



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**ANTTI SUOKAS**  
**TUULIENERGIAN VARASTOINTIMENETELMÄT JA NIIDEN**  
**OMINAISUUDET**

Kandidaatintyö

Kemian ja biotekniikan laitos

Tarkastaja: Seppo Syrjälä

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknis-luonnontieteellinen tiedekunta

**SUOKAS, ANTTI:** Tuulienergian varastointimenetelmät ja niiden ominaisuudet

Kandidaatintyö, 20 sivua

Toukokuu 2018

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastaja: Seppo Syrjälä

Avainsanat: Tuulienergia, energian varastointi, uusiutuva energia

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan energian varastointimenetelmiä tuulienergian varastoimiseksi. Tuulienergiaa tulee varastoida, koska tuulivoiman ongelmana on yleisesti se, että tuulisähköntuotanto on vaihtelevaa tuulisuuden mukaan. Tällöin tuulisina päivinä tuotettu sähköenergia, joka ylittää sähköverkon kysynnän, tulee varastoida jollakin tavalla. Erilaiset varastointimenetelmät voidaan jakaa viiteen pääkategoriaan. Pääkategoriat ovat mekaaninen, kemiallinen, sähkökemiallinen, sähkömagneettinen ja terminen energian varastointi. Aluksi työssä käsitellään tuulivoiman perusteita, jonka jälkeen tarkasteltavana on neljä erilaista tuulienergian varastointimenetelmää.

Tuulienergia on tuulesta saatua energiaa. Tuulessa olevan energian muuntaminen sähköenergiaksi, vaatii tuulivoimalan. Tuulivoimalan lavat on suunniteltu siten, että ne maksimoivat nostovoiman ja minimoivat vastusvoiman. Vastusvoima aiheuttaa rasisusta tuulivoimalan rakenteelle ja nostovoima taas saattaa tuuliturbiinin roottorin pyöriivään liikkeeseen. Tämä pyörimisenergia muunnetaan edelleen sähköenergiaksi generaattorin avulla.

Esiteltävistä tuulienergian varastointimenetelmistä pumpatut vesivarastot perustuvat siihen, että ylimääräinen sähköenergia varastoidaan potentiaalienergiaksi pumppaamalla vettä alemmasta tasosta ylempään. Ylimääräistä tuulienergiaa varastoidaan myös lämpöenergiaksi. Työssä esitellään kaksi erilaista menetelmää lämmöksi varastoimiseen. Ensimmäisessä näistä tuulisähkö varastoidaan lämpöakkuun, josta sitä käytetään kaukolämpönä kysynnän mukaan. Toinen lämmön varastointimenetelmä on, että tuuliturbiinissa tuotetaan suoraan höyryä, joka varastoitaisiin höyryakkuun. Työn kolmas energian varastointimenetelmä on polttoaineeksi varastoiminen, jossa ylimääräisellä sähköllä tuotetaan vetyä elektrolyysin avulla. Viimeinen esiteltävä energian varastointimenetelmä työssä on paineilmaparastot. Menetelmässä ylimääräisellä sähköllä paineistetaan ilmaa, joka varastoidaan ja käytetään myöhemmin kaasuturbiinilaitoksessa.

Työssä vertaillaan myös näitä erilaisia energian varastointimenetelmiä. Tietyn varastointimenetelmän paremmuutta ei kuitenkaan pystytä toteamaan, koska tarkasteltavana on ainoastaan neljä energian varastointimenetelmää.

## SISÄLLYS

1.	Johdanto .....	1
2.	Tuulienergian perusteet.....	2
3.	Tuulienergian varastointimenetelmät .....	5
3.1.	Varastoiminen potentiaalienergiaksi pumppaamalla vettä.....	5
3.2.	Lämpöenergiaksi varastoiminen .....	8
3.2.1.	Kahden säiliön lämpöenergiavarasto.....	8
3.2.2.	Tuulilämpövoiman käyttö energian varastointiin.....	10
3.3.	Varastoiminen polttoaineeksi valmistamalla vetyä .....	11
3.4.	Varastointi paineilmaparastoon .....	14
4.	Yhteenveto ja johtopäätökset .....	19
	Lähteet .....	20

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

<b>bar</b>	baari
<b>°C</b>	celsius
<b>€/MWh</b>	euroa per megawattituntia
<b>GW</b>	gigawatti
<b>kW</b>	kilowatti
<b>m<sup>3</sup></b>	kuutiometri
<b>MJ/kg</b>	megajoulea per kilogramma
<b>MW</b>	megawatti
<b>m/s</b>	metriä per sekunti
<b>%</b>	prosentti
<b>TWh</b>	terawattitunti

# 1. JOHDANTO

Tuulienergia on energiaa, joka on peräisin auringonsäteilystä. Se on myös uusiutuvaa energiaa, josta ei aiheudu päästöjä ympäristöön, kuten esimerkiksi fossiilisista polttoaineista. Tuulienergian ongelmana on yleisesti se, että sähköntuotanto riippuu täysin tuulen voimakkuudesta. Päivinä, jolloin tuulee paljon, on tuulisähköntuotanto hyvinkin suurta. Toisaalta taas päivinä, jolloin tuulee vähemmän, jää tuotanto alhaiseksi. Tämä aiheuttaa ongelmia sähköntuotannon tasaisena pitämiseen. Sähköntuotannossa tuotannon tulee vastata aina kulutusta. Tuulisähkön kanssa tämä on haastavaa juuri aikaisemmin mainituista syistä. Tämän takia onkin kehitetty erilaisia menetelmiä tuulienergian varastoimiseksi. Energian varastointi voidaan yleisesti jakaa viiteen pääkategoriaan. Nämä viisi varastointikategoriaa ovat mekaaninen, sähkökemiallinen, kemiallinen, sähkömagneettinen sekä terminen energian varastointi (Zhao et al. 2015, s. 546).

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on antaa lukijalle katsaus tuulienergian varastointimenetelmistä. Työhön valittiin tarkasteltavaksi neljä erilaista energian varastointimenetelmää. Ensimmäisenä selvitettävänä asiana on tuulienergian varastointimenetelmien yleinen tarkastelu. Tämän jälkeen seuraavana tutkimusongelmana on selvittää valittujen menetelmien etuja ja haittoja. Lopuksi työssä tehdään vielä hieman arviointia erilaisten varastointimenetelmien välillä. Työ on puhtaasti kirjallisuusselvitys, ja sen tavoitteena on tehdä katsaus tarkasteltavaksi valituista tuulienergian varastointimenetelmistä.

Ensimmäiseksi tässä kandidaatintyössä kerrotaan tuulienergiasta yleisellä tasolla. Yleisellä tasolla tarkastelussa käydään läpi tuulivoiman perusteet. Tämän jälkeen on tarkoitus perehtyä tarkemmin erilaisiin valittuihin energian varastointimenetelmiin, joita käytetään tuulienergian varastoimiseen. Tarkoituksena on myös avata näiden erilaisten varastointimenetelmien ominaisuuksia, sekä tuoda esiin niiden etuja ja haittoja. Yhteenvedossa pyritään tekemään arviointia esiteltyjen energian varastointimenetelmien välillä. Lopussa vielä sivutaan energian varastoinnin tulevaisuutta.

## 2. TUULIENERGIAN PERUSTEET

Ilmastonmuutoksen takia nykymaailmassa on pyritty korvaamaan fossiilisia polttoaineita uusiutuvalla energialla. Merkittävää roolia tässä näyttelee tuulienergia. Esimerkiksi Euroopan unionin sähkön kulutuksesta 5,3% katettiin tuuliturbiineilla vuonna 2010 ja joissakin Euroopan maissa tuulienergia on saavuttanut jo 20% osuuden (Díaz-González 2012, s.2155).

Itse tuulisähköntuotanto on yksinkertaisesti sitä, että tuulisena päivänä tuuli pyörittää turbiinia, josta mekaaninen pyörimisenergia muunnetaan generaattorilla sähköenergiaksi. Kuvassa 2.1 on esitetty kuva tyypillisestä kolmilapaisesta tuulivoimalasta.

