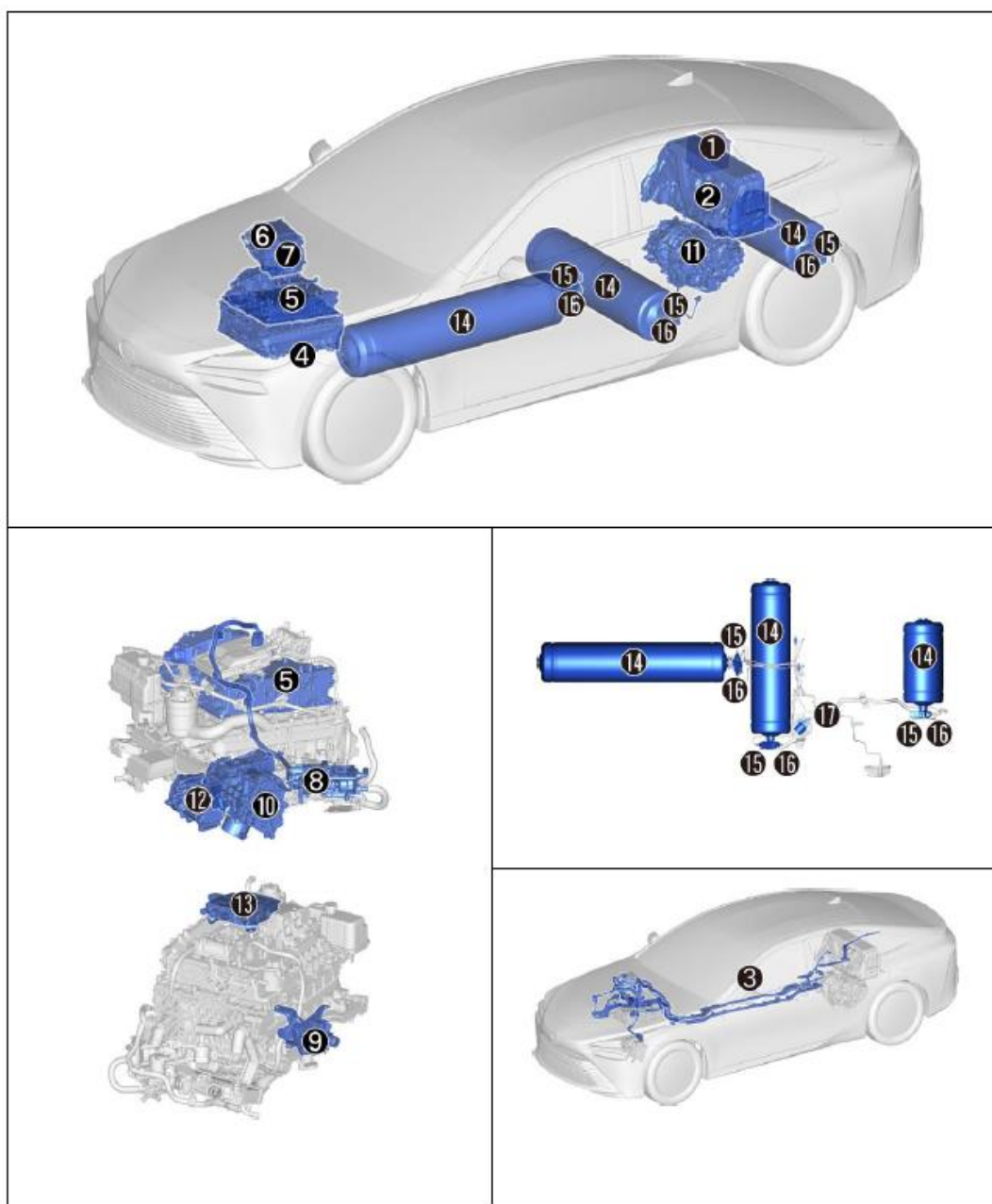


Sele 7. FCEV skeem [25]

Toyota vesiniksõiduk Mirai ühendab endas hübriidtehnoloogiat kütuseelemendi tehnoloogiaga. Kütuseelemendiga sõidukis jaotatakse kütuseelemendist ja elektriakust saadav energia vastavalt erinevatele sõidutingimustele. Samuti toimib veomootor aeglustamise ajal regeneratiivpidurina, et muuta pidurdusjõud elektrienergiaks, mida kasutatakse elektriaku laadimiseks. [26]

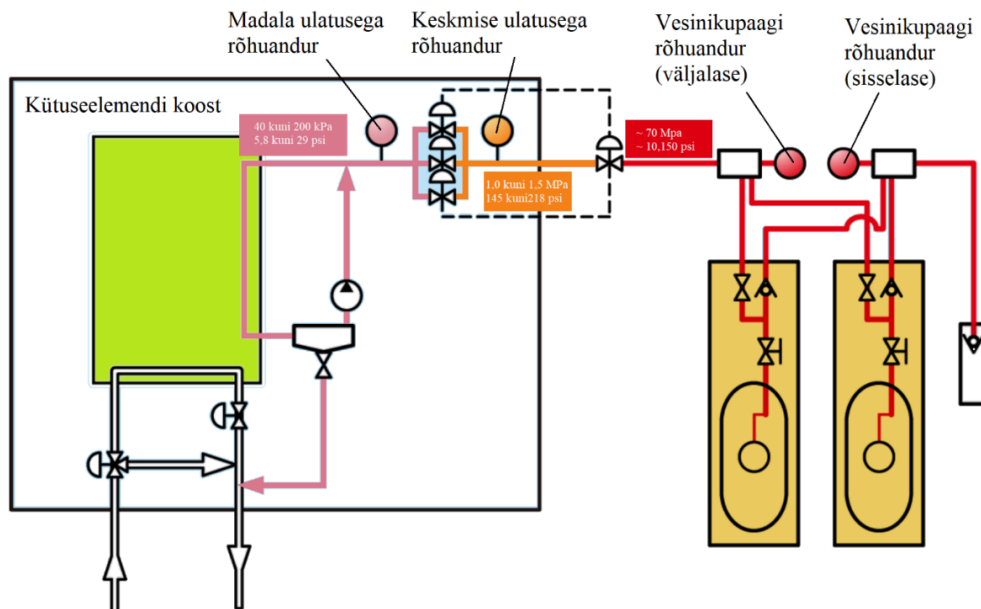
Vesinikautol (Sele 8) on 12-voldine aku ❶, mis varustab madalpingeseadmeid. Mirail on 310,8 voldine liitiumioonaku (Li-ion) ❷, mis koosneb 84 jadamisi ühendatud madalpinge elemendist. Oranži värvi kõrgepinge toitekaablit ❸ kasutatakse sõiduki toiteaku ja kütuseelemendi muunduri koostu ning elektrimootori käitamiseks. Kütuselement FC ❹ toodab elektrienergiat, põhjustades keemilise reaktsiooni vesinikupaagist tuleva kütuse ja õhust saadava hapniku vahel. Kütuseelemendi konverteri koost ❺ tõstab tekkiva elektrienergia pinget maksimaalselt 650 voldini (alalisvool). Inverter koos muunduri komplektiga ❻ juhivad veomootori ja kütuseelemendi elektrienergiat. Alalisvoolu muundur (DC-DC) ❼ alandab kõrgepingesüsteemi pinget ligikaudu 14-voldise alalisvooluni ja varustab sellega nii lisakomponente kui ka 12-voldist akut. Vesiniku retsirkulatsioonipumba koost ❽ tsirkuleerib kütusepihustitest tulevat vesinikku. Kütuseelemendi veepumba koost ❾ tsirkuleerib kütuselemendis jahutusvedelikku ja õhukompressori poolt kokkusurutud õhku. Kütuseelemendi õhukompressor koos mootorisõlmega ❿ varustab kütuselementi õhuga. Mootorgeneraator (MG) ⓫ annab sõidutingimustest lähtuvalt liikumapanevat jõudu ja aeglustamisel toodab elektrit. Kolmefaasiline kõrgepinge vahelduvvoolu elektriajamiga

mootorkompressor **12**. Elektriküttekeha **13** reguleeritakse juhtaju poolt vastavalt tingimustele. Vesinikupaak **14** on peamiselt süsinikkiuga tugevdatud plastist paak, mis talub kõrget rõhku (70 MPa). Vesinikupaagi klapi kompleks **15** paigaldatakse igale vesinikupaagile ning see avab ja sulgeb vesinikukanalid. Vesinikupaagi temperatuuriandur **16** tuvastab vesinikupaagis vesiniku temperatuuri ja edastab selle vesinikkütuse juhtseadmesse. Vesinikkütuse regulaator **17** paigaldatakse vesinikupaagi ja kütuseelemendi vahele ning see vähendab vesinikupaagist tuleva vesinikkütuse rõhku (1-1,5 MPa). [26]



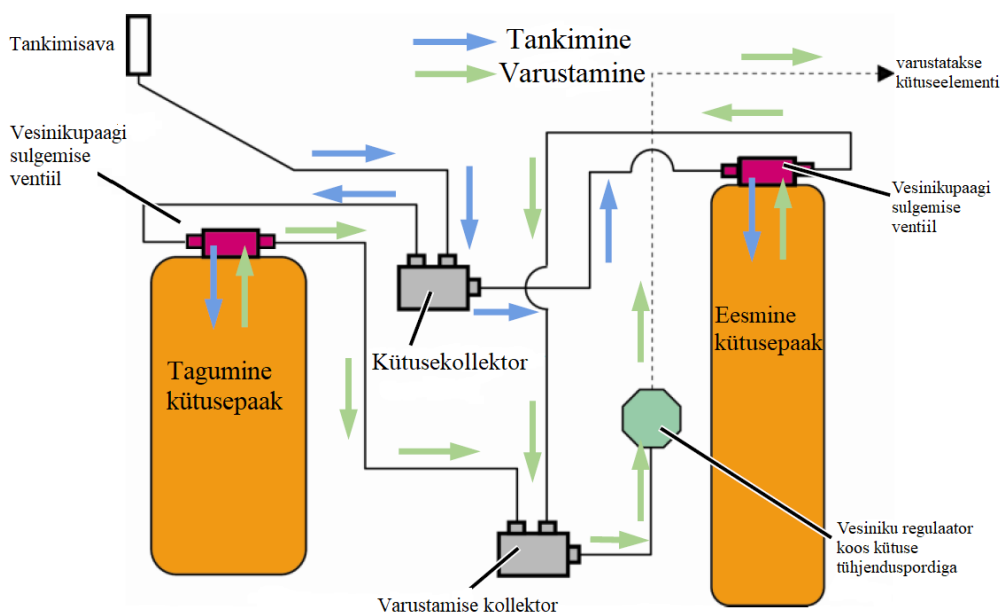
Sele 8. Kütuselemendiga sõiduki osade asukohad [26]

Vesinikauto kütusesüsteemil (Sele 9) on kolm survetsooni – madal, keskmine ja kõrge. Tegemist on suletud kütusesüsteemiga, mis tähendab seda, et süsteem on kogu aeg surve all. Enne hoolduse või remondiga alustamist tuleb rõhk maha lasta ja süsteemis olev vesinik juhtida atmosfääri. [27]



Sele 9. Vesinikauto kütusesüsteem

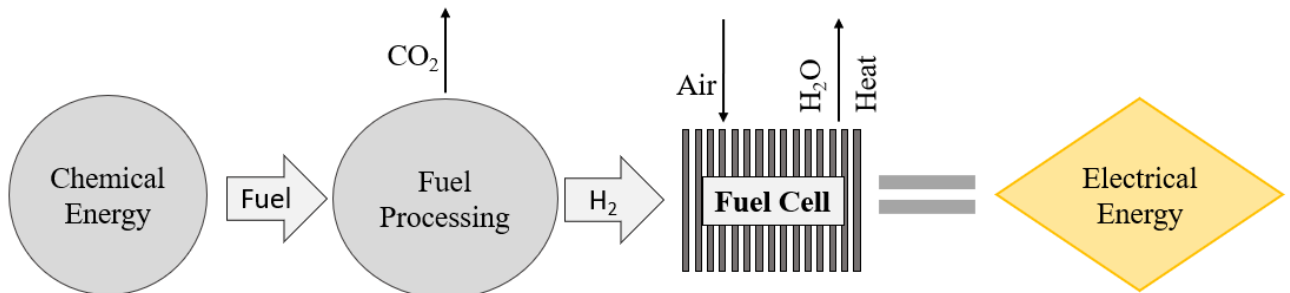
Vesinikkütusega auto kütusepaagid (Sele 10) asuvad reisijate istmete all. Kombineeritult mahub paakidesse 5,3 kg vesinikku, mis on umbkaudu 68 MPa rõhu all. Vesinikku väljutatakse keskmise ulatusega rõhuregulaatori juures asuva väljalaske klapi kaudu. [27]



Sele 10. Vesinikauto kütusepaagid

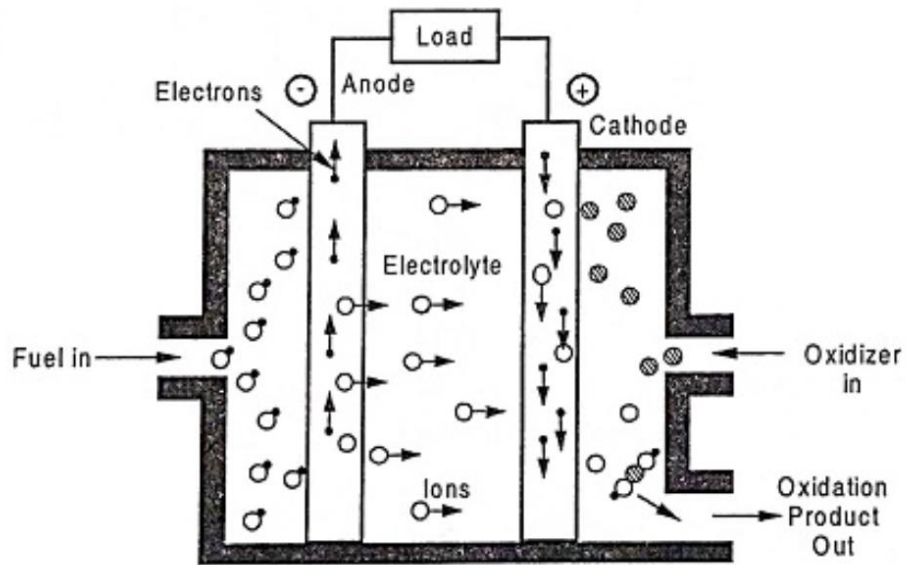
3.3 Kütuseelemendi tööpõhimõte

Sele 11 on kujutatud tööprotsessi, mis algab keemilise energia sisestamisega kütusena, siis viiakse läbi põlemine ja hüdrolüüsi protsess vesiniku tootmiseks ning lõpuks läheb see kütuseelemendile elektrienergia tootmiseks. [28], [29]



Sele 11. Tööprotsess [29]

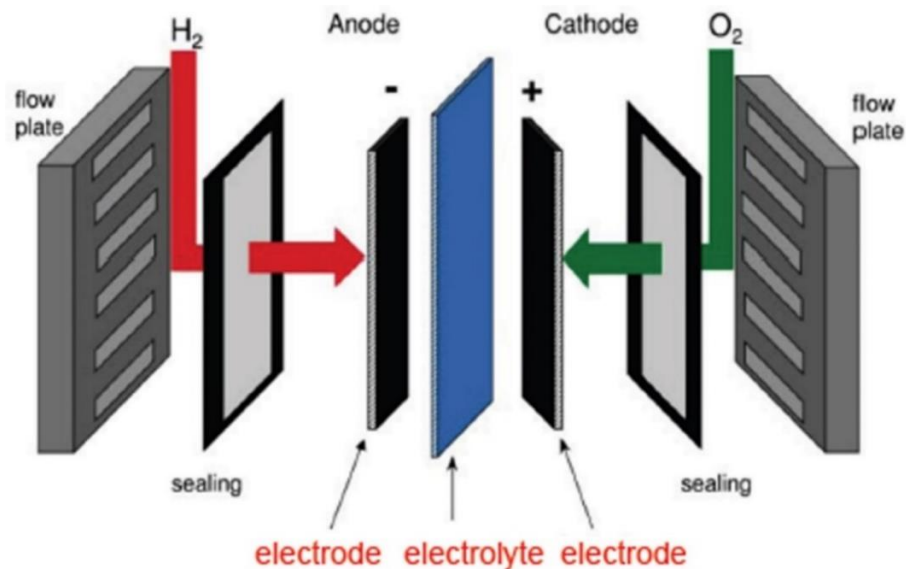
Vesinikkütuseelement (*Hydrogen Fuel Cell* HFC) on energia muundamise süsteem, mis muudab kütuse ja oksüdeerija tarnimisel vesiniku või mis tahes vesinikku sisaldava energiaallika elektri- ja soojusenergiaks. HFC-s (Sele 12) juhitakse vesinik ja hapnik elemendile, kus anoodi ja katoodi vaheline elektrokeemiline reaktsioon eraldatakseioonivahetusmembraaniga. Kütuse südamik on *sandwich*-laadne struktuur, kus mõlemal pool prootonivahetusmembraani on katalüsaatorikiht ja gaasi difusioonikiht katab katalüsaatorikihti. Membraani üks külg toimib anoodina ja teine külg katoodina. Anoodil olev katalüsaator eraldab vesiniku molekulid prootoniteks ja elektronideks, mis liiguvad elektrolüütmembraani kaudu katoodile. Elektronid läbivad välise vooluringi, tekitades elektrivoolu. Läbi elektrolüüdi lähevad prootonid katoodile, kus nad ühinevad hapniku ja elektronidega, mille tagajärjel tekib vesi ja soojus. Katoodil toimuvat reaktsiooni nimetatakse hapniku redutseerimise reaktsiooniks. [30]–[32]



