



jamk

Poltonestesäiliöiden lämmitysjärjestelmän selvitystyö

Taija Tiainen

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2023

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Tiainen Taija

Polttonestesäiliöiden lämmitysjärjestelmän selvitystyö

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2023, 48 sivua.

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

NEOT:n Porin polttonesteterminalin dieselsäiliöiden lämmitysjärjestelmä oli käyttökänsä päässä, eikä säiliöitä saatu tavoiteajassa lämmitettyä jakelulämpötilaan. Pitkä lämpenemisaika johtui siitä, että järjestelmä oli alimitoitettu, sillä se oli alun perin lämmittänyt vain yhtä säiliötä, mutta myöhemmin siirretty lämmittämään myös toista säiliötä.

Opinnäytetyö toteutettiin kehittämistutkimuksena. Työn tavoitteena oli laskea säiliöiden ja lämmitysputkistojen lämpöhäviöt sekä säiliöiden lämmitystehontarve ja vertailla sen perusteella, mikä lämmitysmuoto olisi paras uuteen järjestelmään. Vertailuun valittiin maalämpö, sähkölämmitys ja öljylämmitys. Lämmitysmuotojen välillä vertailtiin alkuinvestoinnin hintaa, elinkaarikustannuksia, käyttövarmuutta sekä hiilijalanjälkeä. Lisäksi tarkoituksena oli luoda lämpöhäviölaskelmista Excel-työkalu, jota voitaisiin hyödyntää myös jatkossa lämpöhäviöiden laskemisessa.

Työ aloitettiin vierailulla Porin terminalilla, jossa kerättiin kasaan tarvittavat lähtötiedot. Lähtötietojen keräämisen jälkeen aloitettiin laskelmat sekä Excel-laskentatyökalun tekeminen. Laskelmien tuloksia vertailtiin netistä löytyvän valmiin laskentatyökalun tuloksiin, jotta työlle saatiin lisää luotettavuutta. Laskelmien jälkeen kysyttiin tarjouksia eri laitetoimittajilta, jotta vertailuun saatiin kattava kuva lämmitysjärjestelmien hinnoista.

Lopputulokseksi saatiin vertailu lämmitysmuodoista sekä toimenpide-ehdotuksia lämmitysputkistojen lämmitystehon lisäämiseksi säiliöissä. Tärkeimmiksi toimenpiteiksi osoittautuivat lämmitysputkiston määrän lisääminen sekä virtaavan glykolin lämpötilan nosto. Vertailussa tultiin siihen tulokseen, että paras vaihtoehto kaikki näkökulmat huomioiden olisi maalämpö, jossa varajärjestelmänä toimisi öljypoltin. Laskelmat tehtiin nykyisten keskiarvojen perusteella, sillä sähkön ja öljyn hintojen nousua ei voitu tarkkaan ennustaa.

Avainsanat (asiasanat)

Lämmitysjärjestelmät, polttoneste, öljylämmitys, sähkölämmitys, maalämpö, lämpöhäviöt

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Tiainen Taija

Investigation of the fuel tank heating system

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2023, 48 pages.

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The heating system for the diesel tanks at NEOT's Pori fuel liquid terminal was at the end of its useful life, and the tanks could not be heated to the required temperature within the target time. The long warm-up time was because the system was undersized, as it had originally only heated one tank, but was later moved to also heat the second tank.

The thesis was implemented as a development study. The purpose of the work was to calculate the heat losses of the storage and heating pipelines, as well as the heating power requirement of the storage, and based on that, compare which form of heating would be best for the new system. Geothermal, electric heating and oil heating were chosen for comparison. The initial investment price, life cycle costs, operational reliability and carbon footprint were compared between the heating methods. An Excel tool from the heat loss calculations was also made, which can be used in the future to calculate heat losses.

The work started with a visit to the terminal, where the necessary information was collected. After the visit, the calculations were started. The results of the calculations were compared to the results of a ready-made calculation tool found on the internet, to give the work more reliability. After the calculations, offers were asked from different suppliers in order to get a comprehensive picture of the costs of the heating system.

As a result of the work was a comparison of heating methods and measures to increase the heating power of the heating pipelines in the tanks. The most important measures turned out to be increasing the amount of heating pipelines and raising the temperature of the flowing glycol. In the comparison, it was concluded that the best option, considering all aspects, would be geothermal heating, with an oil burner acting as a backup system. The calculations were made based on current averages, as the increase in electricity and oil prices could not be accurately predicted.

Keywords/tags (subjects)

Heating systems, fuel, oil heating, electric heating, geothermal heat, heat losses

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

1	Johdanto	3
1.1	Opinnäytetyön tausta	3
1.2	Aiheen rajaus.....	3
1.3	Tutkimusmenetelmä	4
2	Lämmitysjärjestelmistä yleisesti	5
2.1	Öljylämmitys.....	6
2.2	Maalämpöpumppu.....	8
2.2.1	Toimintaperiaate	9
2.3	Sähkölämmitys	10
3	Termodynamiikka ja lämmönsiirto	11
3.1	Virtaustekniikka.....	13
4	Säiliöiden ja putkiston lämpöhäviöt	14
4.1	Säiliöiden uuden lämmitysjärjestelmän toimintaperiaate	15
4.2	Laskuissa käytetyt suureet, tunnuksot ja mittayksiköt	18
4.3	Lähtötiedot.....	21
4.4	Laskuissa käytetyt kaavat.....	21
4.5	Laskujen tulokset.....	29
5	Lämmitysmuotojen vertailu	32
5.1	Maalämpö	33
5.2	Sähkölämmitys	34
5.3	Öljylämmitys.....	36
6	Tulokset ja pohdinnat	38
6.1	Työn luotettavuuden arviointi	40
	Lähteet	42

Kuviot

Kuvio 1.	Öljykattilan toimintaperiaate.....	7
Kuvio 2.	Maalämpöpumpun toimintakaavio	10
Kuvio 3.	Johtuminen, konvektio ja säteily	12
Kuvio 4.	Laminaarinen ja turbulenti virtaus	13
Kuvio 5.	Säiliöiden FA-1 ja FA-6 sekä nykyisen lämmityskontin sijainti terminaalilla	15
Kuvio 6.	Säiliö FA-1.....	16

Kuvio 7. Säiliö FA-6.....	17
Kuvio 8. Säiliöiden uuden lämmitysjärjestelmän toimintaperiaate	18
Kuvio 9. Glykolin lämpötilan vaikutus lämmitystehtävään	31
Kuvio 10. Lämmitysputken pituuden vaikutus lämmitystehtävään.....	31
Kuvio 11. Virtausnopeuden vaikutus lämmitystehtävään.....	32
Kuvio 12. Uuden maalämpöpumppujärjestelmän periaatekaavio.....	34
Kuvio 13. Uuden sähkölämmitysjärjestelmän periaatekuva	36
Kuvio 14. Uuden öljylämmitysjärjestelmän periaatekuva	37

Taulukot

Taulukko 1. Säiliöiden lähtötiedot	21
Taulukko 2. Putkistojen lähtötiedot.....	21
Taulukko 3. Lämmitysmuotojen vertailu 20 vuoden ajalta	32

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

Työn tilaajana toimi North European Oil Trade (NEOT). NEOT on suomalainen SOK:n ja St1 Nordic Oy:n omistama polttonesteiden hankintayhtiö, joka toimittaa polttoainetta suurille pohjoismaisille huoltamoketjuille, kuten St1:lle, ABC:lle ja Shellille. NEOT:n Porin Tahkoluodossa sijaitsevalla öljy- ja kemikaalisataman terminaalilla varastoidaan polttonesteitä maanpäällisissä terässäiliöissä. Polttonesteet saapuvat terminaalille laivateitse, ja niiden varastointikapasiteetti on jopa 118 000 kuutiota. (NEOT Group n.d.)

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi AFRY Finland Oy, joka on yksi Euroopan johtavista suunnittelu- ja konsultointiyhtiöistä. AFRY suunnittelee ratkaisuja teollisuuden digitalisaatioon, energiamarkkinoiden murrokseen, biotalouteen ja kaupungistumiseen. AFRY on jakautunut kuuteen eri divisioonaan, jotka ovat prosessiteollisuus, rakennettu ympäristö, energia, liikkeenjohdon konsultointi, AFRY X sekä teolliset ja digitaaliset ratkaisut. (Tietoa meistä 2023.)

1.2 Aiheen rajaus

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, mikä lämmitysmuoto olisi Porin terminaalissa sijaitseville polttonestesäiliöille FA-1 ja FA-6 paras ja kannattavin. Polttonestesäiliöt tarvitsevat talvikaudella lämmitystä joulukuusta huhtikuulle, jotta kesälaatuiset polttonesteet eivät jäädy. Eristetyissä lämmityspotkistoissa kiertää vesi-glykoliseos. Sekä säiliössä FA-1 (5000 m³) että säiliössä FA-6 (8300 m³) varastoidaan kesälaatuista dieseliä. Lämmityskontti on siirretty lämmittämään säiliön FA-6 lisäksi myös säiliötä FA-1.

Tarkoituksena oli laskea järjestelmän lämmitysenergiantarve laskemalla säiliöiden ja putkistojen lämpöhäviöt sekä vertailla lämmityksen toteuttamiseksi erilaisia vaihtoehtoja keskenään. Tavoitteena oli, että laivan tuodessa säiliöihin 0-asteista polttonestettä, lämpenisi suurempi säiliö FA-6 viikossa nollasta asteesta kymmeneen asteeseen eli haluttuun jakelulämpötilaan. Vertailtavia lämmitysmuotoja olivat maalämpö, sähkölämmitys ja öljylämmitys. Vertailussa otettiin huomioon sekä elinkaaren että alkuinvestoinnin kustannukset,

hiilijalanjälki sekä käyttövarmuus. Työn tarkoituksena oli lisäksi selvittää, tarvitaanko järjestelmään esimerkiksi lisäeristystä, lisää lämmitysputkistoa tai muuta vastaavaa. Opinnäytetyö oli tärkeä ja ajankohtainen, sillä nykyinen lämmitysjärjestelmä on elinkaarensa päässä. Opinnäytetyön olennaisimmat kysymykset olivat:

- Mikä on paras lämmitysmuoto polttonestesäiliöille kustannusten, ympäristön ja käyttövarmuuden kannalta?
- Mitkä ovat säiliöiden ja putkistojen lämpöhäviöt ja lämmitysenergiantarve?
- Mitä muutoksia järjestelmään tarvitaan, jotta säiliön FA-6 saisi lämmitettyä viikossa nolasta asteesta kymmeneen asteeseen?

Lämmitysjärjestelmän selvitystyö oli aiheena melko laaja ja sisälsi monia eri vaiheita. Lämmityskontti tulee lisäksi paikoittaa terminaalille uudelleen standardien mukaisesti, mutta se rajattiin tästä opinnäytetyöstä pois, jottei aiheesta tulisi liian laaja. Kustannusvertailussa ei huomioitu lämmitysjärjestelmän suojarakennuksesta koituvia rakennuskustannuksia tai siihen liittyviä suunnittelu- tai valmistuskustannuksia, sillä lämmitysmuodosta huolimatta niitä tulee joka tapauksessa järjestelmän uusimisen yhteydessä.

Lisäksi tavoitteena oli luoda lämpöhäviölaskelmista Excel-työkalu, jota voi käyttää tulevaisuudessa samankaltaisissa tilanteissa muuttamalla Excel-taulukon arvoja. Laskelmiin on olemassa myös valmiita laskentaohjelmia, joita työssä hyödynnettiin laskelmien paikkansapitävyyden vertailuun.

1.3 Tutkimusmenetelmä

Opinnäytetyöni oli kehittämistutkimus, sillä se sisälsi sille tyypillisiä piirteitä. Kehittämistutkimuksessa kehittäminen ja tutkimus yhdistyvät, ja prosessiin sisältyy sekä kokeellisia että teoreettisia vaiheita (Tutkimusmenetelmät n.d). Kehittämistutkimuksen tavoitteena on edistää oppimista todellisissa tilanteissa. Kehittämistutkimuksessa pyritään parantamaan jonkin toiminnan tasoa tai kehittämään tuotantoa, ja sille tavallista on ongelmalähtöisyys sekä tavoitteellisuus. (Tutkimusmenetelmät n.d.)

Kehittämistutkimus voi vastata kolmeen eri kysymykseen: miten kehittämisessä edetään, millaisia tarpeita ja mahdollisuuksia kehittämisellä on ja millaiseen tuotokseen kehittäminen johtaa. Ongelma-analyysi on kehittämistutkimuksen ensimmäinen vaihe, sillä kehittämistarpeen tulee perustua johonkin todelliseen ongelmaan. Tavoitteiden selvittyä paremmin laaditaan niiden pohjalta kehityssuunnitelma. Kehittämistutkimuksen suunnitelma voi muuttua jatkuvasti tutkimuksen edetessä, ja se on todella joustava tutkimusmenetelmä. (Pernaa n.d.)

Kehittämistyön aineistona toimivat standardit sekä erilaiset olemassa olevat dokumentit esimerkiksi lämmityskontista, säiliöistä sekä eristyspaksuuksista. Työmenetelmänä toimi kirjallisten lähteiden analysointi sekä laskukaavat. Aineistoa analysoin mahdollisuuksien mukaan vertailemalla eri lähteitä keskenään sekä keräsin tietoa ainoastaan luotettavina pitämistäni lähteistä.

2 Lämmitysjärjestelmistä yleisesti

Lämmitysjärjestelmässä energia halutaan muuttaa sellaiseen muotoon, että sitä voidaan hyödyntää jonkin kohteen lämmityksessä. Energiaa on mahdollista varastoida, mikäli halutaan säästää kustannuksissa tai tasata lämmitystehontarvetta. Lämmön varastoiminen tapahtuu yleensä lämmitysvaraajassa, jossa lämpöä varastoidaan esimerkiksi lämpimään veteen tai rakenteisiin. Lämmitykseen tarvittava energia tuotetaan lämmönkehityslaitteistossa lämmönlähteen, kuten puun, polttoöljyn, kaukolämmön tai maahan varastoituneen lämpöenergian avulla. Lämmönkehityslaitteita ovat siis esimerkiksi puu- ja öljykattilat, kaukolämmönvaihtimet sekä maalämpöpumput. Sähkölämmitysjärjestelmissä sähkön muuttaminen lämpöenergiaksi tapahtuu sähkövastuksissa. (Näin lämmitysjärjestelmä toimii 2022.)

