

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2025

Leevi Yliaho

Teräspohjaisen sivuvirran uudelleenkäyttö lämpöä varaavana massana

– LTO laitteen prototyypin kehitys maalausseinän
hukkalämmön talteenottoa varten.

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2025 | 55 sivua

Leevi Yliaho

Teräspohjaisen sivuvirran uudelleenkäyttö lämpöä varaavana massana

- LTO laitteen prototyypin kehitys maalausseinän hukkalämmön talteenottoa varten.

Työn tarkoituksena on pohtia jauhemaisen metallipuhalluskuonan hyötykäyttöä lämpöä varaavana massana maalausseinän hukkalämmön talteen otossa rakentamalla Turun ammattikorkeakouluun pienessä muodossa lämmöntalteenottojärjestelmä. Työn toimeksiantajana toimi Difilcon Oy. Opinnäytetyö on toteutettu suuriltaosin Turun ammattikorkeakoulun tiloissa.

Järjestelmässä käytetään samaa metallimassa, kuin mitä lopullisessa järjestelmässä käytettäisiin. Työssä koulun tiloihin kasattiin systeemi, jossa metalli varastoidaan tynnyriin, jota lämmitetään/jäähdytetään ilmalla. Tynnyri on varustettu ilmaa varten läpivienti putkilla. Ilman lämmitys toteutetaan saunan kiukaalla ja ilmaa kierrätetään systeemissä kanavapuhaltimen avulla.

Lämmitystä rajoittavat tekijät olivat lähinnä puhaltimen- ja tiivistemassan lämmönkestävyys. Testeissä saatuja tuloksia skaalattiin 600 °C lämpötilaan asti. Kokeiden perusteella todetaan, että oikein suunniteltu järjestelmä voisi olla toimiva.

Asiasanat:

lämpöoppi, lämmön talteenotto, lämpeneminen, lämmön siirtyminen

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and environmental engineering

2025 | 55 pages

Leevi Yliaho

Reuse of steel-based side flow as a heat-storing mass

- Development of an HVR device prototype for the recovery of paint oven waste heat.

The purpose of the study was to consider the utilization of powdered metal blasting slag as a heat-storing mass in the recovery of waste heat from a painting furnace by building a small-scale heat recovery system at Turku University of Applied Sciences. The work was commissioned by Difilcon Oy. The thesis was carried out largely on the premises of Turku University of Applied Sciences.

The system used the same metal mass as would be used in the real system. In the study, a system where the metal is stored in a barrel was assembled at the school premises, and then heated/cooled with air. The barrel is equipped with pipes where air travels through the barrel. The air is heated by a sauna heater, and the air is circulated in the system using a duct fan. The factors limiting heating were found to be mainly the heat resistance of the fan and sealing compound. The results obtained in the tests were scaled up to a temperature of 600 °C. Based on the experiments, a properly designed system is likely possible.

Keywords:

thermodynamics, heat recovery, warming, heat transfer

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1. Johdanto	8
1.1 Toimeksiantaja	9
1.2 Lähtökohdat	10
1.3 Projektin tarkoitus	10
1.4 Toteutus	11
2. LTO-laitteen suunnitelma ja mittausmenetelmät.	12
2.1 Turku AMK:n tiloissa sijaitsevan testipenkin esittely.	12
2.1.1 LTO-järjestelmän osat.	13
2.1.2 Toimintaperiaate	14
2.1.3 Mittaustavat ja datankeruu	16
2.2 Kiukaan kytkentä ja ohjaus.	17
3. Järjestelmän alustava mallintaminen laskennallisesti.	19
3.1 Metallimassa ja sen ominaisuudet.	19
3.1.1 Massan tutkiminen koulun rakennustekniikan laboratoriossa.	20
3.2 Alustavat laskelmat ennen kokeita	23
3.2.1 Virtausnopeus järjestelmässä ja painehäviölaskenta.	23
3.2.2 Laskennallinen lämmitysteho tynnyrissä	27
3.3 Järjestelmän lämmitys mallintamisen avulla	31
4. Laboratorion kasausvaihe.	32
5. Testitulokset	34
5.1 Lämmitys	34
5.1.1 Lämmitysteho	34
5.1.2 Tynnyrin lämpötilan nousu	37
5.2 Jäähdytys	39
5.2.1 Jäähdytysteho	39
5.2.2 Tynnyrin lämpötilan lasku	41

5.3 Tynnyrin lämmitys- ja jäähdytysyksi sekä järjestelmään syötetty- ja ulos saatu energia	42
5.3.1 Lämmitys- ja jäähdytysyksi	42
5.3.2 Tynnyriin syötetty- ja ulos saatu energia	43
5.3.3 Lämpöhukka	44
6. Tynnyrin skaalaus suuremmalle lämpötila alueelle	46
6.1 Tynnyriin mennyt energia ja sieltä ulos saatu energia eri lämpötiloilla ja täyttömäärillä.	51
7. Loppupäätelmät	52
Lähteet	54

Kuvat

<i>Kuva 1.</i> LTO-järjestelmän toimintaperiaate.	14
<i>Kuva 2.</i> Tynnyrin poikkileikkaus.	16
<i>Kuva 3.</i> Harvia C170VKK ohjauskeskus (Harvia n.d).	17
<i>Kuva 4.</i> Harvia C170VKK kytkentäkaavio, jossa kuvattu tarvittavat kytkennät kiukaan liittämiseksi ohjauskeskukseen ja siitä virran syöttöön (Harvia n.d).	18
<i>Kuva 5.</i> Kuvassa kaikki koululle toimitettu hienojakoinen metallimassa.	19
<i>Kuva 6.</i> Seula ja sen sisällä oleva näyte seulalle tarkoitetussa sekoittajassa.	20
<i>Kuva 7.</i> Näytteen läpäisy seulan lävitse graafisessa muodossa.	21
<i>Kuva 8.</i> Seulasarjan eri aukkoille jääneet metalli partikkelit seulasarjaan kaadetusta näytteestä.	22
<i>Kuva 9.</i> Järjestelmän vastuskäyrä.	26
<i>Kuva 10.</i> Kanavapuhaltimen laitoskäyrä, josta ilmenee puhaltimen toiminta eri jännitetasoilla LTO-järjestelmässä.	27
<i>Kuva 11.</i> Metallimassan lämpeneminen 80 °C lämpötilaan ilman virtausnopeuden kasvaessa.	29

<i>Kuva 12.</i> Metallimassan lämpeneminen esitetty, kuin kuviossa 3, mutta tässä tapauksessa ilman eri lämpötiloilla ja ilman nopeuden ollessa jatkuvasti 1,6 m/s.	30
<i>Kuva 13.</i> Tynnyrin lämpeneminen tyhjän tilan ollessa 70 % metallijauheen säilytystilasta. (Jun Ting 2025,56–57.)	31
<i>Kuva 14.</i> Valmis LTO järjestelmä.	32
<i>Kuva 15.</i> 16 tunnin lämmityksien tehot ja näiden keskiteho ajansuhteen kuvattuna.	35
<i>Kuva 16.</i> 16 tunnin lämmityksien keskitehot laskettuna entalpian- ja lämpötilan muutoksen mukaan.	36
<i>Kuva 17.</i> Tynnyrin lämpeneminen ajansuhteen lämmityksen aikana.	37
<i>Kuva 18.</i> Tynnyrin jäähtymisen keskijäähtytys tehot ajan suhteen suljetulla kierrolla.	39
<i>Kuva 19.</i> Tynnyrin jäähtymisen keskijäähtytys tehot ajan suhteen avoimella kierrolla.	40
<i>Kuva 20.</i> Tynnyrin lämpötilan lasku suljetulla ja avoimella kierrolla.	41
<i>Kuva 21.</i> Tynnyrin lämmitys- ja jäähtytys sykli ajansuhteen.	42
<i>Kuva 22.</i> Tynnyriin syötetty- ja ulos saatu energia.	43
<i>Kuva 23.</i> Lämpötasapaino yhtälöllä skaalattu tynnyri 90,2 litran täytöllä.	49

Taulukot

Taulukko 1. Testien 1–3 hukcatehot ja hukkaenergiat	44
Taulukko 2. Tynnyri skaalattuna eri metallimassoille ja lämpötiloille.	50
Taulukko 3. Taulukossa kuvattuna tynnyriin syötetty energia ja tynnyristä saatava energia ulos.	51

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

LTO	Lämmöntalteenotto
HRV	Heat recovery ventilation
Q	Lämmitysteho
\dot{m}	Massavirta
Cp	Ominaislämpökapasiteetti
Te	Lämpötila ennen vaihdinta
Tj	Lämpötila vaihtimen jälkeen
λ	Kitkavastuskerroin
Nu	Nusseltin numero
Re	Reynoldsin luku
Pr	Prantleyn luku
He	Ilman entalpia ennen tynnyriä
Hj	Ilman entalpia tynnyrin jälkeen
h	Lämmönsiirtokerroin
ε	Emissiivisyys
σ	Stefanin–Boltzmannin vakio

1. Johdanto

Energiatekniikka on ollut jo pitkään kovassa kehitystahdissa. Rakennuksien energiatehokkuutta pyritään jatkuvasti parantamaan varsinkin pohjois-Euroopassa. Hyvillä energiaratkaisuilla voidaan saada aikaan huomattaviakin säästöjä. Tässä työssä on tarkoituksena perehtyä lämmöntalteenottoon (LTO). Lämmöntalteenotossa tarkoitetaan hukkaan menevän lämpöenergian hyödyntämistä uusiokäyttöön. Yleinen lämmöntalteenoton kohde varsinkin Suomessa on rakennuksien poistoilman lämmöntalteenotto. Poistoilman lämpö siirretään tuloilmaan, jolloin voidaan saada mittavia säästöjä lämmityskuluissa. Tässä työssä Kankaanpäässä sijaitsevassa tuotantolaitoksessa on maalausuni, josta lämpö on tarkoitus ottaa talteen ja siirtää takaisin uuniin. Näin voidaan säästää uunin lämmityskustannuksissa kierrättämällä sen tuottamaa lämpöä uudestaan. Maalausunun yhteyteen olisi tarkoitus luoda LTO-systeemi, jolla lämpö on tarkoitus ottaa talteen. LTO-laitteesta on tarkoitus tehdä prototyyppi. Toimeksianto on tarkoitus toteuttaa Turun ammattikorkeakoulun tiloissa. Koulun on tarkoitus rakentaa laboratorio, jonne kyseinen prototyyppi rakennetaan. Prototyyppi rakennetaan miniatyyri koossa ja tämän jälkeen se on tarkoitus skaalata lopulliseen kokoonsa. Työn rahoittaa puoliksi Turun kaupungin vuonna 2023 käyttöön ottama TKI-palvelu (tutkimus-, kehitys- ja innovaatio osaaminen) ja lopun puolikkaan projektista rahoittaa Turun ammattikorkeakoulu ja Difilcon Oy. Toimeksiantaja toimii siis asiakkaana koululle. Työn tarkoituksena on myös toimeksiantajan kautta mahdollisesti perustaa uusi yritys opinnäytetyön valmistuttua. Laboratorion rakennusvaihe on vielä tässä vaiheessa vasta aluillaan.

Kyseiselle yritykselle, jolle työ tehdään, on käytössään ylimääräistä metallimassaa. LTO-laitteessa on tarkoituksena käyttää kyseistä metallimassaa. Uunista olevasta kuumasta ilmasta saatava lämpö on tarkoituksena siirtää metallimassaan. Lämmennyttä metallia voidaan tämän jälkeen käyttää hyödyksi yrityksen tilojen lämmittämiseen. Näin uuniin käytetty energia voidaan kierrättää osittain tilojen lämmitykseen, näin säästäen lämmityskustannuksissa.

Suurimman hyödyn tästä oletettavasti saa talven kylmimmiltä ajanjaksoilta. Lämmöntalteenotossa olennaisia ovat lämpötilaerot. Mitä suurempi on lämpötilaero lämmönsiirtimessä, sitä suurempi on lämmönsiirtimessä tapahtuva lämmönsiirto teho. Lämpö siirtyy aina lämpimämmästä kylmempään. Tässä tilanteessa kuumasta metallimassasta lämpö siirtyy kylmään ulkoilmaan näin lämmittäen sisälle saapuvaa ilmaa. LTO-laitteen arvioitua lämmitystehoa on vaikea määrittää, sillä lämmönsiirtoon vaikuttavat olennaisesti lämmön siirtimen pinta-ala ja lämpötila. Näin ollen paras tapa on luoda LTO-laitteesta prototyyppi koulun tiloissa. LTO-laitteen tehokkuutta voidaan mitata tehokkaasti mittaamalla siihen syötetyn ilman ja siitä poistuneen ilman lämpötilaeroa. Alhaalla kaava, jota voi soveltaa kyseiseen tilanteeseen.

