

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikka
BH10A202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Vedyn kompressointimenetelmien vertailu

Comparison of hydrogen compression methods

Työntarkastaja: TkT Aki Grönman
Työnohjaajat: TkT Jero Ahola, TkL Simo Hammo
Mikkeli 23.4.2021
Satu Korhola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Satu Korhola

Vedyn kompressointimenetelmien vertailu

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Aki Grönman

Ohjaajat: Professori Jero Ahola ja Laboratorioinsinööri Simo Hammo

41 sivua, 7 taulukkoa ja 16 kuvaa

Hakusanat: vetykompressori, vihreä vety, vedyn siirtoverkko

Vetytalouden aikakauden lähestyessä tulee löytää energiatehokas ja kriteerit täyttävä vedyn kompressointimenetelmä. Tässä kandidaatintyössä vertaillaan vetykompressoreita kirjallisuuteen perehtymällä. Työn tavoitteena on vastata kysymyksiin, mikä kompressointimenetelmä on kuhunkin käyttötarkoitukseen paras mahdollinen ja minkä vuoksi. Tarkastelussa on menetelmien soveltuvuus eri painesuhteille ja volyyymeille, kompressoreiden saatavuus, maksimi paine, hyötysuhde, energiankulutus, kustannukset sekä edut ja haitat. Lisäksi arvioidaan kompressoreiden pyörimisnopeuksia ja tehontarpeita. Tarkastelu on rajattu puhtaan, vihreään vetyyn.

Vetykompressorit voidaan jakaa mekaanisiin ja ei-mekaanisiin kompressoreihin. Mekaanisista kompressoreista on saatavilla mäntä-, kalvo- ja ioninestekompressoreita. Ei-mekaanisista on saatavilla metallihydridikompressoreita ja sähkökemiallisia kompressoreita. Vedyn tapauksessa mäntäkompressori on toiminta-arvoiltaan soveltuvin ja käytetyin vaihtoehto. Mäntäkompressorissa on kuitenkin useita puutteita ja haittoja. Eri kompressorimenetelmien kehittäminen on aktiivista. On todennäköistä, että myös muiden mekaanisten ja ei-mekaanisten kompressoreiden käyttöaste kasvaa. Etenkin ei-mekaanisilla kompressoreilla on merkittäviä hyötyjä perinteisiin mekaanisiin kompressoreihin verrattuna.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	5
1.1	Tavoitteet ja menetelmät	5
1.2	Työnrajaukset	5
2	TYÖN TAUSTA	6
2.1	Vedyn ominaisuudet	6
2.2	Vedyn tuotanto elektrolyysillä	9
2.3	Vedyn kompressointi eri vaiheissa	11
3	KOMPRESSOINTIMENETELMÄT	13
3.1	Mekaaniset kompressorit	13
3.1.1	Mäntäkompressori	13
3.1.2	Kalvokompressori	15
3.1.3	Nestemäntä- ja ioninestekompressori	16
3.1.4	Keskipakokompressori	18
3.2	Ei-mekaaniset kompressorit	19
3.2.1	Metallihydridikompressori	20
3.2.2	Sähkökemiallinen kompressori	22
4	MENETELMIEN VERTAILU	24
4.1	Saatavuus	24
4.2	Toiminta-arvot	25
4.3	Kustannukset	26
4.4	Edut ja haitat	27
4.5	Vedyn jakelu	28
4.5.1	Elektrolyysin paine	29
4.5.2	Siirtoverkko	30
4.5.3	Varastot	31
5	TULOKSET	33
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	35
7	YHTEENVETO	37
	LÄHTEET	38

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

d_{in}	sisähalkaisija	m
M	moolimassa	g/mol
n	pyörimisnopeus	rpm
p	paine	bar, Pa
Δp	paine-ero	bar, Pa
P	teho	W
q_m	massavirta	kg/s
q_v	tilavuusvirta	m ³ /s
r	ominaishöyrystymislämpö	kJ/kg
T	lämpötila	°C, K
v	ominaistilavuus	m ³ /kg

Kreikkalaiset

ρ	tiheys	kg/m ³
--------	--------	-------------------

Alaindeksit

c	kriittinen
g	kaasu
kp	kolmoispiste
l	nestemäinen
s	kiinteä
t	tuulivoima
tot	kokonais-

Lyhenteet

AEL	alkaline water electrolysis
CAPEX	capital expenditure
IRENA	The International Renewable Energy Agency
OPEX	operating expenses
PEM	proton electrolyte membrane
STP	standardi lämpötila ja paine

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen ja parhaillaan tapahtuvan energiamurroksen keskellä on tutkittava, millä keinoin korvaamme fossiilisten polttoaineiden jättämän kuilun sekä kuinka nopeasti se saadaan toteutettua. Fossiilisista polttoaineista luopuminen ei käy käden käänteessä. Vety on sekä raaka- että polttoaine, joka tarjoaa mahdollisuuden luoda ominaisuuksiltaan fossiilisia vastaavia synteettisiä polttoaineita. Vetyvarastot voivat tulevaisuudessa toimia myös uusiutuvan sähkön tuotannon ja kulutusvaihtelun tasaajana. Kaasumaisen vedyn säilömistä varten vety täytyy paineistaa, joka vie paljon energiaa. On siis tärkeää löytää energia- ja kustannustehokas keino paineistaa vetykaasua, jotta sen hyödyntäminen tulevaisuudessa olisi kannattavampaa.

1.1 Tavoitteet ja menetelmät

Työn tavoitteena on kirjallisuutta tutkimalla selvittää, millaisia menetelmiä vedyn kompressointiin käytetään. Tarkastelussa on menetelmien soveltuvuus eri painesuhteille ja volyymeille. Lisäksi arvioidaan kompressoreiden energiatehokkuuksia, pyörimisnopeuksia, tehontarpeita sekä niiden etuja ja haittoja. Tavoitteena on vastata kysymyksiin, mikä kompressointimenetelmä on millekin sovellukselle paras mahdollinen ja minkä vuoksi. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

1.2 Työnrajaukset

Tässä työssä keskitytään olennaisin osin jo markkinoilla oleviin vetykaasun kompressointimenetelmiin. On ehdotettu, että vetykaasua voitaisiin toimittaa samassa siirtoverkossa kuin maakaasua, sekoittaen vetyä maakaasun joukkoon (IRENA, 2020a). Tämä työ käsittelee kuitenkin vain puhtaan vedyn paineistamista ja siirtoa. Vedyn kompressointiin liittyy olennaisesti vedyn säilytys korkeassa paineessa. Tässä työssä ei oteta kantaa säilytysmenetelmiin, vaan keskitytään itse paineistukseen liittyviin eroihin eri menetelmien välillä. Lisäksi työssä puhutaan pääasiassa vihreästä, eli uusiutuvalla energialähteillä tuotetusta vedystä.

2 TYÖN TAUSTA

Power-to-X teknologialla voidaan tuottaa synteettisiä polttoaineita, kuten metaania tai metanolia, vedestä ja hiilidioksidista sekä uusiutuvasta energiasta. Vetyä tuotetaan vedestä elektrolyysillä. Elektrolyysiin vaadittava energia saadaan aurinko-, vesi- tai tuulivoimasta ja sen tuotteena syntyy happea ja vetyä. Uusiutuvalla energialla tuotettua vetyä kutsutaan vihreäksi vedyksi. Vetykaasu kompressoidaan korkeaan paineeseen siirtoa ja varastointia varten. Hiilidioksidia kerätään vesistöistä ja ilmasta. Yhdessä vedystä ja hiilidioksidista voidaan tuottaa hiilivety-yhdisteitä. Vetyä käytetään polttoaineena esimerkiksi polttokennoissa ja kaasuturbiineissa. Polttokennot ovat herkkiä vedyn puhtauden suhteen, joten tässä työssä tarkastellaan nimenomaan puhtaan vedyn likaamatonta kompressointia ja siirtoa.

2.1 Vedyn ominaisuudet

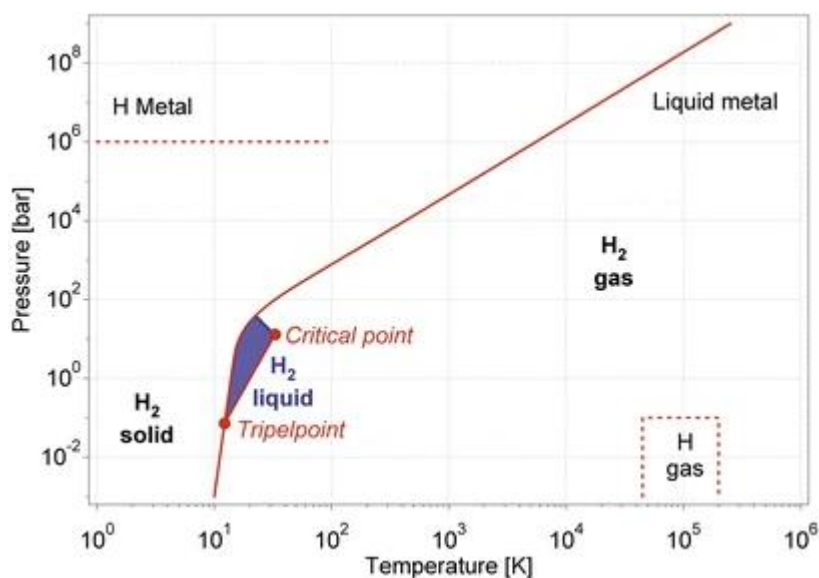
Vety on maailman yleisin alkuaine, mutta sen energiatiheys tilavuutta kohti on normaaliolosuhteissa tavallisimpiin polttoaineisiin verrattuna kaikista alhaisin, vain 0,01079 MJ/l (Sdanghi, G. et al., 2019). Massayksikköä kohden vedyn energiatiheys on kuitenkin suurin (Bellosta von Colbe et al., 2019). Yleisin tapa säilyttää vetyä on kompressointi (Sdanghi et al., 2019). Kompressoinnilla kasvatetaan vedyn energiatiheyttä.

Vedyllä on kolme isotooppia. Lähes kaikki luonnosta löytyvä vety on protiumia, jonka ydin koostuu yhdestä protonista. Deuteriumin ydin koostuu protonista ja neutronista ja tritiumin ytimessä on protonin lisäksi kaksi neutronia. Yhden elektronin omaava vetyatomi on luonnossa hyvin reaktiivinen ja siksi vety esiintyy vetykaasuna H₂. (Press et al., 2009) Vedyn aineominaisuuksia on koottu taulukkoon 1.

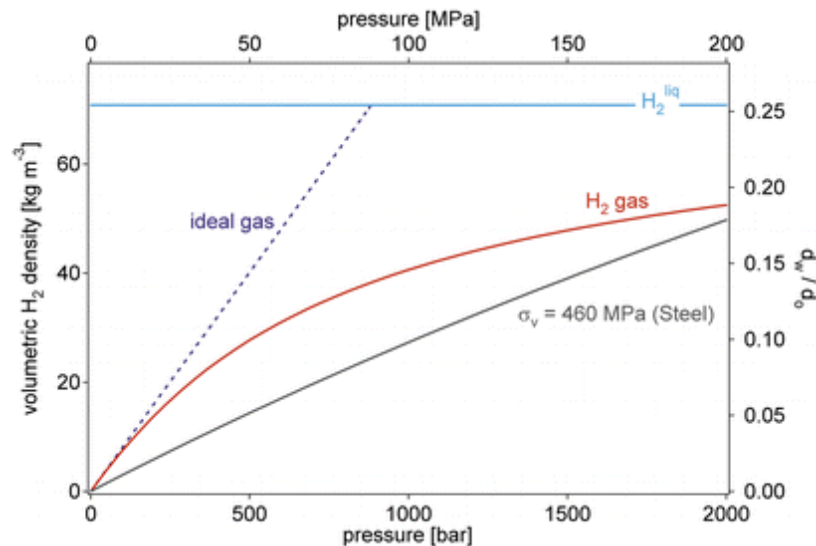
Taulukko 1. Vedyn aineominaisuudet. (Press et al., 2009) (El-Shimy & Afandi, 2017)

Moolimassa	M	2,016	g/mol
Kiinteä			
Sulamispiste	T_s	-259	[°C]
Neste			
Tiheys kiehumispisteessä (1,013 bar)	ρ_l	70,973	[kg/m ³]
Kiehumispiste (1,013 bar)	T_l	-252,8	[°C]
Höyrystyslämpö	r	454,3	[kJ/kg]
Kriittinen piste			
Kriittinen lämpötila	T_c	-240	[°C]
Kriittinen paine	p_c	12,98	[bar]
Kriittinen tiheys	ρ_c	30,09	[kg/m ³]
Kolmoispiste			
Kolmoispisteen lämpötila	T_{kp}	-259,3	[°C]
Kolmoispisteen paine	p_{kp}	0,072	[bar]
Kaasu			
Tiheys kiehumispisteessä (1,013 bar)	ρ_g	1,312	[kg/m ³]
Tiheys (1,013 bar, 0°C; STP)	ρ_g	0,0899	[kg/m ³]
Ominaistilavuus (STP)	v	11,123	[m ³ /kg]

Kuvassa 1 on vedyn faasikaavio. Vety on nestemäisessä olomuodossa vain kriittisen pisteen ja kolmoispisteen välillä olevan suoran sekä kiinteän olomuotokäyrän välillä. Nestemäisen vedyn alue näkyy kuvassa väritettynä. Tätä korkeammissa lämpötiloissa vety on kaasumaista ja matalammissa vety on kiinteää. Hyvin korkeassa paineessa vedystä tulee metalli.