Lämmönjakojärjestelmän avulla lämpöenergia siirretään ja luovutetaan haluttuun käyttökohteeseen. Lämmönjakojärjestelmään kuuluvat lämmönsiirtoputkistot sekä tilojen lämmityslaitteet. Lämmönsiirtoaineena käytetään joko ilmaa tai vettä, joka kiertää lämmönjakoverkostossa. (Näin lämmitysjärjestelmä toimii 2022.) Tyypillisiä lämmönjakojärjestelmiä ovat esimerkiksi vesikiertoinen patteriverkosto, lattialämmitysputkisto tai sähköpatterit. (Näin lämmitysjärjestelmä toimii 2022.)

Säätö- ja ohjauslaitteet ovat tärkeä osa lämmitysjärjestelmää, sillä niiden avulla lämpötila pidetään halutulla tasolla. Lämmitystehontarve vaihtelee vuodenaikasta riippuen ulkolämpötilan mukaan, joten erilaisten termostaattien ja säätimien avulla voidaan säätää esimerkiksi lämmitysverkostoon menevän veden lämpötilaa ulkolämpötilan mukaan. (Näin lämmitysjärjestelmä toimii 2022.) Ennen lämmitysjärjestelmän valintaa on hyvä pohtia, onko kohteen lämmitysenergiantarvetta mahdollista vähentää esimerkiksi lisäämällä eristyksiä tai tiivisteitä. Energian hinnat tulevat todennäköisesti nousemaan kohteen elinkaaren aikana, minkä vuoksi olisi hyvä panostaa ensisijaisesti lämmitysenergiantarpeen pienentämiseen. (Lämmitysjärjestelmän valinta 2023.)

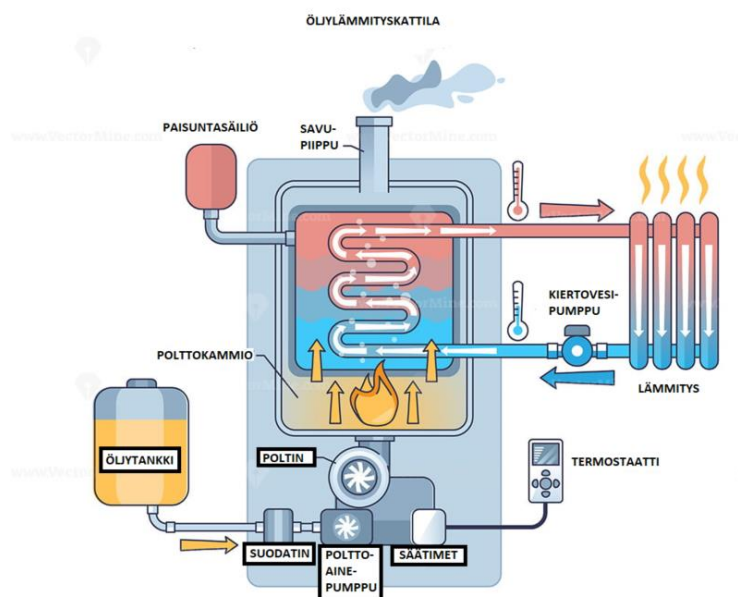
Kestävän kehityksen päätöksenteossa ja toiminnassa huomioidaan ympäristö, ihminen ja talous. Kestävyys rakentuu kolmen peruspilarin mukaan, jotka ovat sosiaalinen, taloudellinen ja ympäristöllinen vastuu. Tämä tarkoittaa sitä, että energiaa on jatkuvasti ja luotettavasti saatavilla, energiajärjestelmä on taloudellisesti kustannustehokas eivätkä energiantuotannon päästöt kohtuuttomasti heikennä ympäristön tilaa tai tulevien sukupolvien elinmahdollisuuksia. (Mitä on kestävä kehitys? N.d.)

2.1 Öljylämmitys

Öljylämmitysjärjestelmä muodostuu öljykattilasta ja -polttimesta, säätölaitteista sekä öljysäiliöstä (Korkala 2018, 20). Öljykattila tuottaa lämmitykseen tarvittavan lämmitysenergian. Öljypoltin saa polttoaineensa öljysäiliöstä, ja palaessaan öljy lämmittää kattilan vesitilan. Nestemäisenä tuleva öljy muuttuu suuttimessa hienojakoiseksi sumuksi, jotta palaminen on mahdollisimman täydellistä. Samaan aikaan polttimen puhallin sekoittaa öljysumun sekaan ilmaa. Palamisesta syntyvät palokaasut poistuvat savuhormiin, ja kiertovesipumppu siirtää lämmitetyn veden kohteen käyttöön lämmitysverkostoon. Lämmönjakotapana öljylämmitteisessä kohteessa on vesikiertoinen lämmönjakojärjestelmä. (Häkkinen 2016.) Öljykattilan toimintaperiaate on kuvattu alla (kuvio 1).

Kattilan termostaatti ohjaa polttimen toimintaa joko käynnistämällä tai pysäyttämällä sen. Modulaarinen poltin eroaa perinteisestä polttimesta siten, että se säätyy portaattomasti lämmitystarpeen mukaan, kun taas perinteinen poltin toimii on-off-periaatteella. Mikäli

säiliössä olevan öljyn lämpötila laskee liian matalalle, öljyn parafiinit kiteytyvät ja laskeutuvat säiliön pohjalle. Samepiste tarkoittaa alhaisinta lämpötilaa, jossa lämmitysöljyä voi varastoida ilman edellä mainittuja haittoja. (Öljylämmityksen sanasto 2023.) Kesälaatuista öljyä voi kesäkaudella säilyttää alhaisimmillaan 0 asteessa, ja kesäkauden ulkopuolella -3 asteessa (Talvi- ja kesälaatuinen polttoöljy n.d.).



Kuvio 1. Öljykattilan toimintaperiaate (Oil heating boiler n.d, muokattu)

Öljylämmityskattiloiden hyötysuhde on tänä päivänä todella hyvä, jopa 90–95 %, ja myös palaminen on erittäin puhdasta. Kehitteillä ja osin käytössäkin on olemassa osittain biopohjaisia polttonesteitä, joiden raaka-aineita voivat olla esimerkiksi metsäbiomassa tai elintarvikkejäte. Öljylämmityksen yhteyteen voidaan myös rakentaa aurinkosähköjärjestelmä, jolloin sillä voidaan kattaa noin 25–35 % lämmöntarpeesta. Öljylämmityskattiloissa on olemassa sähkövastukset mahdollisia häiriötilanteita varten. (Öljylämmitys 2022; Öljylämmityksen sanasto 2023.)

2.2 Maalämpöpumppu

Maalämpöpumppu (MLP) kerää maaperään, veteen tai kallioon varastoitunutta auringon lämpöenergiaa ja käyttää sitä tilojen ja käyttöveden lämmittämiseen. Maalämpö on tasainen ja varma lämmönlähde koko vuoden ympäri, ja se maksaa itsensä takaisin korkeista investointikustannuksista huolimatta, sillä sen avulla voidaan säästää jopa 80 % lämmityskustannuksista. Maalämpö on uusiutuvaa ja luontoystävällistä energiaa. (Maalämpöpumppu 2022.) Koska maalämpö on omasta maaperästä otettuna ilmaista, koostuvat käyttökustannukset ainoastaan sähköstä, jonka pumppu kuluttaa (Maalämpö n.d).

Suurin osa maalämpökohteista toteutetaan tänä päivänä lämpökaivoilla. Porakaivoon asennetaan putkisto, jossa kiertää kylmäainetta. Lämpökaivo on ulkohalkaisijaltaan 115–165 mm, joten sen voi asentaa melko ahtaallekin tontille, mutta lämmönkeruutapana se on yleensä kallein. Toinen ja edullisin vaihtoehto lämmönkeruupiirille on vaakaputkisto, joka on asennettu maahan noin metrin syvyyteen. Vaakaputkisto käyttää hyödykseen maan pintakerrokseen varastoitunutta auringon lämpöenergiaa, kun taas porakaivoissa hyödynnetään syvemmälle maaperään varastoitunutta energiaa. Lämmönkeruupiiri voi sijaita myös vesistössä. Vesistössä sijaitsevista putkista saa enemmän tehoa ja energiaa irti kuin maalla sijaitsevista, sillä veden lämmönsiirto-ominaisuudet ovat parempia kuin maaperän. Tällöin täytyy kuitenkin olla tarkkana, ettei veden lämpötila laske talvella liian matalaksi. Jos putken pinnalle kertyy jäätä, voi se aiheuttaa putkistoon niin suuren nosteen, että putkisto nousee veden pinnalle. (Maalämpöpumppu 2022.)

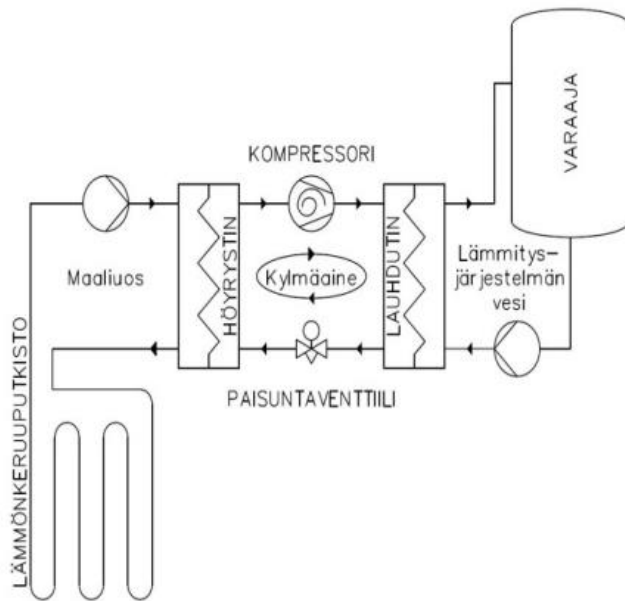
Maalämpöpumppu kannattaa mitoittaa kattamaan noin 60–80 prosenttia kohteen mitoitus-tehosta, jotta hankinta on kustannustehokkaampi ja pitkäikäisempi. Tämä kattaa 95–99 prosenttia vuotuisesta energiantarpeesta, ja loput tarvittavasta energiasta voidaan tuottaa maalämpöpumpun varalämmitysvastuksella. Pitkällä aikavälillä reilusti mitoitettulla lämmönkeruupiirillä on parempi lämpökerroin, jolloin se maksaa itsensä paremmin takaisin. (Maalämpöpumppu 2022.)

2.2.1 Toimintaperiaate

Maalämpöpumppu koostuu höyrystimestä, lauhduttimesta, kompressorista, paisuntaventtiilistä sekä kylmäaineesta (kuvio 2). Ensimmäisenä lämmönkeruupiirissä kiertävä lämmönkeruuneste johdetaan höyrystimelle, jossa se kohtaa kylmäaineen. Höyrystimessä on kaksi puolta, joista toinen on kytketty lämmönkeruupiiriin ja toinen kylmäainepiiriin. Höyrystin on siis lämmönsiirrin; lämpöä siirtyy keruuliuksesta kylmäaineeseen, mutta aineet eivät sekoitu keskenään. Höyrystimessä kylmäaine alkaa kiehua ja höyrystyy kaasuksi. (Asennus- ja käyttöohje 2019.)

Höyrystynyt kylmäaine johdetaan jälleen kompressorille, joka puristaa sen korkeaan paineeseen ja lämmittää kaasun. Kompressori voi nostaa kylmäaineen lämpötilaa jopa 70 astetta ja painetta noin 15 baaria. Mikäli lämpötila on tässä vaiheessa liian matala tai virtaus liian hidas, kompressori imee höyrystimen paineen niin matalaksi, että kompressori pysähtyy joko lämpötilan alarajahälytykseen tai matalapainehälytykseen. Jos taas lämpötila on liian korkea, kompressori pysähtyy joko poiskytkentälämpötilaan tai korkeapainehälytykseen. (Asennus- ja käyttöohje 2019.)

Lämmitetty kaasu johdetaan lauhduttimelle, jossa kaasu lauhtuu nesteeksi ja luovuttaa siten lämpönsä lämmitysjärjestelmälle sekä käyttöveden lämmittämiseen. Lämmönsiirto tapahtuu, koska kompressorin jälkeen kylmäaine on korkeammassa lämpötilassa kuin keruupiirissä kiertävä vesi. Vaikka kylmäaine on jäähtynyt, se on lauhduttimen jälkeen edelleen korkeassa paineessa. Kylmäaineen paine laskee vasta paisuntaventtiilissä, joka sijaitsee lauhduttimen ja höyrystimen välissä. Paisuntaventtiilin läpi virtaava kylmäaine pääsee laajentumaan, jolloin sen paine laskee takaisin höyrystimen matalaan paineeseen. Samalla osa kylmäaineesta jäähtyy ja höyrystyy, jolloin kylmäaineen lämpötila laskee useita kymmeniä asteita. Tämä mahdollistaa jälleen lämmön keräämisen keruuliuksesta, ja prosessi alkaa alusta. (Asennus- ja käyttöohje 2019.)



Kuvio 2. Maalämpöpumpun toimintakaavio (Asennus- ja käyttöohje n.d.)

