

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Kaasuturbiinien ja moottorivoimaloiden rooli
energiamurroksessa

The role of gas turbines and engine power plants in energy
transition

Työn tarkastaja: Aki Grönman

Työn ohjaaja: Aki Grönman

Lappeenranta 18.10.18

Alexi Heikkilä

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Aleksi Heikkilä

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Aki Grönman

Kandidaatintyö 2018

27 sivua, 12 kuvaa ja 1 taulukko

Hakusanat: energiamurros, energiewende, kaasuturbiini, moottorivoimalaitos

Tässä kandidaatintyössä tutustutaan energiamurroksen käsitteeseen ja tarkastellaan vaikuttimia, energiamurroksen toteutusta maailmalla ja mikä on kaasuturbiinien ja polttomoottorivoimaloiden rooli energiamurroksessa. Työtä on mahdollista hyödyntää tietopakettina tutustuttaessa energiamurrokseen ja kaasuturbiinien sekä polttomoottorien käytettävyyteen energiajärjestelmissä, joissa on runsaasti uusiutuvia energianlähteitä. Tarkastelun näkökohtina ovat kokemukset Saksassa ja mahdollisuudet Suomessa. Työ toteutetaan kirjallisuustyönä ja siinä hyödynnetään monipuolisesti lähteitä alan julkaisuista, sekä kansallisten ja kansainvälisten organisaatioiden tuottamaa tietoa.

Työssä todetaan kaasuturbiinien ja polttomoottorien soveltuvan hyvin tasaamaan energiaverkon kulutushuippuja, sekä tuottamaan sähköä ja lämpöä yhteistuotannossa. Työssä osoitetaan myös energiamurrokseen liittyvän ongelmia, jotka ovat ilmentyneet Saksassa. Työssä pohditaan myös mahdollisia ratkaisuja ja toisaalta ongelmia ratkaisuihin.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
1 Johdanto	4
2 Energiamurros	6
2.1 Ilmastonmuutos.....	6
2.2 Energiamurros.....	7
3 Kaasuturbiinit ja polttomoottorit	12
3.1 Kaasuturbiinit.....	12
3.1.1 Erilaisia laitoksia	16
3.1.2 Vuosaaren voimalaitos	17
3.2 Moottorivoimalaitokset.....	18
3.2.1 Kielin voimalaitos	22
3.3 Teknologioiden edut ja haasteet	23
4 Yhteenveto	26
5 Lähdeluettelo	28

1 JOHDANTO

Saksassa käynnistettiin Energiamurrokseksi kutsuttu energiantuotannon uudistamisohjelma Fukushima ydinonnettomuuden jälkeen vuonna 2009. Onnettomuuden seurauksena Saksassa päätettiin luopua ydinvoimasta, sekä fossiilisiin polttoaineisiin pohjautuvista energiantuotanto tavoista. Energiamurroksella tarkoitetaan energiajärjestelmän uudistamista ja siirtymistä järjestelmään, jossa suurin osa energiasta hankittaisiin uusiutuvista ja päästöttömistä lähteistä, kuten tuuli- ja aurinkovoimasta.

Energiamurros koskettaa Saksan lisäksi koko maailmaa. Ilmastonmuutoksen hillitseminen on todettu toistuvasti ihmiskunnan suurimmaksi haasteeksi niin kansallisella, kuin myös kansainvälisellä tasolla. YK:n ilmastositimusta on täydennetty esimerkiksi Kioton pöytäkirjalla, jossa valtioille on annettu tavoitteita päästöjen vähentämiseksi. EU:n yhteinen tavoite on 20% päästöjen vähennys vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä. (Ympäristöministeriö, 2013) Suomi saavutti ja alitti nämä tavoitteet etuajassa. (Tilastokeskus, 2014) Tavoitteen saavuttamista Suomen tapauksessa edesauttoivat erityisesti vuoden 2008 finanssikriisi ja siitä seurannut lama, joka vähensi energiaintensiivistä teollisuutta Suomessa, metsäteollisuuden sivuvirroista syntyneiden uusiutuvan energianlähteiden hyödyntäminen, ydinvoiman laaja käyttö, sekä panostukset erityisesti tuulivoiman lisärakentamiseen. Suomi on kuitenkin pieni talous verrattuna Saksaan, joten mitä Saksassa tapahtuu seuraavien vuosien aikana, tulee merkittävästi määrittämään, miten muualla maailmassa ja erityisesti suurissa talousmaissa tavoitellaan vähäpäästöistä energiajärjestelmää. Siksi on tärkeää tarkastella erilaisia teknologioita, joita Saksassa on käytetty ja arvioida niistä saatuja kokemuksia ja niiden käyttömahdollisuuksia muualla.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan kaasuturbiinien ja polttomoottorien käyttökelpoisuutta tilanteissa, joissa tuuli- tai aurinkovoimalat eivät tuota tarpeeksi sähköä vastatakseen kulutusta tai tuotanto on ailahtelevaa. Sekä kaasuturbiineja, että polttomoottoreita markkinoidaan säätövoiman tuotantoon, saarekekäyttöön, kuin myös perusvoiman tuotantoon soveltuvina laitteina. Molemmat myös voivat hyödyntää erilaisia polttoaineita niin koostumuksen, kuin laadunkin osalta. Tässä työssä pyritään esittelemään molemmat teknologiat yleisesti, sekä käytännön case-kokemusten kautta. Lopuksi suoritetaan

teknologioiden vertailua ja pyritään nimeämään olennaiset erot käytännöllisyyden ja ympäristöystävällisyyden kannalta.

2 ENERGIAMURROS

2.1 Ilmastonmuutos

Ilmastonmuutos on merkittävältä osin seurausta fossiilisten polttoaineiden laajamittaisesta hyödyntämisestä ja muusta ihmisen toiminnasta, kuten metsien hakkuista. Fossiiliset polttoaineet ovat syntyneet satojen miljoonien vuosien aikana eloperäisestä materiaalista paineen, lämpötilan ja ajan yhteisvaikutuksesta. Poltettaessa fossiilisia polttoaineita vapautuu maapallon ilmakehään enemmän hiilidioksidia, mitä kasvit, levät ynnä muut yhteyttävät eliöt ja meret ennättävät sitoa. Kohonnut hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä aiheuttaa kasvihuoneilmaston, jossa maapallolle Auringosta säteilevästä energiasta yhä suurempi osa jää maapallolle, eikä heijastu avaruuteen. Tämän seurauksena maapallon keskilämpötila nousee, joka aiheuttaa erilaisia sään ääri-ilmiöitä, kuivuutta, merenpinnan nousua, sekä merivirtojen häiriintymistä. Maailman monet tiheimmistä asutuskeskuksista ja tärkeimmistä ruuantuotantoalueista sijaitsevat rannikkoalueilla, joten merenpinnan nouseminen aiheuttaa suuria riskejä.

Jotta maapallon olosuhteet eivät muuttuisi merkittävästi on määritetty raja ilmakehän hiilidioksidi pitoisuudelle, joka on 350 ppm. Vuoden 2009 tilanteessa pitoisuus oli kohonnut 387 ppm:n tilavuusyksikköä kohden. (Nature, 2009, s.473). Tämän työn kirjoitushetkellä hiilidioksidipitoisuus on noussut jo yli 400ppm:n (Scripps institution of oceanography, 2018), joten voidaan todeta, että hiilidioksidipitoisuus on toistaiseksi jatkanut kasvuaan. Tähän ovat syitä yleinen maailmantalouden elpyminen, elintason nousu kehittyvissä maissa ja teollisen tuotannon lisääntyminen. Erityisesti Aasiassa kehitys on ilmaston kannalta huolestuttavaa. Kiinassa ollaan jo havahduttu hiilen polton ongelmiin, mutta hiilivoimaloita tullaan vielä rakentamaan lisää ennen kuin päästöjen kasvun on suunniteltu taittuvan vuonna 2030. Intia nostaa jatkuvasti hiilen kulutustaan, kuten myös Kaakkois-Aasian maat, kuten Indonesia ja Vietnam. Tästä johtuen maailman hiilen kulutuksen ennakoitaan nousevan 2020-luvulla huippuunsa, jonka jälkeen kulutus tasaantuu. (EIA, 2017, s.63)

Johtuen ilmastonmuutoksen aiheuttamasta uhasta maapallon biosfäärille ovat maailman valtiot solmineet ilmastopöytäkirjoja, joilla tavoitellaan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä ja ilmastonlämpenemisen pysäyttämistä 2 asteeseen, jota pidetään tällä