Ilman lämmittämiseen vaadittu teho voidaan laskea esimerkiksi ympäristöministeriön rakennuksen energiankulutuksen ja lämmöntehtotarpeen (2018,67) ohjeistuksen mukaisesti.

$$Q = \dot{m} \times C_p \times (T_e - T_j) \quad (1)$$

Jossa:

Q =Lämmitysteho

\dot{m} =massavirta

C_p =Ominaislämpökapasiteetti

T_e =Lämpötila ennen lämmönvaihdinta

T_j =Lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen

Samaa kaavaa voidaan hyödyntää molemmissa tilanteissa, eli tilanteessa kun metallimassaa lämmitetään kuumalla ilmalla ja tilanteessa, jossa kylmä ulkoilma puhalletaan lämmönvaihtimen läpi.

1.1 Toimeksiantaja

Hankeeseen osallistuu 2 yritystä. Difilcon Oy ja Pöytyän Koneistuspalvelu. Projekti käynnistetään aluksi Difilcon Oy:n kanssa, mutta jos prototyypistä saadaan hyviä tutkimustuloksia, niin tarkoituksena olisi perustaa uusi yritys.

Kyseinen hanke on uusi avaus Turun ammattikorkeakoulun ja Difilcon Oy:n välillä.

1.2 Lähtökohdat

Projektissa hyödynnetään Teknologiaakampus Turun vuonna 2023 käynnistämää TKI (tutkimus-, kehitys ja innovaatio-osaaminen) palvelua. Kyseisen palvelun keskeinen tavoite on lisätä Åbo Akademin, Turun ammattikorkeakoulun, Turun yliopiston ja Yrkeshögskolan Novian osaamisen hyödyntämistä. TKI toimii kanavana yrityksille, jotka ovat kiinnostuneita korkeakoulujen kanssa yhteistyöstä. Palvelun rahoittaa Turun kaupunki. Palvelun kautta voi hakea TKI-seteliä, joka on taloudellinen tuki, jonka tarkoituksena on tukea yhteistyötä korkeakoulujen kanssa. Seteli on tarkoitettu käytettäväksi esimerkiksi tutkimushankkeisiin ja opinnäytetöihin, kuten tässä tapauksessa. Setelien hakua ja välitystä operoi Business Turku Oy. Lopullinen myöntäjä setelille on Turun kaupunki.

1.3 Projektin tarkoitus

Perimmäinen tarkoitus on luoda metallimassalle LTO-laite, jolla uunin lämpöä voidaan ottaa talteen. Kyseinen laite tulisi sijoittaa Kankaanpään tuotantolaitokselle, kun toimiva prototyyppi on saatu valmiiksi. Tuotantolaitokselle tehdään alustavasti ennakkokäynti, jossa suunnitellaan LTO-laitteen sijoitus kohde ja kuinka iso kyseisestä laitteesta voidaan tehdä. Ensimmäisenä on tarkoitus tehdä Turun ammattikorkeakoulun tiloissa demoversio laitteesta ja tämän jälkeen tehtyjen mittausten perusteella järjestelmää kehitetään edelleen, jolloin saataisiin ensimmäinen prototyyppi. Demoversio ja prototyyppi luodaan yksinkertaisella rakennelmalla, jossa tynnyrin läpi puhalletaan ilmaa. Tynnyri on täytetty kyseisellä metallimassalla.

1.4 Toteutus

Projekti toteutetaan Turun ammattikorkeakoulussa tutkimusryhmä NERC:in (New Energy Research Center) labrassa Educityssä. Projekti kuuluu suurempaan Ullevi projektiin, minkä tarkoituksena on antaa tietoa eri materiaalien kyvystä varastoida energiaa myöhempää käyttöä varten. Projektissa eri tutkimusorganisaatiot, sekä yritykset pystyvät kehittämään osaamistaan ja näin uutta osaamista voidaan hyödyntää opetuksessa opiskelijoille. (ULLEVI – Uutta liiketoimintaa lämpöenergian varastoinnista 2023.)

2. LTO-laitteen suunnitelma ja mittausmenetelmät.

LTO-laite rakennetaan Turun ammattikorkeakoulun tiloihin. Järjestelmästä pyritään rakentamaan melko yksinkertainen, jolloin mittaustuloksien saaminen on helpompaa ja laboratorion rakennusvaihe ei kestäisi kohtuuttoman kauan. Demoversion jälkeen saatujen mittauksien avulla voidaan systeemiä parantaa lämmönsiirto-ominaisuuksien kannalta, jolloin tehdään mahdollisesti uusi versio. Laboratorion rakentamisessa on isossa osassa, mukana Pöytyän koneistuspalvelu/Difilcon, jonka tehtävänä on valmistaa lämmönsiirto tynnyri tekemäni 2D piirroksen perusteella. Itse LTO-tynnyri tullaan rakentamaan Pöytyän Koneistuspalvelun tiloissa ja tämän jälkeen valmis tynnyri toimitetaan koululle.

Laboratoriossa tarvittavat komponentit ovat melko hyvin saatavilla, sillä jo pelkästään koulun tiloista saa hyvin jo esimerkiksi IV-kanavia. Joitain komponentteja pitää kuitenkin erikseen kaupasta hakea, mikä luo projektiin lisäkustannuksia. Kuitenkin kaupasta haettavien komponenttien kustannukset pysyvät melko maltillisina järjestelmän yksinkertaisuuden vuoksi.

Laboratorion sijoituskohde on Turun AMK:n Educityn parkkihallissa. Tämä on hyvä kohde laboratoriolle, sillä hallin lattia on betonia, missä on hyvät ominaisuudet lämmönkestävyyden kannalta. LTO-laitteen tynnyri sekä muut komponentit saattavat lämmitä melko paljon kokeiden aikana, jolloin ympäristön pitää myös olla lämmönkestävää. Tynnyri kuitenkin eristetään päältäpäin, jolloin sen käsittely on turvallisempaa ja lämpö myös pysyy tynnyrissä paremmin eristeen eristävien ominaisuuksien ansiosta.

2.1 Turku AMK:n tiloissa sijaitsevan testipenkin esittely.

Tässä osiossa esitellään laboratorion komponentit ja koko systeemin toiminta. Ensimmäisessä vaiheessa laboratorion luodaan 2D piirros. Piirroksessa on tarkasti kuvattu koko järjestelmä ja sen osat. Järjestelmä on tarkoitettu rakentaa näiden piirustuksien pohjalta. Piirustukset tehdään Autocad ohjelmaa käyttäen.

LTO-laitteesta on tarkoitus tehdä mahdollisesti kaksi versiota ja molemmista tehdään erikseen piirustukset, jonka pohjalta ne tehdään. Molemmissa versioissa on lämpötila-anturit ja virtausanturit. Näiden antureiden tuottamasta datasta luodaan helposti luettava graafi, josta voidaan analysoida järjestelmän toimintaa ja sen tehokkuutta. Datan keruu ohjelmisto on erikseen luotu tätä tarkoitusta varten.

2.1.1 LTO-järjestelmän osat.

Educityn kellarikerrokseen rakennettava testilabra koostuu tiivistetysti iv-putkista, puhaltimesta ja tynnyristä, jotka muodostavat yhteisen kokonaisuuden.

Iv-putket sopivat hyvin, sillä ne on tarkoitettu ilman siirtämiseen ja näin pienentää niistä syntyvää painehäviötä. Putkia on myös hyvin koulun varastossa saatavilla, tässä tapauksessa 100 mm halkaisijan putkikoolla.

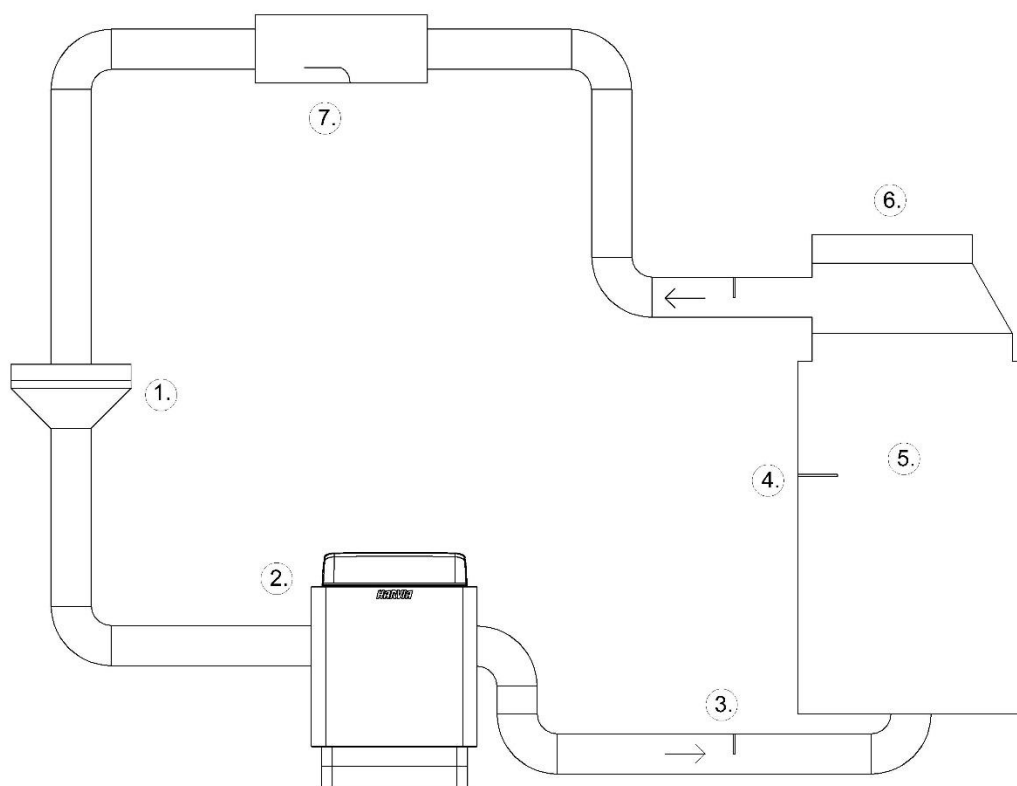
Puhallin on sijoitettu tynnyrin ulkopuolelle kierrättäen ilmaa tynnyrissä. Puhallin on asennettuna sähkökaapin läheisyyteen. Puhaltimen ympärillä olevissa IV-kanavissa on valmiina lämpötila-anturi ja virtausanturi. Sähkökaapissa on pyörät alla, mikä tekee siitä helposti liikuteltavan näin helpottaen systeemin asentamista paikoilleen. Sähkökaappi sisältää järjestelmän virransyötön sulakkeineen, sekä LTO-järjestelmää ohjaavan ohjauspaneelin.

Tynnyri on kooltaan 200 litran metallitynnyri, johon itse lämmitettävän metallimassan on tarkoitus tulla. Tynnyrin kylkeen sijoitetaan Harvian valmistama kiuas, mikä toimii ilman lämmittimenä ennen sen siirtymistä tynnyrin lämmönsiirto putkistoihin. Kiukaan omaa termostaattia tullaan projektissa hyödyntämään, sillä ilman lämpötila ei saa mielellään nousta yli 80°C lämpötilan. Tätä suuremmat lämpötilat voivat aiheuttaa koulun tiloissa riskin sprinkleri järjestelmän laukeamiseen sekä tulipaloriskin, sekä aiheuttaa vahinkoa kiukaan vastuksille, jos kiukaassa ei käytetä kiviä. Lopullinen tuote on tarkoitus skaalata ylöspäin niin, että se soveltuu maalausunin LTO-laitteeksi. Tynnyrin pohjaan tullaan myös sijoittamaan ilman tulokanava, josta ilmaa puhalletaan tynnyrin lämmönsiirto putkistolle, missä ilma sitten jäähtyy

luovuttaen lämpöä metallimassalle. Tynnyriin saapuva ilma ohjataan tynnyrin yläpäähän, jonka jälkeen ilma menee putkia pitkin takaisin tynnyrin pohjalle. Pohjalta ilma jatkaa matkaa taas ylöspäin kohti tynnyrin kantta, josta se sitten poistuu tynnyristä. Näin saadaan pidempi kosketusaika lämmönsiirtoputkiston ja ilman välillä, tehostaen lämmönsiirtymistä. Putkien väliin sijoitetaan itse metallimassa, eli putkien tarkoituksena on siirtää vastuksien tuottama lämpö metallimassaan. Tynnyrin kanteen tulee reikä, mistä ilma poistuu tynnyristä. Tarkoituksena olisi sijoittaa tynnyrin kanteen 500 mm/ 400 mm lv-muuntoliitin, missä 500 mm pää olisi kiinni tynnyrin kannessa. Liittimen kylkeen kiinnitetään 100 mm iv-putki, mikä sitten palautuu puhaltimelle ja kierros alkaa alusta.