2.3 Sähkölämmitys

Sähkölämmityksessä lämmitykseen tarvittava energia tuotetaan esimerkiksi ydinvoimalla tai vesivoimalla. Käyttöpaikalla sähköenergia muutetaan lämpöenergiaksi sähkövastusten avulla. (Harju 2018, 168.) Sähkölämmitysjärjestelmässä lämmöntuottolaitteena toimii joko sähkökattila tai sähkövastuksilla varustettu varaaja. Yösähkön osuuden tulisi olla noin 90 %, jolloin varaaja voisi olla pienempi ja näin ollen myös sen hinta olisi edullisempi. Sähkölämmityksessä voidaan hyödyntää myös aurinkoenergiaa, jolloin suuresta varaajakoosta on hyötyä. (Sähkövaraajat ja -kattilat 2022.)

Sähkökattila tuottaa tarvittavan lämmitysenergian joka hetki sähkövastusten avulla. Siinä lämpöä ei yleensä varata yösähköllä kuten sähkövaraajan kohdalla, mutta varaaja on mahdollista liittää järjestelmään. Sähkökattilat ja sähkövaraajat ovat helppokäyttöisiä ja hankintahinnaltaan edullisia ratkaisuja, mutta niiden haittapuolena on kalliit energiakustannukset. Sähkölämmityksen ympäristökuormitukseen voi itse vaikuttaa hankkimalla ekologista sähköä. (Sähkövaraajat ja -kattilat 2022.) Sähkö ei siis automaattisesti ole saasteeton tai

ympäristöystävällinen energiamuoto, sillä se voidaan tuottaa myös fossiilisilla polttoaineilla (Harju 2018, 168).

3 Termodynamiikka ja lämmönsiirto

Termodynamiikka ja lämmönsiirto liittyvät tiiviisti toisiinsa, ja ne ovatkin pohjana suurille keksinnöille, kuten höyrykoneelle ja polttomoottorille (Hirvijoki 2022). Termodynamiikassa on kolme pääsääntöä, joita ymmärtääkseen täytyy tietää joitakin oleellisia käsitteitä. Näitä käsitteitä on selitetty tiivistetysti seuraavissa kappaleissa.

Systeemillä tarkoitetaan tarkoin määriteltyä tarkastelun kohteena olevaa osaa, esimerkiksi tiettyä määrää kaasua. Systeemi voi olla joko avoin, eristetty tai suljettu. Avoimessa systeemissä sekä ainetta että energiaa voi vaihtua ympäristön kanssa, kun taas eristetyssä systeemissä ainetta tai energiaa ei vaihdu ympäristön kanssa. Suljetussa systeemissä puolestaan ei vaihdu ainetta, mutta energiaa voi vaihtua ympäristön kanssa. (Hirvijoki 2022.) Esimerkkinä suljetusta systeemistä on kaukolämpöverkosto.

Tilanmuuttuja on suure, joka kuvaa systeemin tilaa; esimerkiksi paine, lämpötila, sisäenergia ja entropia ovat tilanmuuttujia. Tilanyhtälö on laki, joka sitoo tilanmuuttujat yhteen. Entropian muutoksella tarkoitetaan systeemin vastaanottaman lämmön suhdetta sen lämpötilaan. Hyötysuhde puolestaan tarkoittaa prosessissa systeemin tekemän nettotyön suhdetta systeemiin tuotuun lämpöön, eli toisin sanoen sitä, kuinka suuren osan lämmöstä voi muuntaa työksi. (Hirvijoki 2022; Termodynamiikan toinen pääsääntö ja entropia n.d.)

Tästä päästään termodynamiikan pääsääntöihin, joista ensimmäinen on energian säilyminen. Tämä tarkoittaa sitä, että energiaa ei koskaan häviä, vaan se ainoastaan muuttaa muotoaan. Ensimmäinen pääsääntö voidaan lausua matemaattisesti muodossa:

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \quad [1]$$

jossa ΔU on sisäenergian muutos, ΔQ systeemiin tuotu lämpö ja ΔW systeemin tekemä työ.

Toinen pääsääntö liittyy entropiaan, ja sillä on erilaisia esitystapoja. Valtanen (2019, 194) on esittänyt termodynamiikan toisen pääsäännön seuraavasti: ”Eristetty systeemi siirtyy itsensä kohden termodynaamista tasapainotilaa eli kohden suurempaa epäjärjestystä. Systeemin entropia (S) kasvaa jokaisessa muutoksessa.” Kokeellisesti on havaittu, että lämpöä ei voida siirtää kylmästä varastosta kuumaan ilman, että systeemin tilaan tulee muita muutoksia. Ei ole myöskään mahdollista muuntaa kuumasta varastosta otettua lämpöä työksi ilman, että osa lämmöstä siirtyy kylmään varastoon. (Hirvijoki 2022.) Termodynamiikan kolmas pääsääntö on yksinkertaisuudessaan seuraava: lämpötilan absoluuttista nolapistettä ei ole mahdollista koskaan saavuttaa (Valtanen 2019, 195).

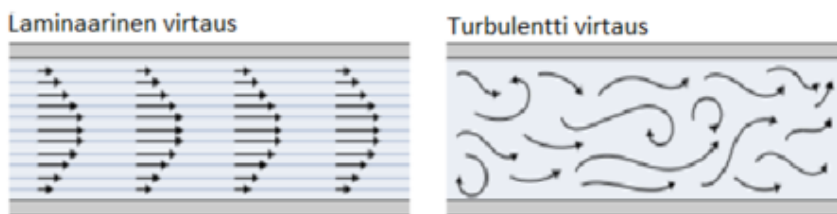
Lämmönsiirto on energian vuorovaikutusta, joka johtuu lämpötilaeroista ja lämpötilan muutoksista. Lämpöä voi siirtyä kolmella eri tavalla: säteilemällä, johtumalla sekä konvektiolla (kuvio 3). Konvektiossa jokin lämpöenergiaa sisältävä aine, esimerkiksi lämmin vesi, siirtää energiaa liikkuessaan paikasta toiseen. Johtumisessa kaksi erillämpöistä ainetta ovat kosketuksissa toisiinsa ja siirtävät lämpöenergiaa keskenään ilman, että ne sekoittuvat toisiinsa. Konvektio ja johtuminen yhdessä mahdollistavat tehokkaan lämmönsiirron silloin, kun aineita ei haluta sekoittaa keskenään eli kun kyseessä on suljettu systeemi. Säteilystä puolestaan energia siirtyy paikasta toiseen väliaineesta riippumatta. (Hirvijoki 2022.)



Kuvio 3. Johtuminen, konvektio ja säteily (What is heat transfer? 2023, muokattu)

3.1 Virtaustekniikka

Virtaustekniikassa käsitellään nestemäisiä ja kaasumaisia fluideja, joiden virtauksilla on merkittävä rooli prosessitekniikassa. Virtauksen luonne vaikuttaa esimerkiksi lämmönsiirron tehokkuuteen; voimakas virtaus, toisin sanoen turbulenti virtaus, siirtää lämpöä tehokkaammin virtaavasta nesteestä lämmönsiirtopinnalle, kun taas hitaampi eli laminaarinen virtaus heikentää lämmönsiirtoa (kuvio 4). Tämä johtuu siitä, että turbulentsissa virtauksessa putken sisäpinnalle muodostuu ohut rajakerros, jossa lämmönsiirtovastus pääosin on. Mitä nopeammaksi virtausnopeus kasvaa, sitä ohuemmaksi kyseinen rajakerros tulee ja sitä enemmän lämmönsiirto tehostuu. Tehokkaamman lämmönsiirron vuoksi turbulenti virtaus onkin teollisuudessa yleisin. (Virtaustekniikka ja lämmönsiirto n.d.)



Kuvio 4. Laminaarinen ja turbulenti virtaus (Turbulent Flow Verses Laminar Flow 2021, muokattu)

Virtauksen muutoksiin vaikuttavat virtausnopeus, putken halkaisija, tiheys sekä viskositeetti. Viskositeetilla tarkoitetaan aineen kykyä vastustaa virtausta ja se pienenee, kun lämpötila kasvaa. (Virtaustekniikka ja lämmönsiirto n.d.) Esimerkiksi vedellä on pieni viskositeetti, kun taas ruokaöljyllä viskositeetti on suurempi. Kun ruokaöljyä lämmitetään pannulla, se muuttuu juoksevammaksi, eli sen viskositeetti pienenee.

Virtauksen luonnetta kuvataan Reynoldsin luvulla:

$$Re = \frac{\bar{v}D\rho}{\eta}$$

[2]

Reynoldsin luku kertoo, onko virtaus turbulenttista, laminaarista vai niiden kahden siirtymäalueella. Kun Reynoldsin luku on alle 2100, putkessa tapahtuva virtaus on laminaarista. Kun taas Reynoldsin luku on yli 3200, on virtaus turbulenttista. (Virtaustekniikka ja lämmönsiirto n.d.) Kuitenkin Lampisen ja Kotiahon (2015) oppimateriaalissa arvoina on käytetty laminaariselle virtaukselle arvoa $Re < 2300$ ja turbulenttiselle virtaukselle arvoa $Re > 4000$. Poikkeavat arvot johtuvat siitä, ettei tarkkaa siirtymävyöhykkeen rajaa voida esittää. Virtauksen luonne riippuu olosuhteista, ja se on usein siirtymäalueella hetkittäin laminaarista ja hetkittäin turbulenttista. (Virtaustekniikka ja lämmönsiirto n.d; Lampinen & Kotiaho, 2015.)

Reynoldsin luvun määritelmää tarkastellessa voidaan huomata, että laminaariseen virtaukseen liittyvät usein pieni virtausnopeus, pieni putkikoko sekä korkea viskositeetti. Putkistoja ja lämmönvaihtimia mitoittaessa tulee ottaa huomioon putken koko, siirtyvän lämpöenergian määrä, materiaali sekä mittaustarpeiden ja säätötarpeiden määrittely. (Virtaustekniikka ja lämmönsiirto n.d.)

4 Säiliöiden ja putkiston lämpöhäviöt

Laskelmat tehtiin standardin PSK-3704 laskentakaavoja sekä Tekniikan taulukkokirjan kaavoja noudattaen. Lämpöhäviöt laskettiin sekä putkistoista että säiliöistä. Laskelmissa olevien putkistojen mitat on arvioitu nykyisten putkistojen sekä standardin vaatimien suojaetäisyyksien perusteella, sillä lämmityskonttia tullaan lähitulevaisuudessa siirtämään. Säiliöiden sekä nykyisen lämmityskontin sijainti terminaalilla näkyy kuviossa 8. Sekä säiliöiden että putkistojen eristemateriaalina on käytetty kivivillaa. Ympäristön lämpötilana T_o käytettiin työn tilaa- ja kansa sovittua ulkolämpötilaa -15°C . Työssä ei käytetty ympäristöministeriön asetuksen mukaista mitoitusulkolämpötilaa, sillä tilanne, jossa Porissa tulisi kahden viikon korkea pakkasjakso juuri sillä hetkellä, kun molemmat polttonestesäiliöt ovat tyhjänä, arvioitiin hyvin epätodennäköiseksi.

Lämpötilan T_e laskennassa on käytetty iterointimenetelmää, sillä eristyksen ulkopinnan lämpötila ei ole tiedossa. Putkissa virtaavan vesi-glykoliseoksen keskimääräiseksi lämpötilaksi on määritetty 45°C . Laskuissa on käytetty lämmönvaihtimen meno- ja paluulämpötiloina arvoja $T_1 = 55^{\circ}\text{C}$ ja $T_2 = 35^{\circ}\text{C}$. Säiliön sisällön lämpötila tulee olla $+10$ astetta, ja laskelmat on

laskettu tilanteessa, jossa polttoneste saapuu terminaalille 0-asteisena. Virtausnopeudelle on annettu standardin PSK-2401 suositeltujen virtausnopeuksien perusteella arvio 2,0 m/s.



Kuvio 5. Säiliöiden FA-1 ja FA-6 sekä nykyisen lämmityskontin sijainti terminaalilla

4.1 Säiliöiden uuden lämmitysjärjestelmän toimintaperiaate

Kattilan vaihdon yhteydessä modernisoidaan koko lämmitysjärjestelmä. Tämä tarkoittaa sitä, että nykyiset käsiventtiilit vaihdetaan automaattiventtiileiksi, putkistoihin lisätään lämpötila- ja virtausmittaukset sekä käyttöön otetaan taajuusmuuttajaohjattu pumppu. Myös lämmityskontin sijainti muutetaan standardien mukaiseksi, kuten aiemmin jo mainittiin, jolloin lämmitysputkistot täytyy johtaa uudelleen lämmityskontin uuteen sijaintiin.

Säiliöiden uuden lämmitysjärjestelmän toimintaperiaate (kuvio 8) on seuraavanlainen: säiliöiden FA-1 (kuvio 6) ja FA-6 (kuvio 7) lämmitysputkistossa virtaa vesi-glykoliseosta, joka pyritään pitämään +40°C-60°C lämpötilassa. Seoksessa on 50 % vettä ja 50 % glykolia. Lämpötilamittaukset TI-30 ja TI-40 mittaavat säiliöiden polttonesteiden lämpötilaa ja avaavat tai sulkevat automaattiventtiilit, mikäli lämpötila ylittää tai alittaa asetetun raja-arvon. Säiliössä

olevan tuotteen lämpötila pyritään pitämään lämpötilassa $+5^{\circ}\text{C}$ - 10°C , jotta kesälaatuinen polttoneste ei jäädy. Alaraja-arvo on siis $+5^{\circ}\text{C}$ ja yläraja-arvo $+10^{\circ}\text{C}$.

