

Touko Marjoniemi

MIKRO-KOKOLUOKAN HÖYRYVOIMALAITOS

Pienen CHP-laitoksen suunnittelu, valmistus ja tuotekehitys.

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma
Lokakuu 2019**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Lokakuu 2019	Tekijä/tekijät Touko Marjoniemi
Koulutusohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka		
Työn nimi MIKRO-KOKOLUOKAN HÖYRYVOIMALAITOS. Pienen CHP-laitoksen suunnittelu, valmistus ja tuotekehitys		
Työn ohjaaja Aki Suokko		Sivumäärä 91
<p>Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää ja toteuttaa höyryturbiiniin perustuva mikro-CHP laitos. Voimalaitoksen kehitystyötä varten perustettiin uusi yritys ja sen kehitystyölle saatiin EU:n Leader rahoitusta.</p> <p>Voimalaitos perustuu höyrykiertoprosessiin, jossa höyrykattilalla tuotetaan höyryä turbiinille. Höyryn tuottamiseen tarkoitettu laitteisto on kehitetty juuri kyseistä laitosta varten. Energianlähteenä höyryprosessissa toimii hake tai pelletti, joka kaasutetaan ja poltetaan höyrykattilan kaasupolttimessa. Generaattorin sähköteho on noin 1 kW ja lämmöntalteenoton lämpöteho 5-10 kW.</p> <p>Voimalaitoksesta valmistettiin toimiva prototyyppi ja sitä testiajettiin polttoaineenkulutuksen ja hyötysuhteen määrittämiseksi. Testitulokset analysoitiin ja laitoksen kannattavuutta arvioitiin.</p> <p>Tulokset viittaavat siihen, että höyryvoimalaitos voi toimia näin pienessä kokoluokassa, mutta sähköntuotannon hyötysuhdetta on parannettava jatkokehityksellä.</p>		
Asiasanat CHP-laitos, höyryturbiini, puukaasu, voimalaitos.		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date October 2019	Author Touko Marjoniemi
Degree programme Electrical and automation engineering		
Name of thesis STEAM TURBINE MICRO-CHP PLANT. Design, manufacture and product development of a small CHP plant		
Instructor Aki Suokko	Pages 91	
<p>The aim of the thesis was to develop and implement a steam turbine-based micro-CHP plant. A new company was set up for the development of the plant and its development was funded by the EU Leader funding.</p> <p>The power plant is based on a steam cycle process, where a steam boiler is used to produce steam for the turbine. The equipment has been developed specifically for this plant. The energy source is wood chips or pellets which are gasified and burned in a gas burner of the steam boiler. The electrical power of the generator is about 1 kW and the heat recovery heat output is 5-10 kW.</p> <p>A working prototype was made and tested with test runs to determine fuel consumption and efficiency. The test results were analyzed and the plant's profitability was evaluated.</p> <p>The results suggest that a steam power plant can operate on such a small scale, but the efficiency of electricity generation needs to be improved with further development.</p>		
Key words CHP plant, powerplant, steam turbine, woodgas.		

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 VOIMALAITOKSEN TOIMINTA	2
2.1 Puun kaasutus	3
2.2 Stirling-moottori	9
2.3 Höyryprosessin toiminta	10
2.4 Stanley Steamer	14
3 LAITTEISTON VALMISTUS	18
3.1 Kontin muutostyö	18
3.2 Häkäpönttö	22
3.3 Stirling-moottori	27
3.4 Höyryturbiini	41
3.5 Höyrylaitteisto	49
3.6 Aurinkopaneelisto	73
4 TESTIAJOT	78
5 KANNATTAVUUS	89
6 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	90
LÄHTEET	92
KUVIOT	
KUVIO 1. Puukaasun esimerkinomainen koostumus	6
KUVIO 2. Voimalaitoksen toimintakaavio	11
KUVIO 3. Voimalan höyrykierron t,s-piirros	12
KUVIO 4. Stanley Steamer auton höyrylaitteisto	15
KUVIO 5. Höyrynpaine (vihreä, baareina) ja lauhduttimen alipaine (sininen, millibaareina)	82
KUVIO 6. Tehokäyrä	82
KUVIO 7. Savukaasun lämpötila ennen (sininen) savukaasuvaihdinta, ja jälkeen (ruskea)	83
KUVIO 8. Jäähdytysveden lämpötila ennen (harmaa) lauhdutinta ja sen jälkeen (keltainen), sekä savukaasuvaihtimen jälkeen (sininen)	83
KUVAT	
KUVA 1. Voimalaitoksen 3D-mallinnus	2
KUVA 2. Häkäpöntön poikkileikkauskuva	7
KUVA 3. Nykyaikaisen häkäpönttöauton kaasutuslaitteisto	8
KUVA 4. Alpha-tyyppinen Stirling-moottori	9
KUVA 5. Stanley Steamer	15
KUVA 6. Merikontin siirtoa kurottajan ja irrotettavien pyörien avulla	18
KUVA 7. Kontin seinät avattuna	19
KUVA 8. Lattiaeristys	20
KUVA 9. Seinien eristys	21

KUVA 10. Vanerointi	21
KUVA 11. Valmis pannuhuone	22
KUVA 12. Häkäpöntön mallinnus ja poikkileikkaus	23
KUVA 13. Häkäpöntön osat vasemmalta oikealle: polttoainesäiliö, tulipesä, arina ja tuhkatila	24
KUVA 14. Tulipesä	24
KUVA 15. Pöntön kokoonpano	25
KUVA 16. Puukaasuliekki	25
KUVA 17. Häkäpönttöauton soihtu	26
KUVA 18. Stirling-moottorin mallinnus	27
KUVA 19. 3D-tulostetut valumallit	28
KUVA 20. Mallit ennen betoniin valamista	28
KUVA 21. Valumuottien poltto	30
KUVA 22. Muotit valmiina metallivalua varten	31
KUVA 23. Alumiinin sulatus nestekaasuahjossa	31
KUVA 24. Kappaleet muotin rikkomisen jälkeen	32
KUVA 25. Kannen koneistus sorvissa	32
KUVA 26. Kaikki valetut osat koneistettuna	33
KUVA 27. Kampiakselin päätykappale	34
KUVA 28. Moottorin runko ja sylinterit	35
KUVA 29. Sylinterinkannet ja liukulaakerit	35
KUVA 30. Teflonliukulaakeri	35
KUVA 31. Vauhtipyörä ja kampiakseli	36
KUVA 32. Lämmönvaihtimien valmistus	37
KUVA 33. Vasemmalla kuuma lämmönvaihdin, oikealla kylmä	38
KUVA 34. Valmis moottori paikoillaan	39
KUVA 35. Grafiittimännän sorvausta	39
KUVA 36. Uudet männät paikoillaan	40
KUVA 37. Höyryturbiinin tietokonemallinnus	42
KUVA 38. Turbiinin 3D-tulostettu malli	44
KUVA 39. Kolme muovista valumallia	45
KUVA 40. Valmiit alumiiniset turbiinin osat	45
KUVA 41. Turbiinin kannen suoristus ja laakerisovitteen sorvaus	46
KUVA 42. Turbiinikokoonpano ja generaattorin kiinnitys	46
KUVA 43. Roottorin kiekot	47
KUVA 44. Roottori paikoillaan	47
KUVA 45. Suuttimen sorvaus	48
KUVA 46. Turbiini paikoillaan ensimmäistä testiajoa varten	48
KUVA 47. Höyryvoimalaitteiston tietokonemallinnus	50
KUVA 48. Tulipesä ja tulistinkierukka	52
KUVA 49. Valmis paloilman esilämmittimen lämmönvaihdin	52
KUVA 50. Lämmönvaihdin sisältä, puolet putkista paikoillaan	53
KUVA 51. Syöttöveden esilämmityskierukka	53
KUVA 52. Kaikki lämmönvaihtimet valmiina	54
KUVA 53. Höyrykattilan vuototestausta paineilmalla	55
KUVA 54. Höyrykattilan koeponnistus vedellä	55
KUVA 55. Tulenkestävä ja eristetty jalusta	56
KUVA 56. Pääkomponentit paikoillaan	57
KUVA 57. Turbosta tehty savukaasupuhallin	58
KUVA 58. Savukaasupuhallin paikoillaan	58
KUVA 59. Savupiippu ja paloilman imuputki	59

KUVA 60. Tiivisteiden tekoa varten investoitu laserleikkuri.....	59
KUVA 61. Laserleikatut kumitiivisteet	60
KUVA 62. Voimalan jäähdytyslaitteisto	61
KUVA 63. Päähöyrytukki.....	62
KUVA 64. Kattilan pinta-anturi.....	62
KUVA 65. Lauhdutin.....	64
KUVA 66. Lauhduttimen takaiskuventtiili	65
KUVA 67. Syöttövesi- ja alipainepumppu	67
KUVA 68. Savukaasu-vesi lämmönvaihdin	68
KUVA 69. Pääosin eristetty kattilakokonaisuus.....	69
KUVA 70. Verkkovirtakytkennät	70
KUVA 71. Automaatiokytkennät	71
KUVA 72. Invertteri ja kuormavastus	72
KUVA 73. Keräimen runko ja tolppa	73
KUVA 74. Paneelien kiinnitys apurunkoon maassa	74
KUVA 75. Valmiin paneeliston nosto paikoilleen kurottajalla	74
KUVA 76. Sähköauton lataus aurinkopaneeleilla	75
KUVA 77. Vesi- ja höyryputkitukset valmiina ensimmäiseen testiajoon	78
KUVA 78. Kattilan lämmitystä nestekaasulla	79
KUVA 79. Turbiinin ja lauhduttimen yhdysputki	79
KUVA 80. Arduinon näyttö testiajon aikana.....	80
KUVA 81. Invertterin tehon mittaus.....	80
KUVA 82. Höyrynpaineet kohdillaan	81
KUVA 83. Uuden turbiinin roottori.....	86
KUVA 84. Uusi turbiini paikoillaan	87

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä oli tarkoituksena kehittää uudenlainen tuote, höyryturbiiniin perustuva mikro-kokoluokan CHP-voimalaitos. Laitoksen pienellä, noin 1 kW:n sähköteholla ja 5-10 kW:n lämpöteholla pystytään kattamaan keskisuuren yrityksen tai suuren omakotitalon sähkön ja lämmön tarve. Vastaavia tuotteita ei ole markkinoilla kyseisessä kokoluokassa, eikä varsinkaan samaa tekniikkaa käyttäviä.

Voimalaitoksen suunnittelutyö aloitettiin talven 2017-2018 aikana. Voimalaitoksen toteutus alkoi keväällä 2018. Alun perin työ oli tarkoitus tehdä kokonaisuudessaan kesän 2018 aikana. Työssä kohdattujen haasteiden vuoksi työ kuitenkin venyi monen vuoden mittaiseksi kehitystyöksi. Kesällä 2019 opinnäytetyön palautushetkellä voimalaitos on lähes toimintakunnossa, mutta sähköhyötysuhteen parantaminen vaatii vielä jatkokehittelyä.

Alun perin voimalaitoksen voimakoneeksi suunniteltiin käytettäväksi Stirling-moottoria. Moottoria kehiteltiin ja siitä valmistettiin toimiva prototyyppi. Moottoria ei kuitenkaan saatu toimimaan kunnolla valmistusteknisten haasteiden vuoksi, jolloin voimakoneeksi päätettiin vaihtaa höyrykiertoprosessiin perustuva höyryturbiini. Stirling-moottorin kehitystyö päätettiin kuitenkin sisällyttää opinnäytetyöhön, koska sillä oli suuri merkitys työn kulkuun.

Opinnäytetyön suuren laajuuden ja käytännönläheisyyden vuoksi opinnäytetyön ulkoasu on hieman päiväkirjatyylinen. Asiat on yritetty esittää siinä järjestyksessä kuin ne on tehty selkeyden parantamiseksi. Työn laajuudesta johtuen monet laskelmat ja rakentamistyön ohessa tehdyt johtopäätökset on jouduttu jättämään mainitsematta.

Voimalaitoksen ja opinnäytetyön tekemistä varten perustettiin oma yritys ja laitoksen kehitystyöhön on saatu tukea Euroopan Unionista. Jos laitos valmistumisensa ja testiajojen jälkeen todetaan toteutuskelpoiseksi tuotteeksi, voidaan laitoksien valmistamisella aloittaa liiketoiminta.

2 VOIMALAITOKSEN TOIMINTA

Laitos rakennetaan kokonaisuudessaan 6 m:n merikonttiin. Kontti jaetaan kahteen yhtä suureen osaan. Toisessa päässä on 10 m³:n hakesiilo ja loppuosassa sijaitsee eristetty konehuone jossa moottori, kaasutin ja automaatiolaitteet sijaitsevat. Hake kaasutetaan myötävirtakaasuttimella ja poltetaan kaasupolttimella höyrykattilassa. Höyryturbiini muuttaa höyryn lämpöenergiaa liike-energiaksi, joka pyörittää sähkögeneraattoria. Voimalaitos kytketään kiinteistön sähköverkkoon kolmivaihesyötöllä ja lämmin vesi hyödynnetään vesikierron avulla. Laitoksen ollessa varsin pieni päästään 10 m³:n hakesiilolla helposti 3-4 kuukauden täyttöväliin.



KUVA 1. Voimalaitoksen 3D-mallinnus

Laitoksessa haketta ei polteta suoraan hakepolttimessa, vaan puulastut kaasutetaan ensin puukaasuksi, ja kaasu poltetaan kaasupolttimessa. Hyöty suoraan polttoon verrattuna on kaasun polttamisen helpompi hallinta, joka myös alentaa syntyviä päästöjä. Lisäksi kaasuttimelle kelpaa huonompilaatuinenkin polttoaine, jolloin polttoaineen hankinnassa voidaan tehdä merkittäviä kustannussäästöjä.

Lähtökohta laitoksen pienestä koosta huolimatta on se, että sillä pystytään kattamaan kiinteistön kaikki sähkön- ja lämmön tarve. Suomessa sähkön pientuottajan kannattaa lähtökohtaisesti aina käyttää tuottamansa sähkö itse sen sijaan, että syöttäisi sen valtakunnan verkkoon. Näin 1kW:n sähköteho valittiin lähtökohdaksi, sillä se riittää kattamaan pääosan useimpien talouksien sähköntarpeesta.

Pääasiallisena polttoaineena laitos käyttää haketta, mutta myös pellettiä, kuorimursketta tai jopa viljaa on mahdollista käyttää polttoaineena. Polttoaine kaasutetaan myötävirtakaasuttimessa ja tuotettu puukaasu poltetaan höyrykattilassa. Höyryturbiini muuttaa höyryn lämpöenergiaa liike-energiaksi, joka pyörittää sähkögeneraattoria.

2.1 Puun kaasutus

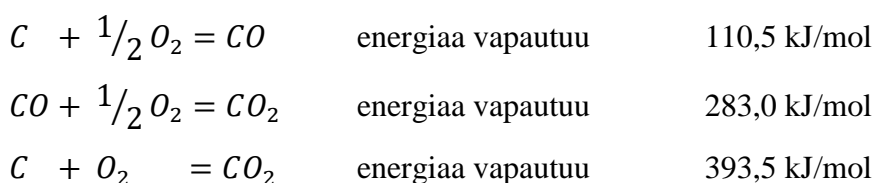
Puun kaasutustekniikka on parhaiten tunnettu toisen maailmansodan aikana käytetyistä häkäpönttöautoista. Kaasutustekniikan historia alkaa kuitenkin jo 1800-luvun alusta, jolloin raudan valmistuksessa sivutuotteena syntyvää masuunikaasua alettiin hyödyntää energianlähteenä. Joissakin tehtaissa rakennettiin kaasulla käyviä höyry- ja polttomoottoreita koneiden voimanlähteeksi. Kaasua alettiin käyttää myös valaistus- ja lämmityskäyttöön kaupungeissa. Kysynnän kasvaessa kaupunkikaasua alettiin tuottaa masuunien lisäksi kivihiltä käyttävillä kaasutuslaitteilla. Ensimmäisen maailmansodan aikana öljyn saanti Euroopassa vaikeutui. Öljyn korvikkeeksi kehitettiin pieniä kaasutuslaitteita, jotka kävivät enimmäkseen kivihillellä. Tällöin polttomoottoreiden käyttö oli vielä vähäistä, eikä kaasutustekniikan käyttö ollut vielä kovin laajamittaista. (Mikkonen 2012.)

Toisen maailmansodan aikana polttoainepula oli koko Euroopassa vielä suurempi kuin 1. maailmansodassa ja häkäpönttöautoja alettiin käyttää kaikkialla Euroopassa. Keski-Euroopassa autojen polttoaineena käytettiin edelleen paljon kivihiltä, mutta Pohjoismaissa pääasiassa puuta ja puuhiltä. Sotavuosina Suomessa varustettiin liikenteeseen noin 42 000 kaasutuslaittein varustettua ajoneuvoa, näistä suurin osa oli kuorma- ja linja-autoja. Kaikista Suomen moottoriajoneuvoista yli puolet kulki puulla. Sodan päätyttyä kaasutuslaitteet riisuttiin nopeasti pois käytöstä öljyn tuonnin elvyttyä. Useimmat häkäpöntöt kierrätettiin romumetallina tai ne päättyivät uusiokäyttöön esimerkiksi saunan kiukaiksi. Nykypäivään sota-aikaisia häkäpönttöautoja on säästynyt vain joitakin kymmeniä joista ajokuntoisia on vain muutama. Varsinaisessa liikennekäytössä olevia häkäpönttöautoja on Suomessa nykyisin noin parikymmentä. (Mikkonen 2012.)

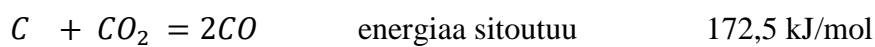
Puun kaasutus on sekä kemiallisesti että käyttötarkoituksellisesti hyvin samanlainen prosessi kuin raa-kaöljyn jalostus kevyiksi moottoripolttoaineiksi. Molemmissa prosesseissa pitkäketjuiset hiilivedyt pilkotaan lämmön avulla pienemmiksi ja samalla epäpuhtaudet erotellaan pois. Puuta kaasutettaessa lähtöaineita ovat ligniini, hemiselluloosa ja selluloosa, joista puu pääasiassa koostuu. Puun kaasutuksessa - kuten nimikin kertoo - kiinteät lähtöaineet muutetaan kaasumaiseen muotoon. Kaasutuksen lopputuotteita ovat häkä, vety, metaani, hiilidioksidi ja vesihöyry sekä pieni määrä epäpuhtauksina pidettyjä komponentteja.

Puun runkoaineksesta vajaa puolet koostuu selluloosasta. Selluloosa on pitkäketjuinen polymeeri, joka muodostaa puun kantavan rakenteen. Selluloosa koostuu hiilestä, vedystä ja hapestä. Sen rakenneosan kemiallinen kaava on $(C_6H_{10}O_5)_n$. Selluloosa palaa puhtaasti tuottaen vain hiilidioksidia ja vettä. Toiseksi yleisin aine puuaineksessa on ligniini. Ligniini on joukko erilaisia polymeerejä, jotka täyttävät puuaineksen soluseinämien välit ja sitovat puuaineksen yhteen liiman tavoin. Ligniini muodostuu pääosin hiilivedyistä, mutta se sisältää myös mineraaleja. Nämä mineraalit muodostavat puun poltossa syntyvän tuhkan. Monet sen polymeereistä sisältävät myös aromaattisia hiiliyhdisteitä, jotka palaessaan epätäydellisesti muodostavat noki- ja tervayhdisteitä. Erityisesti raskaat hiilivedyt eli tervayhdisteet ovat haitallisia tuotteita tuotekaasussa, sillä ne ovat varsin syövyttäviä. Lisäksi niillä on taipumus erkaantua kaasusta erilaisissa yksikköprosesseissa, jolloin ne likaavat ja jumiuttavat kaasun kanssa kosketuksissa olevia mekaanisia osia. Tervanmuodostumisen välttämiseksi kaasutusprosessin lämpötilan tulisi olla riittävän korkea tervayhdisteiden hajoamiseen. (Mikkonen 2012.)

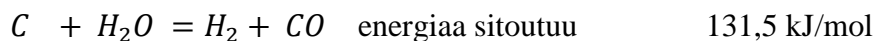
Kaasutusprosessissa puuta ikään kuin poltetaan ilma-alijäämällä, jolloin puun palamistuotteet jäävät suureksi osaksi hapettumatta. Prosessin keskeisin reaktio on hiilen osittainen hapettuminen. Hiilen palamisesta vapautuvasta energiasta noin 72 % vapautuu vasta toisen happiatomin liittyessä hiileen, mikä mahdollistaa kaasutusprosessin hyvän hyötysuhteen ja tuotekaasun käytön polttoaineena. Osa hiilestä reagoi aina hiilidioksidiksi asti tuottaen samalla kaasuttamiseen tarvittavaa lämpöä, mutta vastaavasti kaasutusprosessissa muodostuu myös vety-yhdisteitä, joilla on lämpöarvoa. Näin kemiallinen hyötysuhde voi kaasutusprosessissa olla yli 72 %.



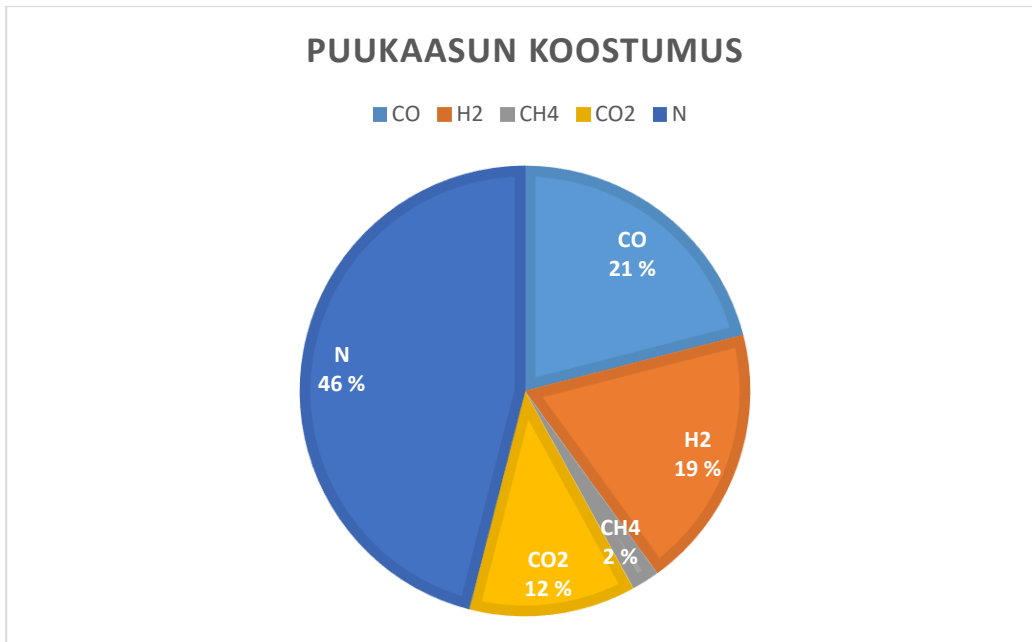
Kaasutusprosessi on lämpötaloudeltaan itsestään säätyvä. Monet reaktiot voivat tapahtua molempiin suuntiin reaktion lämpötilasta riippuen. Matalassa lämpötilassa hiilen hapettumista hiilidioksidiksi tapahtuu enemmän, jolloin lämpötila nousee. Korkeassa lämpötilassa taas hiilidioksidi reagoi hiilen kanssa muodostaen hiilimonoksidia, jolloin lämpöenergiaa sitoutuu kemialliseksi energiaksi ja lämpötila laskee. Käytettäessä polttoaineena puuta, on energiatase voimakkaasti alijäämäinen, jolloin tuotekaasuun jää runsaasti hiilidioksidia. Puu- tai kivihiiltä käytettäessä energiatase on ylijäämäinen ja kaasun hiilidioksidipitoisuus on pieni. Hiilikaasuttimissa on joskus käytetty pakokaasun takaisinkierrätystä, jonka tarkoituksena on ollut saada reaktioon ylimääräistä hiilidioksidia, joka pelkistyessään sitoo ylimääräistä lämpöenergiaa parantaen laitteiston lämpötaloutta. (Mikkonen 2012.)



Hiili kykenee irrottamaan hapen myös vedeltä, jolloin reaktiotuotteena syntyy vetyä ja hiilimonoksidia.

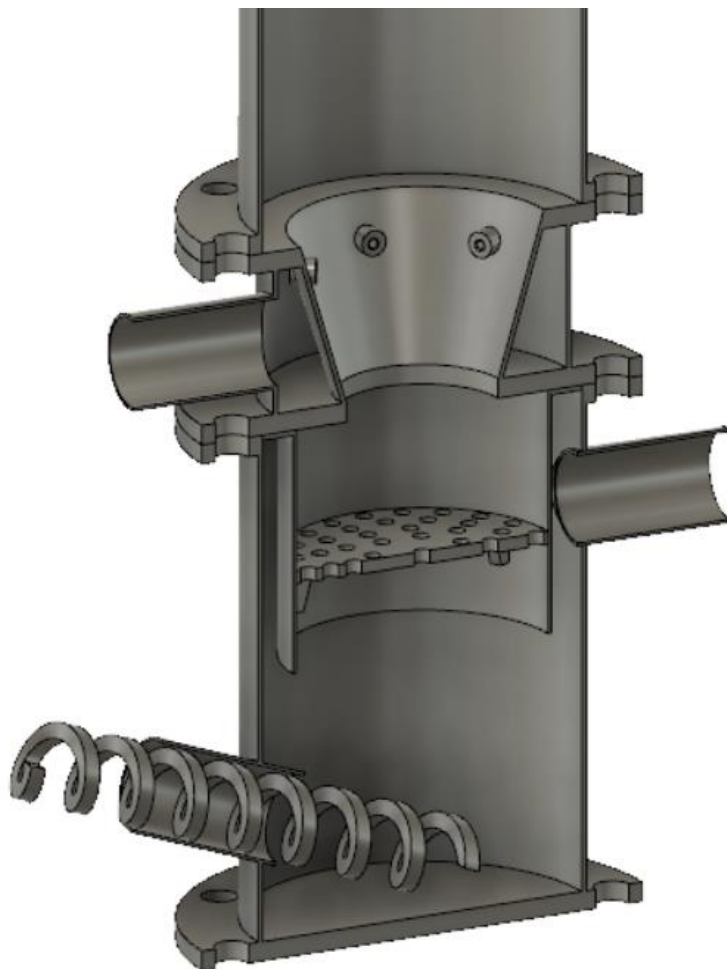


Perinteisen häkäpöntön kemiallinen hyötysuhde on noin 75-85 %. Puun sisältämästä kemiallisesta energiasta valtaosa siis päätyy syntyvään tuotekaasuun. Loput energiasta muuttuu lämmöksi ja pöntöstä ulos tulevan kaasun lämpötila onkin varsin korkea eli 500-1000 °C. Tästä lämpöenergiasta voidaan kierrättää osa takaisin kaasutusprosessiin lämmönvaihtimella lämmittämällä paloilmaa tuotekaasulla. Ajoneuvo-käytössä kaasu on jäähdytettävä ennen sen syöttöä moottoriin, jolloin valtaosa lämpöenergiasta menee hukkaan. CHP-voimalassa tämä lämpö voidaan ottaa helposti talteen vesilämmönvaihtimella.