**Kuva 1.** Vedyn faasikaavio. (Zittel, 2004)

Kuvassa 2 on esitetty kaasumaisen vedyn tiheys paineen funktiona punaisella ja ideaalikaasun violetilla katkoviivalla. Sininen käyrä kuvaa nestemäisen vedyn tiheyttä. Kuvasta nähdään, että vedyn tiheys ei muutu paineen kasvaessa lineaarisesti, kuten ideaalikaasun tiheys. Vedyn puristaminen tiettyyn paineeseen vaatii ideaalikaasua enemmän energiaa. Tämä korostaa vetykompressoreiden kehittämisen tärkeyttä.



Kuva 2. Nestemäisen ja kaasumaisen vedyn sekä ideaalikaasun tiheydet paineen funktiona. (Zittel, 2004)

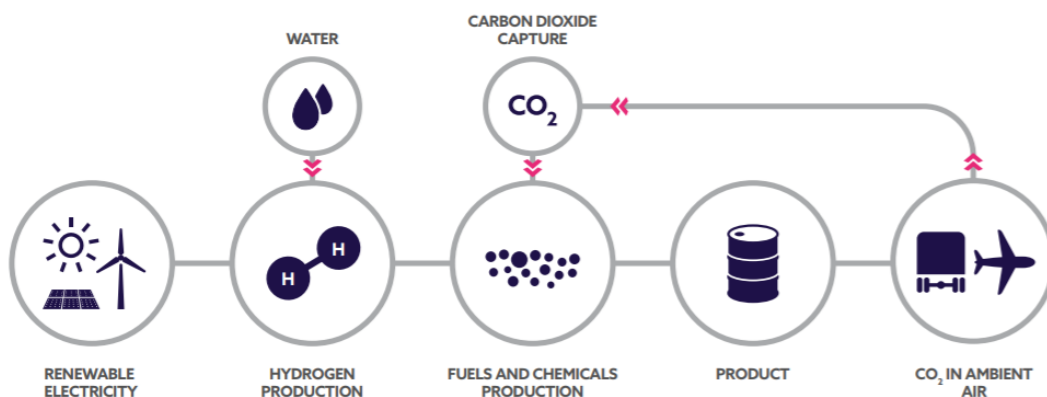
Jotta kompressoreiden volyymeja kaasun vaihtelevilla paineilla ja lämpötiloilla voidaan vertailla, käytetään normaalitilavuutta. Normaalitilana (STP) käytetään lämpötilaa $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja painetta $1,013\text{ bar}$. Kuutiometriä normaaliolosuhteissa kutsutaan normaalikuutiometriksi 1 Nm^3 . (Borremans, 2019) Myös elektrolyysereiden volyymien yksikkönä on käytetty normaalikuutiometriä. Vedyn ominaistilavuuden arvo normaalitilassa on $11,123\text{ Nm}^3/\text{kg}$ (El-Shimy et al., 2017). Kertomalla massavirta STP-olosuhteiden ominaistilavuudella, saadaan tilavuusvirran yksiköksi Nm^3/s .

Vetyhaurastuminen johtuu vedyn adsorptiosta¹, dissosiaatiosta ja diffuusiosta teräksessä. Vedyn suuri diffuusio materiaalien ja tiivisteiden läpi aiheuttaa teräksen rappeutumista, halkeilua ja hajoamista. Terästen alttius kyseiselle ilmiölle kasvaa hiili- ja mangaanipitoisuuksien kasvaessa. Vetyverkostossa on otettava tämä huomioon niin putkissa, kompressoreissa kuin tiivisteissäkin. (Léon, 2008)

¹ Adsorptiolla tarkoitetaan kiinteiden materiaalien kykyä kerätä kaasua- tai nestemolekyylejä materiaalin pinnalle (Britannica, 2013). Dissosiaatio tarkoittaa molekyylin hajoamista molekyyleiksi tai ioneiksi (IUPAC, 2014) ja diffuusio pitoisuuseron aiheuttamaa aineen tunkeutumista muihin aineisiin (Schaschke, 2014).

2.2 Vedyn tuotanto elektrolyysillä

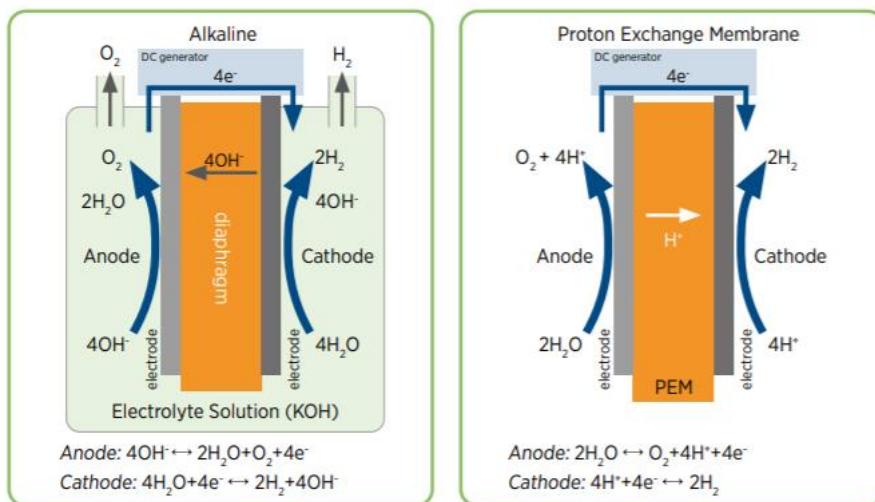
Tällä hetkellä maailmalla tuotetusta vedystä vain neljä prosenttia tuotetaan elektrolyysillä. Suurin osa vedystä tuotetaan reformoimalla² fossiilisista polttoaineista. Vetyä käytetään esimerkiksi ammoniakkin tuotantoon ja öljytuotteiden hydraulukseen. (Sdanghi, Giuseppe et al., 2020) Vihreän vedyn elektrolyysin vaatima sähkö saadaan tuotettua vesi-, aurinko- tai tuulivoimalla. Hiilidioksidista ja vedystä voidaan valmistaa hiilivetyjä synteetisreaktorissa. Yksi esimerkki vedyn tuotannon tikapuukaaviosta on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Synteettisten hiilivetyjen tuotanto vedestä ja hiilidioksidista uusiutuvalla sähköllä. (NeoCarbon-Energy, 2017)

Elektrolyysi ei vielä ole vedyn pääasiallinen tuotantomuoto, mutta sen rooli on tulevaisuudessa tärkeää, koska sillä voidaan tuottaa raaka- ja polttoaineita uusiutuvalla energialla päästöttömästi. Elektrolyyseri jakaa veden vedyksi ja hapeksi. Sähköenergia muuttuu vedyn kemialliseksi energiaksi ja lämpöenergiaksi. Elektrolyysit jaetaan tyypillisesti neljään pääteknologiaan käytetyn elektrolyytin ja lämpötilan mukaan, joista käytetyimpiä ovat alkali (AEL, alkaline water electrolysis) sekä PEM (proton electrolyte membrane) elektrolyysit (IRENA, 2020). Kuvassa 4 on esitetty kyseisten teknologioiden toimintaperiaatteet ja reaktioyhtälöt.

² Reformoinnissa pääreaktio on hiilivetyjen reaktio veden kanssa, jonka tuotteita ovat vety ja hiilimonoksidi. Lisäksi vesihöyryn ja hiilimonoksidin reaktiossa syntyy vetyä ja hiilidioksidia. (Kurkela et al., 2008)



Kuva 4. Alkali- ja PEM-elektrolyserin toimintaperiaate (IRENA, 2020).

Elektrolyysin toiminta perustuu kennoihin, joissa on kaksi elektrodia sekä niitä erottava elektrolyytti. Elektrolyytti on väliaine, joka kuljettaa tuotettuja kemiallisesti varautuneita anioneja tai kationeja yhdeltä elektrodilta toiselle. Alkalielektrolyyserissä elektrolyytti, tyypillisesti kaliumhydroksidiliuos, siirtää hydroksidi-ioneja katodilta anodille. Elektrodeja ja tuotettuja kaasuja erottaa huokoinen epäorgaaninen kalvo. PEM-elektrolyyserissä ei tarvita nestemäistä elektrolyyttiliuosta vaan elektrolyytinä toimii ohut, yleisesti fluoripolymeeristä valmistettu, protonin johtava polymeerielektrolyytti. (IRENA, 2020)

PEM-elektrolyyserissä vesi syötetään anodille, jossa se hajotetaan riittävällä varauksella happikaasuksi ja vetyioneiksi. H^+ -ionit eli protonit kulkevat polymeerikalvon läpi. Katodilla protonit ja elektronit muodostavat vetykaasua. Alkalielektrolyyserissä vesi syötetään katodille, jossa se hajotetaan vedyksi ja hydroksidi-ioneiksi. Hydroksidi-ionit siirtyvät elektrolyytin läpi katodilta anodille, jossa muodostuu vettä ja happea.

AEL vaikuttaa lupaavalta tekniikalta suuren mittakaavan vetytuotannossa pitkän käyttöikänsä ja alhaisten investointikustannustensa vuoksi. PEM on kuitenkin tehokkaampi, sen hiilijalanjälki on pienempi ja käynnistysaika lyhyempi. (Sdanghi et al., 2020)

2.3 Vedyn kompressointi eri vaiheissa

Vetyä voidaan varastoida esimerkiksi korkeapainesäiliöihin, maanalaisiin varastoihin ja putkilinjaan. Tuotetun vedyn jakeluun ja siihen liittyvään infrastruktuuriin on olemassa eri ratkaisuja. Vetyä voidaan kuljettaa matalassa lämpötilassa nestemäisessä tai korkeassa paineessa kaasumaisessa olomuodossa. Alhaisen kiehumispisteensä vuoksi vedyn nesteyttäminen vaatii paljon energiaa, joten usein kompressointi on paras vaihtoehto. Vetyä voidaan kuljettaa teitse, laivoilla tai siirtää putkilinjoja myöten.

Jotta vety voisi kilpailla muiden polttoaineiden kanssa, tarvitaan turvallinen ja tehokas vetytuotanto ja vedyn jakelurakenne (Heshmat et al., 2013). Vedyn kysynnän kasvaessa on toimivan vetykaasuverkoston kehittäminen kustannustehokkain ratkaisu. Vaihtoehtona on rakentaa kokonaan uusi putkilinja tai käyttää olemassa olevaa maakaasun siirtoputkistoa. Maakaasuun verrattuna vety virtaa yli kaksi kertaa nopeammin samassa putkistossa pienemmän molekyylipainonsa ja viskositeettinsa vuoksi. Pienempi energiatiheys, suurempi materiaalin läpäisy ja herkemmin syttyvä kaasu aiheuttavat kuitenkin haasteita maakaasun siirtoon verrattuna. (Weber ja Perrin, 2008 (Leon et al.))

Vetyputkistoa oli vuonna 2016 maailmalla yhteensä yli 4500 kilometriä, joista suurinta osaa operoivat vedyn tuottajat. Pisimmät vetyputket sijaitsevat Yhdysvalloissa, ja lisäksi vetyverkkoa on muun muassa Belgiassa, Saksassa, Ranskassa, Hollannissa ja Kanadassa. (Hydrogen Europe, 2021) Maakaasuverkoston kokonaispituus puolestaan on yli kolme miljoonaa kilometriä (IRENA, 2020b). Käytössä olevien vetysiirtoputkistojen paineet vaihtelevat 20–100 baariin ja putken halkaisijat 100–300 millimetriin. (Gondal, 2016). Useissa tutkimuksissa ja artikkeleissa, joissa pohditaan vanhojen maakaasukaasuputkistojen modifiointia vetykaasulle, on vedyn siirtopaineena käytetty saman suuruusluokan paineita kuin maakaasulle (Adam et al., 2020) (Heshmat et al., 2013).

Putkiverkoston käyttäminen vaatii kompressoriasemia. Kompressoreita tarvitaan matalapaineisen vedyn syöttämiseksi verkkoon sekä mahdollisesti verkon välillä putkihäviöiden vuoksi. Mikäli putkiston pituus jää alle 100 kilometrin ei kompressoreita välttämättä tarvita välimatkalle. (Weber ja Perrin, 2008) Vetyverkossa kompressoriasemien välimatka voisi olla noin 20–60 kilometriä (Witkowski et al., 2017).

Monet vetysovellukset vaativat jopa 1 000 baarin paineen. Vakiintuneeksi menetelmäksi autoteollisuudessa on muodostunut vedyn varastoiminen korkeapainesylintereihin. Raskaissa ajoneuvoissa käytetty paine on 350 baaria ja kevyissä autoissa 700 baaria. (Bellosta von Colbe et al., 2019) Useat autoteollisuuden yritykset ovat julkaisseet, että aikovat kaupallistaa polttokennoauton 2020 vuoden jälkeen. Lisäksi maailmalla on jo olemassa polttokennoautoille tarkoitettuja vetytankkausasemia. (Bhogilla, Niyas, 2019) Esimerkkinä Toyotan Mirai ja Hyundain Nexo ovat jo markkinoilla olevia polttokennoautoja (Toyota, 2021) (Hyundai, 2021).

