

Micke Talvi

ENERGIAN VARASTOINTI PAINEILMAAN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
1/2021

TIIVISTELMÄ

Micke Talvi: Energian varastointi paineilmaan
Energy Storage in Compressed Air
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Tammikuu 2021

Uusiutuvan energian käyttäminen sähköntuotantoon on haasteellista, sillä uusiutuvan energian tuottaminen on epäsäännöllistä. Yksi lupaava ratkaisu tähän ongelmaan on energian varastointi paineilmaan (engl. Compressed Air Energy Storage, CAES). Tässä työssä tutkitaan erilaisia paineilman tuotantomuotoja ja paineilmanvarastoja, sekä niitä vertaillaan kirjallisuuden perusteella.

Sähköntuotantoa pystytään säätämään ja tasaamaan paineilmanvaraston avulla. Paineilmaa tuotetaan sähköenergialla kompressorien avulla paineilmanvarastoon, kun sähkön kysyntä ja hinta ovat alhaiset. Paineilmasta tuotetaan takaisin sähköenergiaa turbiinin ja generaattorin avulla, kun sähkön kysyntä ja hinta ovat taas korkealla. Paineilmaa tuotettaessa ilman puristusvaiheessa ilman lämpötila kohoaa korkeaksi. Esimerkiksi kun ilman painetta kasvatetaan puristuksessa 10 baaria, ilman lämpötila nousee tällöin noin 300 celsiusastetta. Paineilmasta pitää poistaa lämpöenergiaa, jotta paineilman lämpötila laskisi ja paineilman varastointi olisi mahdollista.

Paineilman lämpöenergian käsittely on ratkaisevin tekijä jaoteltaessa eri paineilman tuotantomuotoja. Tässä työssä käsitellään kolmea eri paineilman tuotantomuotoa: diabaattista, adiabaattista ja isotermistä tuotantomuotoa. Diabaattinen tuotantomuoto on tällä hetkellä ainoa käytössä oleva tuotantomuoto suurissa CAES-laitoksissa. Diabaattisessa tuotantomuodossa ei oteta talteen lämpöenergiaa, kun taas adiabaattisessa tuotantomuodossa lämpöenergia otetaan talteen, ja lämpöenergiaa käytetään ilman laajentumisvaiheessa hyödyksi. Isotermisessä tuotantomuodossa taas ilman lämpötilan muutos halutaan minimoida.

Paineilmanvarastoja on erilaisia sekä rakenteeltaan että toiminnaltaan. Paineilmanvarastot ovat joko isobaarisia tai isokoorisia. Isokooriset paineilmanvarastot ovat yksinkertaisempia toiminnaltaan kuin isobaariset varastot. Tällä hetkellä toimivissa CAES-laitoksissa on käytössä vain isokoorisia varastoja. Paineilmanvarastona voidaan käyttää maanalaisia luolamuodostelmia tai rakennettuja säiliöitä. CAES-laitosten paineilmanvarastoina pyritään hyödyntämään luolamuodostelmia, sillä niiden käyttöönottokustannukset ovat paljon matalammat kuin rakennetuilla säiliöillä.

Kirjallisuuden mukaan adiabaattisella paineilman tuotantomuodolla on eniten potentiaalia yleistyä täysimittaiseen käyttöön. Isotermisellä tuotantomuodolla voidaan saavuttaa adiabaattista tuotantomuotoa korkeampi hyötysuhde, mutta isoterminen tuotantomuoto on kehityksessä vasta laboratorioasteella. CAES-laitoksen sijainti on tärkeä, sillä luolamuodostelmien käyttäminen paineilmanvarastona laskee laitoksen hintaa huomattavasti.

Avainsanat: energian varastointi, paineilma, CAES, sähköntuotanto

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PAINEILMAN TUOTTAMISEN TERMODYNAMIIKKA	3
3. PAINEILMAN TUOTANTOMUODOT	5
3.1 Paineilman tuotanto yleisesti	5
3.2 Diabaattinen tuotantomuoto	6
3.3 Adiabaattinen tuotantomuoto	9
3.4 Isoterminen tuotantomuoto	11
4. PAINEILMAN VARASTOINTI	13
4.1 Paineilman varastointi yleisesti	13
4.2 Paineilmavarastot	14
5. TUOTANTO- JA VARASTOINTIMUOTOJEN VERTAILU	15
5.1 Tuotantomuotojen ominaisuudet	15
5.2 Varastointimuodot ja laitoksen sijainti	16
5.3 Tämänhetkinen tilanne	17
5.4 Vertailu pumppuvoimalaitoksiin	18
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	19
LÄHTEET	20

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Lyhenteet

AA-CAES	Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage
A-CAES	Adiabatic Compressed Air Energy Storage
CAES	Compressed Air Energy Storage
CAS	Compressed Air Storage
C-HyPES	Closed cycle Hydro-Pneumatic Energy Storage
D-CAES	Diabatic Compressed Air Energy Storage
I-CAES	Isothermal Compressed Air Energy Storage
O-HyPES	Open cycle Hydro-Pneumatic Energy Storage
PHES	Pumped Hydro Energy Storage
TES	Thermal Energy Storage

Latinalaiset kirjaimet

c_p	ilman isobaarinen ominaislämpökapasiteetti
c_v	ilman isokoorinen ominaislämpökapasiteetti
E	sähköenergia
p	paine
T	lämpötila
x	kerroin

Kreikkalaiset kirjaimet

η	hyötysuhde
γ	suhdeluku

Yksiköt

bar	baari
°C	celsiusaste
kg CO ₂ e/MWh	hiilidioksidiekvivalenttikilo per megawattitunti
MW	megawatti

1. JOHDANTO

Ilmansaasteiden lisääntymisen ja ilmaston lämpenemisen takia kiinnostus uusiutuviin energiantuotantomuotoihin on lisääntynyt monissa maissa. Uusiutuvat energianlähteet kuten aurinko- ja tuulivoima ovat huomattavasti vähäpäästöisempiä energiantuotantomuotoja kuin perinteiset fossiiliset energianlähteet. Hiilidioksidipäästöjen keskiarvo sekä aurinkovoimalle että tuulivoimalle on 26 kg CO₂e/MWh, kun taas kivihielelle hiilidioksidipäästöjen keskiarvo on 888 kg CO₂e/MWh (World Nuclear Association 2011). Uusiutuvien energianlähteiden käytössä sähkön tuottamiseen on kuitenkin ongelmia. Suurimmat ongelmat uusiutuvan energian käyttämiseen sähkön tuotantoon ovat uusiutuvan energian tuottamisen epäsäännöllisyys ja epäjatkuvuus. Jotta uusiutuvalla energialla tuotettua sähköä voitaisiin ottaa käyttöön tasaisemmin, sitä pitäisi pystyä varastoimaan. Yksi lupaava ratkaisu tähän ongelmaan on energian varastointi joko fyysiseen varastoon tai sähkökemialliseen varastoon. (Mozayeni *et al.* 2017)

Eräs fyysinen energian varastointitapa on energian varastointi paineilmaan (engl. *Compressed Air Energy Storage, CAES*). Siinä sähköenergialla tuotetaan paineilmaa kompressorin avulla ja paineilma varastoidaan myöhempää käyttöä varten. (Mozayeni *et al.* 2017) CAES-tuotantomuotoja on olemassa erilaisia, ja suurin erottava tekijä eri tuotantomuotojen välillä on CAES-prosessissa syntyvän lämpöenergian käsittely. Tällä hetkellä sähköntuotannossa mukana on vain kaksi laajan mittakaavan CAES-laitosta. Molemmat näistä laitoksista käyttävät alkeellisinta CAES-tuotantomuotoa. Kehittyneempien paineilman tuotantomuotojen laajamittaisia laitoksia on vasta suunnitteilla. (Luo *et al.* 2014, s. 605) Tämän työn tavoitteena on tutkia paineilman tuotanto- ja varastointimuotojen toimintaperiaatteita kirjallisuuden perusteella. Työssä vertaillaan eri tuotanto- ja varastointimuotojen etuja ja haittoja. Työssä myös tutkitaan mitkä ovat tärkeimpiä kehityksen kohteita tämänhetkisten CAES-laitosten prosesseissa ja millaisia kehitteillä olevat uudet CAES-prosessit ovat.

Aluksi työn luvussa 2 kerrotaan CAES:n termodynamiikasta ja avataan CAES-prosessin laskennan keskeisimpiä yhtälöitä. Luvussa 3 esitellään eri paineilman tuotantomuotoja sekä CAES-prosessia yleisesti. Kolmannessa luvussa kerrotaan myös esimerkkejä käytössä ja kehitysasteella olevista tuotantolaitoksista. Luvussa 4 kerrotaan itse paineilma-varastoista ja niiden suunnitteluun vaikuttavista tekijöistä. Luvussa 5

vertaillaan eri paineilman tuotanto- ja varastointimuotoja, ja kerrotaan mitä etuja tai heikkouksia kehittyneemmillä CAES-prosesseilla on verrattuna jo käytössä oleviin prosesseihin. Luvussa 6 kootaan yhteen työn tärkeimmät havainnot ja johtopäätökset.