Sele 12. HFC tööskeem [32]

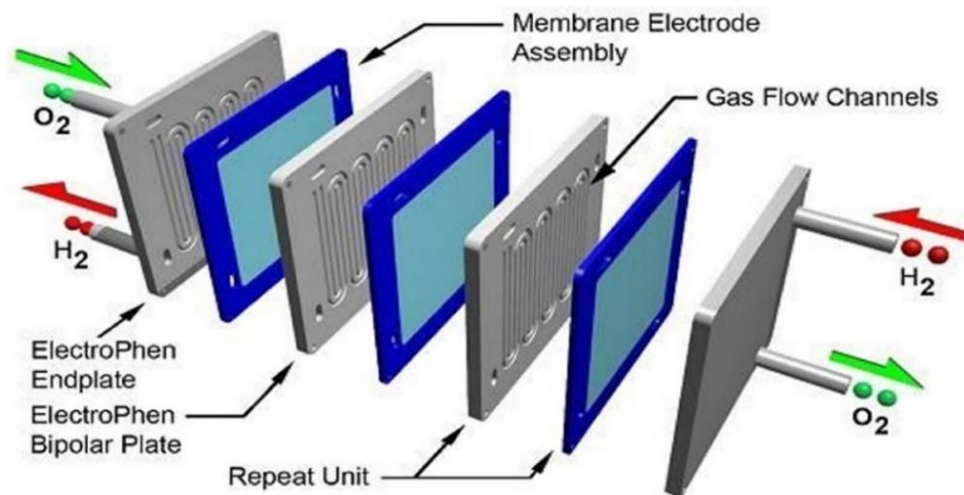
Vesinikkütuseelementide keerukus võib olenevalt kütuseelemendi tüübist ja rakendusest oluliselt erineda. Enamikus vesinikkütuseelementides leidub mitmeid komponente, nagu on näidatud Sele 13.

- ✓ Elektroodid – anood ja katood
- ✓ Katalüsaator
- ✓ Membraan/elektrolüüt
- ✓ Gaasi difusioonikiht
- ✓ Tihendid [33]



Sele 13. Ühe kütuseelemendi komponendid [33]

Üks kütuseelement toimib madalal pingel, seega saab väljundpinge suurendamiseks ühendada mitu kütuselementi jadamisi. Kütuselemendid pannakse kokku virnadesse (Sele 14) ja korstnad on integreeritud moodulisse, mis hõlmab kütuse, vee ja õhu juhtimist ning jahutusvedeliku juhtimise riist- ja tarkvara. [33]



Sele 14. Kütuseelementide virnastamine [33]

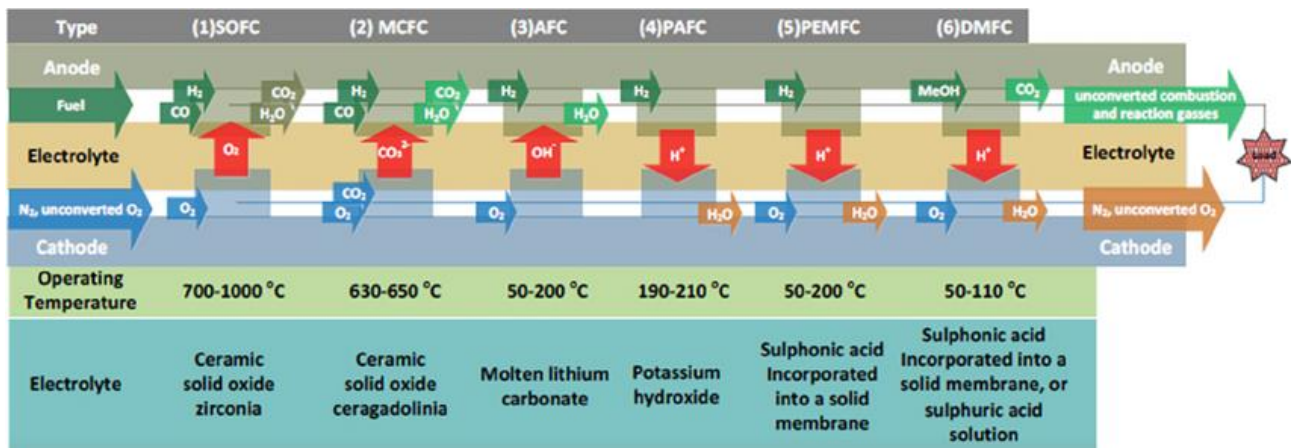
Sõidukid, mis kasutavad kütuseallikana vesinikku jagunevad kaheks: vesinikkütusel töötavad sisepõlemismootoriga sõidukid (*Internal Combustion Engine ICE*) ja vesinikkütuseelemendiga elektrisõidukid (*Fuel Cell Electric Vehicles FCEV*).

3.4 Enamkasutatavad kütuseelemendid

Kütuseelemendid klassifitseeritakse peamiselt nendes kasutatava elektrolüüdi tüübi järgi. See klassifikatsioon määrab elemendis toimuvate elektrokeemiliste reaktsioonide tüübi, vajalike katalüsaatorite tüübi, temperatuurivahemiku, milles element töötab, vajaliku kütuse ja muud tegurid. Need omadused omakorda mõjutavad rakendusi, mille jaoks need elemendid on kõige sobivamad. [23], [26], [27]

Vesinikkütuseelemente saab elektrolüütide järgi jagada viide gruppi: prootonivahetusmembraani kütuseelement (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell PEMFC*), leeliseline kütuseelement (*Alkaline Fuel Cell AFC*), fosforhappe kütuseelement (*Phosphoric Acid Fuel Cell PACF*), tahkeoksiid kütuseelement (*Solid Oxide Fuel Cell SOFC*) ja sulakarbonaadist kütuseelemendid (*Molten Carbonate Fuel Cell MCFC*). Kõigis nimetatud kütuseelementides on vesinikul oluline roll anoodis ja neid kütuselemente nimetatakse vesinikkütuseelementideks. Lisaks on ka otsese metanooliga kütuseelement (*Direct Methanol Fuel Cell DMFC*), kus anoodis elektronidoonorina toimib metanool.

Sele 15 on ülevaade nimetatud kuuest kütuseelemendi grupist. [25], [30], [31], [33]–[36]



Sele 15. Kütuseelementide grupid [34]

4 VESINIKKÜTUS

4.1 Vesinik kütusena

Esimene vesinikkütusega lendav õhupall oli 1783. aastal prantsuse teadlase Jacques Charlesi looming. Ta sai inspiratsiooni vendade Montgolfier'de katsetusest kasutada kummiga immutatud siidist õhupallis vesinikku. Vesinikul näis olevat lendavate masinate kütusena kasutamisel tulevik garanteeritud. Seda arvamust tugevdas jäigale raamile ehitatud õhulaevade leiutamine. Neid kutsuti dirižaabliteks, kuid laiemalt tuntakse neid õhulaevu nende entusiastliku promootori Graf Ferdinand von Zeppelini järgi saksakeelse hüüdnimega Zeppelins. Zeppelinid olid peagi taeva vallutanud ning vedasid reisijaid ohutult ja sujuvalt üle Atlandi ookeani. Kuid hoolimata vesiniku ülimest kergusest on sellel üks ohtlik omadus – vesinik on väga tuleohtlik. Hiiglasliku Hindenburgi õhulaeva hävinemist 1937. aastal, mis toimus tõenäoliselt staatilisest elektrist põhjustatud tulekahjus, nägi šokeeritud publik uudistes üle kogu maailma. Katastroofis hukkus 35 inimest, pääses 62. Vesinikkütusel liikuv õhulaev oli sellega hukule määratud. [28], [37]

Kuid vesinik on selle põlemise efektiivsuse tõttu jäänud siiski kasutusele. Paljud NASA raketid, sealhulgas Apollo programmi Saturn V ja Space Shuttle'i peamootorite teine ja kolmas etapp, töötavad vedela vesiniku põletamisel puhta hapnikuga. Järjest rohkem tehakse katsetusi fossiilkütuste asendamiseks vesinikuga. Siin on vesinikul bensiini ees suur eelis, kuna selle kütusena kasutamise ajal ei eraldu atmosfääri kasvuhoonegaase. Põlemissaadus on lihtsalt vesi, mis on selle tootmise allikas, see tähendab, et toimub energia taaskasutamise ringprotsess. Energeetilisest ja keskkonna seisukohast on vesinik fossiilkütuste alternatiivina kasulik, kuna sisaldab massiühiku kohta palju rohkem energiat ning seda saab toota taastuvatest energiaallikatest nagu tuul, vesi ja hüdroenergia. Kõige tõenäolisem viis vesiniku kasutamiseks pole seda plahvatuslikult põletada, vaid kasutada kütuseelemendis, kus elektrokeemilise reaktsiooni abil toodetakse elektrit. [37]–[40]

4.2 Vesinikkütuse plussid ja miinused

4.2.1 Vesinikkütusena kasutamise eelised

Vesinikelementide kasutamise kõige olulisem eelis on see, et need ei eralda atmosfääri kahjulikke aineid. Seda tüüpi sõiduk toodab sõidu ajal ainult vett, muutes selle keskkonnale täiesti kahjutuks. Vesiniku kasutamine vähendab oluliselt saastet. Kui kütuseelemendis ühendatakse vesinik hapnikuga, toodetakse energiat elektri kujul. Seda elektrit saab kasutada sõidukite toiteks, soojusallikana ja paljudel muudel eesmärkidel. Vesiniku kasutamise eeliseks energiakandjana on see,

et hapnikuga ühinemisel on ainsad kõrvalproduktid vesi ja soojus. Vesinikkütuseelementide kasutamine ei tekita kasvuhoonegaase ega muid tahkeid osakesi. [41]

Sisepõlemismootor, mis käivitati 19. sajandi keskel ja mida pole sellest ajast peale hüljatud, võimaldab autol liikuda tänu kütuse ja õhu põlemisele, mis muundatakse soojusenergiaks ja omakorda mehaaniliseks energiaks. Peaaegu 200 aastaga on see mootor saavutanud oma maksimaalse jõudluse ja optimeerimise ning ei ole täna enam jätkusuutlik. [42]

Bensiinimootor kasutab ainult 20-25% sisestatavast energiast ja kaob 75-80% kütusest, mis tekitab soojust. Need arvud pole kuigi täpsed, kuid näitavad, kui ebaefektiivne on bensiini või diisliga töötav sisepõlemismootor. Elektrimootoris on protsendid täiesti vastupidised. 80% energiat kasutatakse ära ja ainult 20% läheb soojuskaoks. [43]

Vesinikajam pole tänapäeval veel laialt levinud ja üks sektor, mille jaoks see sobib, on raskeveotransport või rongid. Tegemist on transpordivahenditega, mis sisepõlemismootori alternatiivina elektriakudega varustamiseks vajaksid tohutuid, raskeid akusid ülipika laadimisajaga. Seega pakub vesinik eeliseid kompaktsemast tõukejõusüsteemist koos kiirete tankimisaegade ja pika sõiduulatusega. [41]–[45]

4.2.2 Vesiniku kütusena kasutamise puudused

Kui vesinikku ei toodeta taastuvatest allikatest, puudub vesinikkütuse kasutuegur. Praegu kasutusel olevast vesinikust on üle 96% hall vesinik. See maksab vähem, kuid selle mõju keskkonnale on kahjulik, sest iga saadud vesiniku kilo kohta tekib 10 kilo süsihappegaasi. Rohelise vesiniku tootmine ei käi praegu käsikäes puhastest allikatest elektritootmise kasvuga. [41]

Bensiini tankimine on kiire ja lihtne, samamoodi nagu elektriauto aku laadimiseks juhtme ühendamise. Vesinik on seevastu raskesti käsitletav gaas, kuna väikese energiatiheduse tõttu peab see olema kõrgel rohul (350–700 bari) tugevalt kokku surutud, et kütust mahuks piisavas koguses paaki. Umbes 600 km läbimiseks kulub 5-6 kg vesinikku. Kui vesinik ei oleks paagis kokku surutud, saaks paagitäiega läbida vaid 5 km. [42]

Vesinikku on keeruline tanklatesse transportida, kuna metaani ja maagaasi jaoks mõeldud torustikud ei sobi vesiniku transportimiseks. Alternatiiv oleks vesinikku transportida vedelas olekus, nagu naftaderivaate, kuid vesiniku vedel olek saavutatakse temperatuuril -253°C ning selle muundamiseks ja seejärel vedelal kujul hoidmiseks kulub palju energiat. On olemas vaid mõned vesiniku torujuhtmed, kuid need ulatuvad vaid mõne tuhande kilomeetri kaugusele üle kogu maailma. Kogu vesiniku

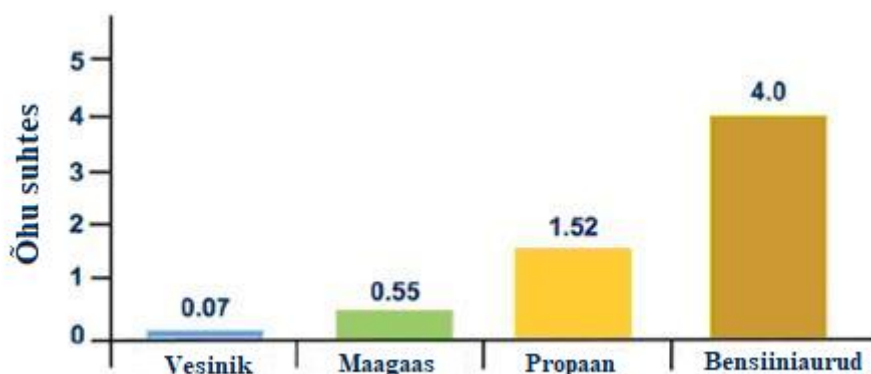
turustajate võrgustiku ehitamine autotranspordi jaoks tooks kaasa märkimisväärsed kulusid ja viivitusi. Elektrolüüs ja auruga reformimine, kaks peamist vesiniku ekstraheerimise protsessi, on äärmiselt kallid. [41]–[45]

4.3 Vesinik vs muud kütused

Vesiniku ohutuse hindamiseks tuleb seda võrrelda teiste tavaliste kütustega, nagu bensiin, propaan ja diislikütus. Kuigi ükski kütus pole 100% ohutu, on vesinikkütus paljudes aspektides osutunud tavakütustest ohutumaks. [45], [46]

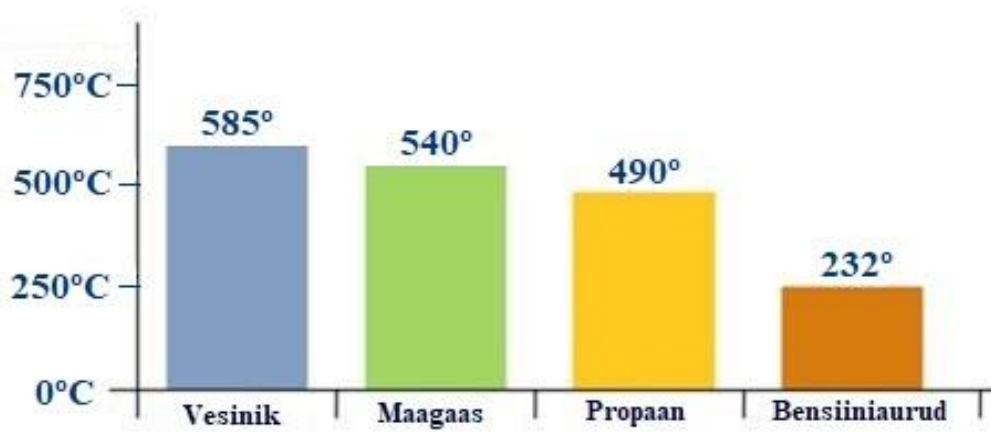
Vesinik on värvitu, lõhnatu, maitsetu, mittetoksiline kerge atmosfääritingimustes gaas. Vesinik on ka mitte söövitav, kuid võib mõningaid metalle hapraks muuta. Maagaas ja propaan on samuti lõhnatud, kuid tööstus lisab väävlit sisaldavat lõhnaainet, et inimestel oleks neid kergem tuvastada. Vesinikule lõhnaaineid ei lisata, kuna puuduvad piisavalt kerged lõhnaained ja olemasolevad lõhnaained saastavad kütuseelemente. Erinevalt tavakütustest ei ole vesinik mürgine. Samas on paljud tavapärased kütused mürgised või sisaldavad mürgiseid aineid, sealhulgas võimsaid kantserogeene. Veelgi enam, vesinikkütuseelementidel töötavate sõidukite puhul toodab vesinik ainult vett, samas kui tavakütuste põletamine sõidukites tekitab kahjulikku õhusaastet. Vesinikuleke ei saasta keskkonda ega ohusta inimeste ega eluslooduse tervist, kuid fossiilkütused võivad lekkimisel, maha valgumisel või põlemisel põhjustada olulisi tervise- ja keskkonnoahte. [45]–[47]