KUVIO 1. Puukaasun esimerkinomainen koostumus (Mikkonen 2012)

Tuotekaasun koostumus vaihtelee käytettävän polttoaineen ja laitteiston ominaisuuksien mukaan. Puuta käytettäessä kaasun koostumus voi olla esimerkiksi kuvion 1 mukainen. Palavien kaasujen osuus on vajaa puolet kaasuseoksesta, tämä on pääsyy puukaasuautojen heikkoon suorituskykyyn. Kaasusta suurin osa koostuu typestä, joka kulkee kaasutusprosessin läpi osallistumatta prosessiin kemiallisesti. Suuren kokoluokan teollisissa prosesseissa voidaan tuotekaasua jalostaa kemianteollisuuden tarpeisiin. Tällöin on edullista vähentää prosessien läpi kulkevan typen osuutta käyttämällä palamisilmana ilman sijasta puhdasta happea. Tällöin typen osuus jää lähes kokonaan pois, jolloin tuotekaasusta valtaosa on palavia komponentteja.



KUVA 2. Häkäpöntön poikkileikkauskuva

Perinteisessä häkäpöntössä komponentit on sijoitettu päällekkäin samaan linjaan. Pöntössä ei ole liikkuvia osia, polttoaine ja kaasu liikkuvat oman painonsa ja moottorin aiheuttaman imun avulla. Hyvin suunniteltuna laite on varsin toimintavarma. Yleisin toimintahäiriö on polttoaineen syötössä. Koska polttoaine valuu palotilaan omalla painollaan, on sillä taipumus holvata, jolloin palotilan polttoaine pääsee vajenemaan ja kaasun laatu huononee. Tarvittavia huoltotoimenpiteitä pöntölle on lähinnä tuhkatilan ajoittainen tyhjennys sekä polttoaineen lisäyksen yhteydessä tehtävä karhoaminen ylhäältä käsin. Karhoaminen suoritetaan pitkällä rautakepillä, jolla sekoitetaan tulipesän hiilikerrosta tuhkasta aiheutuvien kivistymien muodostumisen välttämiseksi.

Polttoaine lisätään pöntön päällä olevasta avattavasta luukusta. Polttoainesäiliön tilavuus on auton koosta riippuen 50-300 litraa. Yhdellä tankkauksella voidaan yleensä ajaa 50-150 kilometrin mittainen matka. Polttoainesäiliöstä polttoaine valuu tulipesään, joka on pyöreä suppilomainen kartio kaasuttimen keskellä. Paloilma johdetaan tulipesään sen reunoilla olevien ilmasuuttimien kautta. Suuttimien tehtävä

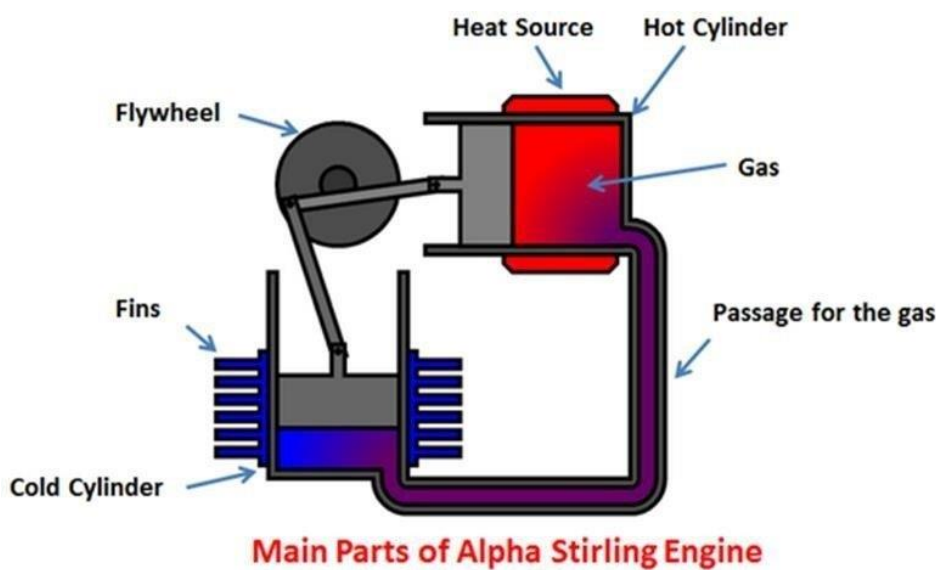
on jakaa paloilma tasaisesti koko tulipesän poikkipinta-alalle. Suutintason korkeudella tapahtuu puun hiiltyminen ja osittainen palaminen puun haihtuvien aineiden palaessa. Suutintason alapuolella on kartiomainen supistus, pöntön toiminnan kannalta erittäin tärkeä ”kurkku”. Kurkun kohdalla tulipesän poikkipinta-ala on pienin ja kaikki palokaasut kulkevat sen kautta. Kurkun keskellä on tulipesän kuumin paikka, jossa lämpötila nousee yli 1000 °C:n lämpötilaan. Kurkun tärkein tehtävä on hajottaa tervamaiset yhdisteet kaasusta korkean lämpötilan avulla. Kurkun jälkeen tulipesä avartuu arinan päälliseen pelkistysvyöhykkeeseen. Pelkistysvyöhykkeessä sijaitsee ”pelkistyshiilikerros” jossa hehkuvassa hiilikerroksessa tapahtuu kaasun laadulle tärkeät pelkistysreaktiot. Kaasu imetään arinan läpi ja tuhka varisee tuhkatilan pohjalle. Kaasu poistuu tuhkatilan kyljessä olevasta putkesta. Kaasuvirta vie mukanaan jonkin verran tuhkaa ja nokea, jotka pitää suodattaa kaasusta pois ennen moottoriin syöttöä.



KUVA 3. Nykyaikaisen häkäpönttöauton kaasutuslaitteisto

2.2 Stirling-moottori

Stirling-moottori on lämpövoimakone, joka muuntaa lämpöenergian liike-energiaksi. Moottorin toiminta on varsin yksinkertainen ja se perustuu työkaasun lämpölaajenemiseen. Männät liikuttavat työkaasua kuuman ja kylmän lämmönvaihtimen välillä, jolloin kaasun paine vaihtelee lämpötilan mukaan. Moottorin tyypistä riippuen paineenvaihtelun energia otetaan talteen joko erillisellä männällä tai samoilla männillä, joilla työkaasua liikutellaan. Oleellisin ero muihin moottorityyppeihin on se, että palaminen tapahtuu työsylinterin ulkopuolella. Tämä mahdollistaa minkä tahansa lämmönlähteen käyttämisen energianlähteenä. (MEEE 2019.)



KUVA 4. Alpha-tyyppinen Stirling-moottori (MEEE 2019)

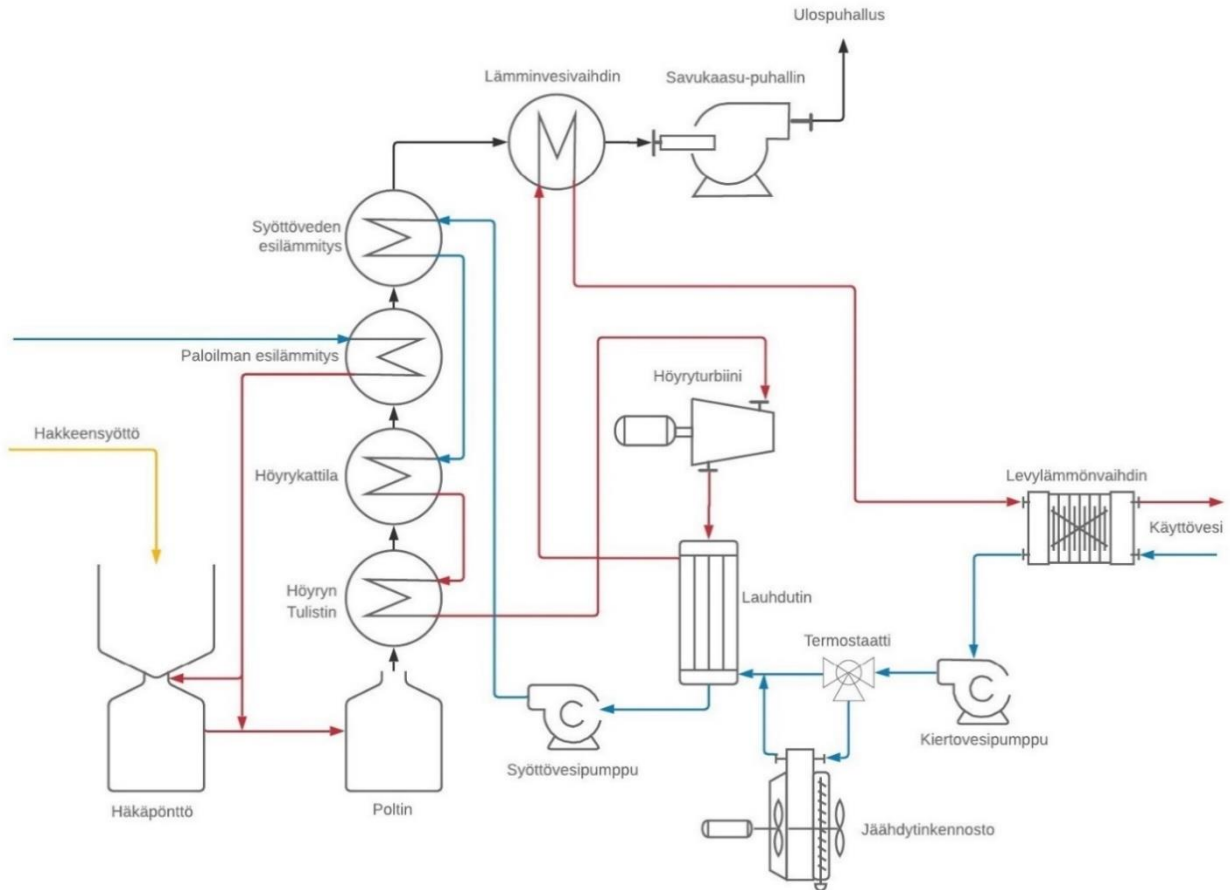
Moottorin suurin ongelma on sen pieni tehotiheys. Pienet moottorit ovat helppoja toteuttaa, mutta skaalaaminen ylöspäin on vaikeaa. Tehoa nostettaessa täytyy sylinteritilavuutta suurentaa, mutta mittakaavaa suurennettaessa tilavuus kasvaa kolmanteen potenssiin ja pinta-ala vain toiseen. Tästä seuraa sylinteritilavuuden ja sen pinta-alan suhteen muutos epäotolliseen suuntaan moottorin toiminnan kannalta. Koska moottorin toiminnan perusedellytys on lämmön siirtyminen sylinterin seinämän läpi, aiheuttaa tämä ongelmia suuressa mittakaavassa. Ongelma voidaan ratkaista käyttämällä suuren pinta-alan omaavia lämmönvaihtimia tai nostamalla työkaasun painetta. Kaupallisissa suurissa moottoreissa käytetään yleensä molempia keinoja, minkä lisäksi työkaasuna käytetään paremman lämpökapasiteetin omaavia kaasuja kuten heliumia. (MEEE 2019.)

Keksintönä Stirling-moottori on yhtä vanha kuin höyrykone. Ensimmäiset toimivat prototyypit valmistettiin 1800-luvun alussa. Teollisen vallankumouksen alussa Stirling-moottorit kilpailivat varhaisten höyrykoneiden kanssa. Ne olivat höyrykoneisiin nähden huomattavasti yksinkertaisempia, turvallisempia ja helpompia käyttää. Höyrykoneet kuitenkin voittivat kilpailun, koska niiden tehot kasvoivat suurempien höyrynpaineiden käytön johdosta. Stirling-moottoreita käytettiin kuitenkin vielä pitkään esimerkiksi veden pumppaamiseen kaivoista, johon ne olivat erinomaisia yksinkertaisen rakenteensa johdosta. Nykyisin Stirling-moottoreita käytetään pääosin käänteisesti kylmäkoneina sovelluksissa, joissa tarvitaan erittäin suuria lämpötila eroja. Niillä on myös lupaavia käyttökohteita uusiutuvan energian tuotannossa. (MEEE 2019.)

CHP-laitokseen kehitetty moottori on uudentyyppinen alpha-moottorityyppiin perustuva ratkaisu, jossa on haettu mekaanisesti yksinkertaista kokoonpanoa. Stirling-moottorin alhaisen tehotehden ongelmaa on pyritty ratkaisemaan nostamalla moottorin iskutilavuus varsin suureksi ja nostamalla sylinterin työpainetta. Työkaasuna käytetään 10 baarin paineessa olevaa paineilmaa, mutta mahdollista on myös käyttää parempia työkaasuja kuten heliumia tai vetyä. Käyttämällä pienen molekyyli­massan omaavia kaasuja on mahdollista parantaa huomattavasti moottorin tehotehettä ja hyötysuhdetta. Moottori käyttää polttoaineenaan kaasumaista polttoainetta. Koska polttoaine palaa moottorin ulkopuolisessa lämmönvaihtimessa, pystytään moottorissa käyttämään polttoaineena puukaasua, joka sisältää epäpuhtauksia. Erityisesti puukaasun laajamittaista käyttöä haittaa se, että se sisältää usein suuria määriä tervaa, joka helposti rikkoo perinteisen polttomoottorin venttiilikoneiston. Myös muita kaasumaisia polttoaineita, kuten bio­kaasua on mahdollista hyödyntää.

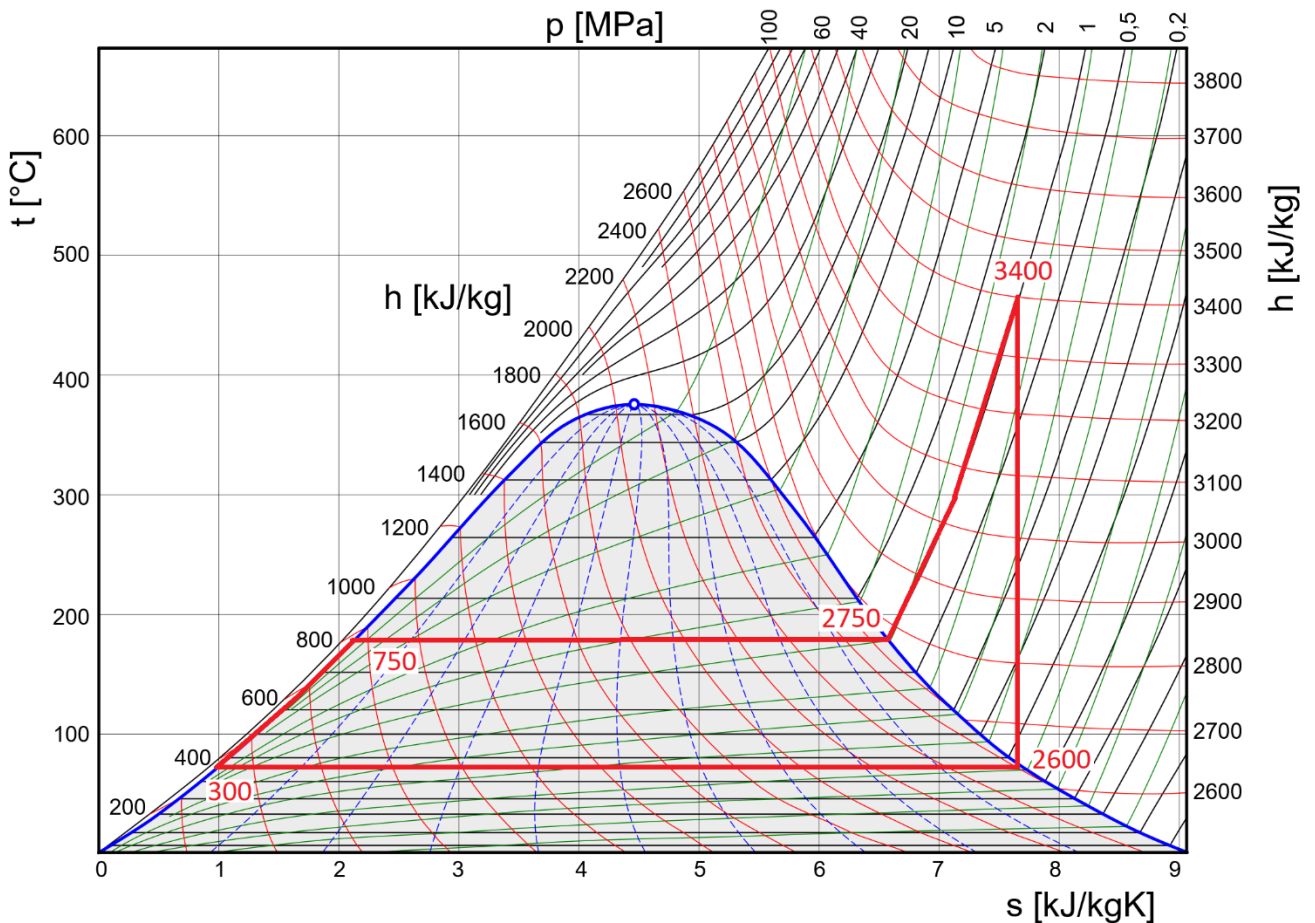
2.3 Höyryprosessin toiminta

Vaikka mikro-CHP-laitokseen soveltuva höyryprosessilaitteisto onkin hyvin pieni suuriin höyrylaitoksiin verrattuna, pystytään siinä silti soveltamaan lähes kaikkia prosessille tyypillisiä laitteistoja ja periaatteita. Lämmönvaihtimien suurella määrällä pyritään parantamaan hyötysuhdetta. Suurille voimalaitoksille tyypillinen alipaineinen höyryn lauhtutin on mahdollista tehdä myös pienessä mittakaavassa, vaikkei pienille laitoksille lauhtuttimia aina välttämättä tehdä ollenkaan.



KUVIO 2. Voimalaitoksen toimintakaavio

Laitteiston toiminnan kannalta ei-välttämättömillä lämmönvaihtimilla kuten paloilman ja syöttöveden esilämmittimillä voidaan saada aikaan suuria hyötysuhteen parannuksia. Hyötysuhteen parantaminen lämmön hukkavirtoja hyödyntämällä on tärkeää. Näin voidaan kompensoida laitteiston pienen koon aiheuttamia hyötysuhdehävikkejä. Pienen koon vuoksi esimerkiksi omakäyttösähkön osuus tuotetusta sähköstä on vaikeampi pitää pienenä. Myös lämpöhäviöt ovat suhteellisesti suuremmat isoon laitokseen nähden, sillä laitteiston pinta-alan ja tilavuuden suhde on varsin suuri.



KUVIO 3. Voimalan höyrykierron t-s-piirros

Voimalan mitoitettu höyrynpaine on 10 baaria. Paine on varsin pieni höyrylaitokseen, ovathan hiilivoimaloiden paineet yleensä useita satoja baareja. Pienen paineen käyttö on ensisijaisesti turvallisuustekijä, mutta sillä saavutetaan muitakin hyötyjä. Laitteisto on helppo rakentaa valmiista LVI-tekniikan osista, sillä vesi-, paineilma- ja hydraulikkaputkistojen käyttöpaineet on standardoitu kestämään vähintään tätä painetta. Koska veden kiehumispiste on pienellä paineella matalampi, on kattilan lämmönsiirto tehokkaampaa kattilaveden ja palokaasujen lämpötilaeron ollessa suurempi. Tällöin höyrykattilan lämmönsiirron hyötysuhde on parempi. Korkeamman paineen käyttö ei juurikaan lisää höyryturbiinin hyötysuhdetta sen ollessa yksivaiheinen. Korkeamman paineen käytön suurin etu onkin välitulistuksen ja monivaiheisen paisunnan avulla saatava hyötysuhteen paraneminen. Monivaiheinen paisunta tulee kyseeseen vain suurissa laitoksissa.

Höyrykiertoprosessin hyötysuhdetta kuvaa Rankine-työkierto, joka määrittää teoreettisen maksimin laitteistosta saatavalle hyötysuhteelle. CHP-laitoksen höyrykierron ollessa kuvion 3 kaltainen voidaan voimalan teoreettinen hyötysuhde laskea jakamalla turbiiniteho polttoaineteholla.

$$Eff = \frac{3400\text{kJ} - 2600\text{kJ}}{3400\text{kJ} - 300\text{kJ}} = 26 \%$$

Todellinen hyötysuhde jää huomattavasti teoreettista hyötysuhdetta pienemmäksi, varsinkin näin pienimuotoisessa ja yksinkertaisin työmenetelmin valmistetussa voimalassa. Tavoiteltava sähköntuotannon kokonaishyötysuhde voimalaitokselle on 10 %. Tällä hyötysuhteella voimalan voidaan arvioida olevan kannattava jo lähes pelkän sähköntuotannon tuoman rahallisen hyödyn avulla. Tavoiteltava 10 prosentin hyötysuhde jää kauas suurten voimaloiden 30-40 prosentin hyötysuhteista. CHP-käytössä sähköhyötysuhdetta tärkeämpiä ominaisuuksia ovat kuitenkin toimintavarmuus ja helppokäyttöisyys. Mikro-CHP:n pääasiallinen käyttötarkoitus onkin olla kannattava vaihtoehto hakelämmityslaitokselle, joka tuottaa hakkeesta ainoastaan lämpöä.

Voimalan suunniteltu sähköteho on 1 kW ja tämä on lähtöarvo koko voimalan mitoittamiselle. Polttoaineen kulutus hakkeen energiatiheyden ollessa 18 MJ/kg ja voimalan hyötysuhde 10 %:

$$\frac{1 \text{ kW}}{10 \%} * 3600 \text{ s} \\ \frac{\quad}{18 \text{ MJ/kg}} = 2 \text{ kg/h} = 0,5 \text{ g/s} = 17,5 \text{ t/a} \approx 58 \text{ m}^3/\text{a}$$

Polttoaineen pieni massavirta aiheuttaa laitteistolle erityisvaatimuksia. Polttoainetta on erittäin vaikeaa annostella kahden kilon tuntivauhdilla niin, että palaminen on tasaista. Useimmat pienkäyttöön tarkoitetut hakepolttimet eivät tähän pysty. Niiden toiminta perustuu usein jaksottaiseen palamiseen, jossa poltin palaa täydellä teholla muutaman kerran päivässä käyttäen lämminvesivaraajaa lämpöakkuna seisokkien ajan. Tässä CHP-laitoksessa polttoainetehon on oltava suhteellisen tasaisesti 10 kW vuorokauden ympäri. Hakepolttimella tähän on vaikea päästä, varsinkin polttoaineen ollessa epätasalaatuista.

Häkäpöntön käyttö mahdollistaa sekä huonomman polttoaineen käytön että tasaisemman palotapahtuman. Kaasutetun puun palamisen hallinta on helpompaa kaasupolttimella kuin avotulella. Häkäpöntön toiminnan perustuessa puun kytämiseen ei polttoaineen laadun vaihteluilla ole niin suurta merkitystä kaasupolttimen toimintaan. Hehkuvan kuumaa polttoainetta on pöntössä huomattavasti enemmän kuin

hakepolttimen päässä. Tästä syystä vierasesineet ja satunnaiset kosteat polttoaineen kappaleet eivät häiritse koko palotapahtumaa. Häkäpönttö ei myöskään sammu käyttökatojen aikana niin helposti kuin hakepoltin, vaan pysyy kuumana useamman tunnin ajan sammuttamisen jälkeen. Haittapuolina on hie- man monimutkaisempi polttoaineen syöttö, sillä häkäpöntön syöttöön tarvitaan sulkusyötin, pintavahti sekä holvinpudotin. Myös häkäkaasun myrkyllisyys jo pienissä pitoisuuksissa on otettava vaaratekijänä huomioon.

Polttihakkeen tiheyden ollessa 300 kg/m^3 kuluttaa voimala vuodessa noin 58 m^3 haketta. Tämä vastaa noin yhtä rekan nuppikuormaa vuodessa. Voimalakontin oman hakesiilon ollessa tilavuudeltaan noin 10 m^3 on siilon täyttöväli reilu kaksi kuukautta. Nämä pätevät vain silloin, jos voimala käy täydellä teholla ympäri vuoden. Todellisuudessa voi olla kannattavaa pienentää laitoksen tehoa kesäkuukausiksi tai sammuttaa se kokonaan. Kahden kuukauden täyttöväliä voidaan pitää varsin hyvänä käytön kannalta. Käytettäessä polttoaineena pellettiä päästään jopa puolen vuoden täyttöväliin.

Höyryn massavirta:

$$\frac{\frac{1 \text{ kW}}{10 \%} * 3600 \text{ s}}{3400 \text{ kJ} - 300 \text{ kJ}} = 11,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 3,2 \text{ g/s}$$

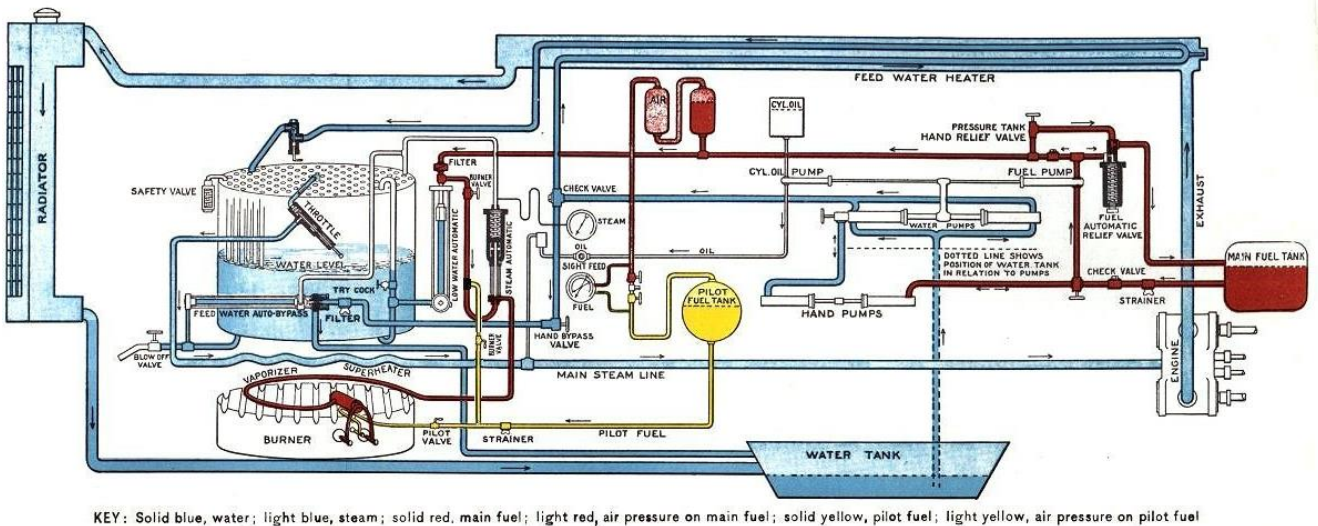
Höyryn massavirta on erittäin pieni. Syöttöveden syöttäminen kattilaan jatkuvatoimisesti on erittäin hankalaa. Syöttövesipumpun on kyettävä pumppaamaan korkeapaineista vettä pienellä virtaamalla, ja virtausnopeutta pitää pystyä säätämään portaattomasti. Keskipakopumppu ei tähän pysty, joten on käytettävä kiertomäntäpumppua. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää suuremman nimellistehon omaavaa pump-pua jaksoittaisesti, jolloin vedenkorkeus kattilassa vaihtelee pumppausyökin mukaan.