2. PAINEILMAN TUOTTAMISEN TERMODYNAMIIKKA

Ideaalikaasulaki on perustana paineilman tuottamiseen liittyviin termodynamiikan yhtälöihin. Ilma lämpenee puristuksessa yhtälön (1) mukaisesti

$$T_1 = T_0 \cdot \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^x, \quad (1)$$

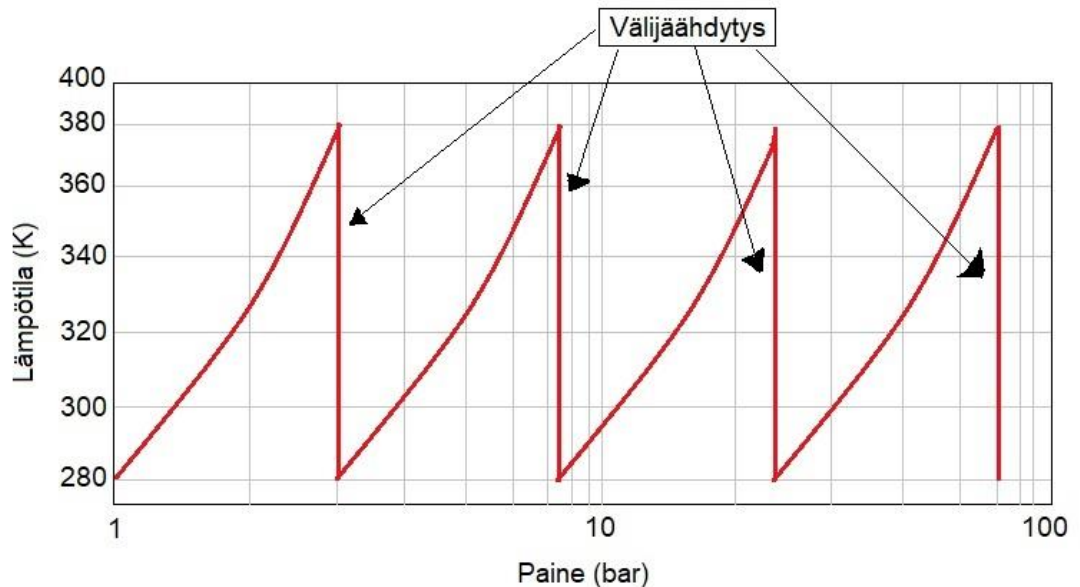
jossa T_1 on ilman lämpötila puristuksen jälkeen, T_0 ilman lämpötila ennen puristusta, p_1 ilman paine puristuksen jälkeen ja p_0 ilman paine ennen puristusta. Paineen yksiköt supistuvat pois yhtälössä (1). Yhtälössä (1) ilman lämpötiloille käytetään yksikköä kelvin. Kerroin x lasketaan yhtälön (2) avulla

$$x = \frac{\gamma - 1}{\gamma}, \quad (2)$$

jossa γ on ilman ominaislämpökapasiteettien (c_p/c_v) suhdeluku. c_p on ilman isobaarinen ominaislämpökapasiteetti ja c_v on ilman isokoorinen ominaislämpökapasiteetti. Ilman ominaislämpökapasiteettien yksiköt supistuvat pois, jolloin suhdeluvulla γ ei ole yksikköä yhtälössä (2). Suhdeluvun γ arvo riippuu ilman lämpötilasta, sillä ilman ominaislämpökapasiteettien arvot ovat lämpötilariippuvaisia. CAES-prosessien yhtälöissä suhdeluvulle γ voidaan käyttää arvoa 1,4, sillä CAES-prosesseissa lämpötilan muutokset eivät ole niin suuria, että ne muuttaisivat suhdeluvun γ arvoa merkittävästi. (Grazzini & Milazzo 2012, s. 465 – 466; Garvey & Pimm 2016, s. 90)

Puristussuhde kuvaa kuinka moninkertainen on puristetun ilman paine verrattuna ilman alkuperäiseen paineeseen ennen puristusta. Puristussuhteen arvo on yleensä 20–200 suurimmassa osassa CAES-laitoksista. (Garvey & Pimm 2016, s. 90) Yhtälössä (1) puristussuhdetta kuvaa termi p_1/p_0 . Koska puristussuhde on aina suurempi kuin 1, niin yhtälöstä (1) voidaan havaita, että myös T_1 on suurempi kuin T_0 . Kun ilman paine kasvaa suureksi, niin myös sen lämpötila kohoaa silloin korkeaksi. Esimerkiksi kun ilma puristetaan adiabaattisesti 10 baarin paineeseen ympäristön paineesta, ilman lämpötila kohoaa 277 °C:seen ympäristön lämpötilasta (Budt *et al.* 2016, s. 260). Adiabaattisessa puristuksessa lämpöenergiaa ei siirry prosessiin sisään eikä myöskään prosessista ulos. Korkea ilman lämpötila aiheuttaa haasteita paineilman varastoinnille, sillä vaatimukset ja hinta varastomateriaalille kohoavat (Garvey & Pimm 2016, s. 89). Monet paineilmaparastot eivät siedä korkeita lämpötiloja, ja tästä syystä puristettua ilmaa pitää viilentää ennen sen varastoimista (Budt *et al.* 2016, s. 260).

Ilmaa voidaan viilentää puristusvaiheessa useita kertoja. Monivaiheisella jäähdytyksellä ilman lämpötila saadaan koko ajan pidettyä matalana (noin alle 107 °C) ja painetta voidaan kasvattaa jopa 100 baariin asti (Garvey & Pimm 2016, s. 91). Kuvasta 1 voidaan nähdä monivaiheisen jäähdytyksen vaikutus ilman lämpötilaan, kun ilman painetta kasvatetaan puristusvaiheessa. Kuvassa 1 punainen käyrä kuvaa ilman lämpötilaa tietyssä paineessa.



Kuva 1. Ilman puristusvaiheen lämpötila, paine -kuvaaja usealla välijäähdytyksellä (Perustuu lähteeseen Garvey & Pimm 2016).

Kuvasta 1 nähdään, että ilmaa välijäähdytetään 4 kertaa puristusvaiheessa. Ilman lämpötila käy korkeintaan noin 107 °C:ssa, ja ilman lopullinen lämpötila puristusvaiheen lopussa on noin 7 °C. Samalla ilman paine kasvaa 1 baarista noin 70 baariin, eli puristussuhde tässä esimerkissä on 70.

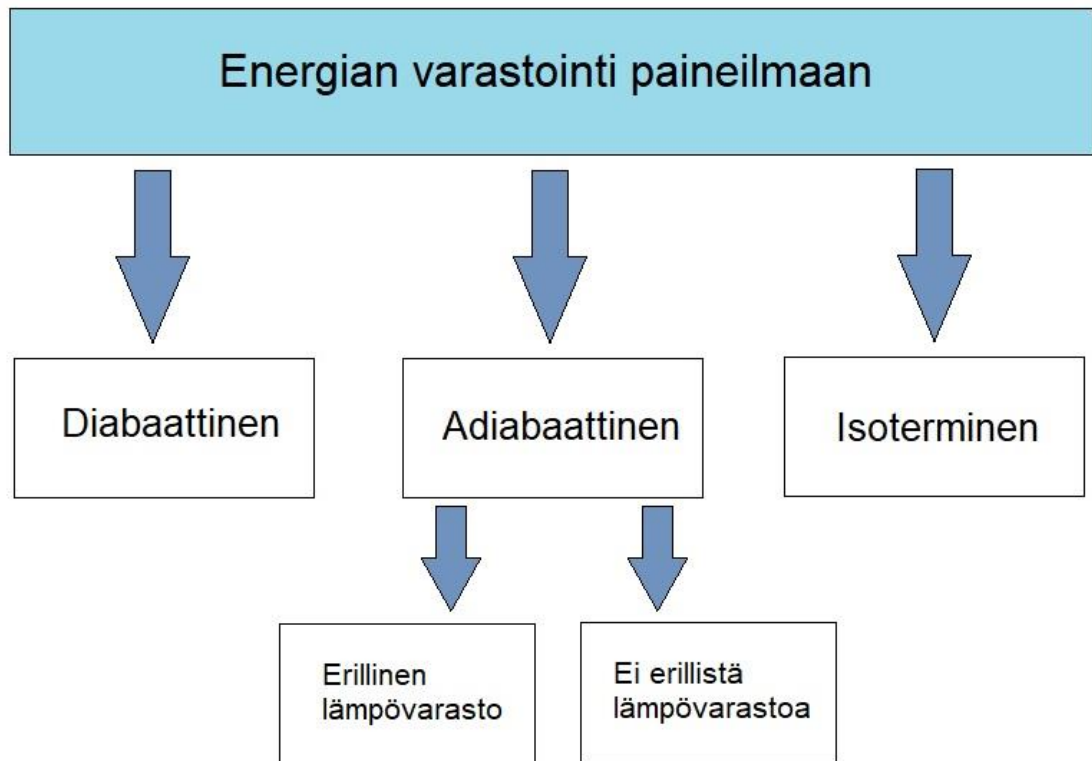
Ilman laajentumisvaiheessa taas ilman lämpötila laskee, koska ilma tekee työtä turbiiniin. Ilmaa halutaan lämmittää laajentumisvaiheessa, jotta sen aikana ei tapahtuisi kondensoitumista ja jäätymistä ilman voimakkaan lämpötilan laskun takia. Kaikissa CAES-prosesseissa ilmaa esilämmitetään laajentumisvaiheessa ennen sen syöttämistä turbiiniin. Monivaiheiset ilman puristus- ja laajentumisvaiheet nostavat CAES-prosessin hyötysuhdetta. (Grazzini & Milazzo 2012, s. 462 – 464 ja s. 470)