Vesinik on umbes 57 korda kergem kui bensiiniaur ja 14 korda kergem kui õhk (Sele 16). See tähendab, et kui vesinik vabaneb avatud keskkonnas, tõuseb see tavaliselt üles ja hajub kiiresti, vähendades oluliselt süttimisohu maapinnal. Siseruumide puhul tähendab see, et vesinik koondub lakke. Propaan ja bensiiniaur on aga õhust raskemad, mistõttu on tõenäolisem, et need jäävad maapinnale, suurendades nii inimesi kui ka hooneid kahjustavate tulekahjude ohtu. [45]–[47]



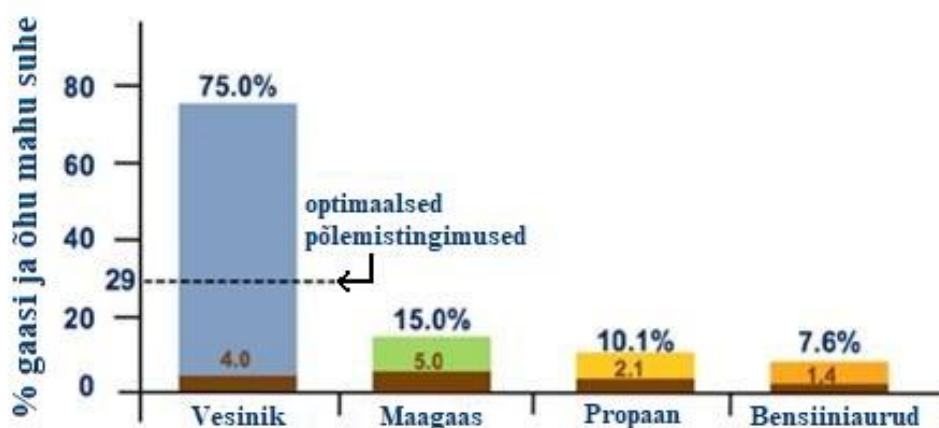
Sele 16. Suhteline aurustustihedus [47]

Aine isesüttimistemperatuur on madalaim temperatuur, mille juures see süttib iseeneslikult ilma leegi või sädemeta. Vesiniku ja maagaasi isesüttimistemperatuurid on väga sarnased. Mõlema isesüttimistemperatuur on üle 500°C, vesinikul üle 585°C, mis on palju kõrgem kui bensiiniauru isesüttimistemperatuur (Sele 17). [47]



Sele 17. Isesüttimise temperatuur [47]

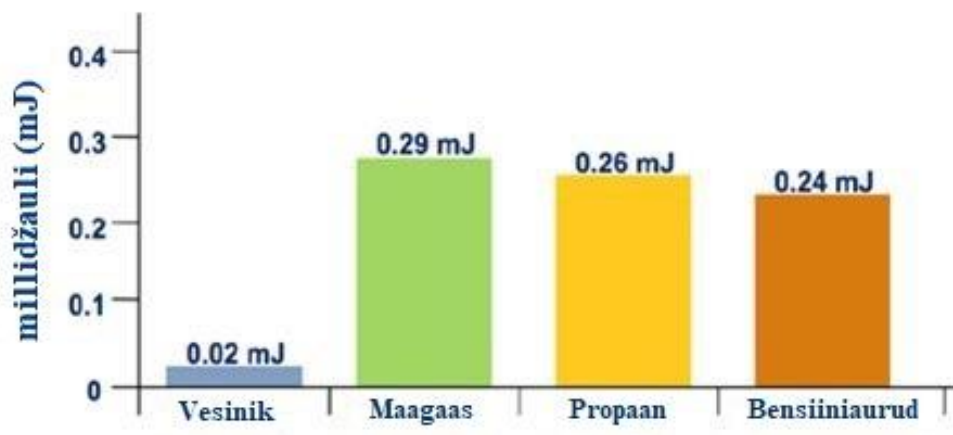
Põlemiseks on vaja kütust, õhku (hapnikku) ja süüteallikat. Vesiniku tuleohtlikkuse vahemik on võrreldes teiste kütustega väga lai (Sele 18). Alumine ja ülemine süttivuspiir näitavad kütuse protsenti kütuse ja õhu segus, mis on segu süttimiseks vajalik. Vesiniku puhul on alumine süttivuspiir 4% ja ülemine 75%. See lai süttivusvahemik muudab vesiniku põlemise kontrollimise keeruliseks. [45], [47], [48]



Sele 18. Süttivuse piir [47]

Optimaalse põlemistingimuse korral, kus vesiniku ja õhu suhe 29%, on vesiniku põlemise alustamiseks vajalik energia palju väiksem kui muude tavaliste kütuste puhul (Sele 19). See tähendab,

et väikesed sädemed võivad selle kergesti süüdata. Kuid madalates vesiniku kontsentratsioonides õhus on põlemise käivitamiseks vajalik energia sarnane teiste kütustega. [45], [47], [48]



Sele 19. Minimaalne süüteenergia [47]

Tabel 4 annab kokkuvõtliku ülevaate vesiniku parameetritest võrreldes teiste praegu kasutausel olevate kütustega [49].

Tabel 4. Vesinik vs muud kütused

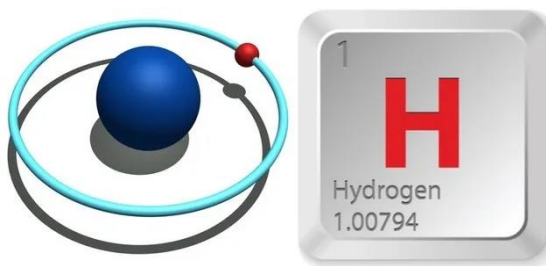
	Bensiin	Metaan	Prpoaan	Vesinik
Alumine süttivuspiir (% õhk)	15	5	2,1	4
Ülemine süttivuspiir (% õhk)	8	15	9,5	75,6
Leek punkt, °C	-20	-188	-104	-270,8
Madalaim süttimise energia, mJ	0,8	0,3	0,25	0,017
Energiatihedus, MJ/kg	46,4	55,6	46,44	120
Tihedus (20° C, 1 bar)	0,7-0,78 kg/l	0,718 kg/m³	2,01 kg/m³	0,089 kg/m³
Keemistemperatuur, °C	30-215	-161,5	-42	-252,7
Kriitiline temperatuur, °C		-82,5	96,6	-239,3
Kriitiline rõhk, bar		45	42,2	13
Difusioonikoefitsient, cm²/s		0,16	0,12	0,61

Turule on tulnud autosid, mis töötavad vesinikkütuseelementidel. Hiinas on maailmas kõige rohkem maanteeõidukite jaoks mõeldud vesiniku tankimisjaamu, kus saab vesinikkütust tankida samamoodi nagu bensiini või diislikütust ja sama aja jooksul kui traditsioonilise kütusega autot. Jaapan on nende tanklate arvult teisel kohal, järgnevad Lõuna-Korea, Saksamaa ja USA. [28], [38], [39]

5 VESINIK

5.1 Vesiniku olemus ja ajalugu

Vesinik on maailma kõige levinum keemiline element ja moodustab hinnanguliselt 75% universumi massist. Vesinikuaatomil on üks prooton ja üks elektron (Sele 20). Kui energiasektoris kasutatakse terminit vesinik, siis tähendab see lihtsat kahe vesinikuaatomi molekuli: H_2 . Vesinik H_2 on mittetoksiline, värvitu ja lõhnatu aine. Toatemperatuuril ja normaalarõhu tingimustes esineb vesinik gaasina ja on õhust ca 14,5 korda kergem. Vesiniku jahutamisel temperatuurini $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ muutub see vedelaks. Vesinikku on võimalik ka rõhu alla panna. Rõhu suurenedes suureneb vesiniku tihedus ja koos sellega suureneb energiahulk massi kohta (m^3). Kui toatemperatuuril ja 1 baari juures on vesiniku tihedus ligikaudu $0,09\text{ kg/m}^3$, siis 200 baari juures on vesiniku tihedus umbes 16 kg/m^3 . [28], [50]



Sele 20. Vesiniku aatom [28]

Vesiniku nime *Hydrogen* andis gaasile Antoine Lavoisier ja see on tuletatud kreekakeelsetest sõnadest „hydro“ ja „genes“, mis tähendavad vee moodustumist. Vesinik oli Paracelsuse, 16. sajandi Šveitsi alkeemiku, tuntud ka kui Theophrastus Philippus Aureolus Bombastus von Hohenheimi, tahtmatu avastus. 1500. aastate alguses avastas Paracelsus, et mullid, mis eralduvad väävelhappele rauapulbri lisamisel, olid tuleohtlikud. Ta ei teadnud midagi keemilisest reaktsioonist, mille metallisoolad moodustasid, vabastastades vesiniku. 1671. aastal tegi sama tähelepaneku Robert Boyle. Kuid kuna kumbki ei patenteerinud oma avastust, sai vesiniku avastajana tunnustuse Henry Cavendish. 1766. aastal kogus Henry Cavendish mullid kokku ja näitas, et need erinevad teistest gaasidest. Hiljem demonstreeris Cavendish, et vesiniku põlemisel tekib vesi, kummutades uskumuse, et vesi on element. [28], [29]

Aastal 1800 avastasid William Nicholson ja Anthony Carlisle elektrolüüsi. Selle protsessi käigus lagundatakse veemolekulid elektrivoolu abil vesinikuks ja hapnikuks. 1839. aastal avaldas William Grove esimese töötava kütuseelemendi kirjelduse ja 1842. aastal selle joonise. Kütuseelement muutis

keemilise energia otse elektrienergiaks. 1920. aastal kasutas Rudolf Erren autos kütusena vesinikku, aastal 1958 ehitas Francis Bacon T edukalt esimese kütuseelemendi. [28], [29]

Molekulaarse vesiniku loomine kasutab palju energiat ja selle eraldamine vabastab selle energia uuesti. See tähendab, et vesiniku tootmine ja seejärel selle kasutamine toimib sarnaselt nagu aku laadimine ja tühjenemine. [50]

5.2 Vesiniku omadused ja kasutusala

Kuigi vesinik on kõige levinum aine, leidub seda Maal harva puhtal kujul, mistõttu tuleb vesinikku ekstraheerida muude energiaallikate abil, näiteks veest või metaanist. Kuna vesinikul on kõrge kütteväärtus, umbes kolm korda suurem kui bensiinil, võib see taastuvatest allikatest toodetud või süsinikdioksiidi sidumise tehnoloogiatega kombineerituna võimaldada nullilähedast heitkogust. Vesiniku suur eelis on see, et see ei tekita hapnikuga põletamisel CO₂ heitmeid, sest vesiniku molekulil pole süsinikku. Jääkproduktina tekib ainult vesi. [51]

Üldiselt võib vesinikku leida kõikjal, sealhulgas atmosfääris, hüdrofääris ja litosfääris. Teisest küljest võib vesinikku toota ka tööstuslike mehhanismide abil. Toodetud vesinikuga kaasnevad aga saasteained nagu CO₂, mis ei ole kliimasõbralikud. Lisaks on enamik vesiniku tootmismeetodeid inimtekkeliste meetodite abil kulukad. Seevastu, looduslik vesinik on süsinikuvaba ja ökonoomne. Tegelikult ei nõua maa-alustest kivimitest vesiniku looduslik ekstraheerimine suuri puurkonstruktsioone, mida tavaliselt kasutatakse nafta- ja gaasitööstuses. Vesiniku kaevandamisel on olulised kolm aspekti: efektiivsus, toodetava vesiniku puhtus ja süsinikuheitmete hulk. [52]

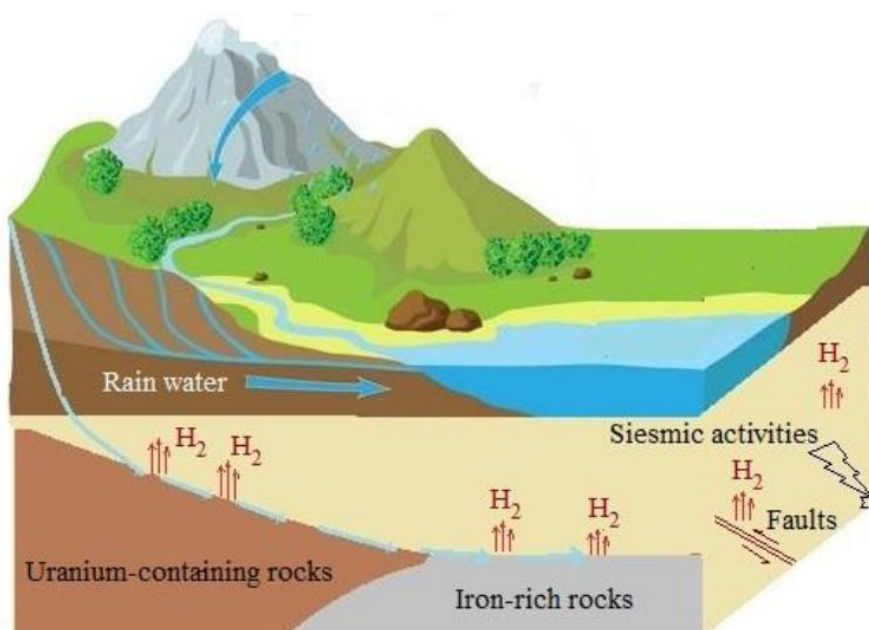
5.2.1 Looduslik vesinik

Erinevad teadlased on omistanud looduslikule vesinikule mitu päritolu [53]. Selliste hüpoteeside vaheline lahknevus võib tuleneda asjaolust, et loodusliku vesiniku iseloomustamiseks kasutatavad avastamiseseadmed ja teadmised on ebapiisavad. Loodusliku vesiniku jaoks on välja pakutud neli peamist päritolu (Sele 21):

- ✓ Põhjavee looduslik radiolüüsimine radioaktiivsetes kivimites leiduvate radioaktiivsete elementide abil.
- ✓ Serpentiniseerimisprotsess, mille käigus kuum põhjavesi reageerib rauarikaste moodustistega, nt ofoliitidega, ja vabaneb looduslik vesinik.
- ✓ Süvaallikate päritolu, milles looduslik vesinik väljub Maa tuumast ja vahevööst.