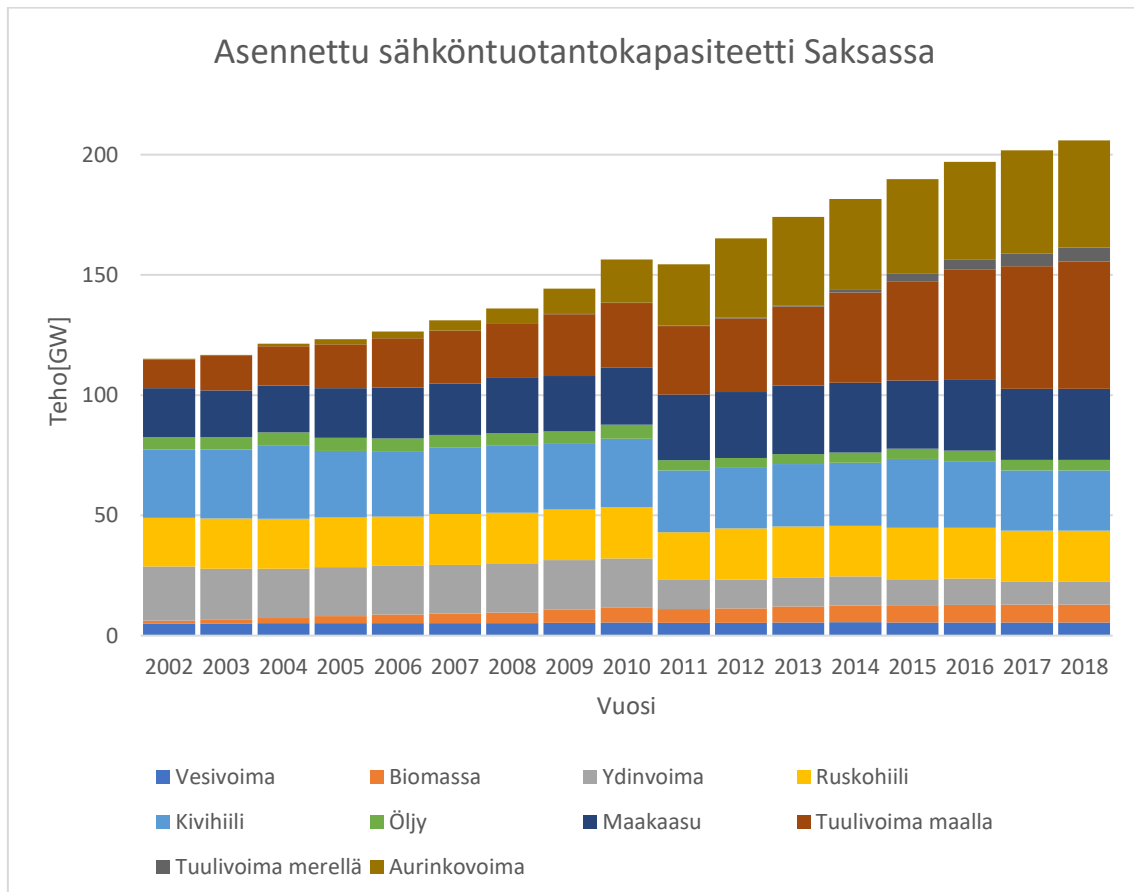
hetkellä vaarallisen lämpenemisen rajana. Viimeisin sopimuksista oli 2016 allekirjoitettu Pariisin ilmastopöytäkirja (YK,2015, s.3), jolla tavoitellaan lämpenemisen pysäyttämistä 1,5 asteeseen. Sopimusta on pidetty merkittävänä, koska ensimmäistä kertaa sopimukseen on sisällytetty konkreettisia päästövähennystavoitteita ja sopimuksen on allekirjoittanut merkittävä osa maailman valtioista.

2.2 Energiamurros

Energiamurroksella tarkoitetaan muutosta, joka käynnistyi kasvaneesta huolesta ympäristön tilasta, erityisesti ilmastonmuutoksesta. Taustalla vaikuttavat myös huolet fossiilisten polttoaineiden polttamisesta ja louhinnasta aiheutuvat terveyshaitat niin kehitysmaissa, kuin kehittyneissäkin maissa. Energiamurrosta on lähdetty voimakkaimmin toteuttamaan Saksassa, jossa päätettiin vuonna 2011 Fukushima ydinonnettomuuden jälkeen luopua sekä ydinvoimasta, että fossiilisista polttoaineista ja luoda uusi vähähiilinen ja uusiutuviin energiantuotantomuotoihin pohjautuva energiajärjestelmä. Saksan talous- ja ympäristöministeriöiden tuottamassa selvityksessä todetaan, että uudessa järjestelmässä avainasemassa olisi erityisesti tuulivoiman tuotannon lisääminen, sekä energiatehokkuuden parantaminen. Taloudellinen ponnistus on huomattava. Kokonaiskustannusten on arvioitu nousevan jopa 520 miljardiin vuoteen 2025 mennessä. (DICE, 2016, s.51)

Uuden energiajärjestelmän kantavana voimana on ollut uusiutuvien energiantuotantomuotojen nopeasti ja merkittävästi alentuvat kustannukset. Merkittävintä tämä kehitys on ollut aurinko- ja tuulienergian kohdalla. Kuvasta 1 voidaan lukea Saksaan asennetun sähköntuotantokapasiteetin kehitys 2000-luvulla. Kuvasta käy hyvin ilmi vuonna 2009 alkanut nopea tuuli- ja aurinkovoimakapasiteetin kasvu. Vuonna 1974 aurinkopaneelien asennuskustannus oli yli 74 \$/W ja 2014 noin 0,70\$/W. (Brown, 2017, s.97) Myös tuulivoiman asennuskustannukset ovat laskeneet huomattavasti. Erityisesti tuulivoiman kohdalla asennetun kapasiteetin kasvu on myös ollut nopeaa, viimeisen kymmenen vuoden aikana jopa 20% vuodessa. Vuonna 2014 tuulivoiman globaalisti asennettu kapasiteetti oli aurinkovoimaan verrattuna noin nelinkertainen. (Brown, 2017, s. 119) Tuulivoiman nopeaa rakentamista ovat edesauttaneet monissa maissa käyttöön otetut syöttötariffi järjestelmät, joissa valtio takaa tuulivoiman tuottajille tietyn hinnan tuotetulle energialle. Suomessa on myös käytössä tariffijärjestelmä, joka

takaa tuottajalle sähkön hinnaksi 83,5 €/MWh. (Finlex, 2010, 23§) Syöttötariffijärjestelmä on herättänyt laajasti suursijoittajien kiinnostusta, joka on taannut tuulivoimakapasiteetin nopean kasvun. Toisaalta tariffijärjestelmä on saanut osakseen kritiikkiä, koska se tarjoaa sijoittajalle käytännössä riskittömän tulonlähteen, vaikka tuulivoimaan, kuten myös aurinkovoimaan liittyy ongelmia, joita avataan seuraavaksi.



Kuva 1 Saksan asennetun sähköntuotantokapasiteetin kehitys 2000-luvulla. (Fraunhofer,2018)

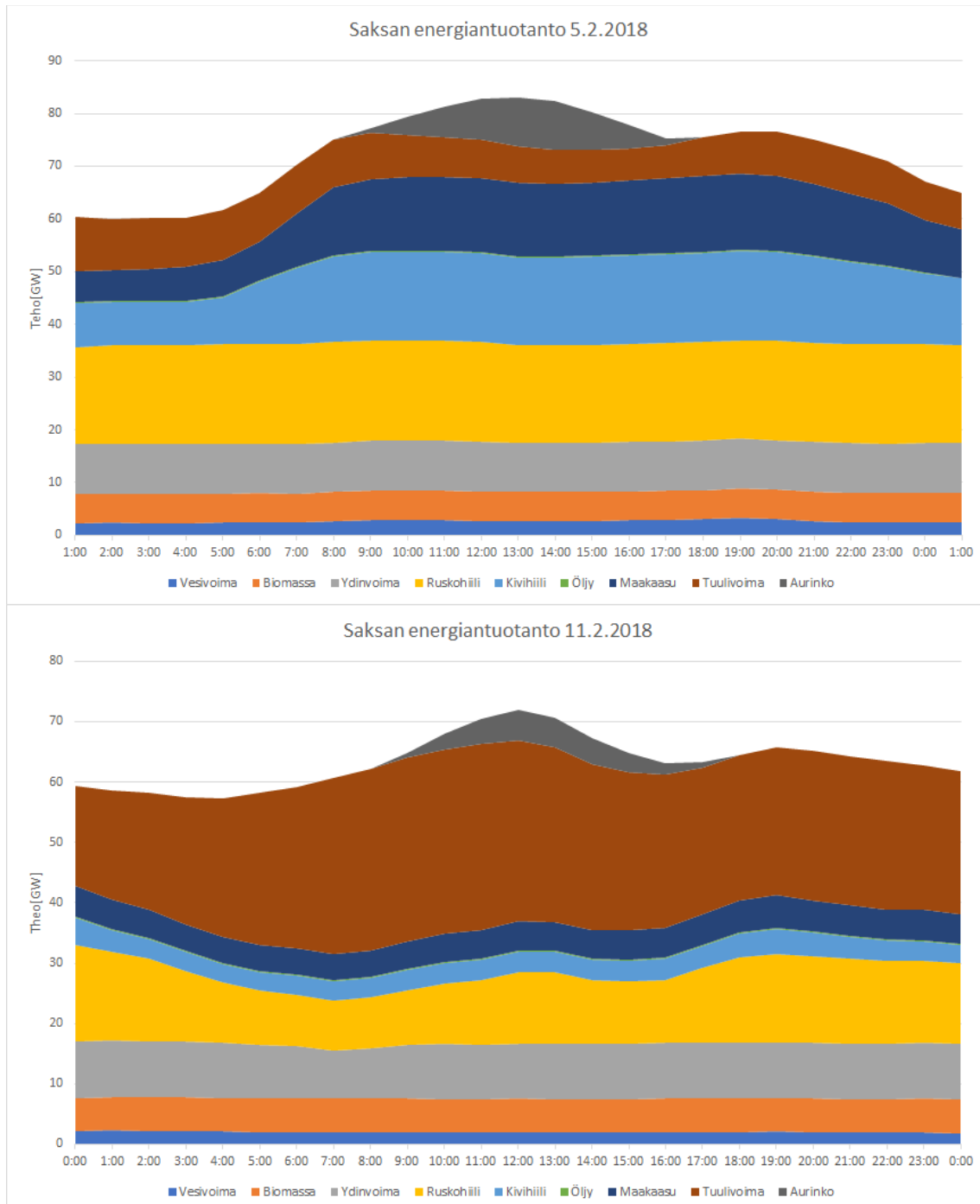
Tuuli- ja aurinkovoimalat saavat energiansa Auringosta. Aurinkopaneelit hyödyntävät suoraan fotonien liike-energiaa puolijohteiden avulla, joista fotonien törmäyksessä irtoavat elektronit saavat aikaa sähkövirran. Tuulivoimalat taas keräävät ilmavirtojen liike-energiaa. Ilmavirrat syntyvät Auringon aiheuttamista ilma- ja vesimassojen lämpötilaerojen tasaantumisesta. Johtuen Maapallon pyörimisliikkeestä Auringon valoa ei aina ole kuitenkaan saatavilla, joten öisin tai hyvin pilvisinä päivinä aurinkopaneelit eivät tuota sähköä kuin korkeintaan osan huipputehostaan. Päivän ja yön vaihtelut ovat kuitenkin helposti ennustettavissa, kuten myös pilvisuus. Tuulen kohdalla tilanne on

kuitenkin vaikeampi, sillä tuulen muutosten tarkka ennustaminen on edelleen haastavaa. Suomessa tuulivoiman ongelmia lisää se, että tuulettomat ajanjaksot painottuvat keskitalven pakkasjaksolle, jolloin sähkön kulutus on myös huipussaan. Tästä esimerkkinä sähkönkulutusennätys 7.1.2016, jolloin kantaverkon kulutushuippu oli 15 105MWh/h. (Fingrid, 2016) Kulutushuipun aikaan tuulivoiman tuotannon keskiarvo oli 134MWh/h, joka on noin 12% tuolloin asennetusta tuulivoiman tehokapasiteetista. (STY, 2016)