3. PAINEILMAN TUOTANTOMUODOT

3.1 Paineilman tuotanto yleisesti

Perusajatus kaikissa paineilman tuotantomuodoissa on tuottaa paineilmaa sähköenergialla kompressorien avulla ja varastoida tätä ilmaa myöhempää tarvetta varten paineilmaparastoon (engl. *Compressed Air Storage, CAS*). Varastoitua korkeapaineista ilmaa ajetaan kaasuturbiiniin, jossa ilma laajenee ja tekee työtä turbiiniin. Turbiini alkaa pyörimään, ja turbiiniin kytketystä generaattorista saadaan sähköenergiaa sähköverkkoon. (Luo *et al.* 2014; Budt *et al.* 2016) CAES:ssa tavoitteena on tuottaa paineilmaa varastoon, kun sähkön kysyntä ja hinta ovat alhaalla. Vaihtoehtoisesti paineilmaa voidaan tuottaa uusiutuvien energianlähteiden ylijäämästä. Paineilmasta pyritään tuottamaan sähköä takaisin verkkoon, kun sähkön kysyntä ja hinta ovat korkealla, tai kun sähköverkko tarvitsee tasaavaa sähköntuotantoa. (Luo *et al.* 2014; Mozayeni *et al.* 2017)

Paineilmaa voidaan tuottaa eri menetelmillä. Lämmön käsittely ilman puristus- ja laajentumisvaiheessa on tärkein tekijä jaotellaessa eri tuotantomuotoja (Budt *et al.* 2016, s. 253). Puristusvaiheessa ilman lämpötila nousee, ja laajentumisvaiheessa ilman lämpötila taas laskee. Teoriassa tehokkain CAES-prosessi poistaisi jatkuvasti lämpöä ilmasta puristusvaiheessa ja lisäisi jatkuvasti lämpöä ilmaan laajentumisvaiheessa (Grazzini & Milazzo 2012, s. 463). Kuvassa 2 on esitettyä jaottelu paineilman tuotantomuotojen välillä. Paineilman tuotantomuodot jaotellaan kaasun tilanmuutoksen mukaan. Kuvassa keskellä olevat laatikot kertovat, millainen tilanmuutos kaasulla on prosessissa. Adiabaattinen prosessi voidaan vielä jakaa kahteen erilaiseen prosessiin riippuen siitä onko prosessissa käytössä erillinen lämpövarasto vai ei.



Kuva 2. Jako paineilman eri tuotantomuotoihin (Perustuu lähteeseen Budt et al. 2016).

Paineilman tuotantomuotoja on olemassa karkeasti neljä erilaista. Tuotantomuotojen erot vaikuttavat hieman niiden prosessin kokonaishyötysuhteen laskentaan. Paineilman tuotantoprosessin kokonaishyötysuhde voidaan yleisesti laskea yhtälöllä (3) (Budt et al. 2016, yhtälö 3)

$$\eta_{\text{cyc}} = \frac{E_{\text{out,el}}}{E_{\text{in,el}}}, \quad (3)$$

jossa η_{cyc} on prosessin kokonaishyötysuhde, $E_{\text{in,el}}$ on prosessiin sisään menevä sähköenergia ja $E_{\text{out,el}}$ on prosessista ulos saatava sähköenergia.

3.2 Diabaattinen tuotantomuoto

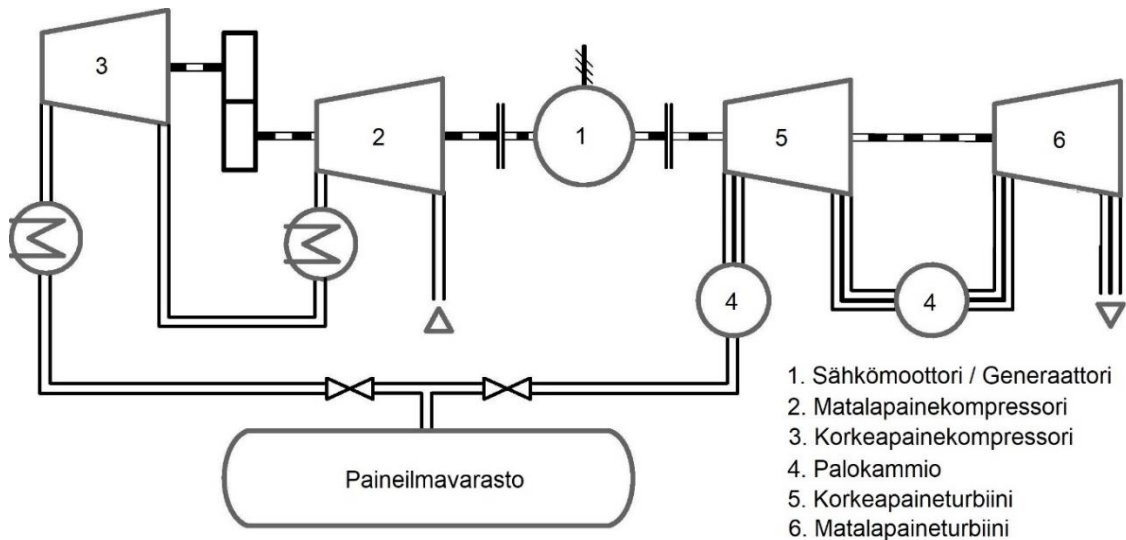
Diabaattinen paineilman tuotantomuoto (engl. *Diabatic Compressed Air Energy Storage, D-CAES*) on tällä hetkellä ainoa käytössä oleva tuotantomuoto täysimittaisissa tuotantolaitoksissa. Näitä täysimittaisia tuotantolaitoksia on kaksi: Huntorfin voimalaitos ja McIntoshin voimalaitos. (Aghahosseini & Breyer 2018; Geissbühler et al. 2018). Diabaattisessa prosessissa ilman puristusvaiheessa syntyvä lämpö vapautuu suoraan ympäristöön prosessi-ilman viilentämiseksi. Tätä syntyvää lämpöenergiaa ei oteta

talteen diabaattisessa prosessissa. Diabaattisessa prosessissa ilmaa esilämmitetään ulkoisella lämpöenergialla ennen sen syöttämistä turbiiniin. Ulkoisen lämpöenergian takia diabaattisen tuotantomuodon kokonaishyötysuhteen laskukaava on hieman erilainen verrattuna yhtälöön (3). Yhtälöllä (4) voidaan laskea kokonaishyötysuhde diabaattiselle prosessille (Budt *et al.* 2016, yhtälö 1)

$$\eta_{\text{cyc}} = \frac{E_{\text{out,el}}}{E_{\text{in,el}} + E_{\text{in,th}}}, \quad (4)$$

jossa $E_{\text{in,th}}$ on ainut uusi termi, jota ei ole yhtälössä (3). $E_{\text{in,th}}$ tarkoittaa prosessiin sisään tuotua lämpöenergiaa ulkoisesta energianlähteestä. Yleensä tämä tuodaan prosessiin polttamalla maakaasua tai kevytöljyä polttokammiossa (Budt *et al.* 2016, s. 253).