- ✓ Muutus püsivas stressirežiimis võib põhjustada lõhede taasaktiveerumist, maavärinaid ja piirkondliku tektoonika aktiivsust. [52]

Põhjavee radiolüüsi radioaktiivsest lagunemisest vabaneva energia abil pakkus algselt välja Vernadski. Radioaktiivse lagunemise energia võib kergesti lõhustada põhjavee molekule, tekitades hapnikku ja vesinikku. Sellist mehhanismi on nimetatud loodusliku vesiniku genereerimise kõige tõenäolisemaks protsessiks [54]. Väga väike osa (ligi 1%) kogu radioaktiivsest lagunemisest vabanevast energiast kulub põhjavee molekulide lagundamiseks. Ülejäänud 99% energiast muudetakse kivimite tahkes skeletis soojuseks. Seega võib väita, et kuna kivimite poorsus on suurem, on ka maagaasi toodetav maht suurem. [52], [55]



Sele 21. Neli peamist loodusliku vesiniku päritolu [52]

Loodusliku vesiniku teine päritolu on serpentiseerumisprotsess [56]. Selles protsessis on oksüdeerijaks põhjavesi, mis viib oksüdatsioonireaktsioonini ja vabastab loodusliku vesiniku. Serpentiseerumise käigus imendub kivimisse suur kogus vett, mis suurendab selle ruumala, vähendab tihedust ja hävitab algse struktuuri. Serpentiseerimisel tekivad metaan, vesiniksulfiid ja vesinik [53]. Maa vahevöö koosneb valdavalt ultramafilistest kividest, nagu peridoriit. Peridoriidi peamiseks mineraaliks on oliviin, mille keemiline valem on $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$. Kui oliviin reageerib kuuma põhjaveega, tekib kolm uut ühendit: hematüit, ränidioksiid ja molekulaarne vesinik. Lisaks vahevöö ultramafilistele kivimitele võivad maakoore basaltmoodustised reageerida ka kuuma põhjaveega, tekitades looduslikku vesinikku. Mõned uuringud maakoore basaltkivimitest püütud isendite kohta on kinnitanud vesiniku kõrget kontsentratsiooni. [52]

Kolmas loodusliku vesiniku päritolu on süvaallikad. Need arvatakse olevat sügavates kivimites Maa tuumas ja vahevöös. Mitmed uurijad on väitnud, et vesiniku kontsentratsioon maa-alustes kivimites suureneb koos sügavusega [57]. Seetõttu tuntakse seda spetsiifilist loodusliku vesiniku tüüpi süvaallikatena. Kuna puurimistööstus ei ole praegu suuteline Maa tuuma ega vahevööni jõudma, näib süvaallikate iseloomustamine raske ja keeruline ülesanne. Selle piirangu tõttu on mõned teadlased seostanud süvaallikaid mantlikivimitega, samas kui teised on seostanud neid tuumakivimitega. Mitmed uurijad on veendunud, et Maa tuum võib sisaldada looduslikku vesinikku rohkem kui ookeanilist vesinikku. [52], [58]–[60]

Neljas loodusliku vesiniku päritolu on pingerežiimi muutumine tektoonilis-aktiivsetes piirkondades. Mitmed eksperimentaalsed katsed on näidanud, et aktiivsetes lõhedes on vesiniku kontsentratsioon väga kõrge [61]. Nende testide põhjal jõuti järeldusele, et põhjavee ja vaserikaste kivimipindade vaheline reaktsioon tekitab vesinikku. Selle protsessi käigus tekkiva loodusliku vesiniku kogus on aga palju väiksem muust päritolust, näiteks serpentiniseerumisest [62]. Maavärinad võivad aktiveerida maakoore lõhesid, põhjustades seeläbi loodusliku vesiniku teket maa-alustes murrudes ja pragudes. Veelgi enam, põhjaveekihtide pikaajalised uuringud on näidanud, et vesiniku kontsentratsioonil vett kandvates kivimites on otsene seos piirkonna viimase tektoonilise aktiivsusega. Samuti on leitud, et äsja toimunud maavärinast põhjustatud murrudes on suurem H_2 sisaldus võrreldes vanade aktiveerimata murrudega. Sellest tulenevalt on teadlased pakkunud vesiniku kontsentratsiooni maavärinate prognoosimise indikaatoriks. [52]

5.2.2 Toodetud vesinik

Toodetud vesinikul on erinevaid värve. Vesiniku värvus esindab tootmistehnikat ja süsiniku mõju ulatust. Tabelis 5 on näidatud toodetud vesiniku vikerkaar [52].

Tabel 5. Toodetud vesiniku vikerkaar [52]

H ₂ Color	Primary Substance	Manufacture Technique
Green	Water	Water electrolysis using the electricity produced from renewable energy sources such as wind, solar and geothermal
Blue	Methane	Steam reforming (methane or natural gas reacts with water vapor) along with capturing and sequestering CO ₂)
Yellow	Water	Water electrolysis using the electricity produced from the combination of renewable energy sources, e.g., solar and non-renewable energy sources.
Turquoise	Methane	Methane pyrolysis (methane is decomposed to gaseous H ₂ and solid carbon). Afterward, the solid carbon is sequestered underground
Pink	Water	Water electrolysis using the electricity produced from nuclear sources
Grey	Methane	Steam reforming without carbon capturing
Black	Coal	Gasification process (adding water vapor or oxygen to the highly heated coal)

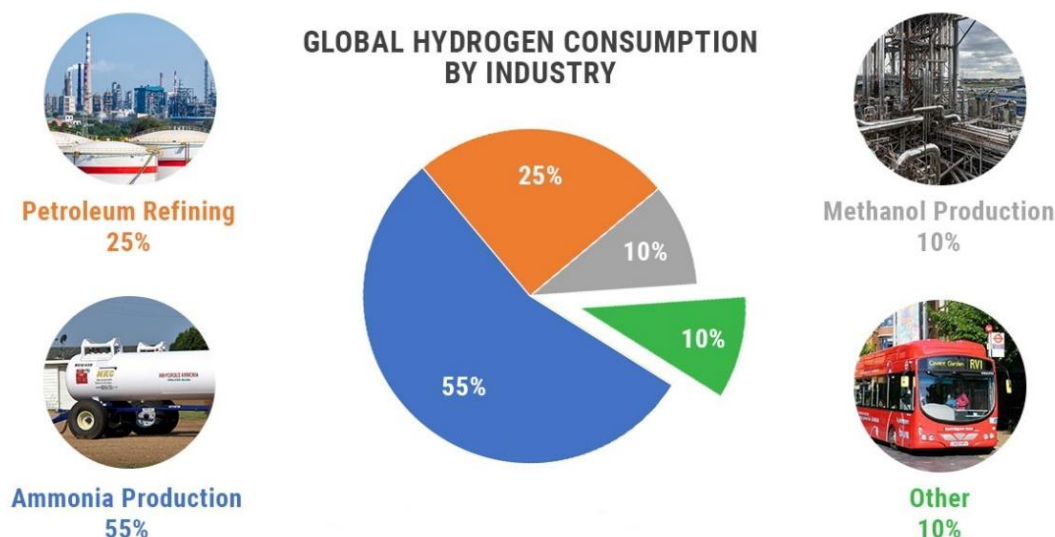
95% maailma vesinikust toodetakse fossiilkütustel põhineva reformimise teel, mille kõrvalsaaduseks on CO₂. Molekulaarse vesiniku tootmisel saab kasutada erinevaid aineid, nagu vesi, metaan (või maagaas) ja kivisüsi. Molekulaarse vesiniku tootmine veest, metaanist ja kivisööst toimub vastavalt elektrolüüsi, aurumetaani reformimise (*Steam Methane Reforming* SMR) ja gaasistamisprotsessi teel. SMR on kõige levinum ja paremini arenenud fossiilkütuste reformimise tehnoloogia. Kõige säästvam ja süsinikuvaba toodetud vesinik on roheline vesinik [63]. Rohelise vesiniku tootmisel puuduvad CO₂ heitkogused, mis tähendab, et vesinikku toodetakse taastuvaid allikaid kasutavate tehnoloogiate või süsinikuneutraalsete tehnoloogiate abil. Teist sobivat toodetud vesiniku tüüpi nimetatakse siniseks vesinikuks [64]. Seda toodetakse SMR tehnika abil, mille käigus kogutud CO₂ kogutakse ja eraldatakse. Seevastu kõige keskkonnavaenulikumad toodetud vesiniku liigid on vastavalt gaasistamise ja aurreformimise (ilma CO₂ kogumise ja eraldamiseta) teel saadud must ja hall vesinik. Halli vesinikku toodetakse praegu kui kõige levinumat vesinikutüüpi. Siiski paiskab see igal aastal atmosfääri tohutul hulgal – ligi 900 miljardit kg CO₂. [51], [52], [63]–[67]

Tänapäeval toodetakse Seejärel rakendatakse kasvuhoonegaaside eemaldamiseks süsiniku kogumise, kasutamise ja säilitamise (CCUS) tehnoloogiat, mille tulemuseks on nn sinine vesinik [64]. Rohelist vesinikku toodetakse taastuvenergia põhineva elektrolüüsi teel. Seejärel on biomassist valmistatud vesinik CO₂ suhtes neutraalne ja seda võib määratleda kui „roheline“. [51], [66], [67]

Madala hinnaga ja minimaalse süsinikdioksiidi heitkogusega energia pakkumine on üks pakilisemaid probleeme maailmas. Vesinik on säästva transpordi ja muude valdkondade jaoks hädavajalik. Eriti kemikaalide ning raua ja terase sektoris, kus heitkoguste vähendamine on osutunud keeruliseks [68]. Vesinikkütusel töötavad sõidukid parandaksid õhukvaliteeti ja edendaksid energiasalvestust. Vesinik võib toetada ka muutuva taastuvenergia integreerimist elektrisüsteemi, olles üks väheseid võimalusi energia salvestamiseks. [51], [66]

5.3 Vesiniku kasutamine tööstusharudes

Vesinik on kiiresti muutumas ülemaailmseks alternatiivenergia konkurendiks, kuid tegelikult moodustavad need rakendused vähem kui 10% ülemaailmsest vesinikutarbimisest (Sele 22). Lõviosa vesiniku kasutusest läheb tegelikult tööstuslikele rakendustele. Näiteks ammoniaagi tootmine moodustab 55% kogu maailmas kasutatavast vesinikust, 25% kasutatakse rafineerimisel ja umbes 10% kasutatakse metanooli tootmiseks. Muud rakendused, nagu taastuvenergia, moodustavad umbes 10%. [51], [69]–[71]



Sele 22. Vesiniku kasutamine tööstusharudes [71]

Põllumajandus- ja keemiatööstus – vesinik on põhitooraine, mis on vajalik ammoniaagi (NH_3) tootmiseks, tuntud ka asaan nime all. Ammoniaak on oluline osa väetistest, mida kasutatakse põllumajandustööstuses üle maailma. Ammoniaaki saab kasutada ka keskkonnasõbraliku külmutusagensina (R-717). [69], [70]

Nafta rafineerimistööstus – vesinikku kasutatakse tavaliselt protsessis, mida nimetatakse hüdrokrakkimiseks, et luua naftasaadusi, sealhulgas bensiini ja diislikütust. Hüdrokrakkimine on protsess, mille käigus süsivesinike molekulid lagundatakse väiksemateks molekulideks. Naftatööstuses kasutatakse vesinikku ka saasteainete (nt väävli) eemaldamiseks ja metanooli (CH_3OH) loomiseks. [69], [70]

Toiduainetööstus – vesinikku kasutatakse küllastumata rasvade muutmiseks küllastunud õlideks ja rasvadeks, sealhulgas hüdrogeenitud taimeõlideks, nagu margariin ja võimäärded. Hüdrogeenimine on töötlemisetapp, kus õlides sisalduvad küllastumata rasvhapped reageerivad gaasilise vesinikuga, et suurendada küllastumist. See protsess parandab õli oksüdatiivset stabiilsust ja annab õlile mitmeid funktsionaalseid omadusi. [72]

Metallurgia – Vesinikmetallurgia kasutab süsinikdioksiidi emissiooni vähendamiseks redutseerijana süsiniku asemel vesinikku. Vesinikku saab kasutada täiendava redutseerijana BF-BOF teel (H_2 -BF) või ainsa redutseeriva ainenä raua või DRI (H_2 -DRI) otsese redutseerimise protsessis. [69], [73]

Keevitamine – vesinikku kasutatakse keevitamisel peamiselt aatomvesinikkeevitusel (AHW). Selles protsessis jagatakse vesinik elektrikaare kaudu aatomiteks. Need aatomid ühinevad, et luua leek, mis

sulatab metalle. Vesinikkeevituses toimib vesinik redutseerijana, lihtsustades oksiidide eemaldamist ning soodustades puhast ja tõhusat keevitusprotsessi. Vesinikkeevitustemperatuur 3400-4000°C. Vesinikku kasutatakse eekõige kõrgsulavate metallide keevitamisel, kuna keevitamisel reageerib see hapnikuga ja eraldab suurel hulgal energiat. [74]

Lehtklaasi tootmine – lehtklaas on teatud tüüpi klaas, mida kasutatakse sageli akende ja klaasuste jaoks. Selle tootmisel kasutatakse vesinikku ja lämmastikku, et vältida oksüdeerumist ja tootmisdefekte. [75], [76]

Elektroonika – elektroonikatööstuses on vesinik tõhus redutseerija ja söövitav aine. Seda kasutatakse kuvarite, LED-lampide, pooljuhtide ja fotogalvaaniliste rakenduste osades. Vesinikku kasutatakse ränipindade puhastamiseks oksiididest.[77]

Meditiin – meditsiinitööstuses kasutatakse vesinikku laialt kasutatava antiseptikumi vesinikperoksiidi (H_2O_2) loomiseks. Hiljuti on vesinikku uuritud ka mitmete erinevate haiguste ravigaasina. Teadlased on leidnud, et H_2 võib otseselt reageerida rakkudes olevate aktiivsete vabade radikaalidega, nagu hüdroksüülvabad radikaalid ja peroksünitro rühm, pärsvad oksüdatiivset stressi, vähendavad põletikku, pärsvad raku apoptoosi ja vähendavad fibroosi. Samal ajal ei häiri H_2 organismi ainevahetust. [78], [79]

Transport – vesinikku kasutatakse kütusena kütuseelementides kergsõidukitise ning pikamaa- ja raskeveokites. Laevanduses, lennunduses ja raudteetranspordis kasutatakse vesinikul põhinevaid kütuseid. [33]

5.4 Vesinikuressursside kasutamine Eestis

2021. aastal Riigikantselei strateegiabüroo tellimusel läbi viidud Eesti vesinikuressursside kasutuselevõtu analüüs [3] näitas, et vesinikkütuseelementide rakendamisel transpordivaldkonnas on suur potentsiaal. Transport on sektor, kus vesinikustrateegiate võrdluses tuuakse vesiniku kasutuselevõttu enim esile. Prognoositakse, et tänu vesiniku hinna langemisele u 1,9 eur/kg, muutub vesinikautode kasutuselevõtt pikemas perspektiivis veelgi teostatavamaks. Kasvuhoonegaaside (KHG) ja õhusaasteainete heitkoguste vähendamisel on vesinik suure potentsiaaliga alternatiivkütus. Eesti Vabariigi Valitsus on eraldanud toetuse vesiniku kütuseelementide kasutuselevõtu rakendusuringute läbiviimiseks. [3]

Praegu tekib umbes 50% lämmastik-oksiidide segust sise põlemismootoriga ja just eriti diiselmootoriga transpordivahendite töötamisel, siis planeeritakse alustada eelkõige linnaliinibusside, väikeautode, mikrobusside, veomasinate ja eriotstarbeliste masinate üleviimisest vesinikuga töötavatele kütuseelementidele. Lisaks leiti, et vesinikku on võimalik kasutada parvlaevade, mootorpaatide ja kaubalaevade kütusena. [80]

Aastaks 2026 plaanib Eesti investeerida vesiniku terviktehnoloogiate kasutuselevõtu edendamisse 49,1 miljonit. Toetusmeede kavandatakse rahastada taaste- ja vastupidavusrahaastuse vahenditest. [80]

6 HOOLDUS- JA REMONDITÖÖKOHT

6.1 Toyota Elke tulevikuperspektiiv

Vesinikku peetakse üheks paljulubavaks kütusevariandiks süsinikdioksiidi vähendamisel Euroopas, kuna see pakub potentsiaali kasvuhoonegaaside heitkoguste ja õhusaaste oluliseks vähendamiseks. Vesinikkütusel töötavaid sõidukeid on võetud kasutusele mitmes Euroopa linnas ning nende kasutamine lähiaastatel suureneb. Ühised jõupingutused vesinikkütusega autode populaarsuse suurendamiseks kogu Euroopas toovad teedele tuhandeid uusi sõidukeid, ühendades autotootjad ja kütusetarnijad.

Eeldatakse, et vesinikkütusega sõidukite kasutuselevõtt avaldab märkimisväärset mõju mitmele sektorile. See hõlmab autotööstust, mis peab investeerima teadus- ja arendustegevusse, et toota tõhusamaid ja taskukohasemaid vesinikkütusega sõidukeid. See hõlmab ka energiasektorit, mis peab investeerima vesinikkütuse tootmisse ja turustamisse. Lisaks nõuab vesinikkütusega sõidukite kasutuselevõtt koostööd avaliku ja erasektori vahel, sealhulgas valitsused, sõidukitootjad, energiaettevõtted ja infrastruktuuri pakkujad.

Vesinikkütuseelemendiga sõidukite hooldus- ja remonditöökohta vajadus muutub üha olulisemaks. Lääne-Euroopas on vesinikauto populaarsus tõusutrendis, vesinikutaristu loomine on jõudmas ka Eestisse. Sellest tulenevalt tekib vajadus vesinikautode hooldamiseks ja remondiks. Toyota Elke soov on pakkuda oma klientidele alati parimaid lahendusi ja võimalusi ning antud töö eesmärk on projekteerida nõuetele vastav vesinikauto hooldus- ja remonditöökoda.