2.1.2 Toimintaperiaate

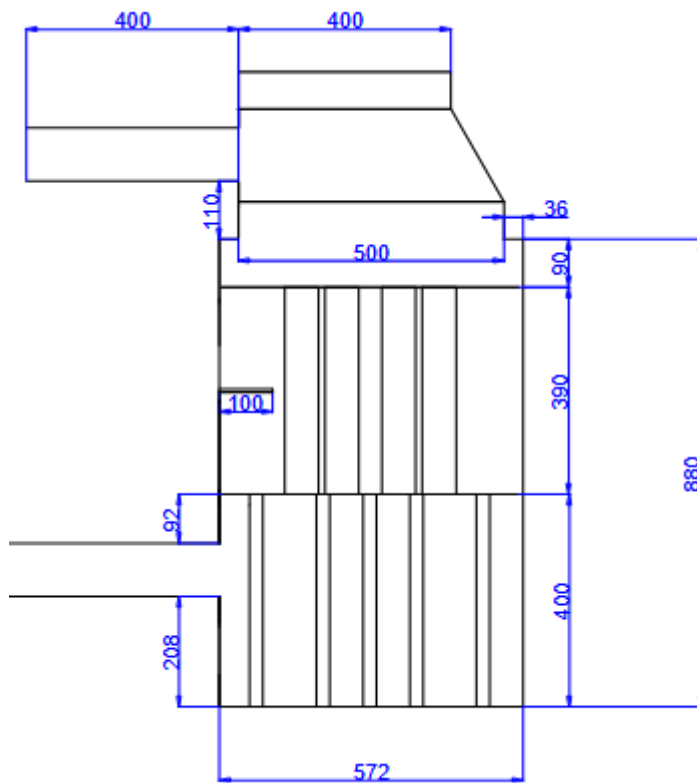
Kyseisessä järjestelmässä on suljettu ilmakierto. Alhaalla systeemiä kuvaava karkea kuva, mikä havainnollistaa sen toimintatapaa.



Kuva 1. LTO-järjestelmän toimintaperiaate.

Jossa

1. Puhallin, joka on sijoitettu liikuteltavaan sähkökaappiin/PLC-järjestelmään. Sähkökaapissa olevassa puhallinputkessa on valmiiksi asennettuna virtausanturi ja lämpötila-anturi. Näitä käytetään järjestelmän mittauksissa hyödyksi.
2. Kiuas. Kiukaassa ei ole kiuaskiviä ilmavirtauksen helpottamiseksi. Kiukaan kyljissä on reiät, jotka toimivat ilman sisään- ja ulostulona. Reikiin tulee istukat putkille, jolloin putket saadaan tiiviisti kiukaaseen kiinni. Kiuas peitetään ylhäältä peltilevyllä, jolloin ilma ei pääse karkuun kiukaan kautta.
3. 50 mm pitkä PT-100 lämpötila-anturit, jolla mitataan ilman sisääntulo- ja ulostulolämpötilaa tynnyrissä. Näin saadaan laskettua, millä lämmitysteholla kuuma ilma siirtää lämpöä tynnyriin.
4. 100 mm pitkä PT-100 lämpötila—anturi. Anturi mittaa tynnyrissä sijaitsevan metallimassan lämpötilaa, kun massaa lämmitetään tai jäähdytetään. Anturia on pidennetty, jotta saataisiin tarkempia lukemia massan lämpötilasta.
5. Tynnyri, joka sisältää lämmönsiirtoputkiston ja lämmitettävän metallimassan.
6. Iv-muuntoliitin, jolla on tarkoitus ohjata ilmavirta takaisin 100 mm putkeen ja siitä edelleen puhaltimelle.
7. Kotelo, jonne sijoitetaan lämpötila-anturi. Lämpötila on tarkoitus pitää 80°C lämmössä.



Kuva 2. Tynnyrin poikkileikkaus.

Kuvassa 2 poikkileikkaus tynnyrin toimintaperiaatteesta. Tynnyrin pohja ja kansi ovat onttoja, joiden kautta ilma siirtyy/poistuu tynnyristä. Tynnyrin keskellä sijaitsevat läpivienti putkistot, joiden väliin metallimassa on tarkoitus sijoittaa. Läpivientiputkia on piirustuksessa yhteensä 8. Poikkileikkauksessa ilmenee myös lämpötila anturin sijoituspaikka tynnyrin kyljessä.

2.1.3 Mittaustavat ja datankeruu

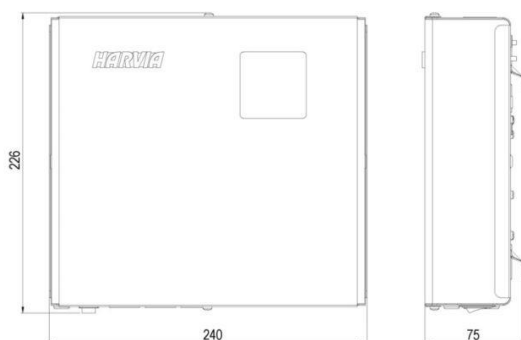
Järjestelmässä kiertävän ilman lämpötilaa mitataan kahdella lämpötila-anturilla mitkä on sijoitettu ennen ja jälkeen tynnyriä. Puhaltimen yhteydessä on virtausanturi. Tynnyrin kyljessä on lämpötila-anturi, jolla saadaan metallimassan lämpötila.

Jäähdytettäessä tynnyriä, sen ympärille tulee letku, jossa kiertää vesiglykoli seos. Veden lämpötilaa mitataan niin, että ennen tynnyriä on lämpöanturi ja

tynnyrin jälkeen on lämpöanturi. Veden tilavuusvirta saadaan vesikiertoon asennetusta virtausanturista.

2.2 Kiukaan kytkentä ja ohjaus.

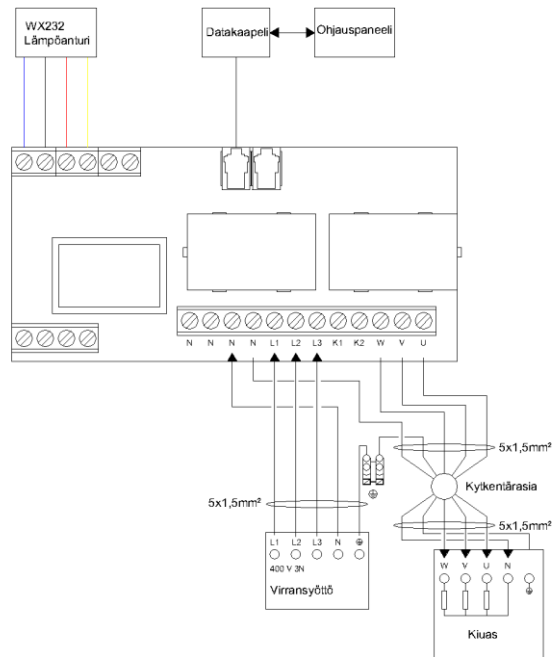
Järjestelmässä toimivan kiukaan oma ohjaus on tarkoitus ohittaa ja käyttää sen sijaan erillistä Harvian valmistamaa C170VKK mallista ohjauskeskusta. Ohjauskeskuksen mukana toimitetaan lämpötila-anturi, joka sijoitetaan järjestelmässä LTO-tynnyrin ilman ulostulon jälkeiseen T-haaraan. T-haaraan asennetaan päätykappale, jonne sijoitetaan ruuvit kannattelemaan anturia sekä porataan reikä anturin johtoa varten. Lämpötila-anturi on suoraan liitetty ohjauskeskukseen ja ohjauskeskus on liitetty kiukaaseen. Järjestelmä säädetään niin, että lämpötila pysyy lämpötila-anturin kohdalla noin 80°C lämpötilassa. Ohjauskeskus sisältää sisäänrakennetun näytön, jolla järjestelmän lämpötilaa voidaan ohjata. (Harvia n.d.)



Kuva 3. Harvia C170VKK ohjauskeskus (Harvia n.d.).

Kiuas kytketään 3-vaiheiseen tähtikytkentään. Lämpötila-anturin malli on WX232. Kiukaan kytkennässä käytetään 5x1,5mm² kaapelia.

Harvia C170VKK
ohjauskeskus



Kuva 4. Harvia C170VKK kytkentäkaavio, jossa kuvattu tarvittavat kytkennät kiukaan liittämiseksi ohjauskeskukseen ja siitä virran syöttöön (Harvia n.d).

3. Järjestelmän alustava mallintaminen laskennallisesti.

3.1 Metallimassa ja sen ominaisuudet.

Tynnyriin toimitettu metallimassa on hienoa purua. Massaa on yhteensä noin 144 litraa. Otin massasta pienen näytteen ja määritin sille alustavasti tiheyden laittamalla massaa mitta-astiaan, jossa on vettä. Massan painoksi sain 294 g samalla syrjäyttäen noin 97 ml vettä.

Näin saadaan tiheydeksi.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0,294 \text{ kg}}{0,097 \text{ dm}^3} = 3,04 \text{ kg/dm}^3 = 3040 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

Massan tiheys on siis huomattavasti pienempi kuin kiinteän raudan tiheys, mikä on noin 7850 kg/m³.

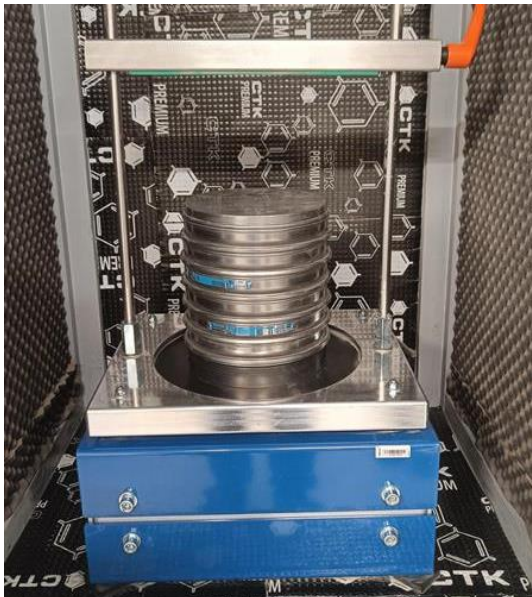


Kuva 5. Kuvassa kaikki koululle toimitettu hienojakoinen metallimassa.

3.1.1 Massan tutkiminen koulun rakennustekniikan laboratoriossa.

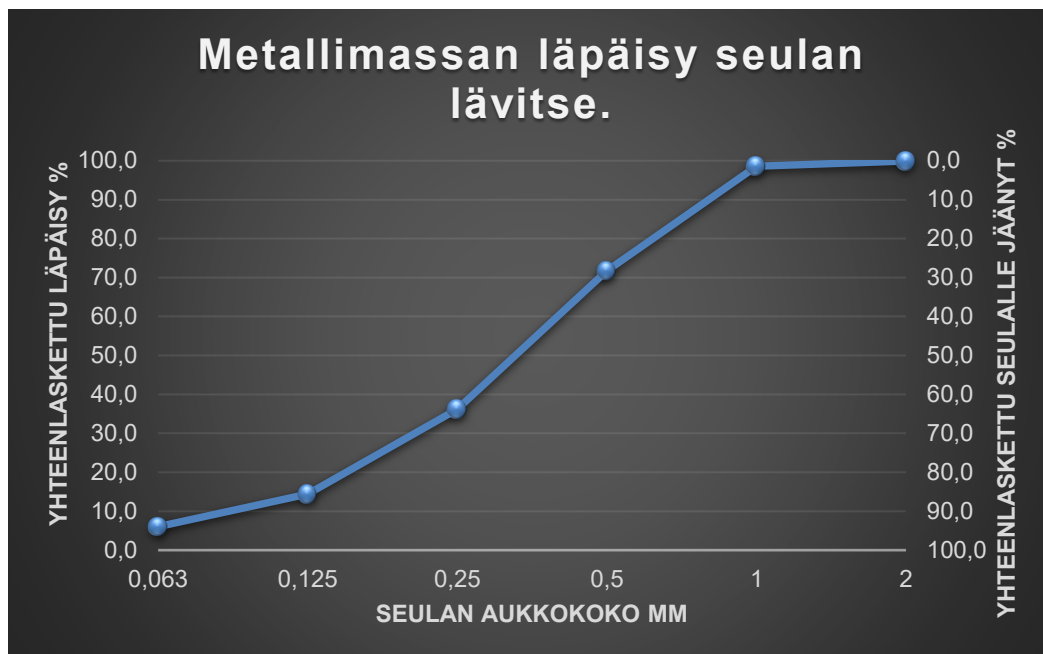
Koulussa sijaitsevassa rakennustekniikan laboratoriossa metallimassalle suoritettiin massan seulonta sen partikkelikoon jakaantumisen havainnoimiseksi. Jotta seulonnan tuloksesta tulisi mahdollisimman tarkka, on seulottavan näytteen oltava mahdollisimman kuivaa. Yleensä seulonta tutkimuksen kohdetta kuivatetaan uunissa ennen, kuin seulonta voidaan aloittaa, mutta tässä tapauksessa seulottava metallimassa oli todella kuivaa ja herkästi pölyävää, joten massaa ei tässä seulonnassa kuivatettu uunissa lainkaan vaan seulonta aloitettiin välittömästi. Seulonnassa käytettiin vanhempaa ja huonokuntoisempaa seulaa, sillä riskinä oli, että seulottava metalli saattaisi vahingoittaa seulaa.

