

Joonas Koivuluoma

CHP-VOIMALAN KÄYTTÖÖNOTTOPROSESSIN SUUNNITTELU

CHP-VOIMALAN KÄYTTÖÖNOTTOPROSESSIN SUUNNITTELU

Joonas Koivuluoma
Opinnäytetyö
Kevät 2018
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Joonas Koivuluoma
Opinnäytetyön nimi: CHP-voimalan käyttöönottoprosessin suunnittelu
Työn ohjaaja: Timo Kiviahde
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2018
Sivumäärä: 30

Työn tarkoituksena oli luoda käyttöönottovaiheen tarkastuspöytäkirja pien-CHP-voimalalle. Tarkastuspöytäkirjassa käydään läpi käyttöönottotarkastuksen toimenpiteet, joilla varmistetaan laitoksen toiminta. Työssä pohdittiin koneturvallisuuteen liittyvien sovellusten kelpuutusprosessia ja pienen voimalaitoksen sähköverkkoon liittymistä koskevia viranomaissäädöksiä. Työn tilaajana toimi Gasek Oy.

Käyttöönottovaiheen tarkastuslistan suunnittelussa käytettiin voimalaitoskomponenttien ohjeistuksia, yritykseltä saatua materiaalia sekä Gasek-henkilöstön asiantuntemusta. Tutkitut viranomaissäädökset olivat yleisesti sovellettuja eurooppalaisia ja kansainvälisiä standardeja, joiden lisäksi otettiin huomioon suomalaisten standardien mahdolliset lisävaatimukset.

Työn tuloksena syntyi tarkastuspöytäkirja, jota voidaan käyttää hyödyksi kohdeprojektissa sekä muissa vastaavissa voimalatoimituksissa. Opinnäytetyön kohteena ollut pien-CHP-voimala oli vielä suunnitteluvaiheessa, joten tarkastuspöytäkirjaan tulee vielä mahdollisesti lisäyksiä projektin edetessä.

Asiasanat: CHP-laitos, käyttöönottotarkastus, yhteistuotanto, puun kaasutus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Energy Technology

Author: Joonas Koivuluoma

Title of thesis: Commissioning phase checklist for a small scale CHP plant

Supervisor: Timo Kiviahde

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2018

Pages: 30

The objective of this thesis was to make a commissioning checklist for a small scale CHP plant. The document contains inspection measures to be taken in the pre-commissioning phase that ensures a properly functioning power plant. Also European and Finnish standards regarding the micro-generating plants were examined relating to the case project. Commissioner of this thesis was Gasek Oy.

The checklist was based off the part manufacturers' manuals and expertise of Gasek personnel. In addition the guidelines from previous projects acted as a base for the document. Examined standards were either international or European and are widely used in the machine industry.

The results were achieved as the commissioning document was compiled and will be used in the case project and comparable future projects. During the time of this thesis, the case plant was in design phase so the document might be supplemented as the project progresses.

Keywords: CHP power plant, commissioning, wood gasification

ALKULAUSE

Haluan kiittää toimitusjohtaja Kauko Väinämöä mahdollisuudesta suorittaa tämä opinnäytetyö Gasek Oy:lle. Kiitän Gasekilta myös Pauli Karttusta, Juhani Haapalahtea ja Markus Sorvaria kysymyksiini vastaamisesta ja neuvoista työn suhteen.

Oulun ammattikorkeakoululta haluan kiittää työn ohjaajana toiminutta lehtori Timo Kiviahdetta, ja työn kieliasun tarkastanutta lehtori Pirjo Partasta.

Oulussa 5.5.2018

Joonas Koivuluoma

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
1 JOHDANTO	7
2 PUUN KAASUTUS	8
2.1 Prosessi	8
2.1.1 Kuivaus	9
2.1.2 Pyrolyysi	9
2.1.3 Hapetus	9
2.1.4 Pelkistys	10
2.2 Kaasutin	10
2.3 Raakakaasun puhdistus	11
3 YHDISTETTY LÄMMÖN- JA SÄHKÖNTUOTANTO	14
3.1 CHP-yksikkö	14
3.2 Hajautettu energiantuotanto	15
4 KÄYTTÖÖNOTTOVAIHEEN TOIMENPITEET	17
4.1 Ohjelmiston testaaminen	20
4.2 Sähköverkkoon liittäminen	21
4.3 Sähkön laatu ja laitoksen suojaus	22
5 TARKASTUSLISTA	24
6 YHTEENVETO	27
LÄHTEET	28

1 JOHDANTO

Työssä laaditaan pien-CHP-voimalalle käyttöönottovaiheen tarkastuspöytäkirja yrityksen sisäiseen käyttöön. Tutkitaan myös käyttöönottoprosessin kelpuutusta ja mikrogeneraattorin pienjänniteverkkoon liittymistä koskevia eurooppalaisia yleisstandardeja. Työn toimeksiantaja on Gasek Oy, joka on puun kaasuttamiseen perustuvia laiteratkaisuja kehittävä suomalainen energiateknologiayritys.

Opinnäytetyön kohdevoimala on suunnitteluvaiheessa oleva projekti. Puukaasutoiminen pien-CHP-voimala toimitetaan asiakkaalle konttirakenteeseen integroituna. Käyttöönotto asennuskohteessa on nopea, sillä voimalan kasaaminen, käyttöönottotarkastus ja koeajo suoritetaan ennen toimitusta. Konttirakenteen ulkopuolelle jääviä laitteita ei sisällytetty tarkastuspöytäkirjaan, sillä ne ovat asennuskohdekohtaisia. Rajapinnan ulkopuolelle jäävät polttoaineen säilytys­siilo ja syöttöjärjestelmät sekä lämmityksen toisiopuoli.

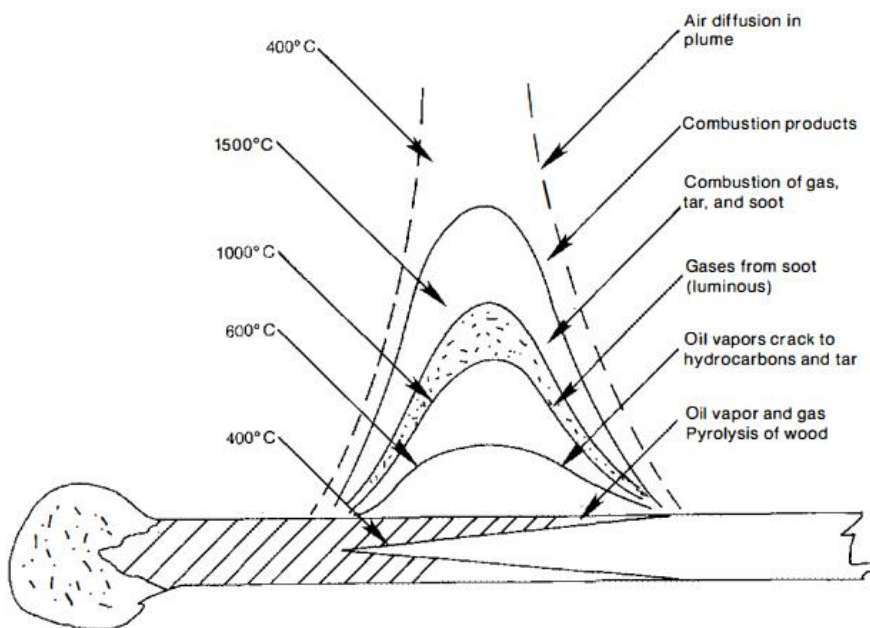
Työn tavoitteena on koota valmis tarkistuslista, jota yritys voi hyödyntää toimituskoh­teessa. Tarkistuslistassa käydään läpi käyttöönottovaiheen toimenpiteet, joilla varmistetaan laitoksen toiminta. Syntynyttä dokumenttia voidaan käyttää soveltaen myös tulevissa voimalatoimituksissa. Toinen tavoite on selvittää, mitä pienvoimalan verkkoon liittämisen­sä täytyy ottaa huomioon laitoksen ja pienjänniteverkon vakaan ja turvallisen toiminnan kannalta.