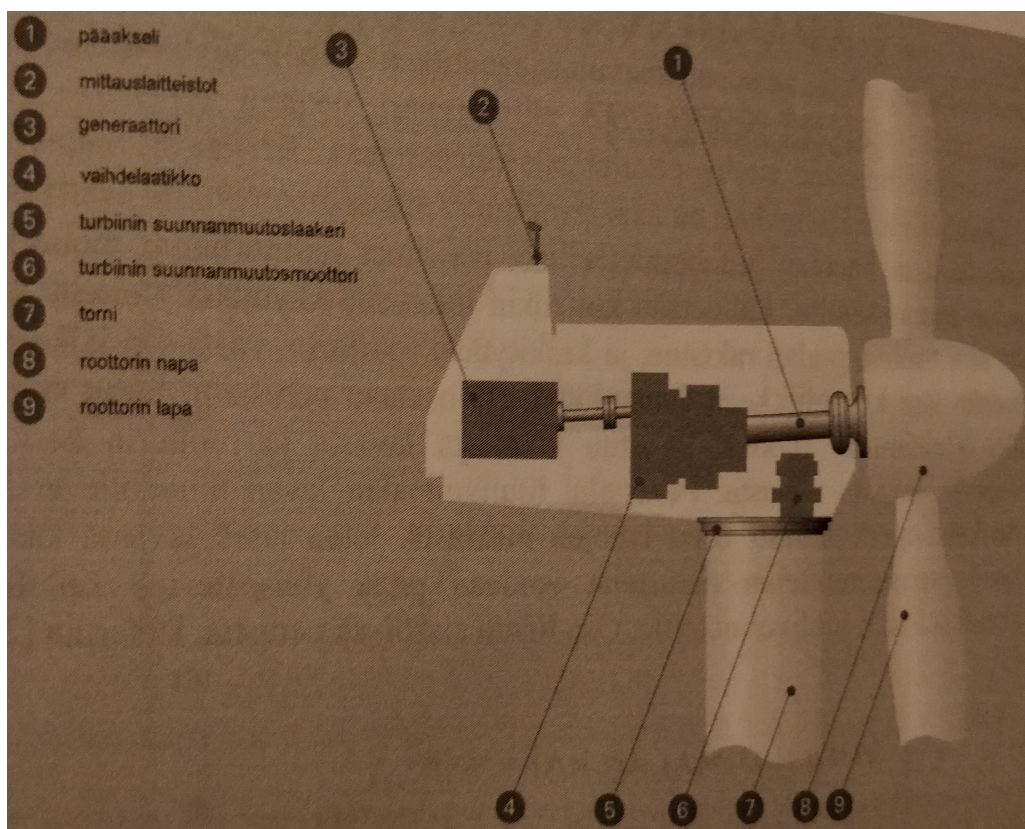


*Kuva 2.1: Kuva tyypillisestä tuulivoimalasta (Tuulivoimayhdistys 2018).*

Korpela (2016) kertoo kirjassaan kattavasti tuulivoiman perusteista. Tähän lukuun on poimittu tärkeimpiä asioita kirjasta, jotta lukija saisi hyvän käsityksen tuulivoiman peruseräiteista.

Tuulivoimala koostuu yleisesti konehuoneesta, roottorista ja tornista. Kuvassa 2.2 on esitetty yksinkertainen kuvaus tuulivoimalan rakenteesta. Roottori on tuulivoimalan se osa, joka pitää sisällään tuulivoimalan navan ja lavat. Suuren kokoluokan tuulivoimalat

on käännettävä tuulen suuntaan, kun taas puolestaan pienen kokoluokan tuulivoimalat kääntyvät itsestään tuulen suuntaan niissä olevan peräsimen avulla. Tästä johtuen tuulivoimalassa tulee olla mittauslaitteisto, jolla pystytään mittaamaan tuulen suunta.



*Kuva 2.2: Yksinkertainen kuvaus tuulivoiman rakenteesta (Korpela 2016).*

Tuulivoimalan roottorin lavoilla on samanlainen ominaisuus kuin lentokoneen siivillä. Lapojen muodon ansiosta turbiinin lavan alapuolelle muodostuu nostovoima, joka pyrkii nostamaan lapaa ja näin ollen saattaa tuulivoimalan roottorin pyörivään liikkeeseen. Lapoihin kohdistuu myös vastusvoima, joka taivuttaa turbiinin lapoja taaksepäin. Lavan muodon suunnittelulla pyritään minimoimaan vastusvoima ja maksimoimaan nostovoima. Roottorin mekaaninen energia muunnetaan sähköenergiaksi generaattorilla sähkömagneettisen induktion avulla. Usein roottorin ja generaattorin välille tulee sijoittaa vaihdelaatikko, koska yleensä yleisimmät kaupalliset generaattorit tarvitsevat suuren pyörimisnopeuden toimiakseen hyvällä hyötysuhteella. Nykyään kuitenkin myös vaihteettomat voimalat ovat tulleet aiempaa suurempaan suosioon, koska vaihteettomuus lisää tuulivoimalan luotettavuutta. Vaihteettomassa ratkaisussa tulee käyttää tuulivoimaan suunniteltua generaattoria. Tämä lisää tuulivoimalan rakennuskustannuksia, mutta toisaalta taas säästää luotettavuuden takia kustannuksia. Generaattoreina tuulivoimaloissa käytetään yleensä aina vaihtosähkögeneraattoreita.

Käytännön esimerkkinä tuulivoimalasta esitellään WinWinD Oy:n malli WinWinD 3. Kyseisen voimalan turbiinin halkaisija on 100 m ja sen generaattorin nimellisteho on 3 MW. Tuulennopeudeksi voimala tarvitsee vähintään 3 m/s, jotta se alkaa tuottaa tehoa. Nimellistehon, 3 MW, saavuttamiseksi tarvittava tuulennopeus on 12 m/s. Nimellistehon saavuttamisen jälkeen voimalan tuottama teho ei enää kasva. Tämä johtuu siitä, että turbiinia joudutaan suojaamaan mekaaniselta rasitukselta säätämällä sen lapakulmia. Tehoa halutaan rajoittaa, koska suuret tuulennopeudet ovat harvinaisia, eikä tuulivoimalaa kannata suunnitella kustannussyistä niin kestäväksi, että sillä pystyttäisiin ottamaan talteen myrskytuulien energia. Yleensä yli 20 m/s tuulennopeuksilla generaattori oikosuljetaan ja roottorin lapojen nostovoima pyritään minimoimaan, eli tuulivoimala toisin sanoen ajetaan alas.

Suomessa tuulivoimalahankkeita on tuettu vuodesta 2011 alkaen valtion puolesta asettamalla tuulivoimalle uusiutuvan energian syöttötariffi, jolla pyritään laskemaan investointeihin liittyviä riskejä. Tariffilla on tarkoitus antaa tuotetulle energialle takuuhinta. Takuuhinta on Suomessa 83,5 €/MWh. Tariffin voimassaoloaika on 12 vuotta. Euroopan unionin energiapolitiikan takia Suomessa on asetettu tavoitteeksi, että vuonna 2020 tuotetaan 6 TWh tuulisähköenergiaa 2500 MW:n nimellisteholla.



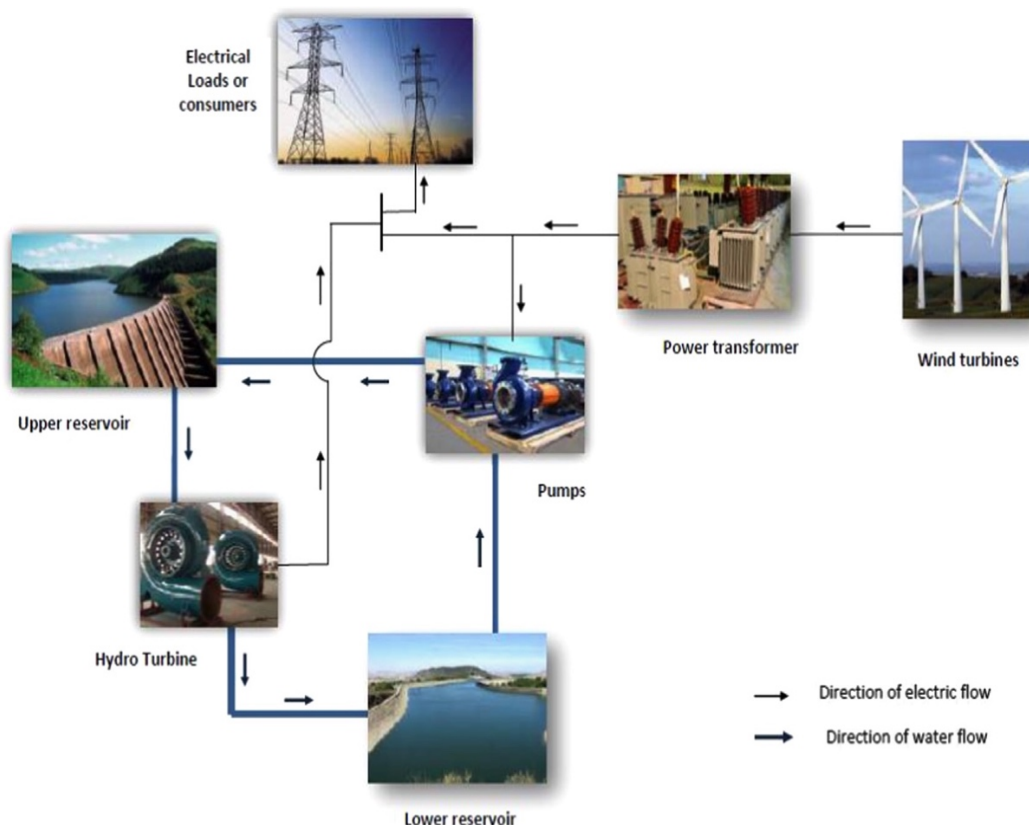
### **3. TUULIENERGIAN VARASTOINTIMENETELMÄT**