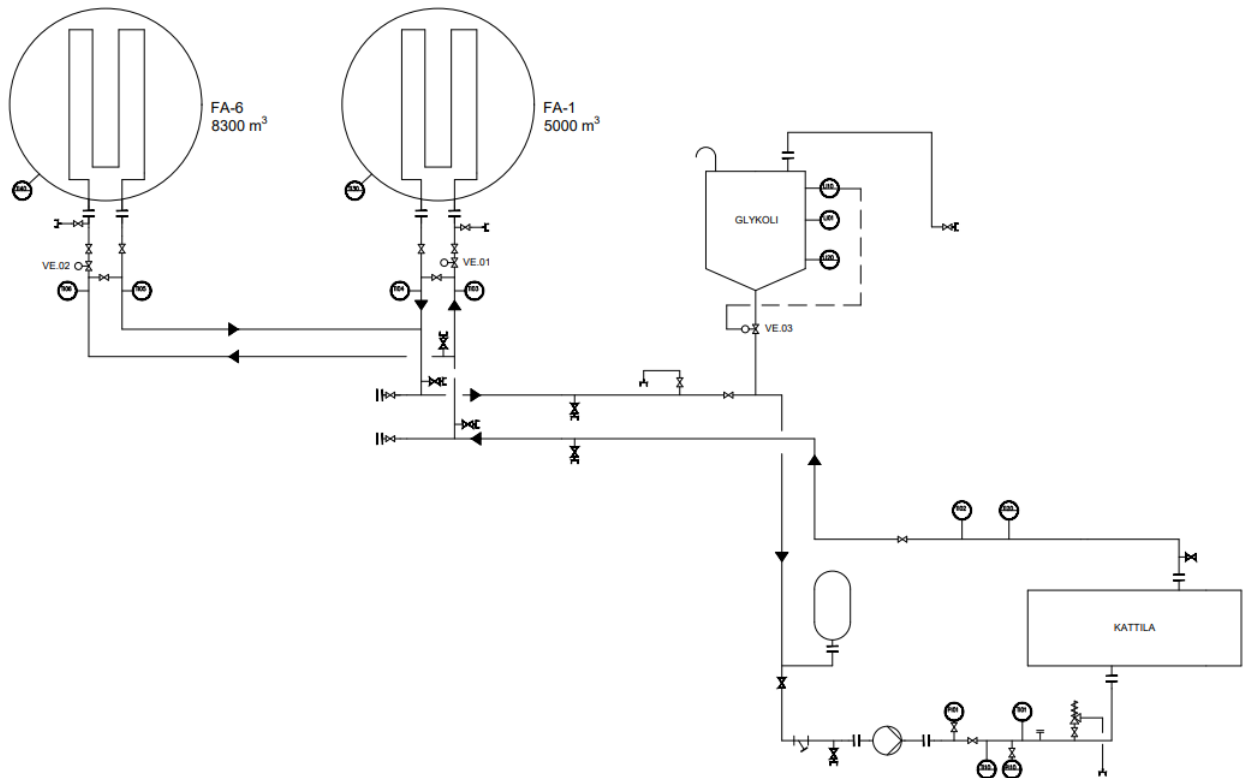


Kuvio 6. Säiliö FA-1



Kuvio 7. Säiliö FA-6

Mikäli lämpötilamittaus saavuttaa alaraja-arvon, on säiliössä oleva tuote jäähtynyt alle viiden celsiusasteen. Tällöin automaattiventtiili VE.01 tai VE.02 aukeaa, minkä jälkeen pumppu alkaa pumppaamaan lämmintä vesi-glykoliseosta säiliön lämmitysputkistoon tietyllä virtausnopeudella. Pumpulle on asetettu eri pyörimisnopeudet eri lämmitystilanteita varten, mikä tarkoittaa käytännössä sitä, että jos molemmat säiliöt tarvitsevat lämmitystä, on virtausnopeus tällöin huomattavasti suurempi kuin yhtä säiliötä lämmittäessä. Automaattiventtiili sulkeutuu, kun lämpötilamittaus saavuttaa yläraja-arvonsa, eli kun polttoneste on lämmennyt kymmeneen celsiusasteeseen. Säiliö FA-6 on suurempi kuin FA-1, joten säiliöiden sisältämät tuotteet jäähtyvät ja lämpenevät eri aikoihin. Prosessi siis toimii säiliöillä sekä samanaikaisesti että erikseen.



Kuvio 8. Säiliöiden uuden lämmitysjärjestelmän toimintaperiaate

4.2 Laskuissa käytetyt suureet, tunnukset ja mittayksiköt

A_p = säiliön pohjan pinta-ala (m^2)

A_v = säiliön vaipan pinta-ala (m^2)

A_k = säiliön katon pinta-ala (m^2)

π = pii

D = säiliön halkaisija (m)

h = säiliön korkeus (m)

r = säde (m)

m = massa (kg)

V = tilavuus (l)

ρ = tiheys (kg/m³)

ρ_r = tiheys rajapinnassa (kg/m³)

Φ_s/A_s = säiliön lämpöhäviö (W/m²)

Φ_p/L = eristetyn putken lämpöhäviö pituusyksikköä kohden (W/m)

Φ_{kok} = kokonaislämpöhäviö (W)

Φ_{pohja} = eristämättömän pohjan lämpöhäviö (W)

T_e = eristyksen ulkopinnan lämpötila käyttöolosuhteissa (K)

T_i = eristettävän kohteen sisällön lämpötila (K)

T_o = eristyksen ympäristön lämpötila (K)

T_g = glykolin lämpötila

T_d = dieselin lämpötila

s = eristyksen paksuus (m)

λ = materiaalin lämmönjohtavuus (W/Km)

d_e = eristyksen ulkohalkaisija

d_i = eristyksen sisähalkaisija

d_s = putken sisähalkaisija

d_u = putken ulkohalkaisija

α_e = ulkopinnan lämmönsiirtymiskerroin (W/m^2K)

α_k = konvektion lämmönsiirtymiskerroin ulkopinnalla (W/m^2K)

α_r = säteilyn lämmönsiirtymiskerroin (W/m^2K)

α_g = glykolin lämmönsiirtymiskerroin (W/m^2K)

α_d = dieselin lämmönsiirtymiskerroin (W/m^2K)

ε = emissiivisyys

σ = Stefan-Boltzmannin vakio = $5,6704 \cdot 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4)$

R_t = teräksen lämmönvastus

R_m = maan lämmönvastus

ΔT = lämpötilan muutos (K)

v = virtausnopeus (m/s)

L = putken pituus (m)

l = aineen paksuus (m)

c_p = ominaislämpökapasiteetti ($J/kg \cdot K$)

U = lämmönläpäisykerroin (W/m^2K)

k = lämmönläpäisykerroin (W/mK)

ν_k = kinemaattinen viskositeetti (m^2/s)

V_d = dynaaminen viskositeetti (kg/ms)

4.3 Lähtötiedot

Alla olevissa taulukoissa 1 ja 2 on esitetty säiliöiden ja putkistojen lähtötiedot.

Taulukko 1. Säiliöiden lähtötiedot

	Säiliö FA-1	Säiliö FA-6		
H	17,5	13,8	m	Korkeus
r	9,55	14,25	m	Säde
D	19,1	28,5	m	Halkaisija

Taulukko 2. Putkistojen lähtötiedot

	Putkisto FA-1	Putkisto FA-6		
s	0,03	0,035	m	Eristyksen paksuus
L	185	100	m	Putkiston pituus
D	0,073	0,0603	m	Eristyksen sisähalkaisija/putken halkaisija
d,e	0,103	0,095	m	Eristyksen ulkohalkaisija

4.4 Laskuissa käytetyt kaavat

Lämpöhäviöitä ja lämmitystehontarvetta laskiessa tarvitaan useita erilaisia kaavoja, joita on listattu alapuolelle. Säiliön vaipan pinta-ala laskettiin kaavalla 3:

$$A_v = \pi * D * h \quad [3]$$

$$A_v (\text{säiliö FA-1}) = \pi * 19,10\text{m} * 17,5\text{m} = 1049,55\text{m}^2$$

$$A_v (\text{säiliö FA-6}) = \pi * 28,50\text{m} * 13,8\text{m} = 1234,96\text{m}^2$$

Säiliön katon pinta-ala laskettiin kaavalla 4:

$$A_k = \pi * r^2 \quad [4]$$

$$A_k (\text{säiliö FA-1}) = \pi * (9,55 \text{ m})^2 = 286,38 \text{ m}^2$$

$$A_k (\text{säiliö FA-6}) = \pi \cdot (14,25 \text{ m})^2 = 637,62 \text{ m}^2$$

Kaavat 5–10 ovat standardista PSK-3704. Konvektion lämmönsiirtokerroin laskettiin eristetyille säiliölle kaavalla 5:

$$\alpha_k = 3,5 + 0,090 (T_e - T_o), \text{ kun/when } T_e - T_o \leq 10 \text{ K} \quad [5]$$

$$\alpha_k (\text{säiliö FA-1}) = 3,5 + 0,090 \cdot (259,15\text{K} - 258,15\text{K}) = 3,59 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_k (\text{säiliö FA-6}) = 3,5 + 0,090 \cdot (259,15\text{K} - 258,15\text{K}) = 3,59 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Konvektion lämmönsiirtokerroin laskettiin eristetyille putkelle kaavalla 6:

$$\alpha_k = 1,32 \cdot \left(\frac{T_e - T_o}{d_e} \right)^{0,25} \quad [6]$$

$$\alpha_k (\text{säiliö FA-1}) = 1,32 \cdot ((263,15\text{K} - 258,15\text{K}) / 0,103 \text{ m})^{0,25} = 3,48 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_k (\text{säiliö FA-6}) = 1,32 \cdot ((263,15\text{K} - 258,15\text{K}) / 0,095 \text{ m})^{0,25} = 3,55 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Emissiivisyyden arvona käytettiin arvoa 0,8. Säteilyn lämmönsiirtokerroin laskettiin sekä eristetyille säiliölle sekä putkelle kaavalla 7:

$$\alpha_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_e^4 - T_o^4}{T_e - T_o} \quad [7]$$

$$\alpha_s (\text{säiliö FA-1}) = 0,8 \cdot \sigma \cdot (259,15\text{K}^4 - 258,15\text{K}^4) / (259,15\text{K} - 258,15\text{K}) = 3,14 \text{ W /m}^2\text{K}$$

$$\alpha_s (\text{säiliö FA-6}) = 0,8 \cdot \sigma \cdot (259,35\text{K}^4 - 258,15\text{K}^4) / (259,35\text{K} - 258,15\text{K}) = 3,14 \text{ W /m}^2\text{K}$$

$$\alpha_s (\text{putkisto FA-1}) = 0,8 * \sigma * (263,15\text{K}^4 - 258,15\text{K}^4) / (263,15\text{K} - 258,15\text{K}) = 3,21 \text{ W /m}^2\text{K}$$

$$\alpha_s (\text{putkisto FA-6}) = 0,8 * \sigma * (263,15\text{K}^4 - 258,15\text{K}^4) / (263,15\text{K} - 258,15\text{K}) = 3,21 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ulkopinnan lämmönsiirtymiskerroin laskettiin kaavalla 8:

$$\alpha_e = \alpha_r + \alpha_k \quad [8]$$

$$\alpha_e (\text{säiliö FA-1}) = 3,14 \text{ W/m}^2\text{K} + 3,59 \text{ W/m}^2\text{K} = 6,73 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_e (\text{säiliö FA-6}) = 3,14 \text{ W/m}^2\text{K} + 3,59 \text{ W/m}^2\text{K} = 6,73 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_e (\text{putkisto FA-1}) = 3,21 \text{ W/m}^2\text{K} + 3,48 \text{ W/m}^2\text{K} = 6,70 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_e (\text{putkisto FA-6}) = 3,21 \text{ W/m}^2\text{K} + 3,55 \text{ W/m}^2\text{K} = 6,77 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Säiliön FA-1 eristyspaksuus oli 0,12 m ja säiliön FA-6 eristyspaksuus 0,1 m. Eristetyn säiliön tasopinnan lämpöhäviö pinta-alayksikköä kohden laskettiin kaavalla 9:

$$\Phi_s = \frac{T_i - T_o}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad [9]$$

$$\Phi_s/A_s (\text{säiliö FA-1}) = (283,15\text{K} - 258,15\text{K}) / ((0,12 \text{ m}/0,036 \text{ W/Km}) + (1/6,73 \text{ W/m}^2\text{K})) = 7,18 \text{ W/m}^2$$

$$\Phi_s/A_s (\text{säiliö FA-6}) = (283,15\text{K} - 258,15\text{K}) / ((0,10 \text{ m}/0,036 \text{ W/Km}) + (1/6,73 \text{ W/m}^2\text{K})) = 8,54 \text{ W/m}^2$$

Eristetyn putken lämpöhäviö pinta-alayksikköä kohden laskettiin kaavalla 10:

$$\Phi_p = \frac{\pi \cdot (T_i - T_o)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda} \ln \frac{d_e}{d_i} + \frac{1}{\alpha_e \cdot d_e}} \quad [10]$$

$$\Phi_p (\text{putkisto FA-1}) = \pi \cdot (318,15\text{K} - 258,15\text{K}) / ((1/2 \cdot 0,036 \text{ m}) \cdot \ln(0,103/0,073) + (1/6,70 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 0,103 \text{ m})) = 30,3 \text{ W/m}$$

$$\Phi_p (\text{putkisto FA-6}) = \pi \cdot (318,15\text{K} - 258,15\text{K}) / ((1/2 \cdot 0,036 \text{ m}) \cdot \ln(0,095/0,0603) + (1/6,77 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 0,095 \text{ m})) = 23,8 \text{ W/m}$$

Teräksen paksuutena laskuissa on käytetty arvoa 4 mm. Säiliöiden pohjia ei ole eristetty, joten niiden lämpöhäviöt laskettiin erikseen. Teräksen lämmönvastus R_t laskettiin kaavalla 11:

$$R_t = l / \lambda \quad [11]$$

$$R_t (\text{säiliön pohja}) = 0,004 \text{ m} / 45 \text{ W/Km} = 8,89 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$$

Maan lämmönvastukselle saatiin arvo $0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$ Suomen rakentamismääräyskokoelmasta.