6.2 Remondiala

Vesinikkütusega auto hooldustöid saab teostada üldisel sõidukite hoolduseks ettenähtud tööalal, kasutades vesinikauto hoolduseks vajalikke eritööriistu. Eraldi on vaja vesinikukütusega sõiduki remondiala, ehk ala kus toimub vesinikkütuse komponentide rikkeotsing ja vajadusel ka osade eemaldamine ning asendamine. See remondiala peab olema täielikult eraldatud ja turvatud. Remondialal, kus remonttööd on kavas või juba teostatakse, on õigus viibida ainult isikutel, kes on vastavalt koolitatud ja instrueeritud. [5]

Vesiniku ainulaadsete omaduste tõttu on vajalik vesinikkütusega autode remontimisel täiendavad ettevaatusabinõud. Remondiala projekteerimine peab tagama, et seal töötamine on ohutu vesiniku tahtmatu eraldumise korral. Kuna vesinik on õhust kergem, tõuseb see vabastamisel üles ja võib

koguneda hoone lakke ning nurkadesse, kus ta ei saa kergesti hajuda. Vesinikuauru kogunemine kinnistesse nurkadesse on väga ohtlik, kuna see suurendab tuleohtliku segu tekkimise tõenäosust. Kui leidub mingi süüteallikas, kas säde või leek, võib see põhjustada tulekahju või plahvatuse. Sellist riski saab maandada, kui remondialal on katus, mis on kaldega väljatõmbe ventilatsioonitava suunas ja lisaks õhutusavad põranda lähedal. Täiendavad õhutusavad on vajalikud, sest täiendav õhuvool aitab lekkinud vesiniku paremini välja ventileerida.[1], [2], [81]

Remondiala eraldamiseks saab kasutada tulekindlaid tõmbekardinatega seinu, mis liiguvad rullikutega siinil ning avanevad kiiresti, tagades alale kiire sisse- ja väljapääsu. Tulekindlad kardinad peavad vastama E klassi tuleohutusnõuetele E30, E60. [82]–[84]



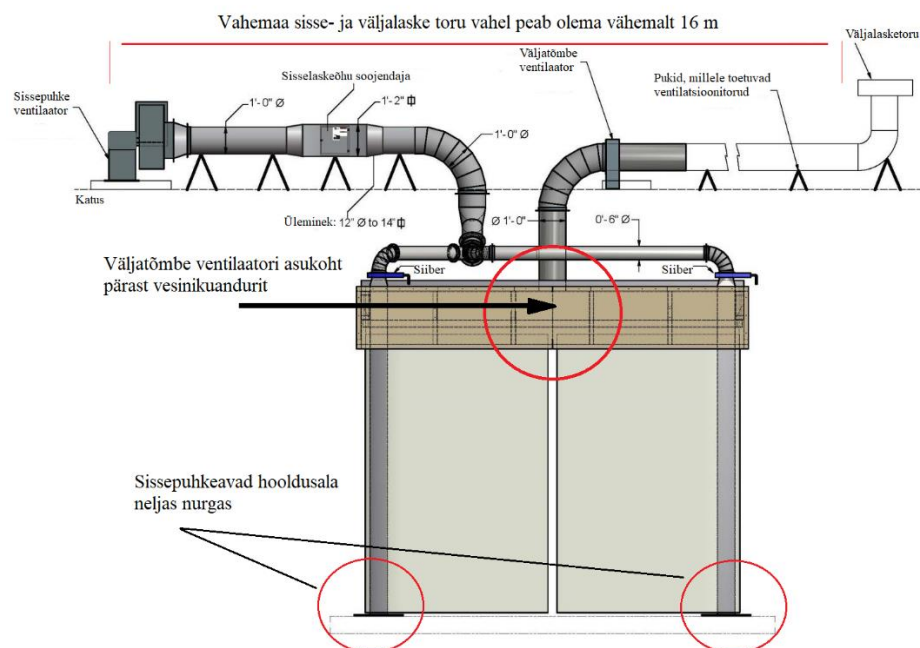
Sele 23. Vesinikkütusega auto remondiala [27]

Vesinikkütusega auto remondiala (Sele 23):

1. Eraldatud, kõrvalistele isikutele suletud ruum.
 - a) Katusega ala, mis toetub 4-le postile.
 - b) Tõmbekardinatega seinad (vastavalt tuleohutuseeskirjadele).
2. Ventilatsioonisüsteem; väljatõmme laes, alumises 4 nurgas õhutusavad lisaõhu saamiseks.
3. Vesinikuandurid, mis on ühendatud nii heli- kui ka visuaalse häiresüsteemiga.
4. Ventilatsiooniklapiga vesiniku tühjendusdüüs.
5. Spetsiaalsed laelambid, suletud, karastatud klaasist.
6. Tuletõrjevihmutid [27].

6.2.1 Ventilatsioon

Vesinikkütuseelemendiga sõidukite ventilatsiooninõuded võivad mõjutada nii ümberehitatud kui ka spetsiaalselt ehitatud remonditöökodasid. Ventilatsioonisüsteemil on oluline roll kütuse vabanemise tõhusal kõrvaldamisel ja selle kontsentratsioonitaseme vähendamisel. Oluline on õige ventilatsiooni paigutus (Sele 24). Kui sissetõmbe ja väljapuhke avad asuvad samal küljel, siis vähendab see vesinikuaurude hajumist, samas kui ristventilatsioon, kus sissetõmbe ja väljapuhke avad asuvad töökoja vastaskülgedel, suurendab see õhuvoolu ja vesinikuaurude kiiremat hajumist. Ventilatsioon peab tagama piisama õhuvahetuse ja korralik lokaalne kohtväljatõmbe ventilatsioon on tõhus meetod ohtlike ja toksiliste heitkoguste kontrollimiseks. Kohtväljatõmbe ventilatsiooni mõte on püüda saasteaine kinni enne, kui see jõuab töökoja õhuruumi. [81], [85]



Sele 24. Remondiala ventilatsioon

Ventilatsiooniseadmetena tuleb kasutada kompleksseid, standarditele vastavaid ventilatsiooniseadmeid, mis on testitud vastavalt standarditele EVS-EN 1886 ja EVS-EN 13053. Ruumide väljatõmme toimub soojustagastusega üldväljatõmbesüsteemidega, vastavalt spetsiifilisele vajadusele tuleb kasutada ka lokaalseid väljatõmbesüsteeme. Lokaalsete kohtväljatõmbesüsteemide projekteerimisel on oluline jälgida, et töötsoonis oleks tagatud saasteainete piirkontsentratsioon, mis on eraldi defineeritud seaduses või standardis. [86]

6.2.2 Vesinikutuvastussüsteemid

Vesinik põleb helesinise leegiga, mida päevavalguses on raske näha. Leek on suitsuvaba ja ei kiirga väga palju soojust. Seetõttu võib vesiniku leegi tuvastamine olla keeruline. Infrapunakaamerat saab kasutada vesiniku leegi soojussignatuuri vaatamiseks. Vesinikautosid teenindavatesse töökodadesse tuleb paigaldada vesinikutuvastamissüsteemid, mis suudavad jälgida vesiniku taset ruumis ja on ühendatud nii heli- kui ka visuaalse häiresüsteemiga (Sele 25). [1], [81]



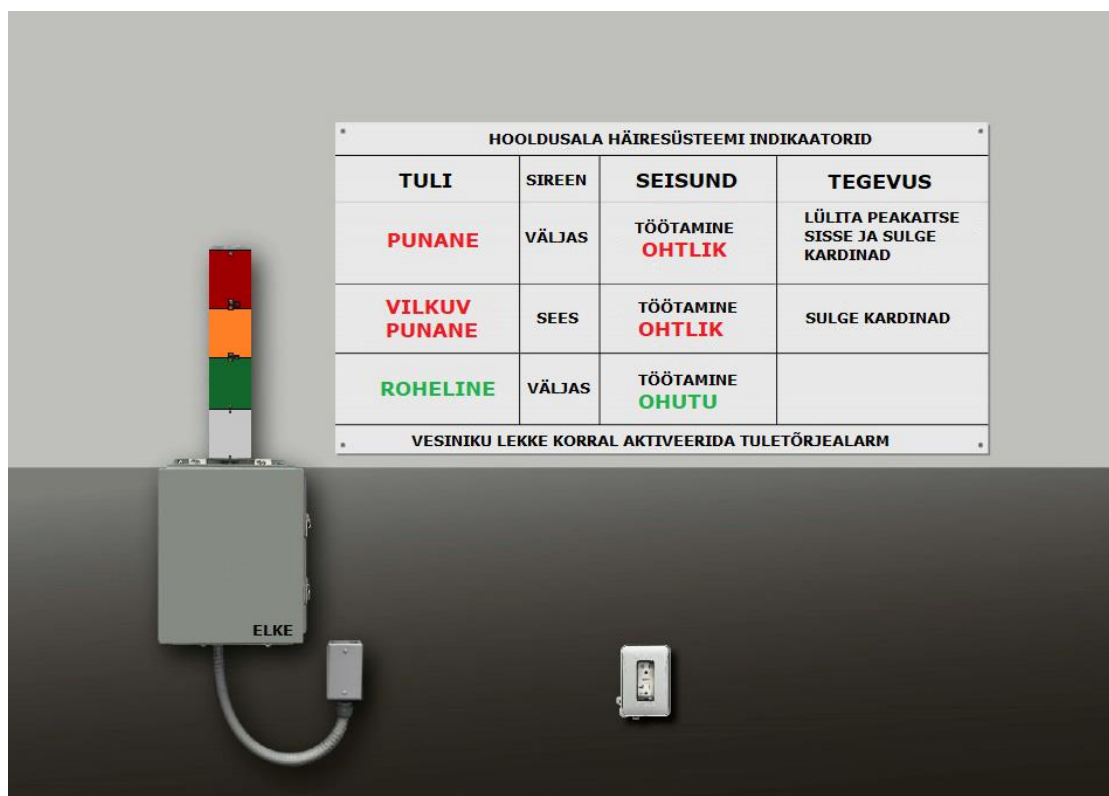
Sele 25. Vesinikutuvastamissüsteem [27]

Vesinikuandurid kasutavad vesiniku olemasolu ja kontsentratsiooni määramiseks mitmeid mehhanisme, sealhulgas difusioonitüüpi, proovivõttu, gaasikromatograafiat, massispektromeetria, katalüütilist helmeid ja soojusjuhtivust. Remondialale sobivate vesinikuandurite valimine tähendab

iga vesinikgaasidetektori funktsioonide ja keskkonnatingimuste mõistmist. Vesinikuanduri valimisel tuleb arvesse võtta mitmeid funktsionaalseid parameetreid:

- ✓ Jõudlus: vesinikuandurite optimaalne jõudlus saavutatakse siis, kui konkreetse rakenduse jaoks valitakse kõige sobivam andur. Andureid saab valida laia töövahemiku, optimeeritud tundlikkuse, kiirete reaktsiooniaegade, pideva töö ja märgades oludes kasutamise järgi.
- ✓ Eluiga: rakendus- ja tegevuskulude ning asendus- ja hooldusvajaduste määramisel on oluline teada seadmete kasutusiga.
- ✓ Töökindlus: anduritel peab olema pikaajaline töökindlus, et saada ühtlaseid tulemusi. Samuti on oluline teada kõiki tingimusi, mis võivad põhjustada valehäireid või kahjustada andurit viisil, mis mõjutab selle töökindlust. [87]–[89]

Kui remondialas teostatakse vesinikauto remonttöid, peavad olema kardinaid suletud ja vesinikuhäiresüsteem (Sele 26) sisse lülitatud. Süsteemi sisse lülitades hakkab kõigepealt põlema valge tuli, see näitab, et süsteem on tööks valmis. Kui kardinaid on suletud ja ventilatsioon töötab, põleb süsteemis roheline tuli, kui kardinaid jäävad lahti, hakkab põlema punane tuli. Kui kardinaid ei suleta 3 minuti jooksul, hakkab punane tuli vilkuma ja lülitub tööle sireen. [89]



Sele 26. Häiresüsteem

Kui vesiniku kontsentratsioonitase õhus on 10%, hakkab põlema kollane tuli ja lülitub tööle sireen, suureneb väljatõmbeventilatsiooni kiirus. Remondialas tuleb kõik tööd katkestada ja alalt koheselt väljuda. Uuesti remondialasse võib siseneda siis, kui kollane tuli on kustunud. Kui vesiniku kontsentratsioonitase õhus ületab 25%, käivitub häiresireen ja hakkab vilkuma punane tuli. Kõik tööd tuleb koheselt katkestada nii remondialas kui ka selle vahetus läheduses. Senikaua kuni alarm töötab ja vilgub punane tuli, ei tohi remondialasse siseneda. [89]

6.2.3 Valgustus

Ohutuks tööks on õige valgustus väga oluline. Kui võimalik, siis tuleks päevasel ajal maksimeerida naturaalse valguse osakaalu. Selleks, et tagada nõuetekohane valgustatus, peab olema lisaks ka tehnilik valgustus. Vesinikkütusega auto remondialas peavad olema suletud, karastatud klaasist plahvatuskindlad spetsiaalsed laelambid. Karastatud klaas on teatud tüüpi turvaklaas, mis on termiliselt või keemiliselt töödeldud ja selle tugevus võrreldes tavalise klaasiga on suurem. [90]–[92]

Vabariigi Valitsuse poolt 14.06.2007 vastu võetud määruse nr 176 „Töökohale esitatavad töötervishoiu ja tööohutuse nõuded“ § 8 lg 1 kohaselt eeldatakse, et töökoha sisevalgustuse nõuded on täidetud, kui töökoha valgustuse osas on juhindutud töökohavalgustuse standardist. Standard EVS-EN 12464-1 näeb ette miinimumnõudeid valgustusele tegevuste ja tööpiirkondade kaupa vastavalt töö iseloomule (Tabel 6). Pinnale langeva valgusvoo ja selle pindala suhet näitab valgustihedus (Em), mida väljendatakse luksides (lx). Vajadusel tuleb töökoha valgustatust suurendada vastavalt töötaja eale või tervises seisundile. [93], [94]

Tabel 6. Töökoha valgustus

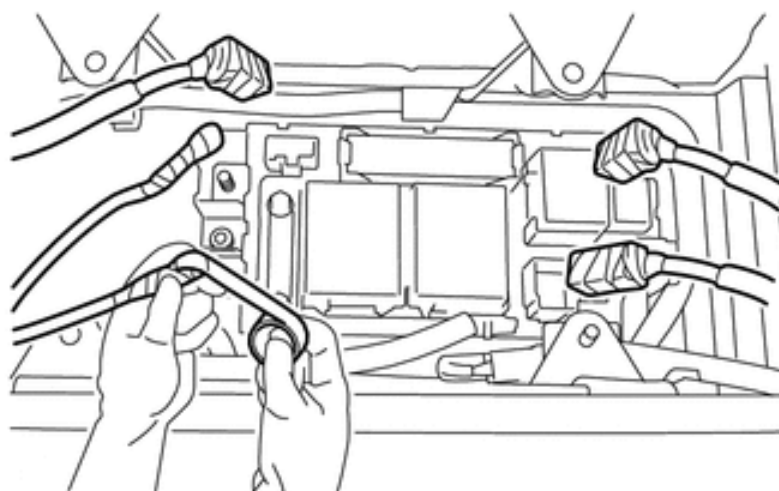
Tegevus/piirkond	Valgustihedus Em (lx)
Keevitamine	300
Jämedad ja keskmised masinatööd	300
Täppis masinatööd	500
Täppistööriistade, kaliibrite ja rakiste valmistamine peen- ja mikromehhaanika tööd	1000
Märkimine ja kontroll	750
Töö ja lõikeriistade valmistamine	750
Pinnatöötlus, lakkimine ja värvimine	750

Töökoha sisekliima peab nende tööde puhul, mis nõuavad teatavat füüsilist pingutust või pidevat liikumist, olema temperatuurivahemikuks 16-22°C. Õhuniiskus peaks olema mõõdukas, kuna liiga kuiv õhk tekitab limaskestade ärritust ning liiga niiske (85% ja enam) põhjustab hallituse teket. [93]

6.3 Ohutusnõuded

Vesinikkütusel töötavate autode remontimisel tuleb järgida väga rangeid ohutusnõudeid. Kuna lisaks vesinikkütusele on autod varustatud kõrgepingesüsteemiga, siis selle süsteemi õigeks käsitsemiseks tuleb kindlasti teha kõrgepingeahela kontroll ja hooldus vastavalt ettenähtud juhiste. Nende eiramine võib põhjustada tõsiseid vigastusi või elektrilööke. Vesinikkütusel töötavatel autodel on hübriidsüsteem, mis töötab kõrgepingeakuga (*high voltages* HV).