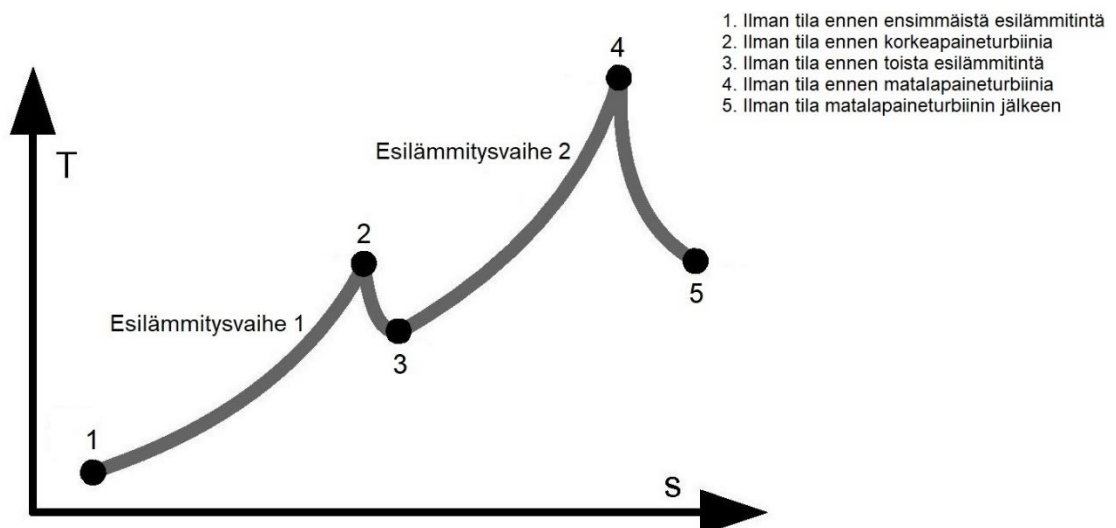
Diabaattinen paineilman tuotantomuoto on käytössä maailman ensimmäisessä CAES-voimalaitoksessa Huntorfissa Saksassa. Huntorfin voimalaitos kykenee tuottamaan 321 MW sähkötehon (Fries *et al.* 2018, s. 214). Huntorfin laitos pystyy tuottamaan sähköä tällä teholla noin neljän tunnin ajan (Arsie *et al.* 2007, taulukko 2). Huntorfin laitoksen yksinkertaistettu prosessikaavio on esitetty Kuvassa 3. Huntorfin laitoksen ilman laajentumisvaiheen T, s -kuvaaja on esitetty Kuvassa 4.



Kuva 3. Huntorfin laitoksen yksinkertaistettu prosessikaavio (Budt *et al.* 2016, muokattu kuva).

Huntorfin laitoksessa ilmaa puristetaan ensin matalapainekompressorissa, sitten korkeapainekompressorissa. Kompressorien välissä ja niiden jälkeen ovat välijäähdyttimet, joissa jäähdytetään puristusvaiheessa lämmennyttä ilmaa. Puristetun

ilman lämpöenergiaa ei oteta talteen välijäähdyttimissä, ja lämpöenergiaa häviää prosessista ulos tässä vaiheessa noin 55,7 MW (Jafarizadeh *et al.* 2020, s. 12). Osa tästä lämpöenergiasta olisi vielä työksi eli sähköenergiaksi muunnettavissa olevaa energiaa eli exergiaa (Demirel 2007, s. 184). Exergia häviää prosessista ulos eli jäähdytyksessä syntyy exergiahäviöitä. Ilman jäähdyttäminen kahdessa vaiheessa pienentää tätä exergiahäviötä diabaattisessa puristuksessa, mutta silti yli 25 % puristusvaiheeseen syötetystä sähköenergiasta häviää prosessista välijäähdytysten takia (Budt *et al.* 2016, s. 258). Toisen välijäähdytyksen jälkeen paineilma varastoidaan paineilma-*varastoon*, jonka suuruus Huntorfin voimalaitoksella on 310000 m³ (Arsie *et al.* 2007, taulukko 2). Myös ilman laajentumisvaihe on kaksivaiheinen Huntorfin laitoksessa. Ennen kumpaakin turbiinia ilmaa esilämmitetään palokammioissa polttamalla maakaasua. Ilman esilämmitysvaiheet on esitetty Kuvan 4 *T, s*-kuvaajassa korkeina lämpötilan nousuina.



Kuva 4. Huntorfin laitoksen prosessin ilman laajentumisvaiheen *T, s*-kuvaaja (Budt *et al.* 2016, muokattu kuva).

Kuvassa 4 on esitetty ilman esilämmitysvaiheet palokammioissa ennen kumpaakin turbiinia. Näissä vaiheissa sekä ilman lämpötila että entropia kasvavat voimakkaasti. Kohta 1 on ilman tila juuri ennen sen syöttämistä ensimmäiseen esilämmittimeen. Kohta 2 tarkoittaa ilman tilaa ennen korkeapaineturbiinia ja tässä kohdassa ilman lämpötila on 490 °C (Jafarizadeh *et al.* 2020, taulukko 1). Kohta 4 tarkoittaa taas ilman tilaa ennen matalapaineturbiinia ja ilman lämpötila on tällöin 945 °C (Jafarizadeh *et al.* 2020, taulukko 1). Kohdat 3 ja 5 ovat ilman tilat korkeapaine- ja matalapaineturbiinien

jälkeen. Ilman lämpötila on ennen matalapaineturbiinia korkeampi kuin ennen korkeapaineturbiinia, vaikka ilma jäähtyy korkeapaineturbiinissa. Tämä johtuu siitä, että ilmaa esilämmitetään vielä uudelleen palokammiossa ennen matalapaineturbiinia.

Toinen laajan mittakaavan CAES-voimalaitos sijaitsee McIntoshissa Yhdysvalloissa. McIntoshin laitos kykenee tuottamaan 110 MW sähkötehon noin 24 tunnin ajan. Myös McIntoshin laitoksella on käytössä diabaattinen paineilman tuotantomuoto. McIntoshin laitoksen paineilmaparaston suurus on 560000 m^3 (Arsie *et al.* 2007, taulukko 2). Prosessin kokonaishyötysuhde McIntoshin laitokselle on 54 % ja Huntorfin laitokselle 42 % (Luo *et al.* 2014, s. 605 – 606).

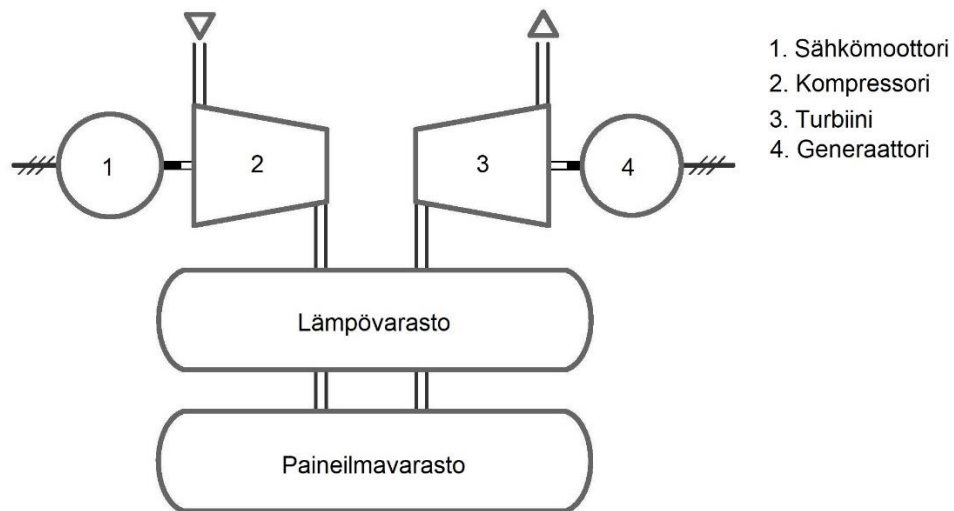
3.3 Adiabaattinen tuotantomuoto

Adiabaattinen paineilman tuotantomuoto (engl. *Adiabatic Compressed Air Energy Storage, A-CAES*) hyödyntää ilman puristusvaiheessa muodostunutta lämpöenergiaa ilman esilämmittämiseen ennen ilman laajentumisvaihetta. Adiabaattisessa prosessissa erillistä lämpöenergiaa ei tuoda prosessiin, eikä lämpöenergiaa myöskään poisteta prosessista ympäristöön. Koska adiabaattisessa prosessissa ei ole käytössä ulkoista lämpöenergiaa, lämpöä pitää saada tehokkaasti talteen ilman puristusvaiheesta. Tästä syystä A-CAES-laitoksissa on käytössä enemmän lämmönvaihtimia kuin D-CAES-laitoksissa. Lämpöenergian talteenotto odotettavasti parantaa prosessin kokonaishyötysuhdetta. (Grazzini & Milazzo 2012, s. 462 – 463) Adiabaattisen prosessin kokonaishyötysuhde voidaan laskea yhtälöllä (3).