Seulonta aloitettiin punnitsemalla seulottavan näytteen kokonaispaino, jonka jälkeen näyte kaadettiin seulaan, niin että seulan aukkokoko pienenee pohjaan päin. Seulan päälle laitettiin tämän jälkeen kansi, jolloin seula asetetaan sekoittajaan, millä saadaan näyte menemään tasaisesti seulojen lävitse.



Kuva 6. Seula ja sen sisällä oleva näyte seulalle tarkoitetussa sekoittajassa.

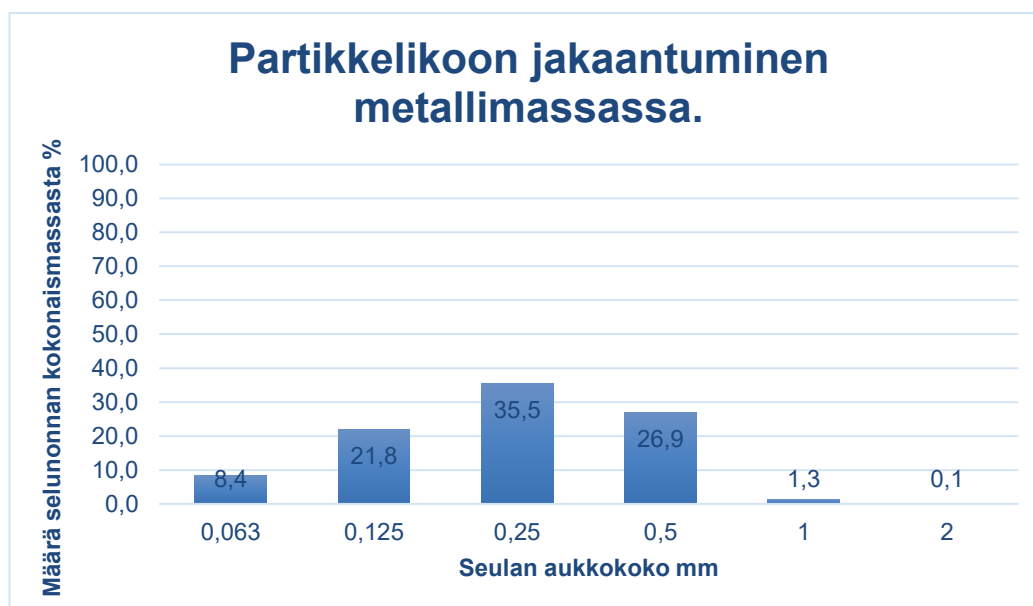
Seulaa pidettiin sekoittajassa viisi minuuttia, jonka jälkeen jokaiselle seulalle jäänyt metallimassa punnittiin. Näin saadaan määritettyä partikkelikoon jakautuminen näytteestä.



Kuva 7. Näytteen läpäisy seulan lävitse graafisessa muodossa.

Yllä oleva graafi kertoo y-akselilla, kuinka paljon testinäytteen massasta on mennyt prosentuaalisesti läpi seulakokoa kohden, jotka näkyvät x-akselilla. Y-akseli taas kertoo, kuinka paljon testinäytteen massaa on jäänyt yhteensä prosentuaalisesti koko seulasarjalle, kun tarkastellaan tiettyä seulan aukkokoko x-akselilta. Graafista voidaan havaita, että osa seulottavasta testinäytteestä meni koko seulasarjan lävitse mikä tarkoittaa, että tämä 0,063 mm aukkokoon lävitse menneen näytteen partikkelikoko on tätäkin pienempi. Testinäytteen massasta partikkelikooltaan pienempiä, kuin 0,063 mm on kokeen perusteella 6 %. 2 mm aukkokoko oli seulasarjan suurin aukkokoko, jonka päälle jäi muutamia suurempia partikkeleita. Näiden suurempien kuin 2 mm partikkeleiden osuus testinäytteen kokonaismassasta oli kokeen perusteella 0,1 %. Partikkelit olivat painoltaan seulassa vain 0,4 g eikä pienen tarkastelun jälkeen vaikuttanut metallilta, vaan partikkelit vaikuttivat pikemminkin olevan

puista materiaalia ulkonäkönsä ja myös sen takia, että partikkeleiden koko oli melko suuri suhteessa niiden painoon.



Kuva 8. Seulasarjan eri aukkoille jääneet metalli partikkelit seulasarjaan kaadetusta näytteestä.

Seulasarjaan kaadetun näytteen perusteella yllä oleva graafi kertoo jokaiselle eri seulan aukkokoolle jääneen massan osuuden näytteen kokonaismassasta prosentuaalisena. Testien perusteella näyte koostuu pääosin partikkeleista, joiden partikkelikoko on suurempi kuin 0,25 mm mutta pienempi kuin 0,5 mm. Tämän osuus koko testinäytteen massasta on 35,5 %. Kokeessa käytetyn testinäytteen massa oli punnituksen perusteella 502,2 g. Tästä massasta oli 84,2 % partikkelikooltaan suurempia kuin 0,124 mm ja pienempiä kuin 1 mm. Seulasarjassa seulan aukkokoolle 1 mm ja 2 mm jääneiden partikkelien osuus näytteen kokonaismassasta oli yhteensä 1,4 %. Nämä olivat yksittäisiä sattumia testinäytteessä, jotka erottuivat huomattavan hyvin näytteen joukosta. Näytteessä oli myös todella hienoa jauhetta mikä oli partikkelikooltaan pienempää, kuin 0,063 mm. Tämän osuuden paino oli vaa'an perusteella 30,2 g. Tämä antaa prosentuaaliseksi osuudeksi testinäytteen painosta noin 6 %. Koko seulasarjan lävitse menneen ja sen pohjalla olevan näytteen kokonaispanoksi punnittiin vaa'alla yhteensä painoksi 500,2 g. Alkuperäisen

painon ollessa vaa'alla ennen seulontaa 502,2 g, havaitaan, että seulasarjaan on jäänyt noin 2 g näytteestä. Tämä tuo hieman virhemarginaalia tulokseen.

Massa soveltuu seulonnan perusteella käytettäväksi LTO-laitteessa sen hienojakoisuuden ansiosta. Tämä tekee massasta helpon sijoittaa LTO järjestelmään.

Seulonta on suoritettu SFS-EN 933-1 standardin mukaan. Standardi on tehty kiviaineksille, mutta soveltuu tässä tapauksessa metallijauheen kuivaseulontaan. Testinäytteen alku- ja loppupainon eron ollessa tässä kyseisessä seulonnassa alle 1 %, voidaan pitää tuloksia standardin mukaan pätevinä. (SFS-EN 933-1. 2013, 7–8, 15.)

3.2 Alustavat laskelmat ennen kokeita

Järjestelmän lämmönsiirto ominaisuudet on hyvä mallintaa laskennallisesti ennen varsinaisten mittauksien aloittamista. Laskelmat on tehty Exceliä hyödyntäen. Laskelmat on tehty kuvan 1 LTO-järjestelmän toimintaperiaatteen pohjalta. Näiden laskujen pohjalta järjestelmästä voidaan saada suuntaa antava käsitys tynnyrin lämmönsiirto ominaisuuksista ennen varsinaisten testien aloitusta. Alustavien laskelmien pohjalta voidaan saada alustavia aikoja tynnyrin lämpenemisnopeudesta ja puhaltimen toiminnasta järjestelmässä.

3.2.1 Virtausnopeus järjestelmässä ja painehäviölaskenta.

Ensimmäiseksi on selvitettävä, että mikä voisi olla realistinen ilmavirran nopeus järjestelmän iv-putkissa ja tynnyrin sisällä. Ilman nopeudella on oleellinen merkitys painehäviön synnyn kannalta. Painehäviön laskennassa on otettu huomioon putkien karheus. Putkien karheuteen vaikuttaa putken materiaali. Mitä sileämpää putkimateriaali on, sitä pienempi on karheus. Näissä laskelmissa on käytetty sekä iv-putkille että tynnyrin putkille samaa karheutta

mikä on tässä tilanteessa 0,15 mm (Pukkila 1986, 22.) Karheuden ohella on myös tiedettävä putkien sisähalkaisijat sekä tietyllä ilman nopeudella laskettu Reynoldsin luku putkessa. Reynoldsin luku kuvaa ilmavirran turbulentsuutta putkessa, millä on myös suuri vaikutus lämmönsiirron kannalta. (LaNasa & Loy Upp 2014.)

Olellista painehäviönlaskennassa on myös järjestelmässä olevien iv-kanavien ja tynnyrissä sijaitsevien putkien pituus, sillä putkien ja kanavien pituus kasvattaa painehäviötä luoden vastusta ilmavirtaukselle. Kuvan 1 pohjalta tynnyrin ulkona kiertävän iv-putkiston pituudeksi sain 2,33 metriä. Tynnyrin sisällä menee 8 kpl lämmönsiirtoputkea. Yksi putki on pituudeltaan 0,39 metriä, mikä tekee putkien yhteispituudeksi 3,12 metriä tynnyrin sisällä. Näin ollen järjestelmässä on yhteensä 5,45 metriä putkea, kun lasketaan mukaan myös tynnyrin sisällä olevat putket.

Painehäviö laskennan toteutin Puhallinteknisen käsikirjan (1986, 22) ohjeen mukaisen kaavan mukaan:

$$\Delta p = \lambda * \frac{L}{d} * \frac{\rho}{2} * v^2 \quad (3)$$

Jossa

Δp = Painehäviö

λ = Kitkavastuskerroin

L = Putkien pituus

d = Putken halkaisija

ρ = Ilman tiheys

v = ilman virtausnopeus

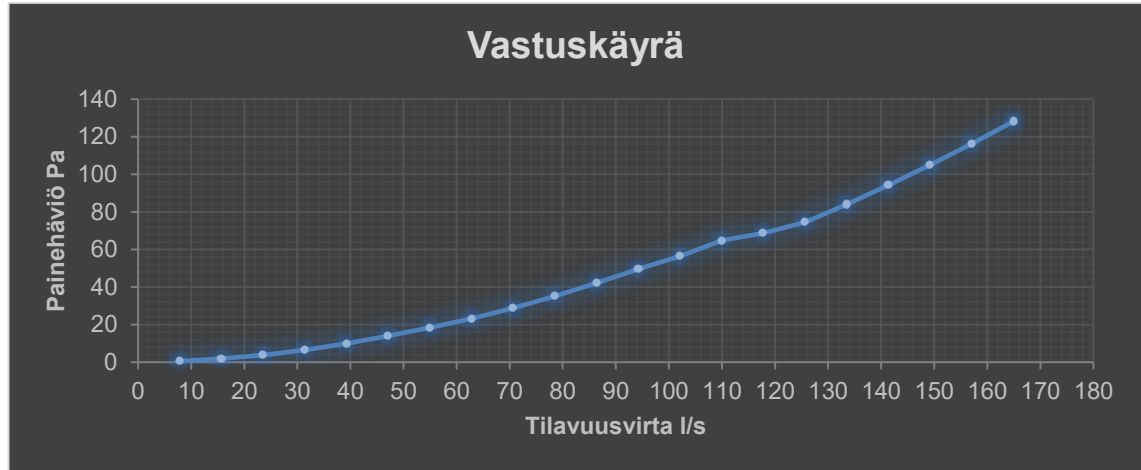
Painehäviöt on laskettu käyttämällä ilman nopeutena iv-kanavissa 1–21 m/s ja tynnyrin sisällä olevan lämmönsiirtoputkiston virtaavan ilman nopeus saadaan, kun tiedetään iv-putkistossa äskettäin mainittujen ilman nopeuksien ja iv-putken poikkipinta-alan perusteella laskettu tilavuusvirta jokaiselle ilman nopeudelle. Tilavuusvirta on sama järjestelmän kaikissa osissa, koska kyseessä on suljettu järjestelmä. Näin saadaan järjestelmässä olevan tilavuusvirran eri ilman

nopeuksille välille 8–165 l/s. Nyt, kun tilavuusvirrat ovat tiedossa voidaan laskea tynnyrin lämmönsiirtoputkistossa virtaavan ilman nopeus jakamalla tilavuusvirta lämmönsiirtoputkiston yhteenlasketulla poikkipinta-alalla. Näin saadaan koko tynnyrissä virtaavan ilman nopeuden arvoiksi 0,3–6,6 m/s. (What is volume flow rate? n.d.)

Kun tiedetään ilman virtausnopeudet järjestelmässä, niin tältä pohjalta voidaan laskea tynnyrissä ja iv-putkissa virtaavien ilmannopeuksien perusteella Reynoldsin luvut. Reynoldsin luvun laskennassa on käytetty ilman kinemaattisen viskositeetin arvoa 20°C lämpötilassa. (LaNasa & Loy Upp 2014.) Kun tiedetään Reynoldsin luku ja putken karheuden suhde putken halkaisijaan eli suhteellinen pinnankarheus, niin kaavassa esitetty kitkavastuskerroin λ saadaan jokaiselle ilman nopeudelle järjestelmässä käyttämällä Colebrook-diagrammia. Painehäviölaskennassa on käytetty ilman tiheyden arvona 1,2 kg/m³, joka on huoneenlämpöisen ilman tiheys. (Pukkila 1986, 22.)