- 1) Nikkel-metallhüdriidaku ehk lühemalt NiMH-aku sisaldab elektrolüüti, milles on kaaliumhüdrokksiidi sisaldav tugev leeliselahus.
 - 2) Liitiumioonaku ehk Li-ioonaku sisaldab süsihappeestril põhinevat orgaanilist elektrolüüti. [26]
- Kõrgepingesüsteemi hooldamiseks ja kontrollimiseks peavad tehnikud läbima spetsiaalse väljaõppe. Kõik kõrgepinge kaablid ja pistikud on oranži värvi. HV akul ja muudel kõrgepingekomponentidel on hoiatussildid „Kõrgepinge“. Kui kõrgepingeahela kaablite või pistikuga on probleeme, ei tohi neid parandada, vaid need tuleb välja vahetada. Enne kõrgepingesüsteemi kontrollimist või hooldamist tuleb elektrilöögi vältimiseks järgida kõiki ohutusmeetmeid, nagu isoleeritud kinnaste kandmine ja hoolduspistiku käepideme eemaldamine. Eemaldatud hoolduspistiku käepidet peab tehnik kandma endaga kaasas, et teised tehnikud seda sõiduki hooldamise ajal kogemata ei paigaldaks. Sõiduki hooldamisel ei tohi tehnik kanda metallesemeid, nagu metallosadega pliiatsid või isoleerimata metalltööriistad, mis võivad kogemata maha kukkuda ja põhjustada lühise. Enne kõrgepingeklemmi puudutamist tuleb kätte panna isoleeritud kindad ja veenduda elektrilise testeri abil, et klemmi pinge on 0 V. Peale kõrgepinge pistiku või klemmi lahtiühendamist tuleb need kohe isoleerida (Sele 27). Kõrgepingeklemmide poldid ja mutrid tuleb pingutada ettenähtud jõuga, kasutades momentvõtit. Nii ebapiisava kui ka liigse jõuga pingutamine võib põhjustada rikkeid. [26]



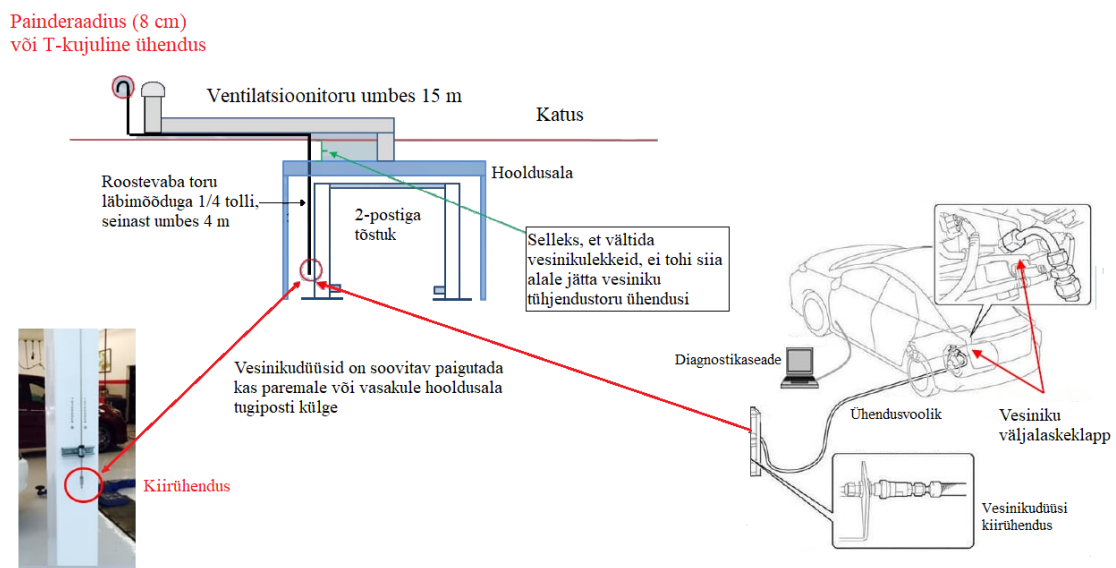
Sele 27. Pistikute isoleerimine [26]

Pärast kõrgepingesüsteemi hooldamist ja enne hoolduspistiku käepideme uuesti paigaldamist tuleb veenduda, et ei ole jäetud ühtegi osa ega tööriista sõidukisse. Tuleb kontrollida, et kõrgepinge klemmid on tugevalt pingutatud ja pistikud õigesti ühendatud. Hübriidsüsteemi komponentide, nt HV-aku paigaldamisel tuleb veenduda, et kõigi ühenduste polaarsus on õige. [26]

6.3.1 Ettevaatusabinõud enne auto remonttöid

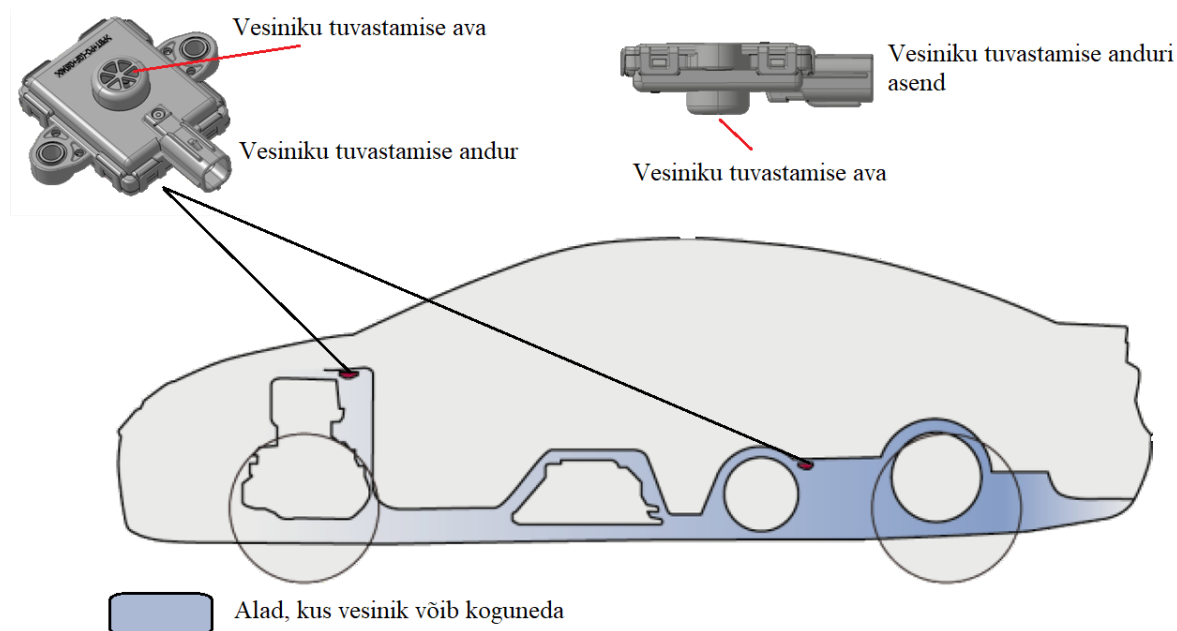
Vesinikkütusel töötava auto remondiks ettevalmistamine algab sõiduki visuaalse kahjustuse hindamisest ning seejärel tuleb veenduda sõiduki lekkekindluses – kontrollitakse, et vesinikkütuse tarneahelates ei esine lekkeid. Auto esmane kontroll toimub välitingimustes, võimaliku lekke korral peab vesinikkütus olema ümbritsevasse keskkonda pihkunud. Juhul kui mahuti ei ole kahjustunud, tuleb käsitsi sulgeda kütusemahuti klapiid, selleks et välistada edasisi lekkeid. Kütusesüsteemi tühjendus (Sele 28) toimub autol oleva keskmise ulatusega rõhuregulaatori juures asuva väljalaske klapi kaudu. Tühjendusvoolik on ühendatud seina küljes asuva vesiniku tühjendusdüüsiga. Autoga ühendatakse diagnostikaseade, mis reguleerib vesinikupaakide survet. See on vajalik selleks, et paakidest vesinik kätte saada ja läbi tühjendusdüüsi atmosfääri lasta. [5], [26]

Vesiniku õhutustoru ehk vesiniku tühjendusdüüse kasutatakse vesiniksõidukite süsteemi tühjendamiseks. Vesiniku tühjendusdüüs peab olema suunatud kas üldisesse ventilatsiooni või iseseisvalt välja. Vesiniku õhutustoru peab olema konstrueeritud nii, et see takistaks niiskuse või jää kogunemist torusse. [95]



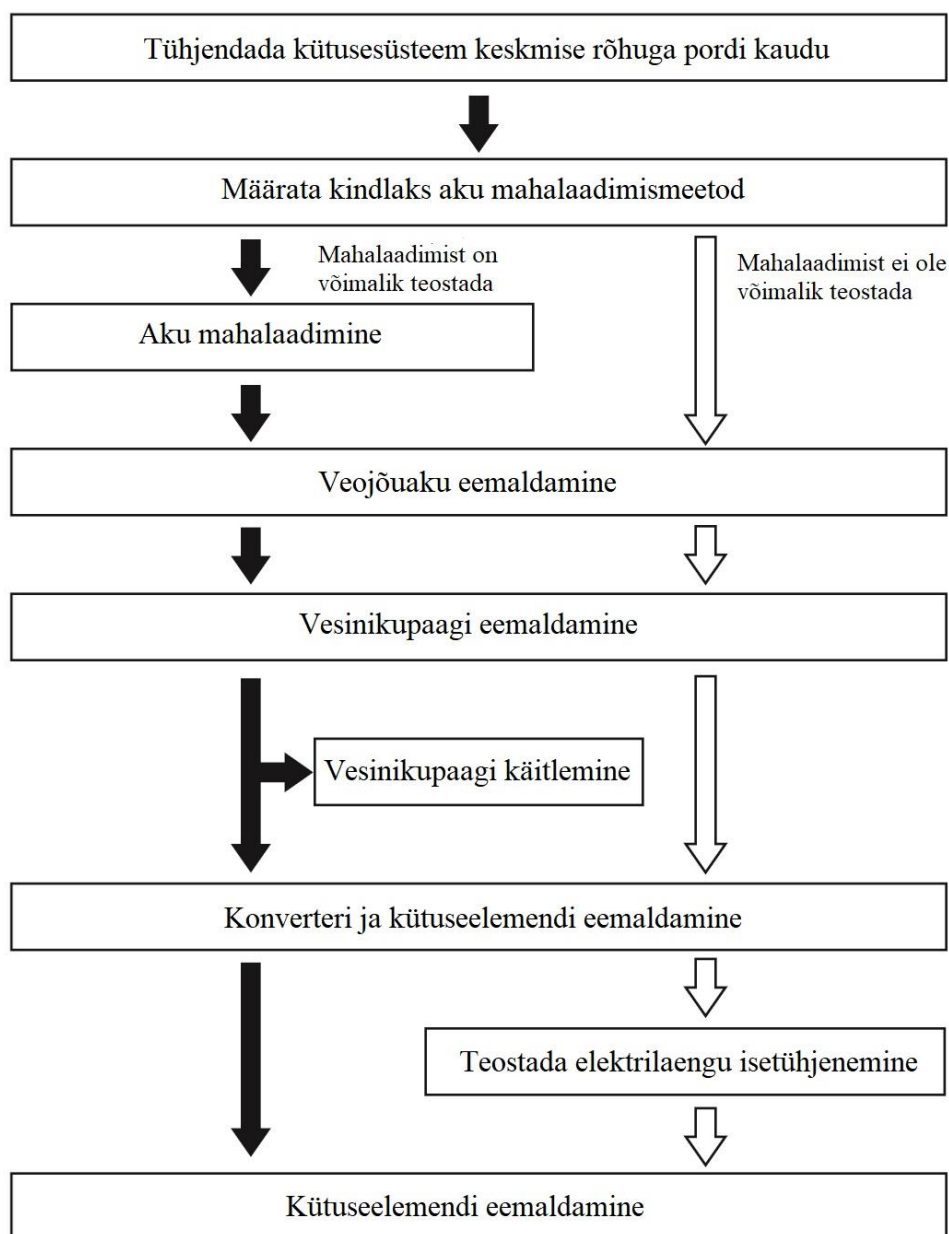
Sele 28. Kütusesüsteemi tühjendamine

Vesinikuandurid (Sele 29) lülituvad automaatselt tööle, kui sõiduk käivitatakse, lisaks lülitatakse andurid sisse ka siis, kui teostatatakse kütusesüsteemi tühjendamist. Kui kütuse tühjendamise ajal tuvastatakse vesiniku leke, katkestatakse kohe töö ja vesinikupaagi ventiilid sulguvad automaatselt. [89]



Sele 29. Vesinikuandurid

Toyota on koostanud kütuselemendiga sõidukite ohutuks käsitlemiseks demonteerimisjuhendi (Sele 30). Kuna sõiduki kütusesüsteem on kõrge rõhu all, ei tohi vesinikupaake eemaldada ilma rõhku alandamata. Selle ettevaatusabinõu eiramine võib põhjustada tõsiseid vigastusi või isegi surma. Kõrgepingesisüsteemi võib pärast sõiduki väljalülitamist jääda vool sisse kuni 10 minutiks. Seetõttu tuleb vältida oranži kõrgepinge toitekaabli või muu kõrgepingekomponendi puudutamist, lõikamist või avamist. Kui teostada vesinikgaasi väljalaskmist süsteemist, ei tohi seda protseduuri teostada halvasti ventileeritud siseruumis. Keelatud on ilma survet vähendamata eemaldada või paigaldada ükskõik millist vesinikusüsteemi komponenti. [5], [26]

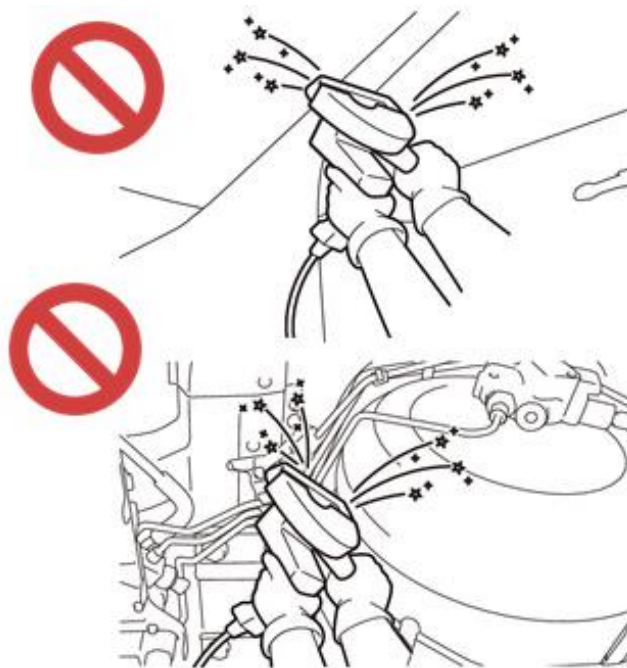


Sele 30. Tööde järjekord

6.3.2 Ettevaatusabinõud sõiduki süttimise korral

Kuna vesiniku kontsentratsioonivahemik on lai (4 – 74,5%) ja süütamiseks vajalik energia on äärmiselt madal, võib isegi staatiline elekter kergesti põhjustada vesinikgaasi süttimist. Kui sõiduki kallal töötades on kuulda vesinikgaasi lekkimise heli (valju kahinat), tuleb mõõta vesinikgaasi kontsentratsiooni vesiniku kontsentratsioonidetektoriga. Kui vesinikgaasi kontsentratsioon sõiduki läheduses on üle 4%, siis on oht, et vesinik võib süttida, seega tuleb kohe kiiresti sõidukist eemalduda. Isegi pärast sõiduki seiskamist võib vesinikgaasi jääke jääda vesinikuseadmetesse, näiteks vesinikupaakidesse ja vesinikutorustikku. Tulekahju või plahvatuse vältimiseks ei tohi lõigata ega

hävitada vesinikuseadmeid ega vesinikutorustikke (Sele 31). Vesiniku süttimise ohtu tõttu ei tohi vesiniku lekke korral kasutada elektriseadmeid ega päästeseadmeid, mis võivad tekitada staatilist elektrit. [26], [96]



Sele 31. Ohutusnõuded [26]