2.4 Stanley Steamer

Malliratkaisuja näin pieneen höyrylaitokseen on vaikea löytää, koska nykyisin käytössä olevat höyryvoimalaitokset ovat kaikki MW-kokoluokkaa. Höyryveturit taas käyttävät hyvin erilaista tekniikkaa ja ovat myös hyvin suuren mittakaavan laitteita. Kuitenkin yksi hyvä vaihtoehto laiteratkaisuksi on ole-massa, joka on teknisesti hyvin lähellä kaavailtua CHP-laitoksen tekniikkaa: Stanley Steamer -höyryau-tot.



KUVA 5. Stanley Steamer (Stanleymotorcarriage 2019)



KUVIO 4. Stanley Steamer -auton höyrylaitteisto (Stanleymotorcarriage 2019)

1900-luvun alussa Stanley Motor Carriage Company valmisti höyryautoja yleisnimellä Stanley Steamer. Tähän aikaan höyryautot olivat varteenotettava kilpailija polttomoottoritekniikalle. Höyry- ja polttomoottoreita kehitettiin tällöin kilpaa liikennekäyttöön. Höyryauton etuina polttomoottoriin olivat sen käytön helppous ja ajomukavuus. Sen ajan polttomoottorit käynnistettiin käsiveivillä ja ne olivat meluisia ja vaikeita ajaa. Höyryautot olivat puolestaan hyvin hiljaisia, eikä suoravetoisen moottorin vuoksi kytkintä tai vaihteistoa tarvittu. Niiden suurimpana haittana oli hidas käynnistyminen, sillä höyrykattilan lämmittämiseen meni aikaa noin 10 minuuttia ennen ajoon lähtöä. Stanley valmisti höyryautoja yli vuosikymmenen ajan, kunnes se hävisi kilpailussa ja tuotekehityksessä polttomoottoriautoille. Tähän johti sekä yhtiön omistajanvaihdoksesta johtuva tuotekehityksen hiipuminen että polttomoottoritekniikan nopea kehitys. Fordin onnistui laskea hintoja sarjatuotannon avulla ja autojen käyttö helpottui huomattavasti sähköisen starttimoottorin yleistymisen vuoksi. (Stanleymotorcarriage 2019.)

Stanleyn höyrymoottorien tehot olivat noin 6-20 hevosvoimaa eli 4-15 kW. Moottorit olivat kaksitoimisia, kaksisylinterisiä ja liukuventtiiliohjattuja. Moottorit oli sijoitettu suoraan vetävän taka-akselin luo. Tuliputkihöyrykattila oli sijoitettu auton konepellin alle. Höyrynpaine oli noin 40 baaria. Polttoaine poltettiin öljypolttimessa kattilan alla. Höyrytekniikan etuna oli se, että autossa voitiin polttaa lähes mitä tahansa palavaa nestettä. Jopa käsittelemätöntä kasviöljyä voitiin käyttää polttoaineena. Kiinnostava seikka auton rakenteessa on se, että koko höyrylaitteisto toimii täysin mekaanisesti. Paineensäätö ja vedensyötön automatiikka oli hoidettu täysin mekaanisilla termostaateilla ja antureilla höyrynpainetta hyödyntäen. Autossa ei ollut myöskään mitään sähkölaitteita. Ajovaloina käytettiin ajalle tyyppillisesti karbidilamppuja. (Stanleymotorcarriage 2019.)

Stanley Steamer -autoista on runsaasti tietoa saatavilla aktiivisen harrastajakunnan ansiosta. Auton laitteistosta on hyvä ottaa mallia mikrokokoluokan CHP-laitoksen suunnitteluun, koska höyrylaitteiston kokoluokka on sekä fyysisiltä mitoiltaan että höyryteholtaan samaa luokkaa. Stanleyyn tekniikkaa tutkimalla saatiin tässä työssä paljon hyvää tietoa ja malliratkaisuja höyrylaitteistoa varten. Auton tekniikka on hyvin yksinkertaistettua ja laitteistoon on mahdollista tehdä useita nykytekniikan mahdollistamia parannusratkaisuja. Autossa on varsin vähän hyötysuhdetta parantavia laitteistoja, näitä ovat lähinnä höyryn tulistin sekä syöttöveden esilämmitin. Tästä huolimatta auto kulutti polttoainetta saman verran kuin sen ajan polttomoottoriautot, eikä kiinnostusta polttoainetalouden parantamiseen ollut polttoaineen hinnan ollessa erittäin alhainen nykypäivän tasoon nähden.

Stanleyn höyrykattila oli valmistettu kokonaan kuparista. Kuparin lämmönjohtokyky on loistava tähän tarkoitukseen, mutta metallin pehmeys aiheutti ongelmia. Jotta kattilan seinämäpaksuus ei kasvaisi liian

suureksi, kierrettiin kattilan ympärille tiukka kerros pianolankaa. Tämä lisäsi kattilan kestävyyttä lisäämättä liikaa painoa. CHP-laitoksen kattilaan tällaista ratkaisua ei tarvitse käyttää, koska kattila voidaan tehdä kestävämmästä haponkestävästä teräksestä. Lisäksi voimalakäytössä kattilan korkeutta voidaan kasvattaa ja siten pienentää tarvittavaa halkaisijaa.

3 LAITTEISTON VALMISTUS

3.1 Kontin muutostyö

Voimalaitos päätettiin rakentaa 6 metriä pitkän merikontin sisään. Tämä on tyypillinen ratkaisu pienissä CHP-voimalaitoksissa. Merikontti on metallinen, vesitiivis kuljetuslaatikko, joka on suunniteltu helppoa logistiikkaa ajatellen. Konttia voidaan kuljettaa helposti paikasta toiseen siihen soveltuvilla kuorma-autoilla ja muulla kuljetuskalustolla. Merikontti on pitkäikäinen rakennusratkaisu, joka ei siirrettävänä rakennuksena tarvitse rakennuslupaa. Voimalaitoskäytössä etuna on erityisesti metallinen rakenne, joka tekee laitoksesta tulenkestävän. Metalliseiniin on myös helppo asentaa painaviakin laitteistoja ilman huolta rakenteen kestävydestä.



KUVA 6. Merikontin siirto kurottajan ja irrotettavien pyörien avulla



KUVA 7. Kontin seinät avattuna

Laitosta varten hankitussa kontissa on päätyovien lisäksi avattavat sivuovet ja miehistöovi. Kontin keskelle tehtiin väliseinä, joka jakaa kontin kahteen osaan. Oikealle puolelle sijoitetaan varsinainen voimalaitos ja sen tekniikka, vasen puoli toimii hakevarastona.



KUVA 8. Lattiaeristys

Kontin lattia purettiin ja sen alle asennettiin kerros lasikuituvillaa eristeeksi (KUVA 8). Koska voimalaitoksessa käytetään nestemäistä vettä, täytyy tekninen huone lämpöeristää, jotta se pystytään pitämään lämpimänä myös talvella. Laitteiston käydessä hukkalämpö riittää pitämään kontin lämpimänä, mutta seisokin aikana täytyy tila pystyä lämmittämään sähkölämmityksellä.



KUVA 9. Seinien eristys



KUVA 10. Vanerointi

Lattiaeristeiden päälle asennettiin ruusupinnoitettu vesivaneri. Seinät eristettiin 40 mm paksulla polystyreenillä, jonka päälle asennettiin sisäseinänä toimiva havuvaneri.

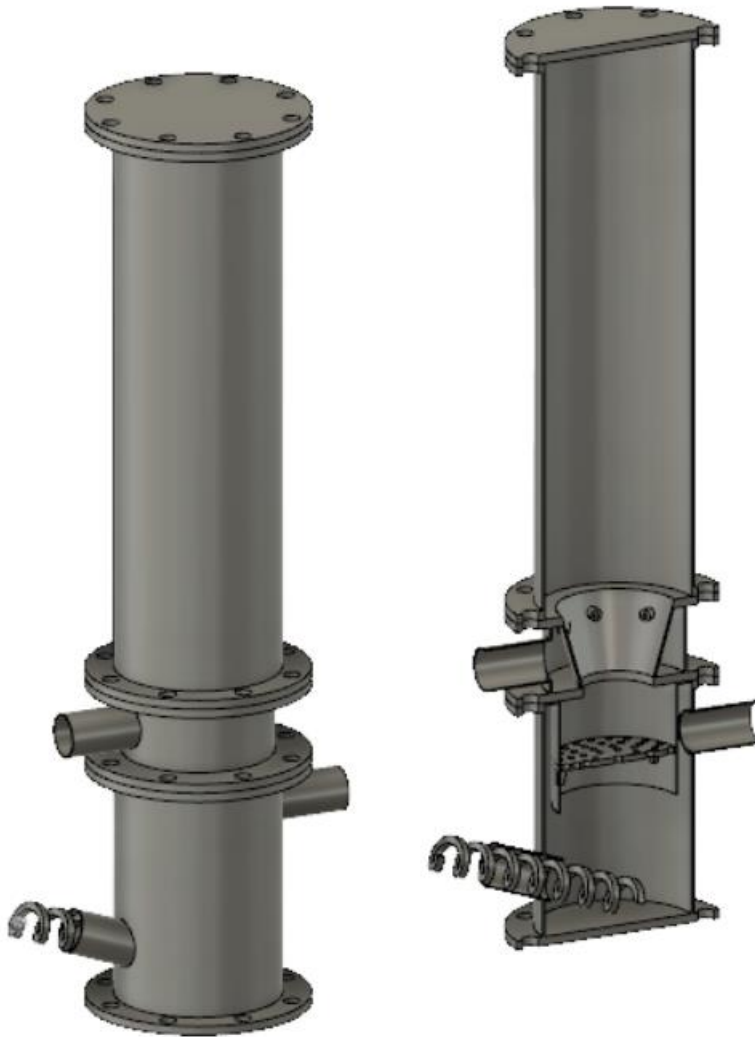


KUVA 11. Valmis pannuhuone, Stirling-moottori seinällä testikäytössä

Koska vaneri ei ole kovin palonkestävä materiaali, täytyi huoneen kuumia osia sisältävään päätyyn asentaa palonsuojalevyt neljälle pinnalle (KUVA 11).

3.2 Häkäpönttö

Puun kaasutuslaite eli häkäpönttö valmistettiin hitsaamalla haponkestävästä teräksestä. Korkeiden lämpötilojen ja puukaasun syövyttävyyden vuoksi tavallista rautaa ei voida käyttää. Kaasutin on varsin pientehoinen ajoneuvoissa käytettäviin kaasuttimiin verrattuna. Pönttö on mitoitettu noin 10 kW:n lämpöteholle, kun pienessäkin häkäpönttöautossa lämpöteho puolestaan on noin 100-150 kW. Pieni teho aiheuttaa ongelmia erityisesti polttoaineen syötössä: hakkeella on taipumus holvata tulipesän yläpuolella polttoainesäiliön pienen halkaisijan vuoksi. Tämän vuoksi mekaaninen holvinpudottaja voi olla tarpeellinen lisävaruste, mikäli ongelmia holvaamisen kanssa ilmenee.



KUVA 12. Häkäpöntön mallinnus ja poikkileikkaus

Pöntön suunnittelun lähtökohtana on yksinkertainen ja helposti huollettava rakenne. Voimalaitoskäytössä ei kaasuttimen kemiallisella hyötysuhteella ole merkitystä, koska kuuma tuotekaasu poltetaan heti kehittimen jälkeen. Tuotekaasun tuntuva lämpö päättyy siis hyödyksi. Ajoneuvokäytössä kaasu jäähdetään ennen moottoriin syöttöä, jolloin ainoastaan kaasun kemiallinen energia tulee hyötykäyttöön. Voimalan kokonaishyötysuhdetta voidaan kuitenkin parantaa esilämmittämällä häkäpönttöön syötettävä palamisilma. Palamisilma voidaan lämmittää lämmönvaihtimien jälkeisellä pakokaasulla, jonka lämpöenergia menisi muuten hukkaan savupiipun kautta. Kaikki lämpöteho, joka voidaan siirtää savukaasuista takaisin prosessin alkupuolelle, vähentää tarvittavaa polttoainetehoa vastaavalla määrällä.



KUVA 13. Häkäpöntön osat vasemmalta oikealle: polttoainesäiliö, tulipesä, arina ja tuhkatila



KUVA 14. Tulipesä



KUVA 15. Pöntön kokoonpano



KUVA 16. Puukaasuliekki



KUVA 17. Häkäpönttöauton soihtu

Koeajossa tarvittava ilmavirta tuotettiin puhaltamalla sähköpuhaltimella ilmaa pöntön ilmanottoon. Käyttämällä ylipainetta testikäytössä on se etu, että mahdolliset vuodot hitsaussaumoissa löytyvät helposti. Voimalakäytössä laitteistossa on kaasun ulostulon puolella alipaine, joka imee kaasun kaasuttimesta. Paine-eron suunnalla ei ole laitteen toiminnalle suurta merkitystä. Voimalassa sisätiloissa käytettäessä ylipaineen käyttö aiheuttaisi turvallisuusriskin, sillä kaikki vuodot vuotaisivat ulospäin jolloin häkämyrkytyksen riski kasvaa. Alipainetta käytettäessä vuodot ovat sisäänpäin, jolloin sisään vuotava ilma vain laimentaa hieman kaasuseosta.

Häkäpönttöä koeajettiin hakkeella. Polttoainesäiliö täytettiin hakkeella ja pöntön annettiin lämmitä toimintalämpötilaan. Tuotettu kaasu poltettiin ulostuloputkessa ja sen väriä tarkkailtiin kaasun laadun toteamiseksi. Kuvassa 16 on esimerkki tervaisesta kaasusta, jonka tunnistaa kirkkaasta keltaoranssista väristä. Kun kaasutin on lämmennyt toimintalämpötilaan ja toiminnassa ei ole häiriöitä, palaa kaasu lähes värittömällä liekillä, jota ei päivänvalossa kykene paljain silmin havaitsemaan. Pimeässä puhdas liekki on sinertävä kuten kuvan 17 häkäpönttöauton liekistä nähdään.

Pöntön lämpötehon määrittämiseksi puunkulutus mitattiin puhaltimen pyöriessä täydellä teholla. Haketta kului noin 10 litraa tunnissa. Hakkeen tiheyden ollessa noin 300 kg/m^3 , ja lämpöarvon 17 MJ/kg , voidaan laskea kulutetun polttoaineen lämpöteho:

$$P = 0,01 \text{ m}^3 * 300 \text{ kg/m}^3 * \frac{17 \text{ MJ/kg}}{3.6 \text{ kWh/Mj}} \approx 14 \text{ kW}$$

Voimalaitoksen suunnitellun tehon ollessa noin 10 kW, on mitattu 14 kW erittäin hyvä tulos. Käytetty puhallin tuotti melko pienen paineen, joten pönttö ei todennäköisesti käynyt vielä täydellä teholla. Virtausta muuttamalla voidaan lämpötehoa todennäköisesti säädellä melko hyvin välillä 5-20 kW.

3.3 Stirling-moottori

Laitokseen kehitetty moottori on uudentyyppinen alpha-moottorityyppiin perustuva ratkaisu, jossa pyrittiin mekaanisesti yksinkertaiseen kokoonpanoon. Stirling-moottorin pienen tehotehokkuuden ongelma on pyritty ratkaisemaan suurentamalla moottorin iskutilavuutta ja nostamalla sylinterin työpainetta. Työkaasuna käytetään 10 baarin paineessa olevaa paineilmaa, mutta mahdollista on myös käyttää parempia työkaasuja kuten heliumia tai vetyä. Käyttämällä pienen molekyyli­massan omaavia kaasuja on mahdollista parantaa huomattavasti moottorin tehotehokkuutta ja hyötysuhdetta. Moottori käyttää polttoaineenaan kaasumaista polttoainetta. Koska polttoaine palaa moottorin ulkopuolisessa lämmönvaihtimessa, pystytään moottorissa käyttämään myös kaasua, joka sisältää epäpuhtauksia. Erityisesti puukaasun laajamittaista käyttöä haittaa se, että se sisältää usein suuria määriä tervaa, joka helposti rikkoo perinteisen polttomoottorin venttiilikoneiston. Myös muita kaasumaisia polttoaineita, kuten biokaasua on mahdollista hyödyntää.



KUVA 18. Stirling-moottorin mallinnus



KUVA 19. 3D-tulostetut valumallit



KUVA 20. Mallit ennen betoniin valamista

Moottorin kannet ja kampiakselin osat valmistettiin valamalla alumiinista. Valumenetelmänä käytettiin ”lost PLA” -menetelmää, jolla saadaan tehtyä erittäin tarkkoja valuosia tietokonemallin pohjalta. Prosessissa valmistetaan PLA-muovista uhrattava valumalli 3D-tulostimella (KUVA 19). PLA-muovi on kasvipohjainen biohajoava muovilaatu, jonka sulamispiste on varsin alhainen. Tämän vuoksi se on suosittu materiaali 3D-tulostimissa ja se tekee sen käyttämisen metallivalussa mahdolliseksi. Muovinen malli valetaan betonin sisään siten, että polystyreeninen täyttösuppilo jää valun ulkopuolelle (KUVA 20). Betonin kuivuttua voidaan se kuumentaa yli 400-asteen lämpötilaan, jolloin muovi kaasuntuu ja palaa muotista ulos jättäen mallin muotoisen onkalon muottiin. Tämän jälkeen lopullinen kappale voidaan valaa metallista täyttämällä onkalo sulalla metallilla. Muotti on kertakäyttöinen. Valamisen jälkeen se lyödään halki ja valmis kappale kaivetaan betonimurskan seasta.

Menetelmä on nykyaikainen versio ikivanhasta ”lost wax” -valumenetelmästä, jossa uhrikappale valmistetaan käsin muotoilemalla vahasta. 3D-tulostin mahdollistaa mittatarkkojen osien valmistamisen, eikä kappaleen geometrinen monimutkaisuus aiheuta ongelmia kuten monissa muissa menetelmissä. Tämän kaltaista valumenetelmää ei käytetä teollisuudessa sen hitauden ja kalleuden vuoksi. Jokainen valettu kappale vaatii oman kertakäyttöisen mallikappaleen ja valumuotin. Sarjavalmisteisissa valumenetelmissä käytetään yleensä joko metallista kestopuottia tai hiekkavalua, jossa samaa hiekkaa voidaan käyttää useita kertoja.



KUVA 21. Valumuottien poltto



KUVA 22. Muotit valmiina metallivalua varten



KUVA 23. Alumiinin sulatus nestekaasuahjossa



KUVA 24. Kappaleet muotin avaamisen jälkeen



KUVA 25. Kannen koneistus sorvissa.



KUVA 26. Kaikki valetut osat koneistettuna



KUVA 27. Kampiakselin päätykappale

Moottoria varten täytyi valaa kaksi sylinterin päätä sekä kuusi kampiakselin niveltä. Kaikki osat tulostettiin 3D-tulostimella PLA-muovista. Muoviosat tulostettiin 102 % koossa, sillä alumiiniosa kutistuu muutaman prosentin jäähtyessään. Osat valettiin betonimuotin sisään, ja muutaman päivän kuivumisen jälkeen muotit poltettiin avotulella päistään avonaisen tynnyrin sisällä (KUVA 21). Alumiini sulatettiin grafiittisessa sulatusastiassa, nestekaasuahjossa (KUVA 23). Käytetty alumiini on kierrätetty vanhoista auton imusarjoista. Valetut muotit halkaistiin ja valmis kappale naputeltiin irti betonin seasta (KUVA 24). Osiin koneistettiin tiivistepinnat, laakeripinnat, läpiviennit ja kierteet metallintyöstökoneilla. Näin osat saatiin lopullisiin mittoihinsa.



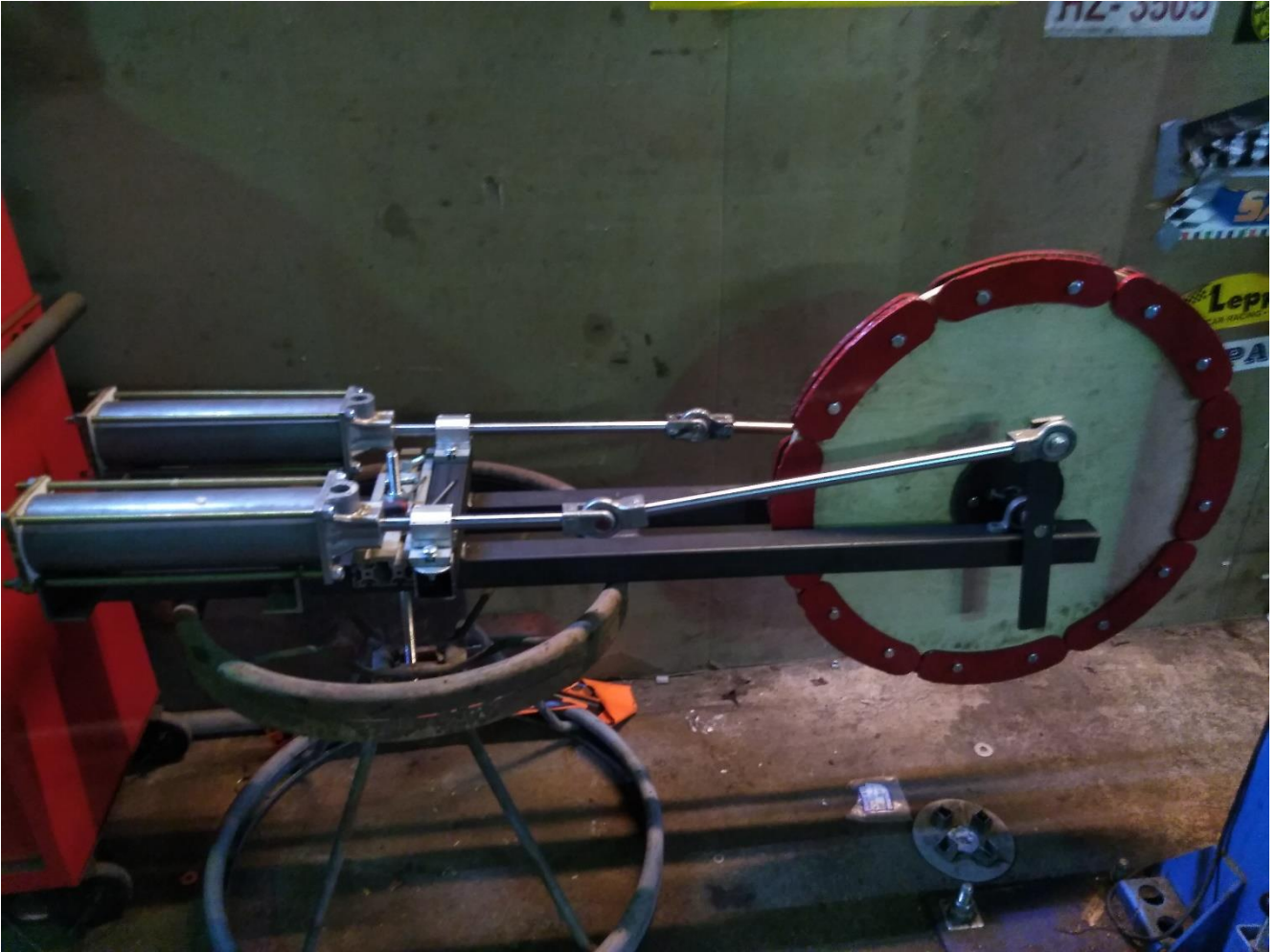
KUVA 28. Moottorin runko ja sylinterit



KUVA 29. Sylinterinkannet ja liukulaakerit



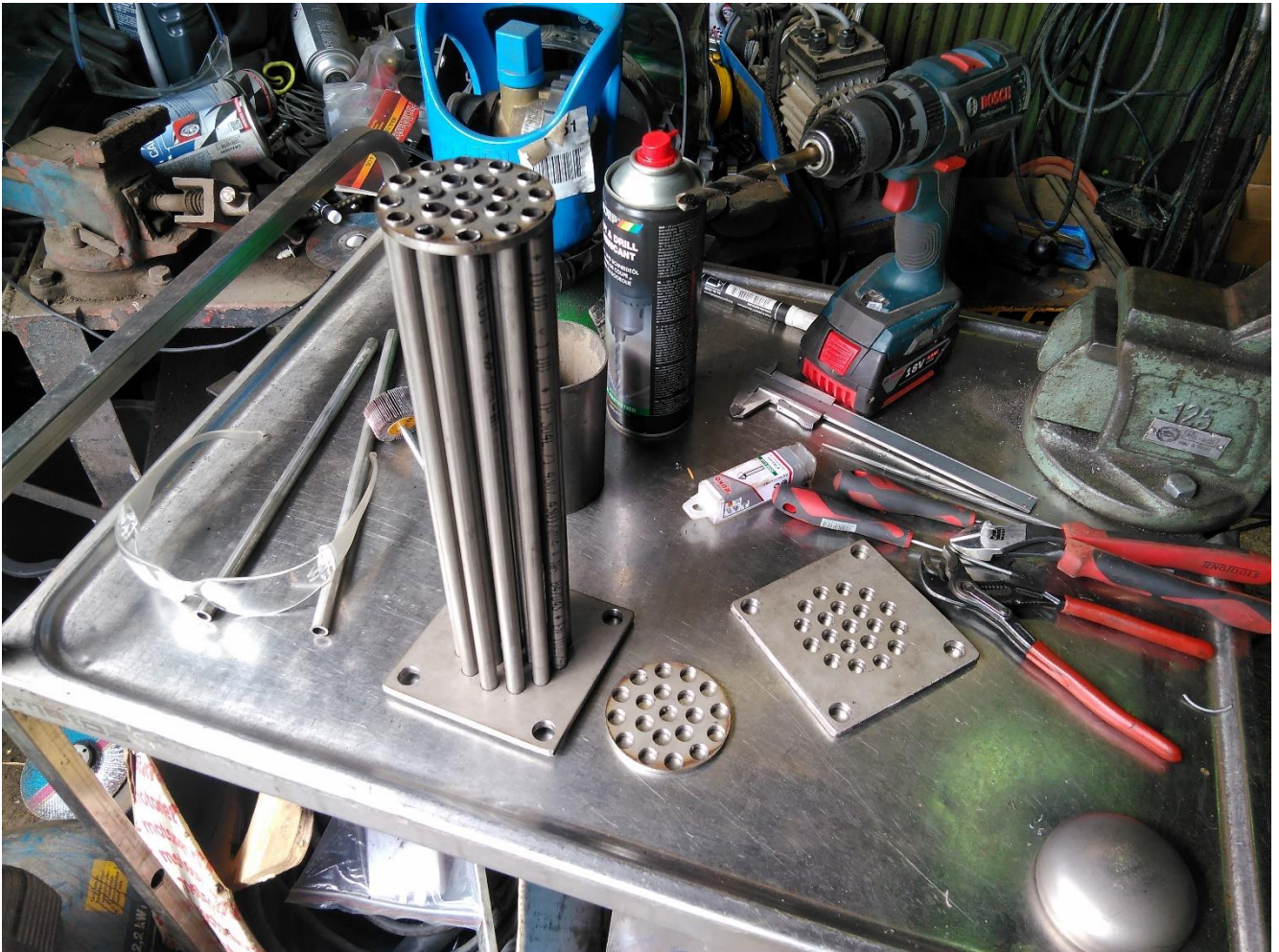
KUVA 30. Teflonliukulaakeri



KUVA 31. Vauhtipyörä ja kampiakseli

Moottorin runko valmistettiin kahdesta 50 mm:n kanttiputkesta, joiden päälle kaikki moottorin osat kiinnitetään (KUVA 28). Sylinterit tehtiin saumattomasta tarkkuushiotusta sylinteriputkesta. Sylinterin koko on valittu sopivaksi, jotta männän tiivisteinä voidaan käyttää tavallista auton moottorin tiivisterengasta. Jotta mäntä liikkuisi sylinterissä suorassa eikä männänvarsi hankaisi tiiviste-pintoja vasten, täytyy männänvarsi tukea kahdesta suunnasta sylinterin ulkopuolelta. Tätä varten heti sylinterin kannen ulkopuolella on säädettävä lineaarinen liukulaakeri. Aluksi laakerina kokeiltiin käyttää kuulalaakeroitua lineaarilaakeraa, mutta kuulien todettiin kuluttavan naarmuja akseliin. Tämä olisi aiheuttanut vuotokanavan tiivisteisiin, joten uusi laakeri sorvattiin teflon-muovista (KUVA 30). Teflon on erittäin liukasta muovia jota käytetään yleisesti liukupinnoissa, kun tarvitaan alhaista kitkakerrointa. Muovin pehmeuden vuoksi laakerin elinikä ei ole kovin pitkä, ja vaihtoehtoisena materiaalina olisi voinut myös käyttää itsevoitelevan ominaisuuden omaavaa alumiinipronssia.