Suuren mittakaavan vetyjakelu tarvitsee myös varaston tasapainoittamaan tuotannon ja kulutuksen vaihteluita. (Weber ja Perrin, 2008) Vanhojen suolakaivosten käyttäminen vetyvarastona on lupaava tekniikka suuren varastointikapasiteetin sekä edullisten investointikustannusten vuoksi. Tällä hetkellä käytössä olevat vetysuolakaivosvarastot sijaitsevat Iso-Britanniassa ja Yhdysvalloissa. Iso-Britanniassa sijaitsevan suolakaivoksen kokonaistilavuus on 210 000 m³ ja se on ollut käytössä jo 1970 luvulta asti. Yhdysvalloissa olevien kahden suolakaivosvarastojen tilavuudet ovat 580 000 m³ ja 566 000 m³. (Caglayan et al., 2020) Myös Euroopassa on vedyn varastointiin soveltuvia suolakaivoksia, joiden kapasiteetit yltyvät jopa 750 000 m³:iin (Sdanghi et al., 2020). Suolakaivoksissa vedyn varastointipaine voi tyypillisesti olla luokkaa 100–275 baaria. (IRENA, 2020)

3 KOMPRESSOINTIMENETELMÄT

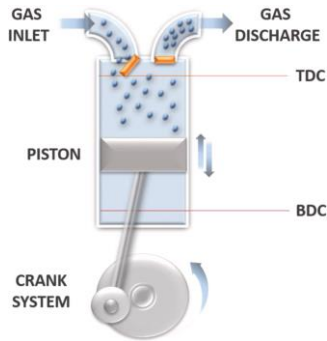
Tässä kappaleessa tutustutaan markkinoilla olevien menetelmien toimintaperiaatteisiin. Jako on tehty perinteisiin puristaviin mekaanisiin kompressoreihin sekä kompressoreihin, joihin ei sisälly edestakaisin liikkuvia tai pyöriviä koneenosia eli niin sanotusti ei mekaanisiin kompressoreihin.

3.1 Mekaaniset kompressorit

Mekaanisten kompressorien toiminta perustuu mekaanisen työn muuntamiseen kaasun energiaksi. Vedyn kompressoinnissa yleisimmät mekaaniset kompressorit ovat syrjäytystyyppiä ("positive displacement"). (Sdanghi et al., 2019) Tässä kappaleessa esitellään mäntäkalvo-, ionineste- ja keskipakokompressoreiden toimintaperiaatteet. Muita mahdollisia mekaanisia kompressoreita vedylle voisivat olla myös lineaari- ja nestereingaskompressorit (Sdanghi et al., 2019). Mäntätyyppisten kompressoreiden käyttövoimana toimivat perinteiset oikosulkumoottorit 750–3 000 rpm pyörimisnopeudella. Pyörimisnopeus määräytyy napapari-luvun ja verkon taajuuden mukaan (ABB, 2001). Kompressorin pyörimisnopeus voidaan säätää hihnavälityksellä sopivaksi moottorin pyörimisnopeuden kanssa.

3.1.1 Mäntäkompressori

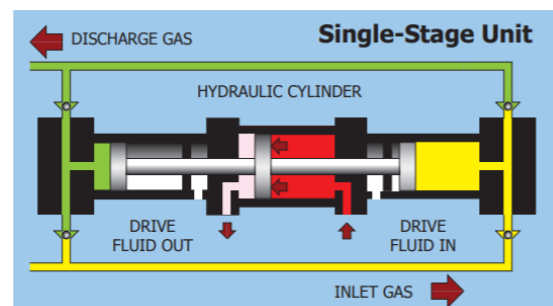
Yksivaiheisessa mäntäkompressorissa (kuva 5) on sylinteri ja mäntä, sekä kaksi sylinterin yläosassa sijaitsevaa automaattisesti toimivaa venttiiliä. Mäntä on perinteisesti kiinnitetty pyörivään kampiakseliin. Sähkö- tai lämpökoneella pyörivä kampiakseli liikuttaa mäntää ylös ja alas suurella nopeudella. Kun mäntä liikkuu alaspäin, sisääntuloventtiili aukeaa ja kaasu saapuu sylinteriin. Kun mäntä on saavuttanut pohjan, se suuntaa takaisin ylös, jolloin sisääntuloventtiili sulkeutuu. Kaasu puristuu haluttuun paineeseen, jonka jälkeen poistoventtiili avataan ja mäntä työntää puristetun kaasun pois sylinteristä. (Sdanghi et al., 2019) Maa-kaasulle tarkoitettuja mäntäkompressoreita voidaan käyttää vedylle ilman suuria muutoksia, mutta vedyn suuren diffuusion vuoksi on tiivisteisiin kiinnitettävä huomiota (Witkowski et al., 2017).



Kuva 5. Yksivaiheisen mäntäkompressorin toiminta. (Sdanghi et al., 2019)

Yksivaiheisella mäntäkompressorilla voidaan saada jo muutaman ilmakehän suuruinen painennousu. Monivaiheisella mäntäkompressorilla saadaan hyvin suuria painesuhteita. Ongelmana kuitenkin on se, että mäntäkompressorilla ei ole tehokas suurilla massavirroilla. Vety tuotetaan matalassa paineessa, joka tarkoittaa suurten massavirtojen kompressointia pienestä paineesta suureen paineeseen. Mäntäkompressorissa massavirta on verrannollinen sylinterin kokoon sekä pyörimisnopeuteen. Sylinterin mitan kasvaessa myös osien paino lisääntyy, jolloin hitausvoimat kasvavat. (Sdanghi et al., 2019) Mäntäkompressoreita käytetään yleensä alle $1700 \text{ m}^3/\text{h}$ tilavuusvirroille. (Witkowski et al., 2017)

Kuvassa 6 on erään valmistajan mäntäkompressorin sekä kaaviokuva sen hydraulisen vahvistimen toiminnasta. Kyseinen kompressorin on hydraulisesti ohjattu, voitelematon ja nestejäähdytetty. Vahvistimessa on kaksi kaasusylinteriä, joiden välissä on hydraulinen sylinteri. Käytön aikana toinen sylintereistä täyttyy kaasulla ja hydraulisesti ohjattu mäntä puristaa toisen sylinterin kaasua. Yksivaiheisen kompressorin saavuttama painesuhde on jopa 1:8 ja kaksivaiheisen 64:1. (Hydro-Pac, 2011)



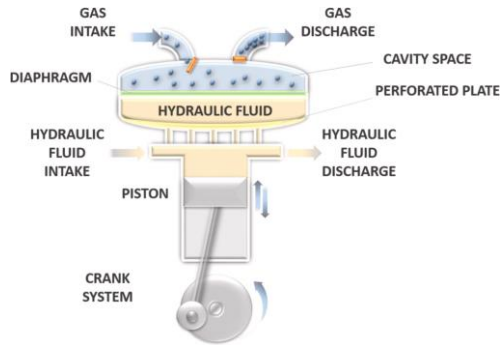
Kuva 6. Vasemmalla Hydro-Pac yksivaiheinen LX-sarjan mäntäkompressorin. Kyseistä mallia on saatavilla seuraavilla toiminta-arvoilla: imupaine 14–400 bar, poistopaine 100–800 bar, kapasiteetti $59\text{--}1151 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ja sähköteho 2,3–45 kW. Oikealla on hydraulisen vahvistajan toimintakaavio. (Hydro-Pac, 2011)

Öljyttömän mäntäkompressorin hyötyjä ovat puhdas kaasu ja hyvä suorituskyky. Männän ja sylinterin väli pitää eristää. Lisäksi on käytettävä männäntiivisteitä vetykaasun vuotamisen estämiseksi. On kuitenkin todettu, että erityisesti korkeapaineisilla ja öljyttömällä vetymäntäkompressoreilla männän tiivisteet menevät rikki helposti. Euroopan unionin maissa tulee vetykaasukompressoreissa noudattaa EU-direktiiviä, joka koskee räjähdysalttiissa tiloissa käytettäviä laitteita. Tämä direktiivi on otettava huomioon muun muassa materiaalivalinnoissa. Viime vuosina vetymäntäkompressoreiden toiminta-arvoja on kehitetty etenkin poistopaineen ja kapasiteetin suhteen. (Sdanghi et al., 2019)

Vaikka mäntäkompressoreita käytetäänkin paljon vedyn kompressoimiseen, se ei ole paras mahdollinen vaihtoehto. Mäntäkompressorissa liikkuvien osien paljous nostaa kuluja valmistuksessa, tehokkaan huollon järjestämisessä sekä kompressorin tehokkaassa jäähdytyksessä. Paineenvaihtelu sylinterissä puolestaan aiheuttaa melua ja tärinää, joka voi vedyn tapauksessa johtaa jopa räjähdyksiin. Vetyhaurastuminen on mäntäkompressoreissa merkittävä haitta, josta johtuen materiaalien valintaan on kiinnitettävä erityistä huomiota. (Sdanghi et al., 2019)

3.1.2 Kalvokompressori

Yhdeksi tehokkaaksi vedyn kompressointimenetelmäksi on osoittautunut kalvokompressori, sillä sen kulutus on pieni ja se tarvitsee vähän jäähdytystehoa. Myös kalvokompressorin toiminta perustuu männän liikkeeseen, mutta tässä tapauksessa mäntä ja kaasu eivät ole suorassa kosketuksessa. Männän liike siirtyy hydrauliseen nesteeseen, joka puolestaan siirtää liikkeen ohkaiseen metallikalvoon (kuva 7). Metallikalvo liikkuu pienentäen vetykaasun tilaa, jolloin kaasun paine nousee. Kalvo koostuu oikeastaan kolmesta eri kalvosta, joista yksi on kosketuksissa vetykaasun kanssa, yksi hydraulisen nesteen kanssa ja keskimmäinen estää vuotoja. (Sdanghi et al., 2019)

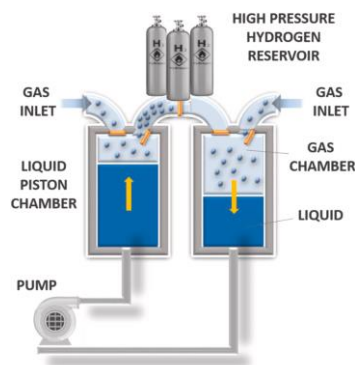


Kuva 7. Kalvokompressorin toiminta. (Sdanghi et al., 2019)

Hydraulisena nesteenä käytetään useimmiten öljyä. Kalvokompressorien suunnittelussa tärkeää on öljynpaineen säätö ja kalvon materiaalien valinta. Kalvokompressorin hyötynä on se, että kompressorissa öljy ei ole kosketuksissa vetyyn, jolloin saadaan aikaan erittäin puhdasta kaasua. Lisäksi tässä kompressorityypissä vedyn vuotaminen on minimaalista, joka tekee siitä etenkin turvallisuuden kannalta varteen otettavan vaihtoehdon. Kalvokompressoireilla päästään hyvään tehokkuuteen myös isoilla tilavuusvirroilla, mutta kalvojen kestävyydellä on rajansa. Tästä syystä kalvokompressorit soveltuvat parhaiten alhaisille tilavuusvirroille. (Sdanghi et al., 2019)

3.1.3 Nestemäntä- ja ioninestekompressorit

Nestemäntäkompressorissa mäntänä toimii neste, jonka liikettä ohjataan pumpun avulla (kuva 8). Nestemäntäkompressoireja käytetään yleisesti paineilman energiavarastoina, jossa sähköenergiaa siirretään paineistettuun 25–30 MPa ilmaan. Nestemäntäkompressoireiden etuna ovat korkeat hyötysuhteet (jopa 83 %). Korkea hyötysuhde selittyy sillä, että puristuksessa lämpö siirtyy tehokkaasti nesteeseen ja sitä ympäröivään kammioon. Näin ollen erillisiä jäähdytysratkaisuja ei tarvita. (Sdanghi et al., 2019)



Kuva 8. Nestemäntäkompressorin toiminta. (Sdanghi et al., 2019)

Ioninestekompressorit on kehitetty varta vasten parantamaan vedyn kompressoinnin hyötysuhdetta. Ioninesteillä tarkoitetaan suoloja, joiden sulamispiste on alhainen. Tämän vuoksi kyseiset suolat esiintyvät huoneenlämmössä nesteinä. Näillä suoloilla on paljon hyviä kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia. Ne ovat harmittomia ihmisten terveydelle, niiden vetyliukoisuus on matala ja ne toimivat kompressorissa hyvänä voiteluaineena. (Sdanghi et al., 2019) Ionisten nesteiden suuri etu on matalan vetyliukoisuuden lisäksi se, että niiden neste-faasin lämpötila alue on suuri. (Bellosta von Colbe et al., 2019) Kuvassa 9 on kuva ioninestekompressorista.