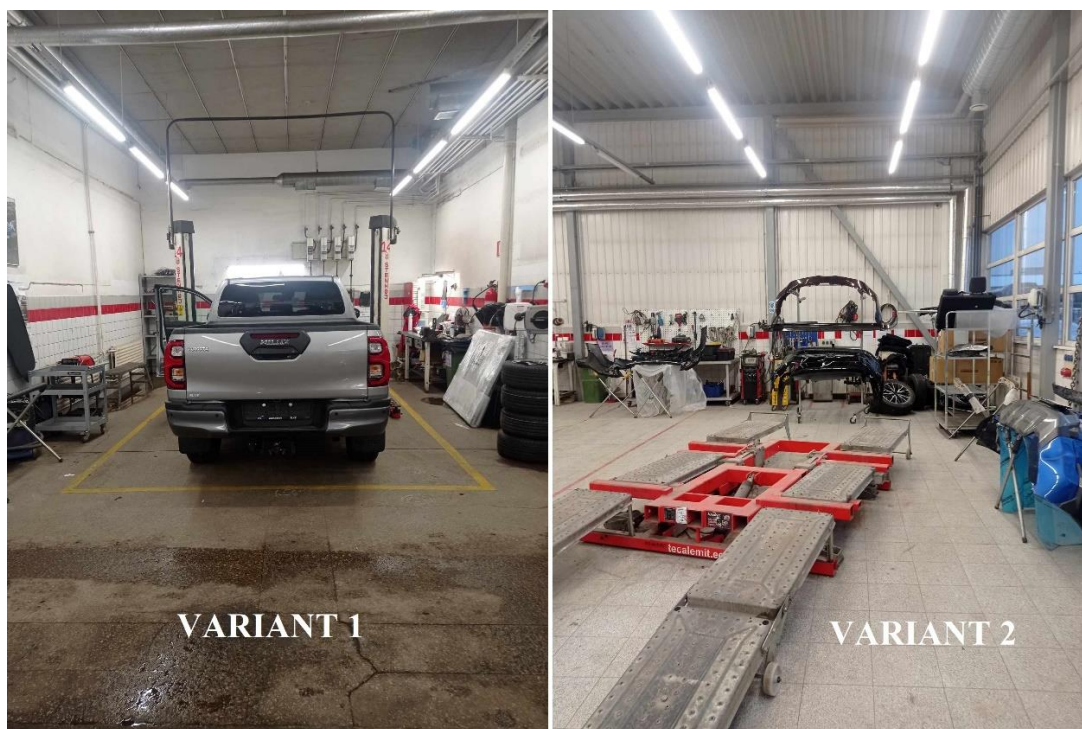
Kuna kütuseelemendiga sõiduk (FCV) sisaldab kokkusurutud vesinikgaasi, siis sõiduki süttimise korral vett tulele pritsides tuleb valmis olla vesiniku süttimiseks ja vett pritsides tuleb hoida sõidukist distantsti. Suur kogus vett tulele pritsida sõiduki tagaosas põranda all olevatele vesinikupaakidele, et need jahutada. Kui vesinik on süttinud, võib tulekahju täielik kustutamine põhjustada põlemata vesinikgaasi kogunemist, mis omakorda võib põhjustada sekundaarse plahvatuse. Selle vältimiseks tuleb piserdada vett, et tuli ei leviks ja oodata, kuni tuli ise vaibub ehk siis kuni kogu kütus on ära põlenud. [26]

Selleks, et vältida vesinikupaakide plahvatamist kõrge temperatuuri või rõhu tagajärjel, avanevad vesinikupaakidesse konstrueeritud ülerõhuklapid, kui temperatuur ületab 110°C. Selle tulemusel paakide sees olev vesinikugaas suunatakse sõiduki tagaosast välja. Kuigi puhas vesinikugaas põleb silmale nähtamatu leegiga, segunevad leegid sõiduki tulekahju korral teiste läheduses põlevate materjalide leekidega, muutes need nähtavaks. Vesiniku leegi omapära on see, et kuigi leegi enda temperatuur on ülikõrge, siis selle läheduses ei ole tule kuumust eriti tunda. Vesiniku leek kiirgab väga vähe soojust ja on oht saada põletushaavu. [26]

6.4 Hooldus- ja remonditöökoha asukoha võimalikud variandid

Antud projekti puhul on valikus töökoja sees kaks asukohta. Esimene variant on kohandada keset töökoda asuv kahe-posti tõstukiga ja vaheseintega eraldatud ala remondialaks, mis sobib teenindama vesinikukütusel töötavat autot. Teise variandina on võimalik luua samalaadne remondiala töökoja kaugemasse nurka, teistest töökohtadest eemale.

Remonditöökoha kalkulatsioonis on lähtutud vesinikukütusel töötava auto remondi spetsiifikast (Tabel 7). Töökoha pindala arvutamisel esimese ja teise variandi puhul on lähtekohaks Elke Mustamäe remonditöokoja asuvad alad (Sele 32). Arvestuslik kasutatav pind koos üldalaga on mõlemal juhul 52 m². Tööpinnal on olemas kahe-posti tõstuk, mis jääb remondialasse.



Sele 32. Tööalad Elke Mustamäe töökojas

Tabel 7. Remonditöökoha kalkulatsioon

	Hind eurodes
4-postile toetuv katusega ala koos tõmbekardinatega	6 100.-
Ventilatsioonisüsteem	2 500.-
Vesinikuandurid, mis on ühendatud nii heli- kui ka visuaalse häiresüsteemiga	2 850.-
Ventilatsiooniklapiga vesiniku tühjendusdüüs	200.-
Suletud ja karastatud klaasist 6 spetsiaalset laelampi	5 100.-
Tuletõrjevihmutid	3 000.-
Kokku:	19 750.-

Kolmanda variandina on võimalik ehitada Elke Mustamäe territooriumile eraldi töökoda (Sele 33), mille ehitamisel saab kasutada *sandwich*-paneele. *Sandwich*-tüüpi paneelidel on kaks eelist – tulekindlus ja heliisolatsiooni efektiivsus. *Sandwich*-paneelid ehk kihtpaneelid koosnevad kahest kihist, millest välimine kiht tagab vormi, ilmastikukindluse ja jäikuse. Sisemine kiht ehk südamik annab *sandwich*-paneelidele soojus- ja heliisolatsiooniomadused ning see on valmistatud mineraalvillast või kivivillast. [97], [98]



Sele 33. *Sandwich*-paneelidest valmistatud garaaž

Ehitusmaterjalid jagatakse tuleohutuse euroklassidesse selle põhjal, milline on nende mõju tulekahju puhkemisele ja tule levikule, suitsu tekkimisele ning põlevate osade moodustumisele. Euroklasside liigitus on A1-st (kõrgeim) kuni F-ni (madalaim). Katse- ja klassifikatsioonimeetoditena kasutatakse EN-standardeid. A1 tuleohutusklassi kuuluvad ehitusmaterjalid vastavad kõige rangeimate tuleohutusstandardite nõuetele. Kokkupuutel tulega ei osale need tooted otseselt põlengus, ei suurenda tuld ega kannu tulelevikut edasi ning ei eralda suitsu ega põhjusta põlevaid pritsmeid. *Sandwich*-paneel talub pikaajalist kokkupuudet tulega, kautamata oma terviklikkust või tekitamata mürgiseid aure. [99]

Mineraalvilla ja kivivilla üheks omaduseks on nende käitumine tulekahjudes. Mineraalvillasüdamikuga *sandwich*-paneelid on kuuluvad tuleohutuse klassi A2. Mineraalvilla iseloomustab madal soojuslähivus ja seega on see suurepärane isolatsioon, kuid kõige enam eristab seda teistest hästi isoleerivatest materjalidest just selle loomulik mittesüttivus. Mineraalvillast isolatsiooniplaadi sulamistemperatuur on tavaliselt üle 1000°C, mis on palju kõrgem kui enamikul teistel isolatsioonimaterjalidel. See tähendab, et see talub pikaajalist kokkupuudet tulega, kaotamata oma terviklikkust või tekitamata mürgiseid aure. [98], [100], [101]

Vesinikkütusel töötava auto remonditöökoja puhul tasub eelistada kivivillast valmistatud *sandwich*-paneele, kuna selle töökoja projekteerimisel on tulekindlusega seotud nõuded keskmisest karmimad. Kivivillal on kõrgeim tulekindlusklass – A1. See aitab plahvatuse korral minimeerida tekkivaid kahjusid. Kivivillasüdamik on element, mis kõige enam mõjutab kogu *sandwich*-paneeli käitumist tulekahju korral. Kergete teisaldatavate konstruktsioonide põhiülesanne on inimeste elu ja tervise säilitamine ruumisisese plahvatuse korral, samuti ehituskonstruktsioonide ja -seadmete kaitsmine hävimise eest. Kivivill on oma kõrge sulamistemperatuuri tõttu suurepärase valik tulekindlate konstruktsioonide jaoks, ta säilitab oma omadused isegi 1000°C juures. [102]–[105]

Sandwich-paneelidest valmistatud garaaži maksumus on umbes 30 000 eurot ja selle kogupindala on 96 m².

Elke Mustamäe töökoja plaan on näidatud Sele 34.

6.5 Hooldusplaan

Õigeaegne hooldus on seadmete ohutu töö tagamise võtmeks. Remondialas olevate seadmete hindamiseks tuleks kasutada süstemaatilist meetodit, et töötada välja kulutõhus lähenemisviis ohutu ja usaldusväärse töö tagamiseks. Hooldusplaan tuleb dokumenteerida ja selle eest hoolitseda.

Vesinikusüsteemide hooldusplaan hõlmab:

- ✓ Kirjalikud protseduurid – ohtlike tingimuste ennetamiseks tuleb koostada hooldusgraafik
- ✓ Koolitus hooldus- ja kontrollipersonalile
- ✓ Kalibreerimine ja ülevaatus – tüübid ja sagedus peaksid olema kooskõlas kehtivate tootjate soovitustega ja kohandatud vastavalt kasutuskogemusele
- ✓ Dokumentatsioon – koos iga seadme hooldusplaaniga tuleb ülevaatus ja hoolduse tulemused dokumenteerida ning need peavad sisaldama vajalike järelmeetmete ja järgmise plaanilise ülevaatus/hooldustoimingu kirjeldust.

Lekkeandurite hooldust ja ümberkalibreerimist tuleks teostada iga 3-6 kuu järel ning see tuleb registreerida töökoja dokumentides või vastavalt tootja juhiste. [5]

KOKKUVÕTE

Jätkusuutlikuma, süsinikuneutraalse tuleviku poole püüeldes on eesmärk süsinikdioksiidi heitkoguste vähendamine. Ettevõtted üle maailma töötavad välja ja võtavad kasutusele keskkonnasäästlikumaid alternatiive ja energiaallikaid. Vesinikku peetakse üheks tuleviku kütuse- ja energiaallikaks. See süsinikuheitevaba tehnoloogia on pälvinud mitmete autotööstuse suurimate tegijate tähelepanu ja toodetakse üha rohkem vesinikkütusel töötavaid autosid. Toyota on kütuseelemendiga sõidukite tehnoloogia arendamisel olnud vankumatu – kütuseelemendiga sõidukeid toodeti juba ammu enne seda, kui teised autotootjad seda ideed alles kaalusid. Toyota Mirai oli üks esimesi masstootmises vesinikkütusega autosid ja see jõudis teedele 2014. aastal.

2021. aasta detsembris tutvustas Toyota GR Yaris H2, täiustatud vesinikkütusega ideeautot. Erinevalt Miraist, mis muundab vesinikkütust elektrienergia tootmiseks, kasutab GR Yaris H2 põleva kütusena vesinikku, pakkudes traditsioonilist sisepõlemismootori kogemust.

2022. aastal müüs Toyota 2094 Miraid, mis on 20% rohkem kui 2021. aastal. See müügikasv näitab kasvavat nõudlust puhtamate sõidukite järele, eriti vesiniku infrastruktuuri arenedes. Seega suureneb vajadus ka nende autode hoolduse ja remondi järele.

Töö eesmärgiks oli projekteerida kehtivatele nõuetele vastav vesinikkütust kasutava auto remonditöökoda Toyota Elke näitel. Püstitatud ülesanded said täidetud ja selle tulemusena on projekteeritud kehtivatele nõuetele vastav remonditöökoda Elke Mustamäe territooriumile ning lisaks tehtud ettepanek töökojas asuva kahe tööala kohandamiseks vesinikkütusega autode remondiks.

Töö autor tänab Elke Mustamäe esindust, järelteeninduse juhti Viljar Sillamaad ja Toyota Baltic AS esindajat Lauri Erti igakülgse toetuse ja abi eest diplomitöö valmimisel.

SUMMARY

Faced with climate change and the demand for overall sustainability of the renewable energy-driven energy sector, a number of studies are currently being conducted on alternative energy sources and fuels. One of the challenges facing the hydrogen revolution is the maintenance and repair of hydrogen-powered cars. What is required of those who have to maintain and repair these vehicles? Hydrogen molecules are small and light, so it is not possible to detect hydrogen leaks with the naked eye. Explosive hydrogen-air mixtures can form as a result of leaks. Therefore, the maintenance of a hydrogen fuel cell car requires special space, tools and technician training.

In striving for a more sustainable, carbon-neutral future, the goal is to reduce carbon dioxide emissions. Companies around the world are developing and adopting greener alternatives and energy sources. Hydrogen is considered one of the fuel and energy sources of the future. Carbon-free technology has attracted the attention of several major car manufacturers, and more and more hydrogen-powered cars are being produced.

Toyota produced fuel cell vehicles long before other automakers even considered the idea. The Toyota Mirai was one of the first mass-produced hydrogen cars and hit the roads in 2014. In December 2021, Toyota unveiled the GR Yaris H2, an advanced hydrogen concept car. Unlike the Mirai, which converts hydrogen fuel into electricity, the GR Yaris H2 uses hydrogen as its burning fuel, offering a traditional internal combustion engine experience. In 2022, Toyota sold 2,094 Mirai, which is 20% more than in 2021. This increase in sales reflects the growing demand for cleaner vehicles, especially as the hydrogen infrastructure develops. As a result, the need to maintain and repair these cars increases.

The aim of the work was to design a repair workshop for a car using hydrogen fuel that meets current requirements, using the Toyota Elke as an example. The significance of the work was that, although Toyota has introduced the hydrogen-powered cars Toyota Mirai, Toyota GR Yaris and Toyota Corolla Sport to the market, there are no workshops necessary for the repair of a hydrogen-powered car in Estonia.

The set tasks were completed, and as a result, a repair workshop that meets the current requirements has been designed for the territory of Elke Mustamäe, and in addition, a proposal has been made to adapt the two existing maintenance areas.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] „Risk Assessment and Ventilation Modeling for Hydrogen Vehicle Repair Garages“.
- [2] „Toyota Mirai offers lesson on servicing tomorrow’s vehicles.pdf“.
- [3] „Lõpparuanne _Vesinukuressursside-kasutamise-analüüs.pdf“.
- [4] OECD, *Risk-based Regulatory Design for the Safe Use of Hydrogen*. OECD. doi: 10.1787/46d2da5e-en.
- [5] „Mirai jpd20.pdf“.
- [6] L. Collins (l_collins), „The number of hydrogen fuel-cell vehicles on the world’s roads grew by 40% in 2022, says IEA report“. [Online]. Available at: <https://www.hydrogeninsight.com/transport/the-number-of-hydrogen-fuel-cell-vehicles-on-the-worlds-roads-grew-by-40-in-2022-says-iea-report/2-1-1444069>
- [7] „The Hydrogen Powered Car Is Alive: Sales Up By 84 Percent In 2021“. [Online]. Available at: <https://www.motor1.com/news/574229/hydrogen-powered-car-alive-sales-up-84-percent/>
- [8] L. Collins (l_collins), „Global sales of hydrogen-powered vehicles fall by 11.5% in first four months of 2023“. [Online]. Available at: <https://www.hydrogeninsight.com/transport/global-sales-of-hydrogen-powered-vehicles-fall-by-11-5-in-first-four-months-of-2023/2-1-1466755>
- [9] „Hydrogen Council“, Hydrogen Council. Vaadatud: 31. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://hydrogencouncil.com/en/>
- [10] „8 Vehicle Manufacturers Working on Hydrogen Fuel Cell Cars“. Vaadatud: 18. november 2023. [Online]. Available at: <https://www.fastechus.com/blog/vehicle-manufacturers-working-on-hydrogen-fuel-cell-vehicles>
- [11] „Step inside the new BMW iX5 Hydrogen | BMW | Discover BMW“. [Online]. Available at: <https://discover.bmw.co.uk/article/step-inside-the-new-bmw-ix5-hydrogen>
- [12] A. Tariq, „15 Hydrogen Cars To Look Out For“, TopSpeed. [Online]. Available at: <https://www.topspeed.com/hydrogen-cars-to-look-out-for/>
- [13] B. Dain-Smith, „2025 Hyundai N Vision 74: Everything We Know So Far“. [Online]. Available at: <https://www.hotcars.com/hyundai-n-vision-74-what-we-know/>
- [14] „XCIENT Fuel Cell Truck“, Hyundai Electrified Commercial Vehicles. [Online]. Available at: <https://ecv.hyundai.com/global/en/products/xcient-fuel-cell-truck-fcev/>
- [15] „Riversimple Rasa“. [Online]. Available at: <https://www.emobility-engineering.com/riversimple-rasa/>
- [16] „Cars: Hydrogen Electric XP1 Hypercar - Hyperion“. [Online]. Available at: <https://www.hyperion.inc/xp1-car>
- [17] „Technology_Assessment_Of_A_Fuel_Cell_Vehicle_Toyota-Mirai.pdf“.
- [18] „Toyota showcases experimental hydrogen-powered GR Yaris“, Toyota showcases experimental hydrogen-powered GR Yaris. Vaadatud: 22. oktoober 2023. [Online]. Available at: <https://newsroom.toyota.eu/toyota-showcases-experimental-hydrogen-powered-gr-yaris/>
- [19] „Liquid Hydrogen-Fuelled GR Corolla to Participate in the Super Taikyu Fuji 24h Race“. [Online]. Available at: <https://newsroom.toyota.eu/liquid-hydrogen-fuelled-gr-corolla-to-participate-in-the-super-taikyu-fuji-24h-race/>
- [20] D. Candelaresi, A. Valente, D. Iribarren, J. Dufour, ja G. Spazzafumo, „Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 46, nr 72.
- [21] F. D. Pero, M. Delogu, ja M. Pierini, „Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car“, *Procedia Struct. Integr.*, kd 12, lk 521–537, 2018.
- [22] „Internal Combustion Engine“, Hydrogen Energy. [Online]. Available at: <http://hydrogenenergyproject.weebly.com/internal-combustion-engine.html>