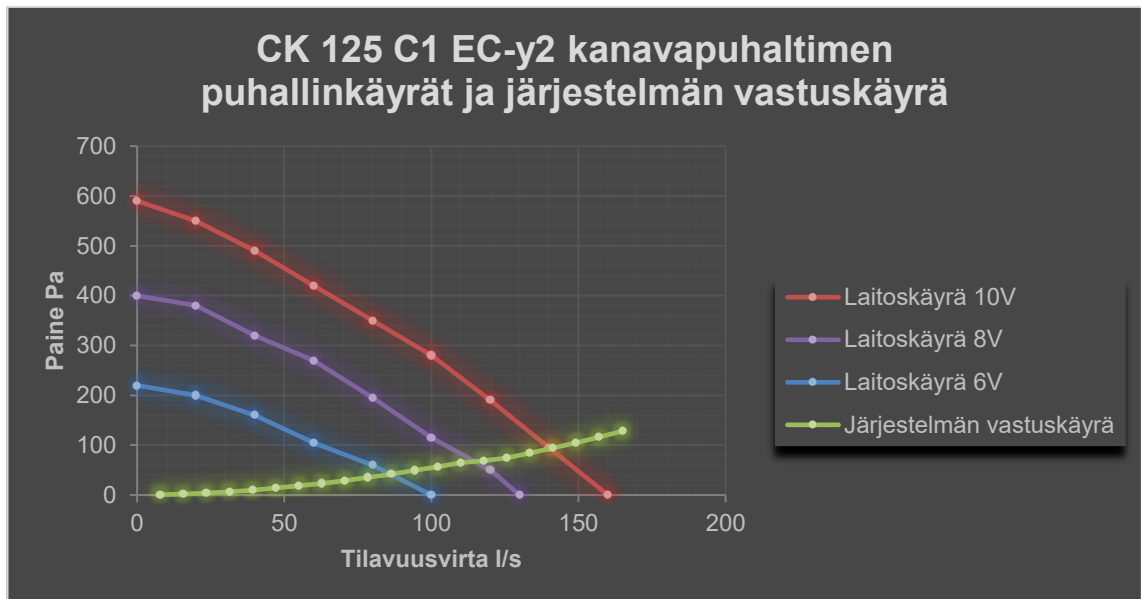
Näiden tietojen pohjalta voidaan laskea järjestelmän suuntaa antava painehäviö. Painehäviölaskennassa ei ole otettu huomioon järjestelmässä esiintyvien mutkien tuottamaa painehäviötä, putkikoon muutoksesta johtuvaa häviötä, kiukaassa tapahtuvaa häviötä eikä lämmönsiirtotynnyrin ala- ja yläpohjassa tapahtuvaa häviötä. (Pukkila 1986, 26.)

Iv-putkistossa ja tynnyrin lämmönsiirtoputkistossa tapahtuva painehäviö on tällöin laskettu yhteen jokaisella eri tilavuusvirralla, jolloin tuloksena saadaan järjestelmän laitoskäyrä.



Kuva 9. Järjestelmän vastuskäyrä.

Koska järjestelmässä ilmaa kierrättää tyypillinen kanavapuhallin, niin järjestelmässä virtaavaa tilavuusvirtaa voidaan arvioida sijoittamalla kuvassa 9 esitetty vastuskäyrä kanavapuhaltimen puhallinkäyrään. Arvioinnissa on käytetty Onnisen valikoimasta löytyvää CK 125 C1 EC-y2 kanavapuhallinta. (Onninen. n.d.) Puhaltimen kanavakoko 125 mm on hiukan oikeassa järjestelmässä käytettyä iv-kanavaa (100 mm) suurempi, mutta tällä ei ole suurta vaikutusta järjestelmän toiminnan arvioinnin kannalta.



Kuva 10. Kanavapuhaltimen laitoskäyrä, josta ilmenee puhaltimen toiminta eri jännitetasoilla LTO-järjestelmässä.

Puhallinkäyrää tarkasteltaessa voidaan arvioida, että järjestelmässä oleva tilavuusvirta on välillä 0–141 l/s, kun huomioidaan kanavapuhaltimen suorituskyky. Tynnyrin lämmönsiirtoputkistossa ilman nopeus olisi tällöin 0–5,7 m/s.

3.2.2 Laskennallinen lämmitysteho tynnyrissä

Järjestelmän lämmönsiirtymistä voidaan alkaa arvioida, kun tiedossa on sen vastuskäyrä, joka on liitetty kanavapuhaltimen puhallinkäyrään. Näin voidaan arvioida ilman nopeuksia tynnyrissä. Ilman nopeudella on suuri vaikutus lämmönsiirron kannalta tynnyrissä (Wibolo ym. 2021). Ilman nopeuden kasvaessa, sen turbulentsisuus myös lisääntyy. Turbulentsisuus kuvaa ilman pyörteisyyttä putkistossa. Mitä suurempi on turbulentsisuus, sitä tehokkaammin lämpö siirtyy lähinnä konvektion vaikutuksesta putkistossa. (Boundary Layer and Promoting Turbulent Flow 2022.) Turbulentsisuutta kuvataan Reynoldsin luvulla (LaNasa & Loy Upp 2014). Lämmönsiirtymisen tehokkuutta voidaan kuvata Nusseltin luvulla, joka vertaa konvektion kautta tapahtuvaa

lämmönsiirtoa johtumisen kautta tapahtuvaan lämmönsiirtoon. Tämä on Nusseltin luvun ensisijainen määritelmä, jonka pohjalta lämmönsiirtymisen tehokkuus voidaan laskea. Nusseltin luvun laskenta eroaa kuitenkin oikeassa tilanteessa riippuen siitä, että millaisen pinnan kautta lämpöä siirtyy. Eri pinnoille on olemassa omat korrelaationsa Nusseltin luvulle. Virtauksen turbulenttisuudella on myös vaikutus Nusseltin luvun kaavoihin. (ScienceDirect n.d)

Tässä tapauksessa on käytetty putkissa virtaaviin fluideihin tarkoitettua Gnielinskin korrelaatiota (Gnielinski Equation n.d).

$$Nu = \frac{\left(\frac{\lambda}{8}\right) * (Re - 1000) * Pr}{1 + 12,7 * \left(\frac{\lambda}{8}\right)^{\frac{1}{2}} * \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (4)$$

Jossa

λ = Vastuskerroin

Re = Reynoldsin luku

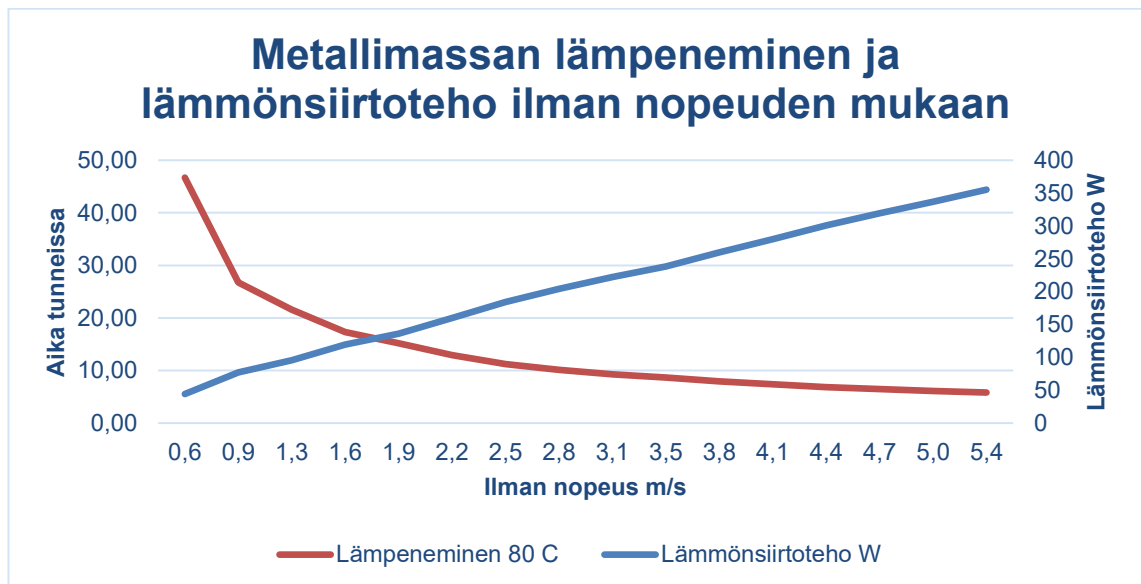
Pr = Prantleyn luku

Nu = Nusseltin luku

Kyseinen korrelaatio on tarkempi, kuin muut putkivirtauksiin tarkoitettut korrelaatiot sillä Gnielinskin korrelaatio ottaa myös huomioon lämmönsiirtoputkiston aiheuttaman vastuksen eri ilman nopeuksilla. Korrelaatio pätee myös suuremmalle Reynoldsin luvun alueelle, kuin vastaavat korrelaatiot, mikä tekee kyseisestä korrelaatiosta soveltuvan kuvaamaan tynnyrin lämmönsiirto ominaisuuksia. (Gnielinski Equation n.d.)

Seuraavaksi on määriteltävä tynnyriin mahtuvan metallimassan määrä, jotta voidaan laskennallisesti arvioida, miten metallimassa lämpenee ja kuinka nopeasti tynnyrissä kiertävän ilman vaikutuksesta. Piirustuksien mukaan laskettu tilavuus tilalle, jonne metallimassa olisi tarkoitus sijoittaa on 90,2 litraa. Tämän tilavuuden perusteella voidaan määrittää metallimassan paino

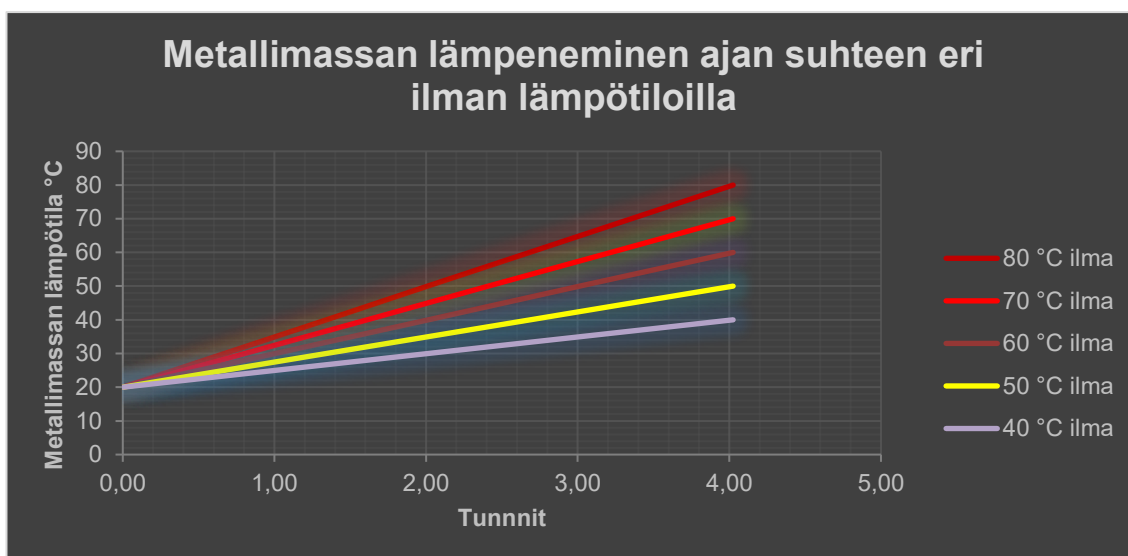
tynnyrissä. Koska tynnyriin sijoitettava metalli ei ole täysin kiinteää metallimassaa vaan metallisilppua, niin painoa laskettaessa on käytettävä eri tiheyttä kuin normaalia raudan tiheyttä. Tässä tapauksessa käytetään raudan 7874 kg/m^3 tiheyttä paljon pienempää tiheyttä mikä on 3040 kg/m^3 . Kyseisen tiheyden olen laskenut kaavan 2 mukaan. Näin ollen tynnyrissä olevan metallimassan tilavuuden ollessa 90,2 litraa, voidaan tämän pohjalta laskea tynnyriin mahtuvan massan paino, mikä on 274 kiloa. Kun tiedetään metallimassan paino, niin ominaislämpökapasiteetin perusteella voidaan laskea, kuinka paljon energiaa vaaditaan metallimassan lämmittämiseen tiettyyn lämpötilaan.



Kuva 11. Metallimassan lämpeneminen $80 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaan ilman virtausnopeuden kasvaessa.