Vauhtipyörän runko valmistettiin vanerista CNC-jyrsimellä ja sen ulkokehälle pultattiin kaksi kierrosta rautapainoja. Näin vauhtipyörän paino sijoittuu ulkokehälle ja saadaan mahdollisimman suuri hitausmomentti pyörän painoon nähden. Koska moottorin kierrosnopeus on varsin matala, täytyy vauhtipyörän olla suuri, jotta sen liike-energia riittää pyöryttämään moottorin sen yläkuolokohdan yli.

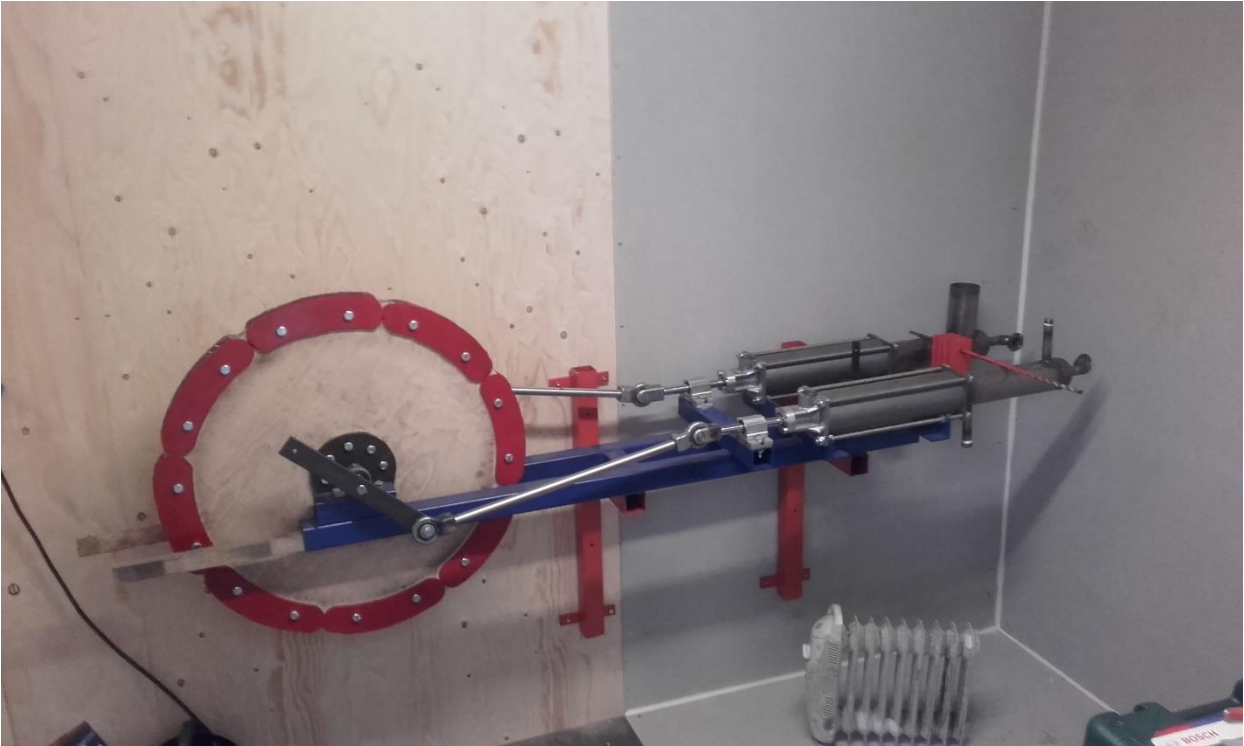


KUVA 32. Lämmönvaihtimien valmistus



KUVA 33. Vasemmalla kuuma lämmönvaihdin, oikealla kylmä

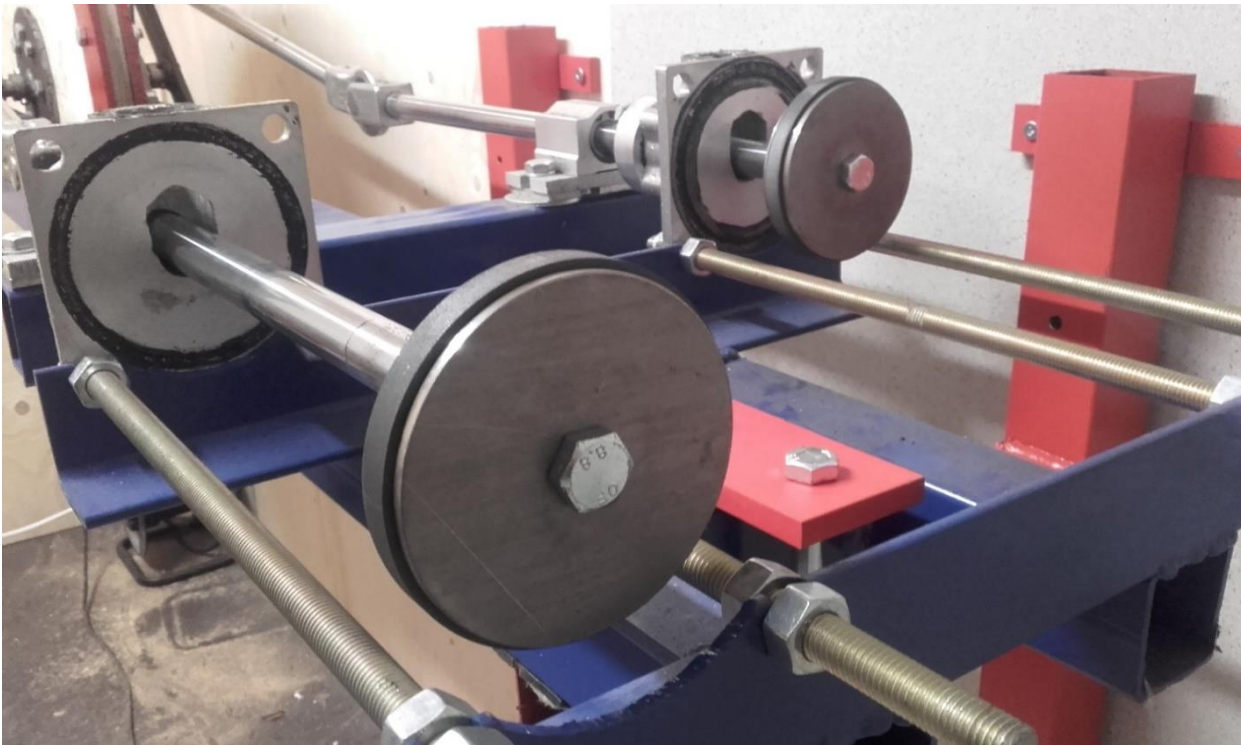
Stirling-moottorin tärkeimmät osat eli lämmönsiirtopinnat valmistettiin hitsaamalla ruostumattomasta teräksestä (KUVA 33). Putkilämmönvaihtimien pinta-ala on noin 19 dm^2 . Ruostumattoman teräksen kestävyyttä vaaditaan etenkin kuumalta lämmönvaihtimelta, joka lämpenee käytössä hehkuvan kuumaksi. Lämmönjohtavuuden kannalta se on kuitenkin huono valinta, sillä sen lämmönjohtavuus on lähes kaikkiin muihin vaihtoehtoihin verrattaessa huonoin. Parempi materiaalivalinta olisi kupari, mutta sitä käytettäessä riskinä on sen hapettuminen ja liian kuumana käytettäessä sulaminen.



KUVA 34. Valmis moottori paikoillaan



KUVA 35. Grafiittimännän sorvausta



KUVA 36. Uudet männät paikoillaan

Moottoria ensimmäisen kerran testatessa havaittiin, että metalliset männänrenkaat aiheuttavat aivan liikaa kitkaa eikä moottori toimi niiden kanssa. Uusiksi männiksi ja tiivisteratkaisuksi päätettiin käyttää grafiittia. Grafiittilevystä sorvattiin mäntä, joka koneistettiin $5\ \mu\text{m}$ pienemmäksi kuin sylinterin sisähalkaisija. Näin muuta tiivistemateriaalia ei tarvita, sillä männän ja sylinterin väliin jäävä $2.5\ \mu\text{m}$:n rako on niin pieni, ettei sen kautta pääse vuotamaan kaasua merkittäviä määriä. Koska grafiitti on haurasta materiaalia, täytyi mäntää vahvistaa puristamalla grafiittikiekkokahden teräslevyn väliin. Teräslevyt on tehty muutaman millimetrin pienemmiksi kuin grafiittilevy (KUVA 36). Grafiitti on loistava materiaali mäntään, sillä se kestää hyvin kuumuutta eikä se tarvitse lainkaan voitelua.

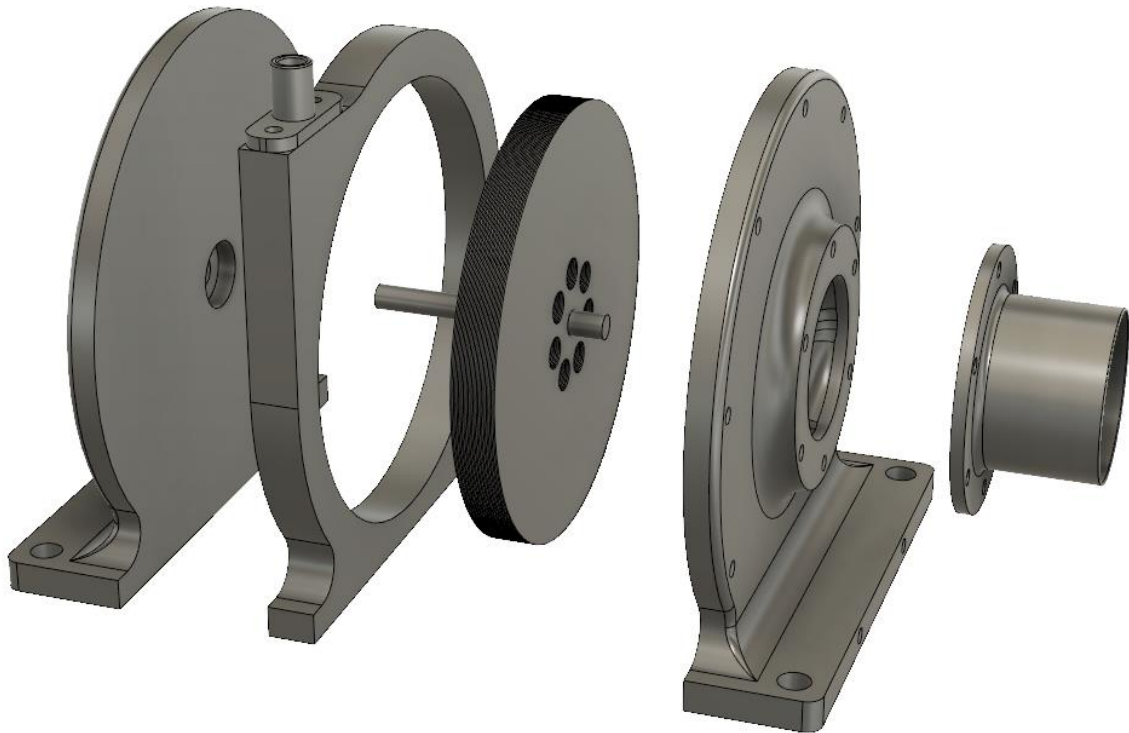
Tiivistysongelmat eivät kuitenkaan loppuneet tähän. Männänvarren kumiset huulitiivisteet aiheuttivat myös erittäin paljon kitkaa. Tiivisteet oli tarkoitettu hydraulisynteririin varsiin, ja ne olivat siksi hyvin tiukat ja pitävät. Vaikka grafiittiset männät olivatkin pitävät ja vähäkitkaiset, todettiin sylinterin sisäpinnan soikeuden aiheuttavan ongelmia. Vaikka sylinterit ovatkin tarkkuushiottuja sylinteriputkia, havaittiin ne silti hieman soikeiksi. Mäntä ottaa kiinni sylinteriin kahdelta kantilta, ja muualta reunan vällys kasvaa niin suureksi, että tiivistys ei enää pidä. Moottorin mittatarkkuuksien lähestyessä mikrometrien

toleransseja, eivät tavalliset koneistusosat ole enää riittävän tarkkaan valmistettuja. Pieni soikeus ei haittaa polttomoottorin sylinterissä eikä hydraulisyylinterissä verrattain suuren välyksen vuoksi. Mutta kun välykset on ainoa tiiviste, ei epätarkkuuksia saa olla.

Moottoria yritettiin testiajaa nestekaasun lämmittämänä useita kertoja, mutta moottoria ei saatu käymään luotettavasti. Ulkoiset tiivisteet ja saumat toimivat riittävän hyvin, jotta työpaine voitiin nostaa 8 baariin, mutta kitkahäviöt ja mäntien vuotaminen osoittautuivat liian suuriksi esteiksi moottorin toiminnalle. Moottorin kehittäminen päätettiin lopettaa riittävän tarkkojen koneistuslaitteistojen puuttuessa. Moottori olisi voitu saada toimimaan paremmilla koneistuslaitteilla ja työkaasun vaihtamisella heliumiksi. Harkinnan perusteella päädyttiin siihen, että voimalaitoksen lämpövoimakoneeksi voidaan tehdä jokin muu ratkaisu.

3.4 Höyryturbiini

CHP-laitos päätettiin tehdä höyrykiertoprosessiin perustuvaksi useista syistä. Yksi vaihtoehto olisi ollut käyttää puukaasua polttomoottorissa, mutta tämän ongelmana olisi ollut lyhyt huoltoväli ja luotettavuus. Voimalaitoksen yhtenä pääperiaatteena on, että se kykenee polttamaan huonolaatuistakin polttoainetta. Polttomoottoria käytettäessä täytyisi puukaasun laadun pysyä vakiona koko ajan. Erityisesti pienessä laitoksessa tämä on kuitenkin vaikeaa ja moottori olisi taipuvainen sammumaan kaasun laadun vaihdeltaessa. Polttomoottorilaitoksen huollontarve olisi myös suuri. Polttomoottorit ovat lyhytikäisiä ja erittäin hyvänkin moottorin voi olettaa toimivan vain muutaman vuoden yhtäjaksoista käyttöä. Lisäksi jatkuvaa huoltoa vaativia osia olisivat kaasun-, ilman- ja öljynsuodattimet, joita laitos vaatisi. Polttomoottoriin verrattuna höyrylaitos on huomattavasti yksinkertaisempi, sillä liikkuvia osia on vain kolme: syöttövesipumppu, savukaasupuhallin sekä höyryturbiini.



KUVA 37. Höyryturbiinin tietokonemallinnus

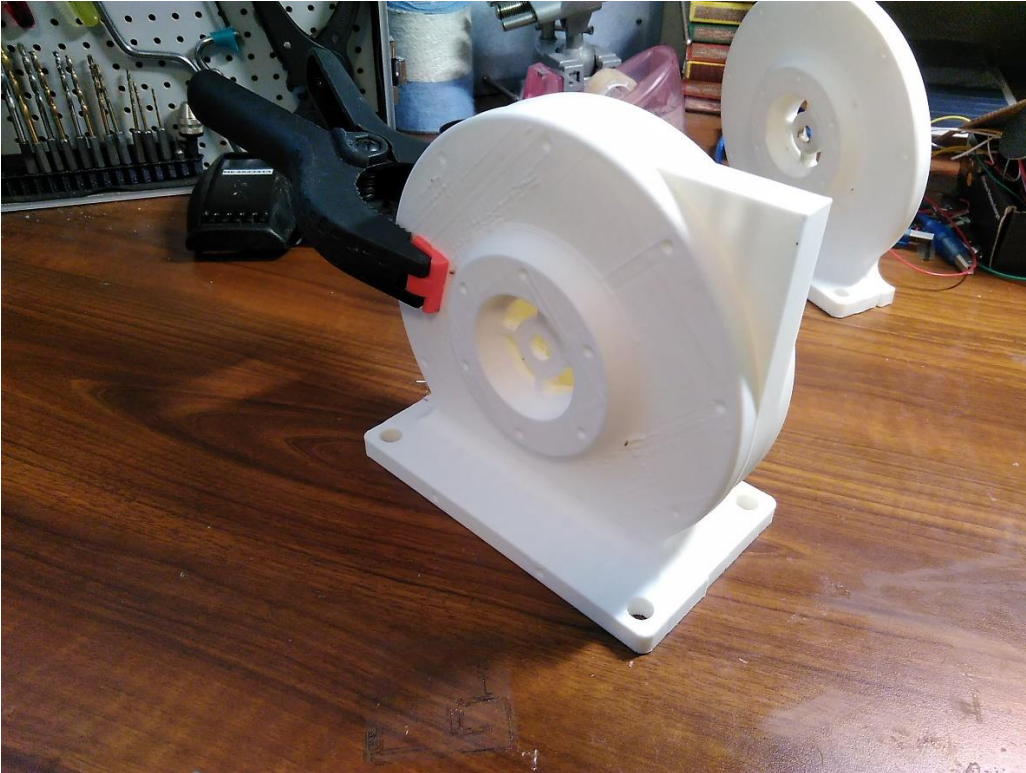
Tuotetulla höyryllä pyöritetään höyryturbiinia, joka generaattoriin kytkettynä muuttaa lämpöenergian sähköenergiaksi. Tämän kokoluokan höyryturbiineja ei ole kaupallisesti käytössä missään, minkä vuoksi valmista mallia turbiinin kehittämiseksi oli vaikea löytää. Turbiinin toimiminen näin pienessä laitoksessa voidaan selvittää vain kokeilemalla. Rakentamista aloitettaessa oli riski turbiinin toimimattomuudesta tiedossa ja varasuunnitelmana pidettiin mäntämoottorin tai Wankel-moottorin käyttöä.

Turbiinin tyypiksi valittiin Tesla-turbiini, koska sillä on monia hyviä ominaisuuksia. Se on varsin helppo valmistaa, koska roottori koostuu vain nipusta tasaisia kiekkoja, eikä tarkkoja koneistettuja siipiä tarvita. Turbiinin hyötysuhde on samaa luokkaa kuin perinteisen monivaiheisen höyryturbiinin, ehkä jopa parempi. Turbiinimallissa on monia etuja muihin turbiineihin nähden, mutta kaupallisen käytön yleistymisen esteenä on sen huono skaalautuvuus isoon mittakaavaan. Roottorin halkaisijaa ei voida suurentaa kovin suureksi, koska ohuet roottorin kiekot eivät kestäisi niihin kohdistuvia voimia. Roottorin suurentaminen akselin suuntaisesti ei puolestaan onnistu koska ulostulevan höyryn täytyy päästä ulos akselin keskellä olevista rei'istä. (Benson, J. & Rayman, A. 1973. em.)

Tesla-turbiinin toimintaperiaate on hyvin erilainen muihin turbiinimalleihin verrattuna. Lähes kaikissa muissa turbiineissa höyryn liike-energia siirretään roottoriin muuttamalla höyryn liikesuuntaa siipien avulla. Tesla-turbiinissa höyryn nopeus ”jarrutetaan” lähelle roottorin pyörimisnopeutta höyryn viskositeetin ja roottorin levyjen aerodynaamisen rajapinnan aiheuttaman kitkan avulla. Höyry syötetään roottorin ulkokehälle tangentiaalisesti siten, että se kulkeutuu roottorin levyjen väliin. Koska levyjen välinen etäisyys on hyvin pieni, aiheutuu höyryn ja roottorin välisestä rajapinnasta suuri kitka, joka hidastaa höyryn nopeutta. Hidastuva höyry kulkeutuu spiraalimaista rataa roottorin akselia kohti, josta se poistuu roottorin keskellä olevista rei’istä.

Roottoriin osuessaan höyryn nopeus on kaksi kertaa roottorin kehänopeuden verran ja poistuessaan höyryn nopeus on pudonnut lähelle akselin kehänopeutta. Koska roottorin- ja akselin halkaisijoilla on suuri kokoero, putoaa höyryn nopeus turbiinissa murto-osaan alkuperäisestä. Suuttimesta lähtiessään nopeus voi olla jopa 1000 m/s, mutta turbiinin poistoputkessa nopeus on enää muutamia metrejä sekunnissa.

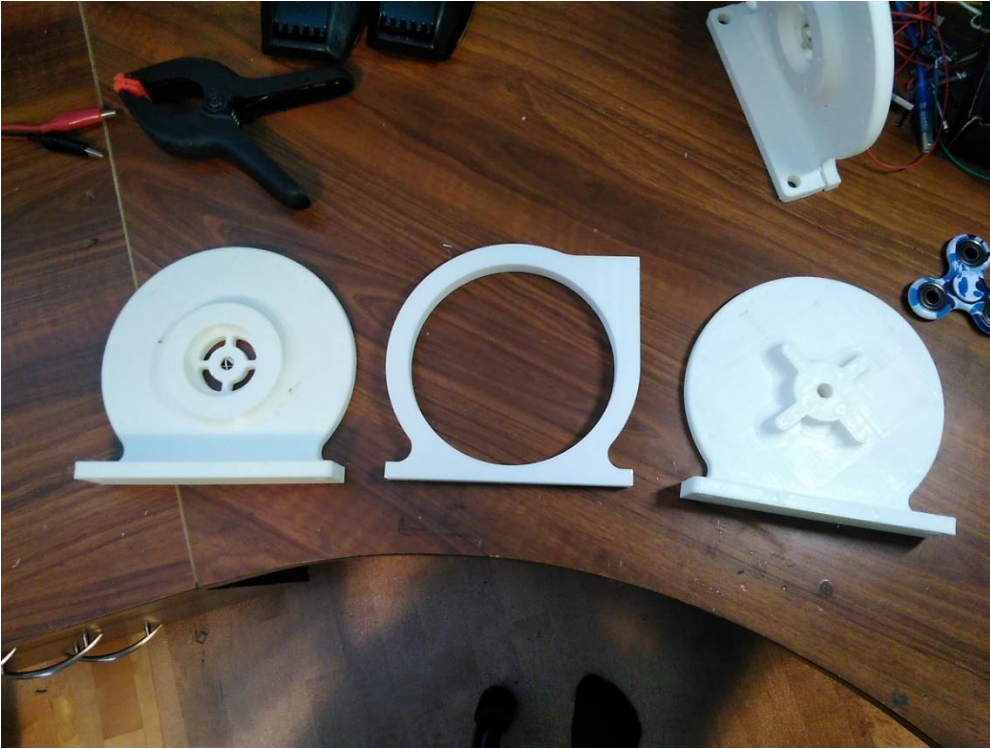
Kuten kaikissa höyryturbiineissa, suuttimen geometrialla on suuri merkitys hyötysuhteen kannalta. Suuttimella on erityisesti merkitystä Tesla-turbiinissa, jossa suuttimia on vain yksi. Suuttimella on kaksi päätarkoitusta: suunnata höyryvirta oikeassa kulmassa roottoriin ja nostaa höyryn nopeus yli äänennopeuden. Ilman suuttimen muotoilua höyryvirta ei voi ylittää äänennopeutta. Käytettäessä suuttimena suoraan leikattua putkea, ulostuleva kaasuvirta ei voi ylittää äänennopeutta koska kaasumolekyylit liikkuvat tätä nopeutta. Käytettäessä päästään laajenevaa suutinta, muodostuu suuttimen ulostuloon shokkiaaltoja, jotka saavat kaasumolekyylit liikkumaan yläääninopeudella. Saavutettu nopeus riippuu paineeroista sekä suuttimen kurkun ja pään pinta-alojen suhteesta. (Benson & Rayman ym. 1973.)