2 PUUN KAASUTUS

2.1 Prosessi

Kaasutusprosessissa luodaan kaasua kiinteästä hiilipitoisesta materiaalista, kuten puusta. Prosessin aikana raaka-aine kuumennetaan korkeisiin lämpötiloihin, minkä seurauksena siitä erottuu kaasuja. Kemiallisten reaktioiden jälkeen syntyy vetyä ja hiilimonoksidia sisältävää synteetikaasua, jota voidaan hyödyntää energiantuotannossa. (1, s. 1–2.)

Kaasutuksen prosessit voidaan esittää esimerkiksi palavan tulitikun avulla (kuva 1). Kun tikku on sytytetty, puu alkaa kaasuuntumaan sytytyksen tuoman lämmön vaikutuksesta. Liekin ylä- ja keskiosassa puusta irtoava kaasu palaa kohdatessaan ilman happimolekyylit, ja puun pinnalla tapahtuu pyrolyysiä vähähappisissa olosuhteissa. (2, s. 21.)



KUVA 1 Kaasuuntuminen ja palaminen tulitikussa (2, s.21)

2.1.1 Kuivaus

Prosessin ensimmäisessä vaiheessa kosteus haihtuu raaka-aineesta. Koska prosessi on endoterminen eli se sitoo lämpöä, kosteampi raaka-aine vie enemmän energiaa kuin kuivempi raaka-aine. Kuivausta ei pidetä aina erillisenä prosessina, vaan se liitetään pyrolyysin yhteyteen. (3, s. 292.)

Kuivumisen aikana haihtuu pääasiassa vesihöyryä polttoaineen pinnalta ja sisähuokosista. On myös mahdollista, että herkimmin haihtuvat polttoaineen komponentit alkavat vapautua. Prosessilämpötila ulottuu noin 107 °C:seen. (3, s. 9.)

2.1.2 Pyrolyysi

Kaasujen erottaminen raaka-aineesta tapahtuu pyrolyysiprosessissa. Pyrolyysi voidaan luokitella kolmeen ryhmään tyypillisesti käytettyjen lämpötila-alueiden ja prosessista saatavan tuotteen perusteella taulukon 1 mukaisesti (4, s. 2). Puun kaasutusprosessissa pyritään korkean lämpötilan kaasuuntumiseen, mutta myös matalamman lämpötila-alueen reaktioita tapahtuu samanaikaisesti.

TAULUKKO 1 Pyrolyysin luokittelu (4, s. 2)

Pyrolyysiprosessi	Lämpötila-alue °C	Tuote
Hiilletys	300 - 500	Puuhiili
Nesteytys	400 - 650	Pyrolyysiöljy
Kaasutus	700 - 1500	Tuotekaasu

Kaasuttimen tyypistä, materiaalista ja siihen syötettävästä polttoaineesta riippuen pyrolyysilämpötila vaihtelee välillä 700 - 1500 °C. Pyrolyysissä palamisreaktioiden happimäärää rajoitetaan, mikä on oleellista hiilimonoksidin syntymisen kannalta. (1, s. 4; 2, s. 17)

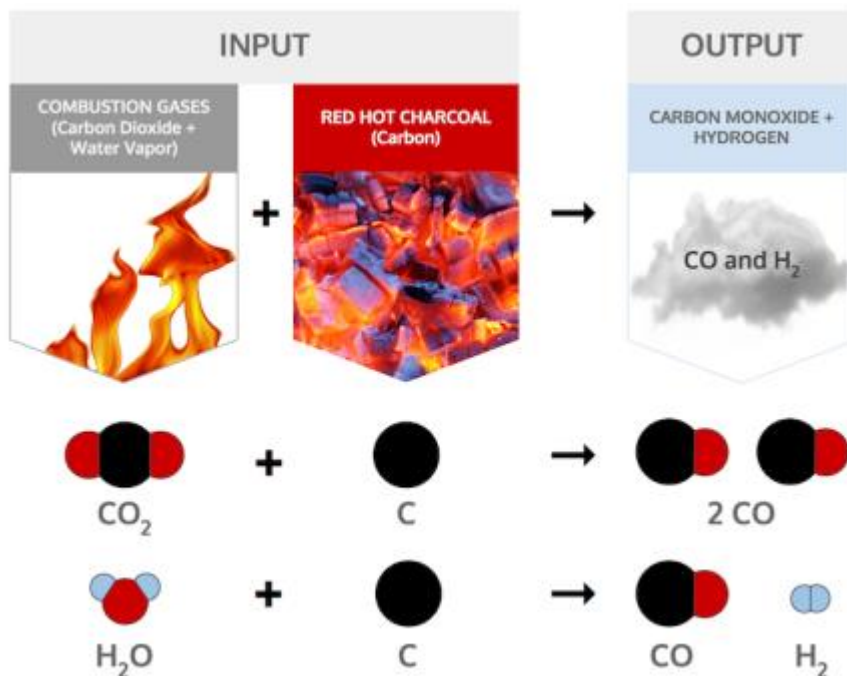
2.1.3 Hapetus

Hapetusvaiheessa prosessiin tuodaan happea, ja materiaali reagoi sen kanssa vapauttaen energiaa palamisreaktiossa. Happi voidaan tuoda ympäröivästä ilmasta, höyrystä

tai jopa puhtaana happena lisäten. Palamisreaktio on kaasutuksen neljästä vaiheesta ainut eksoterminen prosessi, eli siitä vapautuvaa lämpöä käytetään muissa vaiheissa hyödyksi. (1, s. 2; 5.)

2.1.4 Pelkistys

Pelkistysprosessi on kemialliselta reaktioltaan päinvastainen hapetukseen nähden. Siinä poistetaan happi palamistuotteista, ja lopputuloksena syntyy raakakaasua, joka koostuu hiilimonoksidista ja vedystä. Käytännössä kiinteä kuuma puuhiili varastaa happimolekyylin hiilidioksidilta ja vesihöyryltä. Reaktio on esitetty kuvassa 2. Pelkistymistä tapahtuu, kunnes kaikki happimolekyylit ovat siirtyneet. (5.)

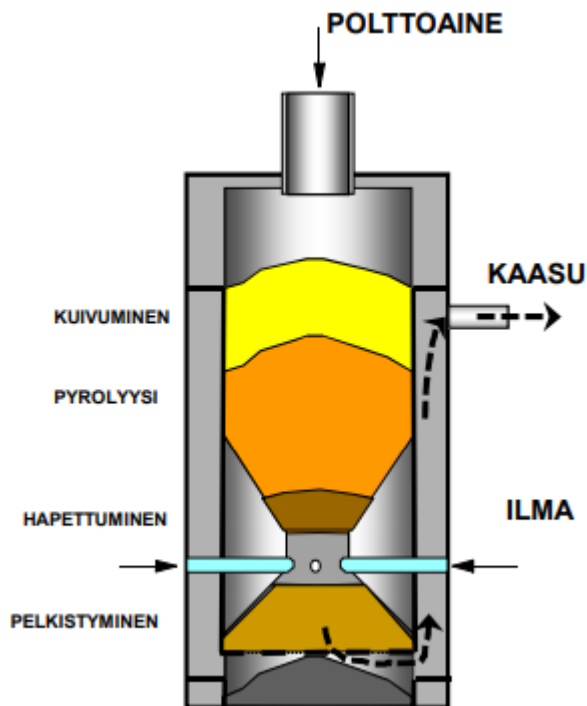


KUVA 2 Pelkistysreaktio (5)

2.2 Kaasutin

Puun kaasutukseen soveltuvia reaktorityyppejä on useita. Eri kaasutinlaitteet toimivat optimaalisemmin eri olosuhteissa. Reaktorityyppi vaikuttaa siihen, minkälaista polttoaine voi olla palakooltaan ja kosteudeltaan. Käytetty kaasutinteknologia vaikuttaa myös tuotetun raakakaasun puhtauteen, jolla on suuri merkitys varsinkin, jos kaasua käytetään sähköntuotantoon.