Hamilo (2014) esittelee artikkelissaan seitsemän erilaista energian varastointimenetelmää tuulienergian varastoimiseksi. Artikkelissa esitellyt menetelmät ovat pumpattu vesivoima, lämmöksi varastoiminen, vauhtipyörään varastoiminen, polttoaineeksi varastoiminen, akkuihin pakkaaminen, varastoiminen paineilmaan sekä suprajohteisiin johtaminen. Näistä artikkelissa esitellyistä energian varastointimenetelmistä tähän kirjallisuusselvitykseen on valittu neljä energian varastointimenetelmää. Nämä kolme valittua menetelmää ovat pumpatut vesivarastot, lämmöksi varastoiminen, polttoaineeksi varastoiminen (vety) ja paineilmaan varastoiminen. Seuraavissa alaluvuissa perehdytään tarkemmin näihin.

#### **3.1. Varastoiminen potentiaalienergiaksi pumppaamalla vettä**

Ensimmäinen työssä esiteltävä energian varastointimenetelmä on pumpattavat vesivarastot (Pumped Hydro Energy Storage). Historian ensimmäiset pumpatut vesivarastot rakennettiin alppimaihin 1890-luvulla (Italia, Sveitsi ja Itävalta). Varastojen kehitys jatkui kuitenkin kohtalaisen hitaana aina 1960-luvulle asti, kunnes esiin nostettiin kysymys, kuinka sähkönkysyntäpiikkejä voitaisiin tasata energiavarastoilla. Kehitys kuitenkin kääntyi laskuun 1990-luvulla, koska maakaasun hinta oli niin alhainen, että kaasuturbiinien käyttäminen kysyntäpiikkien tasaamiseen oli pumpattuihin vesivarastoihin nähden kilpailukykyisempää. Tästä huolimatta pumpattujen vesivarastojen etuna on se, että ne eivät vaadi suuria siirtoverkkoparannuksia. (Rehman et al. 2015, s.591)

Pumpatuissa vesivarastoissa on siis kyse siitä, että energiaa varastoidaan potentiaalienergiaksi pumppaamalla vettä alemmasta tasosta ylempään tasoon. Kuvassa 3.1.1 on esitetty pumpatun vesivaraston toimintaperiaate.



*Kuva 3.1.1: Pumpatun vesivaraston toimintaperiaate (Rehman et al. 2015).*

Pumpattuja vesivarastoja voidaan käyttää sähköverkossa huipputehon tasaamiseen, taajuuden säätöön, loistehon kompensointiin tai energian pitkäaikaiseen varastointiin (Alanen et al. 2003, s.44-45). Yleensä varastointi toimii niin, että kysynnän ollessa alhaista matalahintainen sähkö, esimerkiksi yöllä tuotettu sähkö, käytetään veden pumppaamiseen ylempään tasoon. Puolestaan korkean sähkönkysynnän aikaan, esimerkiksi päiväsaikaan, vesi palautetaan ylemmästä tasosta alempaan tasoon ajamalla se vesiturbiinin läpi sähköenergian tuottamiseksi. Yleisesti pumpatuissa vesivarastoissa käytetään erillisen turbiinin ja pumpun sijasta pumpputurbiinia, joka toimii toiseen suuntaan pumppuna ja toiseen suuntaan vesiturbiinina. (Rehman et al. 2015) Pumpattujen vesivarastojen varastointikapasiteetti riippuu paljon myös vesivaraston tyypistä. Luonnon vesialtaiden varastointikapasiteetti voi olla mahdollisesti jopa 1–2 vuotta, kun taas rakennettujen vesialtaiden varastointikapasiteetti on tyypillisesti yksi vuorokausi (Alanen et al. 2003, s.44).

Rehman et al. (2015) mainitsevat artikkelissaan, että yleisesti ottaen pumpattavia vesivarastoja pidetään yhtenä lupaavimpana energian varastointimenetelmänä, jolla pystyttäisiin nostamaan uusiutuvan energian osuutta energiajärjestelmissä. Loppu tästä luvusta summaa pääkohdat Rehman et al. (2015) artikkelista. Suuren energiamäärän varastointiksi pumpattujen vesivarastojen tulee olla joko korkeuseroltaan tai vesimäärältään suuria. Vuonna 2009 pumpattujen vesivarastojen kapasiteetti oli noin 100 GW. Varastointimenetelmän hyötysuhde vaihtelee 70 %:n ja 80 %:n välillä, mutta

joidenkin väitteiden mukaan hyötysuhde voi olla jopa 87 %. Kokoluokaltaan pumpattuja vesivarastoja hyödyntävät laitokset voivat olla suuren kokoluokan laitoksia, joiden energianvarastointikapasiteetti on jopa 10 MW, tai todella pienen kokoluokan laitoksia, joiden energian varastointikapasiteetti on alle 5 kW.

Pumpattuja vesienenergiavarastoja on maailmanlaajuisesti yli 300, ja rakenteilla on myös paljon uutta kapasiteettia. Euroopan unionissa erityisesti Saksa on panostanut pumpattuihin vesivarastoihin. Toimivia laitoksia vuonna 2010 Saksassa oli yhteensä 31 kappaletta.

Sähköntuotannon aikatauluttamisen (varastoidaan yöllä tuotettu halpahintainen sähkö ja myydään se korkean kysynnän aikaan paremmalla hinnalla) sijasta, pumpattuja vesivarastoja käytetään tuulienergian tuotannon yhteydessä lähinnä tasaamaan sähköntuotantoa, joka on luonteeltaan vaihtelevaa tuulen voimakkuuden takia. Tällä tavalla asennetun tuulivoiman kapasiteetti saadaan hyödynnettyä paremmin. Esimerkkinä tuulivoiman ja pumpattujen vesivarastojen yhdistämisen tuomista eduista voitaisiin käyttää tutkimusta Turkanajärven tuulivoimaprojektista. Tutkimuksessa havaittiin, että tuulivoimantuotanto ei vastaa päivittäistä sähkönkulutusta, mutta integroimalla pumpattu vesivarasto tuulivoiman kanssa saatiin puutetta vähennettyä 46 %:lla.

Pumpattuja vesivarastoja voidaan rakentaa myös merien yhteyteen. Kuvassa 3.1.2 on esitetty Okinawan merivettä käyttävä pumpattu vesivarasto.