Edellä mainittujen haasteiden vuoksi tarve nopeasti kulutuksen ja tuotannon mukaisesti säädettävälle energiantuotannolle on kasvanut, koska mikäli huipunkäytön aikaan aurinko- tai tuulivoimaa ei ole saatavilla, täytyy tuotantoa korvata toisilla energianlähteillä. Mitä käytettävät energiantuotantomuodot ovat, riippuu suuresti käytettävissä olevista energianlähteistä. Esimerkiksi Norjassa ja Ruotsissa on saatavilla runsaasti rakennettua vesivoimaa. Vesivoima soveltuu hyvin säätövoimaksi, joten Pohjoismaissa tavallisinta säätövoimaa on vesivoima. Toisaalta uuden vesivoimakapasiteetin rakentaminen on hankalaa osin taloudellisista ja ympäristöllisistä syistä ja osittain siksi, että kapasiteettia ei ole merkittävästi saatavilla ilman esimerkiksi tekoaltaiden rakentamista. Maailmalla on suunniteltu joitain merkittäviä vesivoima hankkeita, mutta näihin hankkeisiin liittyvät myös edellä mainitut ongelmat. Sähköenergian varastointia on myös esitetty ratkaisuksi, mutta toistaiseksi teknillistaloudellisesti kestävä ja universaalisti sovellettavaa ratkaisua varastoinnin tarpeeseen ei ole.

Saksassa vuonna 2018 ollaan tilanteessa, jossa sähköverkon kulutus ja tuotanto tasataan hiililauhdetuotannolla. Mitä tämä tarkoittaa käytännössä käy ilmi kuvasta 2. Kuvasta huomataan miten helmikuun kylminä aikoina tuulta ei suurimman osan ajasta ole ollut saatavilla ja peruskuorma on täytynyt tuottaa muilla keinoin, lähinnä hiililauhteella. Toisaalta voidaan myös huomata tuulivoiman tuotannon lisääntyessä viikonloppuna kivihiihi- ja kaasutuotannon vastaavasti joustavan. Ruskohiilellä, ydinvoimalla tai biomassalla ei säädetä samassa mittakaavassa vaan niillä pyritään tuottamaan peruskuormaa. Pyrkimystä käyttää ruskohiiltä selittää ruskohiilen vahva kotimaisuusaste. Saksa on maailman suurin ruskohiilen tuottaja 17% globaalilla tuotanto-osuudellaan, kun

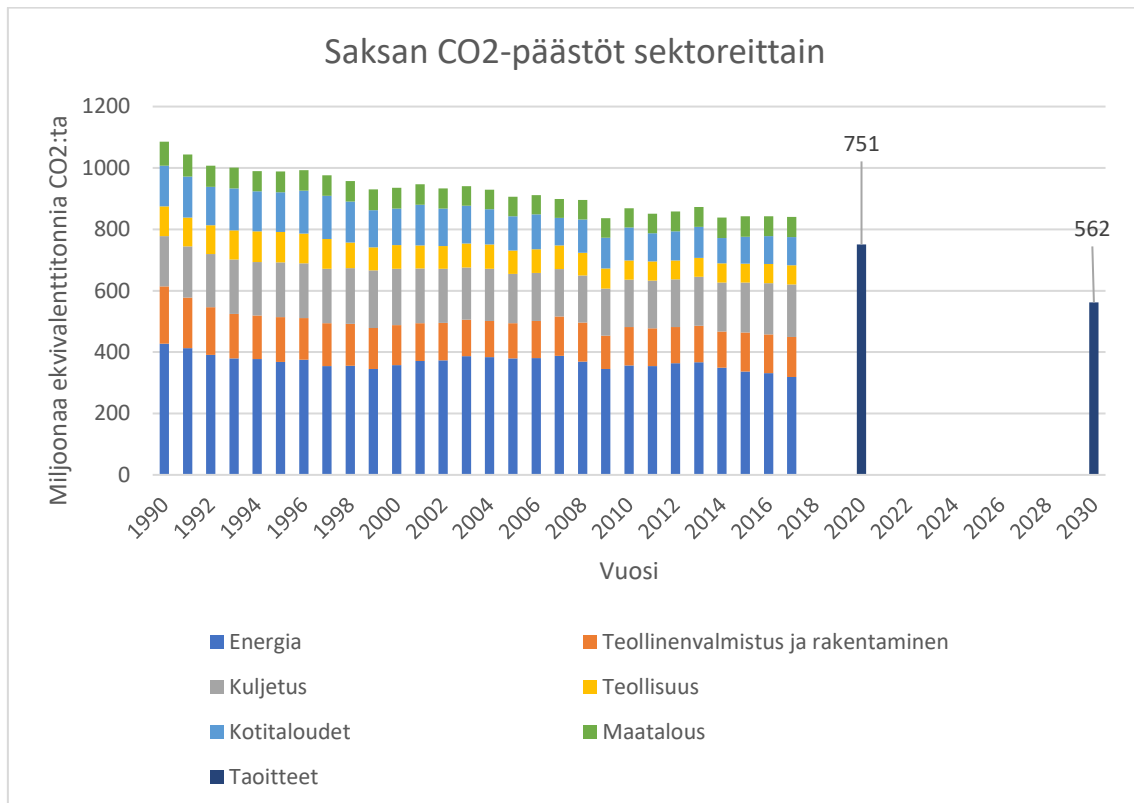
taas maakaasu ja kivihiihi ovat suurimmaksi osaksi tuontipolttoaineita. (Statistisches Bundesamt, 2018, s.7) Tilannetta voidaan verrata puupolttoaineiden käyttöön Suomessa.



Kuva 2 Saksan sähköntuotanto vuonna 2018 viikolla 6. Tuotanto on jaettu tuotantomuodoittain ja kuvasta erottuvat vuorokausien väliset vaihtelut. (Fraunhofer, 2018)

Johtuen hiilen runsaasta käytöstä Saksan energiasektori ei ole onnistunut merkittävästi vähentämään päästöjä vuoden 2009-tasosta, miljardien panostuksista huolimatta, kuten

kuvasta 3 voidaan havaita. Vuonna 2009 energiasektorilla syntyi 345 Mt/CO₂:ta ja 2019 317 Mt/CO₂:ta. Päästöjen lasku on liian vähäinen kattamaan teollisentuotannon ja logistiikan päästöjen kasvun, joten kokonaispäästöjen laskeminen jää vähäiseksi. Energiasektorin ollessa suurin yksittäinen päästöjen aiheuttaja, olisi siellä tärkeää saada aikaan merkittäviä alennuksia kansallisiin tavoitteisiin pääsemiseksi.



Kuva 3 Saksan kasvihuonekaasupäästöt sektoreittain. Merkillepantavaa energiasektorin vähäinen päästöjen alentuminen ja toisaalta kuljetussektorin päästöjen kasvu. Kuvassa myös vuosien 2020 ja 2030 tavoitteet kokonaispäästöille. (CLEW, 2018)

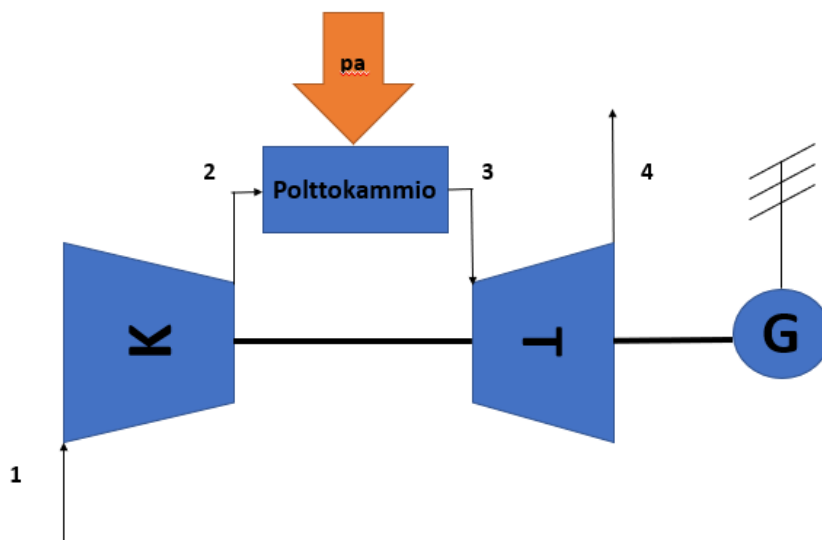
Kasvava tuuli- ja aurinkoenergian tuotanto vaatii siis jonkinlaisen nopeasti säädettävän, vähäpäästöisen ja aina saatavilla olevan varaenergianlähteen ajanjaksoille, jolloin tuulta tai auringonvaloa ei ole saatavilla riittävästi. Luonnon-olojen nopeat muutokset eivät ole ainoa uhka vaan myös voimaverkkojen häiriöt saattavat aiheuttaa paikallisia energiakatkoksia, joiden aikana tarvitaan paikallista tuotantoa. Tällaisen hajautetun tuotannon eduksi voidaan laskea keskitettyä tuotantoa korkeampi toimintavarmuus poikkeusolosuhteissa.