Pienen kokoluokan (teho < 2 MW_{th}) kaasutukseen yleisin kaasutintyyppi on myötävirtakaasutin, jonka periaate on esitetty kuvassa 3. Polttoaine lisätään kaasuttimen yläosasta ja jäännöstuotteet poistetaan pohjalta. Ilma lisätään yleensä keskeltä pyrolyysin jälkeiseen palamisvyöhykkeeseen. Syntyvä kaasu poistuu vaippatilan kautta eteenpäin luovuttaen samalla lämpöä kuivumis- ja pyrolyysiprosessien ylläpitämiseen. (6, s. 6.)



KUVA 3 Myötävirtakaasutin (6, s. 6)

Puun kaasutusteknologian suurimpana haasteena pidetään tervan syntymistä prosessin aikana (7, s. 43.) Pienen kokoluokan myötävirtakaasuttimen etu on sen tuottaman kaasun vähäinen tervapitoisuus, joka on hyvin toimivassa kaasuttimessa alle 200 mg/m³_n. Terva härmistyy putkien ja suodattimien pinnoille, mikä heikentää lämmönvaihtimien suorituskykyä ja voi tukkia suodattimet. Terva aiheuttaa myös terveydelle haitallisia PAH-päästöjä. (8, s. 2–7.)

2.3 Raakakaasun puhdistus

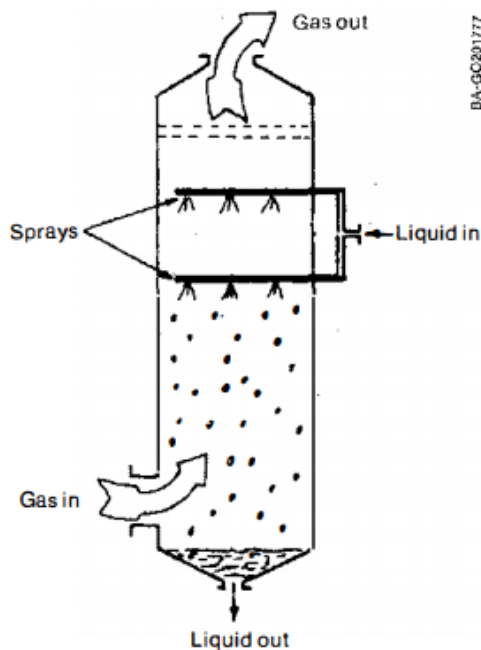
Raakakaasun laatu vaihtelee polttoaineen laadun vaihdellessa, joten raakakaasun puhdistamisella taataan tasalaatuinen syöttö kaasumoottorille. Puhdistuksen tehtävänä on poistaa epäpuhtaudet kuten pöly ja terva kaasusta. Raakakaasun ja puhdistetun kaasun

terva- ja pölypartikkelien pitoisuudet myötävirtakaasuttimessa on listattu taulukkoon 2. Puhdistus voidaan suorittaa kuivasuodatuksella ja/tai pesurin avulla. (2, s. 74.)

TAULUKKO 2 Terva- ja pölypartikkeleiden pitoisuudet kaasussa (2, s. 25)

	Raakakaasun pitoisuudet mg/m ³ n	Puhtaan kaasun vaatimukset mg/m ³ n
Pöly	100 – 1 000	Ainakin < 50 Jos mahdollista < 5
Terva	100 – 500	Ainakin < 50 Jos mahdollista < 25

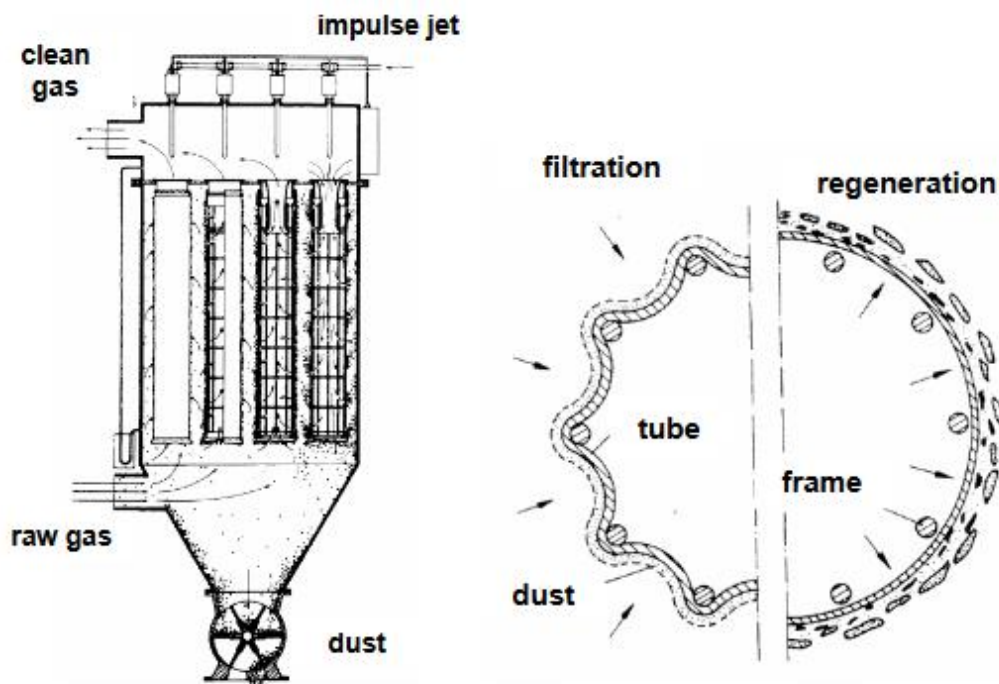
Yksinkertaisen spraypesurin periaate on esitetty kuvassa 4. Kooltaan yli 1 µm:n terva- ja pölypartikkelit laskeutuvat veden ja painovoiman vaikutuksesta alas, kun kaasu poistuu yläosasta. Alle 0,1 µm:n kokoiset partikkelit taas sekoittuvat veteen diffuusion seurauksena. (2, s. 84.)



KUVA 4 Spray-pesuri (2, s. 86)

Kuivasuodatus voidaan jakaa kuumakaasun suodatukseseen, joka tapahtuu ennen kaasun jäähtymistä, ja jäähtytetyn kaasun suodatukseseen. Kuuma raakakaasu on tyypillisesti yli 500 °C, joten suodatinelementit ovat yleensä huokoisia keraamisia tai metallisia materiaaleja. (9, s. 26.)

Jäähtyneen kaasun suodatuksessa hyödynnetään kaasua läpäiseviä kankaita. Sukkasuodatin on usein käytetty kuivasuodatusmenetelmä. Siinä jäähdytetty kaasu virtaa suodatinsukkien sisään ja pölypartikkelit kertyvät sukkien pinnalle. Pölykerros poistetaan säännöllisesti paineilmapulssin avulla. Kaasun lämpötilan ollessa 150 - 300 °C sukka-suodattimessa suodatusmateriaali voi olla esimerkiksi lasikuituhuopa tai polytetrafluori-eteeni eli teflon. Kuvassa 5 on esitetty sukka-suodattimen periaate. Oikeanpuoleinen kuva esittää suodatinsukan tilaa, kun sen pinnalle on kertynyt pölykerros, ja regeneraatiovaihetta, jossa pölykerros poistetaan paineilmapulssin avulla. (9, s. 43.)