Adiabaattisessa prosessissa lämpöenergiaa voidaan varastoida pääasiassa kahdella eri tavalla: varastoimalla kuumaa korkeapaineista ilmaa sellaisenaan tai ottamalla lämpöenergiaa puristetusta ilmasta talteen erilliseen lämpövarastoon. Erillistä lämpövarastoa (engl. *Thermal Energy Storage, TES*) käyttämällä puristettua ilmaa voidaan säilöä omassa säiliössään korkeammassa paineessa, ja tällöin ilman energiatiheys on suurempi. (Budt *et al.* 2016; Mozayeni *et al.* 2017) Erillisessä lämpövarastossa varastoitu lämpöenergia säilyy viikon ajan ilman, että prosessin hyötysuhde pienee juurikaan. Wolfin (2011, s. 154) tutkimuksessa prosessin hyötysuhde laski vain 1,9 prosenttiyksikköä, kun lämpöenergiaa varastoitiin erillisessä lämpövarastossa viikon ajan. Lyhyemmillä varastointiajoilla hyötysuhteen lasku oli vielä pienempi. Lämpöenergiaa voidaan varastoida myös useammassa vaiheessa. Esimerkiksi Wolfin (2011, s. 58) tutkimuksessa oli käytössä 2 erillistä lämpövarastoa, joista toinen varastoi matalapainekompressorissa muodostuvaa lämpöenergiaa ja toinen varastoi korkeapainekompressorissa muodostuvaa lämpöenergiaa. Monivaiheinen lämpöenergian varastointi pienensi prosessin hyötysuhteen laskua entisestään: kaksivaiheisessa varastoinnissa

hyötysuhde laskee enää 0,8 prosenttiyksikköä viikon varastoinnin aikana (Wolf 2011, s. 154).

Adiabaattista paineilman tuotantomuotoa, jossa on käytössä erillinen lämpövarasto kutsutaan nimellä A-CAES with TES (engl. *Adiabatic Compressed Air Energy Storage with Thermal Energy Storage*). Toinen yleisesti käytetty nimitys tällaiselle prosessille on AA-CAES (engl. *Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage*) (Luo *et al.* 2014; Budt *et al.* 2016). A-CAES with TES -prosessin yksinkertaistettu prosessikaavio on esitetty Kuvassa 5. Prosessikaaviossa on selkeästi esitetty erilliset varastot paineilmalle sekä lämpöenergialle. Puristusvaiheen kompressorin jälkeen paineilmasta otetaan lämpöenergia talteen ennen paineilman varastoimista paineilma-varastoon. Kun taas paineilmasta halutaan tuottaa sähköä, paineilmaan tuodaan lämpöenergiaa lämpövarastosta ennen paineilman syöttämistä turbiiniin.



**Adiabaattinen prosessi erillisellä lämpövarastolla
(A-CAES with TES)**

Kuva 5. A-CAES with TES -prosessin yksinkertaistettu prosessikaavio (Budt *et al.* 2016, muokattu kuva).

Ilman erillistä lämpövarastoa toimiva adiabaattinen tuotantomuoto varastoi puristettua kuumaa ilmaa suoraan paineilma-varastoon viilentämättä ilmaa lainkaan (engl. *Adiabatic Compressed Air Energy Storage without Thermal Energy Storage, A-CAES without TES*). Tässä prosessissa on siis käytössä vain yksi paineilma-varasto, johon varastoidaan sekä paineilmaa että lämpöenergiaa samanaikaisesti. Varastoitavan ilman korkean lämpötilan takia vaatimukset paineilma-varastoon käytettävälle materiaalille ovat korkeammat kuin erillistä lämpövarastoa käyttävällä adiabaattisella

prosessilla tai diabaattisen prosessin paineilmaparastolla. Korkeiden materiaali-vaatimusten takia varastoitavan ilman paine jää alhaiseksi, koska sen lämpötilaa ei voida nostaa liian korkealle. Tämän tyyppinen paineilman tuotantomuoto on ollut kehitteillä lähinnä laboratorioasteella, eikä se todennäköisesti tule yleistymään kaupallisessa käytössä. (Budt *et al.* 2016, s. 260)

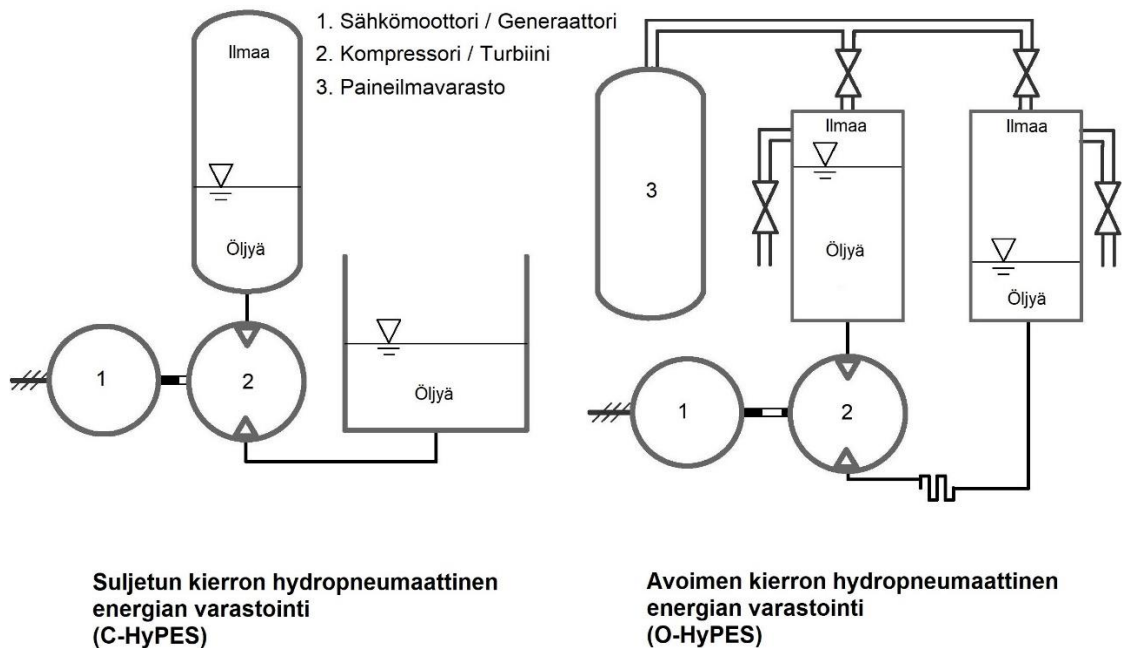
3.4 Isoterminen tuotantomuoto

Isotermisessä paineilman tuotantomuodossa (engl. *Isothermal Compressed Air Energy Storage, I-CAES*) puristusvaiheessa syntyvää ilman lämpötilan nousua pyritään minimoimaan tai jopa estämään sen nouseminen kokonaan. Myös lämpötilan laskua ilman laajentumisvaiheessa pyritään minimoimaan mahdollisimman paljon. (Budt *et al.* 2016, s. 263) Ideaalisesti toimivassa I-CAES-prosessissa ilman lämpötila pysyisi koko prosessin ajan samana eli ympäristön ilman lämpötilassa. Tällaisessa prosessissa saataisiin sama määrä työtä ulos mitä prosessiin on tehty työtä sisään, ja sen kokonaisyhtösuhte olisi 1. Isotermisen prosessin hyötysuhde voidaan laskea yhtälöllä (3). Täysin isoterminen ilman puristuminen ja laajentuminen on hyvin vaikeaa toteuttaa, ja erilaiset isotermiset tuotantomuodot ovat vasta kehitysasteella. (Budt *et al.* 2016; Grazzini & Milazzo 2012)

Isotermisessä paineilman tuotantomuodossa ilman puristusvaiheen täytyy tapahtua hitaasti, jotta lämmönsiirto prosessi-ilman ja kompressorin materiaalien välillä ehtii tapahtumaan. Tällöin lämpöenergiaa siirtyy prosessi-ilmasta kompressoriin, ja prosessi-ilman lämpötila ei ala nousemaan. Tehokkaampaa lämmönsiirtoa varten I-CAES-prosessin kompressoreissa on käytössä nestemäinen mäntä (engl. *liquid piston*) ja erillisiä lämmönsiirtopintoja. Eräs vaihtoehto tehostaa lämmönsiirtoa on ruiskuttaa nestettä kompressorin sylinteriin prosessi-ilman joukkoon, jolloin lämmönsiirtoala suurenee. (Qin & Loth 2014; Budt *et al.* 2016)

Isoterminen prosessi voidaan toteuttaa myös käyttämällä hydraulikkaöljyä väliaineena ilman puristus- ja laajentumisvaiheissa. Hydraulikkaöljyä käyttäviä prosesseja kutsutaan nimillä C-HyPES (engl. *Closed cycle Hydro-Pneumatic Energy Storage*) ja O-HyPES (engl. *Open cycle Hydro-Pneumatic Energy Storage*). Näissä molemmissa prosesseissa vain hydraulikkaöljyä liikkuu kompressorissa ja turbiinissa. (Budt *et al.* 2016, s. 263–264) Ilman puristuminen ja laajentuminen tapahtuvat vain siis öljyn välityksellä. Kuvassa 6 on esitetty kyseisten prosessien yksinkertaistetut prosessi-kaaviot. Suljetun kierron prosessissa eli C-HyPES:ssä varastoidun ilman määrä ei muutu, vain sen paine ja tilavuus muuttuvat. O-HyPES:ssä eli avoimen kierron prosessissa taas ilman määrä muuttuu, ja ilmalle on olemassa erillinen varastosäiliö.