Yllä esitettyssä graafissa on oletettu, että tynnyrissä kiertävän ilman lämpötila on jatkuvasti $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Lämmönsiirtotehon laskennassa on oletettu, että tynnyrissä kiertävän ilman lämpötila on $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ja metallimassan lämpötila on $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Oikeassa tilanteessa kuitenkin metallimassan lämpötila nousee jatkuvasti heikentäen lämmönsiirtotehoa ja näin vaikuttaa hidastavasti massan lämpenemisnopeuteen. Graafista voidaan kuitenkin todeta, että ilman nopeuden suurenemisella on alussa suuri vaikutus metallimassan lämpenemisnopeuteen, mutta hidastuu huomattavasti loppua kohden. Lämmönsiirtoteho nousee

lineaarisesti ilmavirtauksen mukaan ja saavuttaa huippuarvon 355 W, kun ilmavirtaus tynnyrissä on 5,4 m/s. Metallimassan lämmittäminen vie 80 °C lämpötilaan noin 5,82 tuntia, kun ilmavirtaus on 5,4 m/s. Laskennassa ei ole myöskään otettu huomioon metallimassan lämpenemisestä johtuvia lämpöhäviöitä, mitkä hidastuttavat massan lämpenemistä entisestään. Oikeassa tilanteessa, jos ilman lämpötila olisi 80 °C, metallimassan lämpötila ei edes nouse tälle tasolle lämpöhäviöiden vaikutuksesta.

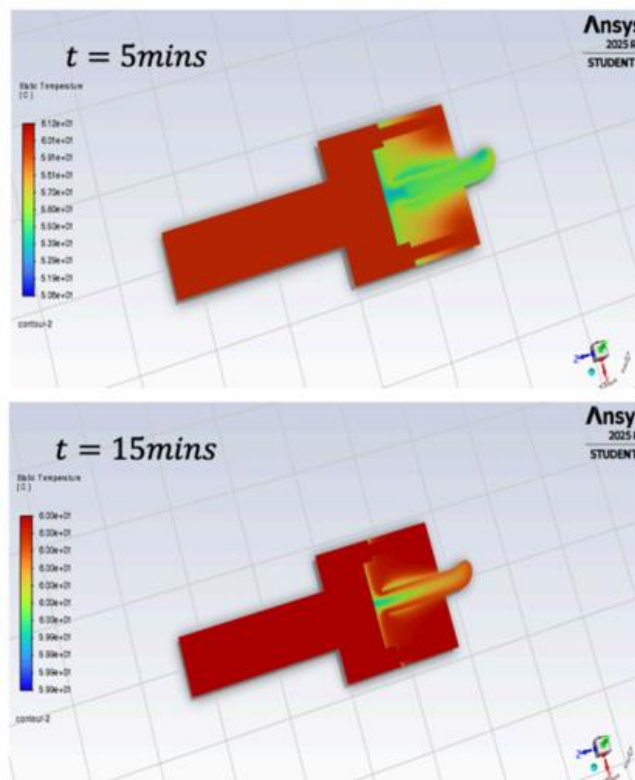


Kuva 12. Metallimassan lämpeneminen esitetty, kuin kuviossa 3, mutta tässä tapauksessa ilman eri lämpötiloilla ja ilman nopeuden ollessa jatkuvasti 1,6 m/s.

Kuvassa 12 metallimassan aloituslämpötila lämmityksen alkaessa on 20 °C. Myöskään tässä tapauksessa ei huomioida lämpöhäviöitä eikä metallimassan lämpenemisestä johtuvaa ilman ja metallimassan lämpötilaeron kaventumista, millä on heikentävä vaikutus lämmönsiirtotehoon. Tässä tapauksessa lämmönsiirtoteho 1,6 m/s ilmavirtauksen nopeudella on pienimmillään 119 W ja suurimmillaan 358 W, kun tarkastellaan 40°C - 80°C ilmavirtaa tynnyrissä. Kaikilla ilman lämpötiloilla huippulämpötila saavutetaan noin 4 tunnin kuluessa lämmityksen aloittamisesta.

3.3 Järjestelmän lämmitys mallintamisen avulla

Järjestelmää mallinnettiin käyttämällä Ansys simulaatio ohjelmistoa. Simulaatiossa tynnyriin syötetään ilmaa, jonka lämpötila on 60°C koko simuloinnin ajan. Ilma syötetään tynnyrin kannesta ja ilma poistuu tynnyrin pohjasta ulos. Simulaatio käyttää aikaisemmista laskuista käytetystä tynnyrin mallista poikkeavaa mallia, jossa tynnyriin on lisätty enemmän vetoja ja läpivientiputkia. Simulaatiossa tynnyriä lämmitettiin 5 min ja 15 min. Näitä simuloituja tehtiin yhteensä kolme kappaletta, joissa tyhjän tilan suuruus tynnyrin osuudessa, jossa on metallijauhetta, on eri suuruiset. Tyhjän tilan osuuksiksi määritettiin 5 %, 20 % ja 70 % metallijauheen säilytystilasta. Simulointien perusteella tynnyri lämpenee nopeimmin, kun tyhjä osuus on 70 %. Tyhjän osuuden pienentyessä tynnyrin lämpenee hitaammin. Suurempi tyhjä osuus suurentaa simuloinnin perusteella lämmönsiirtoa ilman ja metallijauheen välillä. (Jun Ting 2025,56–57.)



Kuva 13. Tynnyrin lämpeneminen tyhjän tilan ollessa 70 % metallijauheen säilytystilasta. (Jun Ting 2025,56–57.)

4. Laboratorion kasausvaihe.

Tynnyrin valmistuksesta vastaa Pöytyän koneistuspalvelu. Järjestelmä rakennetaan muuten Turun ammattikorkeakoulun tiloissa. Suurin osa järjestelmän kasaamiseksi vaadittavista komponenteista on saatavissa koulun varastoista. Näihin kuuluu IV-kanavat, sisä- ja ulkoliittimiä, puhallin ohjausyksikköineen, sivuliittimiä ja t-haara suojaamaan kiukaan termostaattia. Loput osat haetaan niiden jälleenmyyjien kautta. Niihin kuuluu kiuas, lämpötila-anturit ja lv-muuntoliitin, joka sijoitetaan tynnyrin päälle ohjaamaan ilmavirtaa.

Järjestelmän puhallin on liitetty systeemiä ohjaavan ohjausyksikön läheisyyteen. Kyseiseen ohjausyksikköön liitetään järjestelmän lämpötila- ja virtausanturit. Näin saadaan dataa ulos lämmönsiirron tehokkuudesta, sekä tynnyrissä sijaitsevan metallimassan lämpötilan muutoksesta. Ohjausyksikössä on oma näyttö mistä puhallinta voidaan hallita sekä seurata antureiden antamaa dataa. Kiukaalla on oma ohjausyksikkönsä, jolla ohjataan putkessa virtaavan ilman lämpötilaa.



Kuva 14. Valmis LTO järjestelmä.

Kuvassa 14 on esitetty valmis järjestelmä. Jotta voidaan minimoida lämmön johtuminen hukkaan, on systeemi eristetty perusteellisesti iv-kanaville tarkoitettulla eristeillä. Myös järjestelmän rakenteessa on muutoksia alkuperäisiin piirroksiin verrattuna. Tynnyrin päällä oleva rakenne poikkeaa alkuperäisestä siinä suhteessa, että päälle on asennettu D250 iv-kanava, jonka kylkeen on tehty reikä, sekä se on päältä tulpattu umpeen. Myös saunan termostaatti on asennettu iv-putkien t-haaraan, jolla saatiin riittävä suojaus termostaatille. Myös puhaltimen puhallus suunta on vaihdettu päinvastaiseen alkuperäisestä eli ilma puhalletaan nyt tynnyrin kannesta sisään ja poistuu tynnyrin kyljestä takaisin kiukaalle. Tynnyrin lämpötilaa mittaavia antureita on asennettu 3, kahden sijaan. Anturit on asennettu tynnyrin eri tasoille siten, että keskellä on yksi ja loput on asennettu tynnyrin ylä- ja alaosaan. Myös ennen ja jälkeen puhallinta on asennettu lämpötila-anturit, joilla voidaan seurata lämpötilaa puhaltimessa. Tynnyrin lämmönsiirto putkistoon on myös tehty muutoksia. Alkuperäisten piirustuksien sijaan tynnyrin läpi menee pohjasta kanteen 100 mm iv-putki, josta lähtee 4 kappaletta 50 mm putkia takaisin tynnyrin pohjaan ja viimeiseksi takaisin pohjasta kanteen 8 kappaletta 40 mm putkea. Näin tynnyristä tulee kolmivetoinen lämmönsiirrin. Alkuperäisistä suunnitelmista poikettiin toimeksiantajan toimesta.

5. Testitulokset

5.1 Lämmitys

5.1.1 Lämmitysteho

Lämmityksessä tehon laskennassa on käytetty kahta eri laskentamenetelmää. Ensimmäisessä menetelmässä on käytetty kaavaa numero 1, joka on esitelty tämän työn alussa. Toisella menetelmällä on käytetty lämmitystehton laskennassa ilman entalpien muutosta tynnyrissä (Energy-models n.d).