- [23] H. Fayaz, R. Saidur, N. Razali, F. S. Anuar, A. R. Saleman, ja M. R. Islam, „An overview of hydrogen as a vehicle fuel“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, kd 16, nr 8, lk 5511–5528.
- [24] K. Wróbel, J. Wróbel, W. Tokarz, J. Lach, K. Podsadni, ja A. Czerwiński, „Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Review“, *Energies*, kd 15, nr 23.
- [25] G. Pan, Y. Bai, H. Song, Y. Qu, Y. Wang, ja X. Wang, „Hydrogen Fuel Cell Power System—Development Perspectives for Hybrid Topologies“, *Energies*, kd 16, nr 6, lk 2680, märts 2023.
- [26] „TechDoc“. Vaadatud: 29. november 2023. [Online]. Available at: <https://www.techdoc-toyota.com/>
- [27] M. Saxonberg, „Toyota Mirai Hydrogen Fuel Cell EV - Repair Garage Design & Safety -“.
- [28] „The world of hydrogen - Longread Hydrogen“. [Online]. Available at: <https://www.theworldofhydrogen.com/gasunie/>
- [29] J.-W. Grimaldo-Guerrero, J. D. L. H. Barcelo, D. Rivera-Pacheco, L. Ramos-Barrera, ja U. Martinez-Palacio, „A Review of History, Production and Storage of Hydrogen“, *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, kd 14, nr 5, lk 121–134, okt 2021.
- [30] J. Farinha, L. M. Silva, J. Matlock, F. Afonso, ja A. Suleman, „Hydrogen fuel cell integration and testing in a hybrid-electric propulsion rig“, *Int. J. Hydrog. Energy*.
- [31] L. Giorgi, „Fuel Cells: Technologies and Applications“, *Open Fuel Cells J.*, kd 6, nr 1.
- [32] „Fuel Cell Working Principle and Schematic Diagram“. [Online]. Available at: <https://www.eeeguide.com/fuel-cell-working-principle-and-schematic-diagram/>
- [33] T. Jamal *et al.*, *Energy Rep.*, kd 10, lk 2103–2127.
- [34] H. Vaghari, H. Jafarizadeh-Malmiri, A. Berenjian, ja N. Anarjan, „Recent advances in application of chitosan in fuel cells“, *Sustain. Chem. Process.*, kd 1, nr 1, lk 16, dets 2013.
- [35] „Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)“.
- [36] S. E. Hosseini ja B. Butler, „An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles“, *Int. J. Green Energy*, kd 17, nr 1, lk 13–37.
- [37] J. Jeon ja S. J. Kim, „Recent Progress in Hydrogen Flammability Prediction for the Safe Energy Systems“, *Energies*, kd 13, nr 23, lk 6263, nov 2020.
- [38] J.-B. Saffers ja V. V. Molkov, „Hydrogen safety engineering framework and elementary design safety tools“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 39, nr 11, lk 6268–6285, apr 2014.
- [39] S. Falfari, G. Cazzoli, V. Mariani, ja G. M. Bianchi, „Hydrogen Application as a Fuel in Internal Combustion Engines“, *Energies*, kd 16, nr 6, lk 2545, märts 2023.
- [40] V. Beschkov ja E. Ganev, „Perspectives on the Development of Technologies for Hydrogen as a Carrier of Sustainable Energy“, *Energies*, kd 16, nr 17, lk 6108, aug 2023.
- [41] „Hydrogen as a fuel: the pros and cons“. [Online]. Available at: <https://www.pirelli.com/global/en-ww/road/cars/hydrogen-as-a-fuel-the-pros-and-cons-53908/>
- [42] „Advantages and Disadvantages of Hydrogen Energy - Conserve Energy Future“. [Online]. Available at: https://www.conserve-energy-future.com/advantages_disadvantages_hydrogenenergy.php
- [43] „Benefits of the Hydrogen Economy“, Hydrogen Energy Center. [Online]. Available at: <https://www.hydrogenenergycenter.org/benefits-of-the-hydrogen-economy>
- [44] Agnieszka, „Hydrogen as the fuel of the future? Facts and Myths | Knauf Automotive“, Knauf Industries Automotive. [Online]. Available at: <https://knaufautomotive.com/advantages-and-disadvantages-of-hydrogen-fuel-for-the-car/>
- [45] „Hydrogen as fuel for fuel cell electric vehicles“. [Online]. Available at: <https://www.ieafuelcell.com/index.php?id=33>
- [46] „Hydrogen Safety: Let's Clear the Air“. [Online]. Available at: <https://www.nrdc.org/bio/christian-tae/hydrogen-safety-lets-clear-air>
- [47] „Home | Hydrogen Tools“. [Online]. Available at: <https://h2tools.org/>
- [48] „6 Differences between Hydrogen and Natural Gas“. [Online]. Available at: <https://www.powereng.com/library/6-things-to-remember-about-hydrogen-vs-natural-gas>

- [49] „dokumen.tips_wasserstoff-als-antrieb-deutsche-gesetzliche-5-wasserstoff-als-antrieb.pdf“.
- [50] „Hydrogen.pdf“.
- [51] A. Singh, K. K. Singh, R. Rathore, ja S. Rai, „Review of Hydrogen-Based Energy Storage Techniques“.
- [52] D. Knez ja O. A. M. Zamani, „Up-to-Date Status of Geoscience in the Field of Natural Hydrogen with Consideration of Petroleum Issues“, *Energies*, kd 16, nr 18, lk 6580.
- [53] C. Vacquand *et al.*, „Reduced gas seepages in ophiolitic complexes: Evidences for multiple origins of the H₂-CH₄-N₂ gas mixtures“, *Geochim. Cosmochim. Acta*, kd 223, lk 437–461, veebr 2018.
- [54] L.-H. Lin *et al.*, „Radiolytic H₂ in continental crust: Nuclear power for deep subsurface microbial communities“, *Geochem. Geophys. Geosystems*, kd 6, nr 7, juuli 2005, [Online]. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2004GC000907>
- [55] C. C. Blair, S. D'Hondt, A. J. Spivack, ja R. H. Kingsley, „Radiolytic Hydrogen and Microbial Respiration in Subsurface Sediments“, *Astrobiology*, kd 7, nr 6, lk 951–970, dets 2007.
- [56] N. G. Holm, C. Oze, O. Mousis, J. H. Waite, ja A. Guilbert-Lepoutre, „Serpentinization and the Formation of H₂ and CH₄ on Celestial Bodies (Planets, Moons, Comets)“, *Astrobiology*, kd 15, nr 7, lk 587–600.
- [57] „The-fracture-pattern-of-north-central-Kansas-and-its-relation.pdf“.
- [58] X. Yang, H. Keppler, ja Y. Li, „Molecular hydrogen in mantle minerals“, *Geochem. Perspect. Lett.*, lk 160–168, 2016.
- [59] D. Ikuta *et al.*, „Interstitial hydrogen atoms in face-centered cubic iron in the Earth's core“, *Sci. Rep.*, kd 9, nr 1, lk 7108, mai 2019.
- [60] J. D. Hunt, A. Nascimento, B. Zakeri, ja P. S. F. Barbosa, „Hydrogen Deep Ocean Link: a global sustainable interconnected energy grid“, *Energy*, kd 249, lk 123660.
- [61] K. Suzuki, T. Shibuya, M. Yoshizaki, ja T. Hirose, *Subseafloor Biosphere Linked to Hydrothermal. Experimental hydrogen production in hydrothermal and fault systems: Significance for habitability of subseafloor H₂ chemoautotroph microbial ecosystems.*, Springer. Tokyo, Japan, 2015.
- [62] F. Freund, J. T. Dickinson, ja M. Cash, „Hydrogen in Rocks: An Energy Source for Deep Microbial Communities“, *Astrobiology*, kd 2, nr 1, lk 83–92, märts 2002.
- [63] J. Rey, F. Segura, ja J. M. Andújar, „Green Hydrogen: Resources Consumption, Technological Maturity, and Regulatory Framework“, *Energies*, kd 16, nr 17, lk 6222.
- [64] S. Yun, J. Lee, H. Cho, ja J. Kim, „Oxy-fuel combustion-based blue hydrogen production with the integration of water electrolysis“, *Energy Convers. Manag.*, kd 291, lk 117275, sept 2023.
- [65] „What potential for natural hydrogen?“, Energy Observer. [Online]. Available at: <https://www.energy-observer.org/resources/natural-hydrogen>
- [66] Q. Hassan, I. D. J. Azzawi, A. Z. Sameen, ja H. M. Salman, „Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Opportunities and Challenges“, *Sustainability*, kd 15, nr 15, lk 11501.
- [67] J. M. M. Arcos ja D. M. F. Santos, „The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production“, *Gases*, kd 3, nr 1, lk 25–46.
- [68] Y. Chang, F. Wan, X. Yao, J. Wang, Y. Han, ja H. Li, „Influence of hydrogen production on the CO₂ emissions reduction of hydrogen metallurgy transformation in iron and steel industry“, *Energy Rep.*, kd 9, lk 3057–3071.
- [69] „Global Hydrogen REVIEW 2021“, 2021.
- [70] G. W. Crabtree ja M. S. Dresselhaus, „The Hydrogen Fuel Alternative“, *MRS Bull.*, kd 33, nr 4, lk 421–428, apr 2008.
- [71] W. I. Inc, „Top Industrial Uses of Hydrogen | Industrial Hydrogen Safety“, WHA International, Inc. [Online]. Available at: <https://wha-international.com/hydrogen-in-industry/>
- [72] K. Sattarov, „Hydrogenation Technology and Chemistry of Cottonseed oil and fats“, *SABRAO J. Breed. Genet.*, kd 55, nr 3, lk 965–971, juuni 2023.

- [73] S. Tang *et al.*, „Hydrogen trapping in vanadium carbide alloyed with transition metals“, *Nucl. Mater. Energy*, kd 36, lk 101504, sept 2023.
- [74] „The-Use-of-Hydrogen-In-Shielding-Gases-Part-I-Benefits-and-Concerns-2.pdf“.
- [75] M. Zier, P. Stenzel, L. Kotzur, ja D. Stolten, „A review of decarbonization options for the glass industry“, *Energy Conversion and Management: X*, kd 10, lk 100083, juuni 2021.
- [76] C. Wulf ja P. Zapp, „Analyzing the future potential of defossilizing industrial specialty glass production with hydrogen by LCA“, *Procedia CIRP*, kd 105, lk 666–671.
- [77] Y. Zhang, „Modeling hydrogen diffusion for solar cell passivation and process optimization“.
- [78] T. Yuan, J.-N. Zhao, ja N.-R. Bao, „Hydrogen applications: advances in the field of medical therapy“, *Med. Gas Res.*, kd 13, nr 3, lk 99, 2023.
- [79] S. Ohta, „Molecular hydrogen as a preventive and therapeutic medical gas: initiation, development and potential of hydrogen medicine“, *Pharmacol. Ther.*, kd 144, nr 1, lk 1–11.
- [80] „Eesti-vesiniku-tee kaart.pdf“.
- [81] B. R. Ryu *et al.*, „The Effect of Ventilation on the Hazards of Hydrogen Release in Enclosed Areas of Hydrogen-Fueled Ship“, *J. Mar. Sci. Eng.*, kd 11, nr 9, lk 1639.
- [82] W.-C. Hu *et al.*, „Heat Resistance of a Fireproof Curtain with Water Film“, 2014.
- [83] O. Nedryshkin, M. Gravit, A. Lyapin, ja V. Voronin, „Overview of fire curtains in construction“, *MATEC Web Conf.*, 2016.
- [84] T. M. Kotresh, R. Indushekar, M. S. Subbulakshmi, S. N. Vijayalakshmi, A. S. K. Prasad, ja A. K. Agrawal, „Evaluation of Commercial Flame Retardant Polyester Curtain Fabrics in the Cone Calorimeter“, *J. Ind. Text.*, kd 36, lk 47–58, juuli 2006.
- [85] „Air Contaminant Control Industrial Ventilation Laboratory Ventilation“. [Online]. Available at: <https://www.atlenv.com/industrial-ventilation-emissions>
- [86] K. Alusdokumentatsioon ja Õ. P. J. Ehitamise, „Osa 4 - Ventilatsioon“, 2021.
- [87] „Hydrogen alarm for remote hydrogen leak detection“, EurekaAlert! [Online]. Available at: <https://www.eurekaalert.org/news-releases/733515>
- [88] M. Gandhi, „Gas Detection in Process Industry – The Practical Approach“, nr 160, 2015.
- [89] P. Soundarrajan ja F. Schweighardt, „Hydrogen Sensing and Detection“, *Hydrogen Fuel*, R. Gupta, Toim, CRC Press, lk 495–534. doi: 10.1201/9781420045772.ch15.
- [90] „Explosionproof Light Fittings - ATM Lighting - industrial light fittings manufacturer“. [Online]. Available at: <https://atmlighting.pl/en/products/explosionproof-light-fittings>
- [91] M. Gravit, N. Klimin, A. Karimova, E. Fedotova, ja I. Dmitriev, „Fire Resistance Evaluation of Tempered Glass in Software ELCUT“, kd 220, N. Voinov, T. Schreck, ja S. Khan, Toim, Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 220. , Singapore: Springer Singapore, 2021, lk 523–537. doi: 10.1007/978-981-33-6632-9_47.
- [92] D. Wang *et al.*, „Full-Scale Experimental Study on the Integrity of Tempered Glass Protected by Different Sprinkler Systems in High-Rise Building Fire“, *Fire Technol.*, kd 59, nr 4, lk 1465–1488.
- [93] P. Kaljula ja M.-L. Ivask, „2., täiendatud trükk Tööinspektsioon, 2022“.
- [94] „Töökohale esitatavad töötervishoiu ja tööohutuse nõuded–Riigi Teataja“. [Online]. Available at: <https://www.riigiteataja.ee/akt/12843344>
- [95] American Institute of Aeronautics and Astronautics, Toim, *Guide to Safety of Hydrogen and Hydrogen Systems (ANSI/AIAA G-095A-2017)*. 12700 Sunrise Valley Drive, Reston, VA 20191: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. doi: 10.2514/4.105197.
- [96] „Toyota-Rettungsleitfaden-en.pdf“.
- [97] H. Li, C. Jiang, Y. Wu, Y. Huang, Y. Wan, ja R. Chen, „Experimental study on the low-velocity impact failure mechanism of foam core sandwich panels with shape memory alloy hybrid face-sheets“, *Sci. Eng. Compos. Mater.*, kd 28, nr 1, lk 592–604, nov 2021.
- [98] A. Rajaneesh, I. Sridhar, ja S. Rajendran, „Relative performance of metal and polymeric foam sandwich plates under low velocity impact“, *Int. J. Impact Eng.*, kd 65, lk 126–136.

- [99] „Ehituslike-tuleohutusn-uate-kokkuv-te.pdf“.
- [100] „Is Mineral Wool Insulation Slab Rated for Fire?“ [Online]. Available at: <https://www.buyinsulationonline.co.uk/blog/is-mineral-wool-insulation-slab-rated-for-fire>
- [101] M. Novikov, V. Polushin, ja S. Zimin, „Sandwich Panel as a Structural Element of Overlap“, *MATEC Web Conf.*, kd 53, lk 01038, 2016.
- [102] „Fire Performance of Sandwich Panels“. Vaadatud: 16. detsember 2023. [Online]. Available at: <https://www.mekpanpanel.com/en/useful-informations/useful-informations/fire-performance-of-sandwich-panels>
- [103] J. A. Alonso, E. Reyes, ja J. C. Gálvez, „Size effect in the fracture properties of sandwich panels of plasterboard and core of rock wool“, *Mater. Constr.*, kd 69, nr 333, lk 181, veebr 2019.
- [104] V. Rybakov, O. Gracheva, M. Ogurtsov, S. Abdusattarhuzha, ja I. Raimova, „The blast relief sandwich panel fixing under the explosion energy action“, *E3S Web Conf.*, kd 264, lk 02002, 2021.
- [105] M. Georgescu ja V. Ungureanu, „Stabilisation of continuous Z-purlins by sandwich panels: Full scale experimental approach“, *Thin-Walled Struct.*, kd 81, lk 242–249.