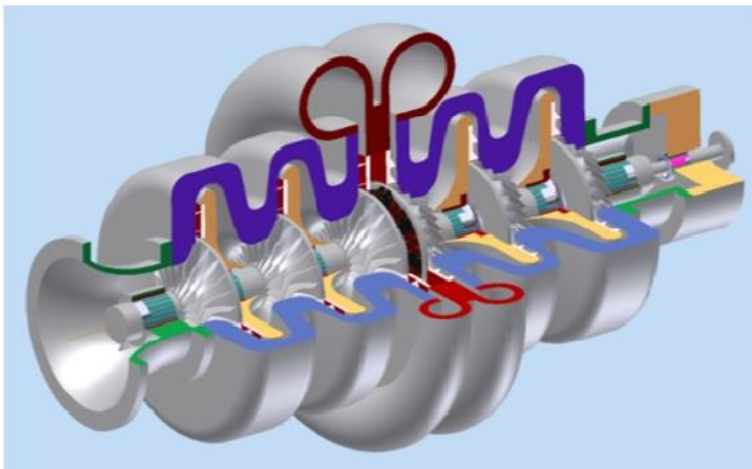


Kuva 9. Linden viisivaiheinen ioninestekompressorin IC90, maksimi kapasiteetti 370 Nm³/h ja loppupaine 1000 baaria, imupaine 5–200 baaria sekä teho 75kW. (Linde, 2019)

Ioninestekompressorin osien määrä on perinteiseen mäntäkompressorin verrattuna pienempi. Nestemäntäkompressoreita, jotka pystyvät saavuttamaan jopa 700 baarin paineen, on käytössä vetytankkausasemilla. (Bellosta von Colbe et al., 2019) Ioninestekompressorin etuja ovat suuri painesuhde, lähes isoterminen puristus, alhainen energiankulutus, pitkä käyttöikä, hiljainen ääni sekä alhaiset materiaalikustannukset. Verrattuna voitelemattomaan mäntäkompressorin ioninestekompressorin on pienempi kokoinen, ja sillä päästään suurempiin loppupaineisiin ja tilavuusvirtoihin. Ioninestekompressorin haittoina ovat kuitenkin suuri korrosio, materiaalien kuluminen ja huoltokulujen kasvaminen. Lisäksi kaasun sekaan vuotanut neste täytyy poistaa kompressoinnin jälkeen ja nesteen sekaan tunkeutunut kaasu voi aiheuttaa kavitaatiota sylinterissä. (Sdanghi et al., 2019)

3.1.4 Keskipakokompressor

Radiaali- ja aksiaalikompressoreita sanotaan kineettisiksi kompressoreiksi. Radiaalikompressoreita kutsutaan myös keskipakokompressoreiksi. Puristettava kaasu saapuu keskipakokompressorin impelleriin eli juoksupyörään aksiaalisesti ja poistuu radiaalisesti säteen suuntaan. Kuvassa 10 on monivaiheinen keskipakokompressor vedyille. Kuva on tutkimuksesta, jossa tutkittiin öljyttömiä laakereita ja tiivisteitä vedylle suunnitellussa siirtoputkiston keskipakokompressorissa.



Kuva 10. Monivaiheisen keskipakokompressorin $\frac{3}{4}$ leikkauskuva. (Heshmat et al., 2013)

Roottorin johdeosassa paineen nousu aiheutuu suhteellisen nopeuden hidastumisesta, säteittäisessä osassa keskipakovoimasta sekä staattorissa nopeuden hidastumisesta (Larjola, 1988). Juoksupyörän jälkeen virtaus kulkee diffuusorin ja mahdollisesti spiraalin kautta. Spiraalin tehtävänä on sekä muuntaa kineettistä energiaa paineeksi että johtaa virtaus putkistoon mahdollisimman pienillä painehäviöillä. Yhden vaiheen maksimi painesuhde on teollisissa koneissa yleensä enintään kolme. (AtlasCopco, 2015)

Juoksupyörä, eli impelleri, tehdään tavallisesti erityisestä ruostumattoman teräksen yhdisteestä tai alumiinista. Akselin pyörimisnopeudet voivat olla 15 000–100 000 kierrosta minuutissa. Laakereina käytetään öljykalvolaakereita. Öljyttömässä kompressorissa voidaan käyttää kaasulaakereita tai magneettilaakereita. Moderneissa ilmakekipakokompressoreissa impellereitä ohjataan suoraan suurnopeussähkömoottoreilla. Tämä mahdollistaa kompaktin kompressorin ilman vaihdelaatikkoa, joka tarkoittaa öljytöntä rakennetta. Keskipakokompressorin täytyy olla hyvin tiivistetty. (AtlasCopco, 2015)

Kun puristetaan suurta määrää vetykaasua, on keskipakokompressorin käyttäminen suositeltavaa, mutta kyseistä tekniikkaa ei ole vielä optimoitu vedylle (Witkowski et al., 2017). Mikäli maakaasukäytössä olleella keskipakokompressorilla paineistetaan kaasua, joka sisältää yli 40 % vetyä, tulee kompressorin kokonaan vaihtaa (Adam et al., 2020). Kehänopeudet eivät riitä puristamaan vetykaasua samoihin loppupaineisiin, vaan tarvittaisiin useampi vaihe lisää (Heshmat et al., 2013). Keskipakokompressoreiden painesuhteeseen vaikuttaa suuresti kaasun molekyylipaino³ (Sdanghi et al., 2020). Kineettisen puristuksen paine-ero, kun tiheys oletetaan vakioksi (Larjola et al., 2018):

$$\Delta p = \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

Mikäli käytettäisiin maakaasulle tarkoitettua keskipakokompressoria vedylle, tarvittaisiin yhtä suurelle painesuhteelle kolminkertainen kehänopeus (Sdanghi et al., 2020). Tämä tarkoittaa impellerin suurempaa halkaisijaa ja eri materiaalien käyttöä (Witkowski et al., 2017). Vety aiheuttaa vaikeuksia muun muassa keskipakokompressorin tiivisteiden, puhtauden, tärinän sekä roottorin dynamiikan suunnittelussa (Sdanghi et al., 2020). Kontaminaation estämiseksi öljyvoitelun tilalle täytyy kehittää toinen ratkaisu. Tämä toinen ratkaisu voisi olla kalvolaakerit, jotka toimivat luotettavasti suurilla nopeuksilla käyttäen vetykaasua voiteluaineenaan. (Heshmat et al., 2013)

Vetykeskipakokompressoria on tutkittu, mutta käytännön sovelluksista puhtaalle vedylle ei tiedonhaku tuottanut tulosta. Haasteena on kehittää sellainen keskipakokompressorin, joka olisi luotettava, kustannus- ja energiatehokas sekä pystyisi paineistamaan vetyä yli 3 000 kg/h (33 300 m³/h) (Witkowski et al., 2017). Tiedonhaku ei tuottanut tulosta myöskään aksiaalikompressoreiden käytöstä puhtaan vedyn kompressoinnissa.

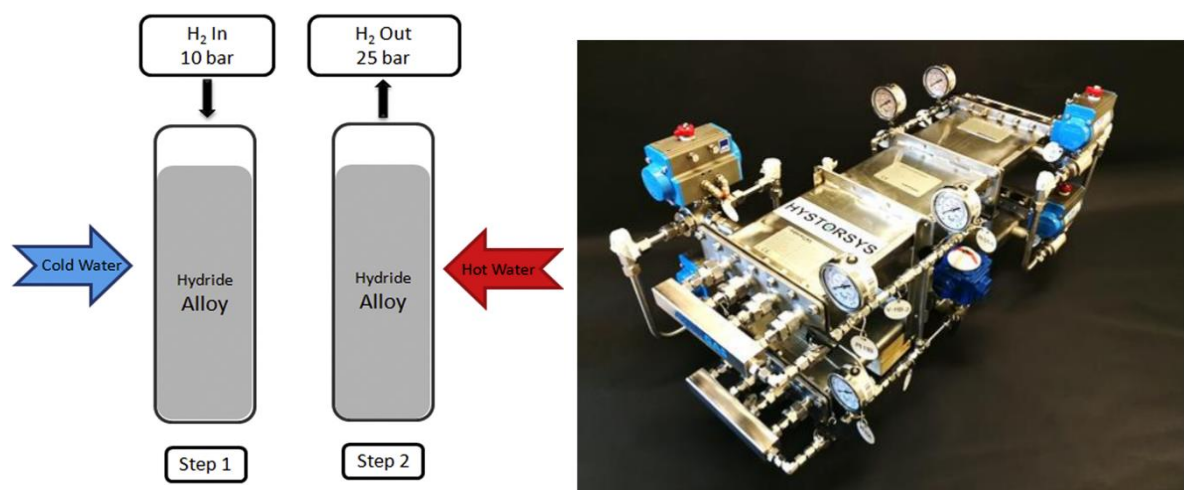
3.2 Ei-mekaaniset kompressorit

Tässä kappaleessa esitellään jo pitkälle kehitettyjä metallihydridi- ja sähkökemiallisia kompressoreita. Näiden lisäksi myös kryopumput ja adsorptiokompressorit voisivat soveltua vedyn paineistamiseen (Sdanghi et al., 2019).

³ Vedyn molekyylipaino on 2,016 g/mol (taulukko 1) ja metaanin 16,04 g/mol (NIST et al., 2018).

3.2.1 Metallihydridikompressori

Metallihydridikompressorin toiminta perustuu metallihydridien hydraus- ja dehydrauskykyyn⁴. Vety absorboituu⁵ matalassa paineessa (<10bar) ja lämpötilassa (<30°C) ja desorboituu⁶ korkeammassa paineessa ja lämpötilassa (>60°C). Tasapainotilan paine on lämpötilan ja vetypitoisuuden funktio. Toimintaperiaate ja markkinoilla oleva kompressori on esitetty kuvassa 11. Metallihydridit ovat seoksia, jotka pystyvät sitomaan vetyä rakenteeseensa. Kompressorin suunnittelussa oleellista onkin metallihydridien ominaisuuksien tutkiminen. Tämä energiataloudellinen ja likaantumaton kompressointimenetelmä on varteen otettava vaihtoehto mekaanisille kompressoreille sekä kehitysvaiheessa oleville sähkökemiallisille kompressoreille. Metallihydridikompressorin etuja ovat lisäksi yksinkertaisuus, kompakti koko, luotettavuus, liikkuvien osien puuttuminen sekä mahdollisuus hyödyntää jätelämpöä. (Stamatakis et al., 2018)



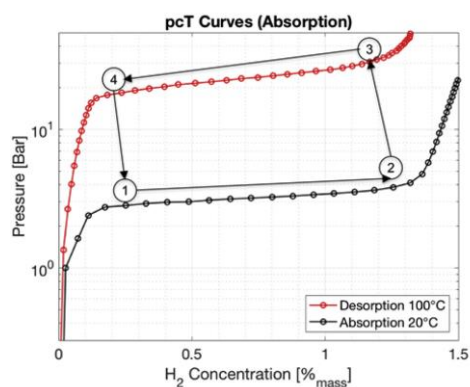
Kuva 11. Vasemmalla metallihydridikompressorin toimintaperiaate (Stamatakis et al., 2018) ja oikealla HYSTORSYS-valmistajan kaksivaiheinen metallihydridi kompressori, malli HYMHEC, imupaine 20 bar, loppupaine 200 baaria ja siirtokapasiteetti 1 Nm³/h. Mallia on saatavilla 12 Nm³/h asti. (HYSTORSYS, 2018)

⁴ Hydraus on kemiallinen reaktio, jossa hiiltä sisältävän molekyylin sidoksiin liittyy vetyä ja dehydraus käänteinen reaktio hydraukselle (Schaschke, 2014).

⁵ Absorptio on massansiirtoprosessi, jossa kaasuseoksessa oleva kaasu siirretään nestemäiseen tai kiinteään aineeseen. Absorptio on yleinen kaasujen erottelutapa. (Schaschke, 2014)

⁶ Desorptiolla tarkoitetaan absorption vastaista prosessia, jossa atomit, ionit tai molekyylit poistetaan materiaalin pinnalta. Desorptio vaatii lämpöä. (Schaschke, 2014)

Kaikkiaan nelivaiheinen puristus on esitetty kuvassa 12. Ensimmäisessä vaiheessa vety absorboituu matalassa paineessa ja matalassa lämpötilassa muodostaen hydridin ja tuottaen samalla lämpöä. Toisessa vaiheessa hydridiä kuumennetaan, kunnes saavutetaan haluttu painetaso. Kolmas vaihe on vedyn desorptio korkeassa paineessa ja korkeassa lämpötilassa. Desorptio on endoterminen reaktio ja vaatii lämpöä järjestelmään sen aikana. Viimeinen vaihe on järjestelmän jäädyttäminen takaisin alkulämpötilaan. Metallihydridikompressorin tarvitsemasta energiasta pääosa on desorptioon käytettävä lämpö. (Bellosta von Colbe et al., 2019)



Kuva 12. Vetykaasun absorptio ja desorptio, paine, konsentraatio ja lämpötila. (Bellosta von Colbe et al., 2019)

Puristus on usean jäädytys ja lämmitysvaiheen seurausta, joten kompressointia ohjataan lähes täysin lämmönsiirrolla. Kun käytössä on korkean lämpötilan lämmönlähde, voidaan yhdellä vaiheella saavuttaa 3–10 kertainen paineenousu. Käytännössä yksivaiheisella metallihydridikompressorilla paineenousu ei ole vielä riittävä. (Sdanghi et al., 2019). Käytännön kokeessa kuusivaiheisella kompressorilla saatiin paineenousu kahdesta baarista yli kahteensataan baariin. Metallihydridikompressorilla on hyvät kaupallistamismahdollisuudet lähitulevaisuudessa. (Stamatakis et al., 2018) Lisäksi on useita tutkimuksia, joilla on todistettu, että monivaiheisella metallihydridikompressorilla voidaan saavuttaa 70 MPa painetaso. Kuitenkin näin suurella paineenousulla hyötysuhde kärsii (Sdanghi et al., 2019). Kaupallisesti metallihydridikompressoreita on saatavilla 200 baarin paineille. (Bellosta von Colbe et al., 2019)

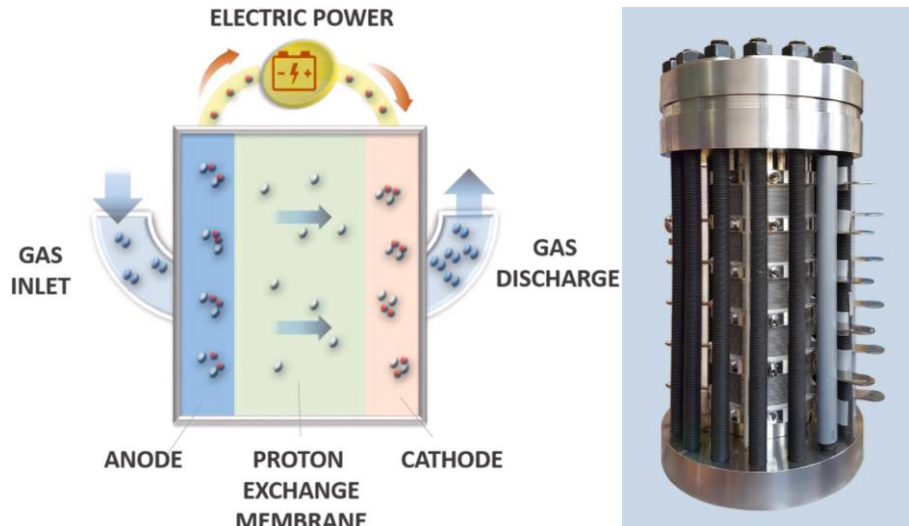
Metallihydridikompressorin yksi ylivoimaisimmista eduista on sen kyky hyödyntää teollisuuden jätelämpöä tai uusiutuvaa energiaa, kuten aurinkosähköä. Verrattuna mekaanisiin kompressointimenetelmiin paineistuksessa säästettäisiin sähkön hinnassa.