O-HyPES-prosessissa on oltava käytössä vähintään 2 eri ilma-öljy-sylinteriä, jotka työskentelevät vuorotellen (Budt *et al.* 2016, s. 263–264).



Kuva 6. Yksinkertaistetut prosessikaaviot C-HyPES- ja O-HyPES-prosesseista (Budt *et al.* 2016, muokattu kuva).

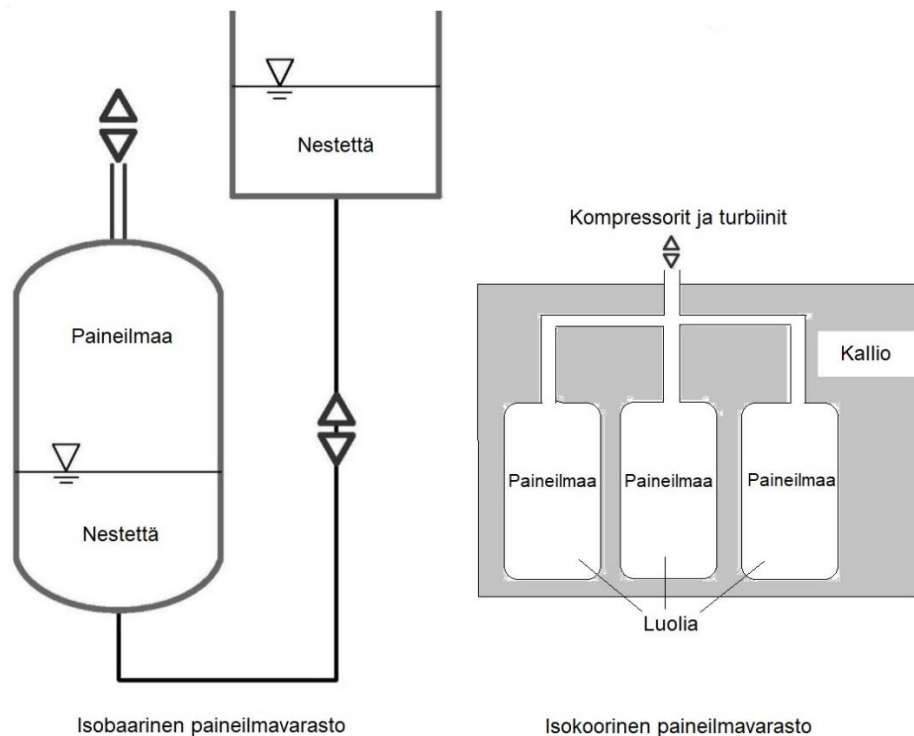
Todellisuudessa suurin osa kompressoreista ja turbiineista on lähes adiabaattisia, ja niiden lämmönsiirtyminen ympäristön kanssa on pientä. Tällöin lähes isoterminen CAES-prosessin puristusvaihe olisi mahdollista toteuttaa monella peräkkäisellä adiabaattisella kompressorilla ja pienellä ilman jäähdytyksellä puristusvaiheessa. Lähes isotermisen CAES-prosessin laajentumisvaiheessa taas käytettäisiin montaa peräkkäistä adiabaattista turbiinia ja pientä esilämmitystä ilmalle. (Grazzini & Milazzo 2012; Garvey & Pimm 2016)

4. PAINEILMAN VARASTOINTI

4.1 Paineilman varastointi yleisesti

Paineilmaa voidaan varastoida joko isokoorisesti tai isobaarisesti. Isokoorisessa varastoinnissa paineilman viemä tilavuus pysyy koko ajan vakiona ja paineilman paine muuttuu. Isobaarisessa varastoinnissa taas paineilman paine pysyy koko ajan vakiona, mutta paineilman tilavuus vaihtelee. Molemmilla menetelmillä on omat etunsa ja haittansa. (Budt *et al.* 2016; Garvey & Pimm 2016) Paineilmaa pystytään varastoimaan paineilma- varastoissa jopa kuukausien ajan (Luo *et al.* 2014, s. 607).

Isobaarisessa varastoinnissa paineilman viemä tilavuus vaihtelee sen tuotannon ja käytön mukaan. Ilman paine pidetään koko ajan vakiona säätämällä nesteen määrää paineilma- varastossa. (Budt *et al.* 2016; Garvey & Pimm 2016) Kuvassa 7 on esitetty havainnekuvat sekä isobaarisesta että isokoorisesta paineilma- varastoista. Isobaarisen paineilma- varaston painetta säätelevää nestettä varastoidaan erillisessä säiliössä, josta sitä voidaan ajaa paineilma- varastoon tai sieltä pois.



Kuva 7. Isobaarisen ja isokoorisen paineilma- varastojen havainnekuvat (Budt *et al.* 2016, muokattu kuva; perustuu lähteeseen Garvey & Pimm 2016).

Isokoorinen paineilmavarasto on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen, sillä siinä ei ole tarvetta erilliselle paineensäätöjärjestelmälle. Kuvassa 7 on esimerkki isokoorisesta paineilmavarastosta, jossa on hyödynnetty kalliassa olevia luolia paineilmavarastoina. Isokoorinen paineilmavarasto on täynnä, kun ilmanpaine siellä saavuttaa varaston maksimipaineen. Isokoorisessa paineilmavarastossa ilmanpaine muuttuu välittömästi, kun paineilmaa ajetaan sinne tai pois sieltä. (Garvey & Pimm 2016, s. 98) Tällä hetkellä toimivissa suuren mittakaavan CAES-laitoksissa on käytössä isokooriset paineilmavarastot (Budt *et al.* 2016, s. 265).

4.2 Paineilmavarastot

Paineilmavarasto voi olla joko maanpäällinen tai maanalainen. Molemmissa vaihtoehdoissa voidaan käyttää joko isokoorista tai isobaarista varastointimenetelmää. Suuren mittakaavan CAES-laitoksissa pyritään käyttämään maanalaista paineilmavarastoa, sillä sellaisen kapasiteetti voidaan rakentaa suuremmaksi ja käyttöönottohintana on pienempi. (Grazzini & Milazzo 2012; Budt *et al.* 2016)

Maanalaisina paineilmavarastoina voidaan hyödyntää esimerkiksi vanhoja maakaasukenttiä ja kaivoskuiluja sekä luonnollisia maanalaisia luolia. Tällä hetkellä käytetyin ja tunnetuin paineilman varastotyyppi on suolaluola (engl. *salt cavern*). (Budt *et al.* 2016; Aghahosseini & Breyer 2018) Suolaluolat ovat käytännössä ilmatiiviitä, ja siksi sopivat todella hyvin paineilmavarastoiksi. Lisäksi suolaluolia on käytetty kaasujen varastoinnissa jo pitkään maakaasun varastoinnin yhteydessä. (Geissbühler *et al.* 2018, s. 130)

Maanpäälliset paineilmavarastot ovat keinotekoisia rakennettuja varastoja. Keinotekoisien varastojen materiaaleina voidaan käyttää terästä tai erilaisia kerroslevyjä. Keinotekoiset paineilmavarastot soveltuvat paremmin pienen mittakaavan (1–10 MW) CAES-laitoksille, sillä niiden rakennuskulut kohoavat voimakkaasti varaston koon suurentuessa. (Grazzini & Milazzo 2012; Budt *et al.* 2016)

5. TUOTANTO- JA VARASTOINTIMUOTOJEN VERTAILU

5.1 Tuotantomuotojen ominaisuudet

Kaikilla paineilman tuotanto- ja varastointimuodoilla on sekä hyviä että huonoja puolia. Etuja ja haittoja eri muotojen välillä voidaan arvioida muun muassa hyötysuhteen, prosessin toteutettavuuden ja laitoksen hinnan kannalta. Taulukossa 1 on esitettyä eri paineilman tuotantomuotojen oleellisia ominaisuuksia laitoksen käytön kannalta.

Taulukko 1. Eri paineilman tuotantomuotojen ominaisuuksien vertailua (Wolf 2011¹; Geissbühler et al. 2018²).

	D-CAES	A-CAES	I-CAES	
			C-HyPES	O-HyPES
Hyötysuhde [%]	40 – 50 ²	60 – 75 ²	80 ¹	75 ¹
Tehoalue ¹	5 MW – 1 GW	1 MW – 1 GW	5 kW – 1 GW	5 kW – 0,1 GW
Käynnistymisaika ¹ [min]	10 – 15	10 – 15	< 1	< 1
Kehityksen taso	täysimittainen laitos ¹	pilot-laitos ja tutkimus ^{1,2}	tutkimus ¹	tutkimus ¹

Erityyppisten CAES-tuotantomuotojen hyötysuhteet poikkeavat toisistaan suuresti, kuten Taulukosta 1 voidaan havaita. Diabaattisen ja isotermisen prosessin välillä voi olla jopa 40 %:n ero hyötysuhteessa. Diabaattisen prosessin hyötysuhde on selkeästi heikompi kuin muiden tuotantoprosessien, sillä muissa tuotantoprosesseissa käytetään prosessissa syntyvää lämpöenergiaa hyödyksi, eikä hukata sitä (Budt et al. 2016; Geissbühler et al. 2018). Diabaattisessa tuotantomuodossa prosessiin tuodaan sähköenergian lisäksi ulkoista lämpöenergiaa, mikä heikentää myös sen hyötysuhdetta. Molemmilla isotermisillä prosesseilla on parempi hyötysuhde kuin diabaattisella ja adiabaattisella prosessilla. Tämä selittyy sillä, että isotermisillä prosesseilla on hyvin

pieni exergiahäviö, ja isotermisessä puristuksessa on mahdollista saavuttaa jopa 98 %:n hyötysuhde (Grazzini & Milazzo 2012; Qin & Loth 2014).