3 KAASUTURBIINIT JA POLTTOMOOTTORIT

Tässä osiossa tarkastelemme kaasuturbiinien ja polttomoottorien tekniikkaa ja pyrimme toteamaan keskeisimmät erot käytettävyyden kannalta ja pohdimme tekniikoiden mahdollisuuksia sekä maailmalla, että Suomessa. Kaasuturbiinit ja polttomoottorit ovat teknisiltä ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia teknisiltä ratkaisuiltaan, mutta niitä käytetään usein vastaaviin tarkoituksiin.

3.1 Kaasuturbiinit

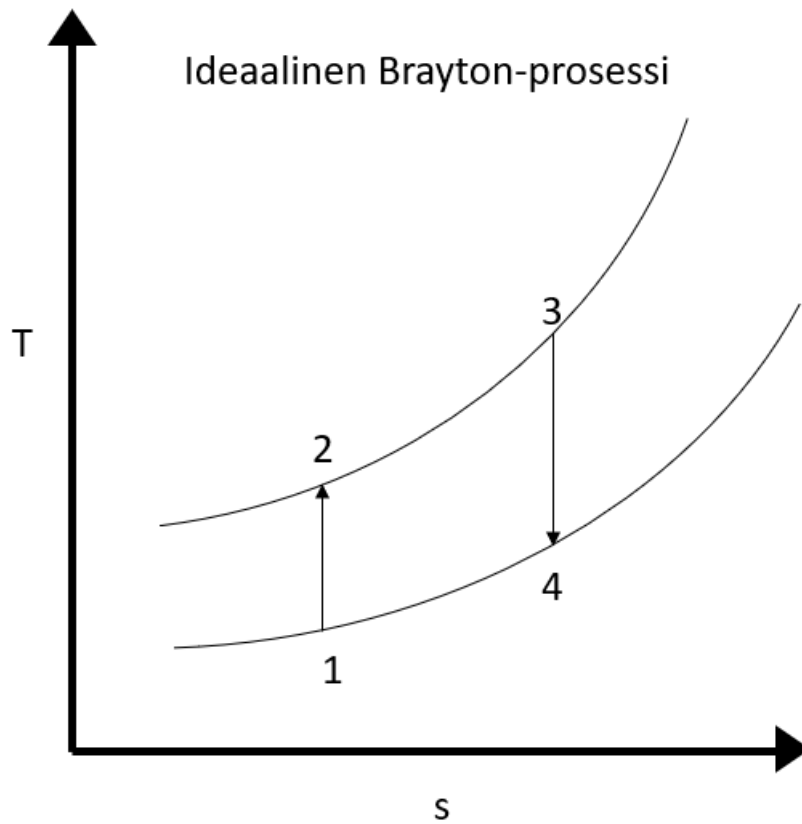
Kaasuturbiinilla tarkoitetaan lämpövoimakonetta, jossa turbiinia pyöritetään kuumilla savukaasuilla. Turbiinin tuottama mekaaninen energia voidaan käyttää sellaisenaan tai muuntaa generaattorilla sähköksi. Johtuen kaasuturbiinien hyvästä teho-paino suhteesta ovat ne yleisiä esimerkiksi lentokoneiden, laivojen ja panssarivaunujen voimanlähteinä. Kaasuturbiinien historia on jo satoja vuosia vanha, ensimmäinen kaasuturbiini patentoitiin vuonna 1791 John Barberin toimesta ja ensimmäinen nettotehoa tuottanut kaasuturbiini rakennettiin 1903. (Huhtinen et.al, 2008, s.204) Kaasuturbiiniprosessi on esitetty kuvassa 4.



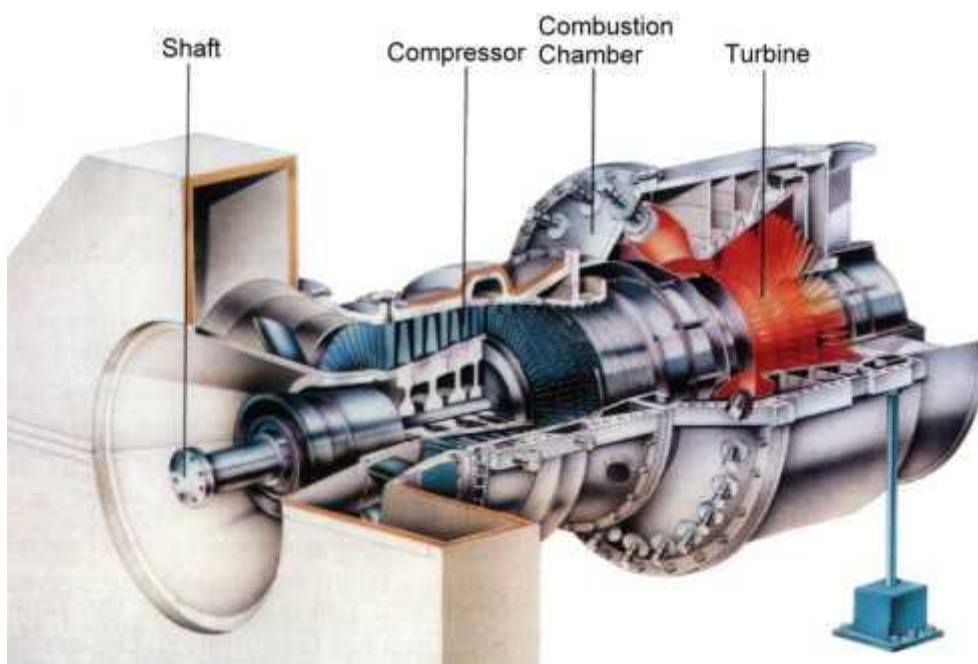
Kuva 4 Kaasuturbiiniprosessi. Pisteessä 1 kompressoriin tuleva ilma, pisteessä 2 paineistettu ilma menee polttokammioon, pisteessä 3 kuumat savukaasut ja yli-ilma menevät turbiiniin ja pisteessä 4 savukaasut menevät savupiippuun. K tarkoittaa kompressoria, T turbiinia ja G generaattoria.

Kaasuturbiinien etu verrattuna perinteiseen höyryvoimalaitokseen on se, että kuumien savukaasujen tuottama lämpö voidaan ottaa talteen ja hyödyntää suoraan. Näin säästetään vesihöyrypiirin valmistuskustannukset ja vaativa tila. Toisaalta kaasuturbiinien savukaasujen mukana hukataan paljon lämpöä. Savukaasujen lämpötila turbiinin jälkeen on tyypillisesti yli 450 celsius astetta (Huhtinen et.al, 2008, s208). Mikäli turbiinin jälkeisten savukaasujen lämpö kyetään keräämään talteen ja hyödyntää höyryvoimalaitosprosessissa, voi kokonaishyötysuhde nousta sähköntuotannossa yli 50% ja yhteistuotannossa jopa yli 90%. Prosessia, jossa on yhdistetty kaasuturbiini ja höyryprosessi, kutsutaan kombiprosessiksi. Esimerkiksi Helen Oy:n Vuosaaren voimalaitos on kombivoimalaitos, joka tuottaa sähköä sekä kaukolämpöä Helsingin kaupungille. (Helen, 2018)

Kaasuturbiinissa ympäristöstä otetun ilman paine nostetaan kompressorissa. Teollisen mittakaavan kaasuturbiineissa on yleensä aksiaalikompressorit, mutta pienessä mittakaavassa radiaalikompressorit ovat yleisempi ratkaisu. Kompressorin jälkeen polttokammiossa korkeapaineisessa ilmassa poltetaan polttoaine, jolloin saadaan korkeassa paineessa ja lämpötilassa olevaa savukaasun ja ilman seosta. Tämä kaasuseos johdetaan turbiiniin, jossa seos paisuu ja paisunnan tekemä työ muuttuu turbiinin akselin pyörimisliikkeeksi. Kaasuturbiinissa kompressorit ja turbiini ovat yleensä samalla akselilla, kuten kuvasta 6 voidaan nähdä, joten osa turbiinissa saadusta työstä kuluu kompressorin tekemänä työnä. Kaasuturbiinin käynnistyksessä työ voidaan tehdä erillisellä sähkö- tai polttomootorilla. Kaasuturbiinien ideaalinen malli on Brayton prosessi, joka on esitetty T,s-tasossa kuvassa 5. Ideaalisessa prosessissa kompressorin puristukseen tai turbiinissa tapahtuvaan paisuntaan ei liity häviöitä.



Kuva 5. Ideaalinen Brayton-prosessi T,s-tasossa esitettyä. Välillä 1-2 tapahtuu palamisilman puristus kompressorissa, välillä 2-3 polttoaineen palaminen ja välillä 3-4 savukaasujen paisuminen turbiinissa. (NASA, 2015)



Kuva 6 Kaasuturbiini avattuna. Kuvassa erottuu kaasuturbiinin akseli, jolle on kiinnitetty sekä kompressor, että turbiini. Näiden välissä sijaitsee polttokammio. (Wärtsilä, 2018)

Kaasuturbiinin hyötysuhdetta on mahdollista parantaa jakamalla puristus kahteen tai useampaan vaiheeseen ja asentamalla kompressorien väliin jäähdytin. Viileän ilman puristamiseksi tehtävä työ on lämmintä ilmaa pienempi, joten kaasuturbiinin nettotyö kasvaa. Turbiinin jälkeisten savukaasujen lämpöä voidaan vastaavasti hyödyntää kompressorin ja polttokammion välillä palamisilman lämmitykseen, joka nostaa keskimääräistä tuotua lämpöä ja parantaa palamisen hyötysuhdetta.