Metallihydridikompressori voitaisiin kytkeä esimerkiksi elektrolyysilaitteen perään, jolloin hyödynnettäisiin elektrolyysissä syntynyt lämpö. Menetelmän hyötysuhde on alle 25 prosenttia lämpötilassa 423 K, ja keskimäärin alle 10 prosenttia. Hyötysuhde on alhainen, mutta sitä voidaan parantaa käyttämällä elektrolyysin jätelämpöä tai käyttämällä korkeampaa desorptiolämpötilaa. (Sdanghi et al., 2019)

Metallihydridien kehittäminen keskittyy termodynaamisesti sopivien metalliyhdisteiden löytämiseen, tilavuus- ja gravimetrinen kapasiteetin parantamiseen sekä vedyn adsorption ja desorption kinetiikkaan. Metallihydridikompressorin etu kiinteissä varastoissa on sen kompakti koko. Kiinteissä sovelluksissa kompressorin massa ei ole olennaisin tekijä. Metallihydridikompressorit mahdollistavat hyvin puhtaan (99,9999 %) vedyn paineistamisen. Metallihydridikompressorit mahdollistavat myös vedyn varastoinnin matalassa paineessa, mikä lisää huomattavasti järjestelmän turvallisuutta ja joustavuutta. (Bellosta von Colbe et al., 2019)

3.2.2 Sähkökemiallinen kompressori

Sähkökemialliset kompressorit sopivat parhaiten sovelluksiin, jossa tarvitaan pieniä määriä kaasua korkeassa paineessa. Matalassa paineessa oleva vety syötetään kompressorin anodille, jossa se hajoaa protoneiksi (H^+) ja elektroneiksi. Protonit kulkeutuvat elektrolyytin läpi katodille, samoin elektronit ulkoisen piirin kautta. Katodilla protonit ja elektronit yhdistyvät jälleen vedyksi, mutta korkeammassa paineessa. Tämä prosessi jatkuu niin kauan kuin järjestelmään syötetty energia on järjestelmän sisäistä energiaa suurempi. (Sdanghi et al., 2019) Kompressorin toimintaperiaate ja erään valmistajan sähkökemiallinen kompressori on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Vasemmalla sähkökemiallisen kompressorin toimintaperiaate (Sdanghi et al., 2019). Oikealla HyET HCS100 sähkökemiallinen vetykompressori. Yksivaiheisen kompressorin poistopaine jopa 875 baaria, maksimi kapasiteetti 10 kg/vrk eli noin 4,6 Nm³/h ja energiankulutus alle 4 kWh/kg H₂. (HyET, 2018a)

Anodilla tapahtuva hapettuminen noudattaa Faradayn lakia. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä suurempi virta syötetään, sitä suurempi on virta anodilta katodille. Kompressorin suorituskykyä arvioidaan Nernstin yhtälöllä, jolla voidaan verrata saavutettua painesuhdetta syötettyyn jännitteeseen. (Sdanghi et al., 2019)

Anodin ja katodin yli potentiaaleja voidaan pitää merkityksettömänä. Sen sijaan merkittävin suorituskykyyn vaikuttava tekijä on membraanikalvon resistanssi. Sähkökemiallisen kennon käyttöikä on yli 20 000 tuntia ja tyypilliset painetasot 20–35 MPa. Suuremmat puristukset ovat mahdollisia, mutta ne eivät ole kannattavia. (Sdanghi et al., 2019) Vedyn läpäisevyys katodilta anodille lisääntyy lineaarisesti loppupaineen kasvaessa, mikä huonontaa hyötysuhdetta (Sdanghi et al., 2020). Sähkökemiallisen kompressorin etuja ovat pieni kompressointivaiheiden määrä, hiljainen ääni, tasainen käynti (ei tärinää) ja yksinkertainen rakenne. (Sdanghi et al., 2019)

4 MENETELMIEN VERTAILU

Tässä kappaleessa vertaillaan aluksi kompressoreita niiden saatavuuden, toiminta-arvojen, kustannusten sekä etujen ja haittojen osalta. Toiminta-arvoista tarkasteluun on valittu kompressorin maksimi poistopaine ja tilavuusvirta, hyötysuhde, energiankulutus sekä kustannukset. Lopuksi menetelmiä vertaillaan niiden soveltuvuuteen jakelun eri vaiheissa. Tämä tarkastelu painottuu vedyn siirtoverkkoon, jonka lisäksi on katsaus elektrolyysin jälkeisestä ja loppukäytön paineistuksesta.

4.1 Saatavuus

Vetykompressoreita on tutkittu ja kehitetty paljon viime vuosina. Tässä kappaleessa keskitytään siihen, että mitkä menetelmät ovat tällä hetkellä markkinoilla ja mitkä menetelmät ovat vielä kehitysvaiheessa. Osa kompressoreista on jo vanhaa tekniikkaa ja niiden saatavuus jo tällä hetkellä hyvä. Varsinkin ei-mekaanisten kompressoreiden kehittäminen on ollut viime vuosina vilkasta, mutta näiden uudempien teknologioiden osalta saatavuus on selvästi perinteisiä jäljessä. Taulukossa 2 on listattu tiedonhaun tuloksena vetykompressoreiden valmistajia.

Taulukko 2. Katsaus markkinoilla olevien vetykompressoreiden valmistajiin. (Peschel, 2020)

Kompressorityyppi	Valmistaja
Mäntä	Hydropac, Neuman & Esser, Sera, Kobelco, Haskel, LMF, SIAD, Maximator, Resato, Sauer
Kalvo	PDC machines, Neuman & Esser, Ventos, Sera Com-Press, Howden
Sähkökemiallinen	Skyre inc, HySA, HyET Hydrogen
Ruuvi	MAN, KobelCo, Adicomp
Ionineste	Linde
Metallihydridi	GRZ Technologies, Hystorsys ab Norway, Xergy
Keskipako	Useita, mutta rajoitetusti vedylle

Kaikista eniten tarjontaa löytyy mäntäkompressoreille. Mäntäkompressoritekniikka on yksi kompressoritekniikan vanhemmista ja se tunnetaan hyvin. Kalvokompressoreiden tarjonta on myös kasvanut viime vuosina ja niiden valmistajia näyttäisi olevan toiseksi eniten. Perinteisiä ruuvikompressoreitakin on tarjolla vedylle, mutta niiden käytöstä ei löytynyt tietoa.

Lisäksi markkinoille ovat tulleet sähkökemialliset kompressorit. Ioninestekompressoreiden markkinat ovat vielä pienet, sillä toistaiseksi ainut malli on Linden valmistama. Myös ensimmäiset metallihydridikompressorit ovat saatavilla, mutta niidenkin tarjonta on pientä ja käyttökohteet rajoittuneet. Keskipakokompressoreita ei vielä ole saatavilla puhtaalle vedylle.

4.2 Toiminta-arvot

Tässä kappaleessa vertaillaan kompressoreiden hyötysuhteita, maksimi tilavuusvirtoja ja loppupaineita sekä energiankulutusta. Kyseiset suureet on esitetty kullekin kompressorityypille taulukossa 3. Ilmoitetut arvot ovat kirjallisuudesta peräisin ja suuntaa antavia. Tilavuusvirrat ovat STP-olosuhteisiin referoituja maksimiarvoja. Maksimi loppupaine kuvaa painetasoa, johon kompressori pystyy korkeintaan vedyn puristamaan. Energiankulutus on ilmaistu yhtä paineistettua vetykiloa kohti. Energiankulutuksen lukuarvoissa ei ole ilmoitettu painesuhteita, joten luvut ovat keskimääräisiä. Tarkastelusta on jätetty pois aiemmassa kappaleessa mainitut ruuvi- ja keskipakokompressorit, sillä niiden osalta ei löytynyt tarpeeksi tietoa vetysovelluksista.

Taulukko 3. Kompressorityyppien hyötysuhde, tilavuusvirta, maksimi loppupaine ja energiankulutus. (Sdanghi et al., 2020) (Peschel, 2020)

Kompressorityyppi	Hyötysuhde [%]	Tilavuusvirta [Nm ³ /h]	Maksimi poistopaine [bar]	Energiankulutus [kWh/kg]
Ionineste	> 75	< 1000	1000	< 2,7
Sähkökemiallinen	60	< 10	950	< 4
Mäntä	45	10 000	1300	< 5
Kalvo	45	< 1000	3000	< 5
Metallihydridi	< 10	< 10	250	10

Ioninestekompressoreilla on tällä hetkellä kaikista suurin hyötysuhde. Toisena tulee sähkökemiallinen kompressori. Mäntä- ja kalvokompressoreiden hyötysuhteet ovat samaa luokkaa, metallihydridien kaikista alhaisin. Lähes kaikilla menetelmillä päästään riittävän korkeisiin paineisiin, joten erottavaksi tekijäksi jää kompressorin tilavuusvirta. Volyymilta/tilavuusvirraltaan mäntäkompressori on tällä hetkellä ylivoimaisin. Kalvo- ja ioninestekompressorit yltyvät myös kohtuullisiin tilavuusvirtoihin, mutta sähkökemialliset ja metallihydridikompressorit jäävät vielä jälkeen muista tilavuusvirtojen suuruudessa.

4.3 Kustannukset

Yhdysvaltojen energiaministeriön yhtenä tavoitteena on, että vedyn kompressoinnin energiankulutus 100:sta 875 baariin on saatava alle 1,6 kWh/kg. Lisäksi tavoitellut pääomakustannukset ilman asennusta olisivat 275 000 \$ ja vuotuiset huolto- ja kunnossapitokustannukset 4 % tästä hinnasta. (Sdanghi et al., 2020) Taulukosta 3 nähdään, että tällä hetkellä lähimäksi tavoitteena olevaa energiankulutuksen arvoa päästään ioninestekompressorilla. Toiseksi alin energiankulutus on sähkökemiallisella kompressorilla. Mekaanisen kompressorin pääomakustannukset (CAPEX) ovat keskimäärin 170 000 \$ ja vuotuiset käyttökustannukset (OPEX) noin 5 % pääomakustannuksista (Sdanghi et al., 2020).

Sähkökemialliset kompressorit ovat kilpailukykyisiä kustannustensa puolesta perinteisiin mekaanisiin kompressoreihin nähden. Sähkökemiallisen kompressorin pääomakustannukset ovat keskimäärin 170–1 700 \$/kg/vrk ja mekaanisten noin 2 300 \$/kg/vrk (Sdanghi et al., 2019). Sähkökemiallisen kompressorin käyttökustannukset ovat alle 0,5 €/kg ja mekaanisten 1,5–2,0 €/kg. (HyET, 2018b)

Taulukossa 4 on esitetty vertailu metallihydridi- ja mäntäkompressorin toiminta-arvoista. Molemmilla kompressoreilla on sama imu- ja poistopaine, sekä tilavuusvirta. Sähkön hintana on käytetty arvoa 0,1 €/kWh ja jätelämmön 0 €.

Taulukko 4. Metallihydridi- ja mäntäkompressorin kustannusten vertailu. (Stamatakis et al., 2018)

	metallihydridi	mäntä	
tilavuusvirta	56,63	56,63	Nm ³ /h
imupaine	6,89	6,89	bar
poistopaine	17,11	17,11	bar
vaiheiden määrä	5	3	
paino	1000	3600	kg
tilavuus	400	6000	l
sähköteho	500	20000	W
pääomakustannukset	130000	145000	€
vuotuinen sähkö	100	4000	€
vuotuinen huolto	1000	8000	€

Pääomakustannukset eivät eroa paljoa toisistaan, mutta metallihydridikompressorin vuotuiset kustannukset ovat huomattavasti pienemmät. Lisäksi metallihydridikompressorin koko ja paino ovat pienemmät. Mäntäkompressorissa tarvitaan kaksi vaihetta vähemmän saman paineen aikaansaamiseksi.