Isotermiinen CAES-tuotantomuoto olisi hyvin tehokas, mutta se on hyvin vaikea toteuttaa käytännössä (Grazzini & Milazzo 2012, s. 463). Isotermiset CAES-tuotantomuodot ovatkin vasta tutkimusasteella, kun taas muilla tuotantomuodoilla on jo käynnissä olevia laitoksia. Yksi suuri este C-HyPES-prosessin yleistymiselle laitostasolle asti on sen paineilman pieni energiatiheys (Budt *et al.* 2016, s. 264). C-HyPES-prosessin paineilman energiatiheys on 1–3 kW/m³, kun taas muilla tuotantomuodoilla päästään keskimäärin vähintään 8 kW/m³:iin (Wolf 2011, s. 26). Pienen energiatheyden takia paineilmavaraston koko pitää olla suuri, ja tämä lisää CAES-laitoksen rakennuskustannuksia.

Kaikilla Taulukon 1 paineilman tuotantomuodoilla on laajahko tehoalue. Isotermisillä tuotantomuodoilla voitaisiin toteuttaa myös hyvin pienitehoisia CAES-laitoksia. Käynnistymisajat ovat kaikilla tuotantomuodoilla kohtuullisen lyhyitä, isotermisillä tuotantomuodoilla todella lyhyitä. Lyhyiden käynnistymisaikojensa takia kaikki CAES-laitokset soveltuvat hyvin tasaamaan sähköntuotantoa uusiutuvien energiantuotantolaitosten yhteyteen. Erityisesti isotermiset tuotantomuodot pystyisivät toimimaan myös teollisuuden varavirtalähteinä todella lyhyiden käynnistymisaikojensa takia. (Luo *et al.* 2014, s. 605)

5.2 Varastointimuodot ja laitoksen sijainti

Tällä hetkellä toimivilla suuren mittakaavan laitoksilla on käytössä isokoorinen paineilman varastointitapa (Budt *et al.* 2016, s. 265). Isokoorinen varastointitapa on yksinkertainen ja soveltuu mainiosti suuren mittakaavan laitoksiin (Garvey & Pimm 2016, s. 95–98). Suuri haittapuoli isokoorisessa varastoinnissa on kuitenkin sen ilmanpaineen vaihtelu käytön aikana. Paineen vaihtelu haittaa kompressorien ja turbiinien toimintaa, jolloin niiden tehokkuus laskee. (Budt *et al.* 2016, s. 264) Kompressorit ja turbiinit voivat toimia optimaalisemmin, jos CAES-laitoksella on käytössä isobaarinen paineilman varastointitapa. Isobaarinen varastointitapa myös vähentää paineilmavaraston rasiutusta, sillä ilmanpaine pysyy varastossa koko ajan samana. (Garvey & Pimm 2016, s. 96)

CAES-laitoksen hinta nousee korkealle, jos paineilmavarastona ei pystytä hyödyntämään vanhaa kaivosta tai luolamuodostelmaa. Tällöin joudutaan käyttämään keinotekoisista rakennettua paineilmavarastoa, jonka rakentamiskustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin maanalaisella luolamuodostelmalla. (Budt *et al.* 2016; Garvey & Pimm 2016; Geissbühler *et al.* 2018) Jos maanalainen tila on tarpeeksi suuri,

koko CAES-laitos voitaisiin sijoittaa maan alle. Tämä helpottaisi erityisesti erillisen lämpövaraston rakentamista, ja myös lämpövaraston rakentamiskulut pienenisivät. (Geissbühler *et al.* 2018, s. 130) CAES-laitokselle soveltuvia maanalaisia luolia on kuitenkin rajattu määrä maailmassa, ja niiden sijainti voi olla huono (Grazzini & Milazzo 2012, s. 462). CAES-laitoksen pitäisi sijaita myös uusiutuvan energiantuotantolaitoksen läheisyydessä, sillä pääsääntöisesti vain uusiutuvasta energiasta peräisin olevaa sähköenergiaa tarvitsee varastoida. CAES-laitoksen läheinen sijainti uusiutuvien energianlähteiden kanssa tekisi energian varastoinnista tehokkaampaa ja kustannustehokkaampaa. (Aghahosseini & Breyer 2018, s. 167)

5.3 Tämänhetkinen tilanne

Tämänhetkiset suuren mittakaavan CAES-laitokset tuottavat hiilidioksidipäästöjä niiden käytön aikana, sillä niissä poltetaan hiilidioksidia tuottavia polttoaineita paineilman lämmittämiseksi ilman laajentumisvaiheessa. Diabaattinen paineilman tuotantomuoto ei ole siis täysin päästötön energianvarastointitapa, vaikka laitokselle tuleva sähköenergia olisi tuotettu päästöttömästi esimerkiksi tuulivoimalla. Tämä on yksi suurimpia kehityksen kohteita energian varastoinnissa paineilmaan (Fries *et al.* 2018, s. 214). Diabaattisen prosessin päästöjen vähentämiseksi on ehdotettu muun muassa maakaasun korvaamista vedyllä tai biomassalla (Fries *et al.* 2018; Grazzini & Milazzo 2012). Maakaasusta eroon pääseminen ei pelkästään vähentäisi päästöjä, mutta myös laitoksen sijainti ei olisi riippuvainen maakaasuverkosta (Grazzini & Milazzo 2012, 463).

Paineilman tuotantomuodoista adiabaattisella tuotantomuodolla on eniten potentiaalia yleistyä täysinmittaiseen käyttöön tämänhetkisen kehityksen mukaan (Luo *et al.* 2014; Aghahosseini & Breyer 2018; Geissbühler *et al.* 2018). Geissbühler *et al.* (2018, s. 129) mukaan adiabaattinen tuotantomuoto olisi ainoa relevantti vaihtoehto, joka voisi kilpailla suuren kokoluokan energian varastoinnissa pumppuvoimalaitosten kanssa (engl. *Pumped Hydro Energy Storage, PHES*). Adiabaattisen tuotantomuodon yksi suurimpia etuja verrattuna tällä hetkellä käytössä olevaan diabaattiseen tuotantomuotoon on adiabaattisen tuotantomuodon nollapäästöt laitoksen käytön aikana. Oletuksena tässä on, että laitoksessa tuotetaan paineilmaa uusiutuvista energianlähteistä peräisin olevalla sähköllä. (Luo *et al.* 2014; Aghahosseini & Breyer 2018) Adiabaattinen tuotantomuoto toisaalta tarvitsee monta tehokasta lämmönvaihdinta toimiakseen, mikä nostaa laitoksen hintaa (Garvey & Pimm 2016, s. 105).

5.4 Vertailu pumppuvoimalaitoksiin

Pumppuvoimalaitokset sopivat hyvin vertailukohteiksi CAES-laitoksille, sillä nämä molemmat energianvarastointitavat ovat kokoluokaltaan samansuuruisia. Molemmat energianvarastointitavat ovat myös reilusti suurempia tehoiltaan ja kapasiteeteiltaan kuin muut energianvarastointitavat. (Wolf 2011; Møller *et al.* 2017) Pumppuvoimalaitokset kattoivat suuren kokoluokan energianvarastointikapasiteetista 99 % maailmanlaajuisesti vuonna 2012 (Luo *et al.* 2014, s. 603). Energian varastointi paineilmaan ei ole siis läheskään niin suuressa käytössä kuin energian varastointi pumppuvoimalaitoksia hyödyntämällä on. Pumppuvoimalaitosten yksi suurimpia etuja CAES-laitoksiin nähden on pumppuvoimalaitosten korkeammat hyötysuhteet. Pumppuvoimalaitosten tämänhetkiset hyötysuhteet ovat 70 – 80 % (Rehman *et al.* 2015, s. 586), kun taas CAES-laitoksilla hyötysuhteet ovat tällä hetkellä 40 – 50 %. CAES-laitosten matala hyötysuhde onkin yksi suurimpia kehityksen kohteita energian varastoinnissa paineilmaan (Budt *et al.* 2016, s. 266). CAES-laitosten hyötysuhde voi nousta myös 70 – 80 % alueelle, jos tuotantomuotona on adiabaattinen tai isoterminen prosessi.