Säiliön pohjan lämmönläpäisykerroin U laskettiin kaavalla 12:

$$U = 1 / (R_m + R_t) \quad [12]$$

$$U = 1 / ((8,89 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W} + 0,8 \text{ m}^2\text{K/W})) = 1,25 \text{ W /m}^2\text{K}$$

Lämmön siirtyminen ja johtuminen säiliön eristämättömän pohjan läpi laskettiin kaavalla 13:

$$\Phi_{\text{pohja}} = U \cdot A_p \cdot \Delta T \quad [13]$$

$$\Phi_{\text{pohja}} (\text{säiliö FA-1}) = 1,25 \text{ W /m}^2\text{K} \cdot 286,38 \text{ m}^2 \cdot (283,15\text{K} - 258,15\text{K}) = 8948 \text{ W}$$

$$\Phi_{\text{pohja}} (\text{säiliö FA-6}) = 1,25 \text{ W/m}^2\text{K} * 637,62\text{m}^2 * (283,15\text{K}-258,15\text{K}) = 19\,923 \text{ W}$$

Kokonaislämpöhäviö säiliölle laskettiin kaavalla 14:

$$\Phi_{\text{kok}} = \Phi_s * A_{v+k} + \Phi_{\text{pohja}} \quad [14]$$

$$\Phi_{\text{kok}} (\text{säiliö FA-1}) = (7,18 \text{ W/m}^2 * 1335,92 \text{ m}^2) + 8948 \text{ W} = 18\,539,9 \text{ W} = 18,5 \text{ kW}$$

$$\Phi_{\text{kok}} (\text{säiliö FA-6}) = (8,54 \text{ W/m}^2 * 1872,58 \text{ m}^2) + 19\,923 \text{ W} = 35\,914,8 \text{ W} = 35,9 \text{ kW}$$

Kokonaislämpöhäviöt putkistolle laskettiin kaavalla 15:

$$\Phi_{\text{kok}} = \Phi_p * L \quad [15]$$

$$\Phi_{\text{kok}} (\text{putkisto FA-1}) = 30,3 \text{ W/m} * 185 \text{ m} = 5596,41 \text{ W} = 5,6 \text{ kW}$$

$$\Phi_{\text{kok}} (\text{putkisto FA-6}) = 23,8 \text{ W/m} * 100 \text{ m} = 2383,67 \text{ W} = 2,38 \text{ kW}$$

Polttonesteen massa laskettiin kaavalla 16:

$$m = \rho * V \quad [16]$$

$$m (\text{säiliö FA-1}) = 0,9 \text{ kg/l} * 5000000 \text{ l} = 4500000 \text{ kg}$$

$$m (\text{säiliö FA-6}) = 0,9 \text{ kg/l} * 8300000 \text{ l} = 7470000 \text{ kg}$$

Dieselin ominaislämpökapasiteettinä käytettiin 2,1 kJ/kgK. Polttonesteen lämmittämiseen tarvittava lämpömäärä laskettiin kaavalla 17:

$$Q = c * m * \Delta T \quad [17]$$

$$Q (\text{säiliö FA-1}) = 2,1 \text{ kJ/kgK} * 4500000 \text{ kg} * (10^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 94\,500\,000 \text{ kJ}$$

$$Q (\text{säiliö FA-6}) = 2,1 \text{ kJ/kgK} * 7470000 \text{ kg} * (10^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 156\,870\,000 \text{ kJ}$$

Lämmönvaihtimen todellinen teho laskettiin lämmitysputken lämmönsiirtymiskertoimen avulla. Lämmönsiirtymiskertoimen laskemiseen tarvittiin Nusseltin lukua, jonka laskemiseen puolestaan tarvittiin Reynoldsin lukua, Grashofin lukua ja Prandtlin lukua. Reynoldsin luku laskettiin kaavalla 2:

$$Re (\text{säiliö FA-1}) = v * d_s / \nu_k = 2,0 \text{ m/s} * 0,057 / 1 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 114000$$

$$Re (\text{säiliö FA-6}) = v * d_s / \nu_k = 2,0 \text{ m/s} * 0,0444 / 1 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 88800$$

Prandtlin luku laskettiin kaavalla 18:

$$Pr = \nu_d * c_p / \lambda \quad [18]$$

$$Pr (\text{glykoli}) = 0,0015 \text{ kg/ms} * 3800 \text{ J/kgK} / 0,456 \text{ W/mK} = 12,5$$

$$Pr (\text{diesel}) = 0,0018 \text{ kg/ms} * 2100 \text{ J/kgK} / 0,15 \text{ W/mK} = 25,2$$

Grashofin luku laskettiin kaavalla 19:

$$Gr = (g * L^3 * (\rho - \rho_r / \rho_r)) / \nu_k^2 \quad [19]$$

$$Gr (\text{säiliö FA-1}) = (9,81 \text{ m/s}^2 * (299,8^3) \text{ m} * ((900 \text{ kg/m}^3 - 860 \text{ kg/m}^3) / 860 \text{ kg/m}^3)) / (0,000001^2) \text{ m}^2/\text{s} = 2,93712 * 10^{18}$$

$$Gr (\text{säiliö FA-6}) = (9,81 \text{ m/s}^2 * (161^3) \text{ m} * ((900 \text{ kg/m}^3 - 860 \text{ kg/m}^3) / 860 \text{ kg/m}^3)) / (0,000001^2) \text{ m}^2/\text{s} = 4,548 * 10^{17}$$

Koska virtaus on turbulenttista eli Reynoldsin luku on yli 4000, laskettiin Nusseltin luku glykolin ja putken välisessä lämmönsiirrossa Hausenin korrelaatiokaavalla (kaava 20) ja kaavalla 21 putken ja dieselin välisessä lämmönsiirrossa:

$$\text{Nu} = 0,037 * (\text{Re}^{0,75} - 180) * \text{Pr}^{0,42} \quad [20]$$

$$\text{Nu} = 0,14 * (\text{Gr} * \text{Pr})^{1/3} \quad [21]$$

$$\text{Nu (säiliö FA-1, glykoli - putki)} = 0,037 * (114000^{0,75} - 180) * 12,5^{0,42} = 643,87$$

$$\text{Nu (säiliö FA-6, glykoli - putki)} = 0,037 * (88800^{0,75} - 180) * 12,5^{0,42} = 530,57$$

$$\text{Nu (säiliö FA-1, putki - diesel)} = 0,14 * (2,93712 * 10^{18} * 25,2)^{1/3} = 587\ 808$$

$$\text{Nu (säiliö FA-6, putki - diesel)} = 0,14 * (4,548 * 10^{17} * 25,2)^{1/3} = 315\ 667$$

Lämmönsiirtokerroin laskettiin kaavalla 22 glykolin ja putken välisessä lämmönsiirrossa ja kaavalla 23 putken ja dieselin välisessä lämmönsiirrossa:

$$\alpha = \text{Nu} * \lambda / d_s \quad [22]$$

$$\alpha = \text{Nu} * \lambda / L \quad [23]$$

$$\alpha_g \text{ (säiliö FA-1, glykoli - putki)} = 643,87 * 0,456 \text{ W/mK} / 0,057 \text{ m} = 5150,93 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_g \text{ (säiliö FA-6, glykoli - putki)} = 530,57 * 0,456 \text{ W/mK} / 0,0444 \text{ m} = 5449,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_d \text{ (säiliö FA-1, putki - diesel)} = 587\ 808 * 0,15 \text{ W/mK} / 299,8 \text{ m} = 294,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\alpha_d \text{ (säiliö FA-6, putki - diesel)} = 315\ 667 * 0,15 \text{ W/mK} / 161 \text{ m} = 294,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Lämmönläpäisykerroin pituusyksikköä kohden laskettiin kaavalla 24:

$$k = \left(\frac{1}{d_s} \cdot \alpha_g + \frac{\ln(d_u/d_s)}{2 \cdot \lambda} + \frac{1}{d_u} \cdot \alpha_d \right)^{-1} \quad [24]$$

$$k \text{ (lämmitysputkisto FA-1)} = \left(\frac{1}{0,057 \text{ m} \cdot 5150,72 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{\ln(0,073/0,057)}{2 \cdot 45 \text{ W/mK}} + \frac{1}{0,073 \cdot 294,1 \text{ W/m}^2 \text{K}} \right)^{-1} = 18,96 \text{ W/mK}$$

$$k \text{ (lämmitysputkisto FA-6)} = \left(\frac{1}{0,0603 \text{ m} \cdot 5449,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{\ln(0,0603/0,0444)}{2 \cdot 45 \text{ W/mK}} + \frac{1}{0,0603 \cdot 294,1 \text{ W/m}^2 \text{K}} \right)^{-1} = 15,64 \text{ W/mK}$$

Lämmitysputkiston lämpövirta laskettiin kaavalla 25:

$$\Phi = k \cdot L \cdot (T_g - T_d) \quad [25]$$

$$\Phi \text{ (lämmitysputkisto FA-1)} = 18,96 \text{ W/mK} \cdot 299,8 \text{ m} \cdot (318,15\text{K} - 273,15\text{K}) = 255,84 \text{ kW}$$

$$\Phi \text{ (lämmitysputkisto FA-6)} = 15,64 \text{ W/mK} \cdot 161 \text{ m} \cdot (318,15\text{K} - 273,15\text{K}) = 113,34 \text{ kW}$$

Suuremman säiliön FA-6 sisällön tulee lämmitä uudella järjestelmällä viikossa (7vkr = 604800 s) lämpötilasta 0°C lämpötilaan +10°C. Säiliön sisällön lämmittämiseen tarvittava teho laskettiin kaavalla 26:

$$\Phi = Q/\Delta t \quad [26]$$

$$\Phi \text{ (säiliö FA-1)} = 94\,500\,000 \text{ kJ} / 604\,800 \text{ s} = 156,25 \text{ kW}$$

$$\Phi \text{ (säiliö FA-6)} = 156\,870\,000 \text{ kJ} / 604\,800 \text{ s} = 259,375 \text{ kW}$$

Kun säiliön FA-6 tehontarpeeseen lisätään säiliön ja putkiston lämpöhäviöt sekä säiliön FA-1 lämpöhäviöt (ylläpitolämmitys), saadaan säiliön kokonaistehontarve:

$$\Phi (\text{säiliö FA-6}) = 259,4 \text{ kW} + 18,54 \text{ kW} + 35,9 \text{ kW} + 5,6 \text{ kW} + 2,38 \text{ kW} = 321,8 \text{ kW}$$

Lopuksi saatiin iterointimenetelmällä säiliöiden sekä putkistojen eristyksen pintalämpötilat käyttöolosuhteissa. Säiliöiden kohdalla käytettiin kaavaa 27 ja putkistojen kohdalla kaavaa 28:

$$T_e = T_o + (\Phi_s / \alpha_e) \quad [27]$$

$$T_e = T_o + (\Phi_p / (\pi * \alpha_e * d_e)) \quad [28]$$

$$T_e (\text{säiliö FA-1}) = 258,15 \text{ K} + (7,18 \text{ W/m}^2 / 6,73 \text{ W/m}^2\text{K}) = 259,11 \text{ K}$$

$$T_e (\text{säiliö FA-6}) = 258,15 \text{ K} + (8,54 \text{ W/m}^2 / 6,73 \text{ W/m}^2\text{K}) = 259,42 \text{ K}$$

$$T_e (\text{putkisto FA-1}) = 258,15 \text{ K} + (30,3 \text{ W/m} / (\pi * 6,70 \text{ W/m}^2\text{K} * 0,103 \text{ m})) = 272,11 \text{ K}$$

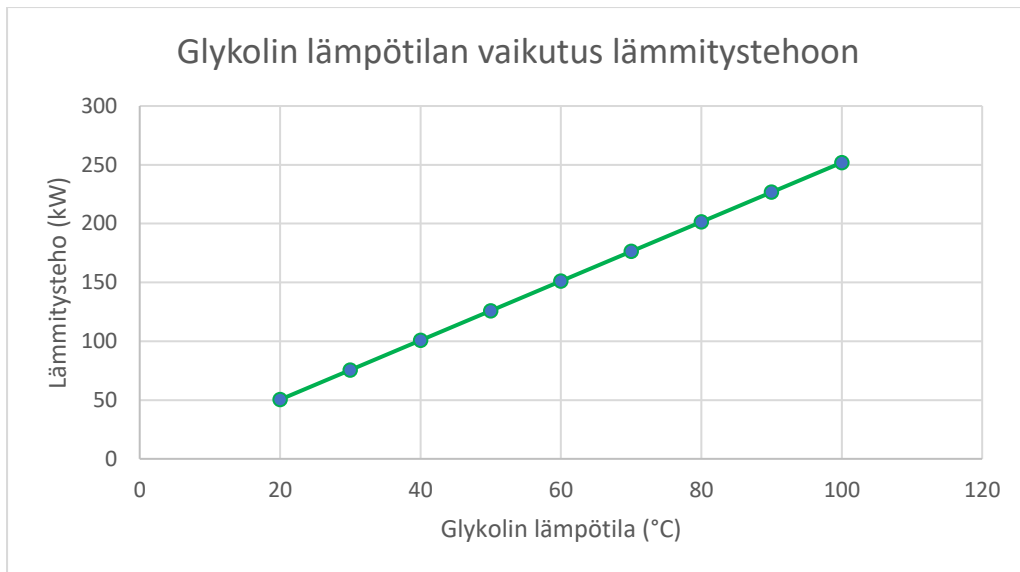
$$T_e (\text{putkisto FA-6}) = 258,15 \text{ K} + (23,8 \text{ W/m} / (\pi * 6,77 \text{ W/m}^2\text{K} * 0,095 \text{ m})) = 269,92 \text{ K}$$