*Kuva 3.1.2: Okinawan saaren merivettä käyttävä pumpattava vesivarasto (Rehman et al. 2015).*

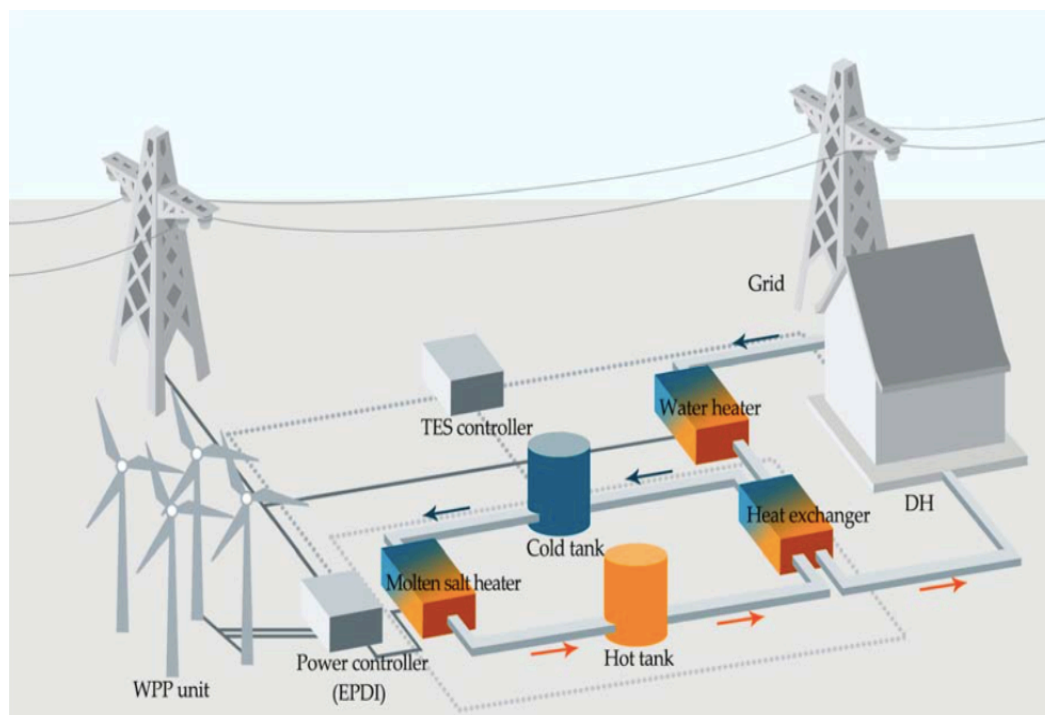
Okinawan saaren pumpatussa vesivarastossa on potentiaalia tuottaa 30 MW energiaa. Se on toistaiseksi ainoa maailmassa toimiva merivettä käyttävä pumpattu vesivarasto.

## **3.2. Lämpöenergiaksi varastoiminen**

Toinen tässä työssä esiteltävistä tuulienergian varastointimenetelmistä on lämpöenergiaksi varastoiminen, jolla tarkoitetaan sitä, että tuulivoimalla, tai jollakin muulla tuotantotavalla, tuotettu ylimääräinen energia varastoidaan lämpöenergiaksi. Lämpöenergiavarastojen katsotaan myös olevan hyvinkin käytännöllinen ratkaisu energian varastoimiseksi, koska ne ovat kustannustehokkaita, pitkäikäisiä, ympäristöystävällisiä sekä mahdollistavat suuren varastointikapasiteetin (Liu et al. 2017, s. 2). Lämpöenergian varastointimenetelmät voidaan jakaa kolmella tavalla, jotka ovat jako lämpötilan mukaan (matala-, keski- ja korkealämpötilavarastointi), jako sijoituspaikan mukaan (maanjääliset ja maanalaiset) tai jako varastointiajan mukaan (lyhyt tai pitkä) (Alanen et al. 2003, s. 12). Lämmön varastointi voi perustua tuntuvan lämmön varastointiin, latenttilämmön varastointiin tai termokemialliseen varastointiin (Alanen et al. 2003, s. 12). Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan kahta lämpöenergian varastoimismenetelmää, joita voidaan käyttää tuulivoiman yhteydessä. Ensimmäisenä tarkasteltavana menetelmänä on kahden säiliön lämpöenergiavarasto, jota käytetään kaukolämmön kysynnän tasaamiseen (Liu et al. 2017). Toisena varastointimenetelmänä tarkastellaan menetelmää, jossa tuulesta saatu energia muunnetaan välittömästi lämpöenergiaksi ja varastoidaan tuulilämpövoimaksi (Okazaki et al. 2015).

### **3.2.1. Kahden säiliön lämpöenergiavarasto**

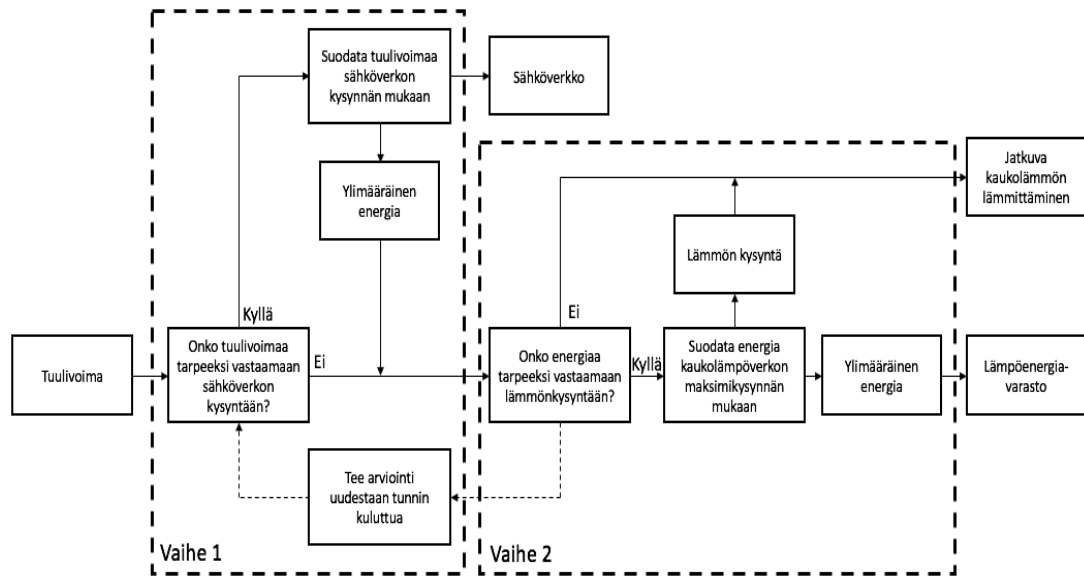
Liu et al. (2017) esittelevät artikkelissaan tuulivoiman varastointiin käytettävän kahden säiliön lämpöenergiavaraston, jossa ylimääräinen sähköenergia käytetään kaukolämpönä. Tässä luvussa on pyritty kyseisen artikkelin pohjalta kuvaamaan tämän tyyppisen lämpöenergiavaraston toimintaperiaate. Väliaineena kyseisessä lämpöenergiavarastossa toimii sula suola. Kuvassa 3.2.1 esitetään kahden säiliön lämpöenergiavaraston rakenne.



**Kuva 3.2.1:** Kaukolämmön tasaamiseen käytetyn lämpöenergiavaraston rakenne (Liu et al. 2017, s. 3).

Kuvasta nähdään, että rakenne koostuu tuulivoimayksiköstä, tehonsäätäjästä, kahdesta lämmittimestä (sulan suolan ja veden lämmittimet), kahden säiliön lämpöenergiavarastosta, lämmönvaihtimesta, kaukolämpöverkosta sekä lämpöenergiavaraston säätäjästä.

Aikaisemmin tässä työssä on käsitelty, että sähkötuotannon tulee vastata aina sähköverkon kysyntää. Tässä varastointisysteemissä tehonsäätäjä ohjailee systeemiä tuotetun tuulisähkön ja sähköverkon kysynnän mukaan. Mikäli verkossa on kysyntää, niin tehonsäätäjä ohjaa tuotettua sähköä sinne niin paljon kuin pystyy. Tämän jälkeen systeemi alkaa tarkastella sähkön käyttöä kaukolämpöverkossa. Jos verkossa ei ole kysyntää tuotetulle energialle tai verkkoon ei pystytty syöttämään kaikkea tuotettua energiaa, niin systeemissä tehdään arviointia kaukolämmönkysynnän mukaan. Systeemi tarkastelee, että onko lämmönkysyntä yhtä suuri tai korkeampi kuin energiantuotannosta tuleva energiamäärä. Jos on, niin kaikki energia käytetään suoraan kaukolämpöveden lämmittämiseen vedenlämmittimen avulla. Kahden säiliön lämpöenergiavarastoa käytetään, kun kaukolämpöverkon kysyntä on alhaisempaa kuin käytettävissä oleva energiamäärä. Tällöin sulaa suolaa lämmitetään ja se varastoidaan kuuman sulan suolan säiliöön, josta varastoitu lämpöenergia voidaan ottaa käyttöön, mikäli lämmönkysyntä on suurempaa kuin lämmittämiseen suoraan käytettävissä oleva energiamäärä on. Kuvassa 3.2.2 on esitetty kaavio, jossa kuvataan tämän lämmön varastointisysteemin toimintaperiaate.