4.4 Edut ja haitat

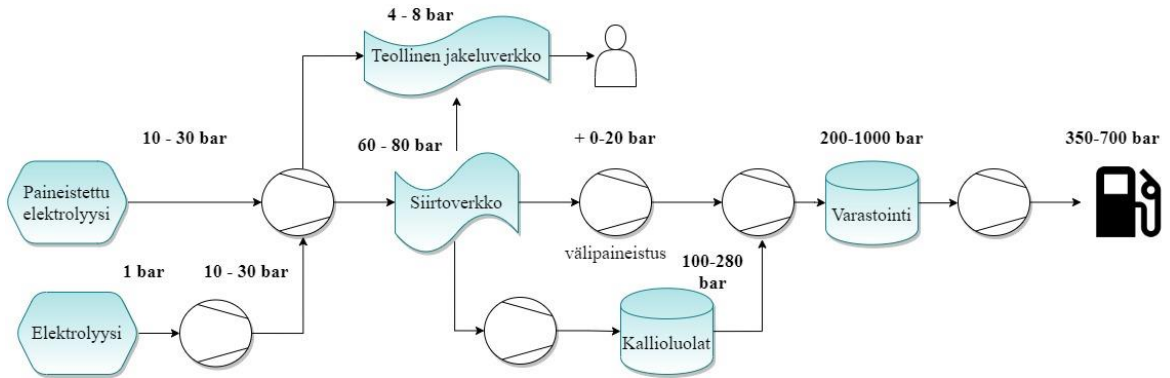
Taulukkoon 5 on koottu vetykompressoreiden oleellisimpia etuja ja haittoja. Edellisessä kappaleessa mainittujen toiminta-arvojen lisäksi huomattaviksi eroavaisuuksiksi nousevat muun muassa menetelmän likaavuus, melu ja värinä, sekä huolto ja kustannukset.

Taulukko 5. Vetykompressoreiden etuja ja haittoja. (Sdanghi et al., 2019)

	Edut	Haitat
Mäntä	Tunnettu tekniikka, sopivuus eri tilavuusvirroille, korkeat painesuhteet	Voiteluaineiden aiheuttama kontaminaatio, vetyaurastuminen, liikkuvien osien paljous, monimutkainen valmistus, tehokkaan huollon vaikeus, lämmönsiirron hallitseminen, kova melu ja värinä
Kalvo	Korkea suorituskyky, alhainen tehonkulutus ja jäähdytyksen tarve, sopii hyvin puhtaille ja räjähdysherkille kaasuille	Kalvon kestävyys, monimutkainen muotoilu
Ionineste	Korkea hyötysuhde ja painesuhteet, alhainen energiankulutus ja materiaalikustannukset, vähäinen huollontarve, pitkä käyttöikä, hiljainen, lähes isoterminen puristus, ei kontaminoi, vain vähän liikkuvia osia	Nesteen vuotaminen, kavitointi, korroosio
Metallihydridi	Termisesti ohjattava, ei liikkuvia osia, kompakti muotoilu, turvallisuus, hiljainen, puhdas vety	Rajoitettu lämmönsiirto, välttämättömyys käyttää sopivia metalliseoksia, matala hyötysuhde, paino, materiaalien suuret kustannukset
Sähkökemiallinen	Alhaiset käyttökustannukset, puhtaan vedyn tuottaminen, ei liikkuvia osia, korkea hyötysuhde, käyttö vedyn puhdistuksessa.	Kokoonpanon rakentaminen vaikeaa, täydellinen tiivistys vaikea toteuttaa, korkea kennon resistanssi, diffuusio

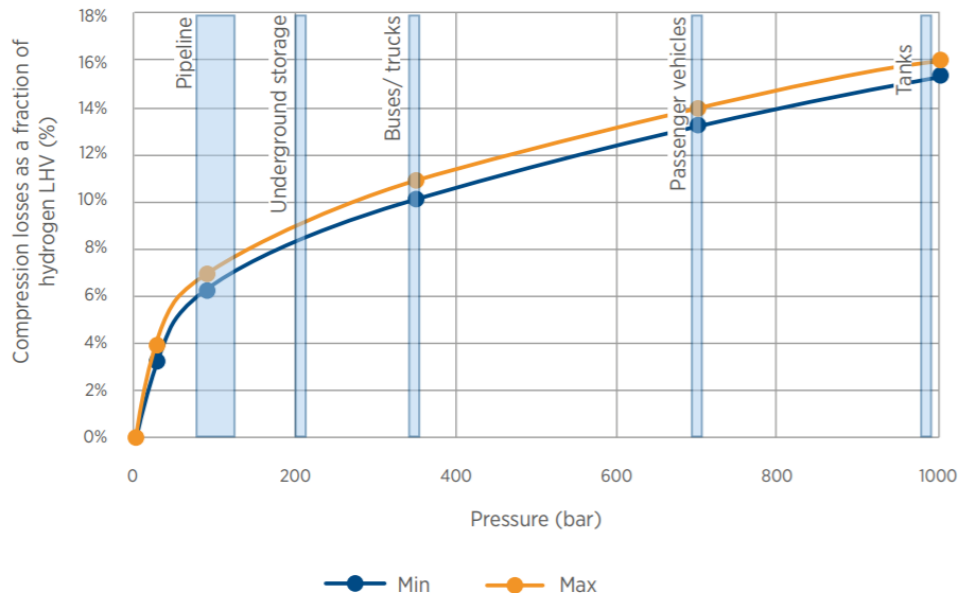
4.5 Vedyn jakelu

Tässä kappaleessa vertaillaan kompressoreita volyymin ja tarvittavien painetasojen avulla jakelun eri vaiheissa, kun jakelutapana toimii siirto- ja jakeluverkosto. Kuvassa 14 on hahmotelma vetyverkon rakenteesta ja esimerkin omaisesti painetasoja jakelun eri vaiheissa.



Kuva 14. Vedyn paineistus ja painetasot jakelun eri vaiheissa.

Kuvassa 15 on esitetty vedyn puristuksen aiheuttamat energiahäviöt ilmanpaineesta tuhan- teen baariin asti. Painesuhde on kriittinen parametri kompressoinnissa. Kuvaajasta nähdään, että alussa energiahäviöiden käyrä on kaikista jyrkin. Puristettaessa 1–60 baariin painesuhde on 60. Vertauksena puristettaessa 60–300 baariin painesuhteen suuruus on vain viisi.



Kuva 15. Minimi- ja maksimi energiahäviöt kompressoinnissa prosentteina vedyn alemmasta lämpöarvosta monivaiheisessa mekaanisessa puristuksessa. (IRENA, 2020)

4.5.1 Elektrolyylerin paine

Taulukossa 6 on esitetty muutaman eri valmistajan tarjoamia AEL ja PEM elektrolyysereiden toiminta-arvoja. Taulukosta näemme, että yksittäisen 1–2 MW elektrolyylerin tuotantokapasiteetti on mahdollisesti joitakin satoja normaalikuutiometrejä tunnissa sekä tuotetun vedyn paineet elektrolyyseristä riippuen ilmakehän paineesta jopa 40 baariin.

Taulukko 6. Esimerkkejä eri valmistajien elektrolyysereiden suuruusluokista ja paineista. (Boudellal, 2018)

Valmistaja	Tyyppi	Teho [MW]	Volyymi [Nm ³ /h]	Paine [bar]
NEL Hydrogen	AEL	2,2	≤ 500	1
NEL Hydrogen	AEL	-	≤ 60	15
Siemens	PEM	1,25	225	35
Proton OnSite	PEM	1	≤ 200	-
Hydrogenics	PEM	1,5	≤ 285	40

Sekä alkali-, että PEM-elektrolyysereit pystyvät nykyisellään jo 30 baarin tuottopaineisiin. PEM-elektrolyysereillä myös korkeammat paineet ovat mahdollisia ja tulevaisuudessa elektrolyysereiden käyttöpaineita tullaan yhä kehittämään jopa 70 baariin (IRENA, 2020). Kuvan 15 käyrän mukaan vedyn kompressointi matalasta paineesta kuluttaa paljon energiaa. Tämän vuoksi korkeapaineisen vedyn tuottaminen elektrolyyserissä on houkuttelevaa. Mikäli 30 baarin paine tuotetaan kompressorilla elektrolyylerin sijaan, kulutetaan 3,5–4 % vedyn alemmasta lämpöarvosta (IRENA, 2020).

Kompressoinnilla elektrolyyserissä on ongelmana kuitenkin hyötysuhteen laskun lisäksi vedyn kulkeutuminen elektrolyyserissä väärään suuntaan, materiaalien kestävyys ja turvallisuus. Kun elektrolyylerin suunnittelupainetta nostetaan, kustannukset nousevat huomattavasti. Kompressoinnista aiheutuvat kulut ovat verrattain pieniä tuotantokuluihin nähden, jolloin halvempien materiaalien käyttö sekä yksinkertaisempi suunnittelu voisivat johtaa suurempiin hyötyihin. Suuremmat kompressorit ovat pienempiä tehokkaampia. Mikäli painetta joudutaan joka tapauksessa nostamaan elektrolyylerin jälkeen, voisi kustannusten laskeminen elektrolyyserissä olla kannattavampaa sen sijaan että tuotettaisiin suurempi paine. (IRENA, 2020)

Metallihydridikompressorit voisivat toimia elektrolyylerin perässä hyödyntäen elektrolyysissä syntyvää jätelämpöä ja nostaa tuotetun vedyn painetta. Myös sähkökemiallinen

kompressori soveltuu käytettäväksi elektrolyysin perään parantaen systeemin hyötysuhdetta. Sähkökemiallisen kompressorin hyötysuhde matalilla paineilla on huomattavasti mekaanisten kompressoreiden hyötysuhteita parempi. (Sdanghi et al., 2019). Näiden menetelmien käyttäminen paineen nostamiseen jakelun alkuvaiheissa vähentäisi kompressoinnin kulluttamaa kokonaisenergiaa vedyn jakelussa.

4.5.2 Siirtoverkko

Vedyn siirtokapasiteetti vedyn jakelun eri vaiheissa on olennainen parametri paineennostokyvyn rinnalla kompressorin valinnassa. Witkowski et al. suorittamassa tutkimuksessa analysoidaan elektrolyysillä tuotetun vedyn kompressointia ja putkijakelua turvallisuuden ja termodynamiikan kannalta. Vety siirtoverkon kompressointimenetelmä riippuu tilavuusvirrasta ja siirtoverkon paineesta. Tutkimukseen valittiin tilavuusvirrat eri tehoisten tuulivoimaloiden (P_t) mukaan, sillä projektin tavoitteena on tuottaa vetyä elektrolyysillä, johon tarvittava energia saadaan tuulivoimasta. Putkihalkaisijat laskettiin vastaamaan valittuja tilavuusvirtoja, kun putken maksimipituudeksi valittiin viisikymmentä kilometriä (ilman kompressoriasemaa tällä välimatkalla). (Witkowski et al., 2017) Tutkimuksen tuloksia on poimittu taulukkoon 7.

Taulukko 7. Tutkimuksessa valittuja massavirtoja vastaavat suunnittelun valinnat. (Witkowski et al., 2017)

P_t [MW]	q_m [kg/s]	q_v [Nm ³ /h]	d_{in} [m]	Vaiheita	n [rpm]	Sovellus	P_{tot} [kW]
40	0,2	8011	0,06–0,065	3		Mäntä	565
100	0,5	20027	0,094–0,1	3		Mäntä	1373
200	1	40054	0,12–0,15	2 x 6 2	19600	Keskipako + Mäntä	2733
	2	80107	0,16–0,2	2 x 6 2	23000	Keskipako + Mäntä	5465
550	2,8	112150	0,18–0,25	8	59639–65000	Keskipako	6566

Työssä ehdotetaan, että alle 0,5 kg/s verkolle sopiva kompressointi menetelmä voisi olla kolmivaiheinen mäntäkompressori. Suuremmalle massavirralle (1–2 kg/s) sopisi kaksijakoinen monivaiheinen keskipakokompressori, jonka perässä on kaksivaiheinen mäntäkompressori, sekä yli 2,8 kg/s massavirroille kahdeksan vaiheinen keskipakokompressori lähes 600 m/s kehänopeuksilla. (Witkowski et al., 2017) Pitää kuitenkin muistaa, että tämänhetkiset vedylle tarkoitetut keskipakokompressorit ovat prototyyppivaiheessa (Di et al., 2015)

(Heshmat et al., 2013). Lasketut putkikoot eri massavirroille vaihtelivat välillä DN 65 - DN 250, putkistopaineen ollessa 100 baaria lämpötilassa 300 K. Elektrolyysin tuottopaineeksi arvioitiin puolestaan 20 baaria 300 K lämpötilassa. (Witkowski et al., 2017)

Mikäli puhdasta vetyä siirrettäisiin maakaasuputkessa, tarvittaisiin vedyn pienemmän energiatihedden vuoksi samassa siirtopaineessa kolminkertainen tilavuusvirta maakaasuun nähden, jotta energiavirta pysyisi vakiona (Adam et al., 2020). Monivaiheisilla rinnakkaisilla mäntäkompressoreilla voidaan saavuttaa taloudellisesti kannattava, jopa 750 000 Nm³/h siirtokapasiteetti. Tätä suuremmille kokonaistilavuusvirroille tarvitaan turbokompressoreita. Teknologia tähän on jo olemassa, mutta tällä hetkellä mäntäkompressoreiden hyötysuhde on parempi. (Adam et al., 2020)

Myös ruuvikompressorit soveltuvat suurille tilavuusvirroille, mutta kontaminaation vuoksi niiden tulisi olla voitelemattomia ja niiden käyttö vetysovelluksissa on epätavallista (Peschel, 2020). Lisäksi pyörivien kompressoreiden käyttöä rajoittavat tiukat toleranssit vetyvuotojen suhteen. (Witkowski et al., 2017)

4.5.3 Varastot

Vetyvarastoja on kuvailtu kappaleessa 2.3. Vetyvarastosta ja varaston käyttötarpeesta riippuen kannattaa kompressorin valinnassa kiinnittää huomiota etenkin kompressoinnissa käytettävään energianlähteeseen, hyötysuhteeseen, tarvittavaan kompressointinopeuteen ja loppupaineeseen. Mikäli pienemmän mittakaavan käyttökohteessa on jätelämpöä käytettävissä, on metallihydridikompressorin varten otettava vaihtoehto. Mikäli oletetaan, että siirtoverkon paine on 80 baaria ja varastona toimivan suolakaivon paine 240 baaria, olisi tarvittava painesuhde 3. Korkeapaineiseen säiliöön (350–700 bar) puristettaessa tarvittava painesuhde voi puolestaan olla jopa 4–9.