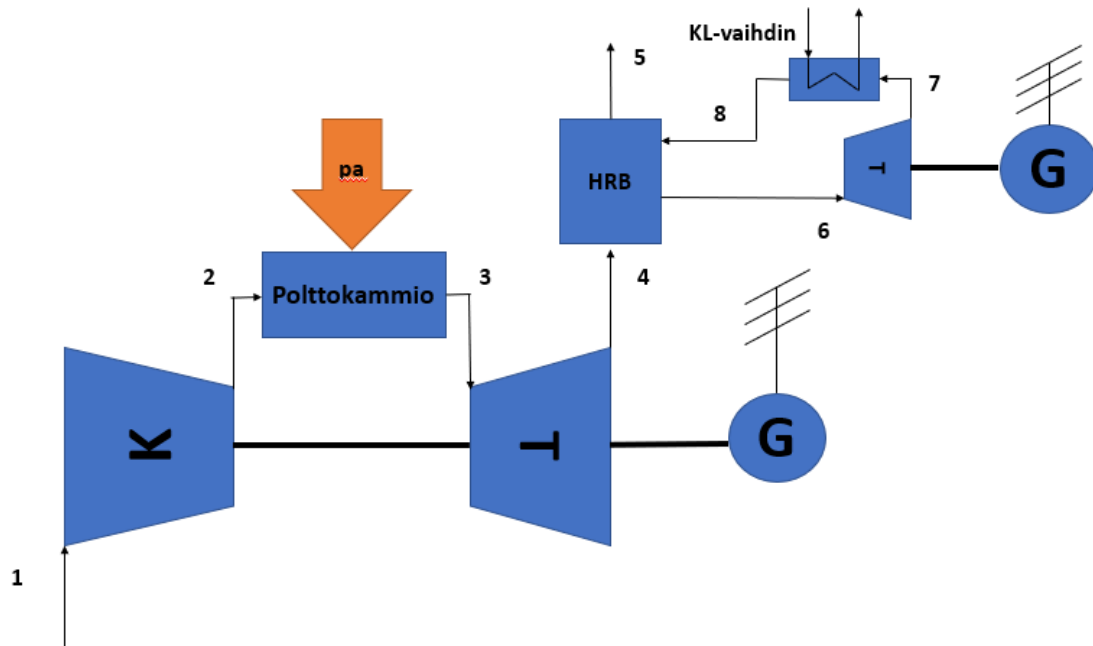
Kaasuturbiinien yksinkertainen rakenne mahdollistaa alhaiset rakennuskustannukset tehoyksikköä kohden verrattuna perinteiseen höyryvoimalaitokseen, kuten esimerkiksi ydinvoimalaan. Kaasuturbiinin käyttökustannuksista suurimman osan muodostavatkin polttoainekustannukset, esimerkiksi maakaasun hinta, joka on huomattavasti korkeampi, kuin esimerkiksi kivihiilen tai puupolttoaineiden. Suomessa käytettyjen voimalaitospolttoaineiden toteutuneen hintakehityksen perusteella voidaan maakaasun todeta olevan noin kaksi kertaa kalliimpaa verrattuna turpeeseen tai hiileen. (Tilastokeskusta, 2018) Tilanne saattaa päästöjen verotuksen kehittyessä kuitenkin muuttua maakaasulle otollisemmaksi. Mahdolliset LNG terminaalihankkeet tulevaisuudessa saattavat lisääntyneen kilpailun myötä myös vaikuttaa hintaan alentavasti.

Maakaasun edut polttoaineena ilmaston ja terveysvaikutusten kannalta ovat puhdas palaminen ja alhaiset rikkidioksidi (SO₂) päästöt. Suomessa käytetään pääosin venäläistä maakaasua, jonka metaanipitoisuus (CH₄) on hyvin korkea, jopa 98% ja loput 2% on pääasiassa typpeä (N₂) ja raskaampia hiilivetyjä. Näin hyvälaatuisesta maakaasusta ei synny juurikaan typenoksideja (NO_x) tai rikkioksideja (SO₂), toisin kuin huonompilaatuisesta kaasusta. Alhainen rikkipitoisuus vähentää laitteiston korroosiota. Maakaasusta ei myöskään synny hiukkaspäästöjä tai tuhkaa. Tämän vuoksi siirryttäessä esimerkiksi kivihiilen poltosta maakaasun polttoon saavutetaan lähialueilla usein parantunut ilmanlaatu. Savukaasujen puhtauden vuoksi niitä ei myöskään tarvitse suodattaa erillisillä savukaasujen suodattimilla, joka alentaa edelleen investointikustannuksia verrattuna esimerkiksi kivihiiiltä tai kiinteitä biopolttoaineita polttavaan laitokseen.

3.1.1 Erilaisia laitoksia

Kaasuturbiini tarjoaa lukuisia kytkentävaihtoehtoja riippuen käyttötärpeesta. Yksinkertaisin kytkentä on kaasuturbiini, joka on kiinnitetty generaattoriin. Tällaisella lauhdetuotannolla saavutetaan maksimissaan 36% hyötysuhde, joka vastaa höyryvoimalaitoksen tyypillistä hyötysuhdetta pelkässä sähköntuotannossa. Tällaiset voimalaitokset imevät puristettavan ilman ympäristöstä ja puhaltavat savukaasut taivaalle ilman lämmöntalteenottoa. Tällaisessa kytkennässä hukataan huomattava osa polttoaineen sisältämästä energiasta, joka nostaa polttoainekustannuksia. Toisaalta yksinkertainen rakenne mahdollistaa nopean ylös- ja alasajon, eikä sen tehon säädössä tarvitse huomioida esimerkiksi lämmön tarvetta. Kytkentä on tyypillinen esimerkiksi varavoimaloissa, joita ei ajeta kuin poikkeustilanteissa.

Suomen oloissa lämmöntalteenotto savukaasuista on kiinnostava mahdollisuus, koska lämmitystarve talvisin on huomattava. Lämmöntalteenotto toteutetaan yleensä erillisellä lämmöntalteenottokattilalla, jossa kaasuturbiinilta saapuvat savukaasut virtaavat keittoputkiston läpi ja talteen saatu lämpö siirretään kaukolämpöverkkoon. Höyryprosessiin on mahdollista liittää myös höyryturbiini, jolla voidaan nostaa sähköntuotantokapasiteettia ja prosessin hyötysuhdetta. Tällainen kaasuturbiinin ja chp-höyryvoimalaitoksen yhdistelmä on käytössä Helsingin energian Vuosaaren voimalaitoksessa, joka tuottaa maakaasusta sähköä ja lämpöä Helsingin kaukolämpöverkkoon. Kuvassa 8 on esitelty tällaisen laitoksen prosessikaavio.



Kuva 7 Kombiprosessi, jossa kaasuturbiiniin on liitetty lämmön talteenottokattila (HRB), höyryturbiini ja kaukolämpövaihdin. Höyryprosessissa kiertoaineena on vesi ja tämä pätee pisteissä 6-8.

Lämmöntalteenottokattila on rakenteeltaan hyvin samanlainen kuin muutkin höyrykattilat, sillä erotuksella, että kattilassa ei tapahdu palamista. Kaasuturbiinissa tapahtuvan palamisen korkeasta ilmakertoimesta johtuen savukaasuissa on jäljellä huomattavasti happea, joten erityisesti sähköntuotannossa niin sanottu jälkipoltto on mahdollinen ratkaisu höyryprosessin hyötysuhteen parantamiseksi. Jälkipoltolla tarkoitetaan polttamista, joka tapahtuu varsinaisen kaasuturbiiniprosessin jälkeen hyödyntäen savukaasuissa jäljellä olevaa happea. Tyypillinen ratkaisu jälkipolttoon on poltinpoltto, mutta maailmalla on myös toteutettu kombivoimalaitoksia, joissa kaasuturbiini on yhdistetty olemassa olevaan kattilavoimalaitokseen. Tällaisessa ratkaisussa kaasuturbiinin savukaasut johdetaan polttokattilaan, jossa niiden lämpö saadaan talteen. Ratkaisu on kuitenkin harvinainen johtuen korkeista kustannuksista.

3.1.2 Vuosaaren voimalaitos

Helsingin energian omistama ja operoima Vuosaaren voimalaitos on tyypillinen esimerkki kombivoimalaitoksesta. Laitoksessa on kaksi yksikköä A ja B, jotka molemmat koostuvat kahdesta kaasuturbiinista ja lämmöntalteenottokattilasta. Vuosaari B on laitoksista uudempi ja suurempi tuottaen 2000-luvulla tehtyjen modernisointien jälkeen

sähköä 487 MW sähköntuotantohyötysuhteen ollessa 49%. Vuosaari A:n sähköteho on 165 MW. Voimalaitos tuottaa sähköä valtakunnan verkkoon ja kaukolämpöä Helsingin kaukolämpöverkkoon käyttäen polttoaineena maakaasua. Laitoksen erikoispiirteisiin kuuluu kuvassa 9 näkyvä kaukolämpöakku, jolla on mahdollistaa lämmön kysynnän ja tarjonnan tasaamisen kaukolämpöverkossa ja toimii myös varalämmönlähteenä poikkeustilanteissa. Lämpöakun kapasiteetti on noin 1250MWh. (Helen, 2017, s.5)



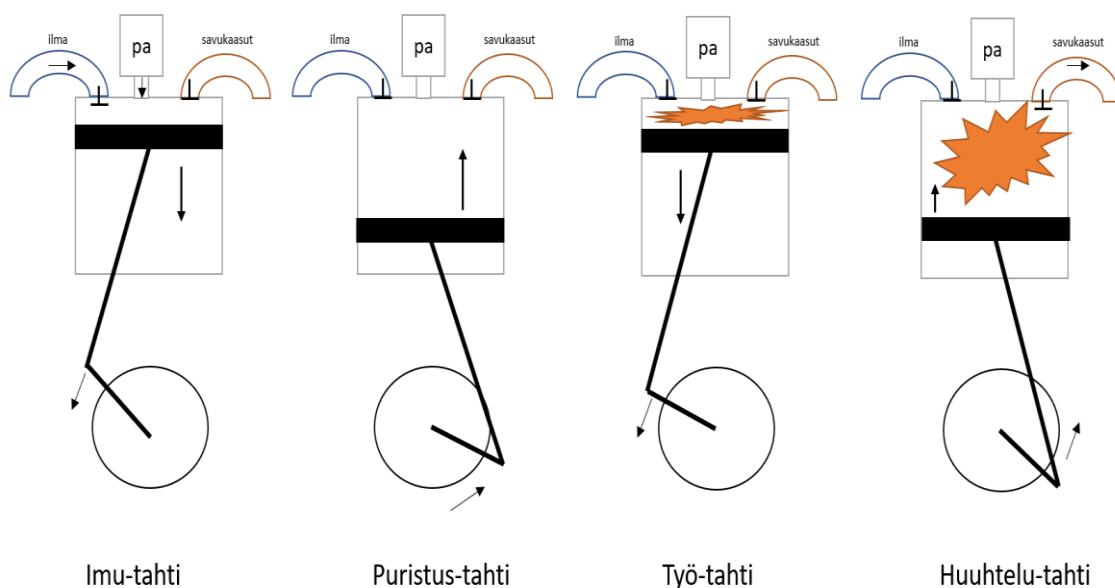
Kuva 8 Helsingin energian Vuosaaren voimalaitos. Kuvassa savupiipuista vasemmalle näkyvä harmaa säiliö on kaukolämpövesiakku, jolla tuotantoa voidaan tarvittaessa tasata. (Helen, 2016)