Yksi suurimpia esteitä CAES-laitosten yleistymiselle energian varastointiin on laitokselle soveltuvan sijainnin löytäminen. Tämä on merkittävä haaste myös pumppuvoimalaitoksille, sillä ne tarvitsevat huomattavan korkeuseron laitosalueelle. (Budt *et al.* 2016; Geissbühler *et al.* 2018) CAES-laitosten yleistymistä hidastaa myös niiden korkeat investointikulut (Wang *et al.* 2017, s. 445). Lund & Salgi (2009, s. 1177) mukaan muut energianvarastointitavat ovat enemmän toteuttamiskelpoisia ja taloudellisesti kannattavampia kuin energian varastointi paineilmaan. He kuitenkin korostavat, että heidän tutkimuksessaan energian varastointiin tuleva sähkö on peräisin tuulivoimasta, ja kaikki heidän tutkimuksensa energianvarastointitavat on kytketty suoraan tuulivoimalaan. Kannattavuusarviointi ja energianvarastointitapojen vertailu saattaisi olla suotuisampi CAES-laitoksille, jos varastoitavana sähköenergiana käytettäisiin jostain muusta kuin suoraan tuulivoimasta peräisin olevaa sähköä. Tutkimuksen mukaan CAES-laitos ei toimi kannattavasti tuulivoiman kanssa, sillä CAES-laitokselle tulevan sähkötehon tarvitsee olla koko ajan CAES-laitokselle sopivalla tasolla. Tutkimuksessa CAES-laitos ei kyennyt hyödyntämään kaikkea tuulivoimasta saatavaa sähköenergiaa ja tuottamaan sillä paineilmaa, kun tuulivoiman sähköteho oli yli CAES-laitokselle ideaalisen tason. CAES-laitos ei myöskään pystynyt tuottamaan itse tarpeeksi sähköä paineilmaasta, kun tuulivoiman sähköteho oli alle CAES-laitokselle ideaalisen tason. (Lund & Salgi, s. 1175 – 1176)

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Energiaa voidaan varastoida paineilmaan montaa eri tuotantomuotoa käyttäen. Tuotantomuotoja erottaa eniten niiden prosessissa muodostuvan lämpöenergian käsittely. Kirjallisuuden perusteella työssä havaittiin, että lämpöenergiaa talteenottamalla CAES-prosessin hyötysuhde paranee. Myös paineilman monivaiheiset puristus- ja laajentumisvaiheet tekevät prosessista tehokkaamman. Lämpöenergiaa voidaan ottaa talteen pääsääntöisesti kahdella eri tavalla: erillisellä lämpövarastolla tai varastoimalla paineilmaa kuumana tavalliseen paineilmaparastoon. Erillinen varasto lämpöenergialle tehostaa prosessia, ja paineilmaa voidaan tällöin varastoida korkeammassa paineessa, sillä paineilman lämpötila pysyy matalampana. Adiabaattisessa tuotantomuodossa pääsääntöisesti käytetään erillistä lämpövarastoa, ja tämän takia adiabaattisella tuotantomuodolla on kirjallisuuden perusteella eniten potentiaalia yleistyä suuren mittakaavan paineilmalaitoksissa. Tällä hetkellä suurissa CAES-laitoksissa käytössä oleva diabaattinen tuotantomuoto ei todennäköisesti tule yleistymään enempää, koska sen hyötysuhde on matala sekä se tuottaa hiilidioksidipäästöjä käytön aikana.

Tällä hetkellä suuren mittakaavan CAES-laitokset käyttävät suolaluolia paineilman varastointiin. Suolaluolien suurimpana etuna on niiden hyvä soveltuvuus paineilman varastoinnissa: ne ovat edullisia ottaa käyttöön ja ne ovat valmiiksi ilmatiiviitä. Lisäksi suolaluolien toimivuutta kaasujen varastointiin on tutkittu jo vuosikymmenien ajan maakaasuvarastojen yhteydessä. CAES-laitoksille soveltuvien luolamuodostelmien vähäisyys rajoittaa CAES-laitosten yleistymistä merkittävästi. Valmiita maanalaisia luolia tarjoava sijainti laskee CAES-laitoksen rakentamiskustannuksia sekä mahdollistaa suuren varastointikapasiteetin paineilmalle. Maanpäälle rakennettu paineilmaparasto taas nostaa CAES-laitoksen hintaa huomattavasti, eikä laitoksen rakentaminen ole enää taloudellisesti kovin kannattavaa.

Adiabaattinen paineilman tuotantomuoto olisi relevantti kilpailija pumppuvoimalaitoksille suuren kokoluokan energianvarastoinnissa. Tällä hetkellä pumppuvoimalaitokset ovat kuitenkin selkeästi CAES-laitoksia edellä sekä hyötysuhteessa että laitosten määrässä. Molempien energianvarastointitapojen yleistymisen haasteita on niiden suuri riippuvuus laitokselle soveltuvasta sijainnista. CAES-laitosten yleistymistä hidastaa lisäksi niiden korkeat investointikulut sekä taloudellisesti heikko kannattavuus tuulivoiman yhteydessä.

LÄHTEET

Aghahosseini, A. & Breyer, C. (2018). Assessment of geological resource potential for compressed air energy storage in global electricity supply. *Energy Conversion and Management*. Vol. 169, pp. 161–173.

Arsie, I., Marano, V., Moran, M., Rizzo, G. & Savino, G. (2007). Optimal Management of a Wind/CAES Power Plant by Means of Neural Network Wind Speed Forecast. P. 1 – 10. Saatavissa (viitattu 10.1.2021): https://www.researchgate.net/publication/228375333_Optimal_Management_of_a_WindCAES_Power_Plant_by_Means_of_Neural_Network_Wind_Speed_Forecast

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*. Vol. 170, pp. 250–268.

Demirel, Y. (2007). 4 – Using the Second Law: Thermodynamic Analysis. *Nonequilibrium Thermodynamics (Second Edition)*. Elsevier Science B. V.. Chapter 4, pp. 155 – 274.

Fries, A., Kaiser, F., Beck, H. & Weber, R. (2018). Huntorf 2020 – Improvement of Flexibility and Efficiency of a Compressed Air Energy Storage Plant based on Synthetic Hydrogen. NEIS 2018, Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems. VDE, Hamburg, Germany. Pp. 214–218.

Garvey, S. D. & Pimm, A. (2016). *Compressed Air Energy Storage. Storing Energy – With Special Reference to Renewable Energy Sources*. 1st edition, Elsevier, Amsterdam. Chapter 5, pp. 87–111.

Geissbühler, L., Becattini, V., Zanganeh, G., Zavattoni, S., Barbato, M., Haselbacher, A. & Steinfeld, A. (2018). Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, Part 1: Plant description and tests with sensible thermal-energy storage. *Journal of Energy Storage*. Vol. 17, pp. 129–139.

Grazzini, G. & Milazzo, A. (2012). A Thermodynamic Analysis of Multistage Adiabatic CAES. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 100, No. 2, pp. 461–472.

Jafarizadeh, H., Soltani, M. & Nathwani, J. (2020). Assessment of the Huntorf compressed air energy storage plant performance under enhanced modifications. *Energy Conversion and Management*. Vol. 209, article 112662.

Lund, H. & Salgi, G. (2009). The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems. *Energy Conversion and Management*. Vol. 50, Issue 5, pp. 1172–1179.

Luo, X., Wang, J., Dooner, M., Clarke, J. & Krupke, C. (2014). Overview of Current Development in Compressed Air Energy Storage Technology. *Energy Procedia*. Vol. 62, pp. 603–611.

Mozayeni, H., Negnevitsky, M., Wang, X., Cao, F. & Peng, X. (2017). Performance Study of an Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage System. *Energy Procedia*. Vol. 110, pp. 71–76.

Møller, K. T., Jensen, T. R., Akiba, E. & Li, H. (2017). Hydrogen - A sustainable energy carrier. *Progress in Natural Science: Materials International*. DOI: 10.1016/j.pnsc.2016.12.014.

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

Qin, C., Loth, E. (2014). Liquid piston compression efficiency with droplet heat transfer. *Applied Energy*. Vol. 114, pp. 539–550.

Wang, J., Ma, L., Lu, K., Miao, S., Wang, D. & Wang, J. (2017). Current research and development trend of compressed air energy storage. *Systems Science & Control Engineering*. Vol. 5, pp 434–448.

Wolf, D. (2011). Methods for design and application of adiabatic compressed air energy storage based on dynamic modeling. Fraunhofer UMSICHT Oberhausen. P. 1–190. Saatavissa (viitattu 11.11.2020): <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-154651.html>

World Nuclear Association (2011). Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources. WNA Report. Saatavissa (viitattu 5.10.2020): <https://www.world-nuclear.org/our-association/publications/online-reports/lifecycle-ghg-emissions-of-electricity-generation.aspx>