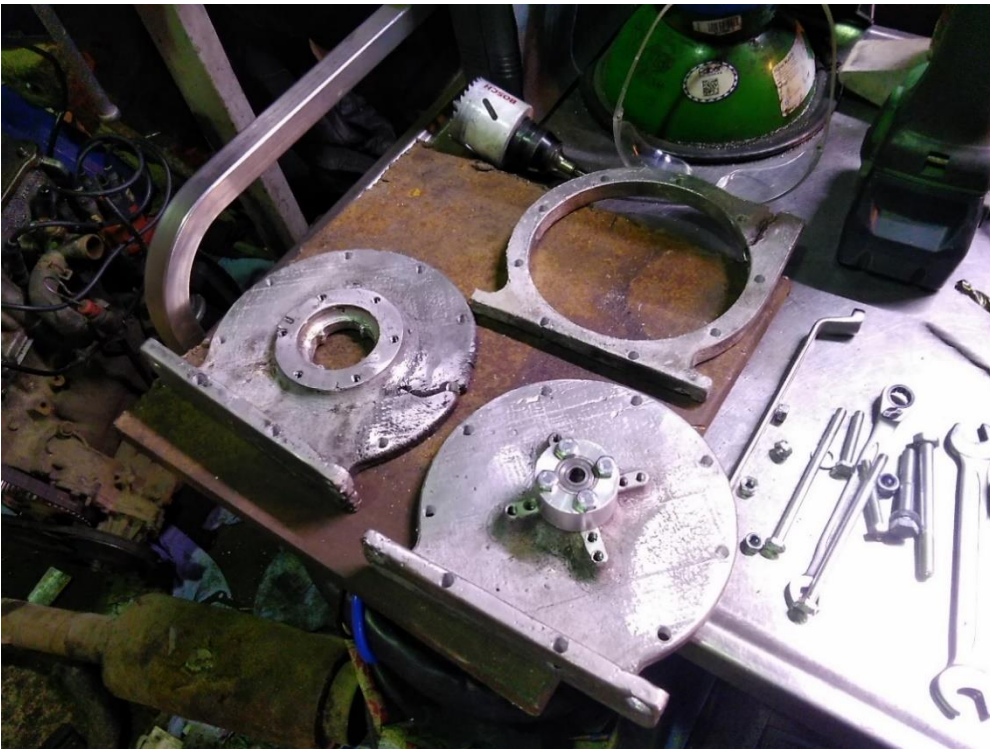
KUVA 38. Turbiinin 3D-tulostettu malli

Turbiini suunniteltiin koostuvaksi kolmesta pääosasta: kahdesta päätykannesta sekä niiden väliin tulevasta välikappaleesta. Erillisen välikappaleen tarkoituksena on helpottaa roottorin keskittämistä. Välikappaletta voidaan siirtää suhteessa roottoriin. Näin roottorin välitys voidaan säätää sopivaksi, vaikka laakerointi ei olisikaan täysin keskellä turbiinikokoonpanoa. Lisäksi turbiinin tehoa on mahdollista säätää leventämällä tai kaventamalla roottorin halkaisijaa.

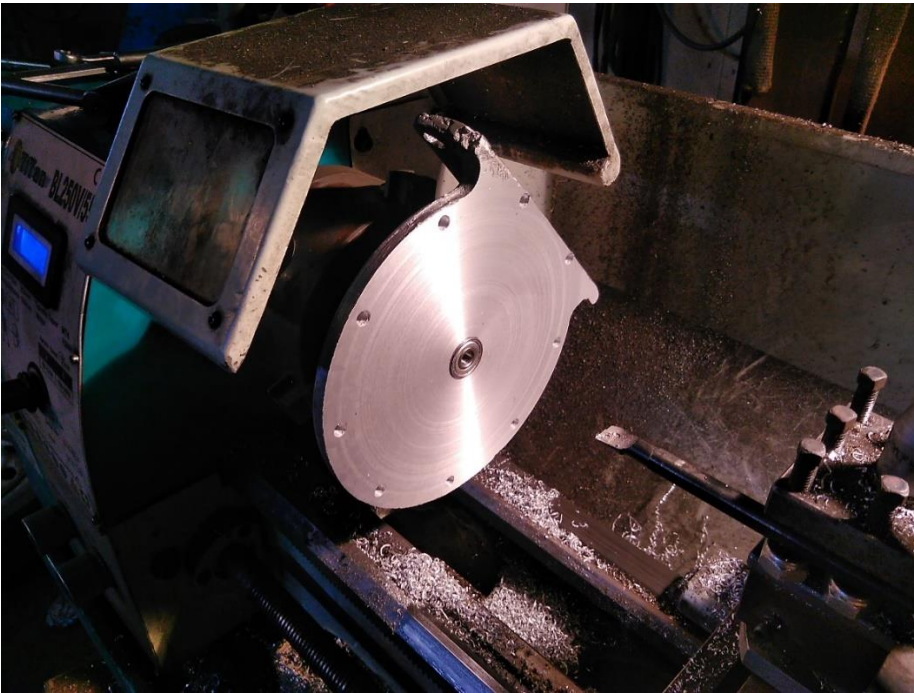
Turbiinin runko tehtiin samalla periaatteella kuin stirling-moottorin valuosatkin. Turbiini suunniteltiin tietokoneella ja siitä tehtiin 3D-tulostimella muovinen malli (KUVA 39). Muoviosista tehtiin alumiiniset kopiot lost-PLA -valumenetelmällä. Metalliosat koneistettiin lopullisiin mittoihin tavallisilla metallintyöstökoneilla (KUVA 40).



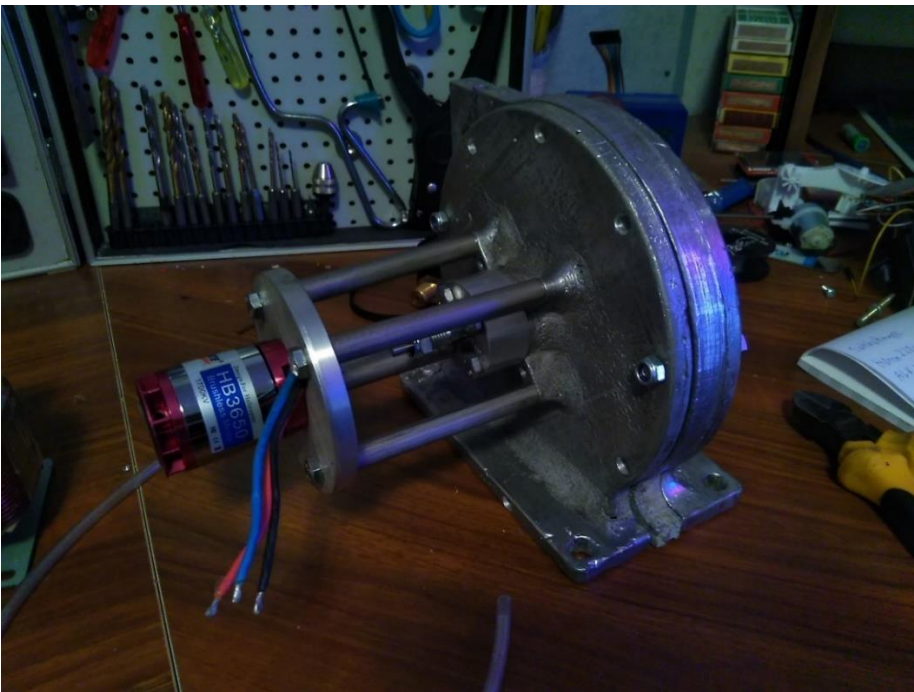
KUVA 39. Kolme muovista valumallia



KUVA 40. Valmiit alumiiniset turbiinin osat



KUVA 41. Turbiinin kannen suoristus ja laakerisovitteen sorvaus



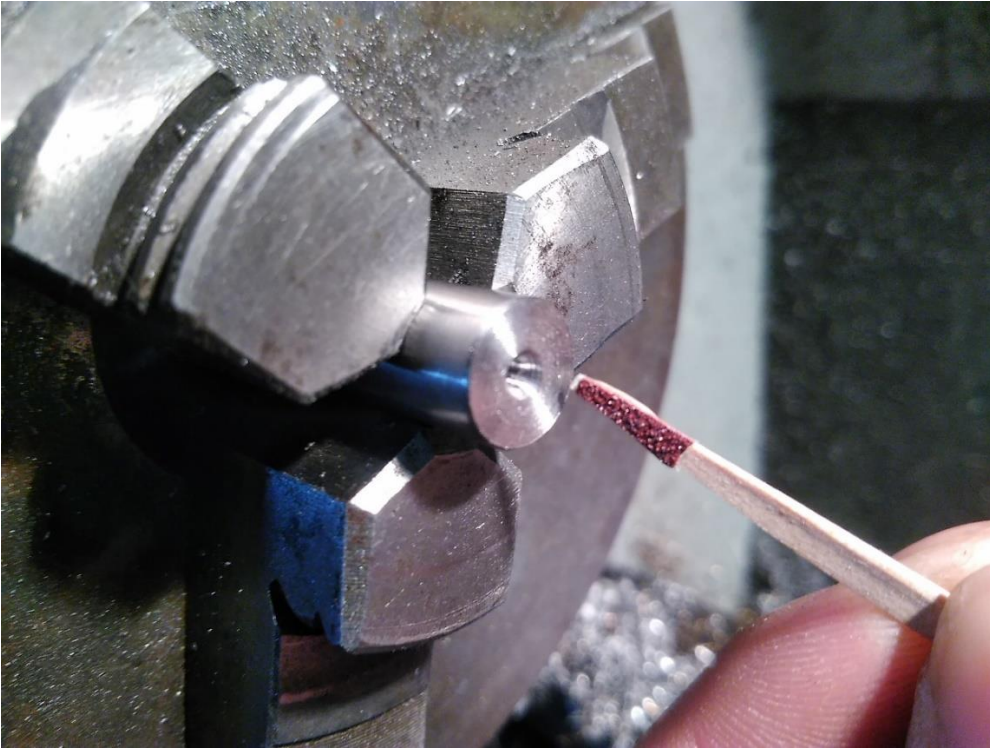
KUVA 42. Turbiinikokoonpano ja generaattorin kiinnitys



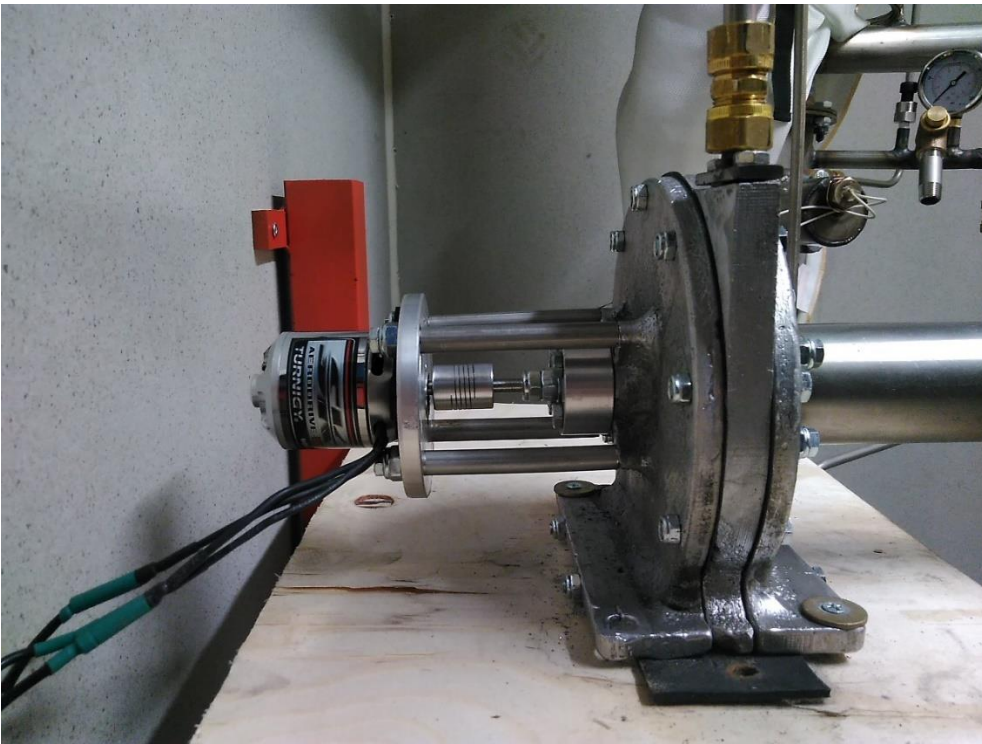
KUVA 43. Roottorin kiekot



KUVA 44. Roottori paikoillaan



KUVA 45. Suuttimen sorvaus



KUVA 46. Turbiini paikoillaan ensimmäistä testiajoa varten

Turbiinin roottorin kiekot tehtiin 0.5mm:n paksuisesta ruostumattomasta teräksestä. Kiekot tilattiin laserleikkaamolta. Kiekkojen väliin tuleva rako saatiin aikaan laittamalla kiekkojen väliin samasta metallilevystä leikattuja välirikkoja (KUVA 43). Akseli sorvattiin 8mm:n tangosta, joka kiristää mutterin avulla kiekot ja laakerit tiukasti toisiinsa. Kiekoissa ei ole lovia akseliin kiinnittymistä varten, vaan kaikki liike-energia siirtyy kiekkoista akseliin pelkän kitkavoiman avulla. Kierrosnopeuden ollessa hyvin suuri vääntömomentin suuruus jää pieneksi. Näin muuta kiinnitysmenetelmää roottorille tarvita.

Höyrysuuttimen sisäpinnan sorvaukseen ei ole tarpeeksi pientä työkalua, joten haluttu muoto täytyi tehdä käsivaraisesti hammastikkuun liimatun hiekkapaperin avulla (KUVA 45). Käsivaraisesti tehty suutin ei ole muodoltaan optimaalinen, mutta saavutettu muototarkkuus on riittävä hyötysuhteen kannalta.

3.5 Höyrylaitteisto

Höyrylaitteiston tekemiseen käytettiin samoja valmistusmenetelmiä kuin häkäpöntönkin valmistuksessa. Kaikki osat ovat ruostumatonta- tai haponkestävää terästä. Näin varmistettiin laitteiston kestävyys sekä aikaa että syövyttäviä olosuhteita vastaan. Galvaaninen erotus muista metalleista sekä metallien sähkökemialla piti ottaa rakentamisessa huomioon. Hyvänä puolena roosterin käytössä on se, että rosteri on laitteiston jaloin metalliseos, joka ruostuu galvaanisissa reaktioissa viimeisenä. Toisaalta kaikki epäjalometalliset metalliesineet, jotka ovat kosketuksissa rosterista valmistettuun laitteistoon, ovat alttiina hapettumiselle.



KUVA 47. Höyryvoimalaitteiston tietokonemallinnus

Laitteiston pääkomponentit ovat neljä lähes identtistä putkilämmönvaihdinta. Lämmönvaihtimet ovat höyrystin, lauhdutin, palamisilman esilämmitin sekä lämminvesivaihdin. Identtisten mitoitusten ansiosta lämmönvaihtimet on helppo valmistaa, ja monet komponentit ovat samoja kaikille vaihtimille. Jos lämmönvaihtimia tarvitsee jatkossa huoltaa tai vaihtaa, ovat varaosien mitat hyvin tiedossa ja huolto helpottuu huomattavasti. Syöttöveden esilämmittimellä ja höyryn tulistimella on omat putkikierukkalämmönvaihtimensa. Kaikki lämmönvaihtimet on tehty ruostumattomasta teräksestä, mikä ei ole niiden lämmönsiirron kannalta otollista. Tämän vuoksi lämmönvaihtimet on mitoitettu hieman ylisuuriksi riittävän lämmönsiirtopinnan varmistamiseksi.

Kuten isoissakin voimalaitoksissa, tehoa säädellään pääosin savukaasupuhaltimen avulla. Tulipesään lisättävän ilman määrää säädellään jäännöshappimittauksen avulla, jolloin savukaasujen koostumus pysyy aina vakiona. Häkäpöntön käytön ansiosta polttoaineen syöttö säätyy automaattisesti kulutuksen mukaan, koska häkäpönttö tuottaa puukaasua automaattisesti samaan tahtiin kuin kaasua imetään poltettavaksi. Muutettaessa savukaasupuhaltimen kierrosnopeutta muuttuu kattilan lämpöteho suorassa

suhteessa savukaasun massavirtaan. Tehon säädön tarve puolestaan perustuu höyrykattilan paineeseen, jonka automaatio yrittää pitää 10:ssä baarissa lämpötehoa säätämällä.

Kaasupolttimen liekki puhaltaa tulipesässä suoraan tulistimen putkia. Tällöin tulistin pystyy lämmittämään höyryn mahdollisimman kuumaksi ennen turbiinia. Liekki suunnataan tulipesään hieman vinossa kulmassa. Lisäksi tulipesän vastakkaisella puolella on kaareva tulenohjainlevy, joka estää liekkiä osumasta suoraan tulipesän seinään ohjaamalla sen pyörivään liikkeeseen. Pyörivän kaasuvirran ansiosta tulipesä toimii syklonin tavoin erotellen tuhkapartikkelit kaasuvirrasta. Samalla myös tulistimen lämmönsiirto tehostuu. Kuuma kaasu virtaa tulipesästä ylöspäin höyrykattilaan ja tuhka putoaa tulipesän pohjalla olevaan tuhkatilaan.

Kuuma kaasuvirta virtaa höyrykattilan putkinipun lävitse. Tällöin kaasu luovuttaa lämpöä kattilaveteen ja jäähtyy yli tuhannesta asteesta muutaman sadan asteen lämpötilaan. Suoraan höyrykattilan päällä on paloilmian esilämmitin, jonka jälkeen savukaasun lämpötila on noin 180 °C. Tässä kohdassa sijaitsee syöttöveden esilämmitin ja lambda-anturi, jotka on sijoitettu laitteiston mutkan sisälle. Mutkan jälkeen on viimeinen lämmönvaihdin, joka ottaa savukaasuissa olevan jäännöslämmön talteen vesikiertoon.

Vesivaihdin on sijoitettu vaakatasoon hieman laskevaan kulmaan kaasun virtaussuuntaan. Tämä on siksi, että vaihtimeen mahdollisesti lauhtuva lauhde valuu kaasuvirran suuntaisesti lauhteenpoistoputkeen. Vesivaihtimen jälkeen kaasun lämpötila on noin 80 °C ja se puhalletaan savukaasupuhaltimen läpi savupiippuun.



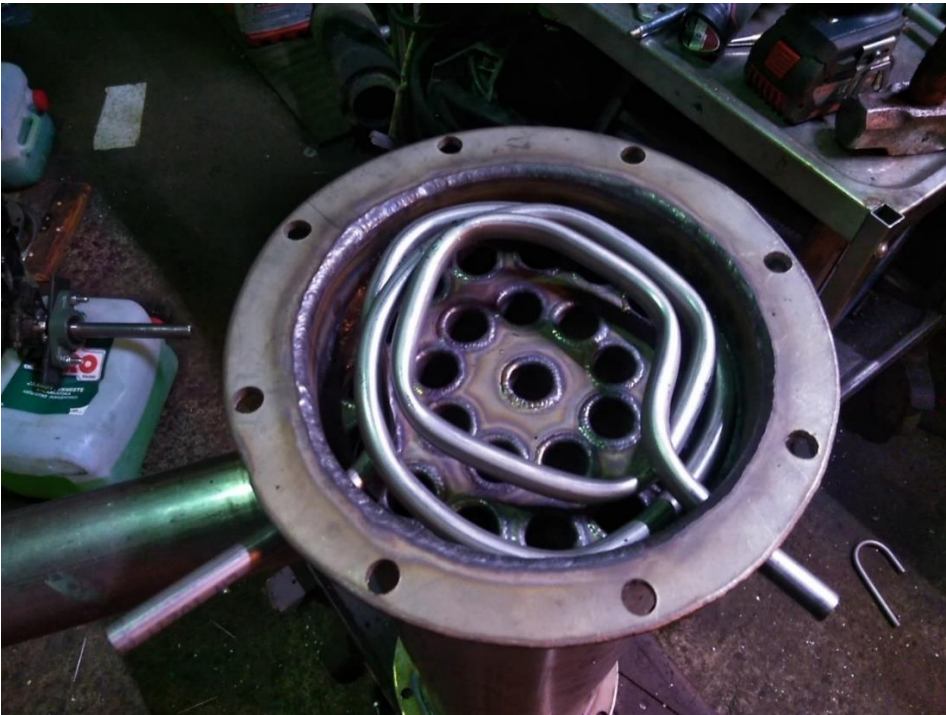
KUVA 48. Tulipesä ja tulistinkierukka



KUVA 49. Valmis paloilman esilämmittimen lämmönvaihdin



KUVA 50. Lämmönvaihdin sisältä, puolet putkista paikoillaan



KUVA 51. Syöttöveden esilämmityskierukka



KUVA 52. Kaikki lämmönvaihtimet valmiina

Lämmönvaihtimet ovat putkivaihtimia, joissa savukaasut kulkevat putkien sisäpuolelta. Vaihtimet on valmistettu TIG-hitsaamalla putkien päät päätylaippaan kiinni. Näin saadaan tiivis ja erittäin luja rakenne. Vaikka höyrykattilan päätylaippa onkin suora, paineen alla putkiin kohdistuva vetovoima pitää päätylevyn suorassa. Hyvä turvallisuusseikka tuliputkikattilassa on se, että ylipaineisena ensimmäisenä kattilasta hajoaa heikoin yksittäinen putki. Hajoava putken pää päästää hallitusti paineen purkautumaan savupiippuun halkaisematta koko kattilaa.

Kunkin vaihtimen pinta-ala on noin $0,8 \text{ m}^2$ putkien ulkopinta-alan mukaan laskettuna. Höyrykattilalle tämä on varsin sopiva mitoitus, mutta savukaasu-vesivaihtimelle, lauhduttimelle ja palamisilman esilämmittimelle pinta-ala on ylimitoitettu. Höyryn lauhduttimessa jäähdytysvesi virtaa putkien sisällä ja höyry lauhtuu ulkopinnalle. Näin saadaan höyryn lauhtumiselle suurin mahdollinen pinta-ala.



KUVA 53. Hörykattilan vuototestausta paineilmalla



KUVA 54. Hörykattilan koeponnistus vedellä

Paineastian valmistuksessa on tärkeää panostaa hitsaussaumojen lujuuteen. Kaikki kattilan saumat tehtiin TIG-hitsaamalla, jolla saadaan helposti tiiviitä ja kestäviä saumoja. Kaikki kattilan metalli on 316L-laadun haponkestävää terästä, joka hitsattiin käyttäen kyseiselle teräslaadulle tarkoitettua täytelankaa. Tuliputkien päitä hitsattaessa käytettiin suojakaasua molemmiin puolin saumaa hapettumien välttämiseksi. Hitsauksen jälkeen saumat passivoitiin typpihapolla parhaan lujuuden saavuttamiseksi.

Valmiin höyrykattilan saumat testattiin vuotojen varalta paineistamalla se paineilmalla ja upottamalla kokonaisuudessaan veteen, mahdolliset vuodot löytyvät tällöin kuplien avulla. Näin tehtiin kaikille neljälle lämmönvaihtimelle, eikä yksikään yli kahdestasadasta saumasta vuotanut. Tämä oli hyvä merkki hitsausten onnistumisesta.

Höyrykattilalle tehtiin vielä koeponnistus. Kattila täytettiin kokonaan vedellä ja paine nostettiin käsi-käyttöisellä hydraulipumpulla 25 baariin. Koeponnistuksen tarkoitus on testata, että laitteisto varmasti kestää sen suunnitellun käyttöpaineen. Tämä tehtiin käyttämällä paine yli kaksinkertaisena käyttöpaineseen nähden. Veden käytön tarkoitus on estää vaaratilanteet, sillä hydrostaattista painetta käyttämällä paineastian räjähdysvaaraa ei ole.

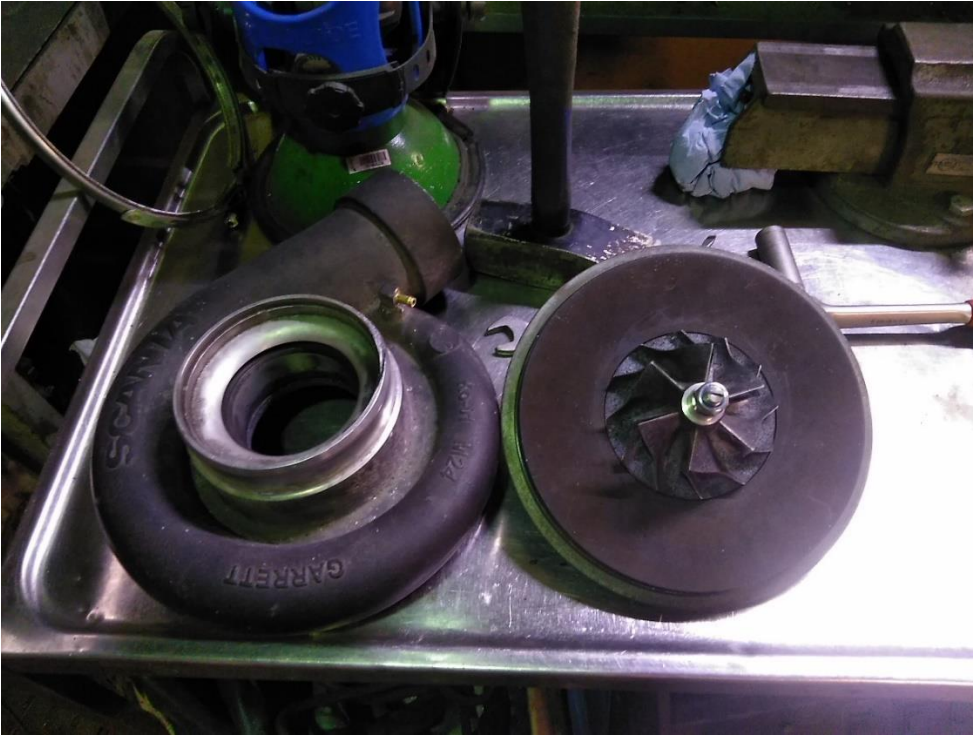


KUVA 55. Tulenkestävä ja eristetty jalusta

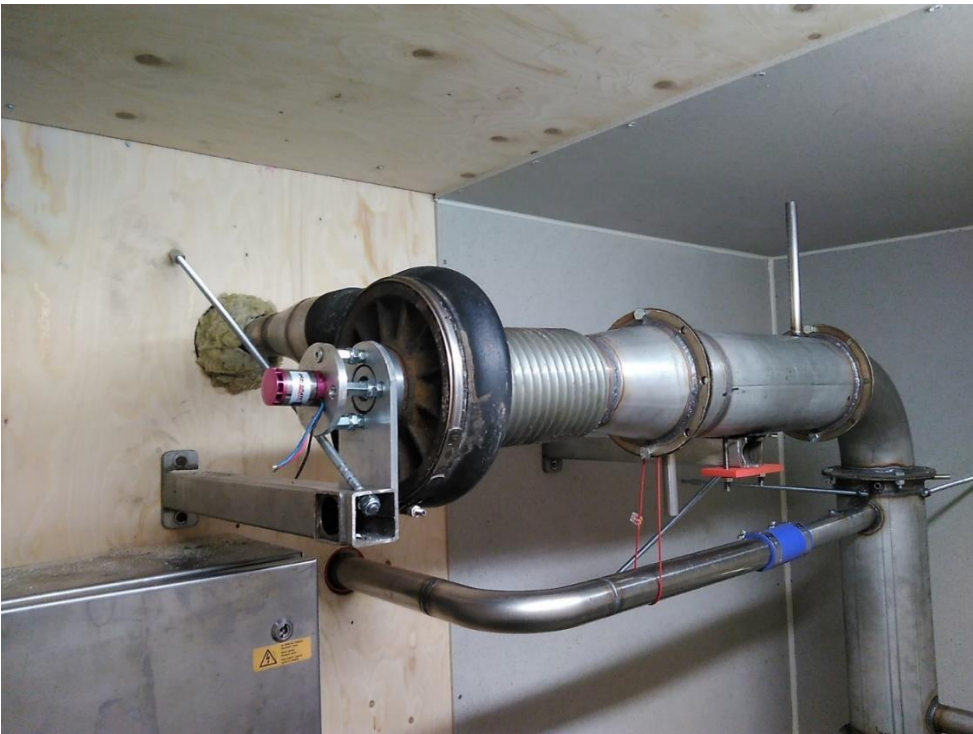


KUVA 56. Pääkomponentit paikoillaan

Häkäpönttöä käytettäessä ei piipun aiheuttama luontainen veto ole riittävä alipaineen luomiseen. Tarvittava alipaine saadaan käyttämällä savukaasupuhallinta. Vaikka pieniä kanavapuhaltimia onkin markkinoilla saatavilla savupiippuihin ja liesituulettimiin, ei tähän käyttötarkoitukseen sopivaa löytynyt. Puhaltimen täytyy kyetä luomaan varsin suuri alipaine, jotta häkäpöntön ja kaasupolttimen painehäviöt saadaan kuriin. Lisäksi puhaltimen täytyy toimia 12 V:n jännitteellä akkuvarmennuksen vuoksi. Puhallin täytyi siis valmistaa itse ja aihioiksi valikoitui suuri rekka-auton turbo. Turbon ahdinpuolen akselille sorvattiin kuulalaakerit ja siivikköä pyörittämään asennettiin harjaton RC-moottori. Moottori on harjaton kestomagneettimoottori, joten sen käyttöikä ja hyötysuhde ovat erittäin hyvät. Maksimiteho on lähes hevosvoiman, mutta moottorinohjaimella tehoa voidaan säätää portaattomasti. Puhallin osoittautui erittäin toimivaksi ratkaisuksi hyötysuhteen ja imutehon ollessa loistavat.