3.2 Moottorivoimalaitokset

Moottorivoimalalla tarkoitetaan voimalaitosta, jossa polttomoottorilla pyöritetään generaattoria. Moottorivoimaloita on käytetty pääasiassa syrjäisten alueiden, kuten kaivosten, saarien ja laivojen energiantuotantoon tai varavoiman lähteenä. Energiamurroksen myötä niiden mahdollisuudet esimerkiksi säätövoiman tuotannossa ovat herättäneet kiinnostusta ja suuremmat moottorivoimalaitokset ovat yleistyneet. Moottorivoimalaitokset rakennetaan yleensä moduuleista kytkemällä useampi moottori

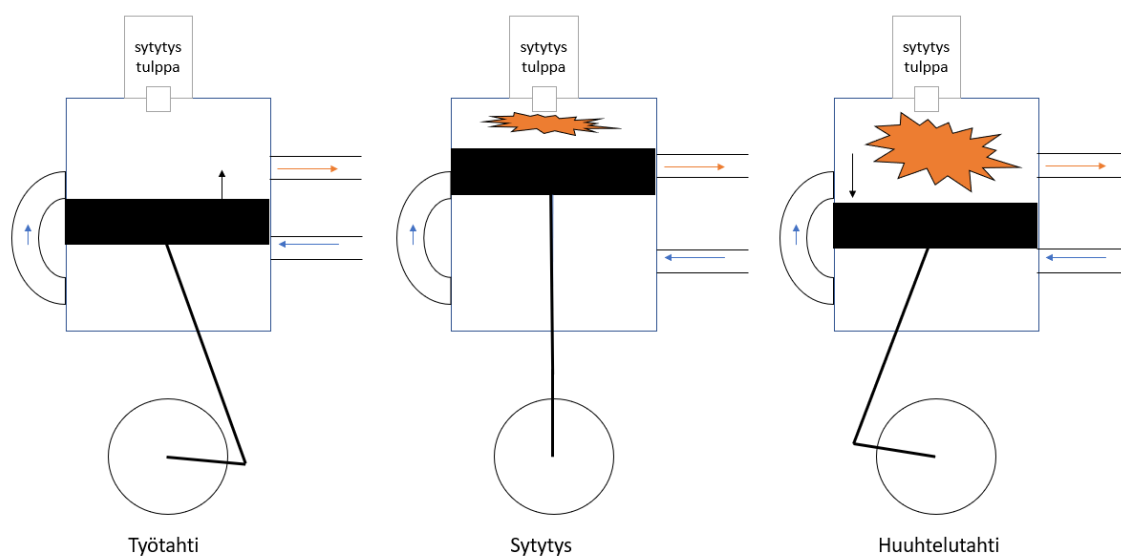
rinnakkain. Yksittäisen moottorin teho vaihtelee yleensä välillä 1-20MW. Suurempiakin laitoksia on rakennettu, mutta nämä ovat harvinaisia.

Polttomoottorin toiminta perustuu polttoaineilmaseoksen palamiseen korkeassa paineessa moottorin sylinterissä. Palaminen on räjähdysmäistä ja laajentuvan kaasun tekemä työ saa aikaan männän liikkeen. Sekä polttomoottori, että kaasuturbiini perustuvat siis savukaasujen suoraan hyödyntämiseen ilman erillistä vesikiertoa. Mäntä on kiinnitetty kampiakseliin, joka voidaan kiinnittää generaattoriin tai hyödyntää sellaisenaan. Polttomoottoreita jaetaan ryhmiin sen mukaan, miten monta vaihetta tai tahtia kuuluu tähän palamistapahtumaan. Polttomoottorit ovat yleensä 2- tai 4-tahtisia. 4-tahti moottorin tahtit ovat imu, puristus, työ ja huuhtelu. Imutahtissa männän alasuuntainen liike aukaisee imuventtiilin, josta ilma-polttoaineseos virtaa alipaineiseen palotilaan. Puristusvaiheessa palamisilma puristetaan korkeaan paineeseen nousevan männän toimesta, jota seuraa työvaihe, jossa sytytystulppa sytyttää seoksen. Sytytyksestä seuraavan räjähdys aiheuttama paineen nousu työntää männän alas. Pakokaasujen poistossa nouseva mäntä pumppaa pakokaasun avautuneen pakokaasuventtiiliin kautta pois palotilasta, jonka jälkeen sama prosessi toistuu. 4-tahti periaatteella toimivan polttomoottorin työtahdit on esitetty kuvassa 10.



Kuva 9 4-tahti moottorin työvaiheet järjestyksessä vasemmalta oikealle: imu, puristus, työ ja huuhtelu. Lyhenne pa tarkoittaa polttoainetta ja se syötetään imu tahdin aikana sylinteriin.

Toisessa vaihtoehdossa eli 2-tahti moottorissa käyntivaiheet ovat työ ja huuhtelu. Työvaiheessa mäntä liikkuu ylöspäin ja puristaa ilma-polttoaineseoksen korkeaan paineeseen. Samaan aikaan männän alapuolella syntyvä alipaine imee uuden seoksen sylinteriin. Männän yläasennossa sytytystulpan kipinä sytyttää seoksen, jonka jälkeen mäntä laskee alas paljastaen poistoaukon sylinterin kyljessä, josta savukaasut pääsevät pois. Kuvassa 11 on esitetty moottorin toimintaperiaate. Nykyään 2-tahtimoottoreita käytetään lähinnä pienissä koneissa, mutta poikkeuksena ovat laivat, joissa 2-tahti moottorin edut eli kokoon nähden hyvä teho ja hyvä hyötysuhde ovat hyödyllisiä. Esimerkiksi Wärtsilän valmistama RTA96-C moottori (kuva 10), joka on käytössä yhdessä nykyajan suurimmista laivoista Emma Maerskissa. Moottori painaa 2300 tonnia ja tuottaa maksimissaan 80MW:n tehon. Moottorin hyötysuhde on jopa 50%, eli puolet polttoaineen kemiallisesta energiasta saadaan talteen.



Kuva 10 2-tahti moottorin käyntivaiheet.



Kuva 11 Emma Maerskin moottori, Wärtsilä RTA96-A, on maailman suurin polttomoottori. Moottorin mittasuhteet erottuvat työntekijöiden avulla. (Emma-Maersk, 2018)

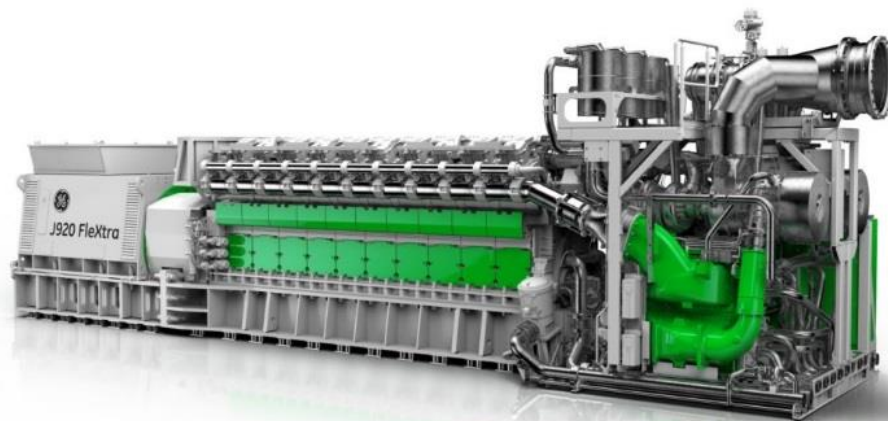
Polttomoottorit, kuten kaasuturbiinitkin, käyttävät nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita. Nestemäisiin polttoaineisiin kuuluvat raskas- ja kevyt polttoöljy, bensiini, diesel, sekä erilaiset bioöljyt ja alkoholit. Erityisesti bioöljyt ja biodiesel ovat kiinnostavia polttoaineita, koska ne voidaan laskea uusiutuviksi polttoaineiksi ja tietyin varauksin myös päästöiltään neutraaleiksi. Suomeen on suunnitteilla useita moderneja biojalostamoita, joissa puusta jalostettaisiin uusiutuvaa dieseliä ja etanolia. (Raunio, 2017) Puun lisäksi esimerkiksi palmuöljy on mahdollinen uusiutuvan polttoaineen raaka-aine. Myös kaasukäyttöisiä moottoreita on olemassa, joissa polttoaine on yleensä maakaasu ja joissain kohteissa myös biokaasu. Biokaasu polttoaineena yleistyy tulevaisuudessa pyrittäessä eroon fossiilisista polttoaineista. Nykyään biokaasua tuotetaan merkittävässä määrin maatalous- ja yhteiskuntajätteistä mädättämällä. Euroopassa biokaasulla toimivaa sähköntuotantokapasiteettia oli vuonna 2016 yhteensä 9 985 MW. (European Biogas Association, 2017)

Moottorivoimaloiden moottorit ovat tyypillisesti otto- tai dieselmoottoreita. Moottorityyppien erot liittyvät polttoaineensyöttöön ja käyttöpaineisiin. Dieselmoottorissa polttoaine syötetään palokammioon suoraruiskutuksella ja moottorin

tehoa säädellään muuttamalla syötetyn polttoaineen määrää. Dieselmootoreissa syöttöpaineet ja palamislämpötilat ovat tyypillisesti korkeampia, kuin ottomootoreissa. Johtuen korkeista palamislämpötiloista dieselmootorien savukaasuihin muodostuu typenoksideja (NO_x) jotka ovat ihmiselle haitallisia. NO_x-päästöjä on mahdollista vähentää ammoniakkiin (NH₃) perustuvalla poistolaitteistolla, jossa ammoniakin ja typenoksidien reaktio synnyttää pelkistettyä typpeä (N₂) ja vettä (H₂O).