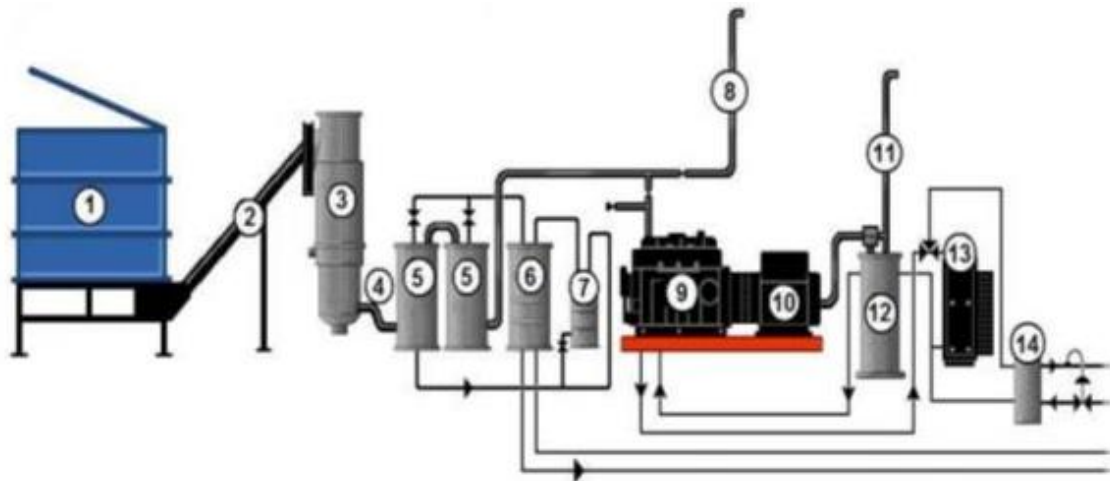
KUVA 5 Sukkasuodattimen periaate ja suodatinsukka ylhäältä kuvattuna (9, s. 42)

3 YHDISTETTY LÄMMÖN- JA SÄHKÖNTUOTANTO

Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto (*Combined Heat and Power*) tarkoittaa, että lämpöä ja sähköä tuotetaan samassa prosessissa. CHP on energiatehokas tuotantomenetelmä, sillä siinä käytetään hyväksi sähköntuotannossa väistämättä syntyvää hukkalämpöä. Vuonna 2016 Suomessa suurin osa kauko- ja teollisuuslämmöstä tuotettiin CHP:n avulla. (10.)

3.1 CHP-yksikkö

Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi voimalan periaate. Kuvassa 6 esitetään erään Gasekin pien-CHP-laitteiston periaatekaavio, jossa raakakaasu puhdistetaan pesureilla.



KUVA 6 Pien-CHP-laitteiston periaatekaavio (11)

- | | |
|----------------------------|------------------------------------|
| 1. Hakesiilo | 8. Käynnistyskaasuputki |
| 2. Ruuvikuljetin | 9. Kaasumoottori |
| 3. Kaasutusreaktori | 10. Generaattori |
| 4. Kaasuputki | 11. Pakokaasuputki |
| 5. Pesurit | 12. Pakokaasun lämmönvaihdin |
| 6. Pesuveden lämmönsiirrin | 13. Hukkalämmönvaihdin (jäähdytin) |
| 7. Hiilisäiliö | 14. Lämmönvaihdin |

Voimalan polttoaine eli hake syötetään hakesiiloon, jonka pohjalta haketta syötetään ruu-
vikuljettimella kaasuttimeen. Kaasuttimessa tapahtuva raakakaasun muodostuminen on
käsitelty pääluvussa 2. Laitoksen ylösajovaiheessa kaasu on likaista, joten käynnistys-
kaasuputken venttiili on auki ja moottorille menevä venttiili on kiinni. Pesureiden yläpuo-
lta ruiskutettava vesi jäädyttää ja puhdistaa kaasua, ja pesuveteen siirtynyt lämpö ote-
taan talteen lämmönsiirtimen avulla.

Kun kaasutin on toiminut hetken aikaa, kaasu on tarpeeksi puhdasta mennäkseen moot-
torille. Käynnistyskaasuventtiili voidaan sulkea ja tuotekaasuventtiili avata. Tuotekaasu
ajetaan polttomoottorille, joka pyörittää generaattoria. Pakokaasun lämpöenergia otetaan
talteen lämmönvaihtimella ennen pakokaasun poistumista ulkoilmaan. Lämpöenergia
voidaan ajaa kolmitieventtiilin kautta lämmityksen toisiopuolelle tai hukkalämmönvaihti-
mella ulkoilmaan lämmön tarpeen mukaan.

3.2 Hajautettu energiantuotanto

Hajautetulla energiantuotannolla tarkoitetaan yleensä tuotantomallia, jossa energia tuo-
tetaan lähellä sen kulutuspaikkaa, ja siihen on liitetty myös oleellisena osana sähkön ja
lämmön pientuotanto. Paikallisen tuotannon lähtökohtana on resurssien saatavuus lähi-
alueelta, mikä vähentää energian sekä polttoaineen siirrosta aiheutuvia kustannuksia.
Hyödynnettävät energiamuodot ovat usein uusiutuvia, sillä esimerkiksi aurinko- ja tuu-
lienergia sekä geoterminen energia ovat laajasti saatavilla paikalliseen tuotantoon. Var-
sinkin Suomessa biomassassa on hyvä energianlähde hajautettuun energiantuotantoon. (12,
s. 6.)

Sähkön ja lämmön hajautettu tuotanto voidaan toteuttaa osana muuta energianjakeluver-
kostoa tai eristetyksi. Jos tuotanto on eristetty jakeluverkostoista, energia täytyy kuluttaa
itse. Oma tuotanto voidaan kuitenkin täydentää tarpeen vaatiessa ostoenergialla. (12,
s. 6.)

Jakeluverkkoon liitettyssä hajautetussa tuotannossa energiaa jää yli omien tarpeiden,
ja sitä voidaan jakaa paikalliseen järjestelmään tai jopa valtakunnalliseen verkkoon. Ja-

keluverkostoon liittäminen vaatii kuitenkin usein erityistoimenpiteitä, sillä energian laatu-kriteerit tulee täyttää ja tekniikan yhteensopivuuteen tulee kiinnittää huomiota. Sähkön-tuotannon liittamisestä verkkoon on kerrottu luvussa 4.2. (12, s. 6.)

Pien-CHP:n tapauksissa on tärkeää arvioida kohteen sähkön ja lämmön kysyntää. Tuo-tetulle lämmölle täytyy löytää käyttökohde, jotta yhteistuotanto olisi järkevää. Ongelmana onkin lämmön kysynnän vaihtelu vuodenajan mukaan. Taloudellisesti toimiva CHP-laitos edellyttää siis tasaisen lämpökuorman vuodenajasta riippumatta, minkä takia hyviksi käyttökohteiksi valikoituvat mm. maitotilat, uimahallit ja kaukolämpöverkoston ulkopuo-lella olevat suurkiinteistöt, joissa lämpimän käyttöveden kulutus on verrattain vakaa. Ke-säajan hukkalämpöä voidaan myös käyttää hyväksi muun muassa puupolttoaineen kui-vauksessa. Taulukosta 3 nähdään, että Suomessa KL-verkoston ulkopuolella olevia öljy-tai kaasulämmitteisiä suurkiinteistöjä on yhteensä noin 39 000. (13, s.15–19.)

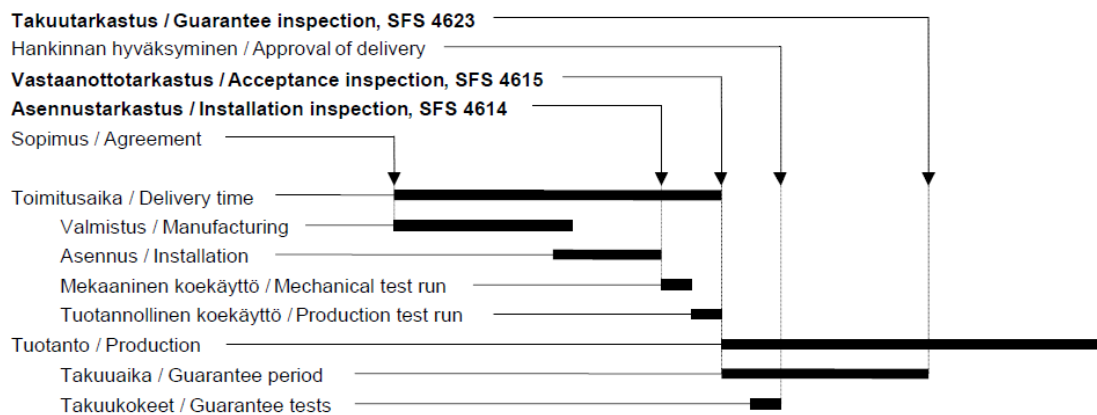
TAULUKKO 3 Kaukolämpöverkoston ulkopuoliset suurkiinteistöt, joissa on vesikiertoinen lämmönjakotapa ja pääasiallinen polttoaine sähkö, öljy tai puu. (13, s. 19.)