KUVA 57. Turbosta tehty savukaasupuhallin



KUVA 58. Savukaasupuhallin paikoillaan. Seinässä läpiviennit savukaasulle ja palamisilmalle



KUVA 59. Savupiippu ja paloilmän imuputki



KUVA 60. Tiivisteiden tekoa varten investoitu laserleikkuri



KUVA 61. Laserleikatut kumitiivisteet

Voimalaitoksessa on lukuisia pulttikiinnitteisiä laippoja jotka tarvitsevat tarkasti mittoihin leikattuja tiivisteitä. Erityisesti turbiinin kannen tiivisteiden täytyy olla millintarkasti sopivat, sillä muuten tiiviste hankaa roottoria vasten tai ei tiivistä kunnolla. Aluksi kumisia tiivisteitä leikattiin kumimatosta käsivaraisesti saksilla, mutta huonon lopputuloksen vuoksi päätettiin tiivisteiden tekoa varten ostaa laserleikkuri. Pienellä 40 W:n tehoisella laserilla voidaan leikata juuri halutunlaisia tiivisteitä tietokonemallin pohjalta. Lämmönvaihtimien suurten laippojen tiivisteet leikattiin 8 mm:n kumimatosta ja pienempien laippojen tiivisteisiin käytettiin 2 mm:n paksuista kumimattoa. Turbiinin kansissa kokeiltiin aluksi kuumankestävästä silikonimatosta tehtyjä tiivisteitä, mutta niiden lämmönkeston ollessa riittämätön päädyttiin käyttämään klingeritipaperista valmistettuja tiivisteitä.

Häkäpöntön, kaasupolttimen ja höyrykattilan osissa, jotka kuumenevat käytössä yli 300 asteen lämpötiloihin, ei pystytä käyttämään joustavia kumi- tai silikonitiivisteitä. Näissä osissa tiivistepinnat on tehty erityisen mittatarkoiksi, jolloin niissä voidaan käyttää tiivisteinä tulenkestävää tiivistemasaa. Tulipesien ja kattiloiden tiivistämiseen tarkoitettu massa levitetään ja puristetaan laippapintojen väliin, johon se kovettuu. Kuumetessaan massa paisuu täyttäen mahdolliset raot.



KUVA 62. Voimalan jäähdytyslaitteisto

Jäähdyttimiä laitoksessa on kaksi. Passiivisena ratkaisuna rosteriputkisto kierrättää jäähdytysnestettä kontin takaseinällä, jolloin koko kontin seinä toimii jäähdytyspintana. Kakkosjäähdyttimenä toimii vanha ilmalämpöpumppu, josta on riisuttu koneikot pois ja kytketty jäähdytysneste kiertämään jäähdytyskennostossa.

Silloin kun lämmintä käyttövetä tulee hieman enemmän kuin sille on kulutusta, kontin seinä pystyy siirtämään ylimääräisen lämpöenergian ulkoilmaan passiivisesti ilman liikkuvia osia. Jos ylimääräistä lämpöä tulee reilusti yli tarpeen esimerkiksi kesähelteellä, kykenee lämpöpumppu puhaltamaan laitoksen kaiken hukkalämmön ulos. Lämpöpumpun puhallin ja jäähdytysnestepumppu kuluttavat tehoa noin 70 W, mikä lisää laitoksen omasähkönkulutusta huomattavasti. Tästä syystä puhaltimen käyttöä jäähdytykseen on hyvä välttää käyttämällä passiivista jäähdytystä tai kytkemällä tarpeeksi lämpökuormaa laitoksen lämminvesipiiriin.



KUVA 63. Päähöyrytukki



KUVA 64. Kattilan pinta-anturi

Kattilan ollessa tuliputkikattila on vesitila yhtenäinen kokonaisuus. Kattila on täytetty $\frac{3}{4}$ korkeudesta vedellä. Pinnankorkeutta mitataan yksinkertaisella kohoan perustuvalla pinnankorkeusanturilla, joka pi-

tää vedenkorkeuden vakiona muutaman senttimetrin tarkkuudella. Pinnan laskiessa alarajaan syöttövesipumppu käynnistyy ja syöttää kattilaan vettä, kunnes pinta on ylärajassaan. Pinnankorkeusanturi toimii samalla myös erittäin tarkkana höyryn massavirta-anturina. Tietokone laskee, kuinka kauan aikaa kuluu vedenpinnan vajenemiseen ylärajalta alarajalle. Tiedettäessä tämän mittavälin vesitilavuus voidaan laskea suhteellisen tarkasti höyryvirta grammoina sekunnissa. Parhaan mittatarkkuuden saavuttamiseksi tietokone ottaa huomioon myös veden tiheyden vaihtelut paineanturin avulla.

Vesi kiehuu ollessaan kosketuksissa kuumiin tuliputkiin, höyrykuplat nousevat pinnalle ja höyry varastoituu kattilan yläosaan. Koska myös höyry on kosketuksissa tuliputkiin, tulistuu se hieman jo ennen kattilasta poistumistaan. Kattilan yläosasta lähtevä höyryn poistoputki muodostaa päänhöyrytukin, johon yhtyvät lukuisat höyrylähdet ja mittausanturit. Höyryn pääasiallinen reitti on alaspäin lähtevä putki tulistimelle, jonka yhteydessä on höyryn lämpötilan mittausanturi. Vaihtoehtoisesti höyryä voidaan ottaa pikaliittimen kautta muuhun käyttöön, esimerkiksi höyrypesuria varten. Höyrytukissa sijaitsee myös varoventtiili, joka on laitteiston tärkein turvavaruste. Varoventtiili on säädetty 14 baarin paineeseen, jonka ylittyessä se puhaltaa ylimääräiset höyryt ulos johtavaan putkeen. Höyrytukin päällä on kaksi painemittausanturia: mekaaninen painemittari ja digitaalinen paineanturi.



KUVA 65. Lauhdutin

Höyryn lauhdutin on sijoitettu suoraan turbiinin alapuolelle. Höyry johdetaan lauhduttimeen turbiinilta lyhyellä 52 mm paksulla putkella. Lauhde valuu vaihtimen pohjalle, jossa sitä on jatkuvasti varastoituneena noin 10 cm:n kerros. Pohjalta lauhde pumpataan suodattimen kautta

syöttövesipumpulle, joka pumppaa sen takaisin höyrykattilaan. Lauhteen määrää mitataan pinnankorkeusanturilla, joka pitää huolen siitä että lauhduttimen pohjalla on aina tarpeeksi lauhdetta syöttövesipumpulle. Tarvittaessa lauhduttimeen annostellaan lisävettä solenoidin kautta. Veden syöttöön ei tarvita erillistä pumppua, sillä lauhduttimen alipaine imee lisäveden säiliöstä solenoidin avauduttua. Lisäveden syöttöä tarvitaan, koska lauhduttimen alipainepumppu imee pieniä määriä höyryä ylläpitäessään alipainetta. Lisäksi lämpötilan- ja paineenvaihtelut höyrykattilassa muuttavat kattilaveden tiheyttä, mikä vaikuttaa lauhdepinnan korkeuteen etenkin käynnistys- ja sammutustilanteissa.

Höyryn lauhtuessa vedeksi muodostuu lauhduttimeen lievä alipaine, mikä on eduksi turbiinin toiminnalle. Alipainetta täytyy kuitenkin ylläpitää alipainepumpulla, sillä ilmavuotojen ja syöttöveden mukana kulkeutuva ilma heikentää höyryn lauhtumista nostoen lauhduttimen painetta. Koska alipainepumppu vie vain muutaman watin tehoa, voi sitä pitää päällä aina voimalan ollessa toiminnassa. Paremmasta alipaineesta saatava hyötysuhteen nousu riittää kattamaan moninkertaisesti alipainepumpun sähkötarpeen.



KUVA 66. Lauhduttimen takaiskuventtiili

Jos lauhduttimen toiminta jostain syystä heikkenee, on mahdollista, että höyrynpaine nousee ylipaineen puolelle. Tämän vuoksi on lauhduttimessa oltava ylipainesuojaus. Paine pääsee purkautumaan

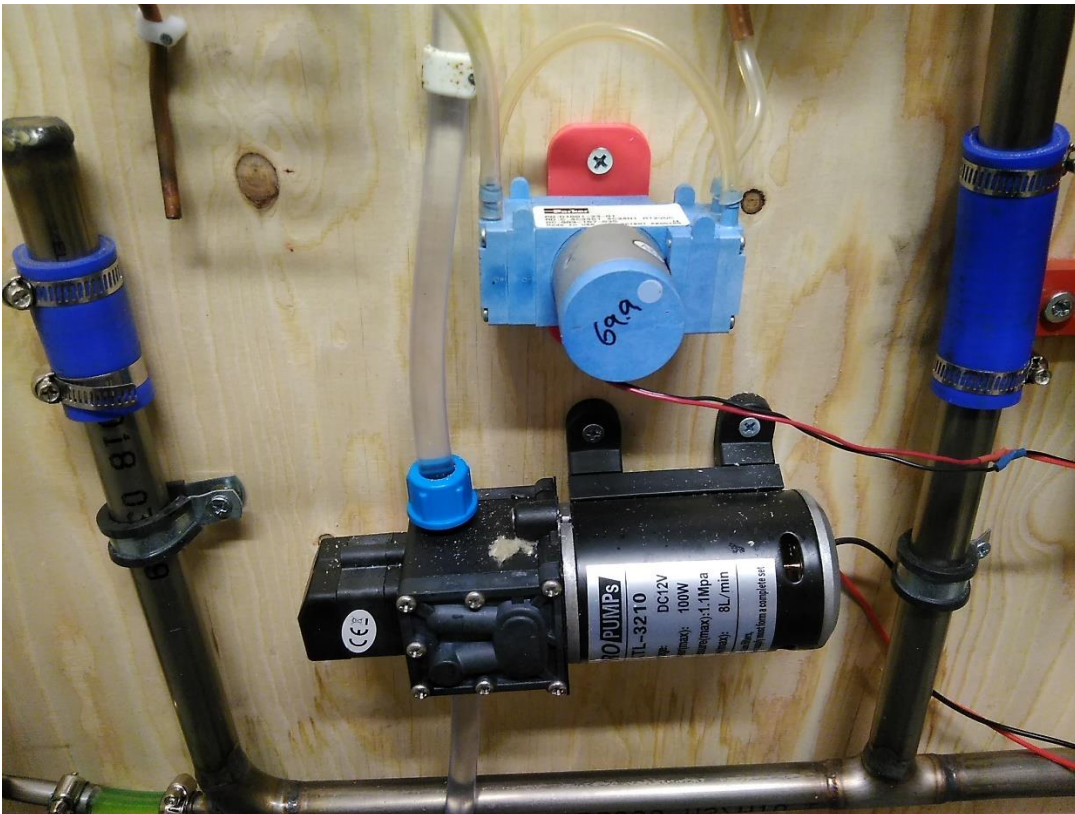
yksisuuntaventtiilin kautta, joka päästää höyryn virtaamaan omalla paineellaan ulkoilmaan häiriötilanteessa (KUVA 66). Paine voi lauhduttimessa nousta esimerkiksi jäähdytysvesikierron- tai alipainepumpun häiriön vuoksi.

Höyry virtaa lauhduttimen lämmönvaihtimen putkien ulkopuolella. Putkien sisäpuolella virtaa jäähdytysneste. Höyryn lauhtuessa lämmönsiirtoteho on noin 1000-6000 W/(m²°C). Tarkkaa arvoa lauhduttimen teholle on vaikea laskea, koska tehoon vaikuttaa niin monta tekijää. Lämpötilan ja paineen lisäksi suuri vaikutustekijä on lauhteen virtauksen hydrodynamiikka. Lauhde voi valua jäähdytysputkien pinnalla kalvo- tai pisaravaluntana. Kalvovalunnassa lauhde muodostaa jäähdytyspinnalle ohuen kalvon joka valuu hitaasti alaspäin. Pisaravalunnassa lauhde kerääntyy pintajännityksen vaikutuksesta pisaroiksi, jotka valuvat nopeasti lauhduttimen pohjalle. Pisaravalunta on lämmönsiirron kannalta parempi vaihtoehto, koska siinä paljas metallipinta pääsee paremmin kosketuksiin höyryn kanssa. Valumisen tyyppi riippuu monesta tekijästä, eikä lauhdutinta suunniteltaessa voida tietää, kummalla tavalla lauhde käyttäytyy. Lauhteen käyttäytyminen nähdään vasta kokeiltaessa lauhdutinta. Yleensä samassa lauhduttimessa tapahtuu molempia valumismuotoja yhtä aikaa lauhduttimen eri osissa. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2016.)

Lauhduksen mitoituksessa on varauduttava kalvovaluntaan, joten lämmönsiirtotehoksi valitaan tässä ala-arvo eli 1000 W/(m²°C). Lauhduksen pinta-ala on 0.8 m². Höyryn lämpötilan ollessa noin 100 °C ja jäähdytysveden 30 °C, voidaan laskea lauhduksen teho:

$$P = 1000 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * 0,8 m^2 * (100 \text{ } ^\circ C - 30 \text{ } ^\circ C) = 56 kW$$

Lauhduksen pinta-ala on näin ollen riittävä höyryn lauhtamiseen jopa pessimistisellä 1000 W/(m²°C):n lämmönsiirron arvolla. Käytössä suurin lauhduttimelta vaadittava teho on noin 10 kW, joten lauhduksen voidaan arvioida olevan jopa kymmenkertaisesti ylimitoitettu. Käytännössä ylimitoitus parantaa huomattavasti alipaineen ylläpitokykyä, etenkin jos lauhduttimeen pääsee vuotamaan pieniä määriä ilmaa.



KUVA 67. Syöttövesi- ja alipainepumppu

Alipainepumppu on 12 V:n jännitteellä toimiva kaksipuolinen kalvopumppu, joka kykenee imemään alipaineen -0.7 baariin asti. Moottori on harjaton ja kuulalaakeroitu, joten sen elinikä on varsin pitkä. Pumppu imee höyryä lauhduttimesta ja turbiinin akselilta. Lauhduttimen imuletku on tärkeä lauhduttimen alipaineen ylläpitoon, sillä lauhduttimeen ajan kanssa kertyvä ilma heikentää sen toimintaa huomattavasti.

Turbiinin akselin imuputki toimii labyrinthitiivisteen apuna akselin tiivistämisessä. Pumppu imee pienen alipaineen labyrinthitiivisteen ulkoilman puoleiseen tilaan, jolloin ulkoilma ei pääse kosketuksiin labyrinthitiivisteen kanssa. Tällöin turbiinin akseli aina ”vuotaa” hieman höyryä alipainepumpulle, estäen ilman pääsemisen turbiinikoteloon. Periaate on samankaltainen kuin isoissakin höyryturbiineissa, joissa lisäksi akseleille johdetaan paineistettua höyryä työntämään ilmaa pois tiivisteiltä.

Alipainepumpun läpi kulkeva höyry lauhtuu pienessä kuparikierukassa, josta se puhalletaan lauhdevesisäiliöön. Tästä säiliöstä se palaa solenoidiventtiilin kautta takaisin lauhduttimen säiliöön ja takaisin höyrykiertoon. Koko höyry- ja lauhdekierto on suljettu piiri, eikä vettä kulu voimalan käytössä juuri lainkaan. Vesi on kuitenkin hyvä vaihtaa aika ajoin esimerkiksi vuosihuollon yhteydessä, jolloin koko

höyryjärjestelmä huuhdellaan ja vesi korvataan uudella erällä tislattua vettä. Tislattun veden maksaessa noin 0,80 €/litra ei veden kulutuksesta aiheudu merkittäviä kustannuksia.

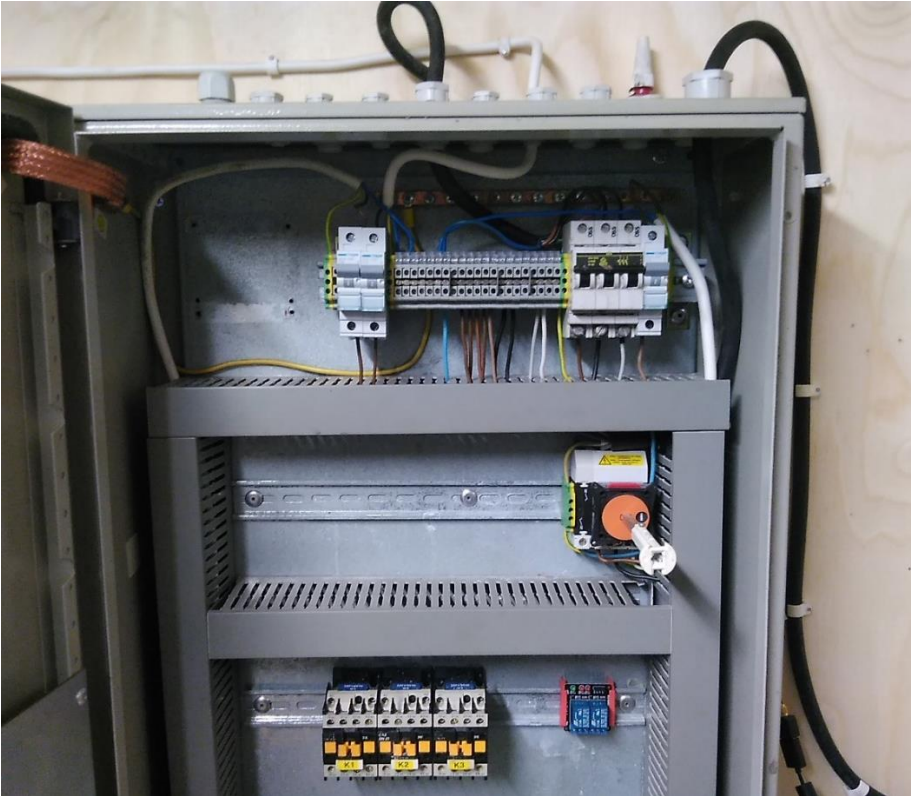


KUVA 68. Savukaasu-vesi lämmönvaihdin

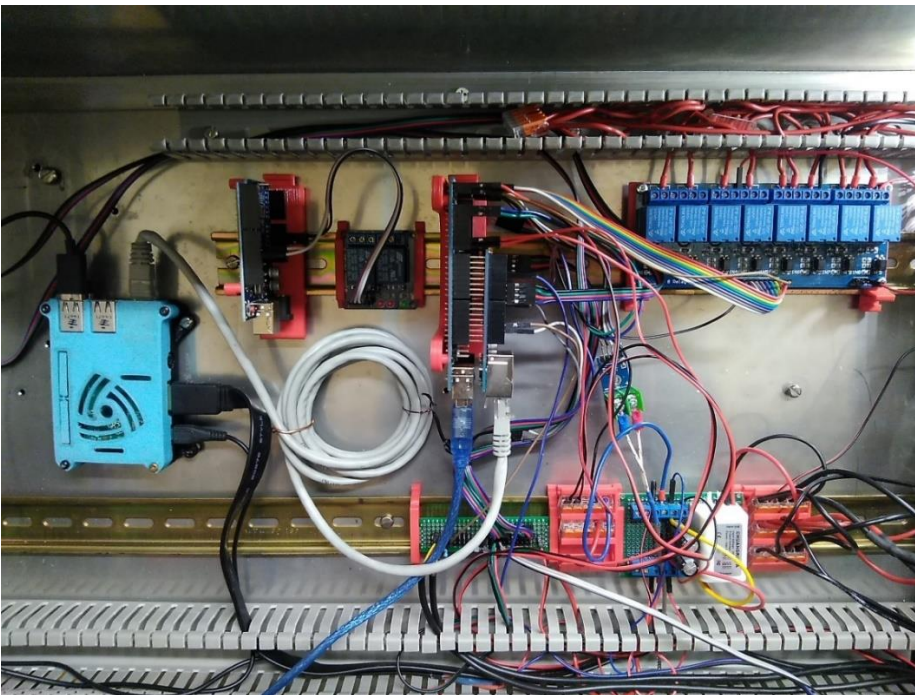
Jälkilämmön talteenotto savukaasuista ei ole pakollinen ratkaisu laitoksen toiminnalle, mutta sillä saadaan hieman lisätehoa lämmöntuotantoon. Saatava teho on vain noin kymmenesosa siitä tehosta, joka saadaan höyryn lauhduttimesta. Lisähyötynä jäähdytysveden lämpötilaa saadaan kuitenkin nostettua hieman ilman lauhduttimen tehon alenemista. Lauhduttimessa kiertävän jäähdytysveden täytyy olla mahdollisimman kylmää lauhduttimen hyvän toiminnan takaamiseksi. Tämä on kuitenkin epäedullista veden lämmityskäyttöä ajatellen. Tämän vuoksi lauhduttimen ja savukaasuvaihtimen jäähdytyskierto on kytketty sarjaan siten, että kylmänä palaava vesi menee ensin lauhduttimeen ja vasta sitten savukaasuvaihtimeen. Tällöin lauhdutin toimii mahdollisimman kylmänä savukaasuvaihtimen nostaessa veden lämpötilaa hieman ennen kuin se menee käyttöön.



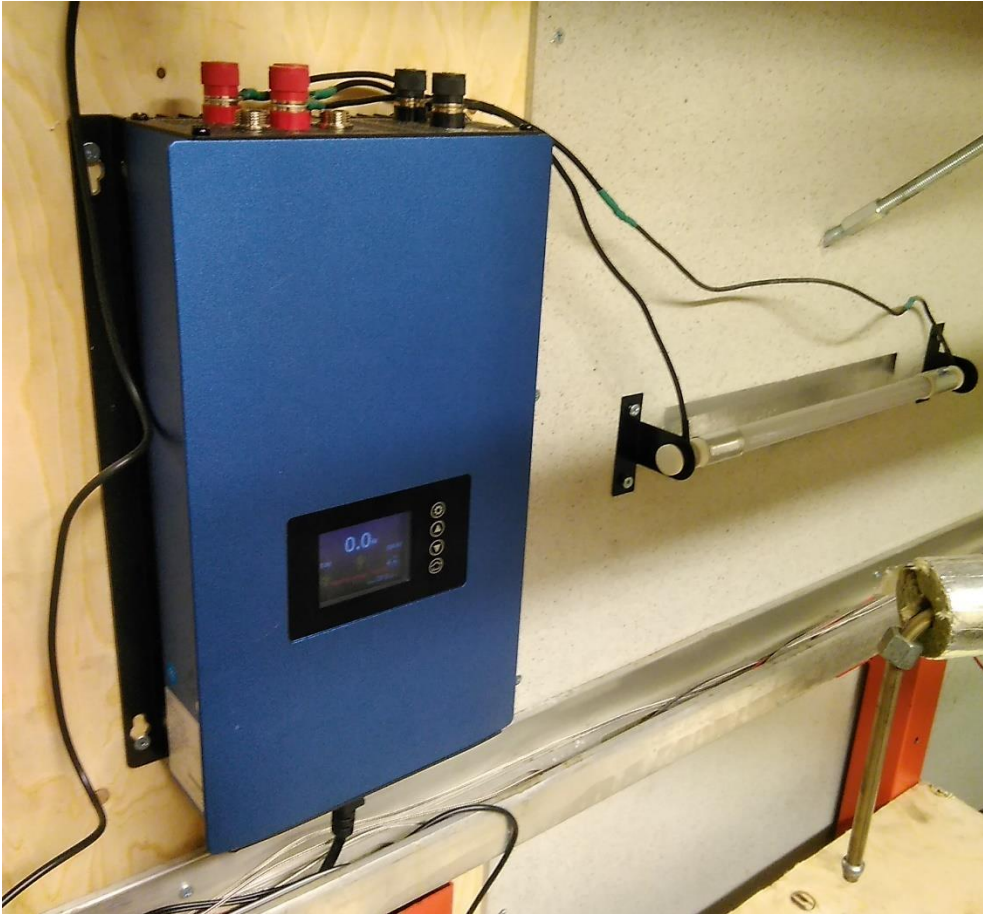
KUVA 69. Pääosin eristetty kattilakokonaisuus



KUVA 70. Verkkovirtakytkennät



KUVA 71. Automaatiokytkennät



KUVA 72. Invertteri ja kuormavastus

Voimalaitoksen sähköistystä varten seinälle asennettiin kaksi erillistä sähkökaappia. Toiseen kaappiin asennettiin tasajännitteellä toimiva automaatiolaitteisto ja toiseen verkkojännitteiset kytkennät. Kaapit on erotettu toisistaan siten, ettei matalajännitteisessä kaapissa ole yhtään korkeajännitteistä kytkentää. Tällöin automaatiokaapin kytkentöjä on turvallista käsitellä laitoksen toiminnan aikanakin.

AC-puolen kaappiin tulee 16 A kolmivaihesyöttö sähköverkosta. Kytkentä on toteutettu voimavirtapistokkeella, joka voidaan kytkeä kiinteistössä olevaan voimavirtapistorasiaan. Tällöin konttia siirrettäessä ei tarvitse tehdä sähkökytkentöjä ja samalla voimavirtapistoketta voidaan käyttää päävirtakatkaisimen tapaan sähköverkosta irtautumiseen. Sähkökaapissa on omat sulakkeet ja lähdöt kontin pistorasioille ja valoille. Inverttereitä varten on omat pistorasiasyötöt. Kaappiin on jätetty tilaa mahdollisia laajennuksia ajatellen sekä vaiheiden välistä kuormanohjausta varten.