3.2.1 Kielin voimalaitos

Saksassa Kielin kaupungissa otetaan 2018 käyttöön moottorivoimalaitos, joka korvaa olemassa olleen hiilivoimalan. Laitos tuottaa sekä sähköä, että kaukolämpöä Kielin kaupungin kaukolämpöverkkoon. Laitos koostuu 20:stä Jenbacherin valmistamasta 9,5 MW:n kaasumoottorista (kuva 11), jotka yhdessä tuottavat 190MW huipputeholla sähköä. Laitos käyttää polttoaineenaan maakaasua. Laitoksen erikoispiirteisiin kuuluu kaukolämpöakku, joka on vastaava kuin Vuosaaren voimalassa. Lämpöakun maksimikapasiteetti vastaa Kielin 70 000 asukkaan kahdeksan tunnin lämmitystarvetta.



Kuva 12 Jenbacher J920 FleXtra kaasumoottori tuottaa 9,5MW sähköä. Tällaisia moottoreita asennetaan Kielin uuteen voimalaan 20 kappaletta. (Diesel & Gas Turbine Worldwide, 2016)

Kielin voimalaitosta voidaan pitää hyvänä esimerkkinä saksalaisen energiamurroksen mukaisesta modernista energiantuotannosta. Sähköstä suurin osa tuotetaan aurinko- ja

tuulivoimalla ja kun näitä ei ole saatavilla, voidaan moottorivoimalaitos käynnistää minuuteissa täyttämään tehovajetta. Hiilivoimalan korvaaminen kaasukäyttöisillä moottoreilla alentaa Kielin kaupungin rikki- ja typpidioksidi, sekä pienhiukkaspäästöjä merkittävästi. Toisaalta tuontipolttoaineesta riippuvainen laitos ei edistä energiaomavaraisuutta ja polttoaine joudutaan tuomaan pitkän matkan päästä, joka on ympäristön kannalta kyseenalainen ratkaisu.

3.3 Teknologioiden edut ja haasteet

Polttomoottoreiden ja kaasuturbiinien teknisistä eroista huolimatta ne vastaavat samoihin tarpeisiin. Molempien ominaisuudet soveltuvat hyvin vastaamaan kasvavaan säätövoiman tarpeeseen ja soveltuvat myös peruskuorman tuotantoon ja yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon. Tässä osiossa teknologioita vertaillaan tarkemmin keskenään ja todetaan keskeisimmät vahvuudet ja heikkoudet, joita molemmissa teknologioissa on.

Sähköntuotannossa sekä polttomoottorit, että kaasuturbiinit kykenevät höyryprosessia korkeampaan hyötysuhteeseen sähköntuotannossa. Erityisesti polttomoottorit ovat hyvä ratkaisu, mikäli sähköntarve ei ole ympärivuotinen ja tarvetta lämmöntuotannolle ei ole. Esimerkiksi Wärtsilä lupaa kaasu- ja öljyvoimaloilleen jopa 54% hyötysuhteen sähköntuotannossa. Haittapuolena ympärivuotista käyttöä ajatellen polttomoottorien huoltovälit ovat tiheämpiä, joskin huoltaminen on usein helpompaa verrattuna kaasuturbiineihin. Vuosaaren ja Kielin voimalaitoksissa käytössä olevat kaukolämpöakut voivat ainakin osittain ratkaista ongelman, mikäli huoltokatkot onnistutaan ajoittamaan pienen kuorman ajalle. Kaasuturbiinit eivät myöskään kykene vastaavaan sähköntuotannon hyötysuhteeseen, vaan hyötysuhde jää noin 30%, joka vastaa höyryprosessin hyötysuhdetta lauhdetuotannossa. Tilanne kuitenkin muuttuu kaasuturbiinin eduksi, mikäli kaasuturbiiniin liitetään lämmöntalteenottokattila ja höyryturbiini, jolloin sähköntuotannossa saavutetaan jopa yli 60% hyötysuhde. Talteenottokattila kasvattaa kuitenkin investointikustannuksia, jolloin se on relevantti vaihtoehto suuren mittakaavan hankkeissa. Esimerkiksi kaupungin tai suuren teollisuuslaitoksen sähkön- ja lämmön yhteistuotannossa, jolloin kokonaishyötysuhteeksi on mahdollista saada jopa yli 90%.

Hyvän hyötysuhteen lisäksi molemmat tuotantomuodot ovat nopeasti säädettävissä vastaamaan kulutusta. Riippuen valmistajasta, erilaisille turbiineille ja moottoreille luvataan lyhimmillään kahden minuutin säätöaika nollatehosta täydelle teholle olettaen, että laite on lämmin. Erityisesti polttomoottorien hyvä sähköntuotannon hyötysuhde yhdistettynä nopeaan käynnistämiseen on tehnyt niistä suositun ratkaisun varavirran lähteinä erilaisissa käyttökohteissa, joissa virran tarve on kriittistä kantaverkon kaaduttuakin tai käyttökohde on kantaverkon ulottumattomissa. Tällaisia kohteita olisivat esimerkiksi ydinvoimalat, öljynporauslautat, kaivokset ja sairaalat. Kaasuturbiinit ovat parempi ratkaisu, mikäli energiantarve jakautuu pidemmälle aikavälille, esimerkiksi talven kylmiksi kuukausiksi. Tällöin myös yhteistuotanto on potentiaalinen vaihtoehto. Polttomoottorien ja kaasuturbiinien eroja on koottu taulukkoon 1.

Ilmaston kannalta täytyy todeta, että sekä kaasuturbiinit että polttomoottorit edustavat tällä hetkellä fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa energiantuotantoa. Näin voidaan todeta siksi, että biopohjaisten polttoaineiden käyttö on toistaiseksi ollut vähäistä ja yleensä turvaudutaan öljyyn tai maakaasuun. Tilanne voi muuttua tulevaisuudessa, mikäli biokaasuntuotannon ja syntyvän biokaasun puhdistus ja nesteytys kehittyvät siten, että lopputuotteen puhtaus ei estä käyttöä teollisessa mittakaavassa. Ongelmia biokaasun käytössä tuottavat tällä hetkellä polttoaineen saatavuus ja laatu, erityisesti mädätyksessä syntyvät siloksaanit, rikkivedyt (H_2S), ammoniakki (NH_3) ja vesi. Jotta biokaasua voidaan käyttää, on laitoksella oltava märkäpesuri tai muu vastaava puhdistuslaite ennen syöttöä kaasuverkkoon. Myös joissain tapauksissa taloudellisesti järkeviä biokaasun tuotantoon sopivia jäteliemiä tai biomateriaalia ei ole saatavilla riittävästi. Mikäli biokaasun käyttö yleistyy, niin voidaan biokaasun kanssa hyödyntää olemassa olevaa infrastruktuuria, kuten nesteytyslaitoksia, tankkereita ja maakaasuverkkoja. Lappeenrannan yliopistossakin tutkittu power-to-gas teknologia tuo myös omat mahdollisuutensa uusiutuvien energiamuotojen ja kaasuvoimalaitosten yhteiskäytölle. Jos kyseisen tekniikan avulla ylimääräisellä sähköllä on mahdollista valmistaa metaania tai vetyä, voidaan tätä käyttää energiantuotannossa silloin kun tuulta tai aurinkoa ei ole saatavilla ja poistaa samalla hiilidioksidia ilmakehästä. Teknologia vaatii kuitenkin vielä kehitystä ollakseen teollisessa mittakaavassa kannattavaa. (LUT, 2016)

Huolimatta siitä käytetäänkö polttoaineena sitten fossiilisia tai biopohjaisia aineita, joudutaan palamisen puhtauteen ja savukaasujen käsittelyyn kiinnittämään tulevaisuudessa entistä enemmän huomiota. Hiilidioksidin talteenotto on eräs tulevaisuuden voimalaitosten kehityskohde, johon liittyy vielä ratkaisemattomia ongelmia talteenotetun hiilidioksidin varastoinnin suhteen. Mahdollisiksi loppusijoituskohteiksi on esitetty loppuun käytettyjä kaivoksia, kaasukenttiä ja merenpohjaa. Hiilidioksidia on jo jossain määrin käytetty öljynporauksessa paineenkorotuskaasuna helpottamaan öljynporausta. Toisenlaisen vaihtoehdon hiilidioksidin uudelleenkäytölle tarjoaa kanadalaisen Carbon Engineering-yhtiön hiilidioksidin talteenotto järjestelmä, jossa suoraan ilmasta erotetun hiilidioksidin annetaan reagoida vedyn kanssa, jolloin tuloksena syntyy hiilivetyjä, joita voidaan käyttää hiilineutraalina polttoaineena erilaisissa käyttökohteissa. Tekniikka on edeltäjiinsä verrattuna merkittävästi halvempi, mutta vaatii edelleen kehitystä toimiakseen teollisessa mittakaavassa ja mahdollisesti kansallisia tai kansainvälisiä tukijärjestelmiä ollakseen taloudellisesti kannattavaa. (Cell, 2018)

Taulukko 1 Kaasuturbiinien ja polttomoottorien vertailu käyttöominaisuuksien ja kustannuksien mukaan. Kustannukset ovat arvioita ja riippuvat suuresti rakennuskohteesta. (IEA, ETSAP, 2010)

	Kaasuturbiini	Polttomoottori
Rakennuskustannukset [€/kW]	621-1035	607-1345
Vuotuiset käyttökustannukset [€/kW]	28	250
Polttoaineet	Maakaasu, biokaasu, öljyt	Maakaasu, biokaasu, öljyt
Huollontarve	Vähäinen	Kohtalainen
Yhteistuotanto	Mahdollista	Mahdollista
Käyttökohteet	Yhteistuotanto suurilla käyttötunneilla, verkon tasapainottaminen	Hätävoima, sähköntuotanto erikoiskohteissa, verkon tasapainottaminen

4 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä on tarkasteltu ilmastonmuutosta ja sen torjuntaa energiatekniikan näkökulmasta ja erityisesti energiamurros termin kautta. Tulokulma oli haastava jo sen vuoksi, että energiamurroksen määritelmä vaikuttaa olevan jossain määrin subjektiivinen. Työssä on annettu koottu määritelmä siitä mitä energiamurros tarkoittaa ja miten sitä on Saksassa käytännössä toteutettu.