	Rivi- ja ketju-talot	Asuinkerros-talot	Liike-rakennukset	Hoitoalan rakennukset	Opetus-rakennukset
KOKO SUOMI					
Sähkö	1 358	258	415	123	71
Öljy (sis. kaasu)	16 974	9 305	7 010	2 220	3 152
Puu	245	176	507	118	516

Lappeenrannan teknillisen yliopiston julkaiseman raportin mukaan Suomessa on 2000–3000 pientä tai keskisuurta yritystä, jotka voisivat hyödyntää pienen mittakaavan CHP-tuotantoa (14, s. 29).

4 KÄYTTÖÖNOTTOVAIHEEN TOIMENPITEET

Voimalan käyttöönottovaiheessa tarkistetaan, että laitos toimii halutulla tavalla. Suoritettava tarkastus takaa laitoksen sujuvan käyttöönoton. Käyttöönottovaiheen voidaan ajatella koostuvan ennen toimitusta tehtävistä tarkastustoimenpiteistä, vastaanottotarkastuksesta ja koeajoista. Kuvassa 7 esitetään esimerkki toimitusaikakaaviosta, josta nähdään tarkastusten sijoittuminen toimitusaikaan.



KUVA 7 Esimerkki toimitusaikakaaviosta (15, s. 3)

Ennen toimitusta tehtävässä tarkastuksessa todennetaan muun muassa

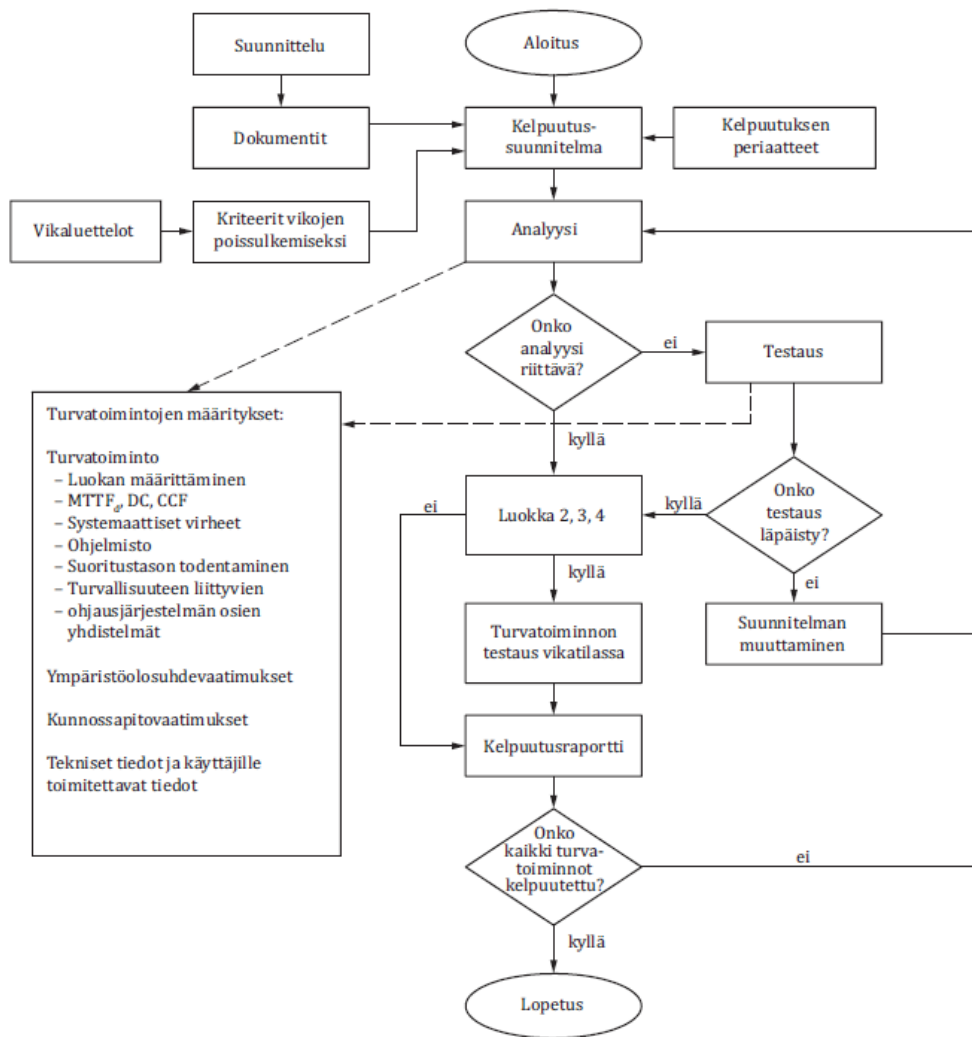
- mekaanisten laitteiden toimivuus
- moottoreiden pyörimissuunta
- putkistoyhteiden tiiviys
- instrumentoinnin toimivuus
- turvatoimintojen toimivuus.

Ensimmäinen koeajo voidaan suorittaa ennen laitoksen toimittamista loppukohteeseen. Laitosta valvotaan toimituksen jälkeen asiakkaan kanssa sovitun ajan, minkä jälkeen laitos luovutetaan loppukäyttäjälle. Käyttöönottovaiheessa suoritetaan myös sähköurakoitsijan suorittama käyttöönottotarkastus, johon sisältyy silmämääräinen tarkastelu ja erilaisia mittauksia ja testauksia. Standardin SFS-EN 50438 liitteenä olevaa testauspöytäkirjapohjaa voidaan käyttää generaattorin ja sen liitännälaitesuojauksen testaukseen käyttöönoton yhteydessä. (16.)

Kansainvälinen standardi ISO 13849-1 määrittelee ohjausjärjestelmän turvallisuuteen liittyvien osien rakenteen ja toiminnan arviointiperusteet, ja niitä voidaan soveltaa mihin tahansa koneeseen. Turvallisuuteen liittyvä osa voi olla esimerkiksi turvalaite, joka katkaisee prosessin tai tehonohjaukselin, kuten venttiili. Ohjelmisto on myös olennainen osa turvajärjestelmää, ja sitä käsitellään luvussa 4.1. Arvioinnin voi suorittaa kolmas osapuoli tai oma organisaatio.

Standardi määrittelee ohjausjärjestelmän osille luokituksen, joka ilmaisee ohjausjärjestelmän osalta vaadittavan käyttäytymisen suhteessa sen vikasietoisuuteen. Käytetyt luokat ovat B, 1, 2, 3 ja 4. Suunnitteluvaiheessa luodaan turvatoimintojen kelpuutussuunnitelma komponenttien valmistajien toimittamien dokumenttien sekä standardissa ilmoitettavien kelpuutuksen periaatteiden pohjalta. Kelpuutuksella osoitetaan, että ohjausjärjestelmän osien yhdistelmä täyttää standardin vaatimukset. Kelpuutussuunnitelmassa otetaan huomioon myös osien yleiset vikaluetellot, jotka perustuvat kokemukseen ja löytyvät standardista ISO 13849-2.

Varsinainen kelpuutus koostuu analyysistä sekä testauksesta. Analyysissä varmistutaan turvatoimintojen teoreettisesta suorituskyvystä, ja se aloitetaan mahdollisuuksien mukaan rinnakkain suunnitteluprosessin kanssa. Kelpuutustestaus täydentää analyysiä, ja se on usein välttämätöntä. Kuvassa 8 on esitetty turvatoimintojen kelpuutusprosessin yleiskuva.