Automaatio- ja toimilaittejärjestelmä on täysin akkuvarmennettu. Tällä saadaan varmistettua laitoksen moitteeton toiminta sähkökatkojen aikana ja mahdollistetaan laitoksen käyttö varavoimalana pidempienkin sähkökatkojen aikana. Akkuvarmennus on yksinkertaisesti toteutettu 12 V:n lyijyakun avulla. Akkua ladataan verkkovirtalaturilla ja automaatiojärjestelmä ottaa 12 V:n käyttöjännitteensä suoraan akulta. Pumput, puhaltimet ja moottorit käyttävät suoraan 12 V:n jännitettä, kun taas automaation anturit ja mikropiirit toimivat 5 V:n jännitteellä, joka tuotetaan erillisellä muuntajalla 12 V:n jännitteestä.

Automaatiolaitteiston päätielokoneena toimii Arduino Mega -mikropiiri, verkkoyhteyden hoitaa Raspberry Pi 3. Arduino Mega ohjaa koko laitoksen automaation. Kymmenet mitta-anturit ja releet on kytketty suoraan Arduinon tuloihin ja lähtöihin. Arduino on lisäksi kytkettynä sähkökaapin kannessa olevaan näyttöön ja näppäimistöön, joilla voimalan käyttöliittymää ohjataan. Vaikka Arduino onkin vain 8-bittinen mikropiiri, kykenee se helposti ohjaamaan koko voimalaitoksen automatiikkaa, käyttöliittymää ja datan lähetystä pilveen reaaliajassa.

Arduinon on kytketty lisäosana Ethernet Shield, jonka avulla Arduino on yhteydessä internettiin. Verkkoyhteys Arduinolle saapuu melko pitkää reittiä myöten, valokuituun yhteydessä oleva langaton reititin sijaitsee asuinrakennuksessa sadan metrin päässä voimalaitoskontista. Langaton WLAN-signaali on hyvin heikko näin pitkän matkan päässä, joten voimalan katolle on asennettu erillinen antenni signaalin vastaanottamiseen. Antenni on sijoitettu konttiin kiinnitetyn valopylvään päähän (KUVA 76), jolloin korkealla sijaitseva antenni saa lähes näköyhteyden reitittimen antenniin. Valopylvään pääasiallinen käyttötarkoitus on toimia antennimastona ja toiminta ulkovalona on hyödyllinen lisäominaisuus. Antennisignaali johdetaan Raspberry Pi-tietokoneelle koaksiaalikaapelia pitkin. Raspberryn ainoa tehtävä on toimia yksinkertaisena reitittimenä muuntamalla WLAN-signaali Ethernet yhteydeksi, johon Arduino voi kytkeytyä.

Verkkoyhteyden kautta Arduino lähettää voimalan mittadataa pilvipalvelu- ja etäohjausohjelma Cayenelle. Sen avulla voimalan toimintaa voidaan seurata puhelimen tai verkkoselaimen avulla. Sovelluksen kautta voidaan myös etäohjata voimalan toimintoja, mutta tärkeimmät palvelun ominaisuudet ovat kuitenkin tiedon tallennus ja häiriötilanteista ilmoittaminen. Data voidaan ladata omalle tietokoneelle esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmalla käsittelyä varten. Ohjelmistoon voidaan tehdä myös raja-arvoja, joiden perusteella palvelu lähettää hälytysviestejä sähköpostilla tai SMS-viestillä. Tämä on erityisen tärkeä ominaisuus ongelmatilanteisiin reagoimiseen, sillä voimalassa tapahtuvista ongelmatilanteista saadaan välittömästi tieto käyttäjälle.

3.6 Aurinkopaneelisto

Kontin katolle päätettiin asentaa koemielessä aurinkoa seuraava 1kW:n aurinkopaneelisto. Voimalaitoksen automatiikka pystyy ohjaamaan mainiosti myös paneelin kääntömekanismia sekä tuotetun sähkön kuormanohjausta eri vaiheille. Tällöin voimalaitos kykenee käyttämään sähkön hyödyksi kiinteistössä paremmin, kun tuotto ohjataan eniten kuormitettuun vaiheeseen. Merikontin katto on otollinen paikka kääntyvälle paneelille, koska laitteisto voidaan pultata suoraan kontin rautarunkoon kiinni ilman tarvetta erillisille perustuksille. Korkea sijainti auttaa sähköntuotannossa etenkin talvella, kun aurinko paistaa matalalta. Kääntömekanismin ansiosta lumi ei myöskään keräänny paneelien päälle talvella, koska paneelisto voidaan kääntää lähes pystyasentoon talvikuukausiksi. Inverterti voidaan sijoittaa hyvin lyhyillä kaapeleilla kontin sisään lämmitettyyn ja kuivaan sisätilaan.



KUVA 73. Keräimen runko ja tolppa



KUVA 74. Paneelien kiinnitys apurunkoon maassa



KUVA 75. Valmiin paneeliston nosto paikoilleen kurottajalla



KUVA 76. Sähköauton lataus aurinkopaneeleilla

Paneeliston runko rakennettiin 40x30 mm:n kantikkaasta rautaputkesta (KUVA 74). Paneelit pultataan tähän apurunkoon kukin neljällä M6-pultilla. Apurunko on laakeroitu pystysuunnassa ja 12 V sähkösylinteri ohjaa pystysuuntaista kallistuskulmaa. Runko on kiinnitetty pystytolppaan, jonka pää on laakeroitu vaakasuuntaista pyörimistä varten. 12 V sähkömoottori pyörittää runkoa vaakasuunnassa hammaskehän välityksellä. Pystytolppa on tehty auton kardaaniputkesta, ja laakereina toimivat kardaanin alkuperäiset laakerit. Pystysuuntaisen voiman ottaa vastaan vaihdelaatikosta kierrätetty puskulaakeri. Tolppa on pultattu kontin nurkkakiinnikkeeseen neljällä erikoiskovalla M10 pultilla parhaan murtolujuuden varmistamiseksi.

Automaatiikka kääntää paneelistoa vaakasuunnassa siten, että paneelisto osoittaa koko ajan aurinkoon päin. Ohjaus perustuu kellonaikaan ja moottori kääntää paneeliston suunnan kohti aurinkoa kellonajan mukaisesti. Yön aikana tehdään täyskäännös takaisin päin, jolloin täyskierrosta ei koskaan tehdä. Näin sähkökaapelit eivät kierry tolpan ympärille ja niiden mekaaninen asennus on yksinkertainen. Pystysuuntaisen ohjaus on manuaalinen, jota käytetään lähinnä paneeliston kääntämiseksi pystyasentoon talviajaksi lumikuorman kerääntymisen estämiseksi.

Paneeleiksi valittiin 4 kpl 270 W:n monikidepaneeleita (SINOSOLA), jolloin huipputehoksi saadaan 1080 W. Invertteri on yksivaiheinen 1000 W:n huipputehon omaava verkkoon tahdistuva MPPT-invertteri (tuotemerkitön kiinalainen). Intuiitivisesti voisi tuntua siltä, että käytetty invertteri on liian pieni paneelistolle. Todellisuudessa se on erittäin hyvin käyttökohteeseen mitoitettu. Paneeliston huipputeho on optimiolosuhteissa tuotettu teho ja Suomen olosuhteissa tuotettu teho jää aina tämän alle. Invertterin teho puolestaan on verkkoon syötettävä maksimiteho häviöiden jälkeen, jolloin ilmoitettu 92 %:n hyötysuhde huomioitaessa invertteri on varsin riittävä tälle paneelistolle.

Paneelit on kytketty sekä sarjaan että rinnan. Invertterin jännitealue on välillä 45-90 V. Paneelien jännite kuormitettuna on noin 30 V. Kaikkia paneeleita ei voinut kytkeä rinnan koska silloin jännite olisi ollut liian matala. Sarjassa jännite olisi taas ollut liian korkea. Ainoa tapa kytkeä paneelit oli tehdä kaksi sarjankytkentää, jolloin jännite saatiin 60 V:iin, ja kytkeä nämä sarjankytkennät rinnan invertterille. Sarjaan kytkentä olisi ollut parempi vaihtoehto suuremmasta jännitteestä saatavien pienempien tehohäviöiden vuoksi. Toisaalta kahteen sarjaan kytkemällä paneeleista saadaan enemmän tehoa silloin, kun toiseen paneelistoon osuu varjo, jolloin alentunut teho vaikuttaa vain varjostuvaan sarjankytkentään.

Laitteiston tehon ja hyötysuhteen määrittämiseksi tehot mitattiin sekä DC- että AC-puolelta invertteriä. Invertterin oman näytön ilmoittaessa tehon olevan 926 W, mitattiin paneeleilta tulevan syötön olevan 60,4 V / 16,8 A. Tällöin invertterin hyötysuhteeksi (Eff) saadaan:

$$Eff = \frac{926 \text{ W}}{60,4 \text{ V} * 16,8 \text{ A}} * 100 \approx 91,2 \%$$

Invertterin ilmoittama suurin teho parhaalla suuntauksella kirkkaana kesäpäivänä on noin 940 W. Tällöin paneelien DC-teho on:

$$Eff = \frac{940 \text{ W}}{0,912} \approx 1030 \text{ W}$$

Invertterin valmistekilvessä on ilmoitettu huippuhyötysuhteen olevan 92 %. Mitattu arvo on varsin lähellä ilmoitettua, vaikka invertteri olikin mittaushetkellä lähes täydellä kuormituksella. Invertterin voidaan todeta toimivan erittäin hyvällä hyötysuhteella valmistajan ilmoittamien arvojen mukaisesti. Paneelien hetkellisen huipputehon laskettiin olevan 1030 W. Tämäkin arvo on varsin lähellä valmistajan ilmoittamien arvojen mukaan laskettua 1080 W:n tehoa. Otettaessa huomioon kaapeleista johtuvat siirtohäviöt olisi tuotettu teho vieläkin lähempänä valmistajan ilmoittamaa tehoa. Paneelien todellisen

tehon voidaan siis todeta olevan erittäin lähellä valmistajan ilmoittamia arvoja, jopa Suomen olosuhteissa.

4 TESTIAJOT

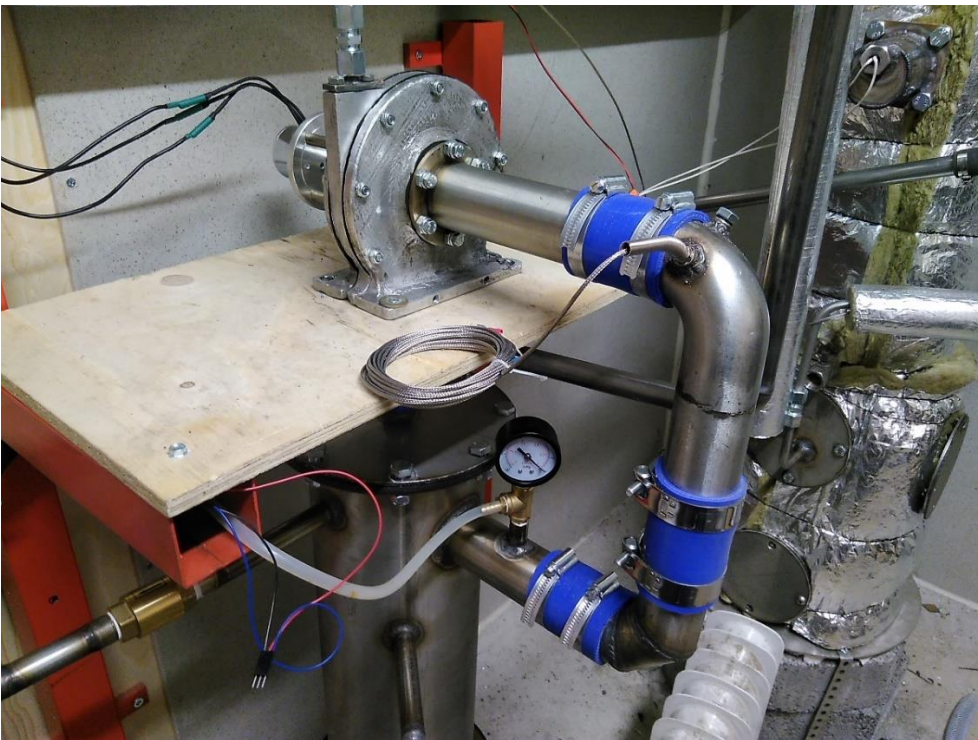
Voimalaitosta testiajettiin useita kertoja laitteiston toiminnan testaamiseksi. Testiajojen mittausdata tallentui automaattisesti pilvipalvelimelle, josta se voitiin ladata myöhempää analysointia varten. Tulosten perusteella laitosta kehitettiin ja paranneltiin seuraavia testejä varten. Kukin testi kesti noin tunnin, jonka aikana höyrylaitteisto saatiin lämmitettyä toimintalämpötilaan ja turbiinia pyöritettiin täydellä höyryteholla.



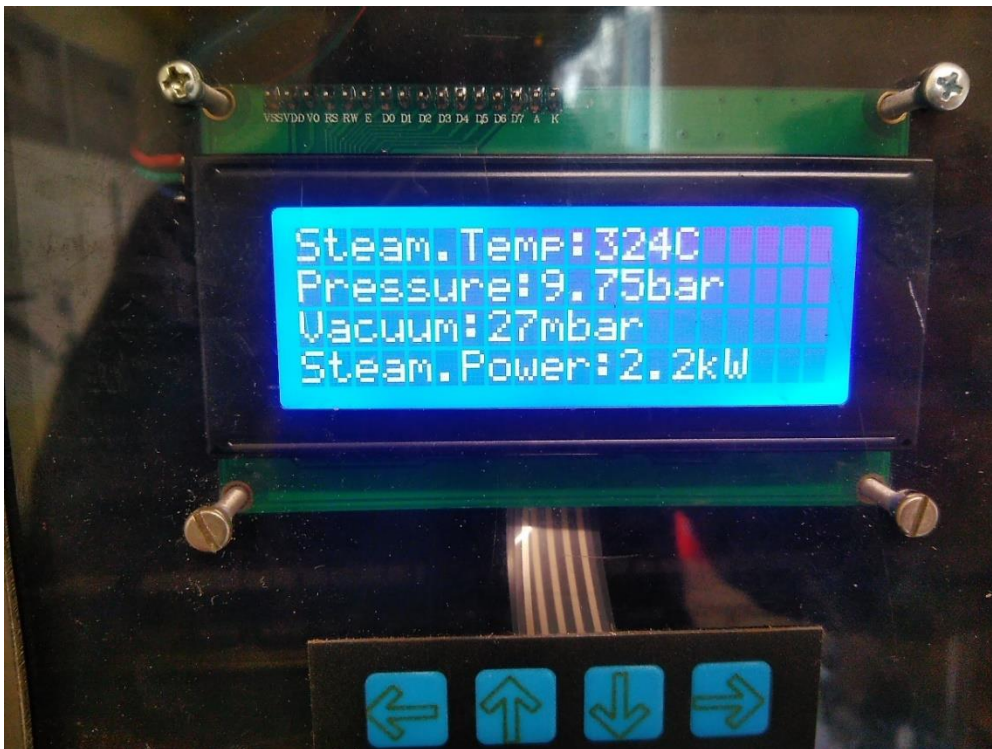
KUVA 77. Vesi- ja höyryputkitukset valmiina ensimmäiseen testiajoon



KUVA 78. Kattilan lämmitystä nestekaasulla



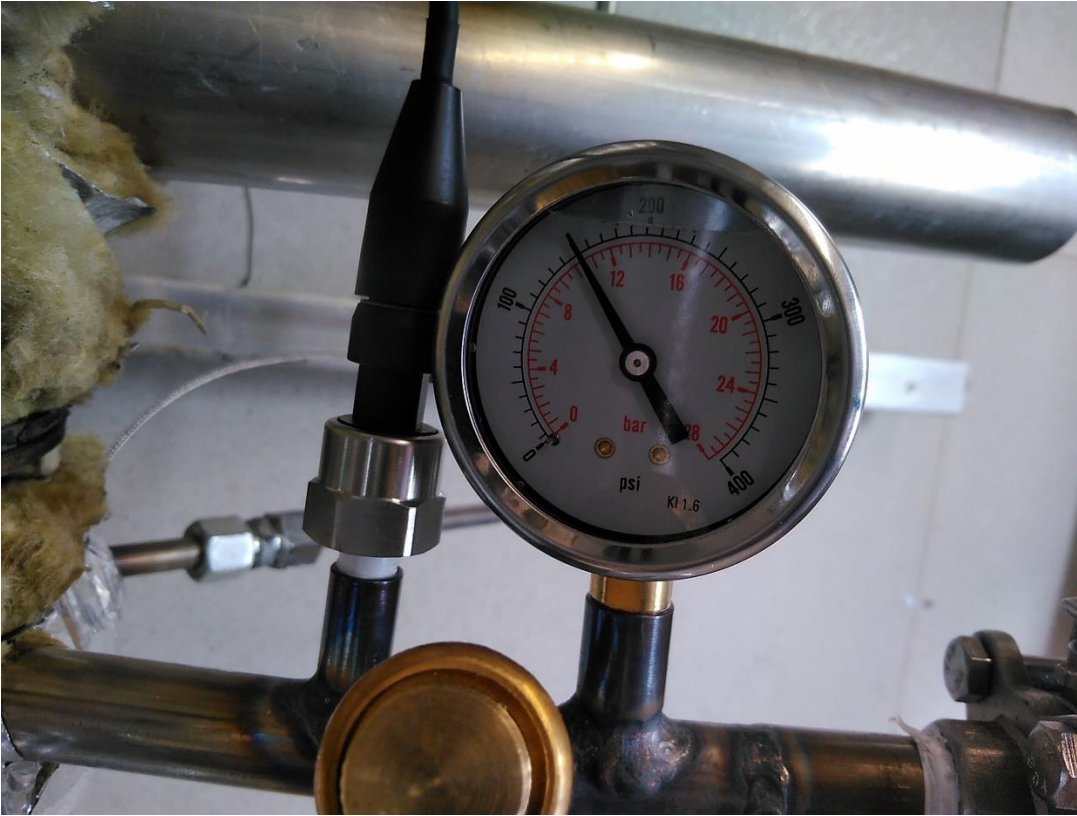
KUVA 79. Turbiinin ja lauhduttimen yhdysputki



KUVA 80. Arduinon näyttö testiajon aikana



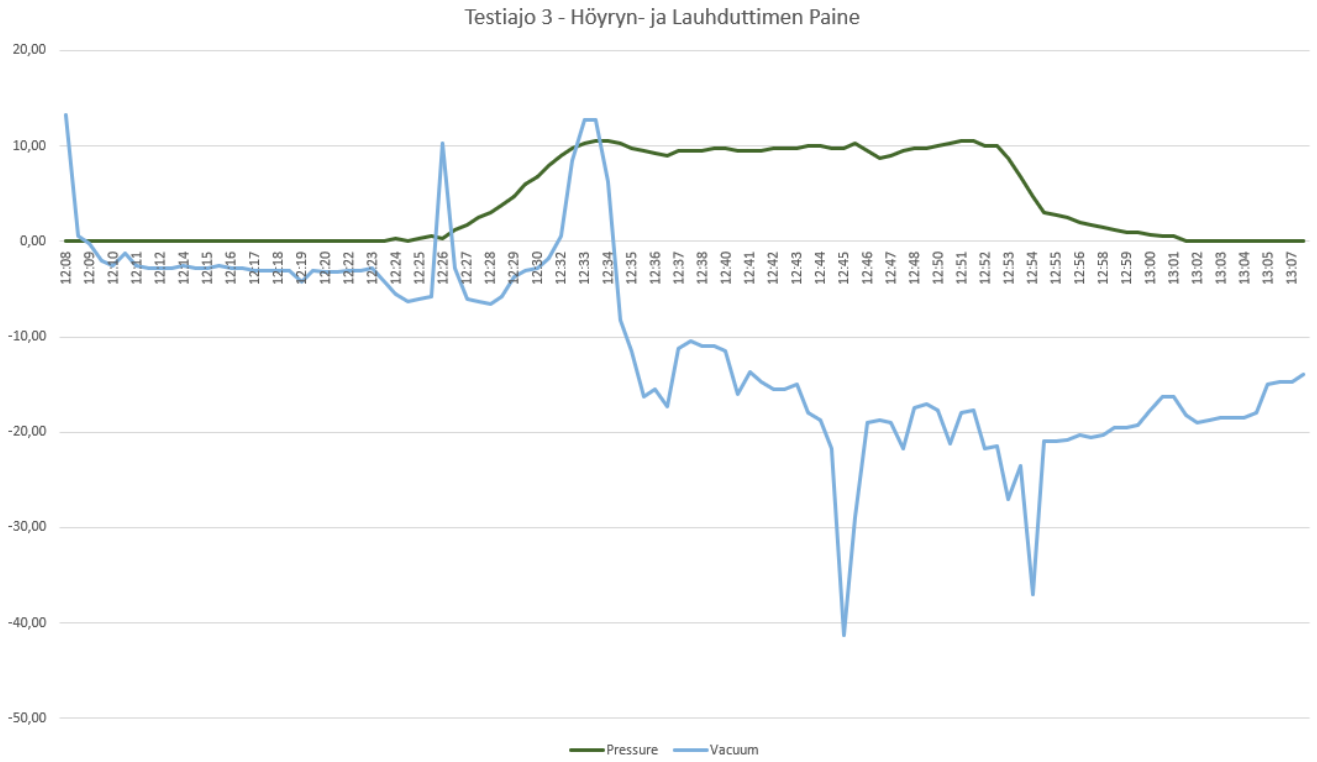
KUVA 81. Invertterin tehon mittaus



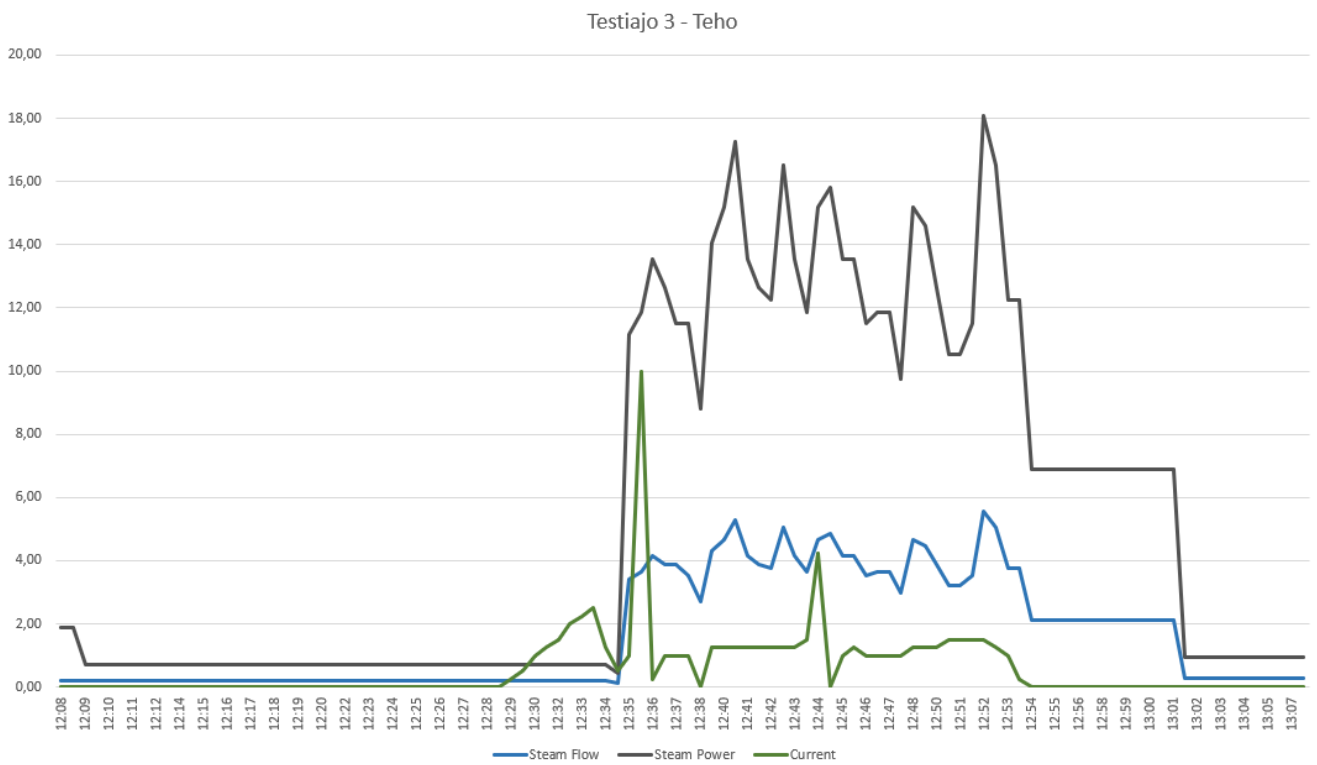
KUVA 82. Höyrynpaineet kohdillaan

Höyrykattila lämmitettiin testiajoissa nestekaasupolttimella, jonka tehoa voitiin säätää helposti viiteentoista kilowattiin asti. Ensimmäisissä ajoissa laitteiston automatiikka ei ollut käytössä lainkaan, jolloin höyryn painetta ja kattilaveden pinnankorkeutta seurattiin manuaalisesti. Myöskään jäähdytysvesikierto ei ollut käytössä, jolloin turbiinin poistohöyry puhallettiin ulkoilmaan. Ensimmäisten testien tarkoitus oli vain todeta höyrylaitteiston toimivuus käytännössä.