$$Q = \dot{m} * (H_e - H_j) \quad (5)$$

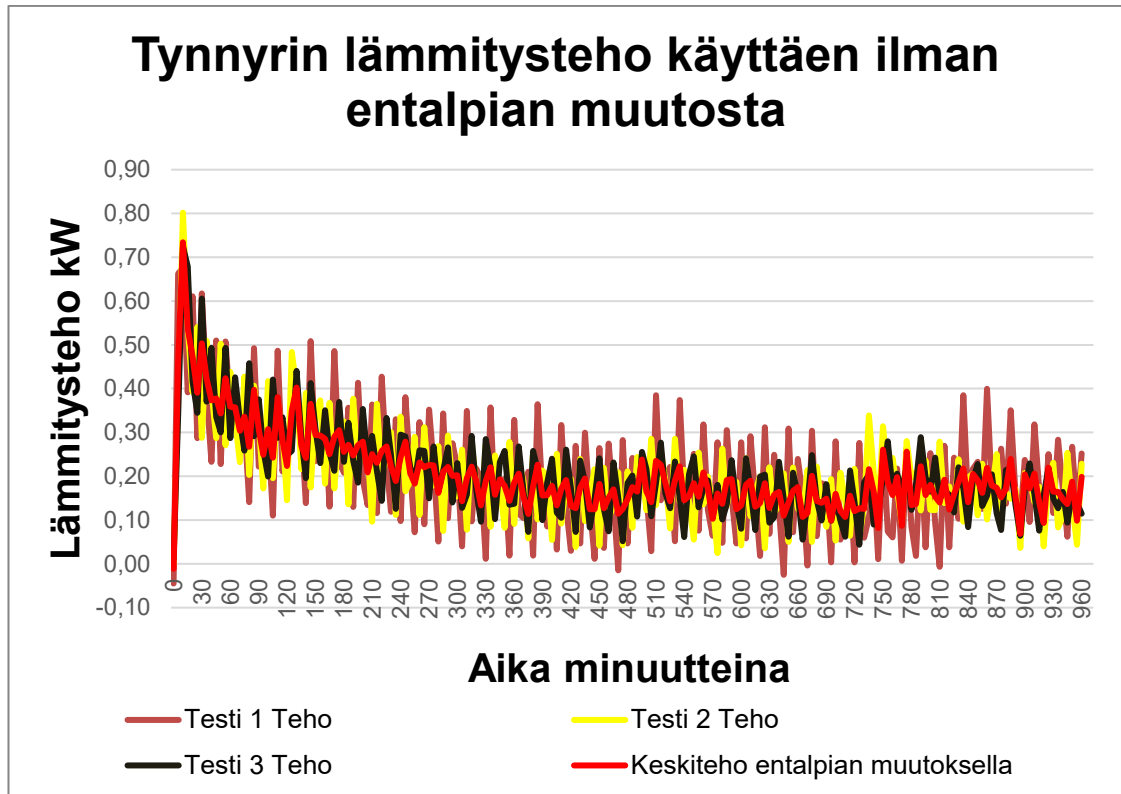
Jossa

Q =lämmitysteho

\dot{m} =massavirta

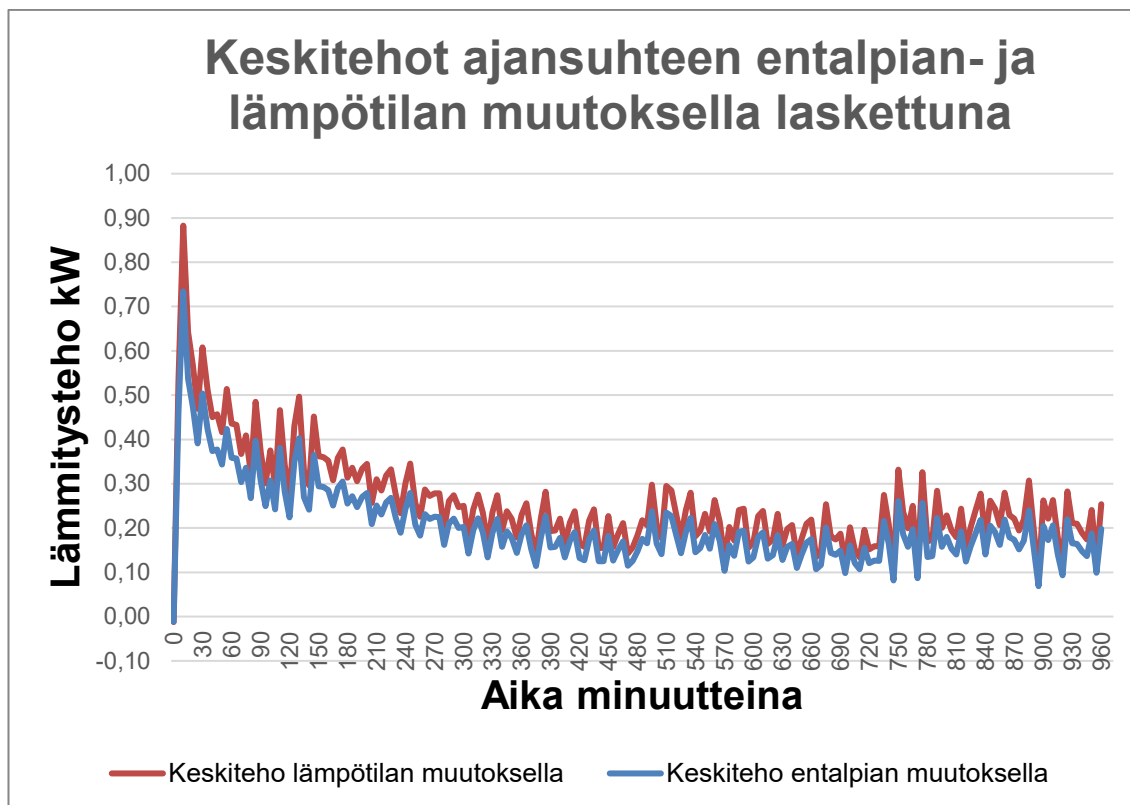
H_e =ilman entalpia ennen tynnyriä

H_j =ilman entalpia tynnyrin jälkeen



Kuva 15. 16 tunnin lämmityksien tehot ja näiden keskiteho ajansuhteen kuvattuna.

Kuvassa 15 kuvattuna 16 tunnin lämmitysjaksojen tehot, joissa lämmöt nostettiin asteittain 60°C lämpötilasta 70°C lämpötilaan. Ensimmäinen jakso päättyi 120min kohdalla (60°C), toinen 480min (65°C) ja kolmas 960min (70°C) kohdalla. Lämmitystehon heilahtelu johtuu kiukaan vastuksista, jotka toimivat on/off periaatteella. Kuvasta huomaa myös keskimääräisen lämmitystehton laskua testien edetessä. Tämä johtuu todennäköisesti tynnyrin lämpenemisestä, jolloin ilman ja tynnyrin välinen lämpötilaero pienenee ajan myötä.



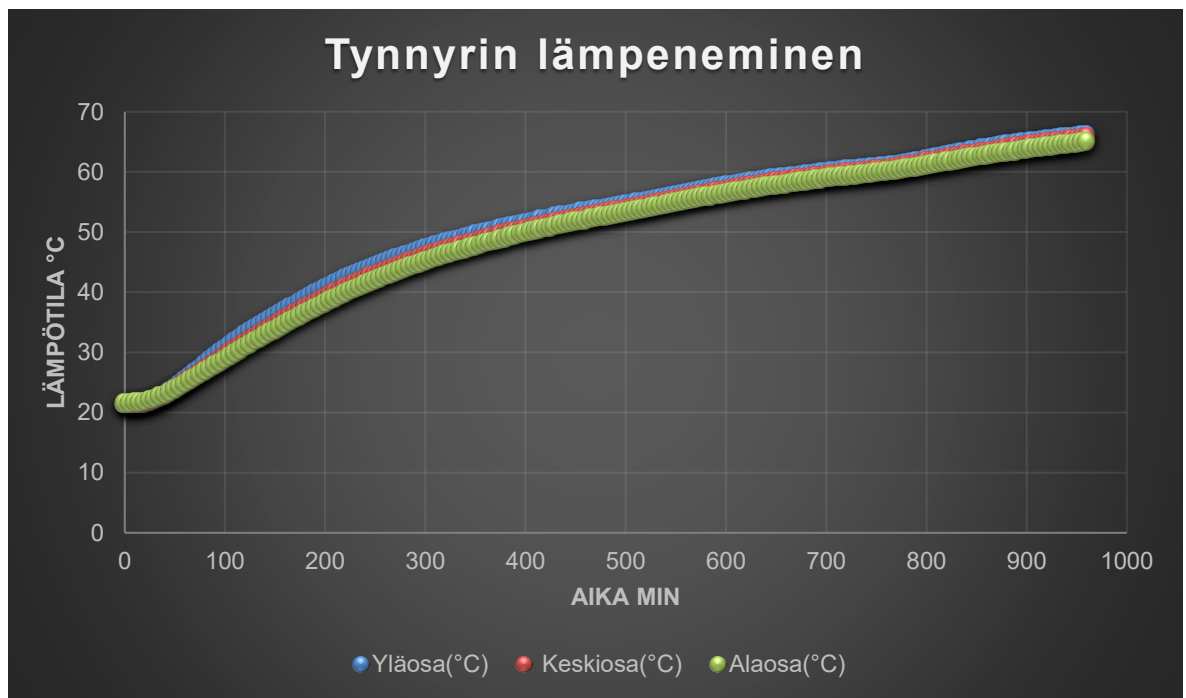
Kuva 16. 16 tunnin lämmityksien keskitehot laskettuna entalpian- ja lämpötilan muutoksen mukaan.

Kuvassa 16 sama tilanne, kuin kuvassa 14, mutta ilmaistuna keskitehoina, ilman entalpian- ja ilman lämpötilan muutoksen mukaan. Entalpian avulla laskettu keskitehoa vastaava kuvaaja vastaa lämpötilan muutoksen mukaan laskettua kuvaajaa sen liikehdinnän mukaan, mutta entalpialla laskettu kuvaaja antaa pienempiä teholumkia, kuin lämpötilan muutoksella luotu kuvaaja. Tämä mahdollisesti selittyy sillä, että entalpian avulla lasketussa keskitehossa huomioidaan ilman tiheyden muutos ilman lämpötilan muuttuessa. Tämä vaikuttaa suoraan massavirtaan. Meno ja paluu ilman entalpian laskennassa on huomioitu ilman absoluuttinen kosteus, joka on tässä tapauksessa oletettu olevan 0,001 kg vesihöyryä/kg kuivaa ilmaa. Absoluuttinen kosteus on yleensä muutaman promillen luokkaa ja sillä on suhteellisen suuri vaikutus ilman tiheyden ja entalpian laskennassa, jolloin voidaan käyttää yllä mainittua arvoa. Arvo kuvaa lähes kuivaa ilmaa, mutta ottaa huomioon kuitenkin vähäisen kosteuden. Lämpötilan mukaan lasketussa keskitehossa ilman tiheyden

oletetaan olevan jatkuvasti $1,293 \text{ kg/m}^3$ mikä on ilman standardi tiheys (Earthdata, n.d).

5.1.2 Tynnyrin lämpötilan nousu

Tynnyrin lämpötilan nousu mitattiin käyttämällä kolmea lämpötila-anturia tynnyrin kyljessä.



Kuva 17. Tynnyrin lämpeneminen ajansuhteen lämmityksen aikana.

Kuvassa 17 esitetty tynnyrin lämpeneminen ajansuhteen 16 tunnin testien osalta. Mitattu lämpötila kokeen alussa oli $21,5^{\circ}\text{C}$ ja korkein kokeen lopussa oli $65,7^{\circ}\text{C}$. Kyseinen data on peräisin kolmannesta 16 tunnin testistä. Muiden testien lämpötiloja ei ole tässä esitetty sillä, tulokset ovat niissä tähän verrattuna melkein identtiset. Tynnyriin kolmesta asennetusta anturista ylimmäinen antoi korkeinta ja alimmainen antoi alinta lämpötilaa. Tämä selittyy sillä, kun ilma saapuu tynnyriin kuumempuna, kuin poistuu sieltä, jolloin lämmönsiirto tynnyrin alaosassa on heikompaa. Tynnyrin lämpötila ei missään vaiheessa saavuttanut

syöttö ilman lämpötilaa (70°C), mikä johtuu tynnyrin hukkaamasta lämmöstä ympäristöön eristyksestä huolimatta.

Järjestelmään suoritettiin monta lämmitys/jäähdytys syklistä. Testien tulokset olivat samankaltaisia. Jäähdytys suoritettiin kierrättämällä ilmaa systeemissä vesiglykoli kiertoisen letkun sijaan. Tällä saatiin yksinkertaistettua järjestelmän rakennetta ja itse testejä.

Järjestelmässä oli rajoituksia, jotka piti huomioida testejä suoritettaessa. Puhallin kestää valmistajan mukaan maksimissaan 80°C ja tynnyrin täyttöluukku piti tiivistää vuotojen välttämiseksi silikonimassalla, jolla oli valmistajan mukaan myös 80°C maksimi lämmönkesto. Tämän takia järjestelmässä käytetty maksimi lämmitys lämpötila oli 70°C. Lämpötila oli pienempi, kuin 80°C, koska saunan termostaatti ei ole tarkoitettu laboratoriokäyttöön vaan ylläpitämään saunassa oikeaa lämpötilaa ja tämä tuo epätarkkuutta lämpötilan säätöön termostaatin hitaan reagoinnin takia. 80°C lämpötilan ylläpito vaatii anturin, jossa on nopeampi reagointi kyky.

Testit suoritettiin lämmittämällä tynnyriä 2 tuntia 60°C lämpötilassa, tämän jälkeen lämmöt nostettiin 65°C lämpötilaan ja lämmitystä jatkettiin 6 tuntia ja vielä viimeiseksi lämmöt nostettiin 70°C lämpötilaan ja lämmitystä jatkettiin vielä 8 tuntia. Lämmitystä kesti yhteensä 16 tuntia. Kyseisiä testejä suoritettiin yhteensä 3 kappaletta. Jokaisen lämmityskerran jälkeen tynnyri jäähdytettiin sammuttamalla kiuas ja kierrättämällä ilmaa systeemissä, pois lukien viimeinen jäähdytys kerta, jolloin jäähdytys toteutettiin poistamalla kiuas kokonaan kierrosta, jolloin tynnyrin läpi puhallettiin kylmempää parkkihallin lämpötilaa vastaavaa ilmaa.

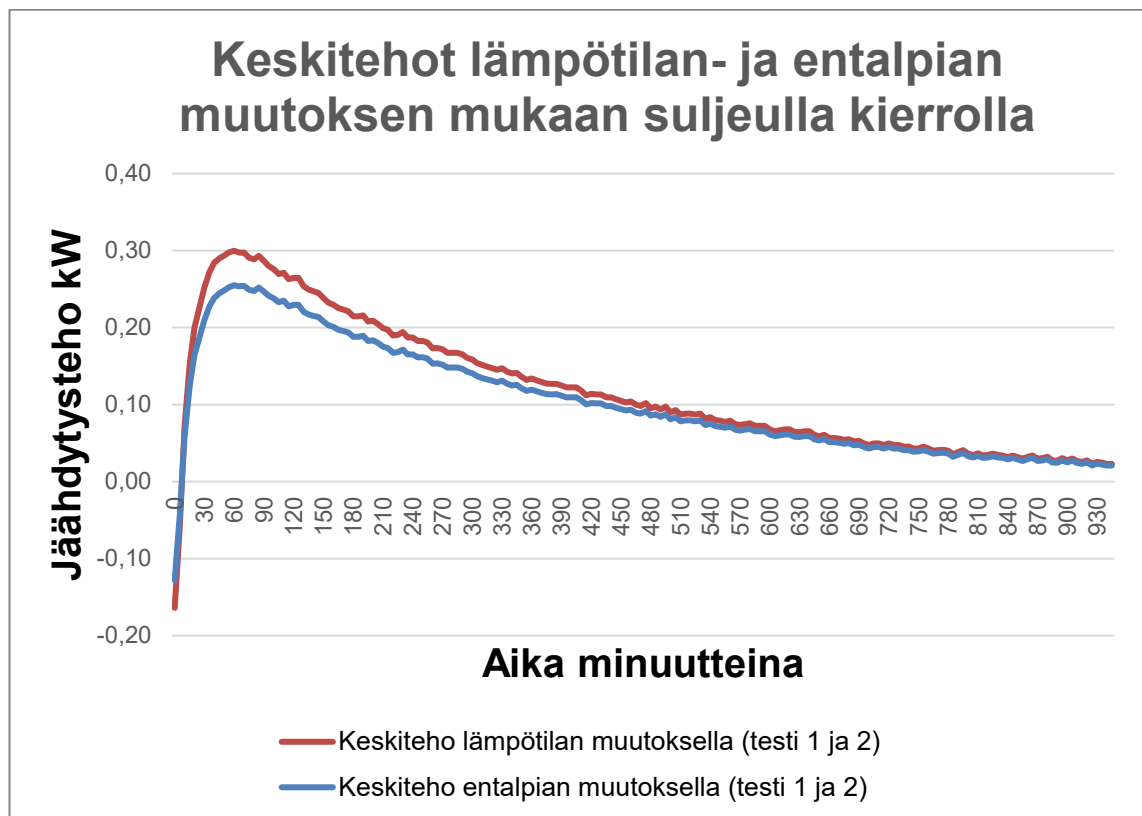
Näiden lisäksi suoritettiin vielä testit, joissa tynnyriä lämmitettiin 16 tuntia käyttämällä 60°C lämpötilaa, lämmitys 8 tuntia 50°C lämpötilalla ja lämmitys 8 tuntia 40°C lämpötilalla.