KUVA 8 Yleiskuva kelpuutusprosessista (17, s. 16)

Kun testaus on läpäisty, niin suoritetaan testaus vielä vikatilassa, jos turvatoiminto on määritelty luokkaan 2, 3 tai 4. Tämä tarkoittaa, että vikoja istutetaan laitteistoon ja todetaan turvatoimintojen toimivuus kyseisessä vikatilassa. Käytettävät vikatilatestaukset ovat laitteistokohtaisia ja niiden tarve tulisi määrittää analyysin avulla. Testausta seuraa kelpuutusraportti, jossa verrataan kelpuutustoimenpiteitä suunnitelmaan ja varmistetaan että tavoitteet on saavutettu.

Käyttöönottovaiheessa tulee ottaa huomioon myös painelaitteiden testaaminen. Painelaittedirektiivi luokittelee painelaitteet tilavuuden, käyttöpaineen ja niiden sisältämän aineen perusteella. Putkistojen tapauksessa luokittelussa käytetään putken nimelliskokoa (DN) tilavuuden sijaan. Kun painelaite luokitellaan johonkin luokkaan (I–IV), menetellään sitä

vastaavan moduulin mukaisesti laitteen vaatimustenmukaisuuden arvioinnissa. Tähän arviointiin voi kuulua erilaisia testauksia ja tarkastuksia, kuten koeponnistus. Jos putkiston tai laitteen ominaisuudet jäävät direktiivissä määriteltyjen rajojen alapuolelle, ei käyttöönoton yhteydessä tarvitse suorittaa koeponnistusta. (18, 4. artikla.)

4.1 Ohjelmiston testaaminen

Ohjelmisto on olennainen osa automaatiojärjestelmää. Laitoksen ohjelmisto testataan tehdastestissä eli FAT-testissä (Factory Acceptance Test). Tämä tarkoittaa sitä, että ohjelma testataan valmistajan tiloissa ennen laitteistokokonaisuuden toimitusta. Testissä simuloidaan automaation toiminta asettamalla yksitellen yksi tai useampi I/O eli sisään- ja ulostulo ja todentamalla elektroniikan ja ohjelman tekninen toimivuus. FAT-testausvaiheessa laitteistosta puuttuu komponentteja, eikä se siten vastaa vielä oikeaa tilannetta. (19, s. 156.)

Kun enemmistö tai kaikki mittaus- ja ohjauspiireistä on asennettu, voidaan suorittaa SAT-testi (Site Acceptance Test), missä saadaan aikaan jo oikeaa tilannetta vastaavat arvot prosessille. SAT-testissä voidaan jo lisätä prosessiin käytettävät raaka-aineet ja hyödykkeet. (19, s. 156.)

Lopullinen ohjelman ja automaatiojärjestelmän testaus suoritetaan, kun laitos otetaan oikeaan käyttöön loppukohteessa. Tätä testiä kutsutaan suorituskykytestiksi. Järjestelmän suorituskykyä pyritään testaamaan normaalioloissa ja ääriolosuhteissa toimintavarmuuden todentamiseksi. Testi dokumentoidaan ja kirjataan ylös mahdolliset puutteet, jotka korjataan heti tai myöhemmin sovittavana ajankohtana, jos vika ei ole kriittinen. (19, s. 156.)

Turvallisuuteen liittyvien ohjelmistojen todentamiselle on määritelty suosituksia standardissa ISO 13849. Asetetut toimenpiteet riippuvat standardin määrittelemästä turvatoiminnon suoritustasosta, joita on viisi: PL a, PL b, PL c, PL d ja PL e. PL a -taso sisältää lievimmät riskitekijät turvatoiminnon pettäessä ja PL e -taso sisältää vastaavasti vakavimmat riskitekijät. Suoritustasoille a...d on sovellettava toiminnallista testausta, kuten black

box -testausta. Tasoille c ja d on lisäksi sovellettava laajennettua toiminnallista testausta, esimerkiksi gray box -testausta.

Ohjelmistopohjaiselle turvallisuuteen liittyvälle parametroidulle on standardissa ISO 13849-1 ohjeistettu seuraavia todentamistoimenpiteitä:

- *todennetaan jokaisen turvallisuuteen liittyvän parametrin asetusarvon oikeellisuus (minimi-, maksimi- ja edustavat arvot)*
- *todennetaan, että turvallisuuteen liittyvien muuttujien mielekkyys tarkistetaan, esimerkiksi käyttämällä epäsopivia arvoja*
- *todennetaan, että ilman valtuuksia tehtävien turvallisuuteen liittyvien muuttujien muuttaminen estetään*
- *todennetaan, että muuttujiin liittyvä data tai signaalit saadaan aikaan ja käsitellään siten, että viat eivät voi johtaa turvatoiminnon menettämiseen. (20, s. 35.)*

4.2 Sähköverkkoon liittäminen

Suomessa pientuottajalla on velvollisuus täyttää sähkön laatuvaatimukset yleiseen sähköverkkoon liittyessään. Teknisten vaatimusten tarkoituksena on mahdollistaa tuotantolaitosten käyttö siten, että tuotantolaitos ei aiheuta häiriöitä verkkoon, vaaranna henkilöturvallisuutta tai esimerkiksi riko muiden sähkönkäyttäjien sähkölaitteita. Tässä luvussa käydään läpi teknisiä kysymyksiä sähköverkkoon liittymisessä. Tiedot pohjautuvat Energateollisuus Ry:n ohjeisiin ja standardeihin. (21, s. 18.)

Alle 100 kilowatin sähköntuotantolaitokset voidaan liittää 400 voltin pienjänniteverkkoon joko oman tai kulutuksen kanssa yhteisen liityntäpisteen kautta. Jakelumuuntajan napoihin liitettäessä voi laitoksen koko olla muutamia satoja kilowatteja. (21, s.18)

Jakeluverkonhaltijalle tulee toimittaa tuotantolaitoksen tiedot. Tuotantolaitoksen koko määrittelee, kuinka yksityiskohtaisesti tiedot täytyy ilmoittaa. Ohjeistuksen mukaan enintään 50 kilovoltiampeerin voimalaitoksesta tulisi ilmoittaa vähintään

- laitostyyppi, nimellisteho ja nimellisvirta

- liitälaitteen tyyppitiedot
- suojauksen asetteluarvot ja toiminta-ajat
- tiedot saarekekäytön estosuojauksen toteutuksesta. (21, s. 20.)

4.3 Sähkön laatu ja laitoksen suojaus

Voimalaitoksesta siirrettävän sähkön laadun vaatimukset on määritelty eurooppalaisessa standardissa SFS-EN 50438. Laatu määritellään pääosin jännitettä ja taajuutta mittaamalla. Näiden tulisi pysyä mahdollisimman vakiona, jotta laitos ja muut verkonkäyttäjät välttyvät ongelmilta. Standardi käsittelee pienjännitejakeluverkon kanssa rinnan toimivia mikrogeneraattoreita, joiden nimellisvirta vaihetta kohti on enintään 16 A yksi- tai useampivaiheisessa 230/400 V:n verkossa tai useampivaiheisessa 230 V:n (vaiheiden välinen jännite) verkossa. Suomessa standardia sovelletaan nimellistehoaltaan enintään 50 kVA oleviin kolmivaiheisiin laitoksiin laitteiden voidessa ylittää 16 A nimellisvirran.

Jännitettä mitattaessa ominaisuudet jaotellaan jatkuviin ilmiöihin ja jännitehäiriöihin. Jatkuvat ilmiöt ovat poikkeamia nimellisarvosta (230 V), mitkä esiintyvät koko ajan. Jännitehäiriöt ovat äkillisiä ja merkittäviä poikkeamia jännitteen käyrämuodossa.

Generaattori ei saa katkaista jännitettä, kun liitoskohdan jännite ja taajuus pysyvät taulukossa 4 ilmoitettujen jatkuvan toiminta-alueen rajojen sisällä. Taajuuden noustessa tai laskiessa rajojen ulkopuolelle määritellään standardissa hetkelliset rajat ali- ja ylitaajuudelle ja vähimmäisajanjakso, jonka generaattorin täytyy toimia rajojen sisällä ennen kuin se kytkeytyy irti verkosta.