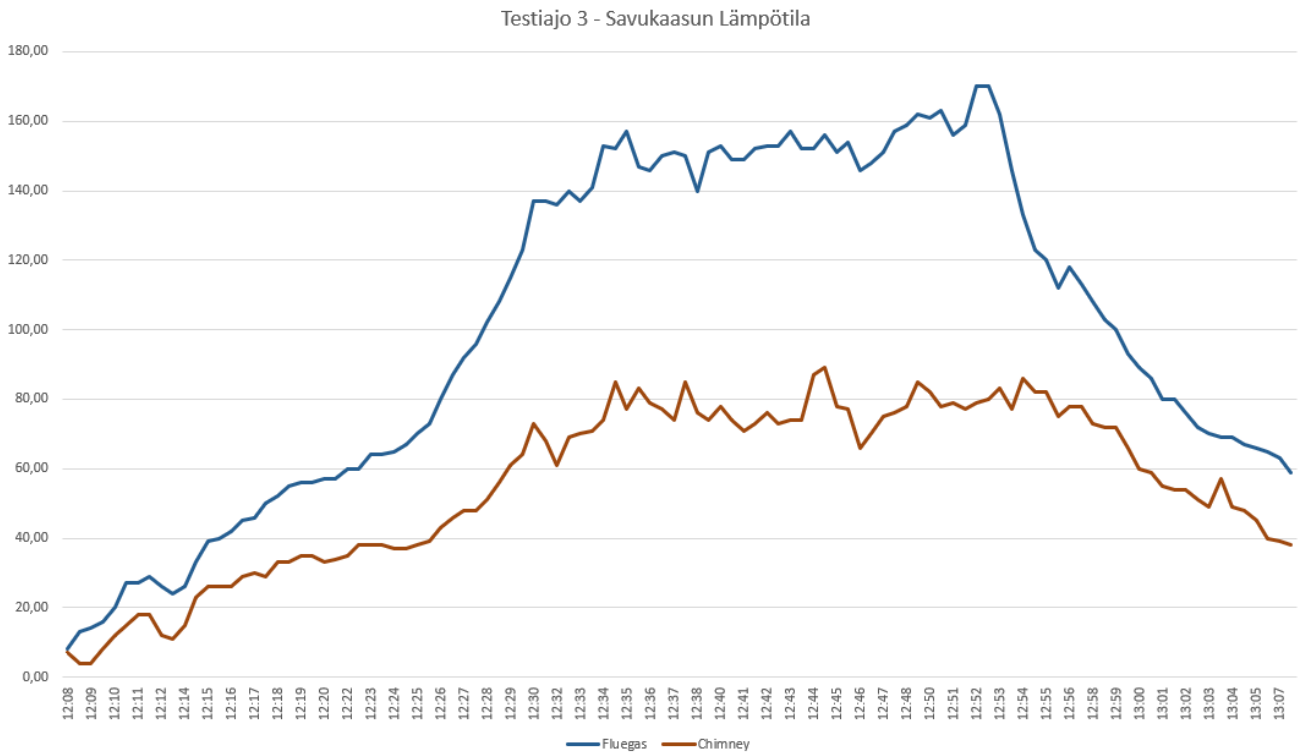
Muutamien testiajojen jälkeen laitos saatiin toimimaan luotettavasti. Jäljempänä esitetyn testiajon tulokset ovat kolmannen pilveen tallennetun testiajon tuloksia. Testiajossa kaikki laitoksen pääkomponentit olivat toiminnassa normaalisti, jolloin lauhdutin ja vesikierto muodostivat suljetun kierron. Laitosta käytettiin noin tunnin verran, josta täydellä höyryteholla ajettiin noin 20 minuuttia. Mittausdata ladattiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaan sen analysointia varten.



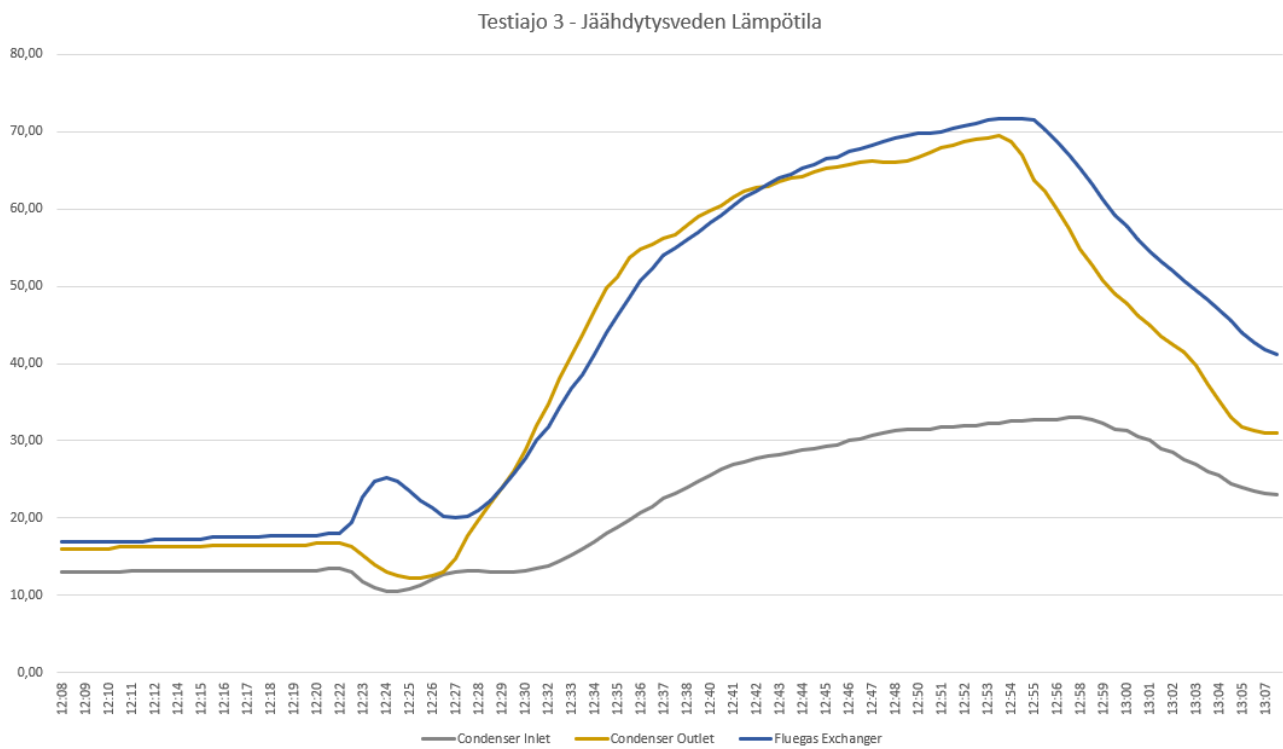
KUVIO 5. Höyrynpaine (vihreä, baareina) ja lauhduttimen alipaine (sininen, millibaareina)



KUVIO 6. Tehokäyrä



KUVIO 7. Savukaasun lämpötila ennen (sininen) savukaasuvaihdinta, ja jälkeen (ruskea)



KUVIO 8. Jäähdytysveden lämpötila ennen (harmaa) lauhdutinta ja sen jälkeen (keltainen), sekä savukaasuvaihtimen jälkeen (sininen)

Voimalaitoksen lämpöteho voidaan laskea jäähdytysveden lämpötilannoususta. Jäähdytysveden kierto- nopeuden on kokeellisesti mitattu olevan noin 3 litraa minuutissa. Mittausajankohdaksi valittiin 12:53 jolloin voimalaitos kävi täydellä teholla, ja lämpötilat olivat vakiintuneet mahdollisimman hyvin.

Lauhduttimen teho:

$$P = 4,18 \text{ kJ} * \frac{3 \text{ l}}{60 \text{ s}} * (69,25 \text{ °C} - 32,25 \text{ °C}) = 7,75 \text{ kW}$$

Savukaasuvaihtimen teho:

$$P = 4,18 \text{ kJ} * \frac{3 \text{ l}}{60 \text{ s}} * (71,50 \text{ °C} - 69,25 \text{ °C}) = 0,47 \text{ kW}$$

Jäähdytysveteen siirtyvä lämpöteho oli yhteensä siis noin 8,2 kW.

Kaaviossa 9 on Arduinon antama arvio höyryn lämpötehosta, mutta se ei ole yhtä tarkka kuin laskettu arvo. Höyryteho voidaan laskea höyryn t-s-piirroksen avulla (KAAVIO 3). Mittaushetkellä tulistetun höyryn lämpötila oli 318 °C, paine 10 baaria ja höyryvirtaus 4 g/s. Näillä tiedoilla voidaan katsoa höyryn entalpiaksi t,s-piirrokselta noin 3100 kJ/kg. Lauhtuneen veden entalpia on 300 kJ/kg.

Höyryn lämpöteho:

$$P = (3100 - 300) \text{ kJ/kg} * 0,004 \text{ kg/s} = 11,2 \text{ kW}$$

Höyryn lämpöteho ei ole sama asia kuin polttoaineteho. Polttoaineena käytetyn nestekaasun massavirtaa ei mitattu eikä tällöin polttoaineteho ole tiedossa. Polttoaineteho on arviolta hyvin lähellä höyrytehon ja savukaasuvaihtimen tehojen summaa. Savukaasuvaihdin pudottaa savukaasujen lämpötilan 160 asteesta 80 asteeseen, jolloin savupiipusta karkaavan lämpötehon suuruus on savukaasuvaihtimenkin tehoa pienempi.

Sähköhyötysuhde saadaan jakamalla tuotettu sähköteho höyryteholla. Tämä hyötysuhde sisältää turbii- nin, generaattorin sekä invertterin häviöt, muttei höyrykattilan eikä omakäyttösähkön osuudesta tulevia häviötä.

Sähköhyötysuhde:

$$Eff = \frac{0,07 \text{ kW}}{11,2 \text{ kW}} = 0,63 \%$$

Lämmön talteenoton hyötysuhde saadaan jakamalla tuotettu lämpöteho höyrytehon ja sähkötehon erotuksella.

Lämmön talteenoton hyötysuhde:

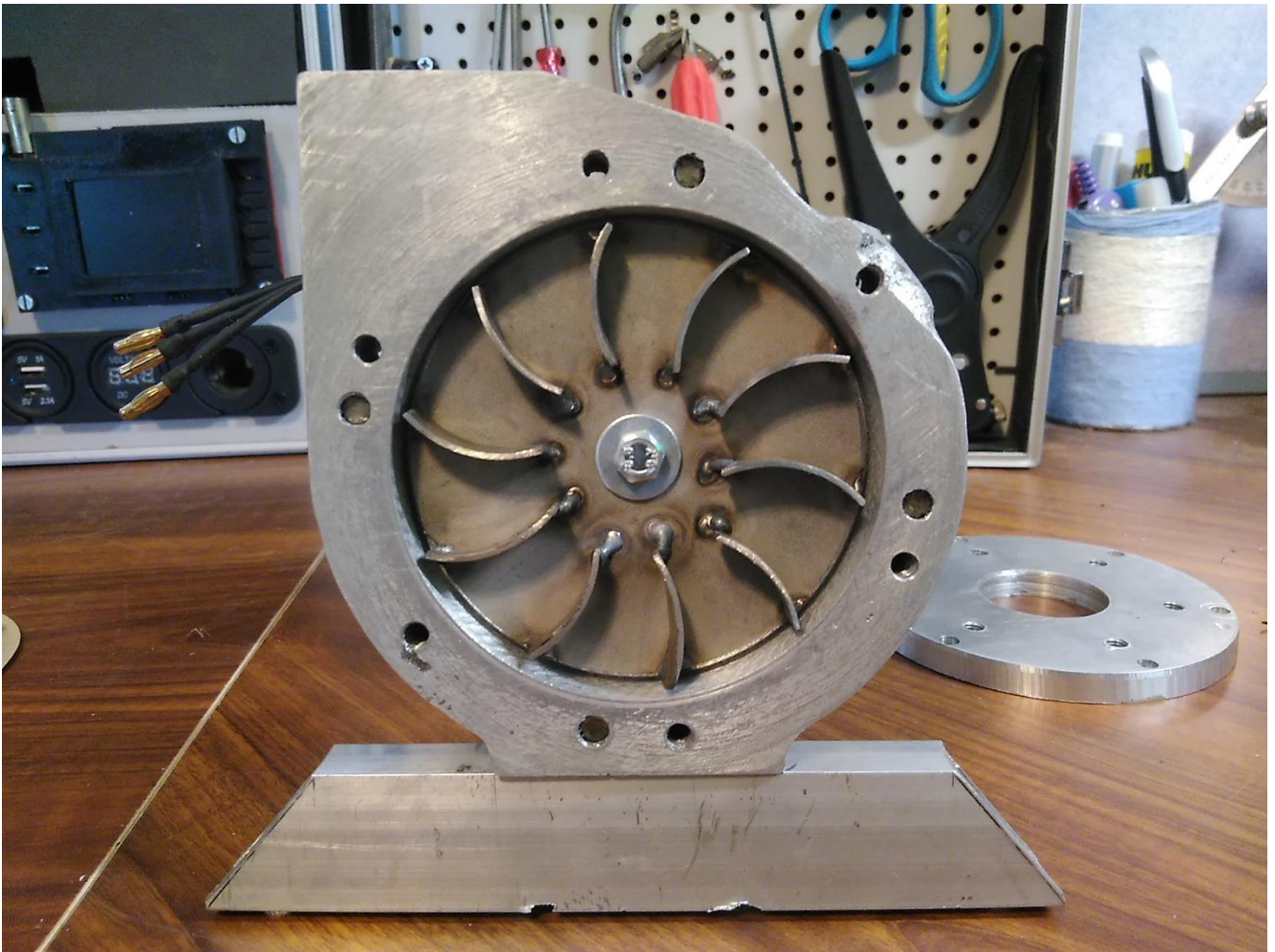
$$Eff = \frac{8,2 \text{ kW}}{11,2 \text{ kW} - 0,07 \text{ kW}} = 74 \%$$

Huono lämmön talteenoton hyötysuhde johtuu eristeiden puuttumisesta. Jäähdytysvesiputkistojen, turbiinin, lauhduttimen ja savukaasuvaihtimen ympärillä ei ollut testin aikana lainkaan eristeitä. Eristeet on tarkoitus laittaa paikoilleen vasta laitteiston viimeistelyvaiheessa, koska eristeet hankaloittavat huomattavasti laitteiston muutos- ja kehitystöitä. Paljaista metallipinnoista vuotavan lämpövirran voidaan arvioida olevan useiden kilowattien luokkaa. Lisäksi lämpötehoa parantaa myöhemmin käyttöön otettavat paloilmian esilämmitys ja lambda-seossäätö. Kiinteistöjen pienten lämmityskattiloiden lämpöhyötysuhde on yleensä yli 90 %, johon CHP-laitoskin luultavasti pääsee eristeiden asentamisen jälkeen. Merkki hyvästä lämmön talteenotosta on savukaasujen lämpötila. Savukaasut poistuvat savupiipusta noin 80 asteen lämpötilassa. Näin matalasta lämmöstä ei ole enää juurikaan mahdollista saada lämpöä hyötykäyttöön kiinteistön käyttöveden ollessa lähes saman lämpöistä kuin savukaasut.

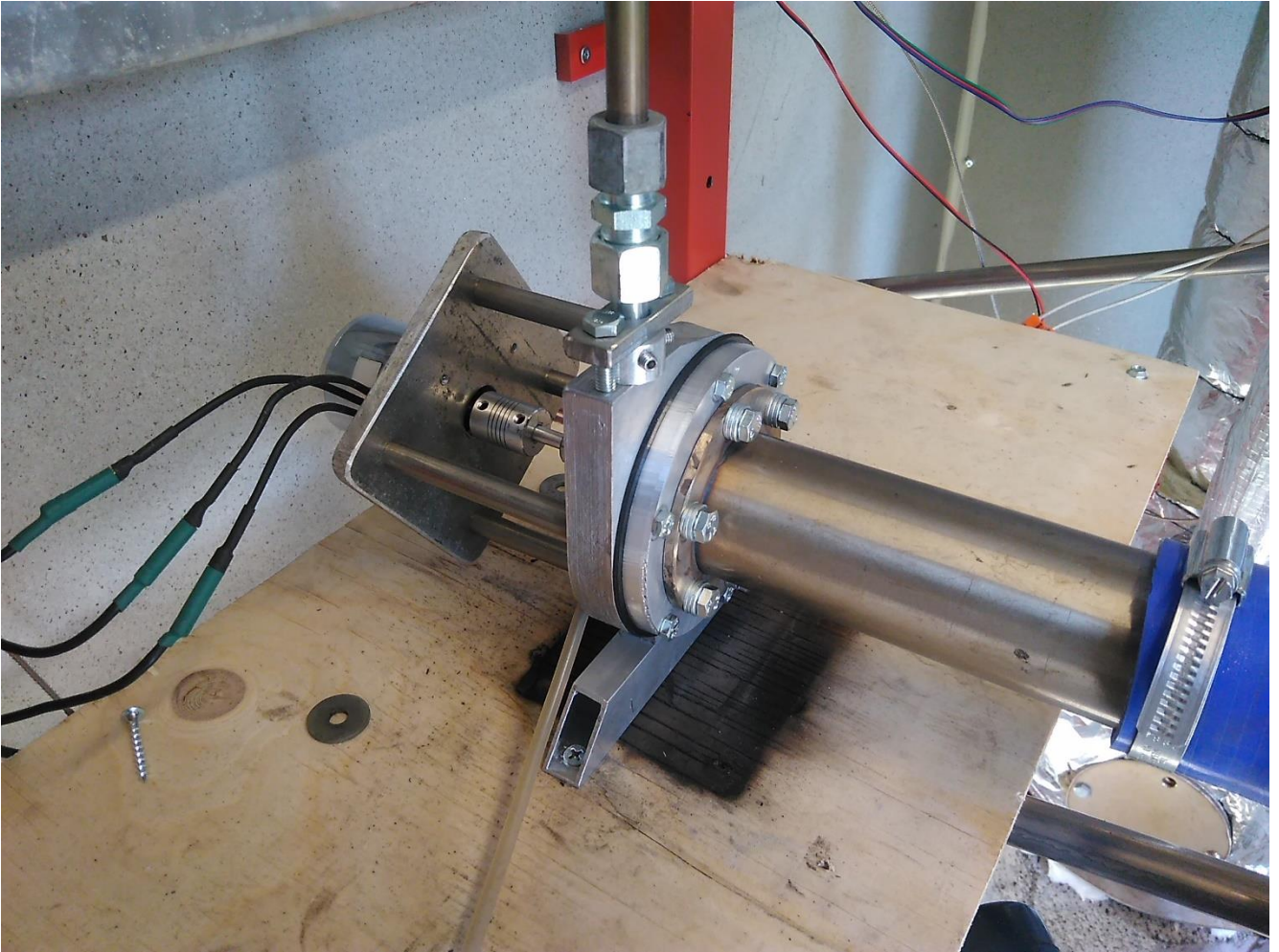
Testeissä kävi nopeasti ilmi turbiinin vaatimaton hyötysuhde ja teho. Useiden erilaisten roottorin kokoonpanojen ja suutinmallien kokeilujen jälkeen turbiinin sähköteho saatiin nousemaan vain hieman yli sadan watin. Vaikka tämä onkin enemmän sähkötehoa kuin voimalaitoksen omakäyttösähköntarve, on se silti vain kymmenesosa tavoitellusta tehosta.

Huonon toiminnan syynä arveltiin olevan joko turbiinin väärä mitoitus tai Tesla-turbiinin toimimattomuus tässä kokoluokassa. Kummastakaan ongelmasta ei löydy minkäänlaista lähdeaineistoa, eikä näin pienten turbiinien mitoittamisesta ei ole olemassa minkäänlaista aineistoa tai esimerkkejä. Turbiini päätettiin rakentaa uusiksi puolta pienemmällä halkaisijalla ja roottori kokeiltiin tehdä impulssiturbiinin periaatteella toimivaksi. Turbiinin lohko valettiin lost-PLA valumenetelmällä yhdestä osasta ja sorvattiin tarkkoihin mittoihinsa. Tuloksena saatiin huomattavasti kompaktimpi turbiini, jonka kokoaminen ja käsittely on helppoa.

Roottori valmistettiin yksinkertaisesti hitsaamalla putkesta leikattuja siipiä metalliekon kehälle (KUVA 83). Tuloksena oleva roottori ei ole millään tavalla optimoitu laskennallisesti, mutta se on niin yksinkertainen, ettei se voi olla toimimatta. Vaikka roottorin virtausdynamiikka ei olekaan optimaalinen, pitäisi sen joka tapauksessa toimia kohtuullisella hyötysuhteella.



KUVA 83. Uuden turbiinin roottori



KUVA 84. Uusi turbiini paikoillaan

Vaikka uusi turbiini olikin rakenteellisesti kaikin puolin parempi kuin edeltäjänsä, oli sen teho ja hyötysuhde lähes täysin samat. Turbiinin halkaisijan pienentäminen ei siis vaikuttanut hyötysuhteeseen juuri millään lailla. Myöskään roottorin vaihdoksella ei ollut mitään merkitystä. Mutta vaikka uusi roottori tehtiinkin käsityönä ilman minkäänlaista tasapainotustyötä, todettiin sen tärisevän jopa vähemmän kuin laserleikattu Tesla-turbiini.

Turbiinin toimimattomuuden syyn täytyy siis olla jossain muualla, mutta syyn etsiminen on melko vaikea tehtävä. Ehkä turbiini on edelleen hyvin ylimitoitettu tai käytetty höyryvirta ei riitä nostamaan kierroslukua paremmalle tehoalueelle.

Yksi tärkeä johtolanka on se, että turbiinin kierrosluku ei nouse lähellekään laskennallista kierrosluku-
aluetta. Turbiini ottaa kierroksia täydellä teholla 18 000 rpm, mutta suuttimen höyryvirran nopeuden
avulla laskettuna teoreettinen optimikierrosluku on vähintään 70 000 rpm. Tämä voisi viitata siihen, että
suuttimen aerodynamiikka ei toimi niin kuin pitäisi. Kuitenkin höyryn massavirran mukaankin lasket-
tuna höyryn virtausnopeus suuttimen poikkipinnan läpi on noin 330 m/s, jolloin roottorin kierrosnopeu-
den pitäisi olla noin 40 000 rpm. Teoria ja käytäntö ei tässä tapauksessa tunnu kohtaavan. Todennäköisin
syy tälle on laitteen pieni koko. Suuttimien virtausdynamiikka ei skaalaudu luontevasti pieneen kokoon,
eivätkä pienen mittakaavan aerodynaamiset ilmiöt ole kovin hyvin tunnettuja yleisestikään.

5 KANNATTAVUUS

Voimala mitoitettiin noin 1 kW:n sähköteholle, koska tämä on lähellä omakotitalon keskimääräistä sähkönkulutusta. Jos voimalaitoksen käyttöaste on 90 %, niin vuotuinen sähköntuotanto on silloin 7884 kWh. Jos sähkön kokonaishinta kuluttajalle on noin 0,12-0,13 €/kWh, niin voimalalla tuotetun sähkön arvo on noin 1000 euroa vuodessa. Tämä pätee ainoastaan, jos tuotetulla sähköllä pystytään korvaamaan ostosähköä. Ylimääräistä sähköä myydessä verkkoon päin saadaan vain muutamien senttien hyvitys per kilowattitunti.

Hakkeen hinta kuluttajalle on noin 15 €/m³. Jos haketus ja rankapuut tehdään itse, voidaan päästä huomattavasti halvemmallakin. Esimerkiksi kaukolämpölaitokset maksavat käyttämästään hakkeesta reilusti alle 10 €/m³. Voimalan kuluttaessa haketta noin 58 m³ vuodessa ovat tällöin vuotuiset polttoainekustannukset noin 870 €. Tämä on alle tuotetun sähkön arvon, eli tuotetusta sähköstä saatavat säästöt riittävät hyvin kattamaan polttoainekustannukset.

Vaikka pelkkä sähköntuotanto voikin olla rahallisesti kannattavaa, ei CHP-laitoksen käyttö ole järkevää, ellei myös lämmölle ole käyttöä. Laitoksen lämpötehon ollessa noin 8 kW vuotuinen lämmöntuotanto on noin 63 MWh. Jos lämpöenergian arvoksi arvioidaan kaukolämmön kuluttajahinta 70-80 €/MWh, niin vuotuisesti tuotetun lämpöenergian arvo on noin 5000 € (Tilastokeskus 2019). Jos kaikki lämpöenergia voidaan käyttää rakennusten lämmityskäyttöön, on laitoksen käyttö erittäin kannattavaa. Kaiken lämpöenergian käyttö ympärivuotisesti on kuitenkin haastavaa, mistä johtuen CHP-laitoksen kannattavuus heikkenee etenkin kesäaikana.

Voimalaitoksen takaisinmaksuaikaa on vaikea arvioida ilman tietoa investoinnin kokonaiskustannuksista. Jos kyseistä voimalaitosta alettaisiin valmistamaan sarjatuotannossa, voisi yhden voimalakontin hinnaksi muodostua 15 000 € – 30 000 €. Tällöin takaisinmaksuaika olisi noin 5-10 vuotta, jos kaikelle sähkölle ja lämmölle löytyy käyttöä. Mahdolliset investointituet lyhentävät takaisinmaksuaikaa huomattavasti. Koska laitosratkaisua on helppo skaalata ylöspäin, voidaan kannattavuutta parantaa suurentamalla laitoksen tehoa. Samaa rakennetta hyödyntämällä voidaan pienillä muutoksilla saada nostettua sähköteho jopa 5-10 kW:iin. Tällöin takaisinmaksuaika voi olla vain muutamia vuosia, jos kaikelle lämmölle löytyy hyötykäyttöä.

6 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Voimalaitoksen kehitystyö ja valmistuminen viivästyi huomattavasti alkuperäisestä suunnitelmasta. Alun perin yhden kesän aikana tehtävä työ venyi pariksi vuodeksi, eikä laitos ole edelleenkään täysin toimintakunnossa. Laitosratkaisu kuitenkin kehittyi huomattavasti matkan varrella ja kokonaisuus saatiin näyttämään lupaavalta.

Voimalaitos saatiin toimimaan halutulla tavalla, mutta sähkötehon- ja hyötysuhteen parantamiseksi laitos vaatii vielä jatkokehittelyä. Laitos toimisi jo sellaisenaan lämpölaitoksena, joka tuottaisi sähköä hie- man omaa kulutustaan enemmän. Aurinkopaneelien ansiosta nettosähkötuotantoa tulee kuitenkin yli 1000 kWh vuodessa. Sähköntuotannon lisäämiseksi täytyy höyryturbiinin hyötysuhdetta nostaa merkittävästi, mikä todennäköisesti vaatii turbiinin suunnittelun ja valmistamisen täysin uudestaan. Vaihtoehtoisesti turbiini voidaan korvata mäntähöyrykoneella, wankel-moottorilla tai muulla vastaavalla.

Mikro-CHP laitoksen voidaan todeta olevan rahallisesti hyvinkin kannattava investointi, joskin kannattavuus on vahvasti sidoksissa lämpöenergian hyödyntämispotentiaaliin. Laitoksen toimintavarmuutta ei pystytty vielä arvioimaan kokonaisuudessaan, mutta höyrylaitteiston automatiikan voidaan todeta toimivan hyvin varmatoimisesti.

LÄHTEET

Benson, J, H. & Rayman, A, A. 1973. Experimental flash steam. Uusittu painos. ISBN 1-85761-116-0. Englanti: TEE Publishing.

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2016. Voimalaitostekniikka. 3. painos. Helsinki: Opetushallitus.

MEEE. Stirling-moottorin toiminnankuvaus. Saatavissa:
www.meee-services.com/how-stirling-engines-work Luettu 1.7.2019.

Mikkonen, Vesa. 2012. Ajoneuvoon asennettavan puukaasuttimen rakennusohjeet. Äänekoski: Omakustanne.

Stanleymotorcarriage. 735 Stanley Steamerin toimintakaavio. Saatavissa:
<http://www.stanleymotorcarriage.com/Parts/howitworks.htm> Luettu 1.7.2019.

Tilastokeskus. Lämmitysenergian kuluttajahintoja maaliskuussa 2019. Saatavissa:
https://www.stat.fi/til/ehi/2019/01/ehi_2019_01_2019-06-12_tau_003_fi.html Luettu 1.7.2019.