Energiamurros näyttää epäonnistuvan vastaamaan tavoitteeseen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja luoda uusi energiajärjestelmä, joka ei ole riippuvainen fossiilisista polttoaineista. Tämä voidaan todeta Saksan vuosittaisista päästöistä, jotka eivät ole vähentyneet huolimatta mittavista panostuksista. Syy tähän on ydinvoimasta luopuminen, jolloin ainoaksi peruskuorman lähteeksi jäi kivi- ja ruskohiili. Hiilen korvaaminen päästöttömästi on vaikea tehtävä ja edellyttäisi hiiliteollisuuden sosioekonomisen aseman heikentämistä, joka saattaa olla vaikeaa erityisesti vanhoilla hiilentuotanto alueilla, kuten Saksassa.

Hiilen korvaaminen vaatii tuuli- ja aurinkovoiman lisäksi lisäksi ydinvoimaa, vesivoimaa, biopolttoaineita tai suuren mittakaavan sähkönvarastointiratkaisua, jotta kulutus ja tuotanto voidaan tasata. Kaikkiin vaihtoehtoihin liittyy kuitenkin joko teknisiä, taloudellisia tai poliittisia haasteita. Ydinvoiman lisärakentaminen ei onnistu Saksan nykyisessä poliittisessa ilmapiirissä. Vesivoiman ja bioenergian lisärakentamiselle ei myöskään ole mahdollisuuksia saatavuuden ja ympäristökysymysten vuoksi. Sähkön varastoinnille suuressa mittakaavassa ei toistaiseksi ole olemassa kestävä ratkaisua, huolimatta akkutekniikan ja sähköautojen kehityksestä. Johtuen päästöttömien tai hiilineutraalien vaihtoehtojen ongelmista, joudutaan energiamurroksessa edelleen turvautumaan fossiilisiin energianlähteisiin, erityisesti maakaasuun. Lämpöenergian varastointia on jossain määrin nykyisin käytössä, esimerkkinä tässäkin työssä mainitut Vuosaaren ja Kielin voimalaitokset.

Polttomoottorit ja kaasuturbiinit tarjoavat olemassa olevan ratkaisun energiamurroksen tarpeeseen säädettävälle ja vähäpäästöiselle energiantuotannolle, jota voidaan käyttää yhdessä tuuli -ja aurinkovoiman kanssa. Kaasuturbiinien ja polttomoottorien eduiksi voidaan lukea korkeat hyötysuhteet sekä erillistuotannossa että yhteistuotannossa.

Molemmat vaihtoehdot voivat hyödyntää useampia erilaisia polttoaineita, niin fossiilisia kuin biopolttoaineita, joka tarjoaa tulevaisuudessa mahdollisuuden pyrkiä kokonaan eroon fossiilisista.

Kaasuturbiinit ja polttomoottorit ovat siirtymäkauden energiantuotantomuotoja, jotka mahdollistavat pyrkimyksen vähäpäästöiseen energiajärjestelmään tukemalla uusiutuvia energiamuotoja.

5 LÄHDELUETTELO

Brown L.R, 2017, Suuri Energiamurros, 248 sivua, ISBN 978-952-264-739-9

Keith et.al, 2018, A Process for Capturing CO2 [internet-sivu] [viitattu 10.9.2018]

Saatavilla: <https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351%2818%2930225-3>

CLEW, 2018, Germany on track to widely miss 2020 climate target-government

[internet-sivu] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla:

<https://www.cleanenergywire.org/news/germany-track-widely-miss-2020-climate-target-government>

Diesel and Gas Turbine Worldwide, 2016, Jenbachers Powering 190MW German Co-Gen Plant [internet-sivu] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla:

<https://diesलगasturbine.com/jenbachers-powering-190-mw-german-co-gen-plant/>

Düsseldorf Institute for Competition Economics, 2016, Kosten der energiewende, 59 sivua [internet-sivu] [viitattu: 14.2.2018] Saatavilla:

<http://www.insm.de/insm/Presse/Pressemeldungen/Pressemeldung-Studie-EEG.html>

EIA, 2017, International Energy Outlook 2017 [pdf-dokumentti] [viitattu 10.9.2018]

Saatavilla: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484%282017%29.pdf>

Emma-Maersk, 2018, Wartsila Sulzer RTA96-C/ Engine [internet-sivu] [viitattu

13.9.2018] Saatavilla: http://www.emma-maersk.com/engine/Wartsila_Sulzer_RT96-C.htm

European Biogas 2017, Association, EBA Statistical Report 2017 [internet-sivu]

[viitattu 11.10.2018] Saatavilla: <http://european-biogas.eu/2017/12/14/eba-statistical-report-2017-published-soon/>

Fingrid, 2016, Sähkönkulutus kaikkien aikojen ennätystasolla 7.1.2016 [internet-sivu]

[viitattu 25.9.2018] Saatavilla:

<https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2016/sahkonkulutus-kaikkien-aikojen-ennatystasolla-7.1.2016/>

Finlex, 2010, Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta [internet-

sivu] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20101396>

Fraunhofer ISE, 2018, Net installed electricity generation capacity in Germany [internet-sivu] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla: https://www.energy-charts.de/power_inst.htm?year=all&period=annual&type=power_inst

Fraunhofer ISE, 2018, Electricity production in Germany in week 6 2018 [internet-sivu] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla: <https://www.energy-charts.de/power.htm?source=all-sources&year=2018&week=6>

Helen, 2018, Vuosaaren voimalaitokset [internet-sivu] [viitattu: 11.2.2018] Saatavilla: <https://www.helen.fi/yritys/energia/energiantuotanto/voimalaitokset/vuosaari/>

Helen, 2017, Lämmön ja jäähdytyksen varastointi Helenissä, 11 sivua [viitattu 13.9.2018] Saatavilla: <https://www.slideshare.net/HelsinginEnergia/lmmn-ja-jhdytyksen-varastointi-heleniss-81548888>

Helen, 2016, Urbaania energiaa [internet-sivu] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla: <https://www.helen.fi/yritys/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2016/urbaania-energiaa/>

Huhtinen M, Korhonen R, Pimiä T, Urpalainen S, 2008, Voimalaitostekniikka, Kotkassa, Otavan kirjapaino Oy, 342 sivua, ISBN 978-952-13-3476-4

International Energy Agency, Energy Technology Analysis Program, 2010, Energy Technology Network, 5.2010 [pdf-dokumentti] [viitattu 11.10.2018] Saatavilla: https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E04-CHP-GS-gct_ADfinal.pdf

Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2016, First test plant producing fuel from solar power to be established at LUT [internet-sivu] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla: https://www.lut.fi/web/en/news/-/asset_publisher/IGh4SAywhcPu/content/first-test-plant-producing-fuel-from-solar-power-to-be-established-at-lut

NASA (National Aeronautics and Safe Administration), 2015, Ideal Brayton Cycle [internet-sivu] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html>

Raunio H, 2017, Suomeen luvassa jättimäiset bioinvestoinnit- useiden miljardien hankkeet odottavat lähtökäskyä, Tekniikka ja talous [internetartikkeli] [viitattu,

13.9.2018] Saatavilla: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/kemia/suomeen-luvassa-jattimaiset-bioinvestoinnit-useiden-miljardien-hankkeet-odottavat-lahtokaskya-6622114>

Rockström J et.al, 2009, A safe operating space for humanity, Nature, 2009 vol 461 [internetartikkeli] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla: <https://www.nature.com/articles/461472a>

Scripps Institution of Oceanography, 2018, The Keeling Curve [internet-sivu] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla: <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>

Statistisches Bundesamt, 30.8.2018, Prices: Data on energy price trends, 55 sivua [pdf-dokumentti] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla:

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergyPriceTrendsPDF_5619002.pdf?__blob=publicationFile

Tilastokeskus, 2018, Tuontipolttoaineiden hinnat nousivat vuoden toisella neljänneksellä [internet-sivu] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla: https://tilastokeskus.fi/til/ehi/2018/02/ehi_2018_02_2018-09-12_tie_001_fi.html

Tilastokeskus, 2014, Suomen kasvihuonekaasupäästöt Kioton pöytäkirjan ensimmäisellä velvoitekaudella arvioitu [internet-sivu] [viitattu: 10.2.2018] Saatavilla: http://stat.fi/til/khki/2012/khki_2012_2014-04-15_tie_001_fi.html

STY, 2016, Tuulivoima Suomessa 2016 [pdf-dokumentti] [viitattu 25.9.2018] Saatavilla: http://www.tuulivoimayhdistys.fi/filebank/930-STY_-_Vuosisiraportti_2016_13_2.pdf

Wärtsilä, 2018, Gas Turbine for Power Generation: Introduction [internet-sivu] [viitattu 13.9.2018] Saatavilla: <https://www.wartsila.com/energy/learning-center/technical-comparisons/gas-turbine-for-power-generation-introduction>

YK, 2018, Paris Agreement [internet-sivu] [viitattu 10.3.2018] Saatavilla: https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en

Ympäristöministeriö, 2013, Kioton pöytäkirja [internet-sivu] [viitattu 10.2.2018] Saatavilla: <http://www.ym.fi/fi->

[FI/Ymparisto/Ilmasto ja ilma/Ilmastonmuutoksen hillitseminen/Kansainvaliset ilmastoneuvottelut/Kiotoon poytakirja](#)