4.5 Laskujen tulokset

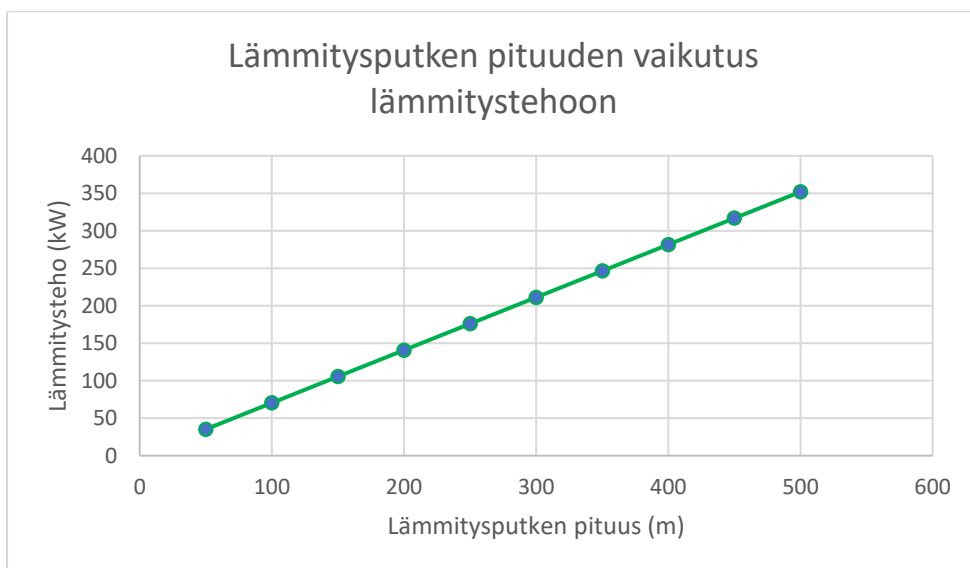
Jo ennen laskelmia oli tiedossa, että vanha kattila ei teholtaan riitä lämmittämään polttonestesäiliöitä tarvittavassa ajassa. Uusi kattila mitoitettiin suuremman säiliön FA-6 lämmitystehontarpeen mukaan siten, että säiliö saadaan lämmitettyä viikossa nolasta asteesta kymmeneen asteeseen. Laskelmat tehtiin yhdestä säiliöstä kerrallaan, sillä mikäli tulisi tilanne, jossa molemmat polttonestesäiliöt olisivat tyhjiä ja ne täytettäisiin 0-asteisella polttonesteellä, pyrittäisiin siinä tapauksessa lämmittämään ensin vain toista säiliötä, jotta se saataisiin mahdollisimman nopeasti jakelulämpötilaan. Mitoituksessa huomioitiin säiliön FA-1 ylläpitolämmitykseen kuuluva energia, mikäli säiliö olisi jo täynnä 10-asteista polttonestettä silloin, kun säiliötä FA-6 aletaan lämmittämään.

Tarkastelussa pyrittiin optimoimaan lämmitysteho nykyisellä lämmitysputkistolla, jolloin tehokkuuteen vaikuttavat virtausnopeus ja putkissa kiertävän glykolin lämpötila. Kuvion 9 perusteella voidaan todeta, että glykolin lämpötilan nostaminen nostaa tehoa lineaarisesti, samoin lämmitysputken määrän lisääminen säiliön sisällä (kuvio 10). Virtausnopeudella puolestaan ei ole samanlaista vaikutusta, sillä suurempi kuin 3 m/s nopeus ei enää merkittävästi nosta lämmitystehoa (kuvio 11). Nykyputkistosta saadaan siis sitä enemmän tehoa irti, mitä kuumempaa glykolia putkissa virtaa noin 3 m/s virtausnopeudella. Nykyisin säiliöt lämpenevät noin 0,5°C päivässä, eli lämpenemisessä kestää noin 20 vrk. Ilman lämmitysputken lisäämistä olisi mahdollista päästä 0,7°C nousuun päivässä, jos glykolin keskimääräinen lämpötila nostettaisiin 55 asteeseen ja virtausnopeus 3 metriin sekunnissa. Tämä tarkoittaisi sitä, että lämmitysaika lyhenisi 14 vuorokauteen. Tämä on kuitenkin vielä kaukana toivotusta 7 vrk:n lämmitysajasta.

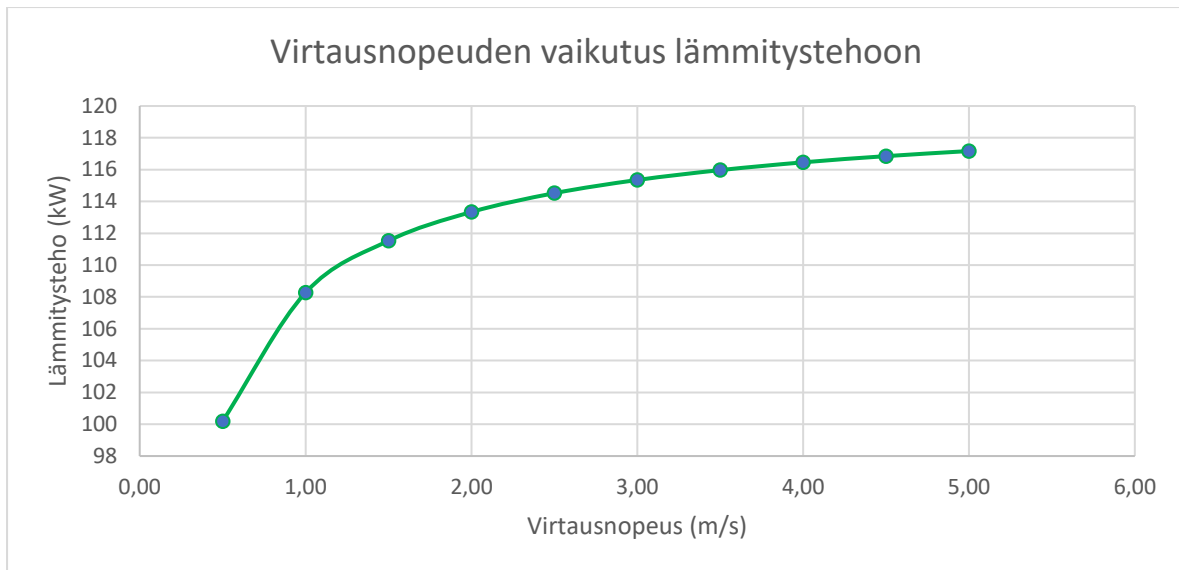
Tästä päästiin johtopäätökseen, että vaikka uusi kattila riittääkin teholtaan lämmittämään säiliöt tavoiteajassa, ei lämmitysputkiston teho riitä tähän. Säiliön FA-1 lämmitysputkiston teho oli 255,84 kW ja säiliön FA-6 113,34 kW. Tarkasteluissa tultiin siihen tulokseen, että mikäli lämmitysputkiston tehoa halutaan nostaa kattilan tehon vaatimalle tasolle, tulisi lämmitysputken pituutta lisätä säiliössä FA-6 noin 210 m, nostaa glykolin keskimääräistä lämpötilaa 55 asteeseen sekä nostaa virtausnopeutta 3 metriin sekunnissa.



Kuvio 9. Glykolin lämpötilan vaikutus lämmitystehoon



Kuvio 10. Lämmityspotken pituuden vaikutus lämmitystehoon



Kuvio 11. Virtausnopeuden vaikutus lämmitystehoon

5 Lämmitysmuotojen vertailu

Jotta lämmitysmuotoja voitiin vertailla tasapuolisesti, kysyttiin laitetoimittajilta tarjoukset sähkö-, maalämpö- ja öljylämmitysjärjestelmästä. Tarjoukset kysyttiin 320 kW:n kattilalle. Alkuinvestoinnin lisäksi vertailussa otettiin huomioon hiilijalanjälki, elinkaarikustannukset sekä käyttövarmuus. Elinkaarikustannukset laskettiin kaikissa lämmitysmuodoissa 20 vuoden ajalle, sillä sen jälkeen lämmitysjärjestelmä luultavasti on joko käyttökänsä päässä tai vähintään huollon tarpeessa. Vuotuinen energiamäärä arvioitiin aiemmin kuluneen lämmitysöljyn perusteella. Kustannusvertailut eri lämmitysmuotojen välillä on esitetty taulukossa 1. Taulukon tuloksia tarkastellaan seuraavissa kappaleissa tarkemmin.

Taulukko 3. Lämmitysmuotojen vertailu 20 vuoden ajalta

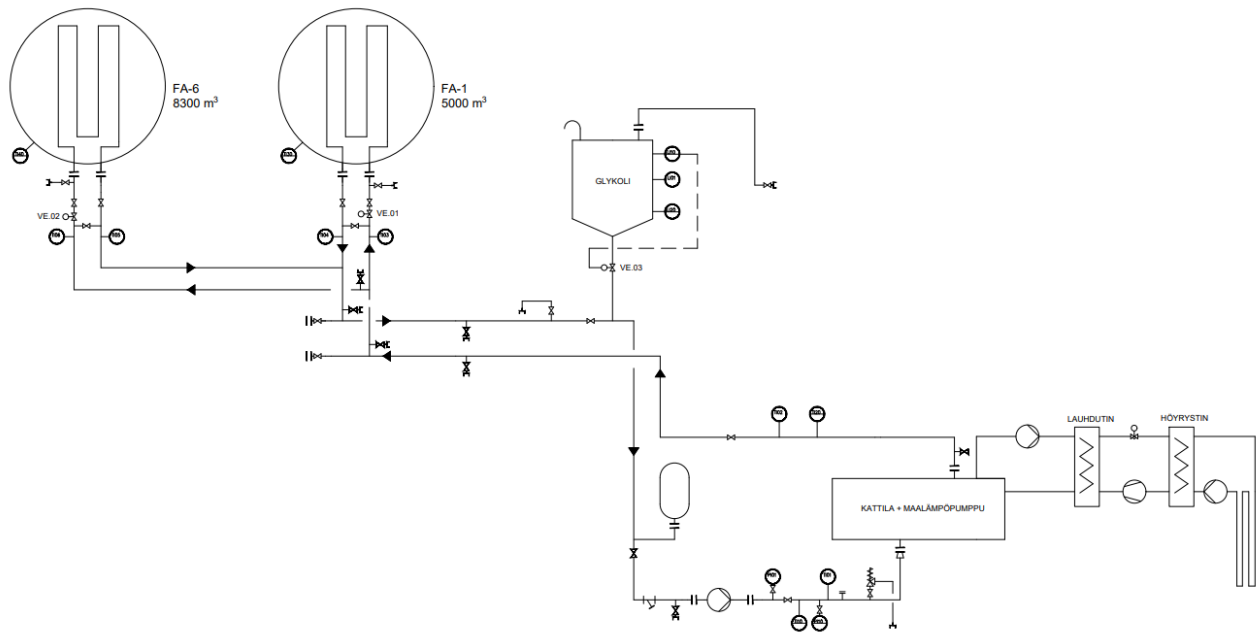
Lämmitysmuoto	Sähkö	Öljylämmitys	Maalämpö	
Hiilijalanjälki	77	260	30	kgCO ₂ /MWh
Alkuinvestointi	240380	12000	376600	€
Ostettu öljy/sähkö	972000	960000	324000	€
Kokonaiskustannukset	1212380	972000	700600	€

5.1 Maalämpö

Tarjouspyyntöjen jälkeen maalämpöpumpulle saatiin hinnaksi 168 600 €. Tämä tarjous sisälsi kaksi 160 kW:n pumppua, sillä haluttiin varmistaa, että toisen pumpun mennessä häiriöön ei menetettäisi koko lämmitysfunktiota. Kyseessä oli vain laitekaupan hinta, joten mukaan ei ollut laskettu asennustöitä, porakaivoja tai materiaaleja. Porakaivon hinnaksi määritettiin tässä vertailussa 8000 €/kaivo. Terminaalille oli aikoinaan tehty maalämpöselvitys, jonka mukaan nykyinen järjestelmä olisi vaatinut 18 kpl 200 metrin syvyistä porakaivoa alueelle. Uudella lämmitysjärjestelmällä 200 metrin syvyisiä porakaivoja tarvittaisiin 26 kpl. Nykyisin on mahdollista porata syvempiäkin kaivoja, mutta laitetoimittajan mukaan 200 metrin porakaivot ovat edelleen yleisimpiä, joten vertailu suoritettiin tämän perusteella. Porakaivot tulisivat maksamaan siis noin 208 000 €. Maalämpöjärjestelmän alkuinvestoinnin kokonaissummaksi kertyisi näiden tietojen perusteella 376 600 €.

Maalämpöpumpulla elinkaarikustannuksia kertyy vähemmän verrattuna muihin lämmitysmuotoihin, sillä ainoastaan sen käyttämästä sähköstä maksetaan. Maalämpöpumpun keskimääräinen lämpökerroin on noin 3, mikä tarkoittaa sitä, että yhdellä ostetulla kilowatilla pumppu tuottaa kolme kilowattia lämpöenergiaa (Lämpöä omasta maasta n.d). Maalämpöpumpun yhden vuoden aikana käyttämä sähkö laskettiin siis seuraavasti: $450\,000\text{ kWh} / 3 = 150\,000\text{ kWh}$. Maalämpöpumpun elinkaarikustannuksiksi saatiin 20 vuoden ajalta 324 000 € ja kokonaiskustannuksiksi 700 600 €.

Ympäristönäkökulmasta katsottuna maalämpö olisi todella hyvä vaihtoehto, sillä se on uusiutuvaa energiaa. Maalämpöpumppu on lisäksi käyttövarma ja huoltovapaa vaihtoehto. Maalämpöpumpun hiilijalanjälki on keskimäärin 30 kgCO₂/MWh, ja sen käyttöikä on noin 30 vuotta. (Maalämpöpumppu n.d).