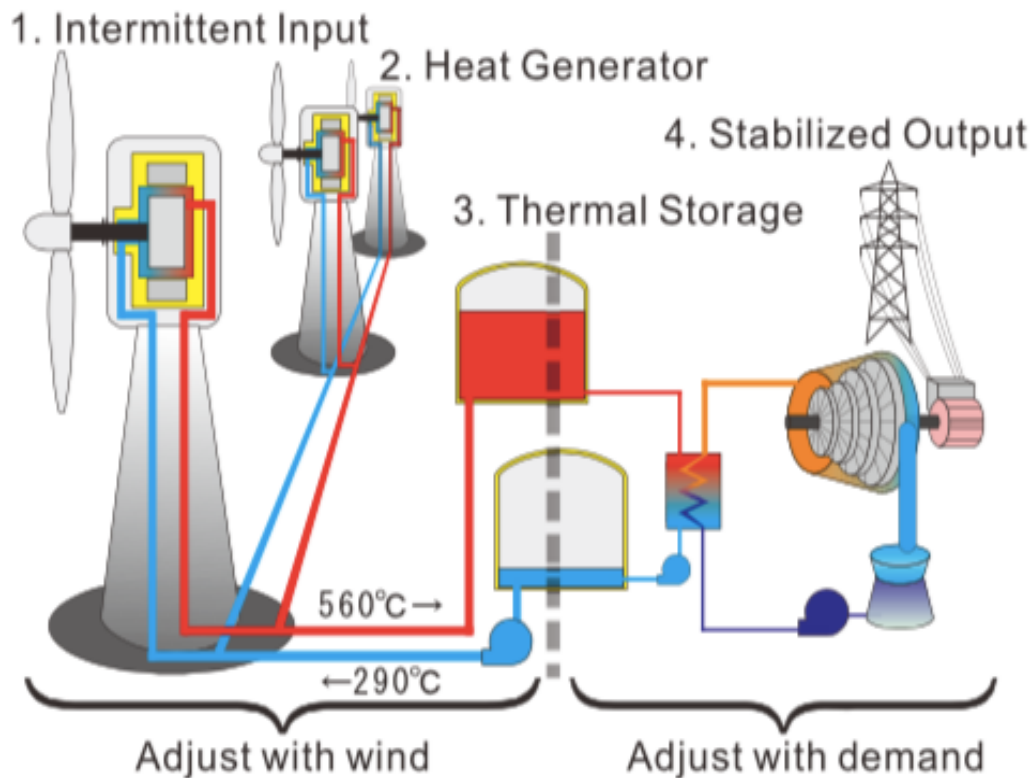
**Kuva 3.2.2:** Kaavio kahden säiliön lämpöenergiavaraston toimintaperiaatteesta (Liu et al. 2017, s. 4).

Kuvasta ilmenee, kuinka systeemi tekee arviointeja tunnin välein eri lämmön- ja sähkönkysynnän suhteen. Lämmönkysyntä määräytyy normaalisoitun mukavuuslämpötilan (normalized comfort temperature) mukaan. Mikäli käytettävissä olevalla energialla ei pystytä jatkuvan kaukolämpöveden lämmittämällä pitämään lämpötilaa halutussa tavoitearvossa, niin voidaan ladattua sulan sulan lämpöenergiavarastoa purkaa, jotta pystytään vastaamaan lämmönkysyntään.

### 3.2.2. Tuulilämpövoiman käyttö energian varastointiin

Okazaki et al. (2015) käsittelevät artikkelissaan tuulienergian varastointia käyttäen tuulilämpövoimaa. Tässä luvussa kerrotaan artikkelin pohjalta tämän tyyppisen lämpöenergiavarastoinnin toimintaperiaatteesta.

Tuulilämpövoimalla tarkoitetaan sitä, että tuulesta saatu energia muunnetaan tuuliturbiinissa välittömästi lämpöenergiaksi, joka voidaan varastoida lämmöksi lämmönsiirtonesteen avulla. Kysynnän ollessa puolestaan taas suurempaa voidaan varastoidulla lämpöenergialla tuottaa höyryä, jolla saadaan tuotettua puolestaan taas sähköä kysynnän mukaan. Kuvassa 3.2.3 on esitetty tuulilämpövoiman rakenne.



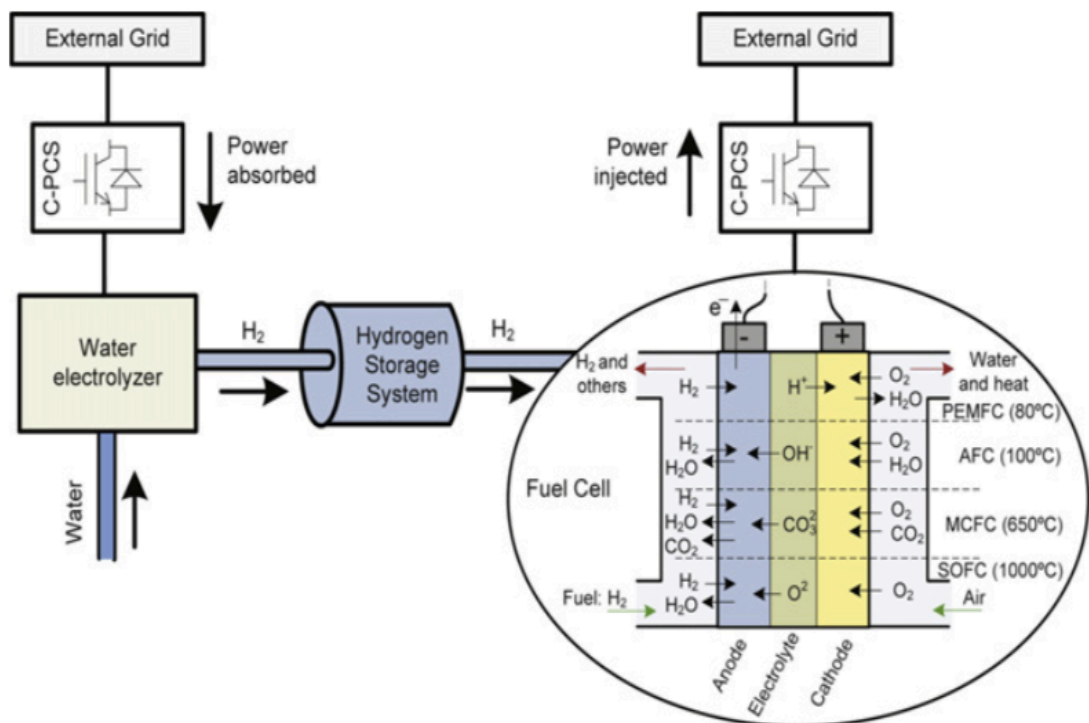
*Kuva 3.2.3: Tuulilämpövoimalan rakenne (Okazaki 2015, s. 333).*

Jäähdytetty lämmönsiirtoneste siis johdetaan tuulivoimalan tornin yläosaan, jossa tuulesta saadulla energialla neste lämmitetään. Sähkön kysynnän mukaan tätä lämpöenergiaa käytetään sähköntuotantoon.

Mekaanisen pyörimisenergian muuntamiseen lämpöenergiaksi on tyypillisesti käytetty nesteen liikuttamista, sähkömagneettista induktiota tai kahden kiinteän aineen välistä kitkaa. Näistä menetelmistä Sähkömagneettinen induktio on todettu parhaaksi tavaksi muuttaa pyörimisenergia lämpöenergiaksi. Sähkömagneettisessa induktiossa johdin pakotetaan pyörimään staattisessa magneettikentässä. Tämä johtaa siihen, että johdin lämpenee ja näin ollen pyörimisenergia muuntuu lämpöenergiaksi.

### 3.3. Varastoinen polttoaineeksi valmistamalla vetyä

Kolmantena tarkasteltavana tuulienergian varastointimenetelmänä on polttoaineeksi varastoinen. Tarkemmin ottaen tarkasteltavana on tuulisähkön varastointi vedyksi. Vetyä voidaan valmistaa tuulisähköstä elektrolyysimenetelmällä ja edelleen tuotettu vety voidaan varastoida odottamaan käyttöä polttokennoissa. Varastointiin käytettyä menetelmää kutsutaan regeneratiiviseksi polttokennoiksi (regenerative fuel cell) (Díaz-González et al. 2012, s.2160). Kuvassa 3.3.1. on esitetty regeneratiivisen polttokennon rakenne.