Vetyvaraston kompressorin valinta riippuu pitkälti sovelluksesta ja käyttötarkoituksesta. Mikäli tarve on nopealle kompressorille ja tarvittava varastokapasiteetti on suuri, tulevat kyseeseen mekaaniset mäntä- tai kalvokompressorit, jotka pystyvät suurempiin tilavuusvirtoihin. Pienemmissä sovelluksissa sähkökemiallinen tai ioninestekompressorin olisi parempi ratkaisu niiden alhaisempien energiankulutusten vuoksi. Yli 100 kW nimellisteholla mekaaniset kompressorit ovat sähkökemiallista kompressoria tehokkaampia (Toghyani et al., 2020).

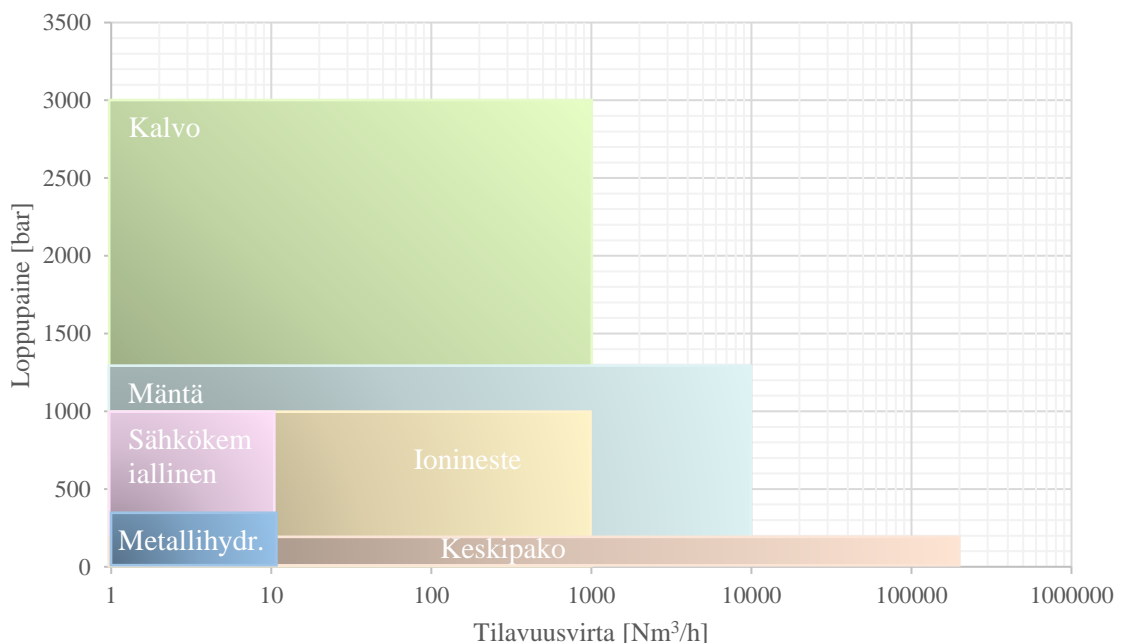
Sähkökemiallisella kompressorilla voidaan saavuttaa sama painesuhde kuin mekaanisillakin kompressoreilla. Vaikka sähkökemiallisten kompressorien on osoitettu toimivan tehokkaammin kuin mekaaniset, ei niiden käyttö ole kannattavaa suurilla painesuhteilla. Sen sijaan ne voisivat soveltua paremmin muiden menetelmien kaveriksi. (Sdanghi et al., 2019)

Uusea yritys on tuonut markkinoille valmiita vetytankkausasemaratkaisuja. Esimerkiksi Linde tarjoaa tankkausasemaa, jossa monivaiheinen ioninestekompressorin paineistaa vedyn korkeapainesäiliöihin varastoon, joista tankatessa vety siirtyy polttokennoautojen säiliöihin. Ulospäin tankkausasemat muistuttavat perinteisiä tankkausasemia. Tankkausajat ovat kohtuullisia ja asemat pystyvät tarjoamaan vetyä jopa neljälle sadalle autolle vuorokaudessa. (Linde, 2020) Linden IC-90 mallin 75 kW ioninestekompressorin siirtokapasiteetti on vajaa 300 Nm³/h ja se pystyy paineistamaan 5–200 baarin vedyn jopa tuhanteen baariin (Linde, Gorecki, 2018).

5 TULOKSET

Mäntä- ja kalvokompressoreiden saatavuus on kaikista parhain, mutta myös ionineste-, sähkökemiallisia ja metallihydridikompressoreita on jo markkinoilla. Hyötysuhteeltaan ioninestekompressorit ja sähkökemialliset kompressorit ovat mäntä- ja kalvokompressoreita parempia. Metallihydridikompressorin hyötysuhde on puolestaan alhainen, mutta on otettava huomioon sen kyky hyödyntää jätelämpöä ja uusiutuvaa energiaa.

Erilaiset mäntätyyppiset kompressorit ovat selkeästi yleisimmin käytettyjä vedyn kompressoinnissa. Mäntätyyppisissä kompressoreissa on käytetty perinteisiä pyörimisnopeuksia. Kuvassa 16 on esitetty eri kompressoreiden toiminta-alueet tilavuusvirran ja loppupaineen osalta. Arvot ovat suuntaa antavia. Kuvasta näkyy mäntätyyppisten kompressoreiden suuren käyttöasteen syy. Ne pystyvät puristamaan vetyä suuriin paineisiin ja kohtuullisen suurilla tilavuusvirroilla. Siirtokapasiteetti on kuitenkin rajallinen, jonka vuoksi siirtoverkoissa tul- laan tarvitsemaan keskipakokompressoreita. Sähkökemialliset ja metallihydridikompresso- rit vaikuttavat lupaavalta tekniikalta ja niiden kehittäminen on aktiivista. Tutkimuksissa on saavutettu korkeita painetasoja, mutta niiden käyttöä rajoittavat vielä pienet tilavuusvirrat.



Kuva 16. Vetykompressoreiden toiminta-alueet: loppupaine ja tilavuusvirta. Tilavuusvirta logaritmisella asteikolla.

Ioninestekompressorin energiankulutus on kaikista alhaisin. Myös sähkökemiallisen kompressorin energiankulutus on alhainen verrattuna mäntä- ja kalvokompressoreihin. Metallihydridikompressorin energiankulutus on suurin.

Vertaillen samoilla paineilla ja tilavuusvirroilla toimivia ei-mekaanisten ja mekaanisten kompressoreiden kustannuksia keskenään, ovat ei-mekaanisten käyttökustannukset ja myös pääomakustannukset alhaisempia kuin mekaanisten. Metallihydridin käyttökustannusten laskennassa vaikuttaa jätelämmön saatavuus ja hinnoittelu, mutta mikäli jätelämmön arvo oletetaan nollassa, tulee metallihydridikompressoriksi edullisemmaksi kuin mekaaninen kompressoriksi. Yleisesti voidaan sanoa, että esimerkiksi metallihydridi- ja sähkökemialliset kompressorit mahdollistavat vetykompressoreiden pienemmän koon sekä kustannusten laskemisen etenkin käyttökustannusten osalta.

Elektrolyysin tuottopaine vaikuttaa tarpeeseen kompressoida vetyä siirtoverkkoa varten. Kompressointi ilmanpaineesta siirtoverkon paineeseen vie paljon energiaa. Elektrolyysereiden paineet ovat kasvaneet kehityksen myötä, mutta paineen nostattamisella on vaikutus elektrolyysin kustannuksiin. Matalapaineista vetyä tuottava elektrolyysi voi olla kokonaisuudessaan kustannustehokkaampi kuin korkeapaineista tuottava.

Vetysiirtoverkossa tällä hetkellä paras vaihtoehto on mäntäkompressoriksi. Suurten tilavuusvirtojen myötä on kuitenkin tarvetta keskipakokompressorille. Keskipakokompressoreita käytetään maakaasun siirtoon, mutta niitä ei vielä ole optimoitu vedylle. Varastokompressorin valinta riippuu varaston suuruudesta ja tarvittavasta tilavuusvirrasta. Mekaaniset kompressorit ovat nopeampia, mutta ei-mekaanisilla kompressoreilla voidaan alentaa kompressoinnin kustannuksia.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Aika näyttää, mikä vedyn puristamiseen liittyvät kriteerit täyttävä kompressoritekniikka menestyy edullisimpana ja energiatehokkaimpana. Kalvokompressorilla näyttäisi olevan useita etuja perinteisiin mäntäkompressoreihin nähden ja ioninestekompressoreissa päästään korkeimpiin hyötysuhteisiin. Todennäköisesti nämä uudemmat teknologiat horjuttavat perinteisen mäntäkompressorin asemaa ja sen rinnalle tulee myös muita ratkaisuja. Jo lähivuosina sähkökemiallisen ja metallihydridikompressorin käyttö laajenee ja kyseisten kompressoreiden toiminta-arvot kehittyvät. Siirtoverkkoihin saadaan keskipakokompressorit ja muissa sovelluksissa ei-mekaaniset ratkaisut yleistyvät. Lisäksi elektrolyysereiden kehittyessä ei välttämättä tarvita niin suurta kapasiteettia paineistamaan vetyä suurilla painesuhteilla siirron alkuvaiheessa.

Kustannusten osalta on vielä hankala osoittaa tarkkoja eroja menetelmien välillä. Todennäköisesti myös parempia kustannuslaskelmia vedyn kompressoinnille tulee lähivuosien aikana, kun vetyinfrastruktuuri rakentuu ja kompressoreista saadaan enemmän tietoa. Yleisesti voidaan sanoa, että ei-mekaaniset menetelmät ovat hyvinkin kilpailukykyisiä elleivät parempia perinteisiin mekaanisiin nähden.

Vedyn kompressointia on tutkittu paljon ja aiheesta löytyy kirjallisuudesta paljon hyviä lähteitä. Tässä työssä on keskitytty jo tällä hetkellä markkinoilla oleviin kompressoreihin, mutta myös muita ratkaisuja on olemassa. Muita kompressoritekniikoita ovat muun muassa lineaarikompressorit, kryopumput ja adsorptio-desorptiokompressorit. Esimerkiksi hybridiratkaisu, jossa ensimmäisessä vaiheessa toimisi sähkökemiallinen ja toisessa vaiheessa adsorptio-desorptio kompressorit, voisi olla toimiva ratkaisu korkeille paineille etenkin hajauteissa laitoksissa, kuten tankkausasemilla (Sdanghi et al., 2020).

International Renewable Energy Agency IRENA:n julkaisuissa on selkeästi esitetty vetyhankkeen laajuus ja eteenpäin vieminen sekä valtiollisella että globaalilla tasolla. Tähän kuuluvat ensisijaisesti uusiutuvan energian kapasiteetin lisääminen sekä vihreän vedyn tuotannon kasvattaminen. Tavoitteet ovat isoja, joten tarvitaan valtiotasolla ohjaavia strategioita, kuten verohelpotuksia tai syöttötariffeja. IRENA käsittelee myös tarvetta löytää energiatehokas vetykompressorit, sillä kompressointi voi kuluttaa jopa 15 prosenttia vedyn alemmasta lämpöarvosta. (IRENA, 2020)

Nykyisellään maakaasuverkon keskipakokompressorit pystyvät puristamaan ilman suurempia muutoksia kaasua, jonka vetytitoisuus on noin alle kymmenen prosenttia. Tätä suuremilla titoisuuksilla täytyy kompressoriin tehdä muutoksia. Arviolta titoisuuden ollessa yli 40 % tulee kompressori kokonaan vaihtaa. (Adam et al., 2020). 23 eurooppalaista kaasuverkkoyhtiötä on julkaissut raportin ”The European Hydrogen Backbone” visiosta, jossa tavoitteena on rakentaa 11 600 kilometriä vetyputkiverkostoa vuoteen 2030 mennessä. Vuoteen 2040 mennessä verkoston yhteispituuden tavoite on lähes 40 000 kilometriä. Suuri osa tästä koostuisi olemassa olevasta vedylle muokatusta verkostosta. Myös Suomen kaasun siirrostä vastaava siirtoverkkoyhtiö Gasgrid Finland on osallistunut vision valmisteluun. (Creos et al., 2021) Todennäköisesti suurien vetyverkostohankkeiden myötä on vain ajan kysymys, milloin keskipakokompressoreita saadaan markkinoille myös vetysovelluksiin paremmilla hyötysuhteilla ja materiaalikestävyyksillä.