Kuvio 12. Uuden maalämpöpumpputerjestelmän periaatekaavio

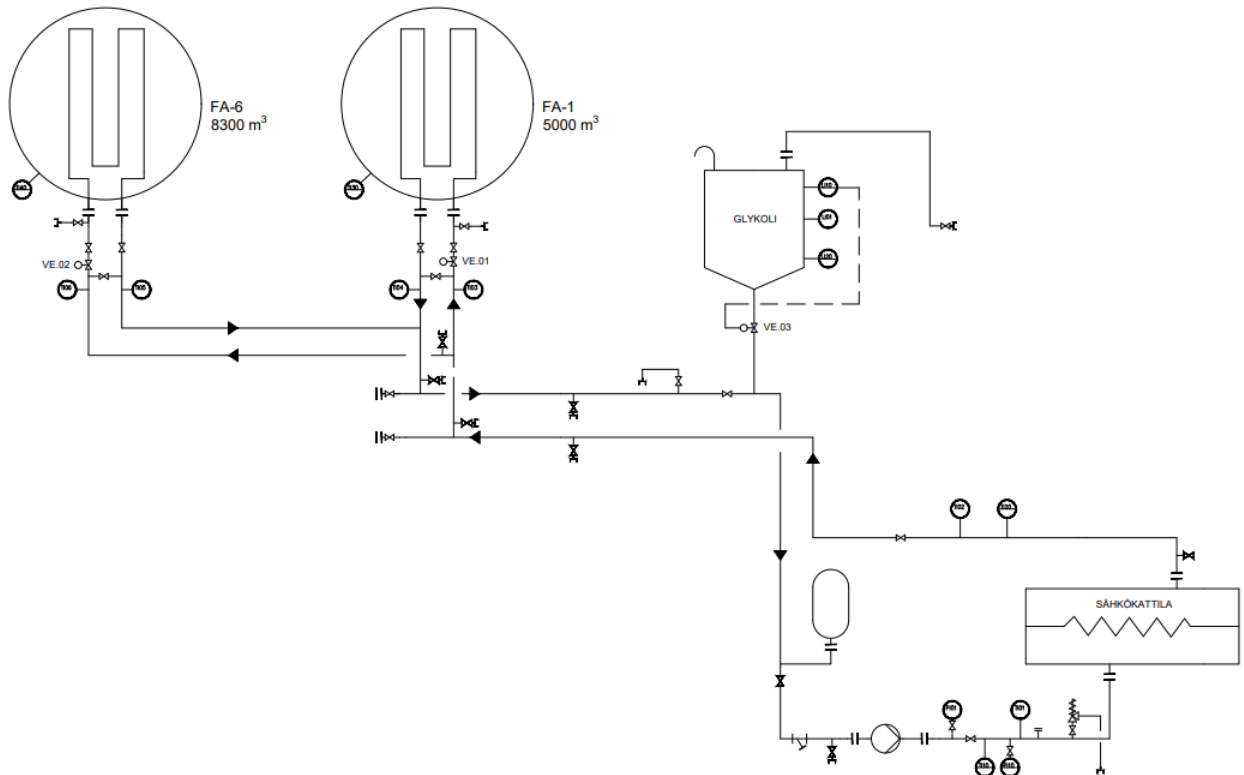
5.2 Sähkölämmitys

Sähkökattiloista saatiin muutama eri tarjous. Kattiloiden hinnat vaihtelivat välillä 11 730 € - 13 380 € ja niiden tehot vaihtelivat välillä 300 kW – 360 kW. Hinnossa ei ollut huomioitu 300 €:n arvoista rahtikuljetusta. Sähkölämmitys on alkuinvestoinniltaan edullinen vaihtoehto, mutta käyttökustannuksiltaan melko hintava. Sähkön hinta on ollut viime aikoina nousussa, mikä luo lisää epävarmuutta kustannustehokkuudelle. Sähkölämmitys on turvallinen lämmitysvaihtoehto eikä siinä ole kuluvia osia, joten se on käyttövarma ja jokseenkin huoltovapaa ratkaisu. Sähkölämmityksen keskimääräinen hiilijalanjälki on Suomessa 77 kgCO₂/MWh (CO₂-päästökertoimet 2023).

Tarkasteluissa huomattiin, että sähkökattilan käyttöönotto vaatisi massiivisia lisäinvestointeja terminaalille, sillä nykyinen sähköteho ei riittäisi lämmittämään kahta suurta säiliötä. Tällä hetkellä pohjoisterminaalilla on käytössä 2kpl 400 A:n liittymää, joista kummastakaan ei saada tarvittavaa tehoa ulos. Uusi kattila tarvitsisi 3kpl 505 A:n liittymää. Tämä vaatisi terminaalille muun muassa uuden sähkötilan ja uuden muuntajan, mikä lisäisi alkuinvestoinnin

määrää merkittävästi. Vaadittavista sähkötöistä ja hankinnoista arvioitiin muodostuvan noin 227 000 €:n kustannukset.

Sähkölämmityksen elinkaarikustannukset riippuvat paljolti sähkön hinnankehityksestä, joka ei ole tarkasti ennustettavissa. Sähkön hintana käytettiin laskelmissa vuosien 2020–2022 keskiarvoa 10,8 c/kWh. Maailmantilanteesta johtuen sähkön hinta on ollut erityisen korkealla lähivuosina, joten keskiarvo laskettiin useamman vuoden ajalta, jotta laskelmat eivät perustuisi yksittäiseen, poikkeukselliseen vuoteen. Sähkökattilan yhden vuoden aikana käyttämä sähkö arvioitiin aiemmin kuluneen öljyn perusteella, sillä koska litrasta lämmitysöljyä saa 10 kWh lämpöenergiaa, tarvitaan yhden vuoden aikana: $15\,000\text{ l} * 10\text{ kWh/l} * 3 = 450\,000\text{ kWh}$. Sähkölämmityksen elinkaarikustannukset 20 vuoden ajalta olivat tämän perusteella 972 000 €. Kun tähän lisätään sähkökattilan hinta 13 380 € sekä sähkötöistä ja hankinnoista aiheutuvat kustannukset, saadaan kokonaiskustannuksiksi 1 212 380 €.



Kuvio 13. Uuden sähkölämmitysjärjestelmän periaatekuva

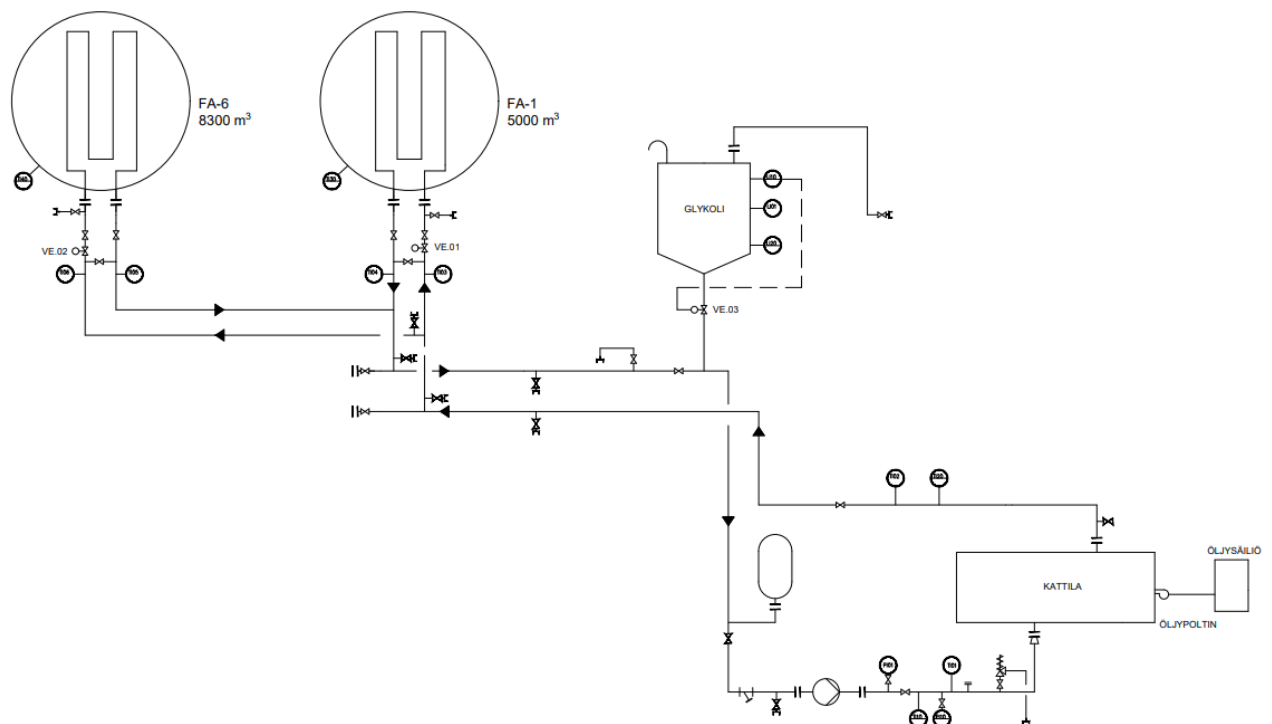
5.3 Öljylämmitys

Öljylämmitysjärjestelmästä saatiin tarjous, jonka loppusumma oli karkeasti arvioituna 12 000 €. Tarjoukseen sisältyi öljypoltin ja -kattila. Maalämpöön ja sähköön verrattuna öljylämmityksen alkuinvestointi olisi siis merkittävästi pienempi, eikä se vaatisi suuria lisätoita terminaalilla.

Öljylämmitys on käyttövarma ja tasainen vaihtoehto lämmitykseen. Nykyaikaiset öljykattilat ovat tehokkaita, ja niiden hyötysuhde on korkea. Öljy on kuitenkin fossiilinen polttoaine, joten ympäristönäkökulmasta katsottuna se on tarkastelun kohteena olevista lämmitysmuodoista kaikista huonoin vaihtoehto. Öljylämmityksen hiilijalanjälki on 260 kgCO₂/MWh, eli moninkertaisesti maalämpöön tai sähköön verrattuna (Carbon emissions of different fuels

2023). Toisaalta nykyisin on olemassa biopohjaisia polttonesteitä, joita voisi harkita otettavaksi käyttöön myös terminaalille.

Öljykattila on alkuinvestoinniltaan edullinen, mutta käyttökustannuksiltaan suhteellisen kallis lämmitysmuoto. Öljylämmityksen elinkaarikustannukset riippuvat öljyn hinnan kehityksestä, jota ei tarkasti voi ennustaa. Laskelmissa öljyn hintana käytettiin vuoden 2021 keskihintaa 1 €/l, ja karkeasti yhdestä litrasta öljyä saa noin 10 kWh lämpöenergiaa (Kun on aika luopua öljylämmityksestä 2019). Yhden lämmityskauden öljynkulutus joulukuulta huhtikuulle on aiemmin ollut terminaalilla n. 15 000 l. Koska uusi kattila on noin 3,2 kertaa suurempi kuin vanha, saatiin uuden järjestelmän kuluttama öljy lämmityskaudella seuraavasti: $3,2 * 15\ 000\ l = 48\ 000\ l$. Öljylämmityksen elinkaarikustannukset 20 vuoden ajalta ovat noin 960 000 € ja kokonaiskustannukset 972 000 €.



Kuvio 14. Uuden öljylämmitysjärjestelmän periaatekuva

6 Tulokset ja pohdinnat

Nykyisen lämmitysputkiston teho on säiliössä FA-1 255,8 kW ja säiliössä FA-6 113,3 kW. Pienemmässä säiliössä FA-1 on lähes kaksi kertaa enemmän lämmitysputkistoa (299,8 m) kuin suuremmissa säiliössä FA-6 (161 m). Säiliön FA-1 sisällä kulkee lämmityspatteri (DN65), ja säiliön FA-6 sisällä kulkee lämmityskierukka (DN50), joka kiertää säiliön kahdesti. Säiliön FA-6 lämmitysputkisto on siis sekä huomattavasti lyhyempi, että myös halkaisijaltaan pienempi. Säiliössä FA-6 on vanhojen dokumenttien mukaan aikoinaan ollut kierukan lisäksi myös lämmityspatteri, mutta terminaalilta kerrottiin, ettei sitä enää ole olemassa. Nämä seikat näkyvätkin suoraan lämmitystehossa, joka on säiliöllä FA-6 yli puolet pienempi kuin säiliöllä FA-1.

Säiliöiden lämpöhäviöt olivat säiliöllä FA-1 18,54 kW ja säiliöllä FA-6 35,9 kW. Eristettyjen putkistojen lämpöhäviöt puolestaan olivat säiliöllä FA-1 5,60 kW ja säiliöllä FA-6 2,38 kW. Laskennallinen kokonaistehontarve sille, että säiliö FA-6 saadaan 7 vrk:n aikana lämmitettyä nollasta asteesta kymmeneen asteeseen, oli lämpöhäviöt mukaan laskettuna 321,8 kW. Nykyisen kattilan teho terminaalilla on vain 100 kW, sillä lämmitysjärjestelmään on vasta myöhemmin liitetty säiliö FA-1, eikä kattilaa ole mitoitettu lämmittämään kahta säiliötä.

Laskelmat osoittivat, että lämmitystehon lisäämiseksi paras vaihtoehto olisi lisätä lämmitysputkiston määrää säiliön sisällä, sillä ainakin säiliössä FA-6 lämmitysputkiston määrä on riittämätön nopeaan lämpenemiseen. Nykyisellä putkistolla tehoa saadaan kasvatettua tietyillä virtausnopeuden ja lämpötilan muutoksilla, mutta se ei silti riitä lämmittämään säiliötä tavoiteajassa. Jotta tarvittava teho saataisiin säiliön FA-6 lämmitysputkistosta irti, tulisi putkiston määrää lisätä 210 metrillä, nostaa vesi-glykoliseoksen keskimääräistä lämpötilaa 55 asteeseen sekä nostaa virtausnopeus kolmeen metriin sekunnissa.

Tarkastelussa pyrittiin ottamaan huomioon kaikki kestävä kehityksen pääpilarit, eli sosiaalinen, taloudellinen ja ympäristöllinen vastuu. Öljylämmitys oli selkeästi kaikista helpoin ja käyttövarmin vaihtoehto. Se olisi myös alkuinvestoinniltaan edullinen, ja öljyä löytyisi terminaalilta jo omasta takaa. Öljylämmitys on myös melko huoltovapaa ratkaisu, mutta koska se on kuitenkin fossiilinen polttoaine, olisi hyvä harkita biopohjaisiin polttonesteisiin siirtymistä, mikäli öljylämmitykseen päädyttäisiin. Öljylämmitys oli elinkaarikustannuksiltaan

vertailtavista lämmitysmuodoista toiseksi kallein, sähkön ollessa kallein ja maalämmön edullisin.