TAULUKKO 4 Vaadittavat jatkuvat ja hetkelliset ominaisuudet generaattorin verkossa pysymiselle (22, s. 15)

Jatkuva toiminta-alue	
Jännite	195,5 V...253 V
Taajuus	49 Hz...51 Hz
Hetkellisen ali-/ylitaajuuden vaste	
47,5 Hz...49 Hz	30 min
51 Hz...51,5 Hz	30min

Laitoksen suojauksen perustana toimivat yli- ja alijännitesuojaukset, yli- ja alitaajuussuojaukset sekä ylivirtasuojaukset. Tarpeelliset suojaukset suunnitellaan jakeluverkkoyhtiön kanssa, jotta jakeluverkon vaatimukset täyttyvät. Suojauksen tarkoitus on irrottaa voimala verkosta, jos jokin aseteltu parametri ylittää tai alittaa asetteluarvon. Suojaukset takaavat myös sen, että tehoa ei syötetä verkkoon ennen kuin vaadittavat raja-arvot ovat olleet sallituissa rajoissa tietyn minimiajan, joka on vaihtojännitegeneraattorille 60 sekuntia (22, s. 23; 23, s. 40.)

Jos jakeluverkon haltija ei ole antanut suojaustoimintojen asetusarvoja, käytetään standardissa määriteltäviä oletusasetuksia. Suojauksasetuksissa määritellään liitäntälaitteen suojauksen toiminta-ajan sekä katkaisuajan maksimit. Toiminta-ajalla tarkoitetaan ajanjakson pituutta vian ilmenemisestä (eli kynnyksiarvon ylittymisestä) suojaustoiminnon laukeamiseen. Katkaisuaika on suojausjärjestelmän ja katkaisijan toiminta-aikojen summa. Eurooppalaisen yleisstandardin lisäksi kansallinen lainsäädäntö saattaa asettaa lisävaatimuksia edellä mainituille parametreille. Taulukossa 5 on yhdistettynä yleisstandardin vaatimukset Suomen tarkempiin vaatimuksiin.

TAULUKKO 5 Eurooppalaisen yleisstandardin vaatimukset yhdistettynä Suomen lisävaatimuksiin suojauksen toteuttamiselle (22)

Parametri	Maksimi katkaisuaika	Maksimi toiminta-aika	Laukaisuarvo
Ylijännite - porras 1	3 s	0,2 s	230 V + 10 %
Ylijännite - porras 2	0,2 s	0,1 s	230 V + 15 %
Alijännite	1,5 s	0,2 s	230 V - 15 %
Ylitaajuus	0,5 s	0,2 s	51,5 Hz
Alitaajuus	0,5 s	0,2 s	47,5 Hz
Verkkojännitteen katoaminen (saarekekäyttö)	Toiminta-aika enintään 5 s		

Verkkojännitteen kadotessa eli *Loss of Mains* -tilanteessa täytyy huolehtia siitä, ettei generaattori jää yksin syöttämään saarekettä. Tästä huolehtii LoM-suojaukset, jonka toiminta-aika saa olla Suomessa enintään 5 sekuntia. Tavalliset taajuus- ja jännitereleetit eivät aina havaitse LoM-tilannetta, joten voidaan käyttää ROCOF-relettä, joka havaitsee nopeat taajuuden vaihtelut. Suomessa laitteiston tulee kyetä jatkamaan toimintaansa taajuuden nopeuden muutoksen ollessa alle 2 Hz/s. (22; 23, s. 42.)

5 TARKASTUSLISTA

Tässä työssä tehtiin tarkastuslista, josta käyttöönottaja pystyy käymään läpi vaihe vaiheelta laitteiston ja varmistamaan toiminnan. Tarkastuslistan sisältämät kohteet rajattiin konttirakenteen sisäpuolelle, eli rajapinnan ulkopuolelle jäävät hakkeen vastaanotto-asema kuljettimiseen ja lämmityksen toisiopuoli. Rajaus tehtiin, sillä kontin ulkopuoliset laitteet vaihtelevat kohteesta riippuen.

Työssä pyrittiin kokoamaan tarkastustoimenpiteet yhteen dokumenttiin, joka toimii samalla tarkastuspöytäkirjana yritykselle. Apuna käytettiin laitteiston komponenttien valmistajien ohjeistuksia, Gasekin henkilöstön asiantuntemusta ja aiempien projektien materiaalia yrityksen tietokannasta. Tarkastuslistan tekoa vaikeutti se, että voimala oli vielä suunnitteluvaiheessa ja jotkin laiteratkaisut olivat vielä varmistamattomia. Tämän takia lista päivittyy vielä tulevaisuudessa, kun kokonaisuus on valmis.

Kuvassa 9 on esitetty pöytäkirjadokumentin ensimmäinen sivu, johon kuitataan testauskokonaisuudet suoritetuiksi. Dokumentista puuttuu sähköurakoitsijan tekemä mittauspöytäkirja, joka voidaan liittää tarkastuspöytäkirjaan muodostaen siten täydellisemmän käyttöönottodokumentin. Kun kaikki testit ovat suoritettu onnistuneesti, tarkastuspöytäkirjan hyväksyy siihen valtuutettu henkilö, ja laitoksen koeajo varsinaisessa tuotannossa voidaan aloittaa.

Kohde _____
 Osoite _____
 Projekti nro _____

Hyväksyjä _____
 Päivämäärä _____

Sisälllys

	OK
1. I/O-testaus	
2. Laitteiston lukitustoiminnot	
3. Ohjelmistolliset lukitukset ja hälytykset	
4. Henkilöturvallisuuslaitteet	
5. Mekaniikka	

Pvm	Kuittaus

<i>Koeajon aikana tehtävät tarkastukset</i>	OK
Hätäseis koeajossa	

Pvm	Kuittaus

KUVA 9 Tarkastuslistan sisällysluettelo

Keskeinen osa tarkastusprosessia on testata instrumentoinnin ja toimilaitteiden toimivuus. Instrumentit ovat tehdaskalibroituja, joten ne toimivat yleensä moitteetta. Testauksessa kuitenkin dokumentoidaan lähtötilanteen mittaustulokset, ja niitä voidaan vertailla myöhemmin laaduntarkkailussa saatuihin mittaustuloksiin.

Pöytäkirjassa on listattu kaikki mittalaitteet positionneen ja mittaalueineen. I/O-testauksen alussa tarkastaja kuittaa nimensä ja testauspäivämäärän tarkastuskerran kohdalle. Mittalaitteen testauksen jälkeen tarkastaja kuittaa merkinnän oikean tarkastuskerran kohdalle kuvan 10 mukaisesti.



Tarkastus	Pvm ja kuittaus
1.	19.4.2017 Erkki Esimerkki
2.	
3.	
4.	
5.	

Positio	Instrumentti/toimilaite	Mittausalue	Tulos	Tarkastus				
	Kaasutin			1.	2.	3.	4.	5.
PT 10	Yläosan paine	+200..-200 Pa	5 Pa	X				

KUVA 10 Ote I/O-testauspöytäkirjasta

Paine- ja lämpötilamittausinstrumenttien näyttämät lukemat tarkistetaan ja kirjataan pöytäkirjaan. Säätoventtiilien ja rajakytkimien toimivuus testataan ajamalla asento haluttuun arvoon käyttöliittymän avulla ja tarkistamalla, että asento vastaa ohjearvoa. Pneumaattisten toimilaitteiden toimintasuunta tarkistetaan, eli katsotaan, onko venttiili halutussa asennossa paineen ollessa kiinni. Työssä todettiin painelaitteiden jäävän painelaittedirektiivin määrittelemien rajojen alapuolelle, joten koeponnistusta ei tarvitse suorittaa.