*Kuva 3.3.1: Regeneratiivisen polttokennon rakenne (Díaz González et al. 2012, s. 2160).*

Tämän tyyppisen polttokennon rakenne koostuu veden elektrolyysimenetelmästä, poltto-  
kennojärjestelmästä, vedyn varastointijärjestelmästä sekä tehonvaihtojärjestelmästä.

Leppälä (2009) käsittelee diplomityössään tuulivoimalla tuotetun sähkön varastoimista  
vedyksi. Loppu tästä luvusta käsittelee vedyn ominaisuuksia polttoaineena ja vedyn  
elektrolyysiä. Lisäksi diplomityöstä on nostettu esiin tämän kandidaatintyön kannalta  
oleellisia asioita.

Vety on yleisimpiä alkuaineita koko maapallolla. Se on myös todella helposti reagoiva ja  
tämän takia se esiintyykin yleensä yhdisteenä muiden alkuaineiden kanssa. Vety ei näin  
ollen siis ole primäärienergianlähde vaan energiankantaja, jota voidaan valmistaa  
erilaisilla menetelmillä. Vetyä voidaan valmistaa esimerkiksi biomassosta,  
höyryreformoinnilla sekä elektrolyysillä. Taulukossa 3.3.2 on esitetty vedyn  
aineominaisuudet.



Taulukko 3.3.2: Vedyn aineominaisuudet (Leppälä 2009).

VETY	
Kaasun tiheys (suhteessa ilman tiheyteen)	0,07
Molekyyli massa	2,0 amu
Sulamislämpötila	-259 °C
Kiehumislämpötila	-253 °C
Syttymisrajat	4-77 til.-%
Itsesyttymislämpötila	560 °C
Minimisyttymisenergia	0,016 mJ
Luokitus	F+
Syttymisryhmä	T1
Räjähdyssyhmä	IIC

Vedyn lämpöarvo on 119 MJ/kg, mikä puhuisi sen puolesta, että vety olisi polttoaineena todella hyvä. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa, sillä vety on kevyt kaasu ja sen energiatiheys on matala tilavuusyksikköä kohden. Varastoinnin kannalta pieni energiatiheys tilavuusyksikköä kohden on ongelmallista. Energiatiheyttä voidaan kasvattaa esimerkiksi nesteyttämällä tai paineistamalla vetyä. Paineistaminen ja nesteyttäminen vaativat energiaa, jolloin varastoinnin kustannukset nousevat.

Tällä hetkellä valtaosa vedystä tehdään reformointimenetelmillä käyttäen fossiilisia polttoaineita. Ainoa fossiilisista polttoaineista riippumaton valmistusmenetelmä on tässä kandidaatintyössä tarkasteltavana oleva elektrolyysimenetelmä. Elektrolyysikin on ainoastaan puhdas, mikäli siihen käytetty sähkö on tuotettu uusiutuvalla energialla. Etuna menetelmässä on se, että tuotettu vety on erittäin puhdasta. Valmistukseen käytetään vettä, joka sisältää vain happea ja vetyä, ja näin ollen haitallisia yhdisteitä ei pääse muodostumaan. Elektrolyysissä lämpöhäviöt ovat merkittäviä, mutta lämpö voidaan ottaa talteen ja hyödyntää muulla tavalla.

Elektrolyysi perustuu hapetus-pelkistysreaktioon, eli redox-reaktioon, jossa suuremman hapetusluvun omaava yhdiste toimii hapettimena. Reaktiossa pelkistinyhdiste luovuttaa elektroneja hapettimelle. Käyttämällä käänteistä galvaanista kennoa pystytään systeemiin syötettyä sähköenergiaa sitomaan kemialliseksi energiaksi, kun lähtöaineista muodostuu korkeampi energisia reaktiotuotteita.

Valmistettaessa vetyä halutaan vesi hajottaa hapeksi ja vedyksi, eli elektrolysoimislaitteen toimintaperiaate on käänteinen polttokennoon nähden. Elektrolyysi on sähkökemiallinen reaktio ja se kuluttaa paljon sähköä, joten valmistus on kallista. Sitä kannattaa käyttää silloin, kun vedyn täytyy olla korkealaatuista tai kun tarjolla on paljon

edullista sähköenergiaa. Jos halutaan tuottaa ainoastaan pieniä vetymääriä, niin elektrolyysi on ainoa markkinoilla tarjolla oleva menetelmä.

Vedyn varastointiin on kolme kaupallisessa käytössä olevaa sovellusta. Aikaisemmin sivuttiin näistä sovelluksista kahta, vedyn nesteyttämistä sekä vedyn paineistamista. Kolmas kaupallisessa käytössä oleva varastointimenetelmä on metallihybridi.

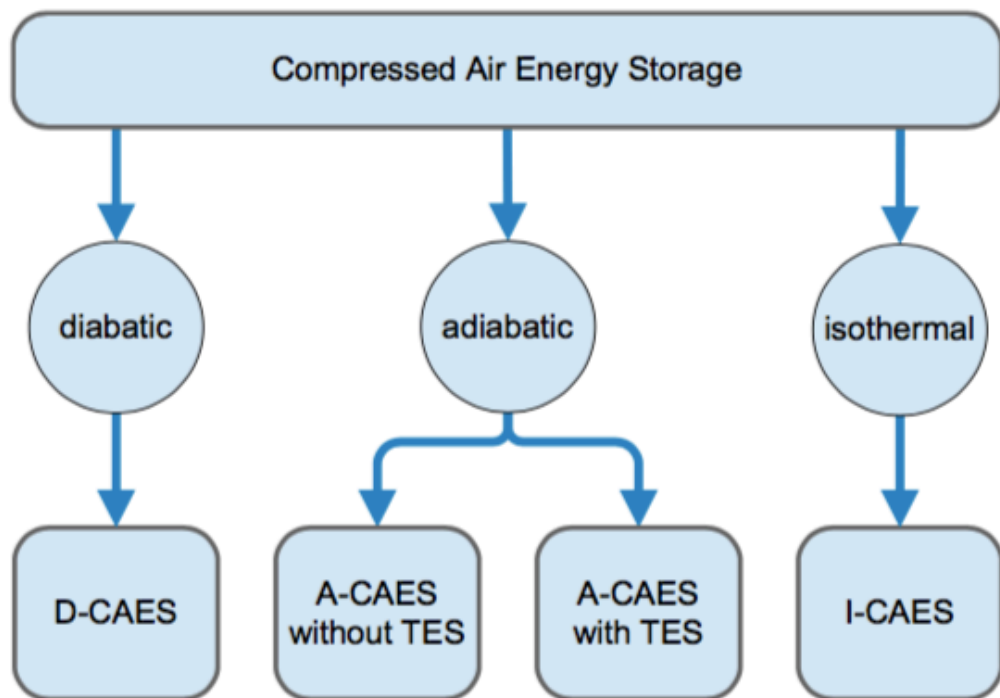
Yleisin varastointiin käytetty menetelmä on vetykaasun paineistaminen. Se on myös kohtalaisen halpa varastointimenetelmä. Hyvän varastointikapasiteetin saavuttamiseksi paineen täytyy kuitenkin olla todella korkea, koska vedyn tiheys on todella alhainen. Tyypillisesti varastointipaine on korkeintaan 200-300 bar. Teknisesti vetyä on myös mahdollista varastoida tätäkin korkeampiin paineisiin, mutta tämä nostaa laitteiston kustannuksia, ja tekee näin ollen varastoinnista kalliimpaa. Lisäksi paineistus aiheuttaa kasvavan räjähdysvaaran.

Vedyn varastoiminen nestemäiseen olomuotoon on hyvä tapa nostaa vedyn alhaista energiatiheyttä. Nesteyttäminen kuluttaa noin kolmanneksen vedyn energiasisällöstä, mikä johtuu esimerkiksi siitä, että vedyn nesteyttämiseen vaadittava lämpötila on todella alhainen. Vety säiliössä kehittyy sisäisesti lämpöä ja säiliötä ei myöskään pystytä täysin eristämään ympäristöstä, joten osa nesteytetystä vedystä muuttuu olomuotoaan takaisin kaasuksi. Täten nesteytettyä vetyä käytetäänkin lähinnä erityissovelluksiin, joissa energiatiheys on saatava korkeaksi hintaan katsomatta.