Sähkölämmitykseen siirtyminen olisi vaatinut massiivisia lisähankintoja, kuten taajuusmuuttajia ja uuden sähköpääkeskuksen, mikä toi investointiin jopa satoja tuhansia lisää. Sähkölämmityksen kohdalla alkuinvestointi siis kasvoi liian suureksi, minkä lisäksi sähkön hintojen nousu voisi vaikuttaa negatiivisesti sähkölämmityksen elinkaarikustannuksiin. Sähkö ei siis olisi kovinkaan järkevä vaihtoehto, ellei se olisi käytössä varajärjestelmänä esimerkiksi maalämmön ohella.

Maalämpöpumpun suhteen tarkastelu sisälsi monia eri tekijöitä. Maalämpö olisi kaikista halvin ja ympäristöystävällisin lämmitysvaihtoehto 20 vuoden ajalla, vaikka alkuinvestointi olisi-kin suuri. Säiliöt olisi mahdollista saada lämpenemään viikossa nolasta kymmeneen asteeseen, jos lämmitysputkiston määrää säiliön sisällä lisättäisiin ja jos tilaa porakaivoille riittäisi terminaali-alueella. Lämmitysputkiston lisääminen olisi maalämmön kohdalla erityisen tärkeää, sillä lämpöpumpulla pitäisi aina pyrkiä mahdollisimman alhaiseen lämmön luovutuslämpötilaan. Käyntiaika pelkästään talvikaudella ei myöskään olisi ongelma, ja suunnittelussa tulisi pyrkiä siihen, ettei käynnistyksiä tule liian montaa. Maalämpöpumpun kompressorin käynnistyy yleensä 4000–16000 kertaa vuodessa riippuen käyttötuntien määrästä (Kuinka monta kertaa kompressorin käynnistyy vuosittain? N.d.). Koska lämmitystä tarvitaan vain talvikaudella, ovat käyttötunnit melko vähäisiä eikä käyntiaikojen suhteen siten ole ongelmaa.

Usein maalämpökohteissa on toinen lämmityslaite varajärjestelmänä, ja tässäkin kohteessa se olisi järkevää, mikäli maalämpöön päädyttäisiin. Mikäli maalämpöpumppua tul-taisiin avustamaan sähkökattilalla, toisi se vielä lisää kustannuksia sähkökattilan sekä sähkötöiden verran. Nykyinen sähköteho terminaalilla ei aivan riittäisi, joten eteen tulisi samanlaisia sähkötöitä kuin sähkökattilankin kohdalla. Tämä toisi alkuinvestointiin reilusti lisää hintaa. Toinen vaihtoehto olisi hankkia varajärjestelmäksi öljypoltin, mikä tulisi huomattavasti edullisemmaksi kuin sähkökattila. Tämä olisi myös terminaalin kannalta käytännöllisempi ratkaisu,

sillä siten kuljetusautoista jäljelle jäävät öljyt saisi hyödynnettyä lämmityskäyttöön. Ylimääräisiä sähkötöitä ei myöskään tarvittaisi.

Yksi alkuinvestoinniltaan maalämpöpumppua edullisempi ratkaisu voisi olla ilma-vesilämpöpumppu + sähkökattila. Ilma-vesilämpöpumppu toimii tehokkaasti noin -20 asteeseen saakka, jonka jälkeen se siirtyisi lämmittämään sähkökattilalla. Tässäkin tapauksessa sähkökattilan tilalla voisi olla varalla öljypoltin. Ratkaisu ei vaatisi porakaivoja, mutta käyttökulut olisivat hieman korkeammat kuin maalämpöpumpulla. Lähtötietoja kerätessä kävi ilmi, että -20 asteen pakkaset ovat Porin terminaalilla melko harvinaisia, minkä vuoksi tällainenkin ratkaisu voisi hyvin toimia. Myös meriveden lämpöä voisi harkita hyödynnettävän lämmitykseen, mikäli maalämpöpumpun kustannukset nousisivat liian korkealle.

6.1 Työn luotettavuuden arviointi

Esiselvitystyö oli melko aikaa vievää, ja useassa vaiheessa täytyi turvautua arvioihin, sillä todellisia lukuja ei ollut saatavilla. Työssä käytettiin arvioita esimerkiksi virtausnopeudesta sekä putkissa virtaavan vesi-glykoliseoksen lämpötilasta. Ostetun sähkön ja öljyn määrä 20 vuoden tarkasteluvälillä arvioitiin lämmityskaudella kuluneen polttoöljyn määrän perusteella, jotta eri lämmitysmuotojen kustannuksia voitiin tasapuolisesti vertailla. Myös lämmityspotkistojen pituudet on arvioitu, sillä lämmityskonttia ei ole vielä sijoitettu uuteen paikkaan, joten tarkkaa pituutta ei ole tiedossa. Edellä mainitut seikat voivat horjuttaa työn luotettavuutta ja tuoda epävarmuutta laskuihin.

Työssä käytetyt dokumentit ja piirustukset säiliöistä olivat alkaen vuodelta 1959, minkä vuoksi osassa dokumenteista oli jo vanhentunutta tietoa. Esimerkiksi lämmityspotkisto toisen säiliön sisällä oli muuttunut, ja säiliöt olivat dokumenteissa eri nimillä. Muuttuneet tiedot kerrottiin terminaalilla suullisesti, mutta tällaisetkin seikat voivat vaikuttaa työn luotettavuuteen.

Työssä noudatettiin eettisiä periaatteita ja käytettiin ainoastaan luotettavina pidettyjä lähteitä. Luotettavuus pyrittiin varmistamaan vertailemalla useiden eri lähteiden tietoja keskenään. Lisäksi lähteitä pyrittiin käyttämään laajasti ja monipuolisesti. Tietoa otettiin sekä

kotimaisista että kansainvälisistä verkkolähteistä sekä myös kirjallisuuslähteistä. Laskelmat tehtiin standardien sekä yleisesti hyväksytyjen kaavojen pohjalta, joten niiden voitiin olettaa olevan luotettavia.

Työhön luotettavuutta toi myös laskelmien vertailu valmiiseen netistä löytyvään lämpöhäviöiden laskentaohjelmaan, joka antoi samansuuruisia tuloksia kuin työssä lopputulokseksi saatiin. Lämmitystehontarvetta verrattiin aiemmin toteutetun projektin tehontarpeeseen, ja tulokset vastasivat melko hyvin toisiaan. Myös nämä seikat toivat työhön lisää luotettavuutta.

Lähteet

Asennus- ja käyttöohje. 2019. Oilon. Viitattu 1.3.2023. https://oilon.com/wp-content/uploads/2020/03/Oilon_kiinteist%C3%B6l%C3%A4mp%C3%B6pumppujen_asennus-ja_k%C3%A4ytt%C3%B6ohje_kaikki_mallit_FI.pdf

Asennus- ja käyttöohje. N.d. Gebwell. Viitattu 14.3.2023. https://gebwell.fi/app/uploads/2021/09/Qi-Asennus-kaytto-ja-huolto-ohjekirja-v4-1_2-03052020.pdf

Carbon emissions of different fuels. 2023. Forest research. Viitattu 2.5.2023. <https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/fthr/biomass-energy-resources/reference-biomass/facts-figures/carbon-emissions-of-different-fuels/>

CO₂-päästökertoimet. 2023. Verkkodokumentti. Motiva. Viitattu 2.5.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/co2-paastokertoimet

Harju, P. 2010. Lämmitystekniikan oppikirja. Kouvola.

Hirvijoki, E. 2022. Termodynamiikan ja lämmönsiirron perusteet. Aalto-yliopiston oppimateriaali. Viitattu 9.3.2023. https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1763289/course/section/204202/oppikirja_6_9_2022.pdf

Häkkinen, S. 2016. Lämmitysjärjestelmän vaihdon kannattavuus öljylämmitteisessä omakotitalossa. Opinnäytetyö. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/109444/Hakkinen_Santeri.pdf?sequence=1

Johannes Pernaa. N.d. Kehittämistutkimus tutkimusmenetelmänä. Viitattu 20.2.2023. https://tuhat.helsinki.fi/ws/files/127650174/2013_Pernaa_KT_tutkimusmenetelmana_KT_kirja.pdf

Korkala, T. 2018. Lämmitys: hoito ja huolto. Kiinteistömedia.

Kuinka monta kertaa kompressori käynnistyy vuosittain? N.d. Nibe. Viitattu 9.5.2023.
<https://www.nibe.eu/fi/fi/tuki/usein-kysytty/old-faq-items/kuinka-monta-kertaa-kompressori-kaynnistyy-vuosittain#:~:text=Yleens%C3%A4%20kompressori%20k%C3%A4ynnisty%204%20000,k%C3%A4yntituntien%20m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4%20on%20off%20maal%C3%A4mp%C3%B6pumpulle.>

Kun on aika luopua öljylämmityksestä. 2019. Nurmijärven sähkö. Viitattu 2.5.2023.
<https://www.nurmijarvensahko.fi/kun-on-aika-luopua-oljylammityksesta/>

Lampinen, M. & Kotiaho, V. 2015. Termodynamiikka ja lämmönsiirto, syksy 2015. Aalto-yliopiston oppimateriaali. Viitattu 31.3.2023. https://mycourses.aalto.fi/plu-ginfile.php/1598367/mod_resource/content/3/LAMPINEN_KOTIAHO_LAMMONSIIRTO.pdf

Lämmitysjärjestelmän valinta. 2023. Verkkodokumentti. Motiva Oyj. Viitattu 27.2.2023.
https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta

Lämpöä omasta maasta. N.d. Verkkodokumentti. Motiva. Viitattu 21.4.2023
https://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa_omasta_maasta_Maalampopumput.pdf

Maalämpö. N.d. Thermia. Thermian verkkosivut. <https://www.thermia.fi/maalampo/maalampo1/>

Maalämpöpumppu. 2022. Verkkodokumentti. Motiva Oyj. Viitattu 23.2.2023.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologia/maalampopumppu

Maalämpöpumppu. N.d. Hiilihelppi. Viitattu 2.5.2023. <https://hiilihelppi.fi/uusiutuvat-energiamuodot/maalampo/>

Mitä on kestävä kehitys? N.d. Verkkodokumentti. Ympäristöministeriö. Viitattu 27.2.2023.
<https://ym.fi/mita-on-kestava-kehitys>

NEOT Group. N.d. NEOT Groupin verkkosivut. Viitattu 22.2.2023. <https://www.neot.fi/>

Näin lämmitysjärjestelmä toimii. 2022. Verkkodokumentti. Motiva Oyj. Viitattu 27.2.2022. https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/nain_lammitysjarjestelma_toimii

Oil heating boiler. N.d. Diagram. VectorMine. Viitattu 14.3.2023. <https://vector-mine.com/item/oil-heating-boiler-for-water-heat-from-gasoline-burning-outline-diagram/>

PKS 3704:2021. Putki-, säiliö- ja laite-eristykset. Mitoitus. 31 s. https://psk-standardisointi.fi/wp-content/uploads/PSK3704_k.pdf

Suomen säädöskokoelma. 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Viitattu 13.3.2023. <https://www.ym.fi/download/noname/%7BFD99E48D-F28B-452E-8175-29EA77ABD4CA%7D/133872>

Sähkövaraajat ja -kattilat. 2022. Verkkodokumentti. Motiva. Viitattu 23.2.2023. https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/sahkovaraajat_ja_kattilat

Talvi- ja kesälaatuinen polttoöljy. N.d. Neste. Viitattu 4.5.2023. [https://www.neste.fi/oljyjen-kesalaatu-ja-talvilaatu#:~:text=Sen%20samepiste%2C%20eli%20alhaisin%20s%C3%A4ilytysl%C3%A4mp%C3%B6tila,%E2%80%948.\)](https://www.neste.fi/oljyjen-kesalaatu-ja-talvilaatu#:~:text=Sen%20samepiste%2C%20eli%20alhaisin%20s%C3%A4ilytysl%C3%A4mp%C3%B6tila,%E2%80%948.))

Termodynamiikan toinen pääsääntö ja entropia. N.d. Aalto-yliopiston luentomateriaali. Viitattu 9.3.2023. https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1296614/mod_resource/content/6/Luennot_vko5.pdf

Tietoa meistä. 2023. AFRY. AFRYn verkkosivut. Viitattu 23.2.2023. <https://afry.com/fi-fi/tieto-meista>

Turbulent Flow Verses Laminar Flow. 2021. Altair AcuSolve. Viitattu 3.4.2023. https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/acusolve/topics/acusolve/training_manual/turb_flow_vs_lam_flow_r.htm

Tutkimusmenetelmät. N.d. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 20.2.2023.

https://moodle.jamk.fi/pluginfile.php/537323/mod_resource/content/0/Tutkimusmenetelm%C3%A4t_kehitt%C3%A4mis_toiminta_case.pdf

Valtanen, E. 2019. Tekniikan taulukkirja. Mikkeli: Genesis-kirjat Oy.

Virtaustekniikka ja lämmönsiirto. N.d. Aalto-yliopiston luentomateriaali. Viitattu 29.4.2023.

https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/867361/mod_folder/content/0/Virtaustekniikka%20ja%20l%C3%A4mm%C3%B6nsiirto%20pruju%202019.pdf?forcedownload=1

What is heat transfer? 2023. Verkkodokumentti. Simscale. Viitattu 10.3.2023.

<https://www.simscale.com/docs/simwiki/heat-transfer-thermal-analysis/what-is-heat-transfer/>

Öljylämmityksen sanasto. 2023. Verkkodokumentti. St1:n verkkosivut. St1. Viitattu

28.2.2023. <https://www.st1.fi/yrityksille/tuotteet-ja-palvelut/polttonesteklinikka/turvallisuus-kuljetus-ja-varastointi-0>

Öljylämmitys. 2022. Verkkodokumentti. Motiva. Viitattu 23.2.2023. https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/oljylammitys

https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/oljylammitys