7 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli vertailla vedyn kompressointimenetelmiä. Vertailun kohteeksi valittiin kompressoreiden hyötysuhteet, siirtokapasiteetit, loppupaineet, energiankulutus, kustannukset sekä kompressoreiden edut ja haitat. Kompressoreiden soveltuvuutta tarkasteltiin jakelun eri vaiheissa. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.

Vedyn kompressointiin on monia eri vaihtoehtoja, mutta tällä hetkellä markkinoilla on viisi muita paremmin saatavilla olevaa kompressoria: mäntä-, kalvo-, ionineste-, metallihydridi- sekä sähkökemiallinen kompressori. Laajin soveltuvuus sekä paras saatavuus on mäntäkompressoreilla. Mäntäkompressoreita käytetään erityisesti siirtoverkkosovelluksissa. Vaikka mäntäkompressori on tällä hetkellä käytetyin, on myös muiden kompressoreiden kehittäminen tärkeää. Mäntäkompressorin huonoja puolia ovat vetyhaurastuminen, melu ja tärinä, kontaminaatio, huollon ja lämmönsiirron toteutus sekä alhainen hyötysuhde muihin verrattuna.

Suurin hyötysuhde ja alhaisin energiankulutus on ioninestekompressorilla, mutta toistaiseksi sen saatavuus ja käyttö on vähäistä. Kalvokompressorin etuna on muun muassa sen sopivuus puhtaille kaasuille. Kalvojen kestävyys vuoksi se soveltuu kuitenkin parhaiten alhaisemille tilavuusvirroille. Keskipakokompressoria tarvitaan siirtoverkkoon suurille tilavuusvirroille, mutta toistaiseksi sitä ei ole saatavilla puhtaalle vedylle. Todennäköisesti sekä ionineste- että kalvokompressoreiden käyttö lisääntyy ja myös keskipakokompressoreita saadaan puhtaasti vetyä sisältäviin sovelluksiin.

Kustannuksiltaan ei-mekaaniset kompressorit ovat mekaanisia edullisempia, kun vertaillaan kahta toiminta-arvoiltaan samanlaista kompressoria. Ei-mekaanisten kompressoreiden käyttö vähentäisi kuluja esimerkiksi toisten menetelmien rinnalla tai elektrolyysin perässä. Metallihydridikompressorin suurin etu on sen kyky hyödyntää jätelämpöä tai uusiutuvaa energiaa. On todennäköistä, että sekä sähkökemiallinen että metallihydridikompressorien kehittäminen jatkuu ja niiden saatavuus paranee.

LÄHTEET

ABB., 2001. Tekninen opas nro 7 - Sähkökäytön mitoitus. [Verkkoaineisto]. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf.

Adam, Peter, Peter Engelshove, Thomas Thiemannja Christoph von dem Bussche. 2020. Hydrogen infrastructure - the pillar of energy transition. Anonymous Press Conference of the European Commission. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 15.2.2021]. Saatavissa: <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:3d4339dc-434e-4692-81a0-a55adbcaa92e/200915-whitepaper-h2-infrastructure-en.pdf>.

Bellosta von Colbe, Jose, Ares, Jose-Ramón, Barale, Jussara, Baricco, Marcello, Buckley, Craig, Capurso, Giovanni, Gallandat, Noris, Grant, David M., Guzik, Matylda N., Jacob, Isaac, Jensen, Emil H., Jensen, Torben, Jepsen, Julian, Klassen, Thomas, Lototsky, Mykhaylol V., Manickam, Kandavel, Montone, Amelia, Puszkiel, Julian, Sartori, Sabrina, Sheppard, Drew A., Stuart, Alastair, Walker, Gavin, Webb, Colin J., Yang, Heena, Yartys, Volodymyr, Züttel, Andreas and Dornheim, Martin, 2019. Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 15, pp. 7780-7808 ISSN 0360-3199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2019.01.104.

Bhogilla, Satya Sekhar and Niyas, Hakeem, 2019. Design of a hydrogen compressor for hydrogen fueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 55, pp. 29329-29337. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0360319919307955> ISSN 0360-3199. DOI <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/j.ijhydene.2019.02.171>.

Borremans, Marc., 2019. *Pumps and Compressors*. New York, N.Y: The American Society of Mechanical Engineers. ISBN 1119534208. DOI 10.1115/1.861BOR.

Boudellal, Méziane., 2018. *Power-to-Gas: Renewable Hydrogen Economy for the Energy Transition*. Berlin: De Gruyter. ISBN 3-11-055889-0. DOI 10.1515/9783110559811.

Britannica., 2013. Adsorption. [Verkkosivu]. *Encyclopedia Britannica*. [Viitattu: 29.3.2021]. Saatavissa: <https://www.britannica.com/science/adsorption>.

Caglayan, Dilara Gulcin, Weber, Nikolaus, Heinrichs, Heidi U., Linßen, Jochen, Robinius, Martin, Kukla, Peter A. and Stolten, Detlef, 2020. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 11, pp. 6793-6805 ISSN 0360-3199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2019.12.161.

Creos, DESFA, Elering, Enagás, Energinet, Eustream, FGSZ, Fluxys Belgium, Gasgrid Finland, Gasunie, GAZ-SYSTEM, GCA, GNI, GRTgaz, National Grid, NET4GAS, Nordion Energi, OGE, ONTRAS, Plinovodi, Snam, TAGja Teréga., 2021. *Extending the European Hydrogen Backbone*. [Verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://gasforclimate2050.eu/publications/>.

Di, Francis A., By, Bellaja Di Bella, Francis A., 2015. Development of a centrifugal hydrogen pipeline gas compressor final report. [Verkkoaineisto]. U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information. DOI: <https://doi.org/10.2172/1227195>.

El-Shimy, Mohamed, A. N. Afandi, M. El-ShimyjaA. N. Afandi. 2017. Overview of Power-to-Hydrogen-to-Power (P2H2P) Systems Based on Variable Renewable Sources Reliability, availability, maintainability, and adequacy. Anonymous The 5th International Conference on Electrical, Electronics, and Information Engineering5. [Konferenssijulkaisu]. [Viitattu: 21.3.2021]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/319653679_Overview_of_Power-to-Hydrogen-to-Power_P2H2P_Systems_Based_on_Variable_Renewable_Sources.

Enagás, Energinet, Fluxys Belgium, Gasunie, GRTgaz, NET4GAS, OGE, ONTRAS, Snam, Swedegasja Teréga., 2020. European Hydrogen Backbone. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 21.4.2021]. Saatavissa: https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/european-hydrogen-backbone/.

Gondal, I. A., 2016. 12 - Hydrogen transportation by pipelines. R.B. GUPTA, A. BASILE and T.N. VEZIROĞLU eds., Woodhead Publishing. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423621000122> ISBN 9781-782423621. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00012-2>.

Heshmat, Hooshang, Zhou, Andrew, Ren, Zhaohui, Jahanmir, Said and Walton, James F., II, 2013. Oil-Free Bearings and Seals for Centrifugal Hydrogen Compressor. Tribology Online, Jan 31, vol. 8, no. 1 [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 22.11.2020], pp. 44–63. Saatavissa: https://www.jstage.jst.go.jp/article/trol/8/1/8_44/_article/-char/en CrossRef. ISSN 1881-2198. DOI 10.2474/trol.8.44.

Hydrogen Europe., 2021. Hydrogen transport and distribution. [Verkkosivu]. [Viitattu: 3.2.2021]. Saatavissa: <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-transport-distribution>.

Hydro-Pac., 2011. LX-Series Hydrogen Compressors. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 15.3.2021]. Saatavissa: http://www.hydropac.com/literature/LX-SERIES%20Hydrogen%20Brochure%2001_2011-%20reduced.pdf.

HyET., 2018a. HCS100 H2. [Verkkosivu]. [Viitattu: 12.4.2021]. Saatavissa: <https://hyethydrogen.com/hcs100/>.

HyET., 2018b. Technology and Performance. [Verkkosivu]. [Viitattu: 12.4.2021]. Saatavissa: <https://hyethydrogen.com/technology/>.

HYSTORSYS., 2018. HYSTORSYS PROUDLY PRESENTS THE NEW METAL HYDRIDE COMPRESSOR HYMEHC-04 Expandable. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 15.3.2021]. Saatavissa: http://www.hystorsys.no/download/Hystorsys_HYMEHC_18.pdf.

Hyundai., 2021. Nexo. [Verkkosivu]. [Viitattu: 30.3.2021]. Saatavissa: <https://www.hyundai.fi/mallisto/nexo/>.

IRENA., 2020a. Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. Abu Dhabi. International Renewable Energy Agency. ISBN 9789-292602956.

IRENA., 2020b. Green Hydrogen, a guide to policy making. Abu Dhabi. International Renewable Energy Agency. ISBN 9789-292602864.

IUPAC., 2014. Compendium of the Chemical Terminology, 2. painos ("the Gold Book") A. D. McNaught ja A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 1997. Nettiversio 2019- S. J. Chalk. [Verkkosivu]. [Viitattu: 29.3.2021]. DOI <https://doi.org/10.1351/gold-book>.

Kurkela, Esa, SIMELL, P., MCKEOUGH, P. and KURKELA, M., 2008. Synteesikaasun ja puhtaan polttokaasun valmistus. Edita Prima Oy, Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland. ISBN 978-951-38-7098-0.

Larjola, Jaakko., 1988. Radiaalikompressorin suunnittelun perusteet. 1.painos Lappeenranta: Aalef Oy. ISBN 951-763-505-2.

Larjola, Jaakko, Punnonen, Pekkaja Jaatinen, Ahti., 2018. BH40A0201 Pumput, puhaltimet ja kompressorit- kurssin kurssimoniste. LUT Energia, Virtaustekniikka.

Léon, Aline., 2008. Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 9783540699255.

Linde., 2020. Linde Hydrogen FuelTech, Tomorrows Fuel Today. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 29.3.2021]. Saatavissa: https://www.linde-engineering.com/en/images/RLD_01_K19004_15_Hydrogen_Fuel_Tech_Broschuere_RZ_VIEW_tcm19-595381.pdf.

Linde., 2019. Linde ATZ Overview. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 15.3.2021]. Saatavissa: <https://gsv.co.at/wp-content/uploads/2017%2001%2019%20Adler.pdf>.

Linde and Gorecki, Marek., 2018. Hydrogen refuelling station - Linde's technologies. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 15.2.2021]. Saatavissa: http://klasterwodorowy.pl/images/pliki/aktualnosc_15_11_2018/Linde.pdf.

NeoCarbonEnergy., 2017. Final report. [Verkkoaineisto]. [Viitattu: 16.11.2020]. Saatavissa: http://www.neocarbonenergy.fi/wp-content/uploads/2015/03/NCE_infokortit_web.pdf.

NIST, National Institute of Standards and Technology and U.S. Department of Commerce., 2018. Methane. [Verkkosivu]. [Viitattu: 15.4.2021]. Saatavissa: <https://web-book.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=74-82-8>.

Peschel, A., 2020. Industrial Perspective on Hydrogen Purification, Compression, Storage, and Distribution. *Fuel Cells*, vol. 20, no. 4, pp. 385-393. Saatavissa: <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1002/fuce.201900235> ISSN 1615-6846.

Press, Roman J., SANTHANAM, K.S.V., MIRI, M.J., BAILEY, A.V. and TAKACS, G.A., 2009. *Introduction to Hydrogen Technology*. ISBN 978-0-471-77985-8.

Schaschke, Carl., 2014. *A Dictionary of Chemical Engineering*. Oxford: Oxford University Press, Incorporated. ISBN 9780199651450.

Sdanghi, G., Maranzana, G., Celzard, A. and Fierro, V., 2019. Review of the current technologies and performances of hydrogen compression for stationary and automotive applications. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 102, pp. 150-170 ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/j.rser.2018.11.028.

Sdanghi, Giuseppe, Maranzana, Gaël, Celzard, Alain and Fierro, Vanessa, 2020. Towards Non-Mechanical Hybrid Hydrogen Compression for Decentralized Hydrogen Facilities. *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 12, pp. 3145 ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en13123145.

Stamatakis, Emmanuel, Zoulias, Emmanuel, Tzamalis, George, Massina, Zoe, Analytis, Vassilis, Christodoulou, Christodoulos and Stubos, Athanasios, 2018. Metal hydride hydrogen compressors: Current developments & early markets. *Renewable Energy*, vol. 127, pp. 850-862 ISSN 0960-1481. DOI 10.1016/j.renene.2018.04.073.

Toghyani, S., Baniasadi, E., Afshari, E. and Javani, N., 2020. Performance analysis and exergoeconomic assessment of a proton exchange membrane compressor for electrochemical hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 60, pp. 34993-35005 ISSN 0360-3199. DOI 10.1016/j.ijhydene.2020.01.232.

Toyota., 2021. Mirai. [Verkkosivu]. [Viitattu: 30.3.2021]. Saatavissa: <https://www.toyota.com/mirai/>.

Witkowski, Andrzej, Rusin, Andrzej, Majkut, Mirosław and Stolecka, Katarzyna, 2017. Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects. *Energy*, vol. 141, pp. 2508-2518. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S036054421730899X> ISSN 0360-5442. DOI <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/j.energy.2017.05.141>.

Zittel, Andreas, 2004. Hydrogen storage methods. *Die Naturwissenschaften; Naturwissenschaften*, vol. 91, no. 4, pp. 157-172 ISSN 1432-1904. DOI 10.1007/s00114-004-0516-x.