Viimeinen kaupallinen vedyn varastoimiseen käytetty menetelmä on metallihybridi, joka perustuu vedyn kanssa reagoiviin alkuaineisiin. Tästä huolimatta kaikki vedyn kanssa reagoivat alkuaineet eivät sovellu varastointiin. Metallit tai metalliyhdisteet sopivat yleensä parhaiten vedyn varastointiin. Metallihybridi-menetelmässä yksinkertaisesti ilmaistuna sitoutetaan vetyä eksotermisesti metallin kidehilaan.

### **3.4. Varastointi paineilmavarastoon**

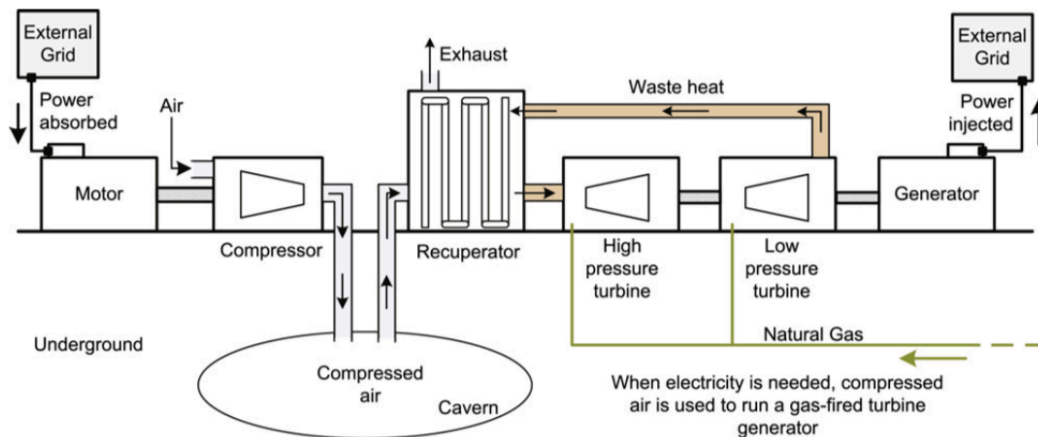
Neljäs ja viimeinen työssä esiteltävä tuulienergian varastointimenetelmä on energian varastoiminen paineilmavarastoihin (Compressed Air Energy Storage, CAES). Paineilmavarastot voidaan jakaa kolmella erilaisella tavalla, adiabaattinen, ei-adiabaattinen tai isoterminen, riippuen siitä minkälaisen tilanmuutoksen paineilmavarasto käy läpi (Budt et al. 2016, s. 253). Kuvassa 3.4.1 on esitettyinä kaaviokuva paineilmavarastojen jakamisesta.



**Kuva 3.4.1:** Paineilmavarastojen jakaminen tilanmuutoksen mukaan (Budt et al. 2016, s. 253)

Kuten kuvasta huomataan, voidaan adiabaattinen paineilmavarastot jakaa vielä kahteen eri kategoriaan, paineilmavarastoihin, jotka sisältävät lämpöenergiavaraston ja paineilmavarastoihin, jotka eivät sisällä lämpöenergiavarastoa.

Paineilmavarastosysteemin kuvaus on esitettyä kuvassa 3.4.2.



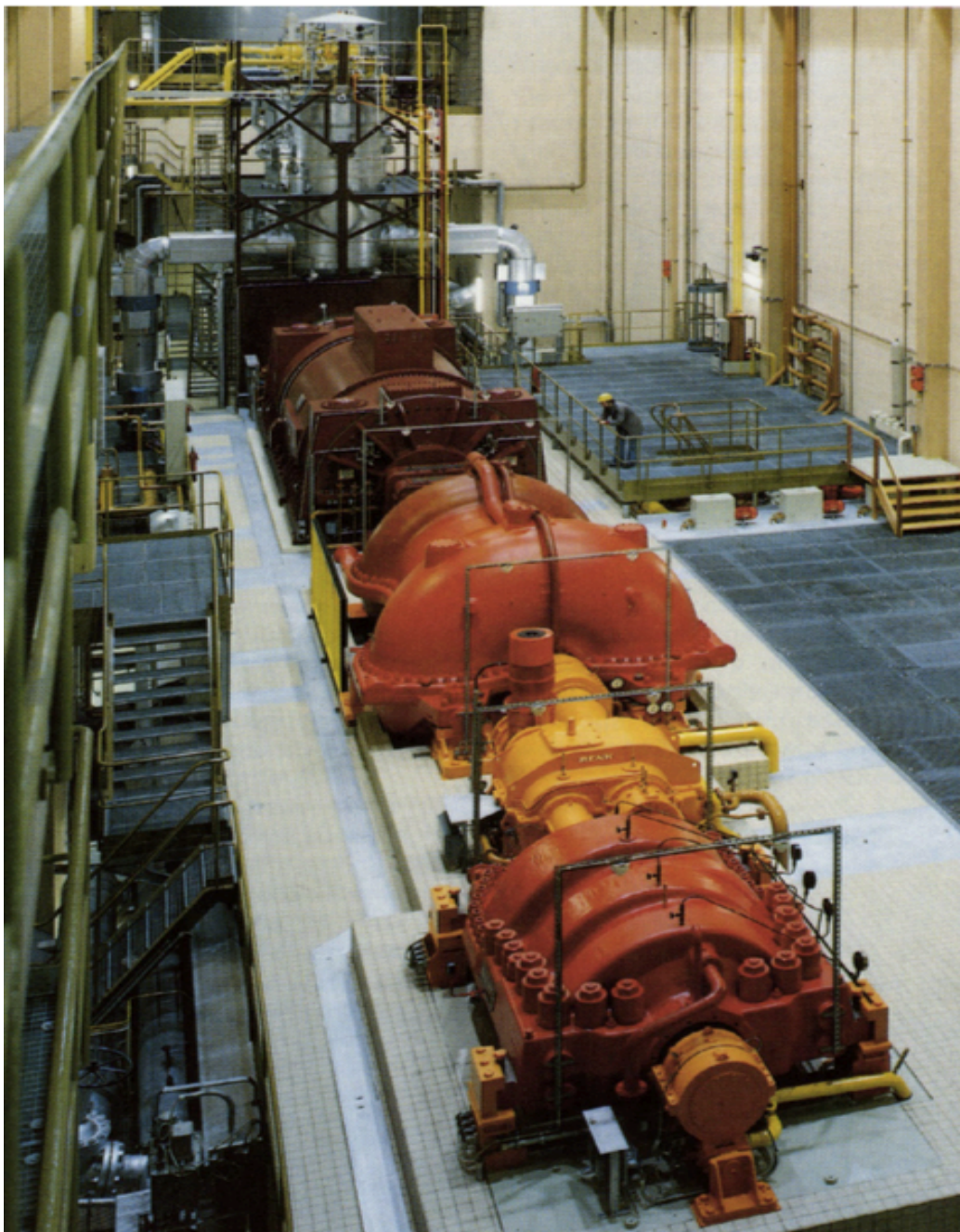
**Kuva 3.4.2:** Paineilmavaraston rakenteen kuvaus (Díaz-González et al. 2012, s. 2156).