Laitteiden toiminta testataan lukitustilanteessa, eli varmistetaan, että tarvittavat venttiilit sulkeutuvat ohjearvojen ylittyessä tai hätäseispainikkeita painaessa. Ohjelmistollisten lukitustoimintojen testauksessa todennetaan, että ohje-arvojen ylittyessä hälytys aktivoituu. Häkävaroittimen toimivuus todennetaan häkätestin avulla, eli kaasunilmaisimeen päästetään hiilimonoksidia esimerkiksi kaasupullosta.

Putkistot tarkastetaan päällisin puolin, eli niiden eristykset ja eristepellitysten kiinnitys sekä laippojen tiivisteet tarkastetaan silmämääräisesti. Pulttien kiristys tarkistetaan putkiyhteistä ja kaasuttimen laipoista. Ruuvikuljettimien, sulkusyöttimien ja tuhkakuljettimien moottorien pyörimissuunta ja räjähdysluukkujen asennus tarkastetaan.

Tarkastuslistaa voitaisiin kehittää järjestämällä tarkastettavat kohteet tehtävän etenemisen mukaiseen järjestykseen, jolloin tarkastusprosessi luultavasti nopeutuisi. Etenemisjärjestys olisi helposti tehtävissä dokumentoimalla se tarkastuksen yhteydessä. Tätä ei kuitenkaan voitu vielä toteuttaa, sillä laitoksen kasaamisen ja opinnäytetyön aikataulut eivät sopineet yhteen.

6 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli luoda tarkastuspöytäkirja pien-CHP-voimalan käyttöönottovaiheen tarkastusprosessiin. Lisäksi työssä pohdittiin voimalaitoksen verkkoon liittymistä, suojausta sekä kelpuutusta koskevia viranomaissäädöksiä. Käyttöönottovaiheen tarkastuslistan suunnittelussa käytettiin voimalaitoskomponenttien ohjeistuksia, Gasek-henkilöstön asiantuntemusta ja aiempien projektien materiaalia yrityksen tietokannasta.

Tutkitut viranomaissäädökset olivat joko eurooppalaisia tai kansainvälisiä yleisesti käytettyjä standardeja, joiden lisäksi ainakin generaattorin suojausasetuksissa noudatetaan myös suomalaisen standardin asettamia lisävaatimuksia. Huomattiin, että varsinkin turvallisuuteen liittyville laitteille ja sovelluksille tulee tehdä asianmukaiset testaukset standardien mukaisesti ja dokumentoida nämä toimenpiteet. Muista käyttöönoton yhteydessä tehtävistä tarkastustoimenpiteistä yhdenmukaista tietoa löytyi niukasti. Lähtökohtana käyttöönototarkastuksessa on kuitenkin laitoksen toiminnan varmistaminen.

Työn tuloksena syntyi tarkastuspöytäkirja, jota käytetään ennen voimalaitoksen toimitusta asiakkaalle. Tarkastuspöytäkirjaan tulee vielä mahdollisesti lisäyksiä projektin edetessä, kun esimerkiksi ohjelmistolliset toiminnot on saatu viimeistelyä. Koska laitosta ei kasattu vielä opinnäytetyön aikana, ei tarkastuslistaa päästy testaamaan käytännössä. Käytännön testaaminen olisi auttanut dokumentin kehittämistä, esimerkiksi edesauttanut tarkastustoimenpiteiden järjestämistä oikeaa tilannetta vastaavaan etenemisjärjestykseen.

LÄHTEET

1. Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes 2009. Raportti. Saatavissa: <http://wiki.gekgasifier.com/f/Review+of+Biomass+Gasification+Technologies.NNFCC.Jun09.pdf>. Hakupäivä 29.1.2018.
2. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems 1988. Solar Energy Research Institute. Saatavissa: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/3022.pdf>. Hakupäivä 22.4.2018.
3. Badeau, Jean-Pierre – Levi, Albrecht 2009. Biomass Gasification. New York: Nova Science Publishers, Inc.
4. Lämmön avulla jalostaminen - Pyrolyysi. Projektijulkaisu. Kokkola: Jyväskylän yliopisto, Kokkolan yliopistokeskus Chydenius. Saatavissa: https://ciweb.chydenius.fi/project_files/HighBio%20projekti%20INFO/INFO%20HighBio%20F27.pdf. Hakupäivä 22.4.2018.
5. ALL Power Labs. How Gasification Works. Saatavissa: <http://www.allpowerlabs.com/gasification-explained>. Hakupäivä 5.3.2018.
6. Hiltunen, Ilkka 2013. Pienen kokoluokan kaasutustekniikan kehityspolku. VTT seminaarimateriaali. Saatavissa: http://www.vtt.fi/Documents/01_Pienen_kokoluokan_kasutustekniika.pdf. Hakupäivä 22.4.2018.
7. Lassi, Ulla – Wikman, Bodil 2011. Biomassan kaasutus sähköksi, lämmöksi ja biopolttoaineiksi. Projektijulkaisu. Kokkola: Jyväskylän yliopisto, Kokkolan yliopistokeskus Chydenius.
8. Simell, Pekka 2013. Kaasutuksen tervat ja tervojen pesu. VTT seminaarimateriaali. Saatavissa: http://www.vtt.fi/Documents/03_Kaasutuksen_tervat_ja_tervojen_pesu.pdf. Hakupäivä 22.4.2018.

9. Haselbacher, Peter – Lettner, Friedrich – Timmerer, Helmut 2007. Biomass Gasification – State of the art description. Saatavissa: https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/gasification_guide_biomass_gasification_state_of_the_art_description.pdf. Hakupäivä 22.4.2018.
10. Uusiutuvilla tuotettiin 45 % sähköstä ja 57 % lämmöstä. Tilastokeskus 2017. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/salatuo/2016/salatuo_2016_2017-11-02_tie_001_fi.html. Hakupäivä 22.4.2018.
11. CHP-voimalan käyttöohje. 2012. Sisäinen dokumentti. Gasek Oy.
12. Vihanninjoki, Vesa 2015. Hajautettu energiantuotanto Suomessa – Nykytila ja tulevaisuus sekä vaikutukset ilmanlaatuun. Suomen ympäristökeskus SYKE.
13. Karjalainen, Timo 2012. Pienimuotoisen lämmön ja sähkön yhteistuotannon tilannekatsaus – laitteet ja niiden käyttöönotto. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/7436/Pienimuotoisen lammon ja sahkon yhteistuotannon tilannekatsaus laitteet ja niiden kayttoonotto.pdf](https://www.motiva.fi/files/7436/Pienimuotoisen_lammon_ja_sahkon_yhteistuotannon_tilannekatsaus_laitteet_ja_niiden_kayttoonotto.pdf). Hakupäivä 5.5.2018.
14. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto biopolttoaineilla 2011. Tutkimusraportti. Saatavissa: <http://www.doria.fi/handle/10024/99377>. Hakupäivä 5.5.2018.
15. SFS 4614. 2000. Teollisuuden kone- ja laitehankinnat. Asennustarkastus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
16. Sähkölaitteistojen asennus ja käyttöönotto. 2017. Tukes. Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Sahkolaitteistot/Asennus-ja-kayttoonotto>. Hakupäivä 5.5.2018.
17. SFS-EN ISO13849-2. 2012. Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 2: Kelpuutus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
18. 2014/68/EU. 2014. Painelaitedirektiivi. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32014L0068&from=fj>. Hakupäivä 5.5.2018.

19. Heinonkoski, Risto 2013. Kone- ja prosessiautomaation kunnossapito. Helsinki: Opetushallitus.
20. SFS-EN ISO 13849-1. 2016. Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 1: Yleiset suunnitteluperiaatteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
21. Opas sähkön pientuottajalle. 2012. Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/kaikki_julkaisut/opas_sahkon_pientuottajalle.9236.shtml. Haku-päivä 5.5.2018.
22. SFS-EN 50438. 2015. Tekniset vaatimukset pienjänniteverkon kanssa rinnan toimiville mikrogeneraattoreille. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
23. Lehto, Ina 2009. Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. Diplomityö. Helsinki: Teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan laitos.