Paineilmavaraston systeemi koostuu moottorista, kompressorista, paineilmavarastosta, lämmönvaihtimesta, korkea- ja matalapaineturbiinista sekä generaattorista. Tämän tyyppinen varastointimenetelmä perustuu tavalliseen kaasuturbiinitekologiaan. Systeemissä tuulivoimalla tuotettu ylimääräinen sähkö varastoidaan paineilman muotoon maanalaiseen luolaan. Sähkön kysynnän ollessa korkeaa, voidaan paineilmavarastoa purkaa lämmittämällä paineistettua ilmaa ja sekoittamalla sitä maakaasun kanssa. Seos

poljetaan ja savukaasut laajenevat korkea- ja matalapaineturbiinien läpi. Näin paineilmaan varastoitu energia saadaan muunnettua takaisin sähköenergiaksi. (Díaz-González et al. 2012, s. 2156-2157)

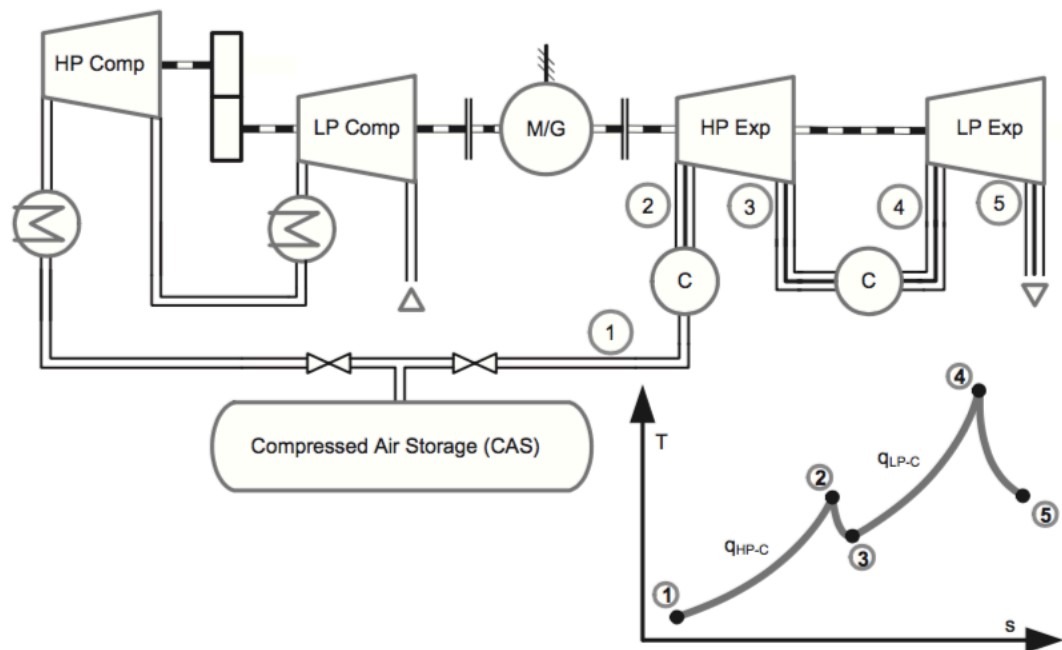
Toistaiseksi paineilma- ja paineilmaenergiavarastot eivät ole kovinkaan yleisiä maailmassa. Tällä hetkellä maailmaan on rakennettuna vain kaksi paineilmaenergiavarastoa. (Díaz-González et al. 2012, s. 2157) Nämä kaksi varastoa ovat Huntorfin varasto Saksassa ja McIntoshin varasto Yhdysvalloissa (Budt et al. 2016). Seuraavassa kappaleessa tarkastellaan tarkemmin Huntorfin laitosta.

Huntorfin laitoksen teho on 290 MW. Kuvassa 3.4.3 on näkymä Huntorfin laitoksen konehallista.



*Kuva 3.4.3: Kuva Huntorfin laitoksen konehallista (Budt et al. 2016, s. 259).*

Laitoksella ulkopuolinen ilma puristetaan välijäähdytteisesti 72 bar maksimipaineeseen kahdella erillisellä turbokompressorilla. Itse varastointipaikkana toimivat louhitut suolakaiwokset, joiden varastointitilavuus on 310 000 m<sup>3</sup>. Ilman lähtiessä varastosta korkeapaineiseen polttokammioon, kuristetaan ilma 42 bar paineeseen. Korkeapainepolttokammiossa ilma kuumennetaan 490 °C:en lämpötilaan. Korkeapainepolttokammioista ilma johdetaan korkeapaineturbiiniin, jossa paisunta tapahtuu noin 10 bar paineeseen. Tältä painetasolta ilma lämmitetään 945 °C:en lämpötilaan matalapainepolttokammiossa, josta se johdetaan lopuksi vielä matalapaineturbiinille. Kuvassa 3.4.4 on esitettyä Huntorfin laitoksen prosessikuvaus.



**Kuva 3.4.4:** Huntorfin laitoksen prosessikuvaus ja  $T,s$ -piirros prosessikuvauksesta (Budt et al. 2016, s. 259).

Kuvassa C-kirjaimilla merkityt osat ovat polttokammioita ja M/G-merkinnällä tarkoitetaan moottoria tai generaattoria. (Budt et al. 2016)

## 4. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä kandidaatintyössä oli tarkoitus esitellä erilaisia tuulienergian varastointiin käytettyjä energiavarastoja. Työ oli kirjallisuusselvitys ja sen pohjana käytettiin alan kirjallisuutta. Tässä luvussa verrataan työssä esiteltyjä varastoja.

Kuten aikaisemmin työssä mainittiin, pidetään pumpattuja vesivarastoja lupaavimpana energian varastointitekniikkana. Vertailun suorittamiseksi erilaisten energiavarastojen välillä on taulukossa 4.1 esitettynä työssä esiteltyjen varastojen käyttöajat ja hyötysuhteet. Lämpöenergiavarastoja ei ole esitettynä taulukossa, koska työssä esitellyille lämpöenergiavarastoille ei löytynyt päteviä arvoja kirjallisuudesta.

**Taulukko 4.1:** Energiavarastojen käyttöajat ja hyötysuhteet (Díaz-González et al. 2012, s. 2156).

<b>Energiavarasto</b>	<b>Käyttöaika [vuotta]</b>	<b>Hyötysuhde [%]</b>
Pumpattu vesivarasto	30-50	65-80
Vedyksi varastoiminen	15	35-42
Paineilmavarastot	30-40	70-73

Taulukossa on esitettynä lukuväli, jolle kirjallisuudesta löytyvät arvot osuvat. Taulukon luvut tukevat väitettä, jonka mukaan pumpatut vesivarastot ovat lupaavimpia energian varastointitapoja. Pumpattujen vesivarastojen hyötysuhde ja käyttöaika ovat esitellyistä energiavarastoista parhaimmat. Toisaalta työssä tutkittiin ainoastaan neljää energian varastointimenetelmään, joten ei voida yksiselitteisesti todeta pumpattujen vesivarastojen ylivoimaisuutta muihin varastointimenetelmiin nähden.

Energian varastoinnin tulevaisuudessa sähköverkolta vaaditaan uudenlaisia ominaisuuksia. Uusiutuvan energian vaihtelevan tuotantomäärän takia tarvitaan uudenlaisia työkaluja, joilla analysoidaan tuotantoa ja saadaan vaihteleva energian tuotanto vastaamaan kysyntää. Myös paljon kehitystä pyritään saamaan aikaan akkuteknologian parissa sekä uusiutuvien polttoaineiden parissa, kuten vaikkapa vetyteknologian ja uusiutuvan etanolin tuotannon parissa. (Shwartz 2017)

## LÄHTEET

Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S. & Saari, P. (2003). Energian varastoinnin nykytila. VTT tiedotteita 2199. s. 169.

Budt, M., Wolf, D., Span, R. & Yan, J. (2016). A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments. *Applied Energy* 170. pp. 250-268.

Diaz-Gonzalez, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O. & Villafafila-Robles, R. (2012). A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16. pp. 2154–2171.

Hamilo, M. (2014). 7 tapaa säilöä tuulta. *Tiede*. Saatavilla (viitattu: 4.2.2018): [https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/7\\_tapaa\\_sailoa\\_tuulta](https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/7_tapaa_sailoa_tuulta)

Korpela, A. (2016). Tuulivoiman perusteet. Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka. s. 98.

Leppälä, R. (2009). Tuulisähkön varastointi vetyyn. Tampereen Teknillinen Yliopisto. s. 110.

Liu, C., Cheng, M., Zhao, B. & Dai, Z. (2017). A Wind Power Plant with Thermal Energy Storage for Improving the Utilization of Wind Energy. *Energies* 2017, 10, 2126. pp. 1-20.

Okazaki, T., Shirai, Y. & Nakamura, T. (2015). Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage. *Renewable Energy* 83. pp. 332-338.

Rehman, S., Al-Hadhrami, L.M. & Alam, M.Md. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 44. pp. 586-598.

Shwartz, M. (2017). Future of energy: Energy Storage. *Stanford News*. Saatavilla (viitattu 9.4.2018): <https://news.stanford.edu/2017/10/05/future-energy-storage/>

Tuulivoimayhdistys. Tietoa tuulivoimasta. Saatavilla (viitattu: 6.2.2018): <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta>

Zhao, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, H. & Rasmussen, C.N., (2015). Review of energy storage system for wind power integration support. *Applied Energy* 137. pp. 545-553