5.2 Jäähdytys

5.2.1 Jäähdytysteho

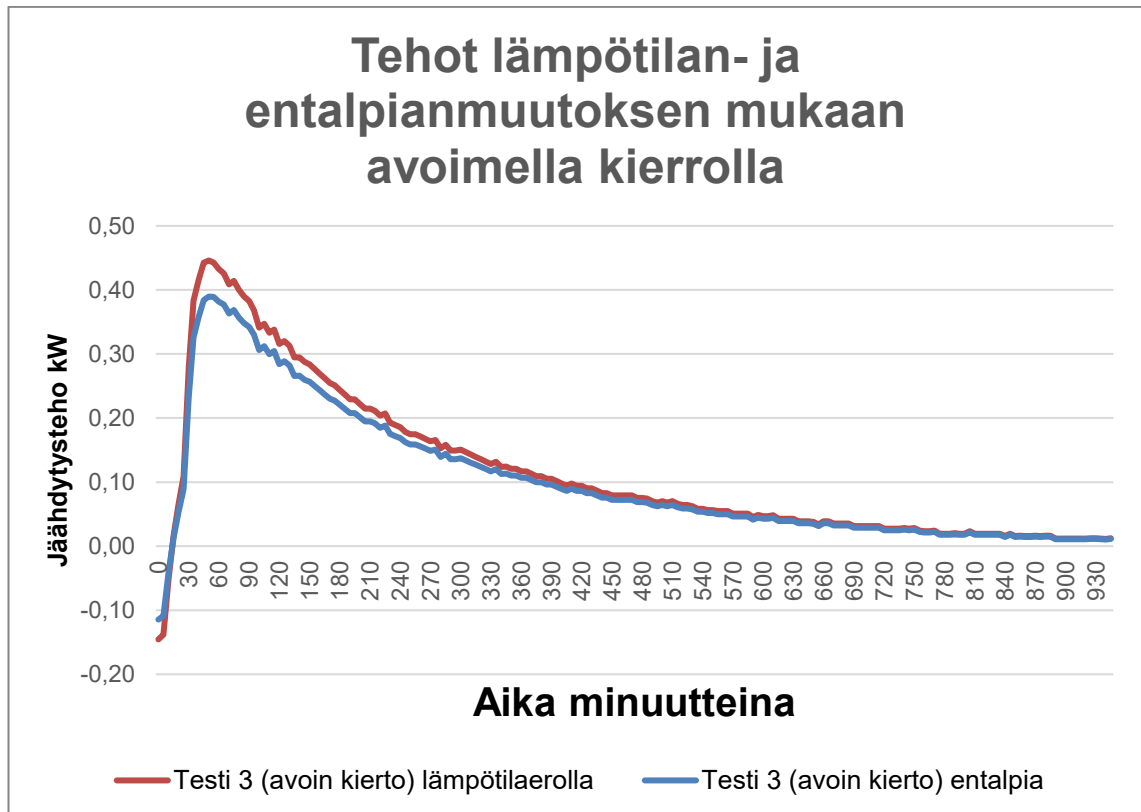
Jäähdytysteho on laskettu samalla tavalla, kuin lämmitysteho eli käyttäen kaavassa 5 ilmaistua entalpian muutosta ja kaavassa 1 olevaa lämpötilan muutosta.

Jäähdytys tehtiin 16 tunnin testeissä kahdella ensimmäisellä kerralla suljetulla kierrolla, jossa kiuas vain sammutettiin ja ilman annettiin kiertää suljetussa järjestelmässä jäähdyttäen tynnyriä. Kolmannella 16 tunnin testissä jäähdytys suoritettiin avoimella kierrolla, jossa kiuas poistettiin kierrosta kokonaan, jolloin puhallin imi kylmempää ilmaa kierron ulkopuolelta tynnyriin.



Kuva 18. Tynnyrin jäähdytyksen keskijäähdytys tehot ajan suhteen suljetulla kierrolla.

Kuvassa 18 esitetty kahden ensimmäisen testin keskitehot entalpia- ja lämpötilaerolla laskettuna. Tässä kohtaa myös entalpialla laskettu teho on hiukan matalampi, kuin lämpötilan muutoksella, sillä entalpia laskelmissa on huomioitu muuttuva ilman tiheys. Teho näyttää alussa negatiivista arvoa, koska jäähdytys on aloitettu välittömästi lämmityksen jälkeen, jolloin kuuma ilma siirtää lämpöä vielä tynnyriin.

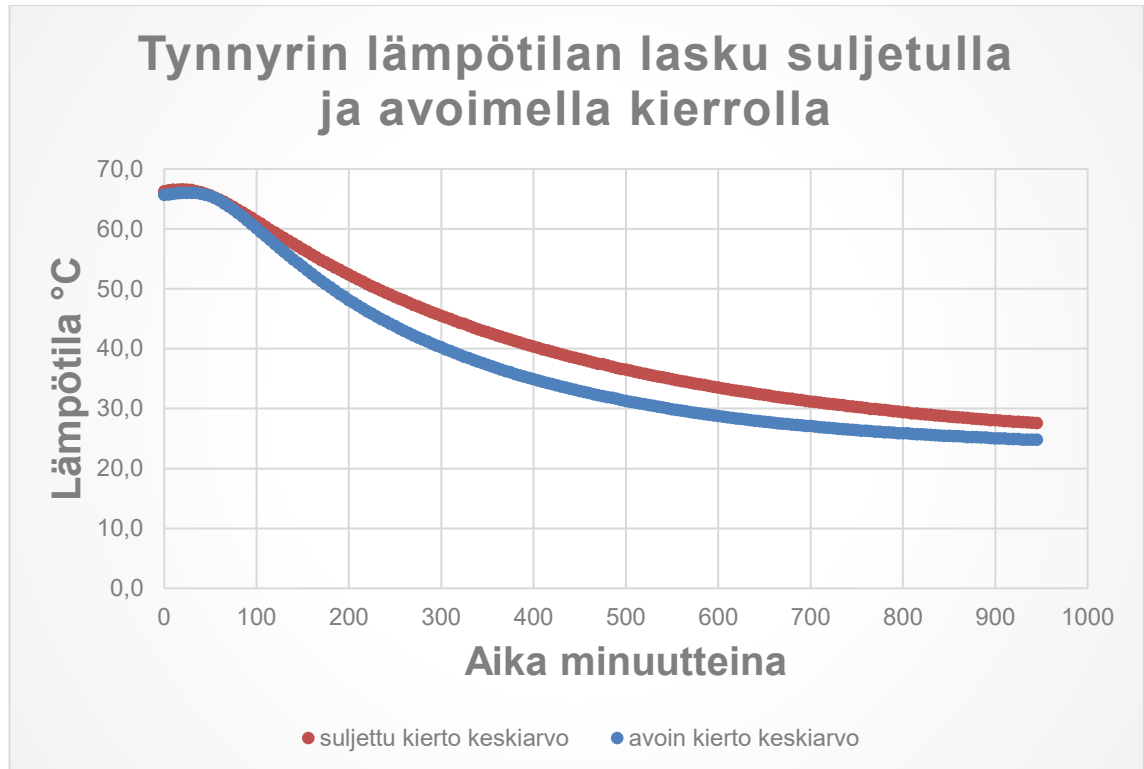


Kuva 19. Tynnyrin jäähdytyksen keskijäähdytys tehot ajan suhteen avoimella kierrolla.

Kuvassa 19 ilmaistu jäähdytystehot ajansuhteen avoimella kierrolla, jossa kiuas on poistettu kierrosta. On huomattavissa, että jäähdytysteho on alussa selkeästi korkeampi, kuin suljetussa kierrossa. Tämä johtuu kylmemmästä sisääntulo ilmasta, jolloin ilman ja tynnyrin lämpötila ero on suurempi, mutta tämä tasaantuu ajansuhteen. Tässäkin tapauksessa entalpiaero antaa matalampaa tulosta, johtuen tarkemmasta laskentamenetelmästä. Myös tässä teho on alussa negatiivinen johtuen todennäköisesti kierrossa olevan ilman olevan vielä

kuumempaa, kuin tynnyri. Kylmä ilma todennäköisesti lämpenee kuumassa kanavistossa ennen tynnyriin saapumistaan lämmittäen tynnyriä.

5.2.2 Tynnyrin lämpötilan lasku

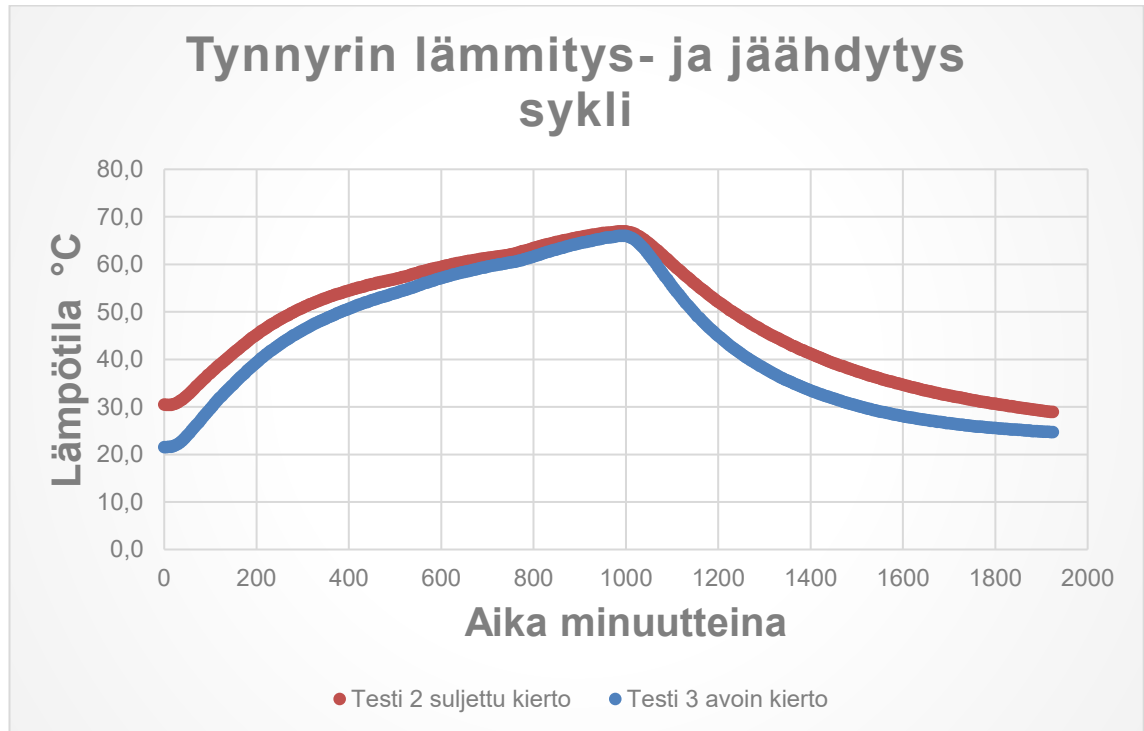


Kuva 20. Tynnyrin lämpötilan lasku suljetulla ja avoimella kierrolla.

Kuvassa 20 esitetty tynnyrin lämpötilan lasku ajansuhteen suljetulla- ja avoimella kierrolla 16 tunnin testeissä. 16 tunnin testeistä 2 ensimmäistä suoritettiin suljetulla kierrolla, joista tässä on esitetty toisen testin tulokset, jotka ovat lähes identtisiä ensimmäisen testin kanssa. Lämpötilat ovat molemmissa tapauksissa keskilämpötiloja tynnyrin kolmesta lämpötila anturista. Lämpötilan lasku on avoimella kierrolla odotetusti nopeampaa, kun verrataan suljettuun kiertoon, johtuen kylmemmästä ilmasta, joka syötetään tynnyriin.

5.3 Tynnyrin lämmitys- ja jäähdytysyksi sekä järjestelmään syötetty- ja ulos saatu energia

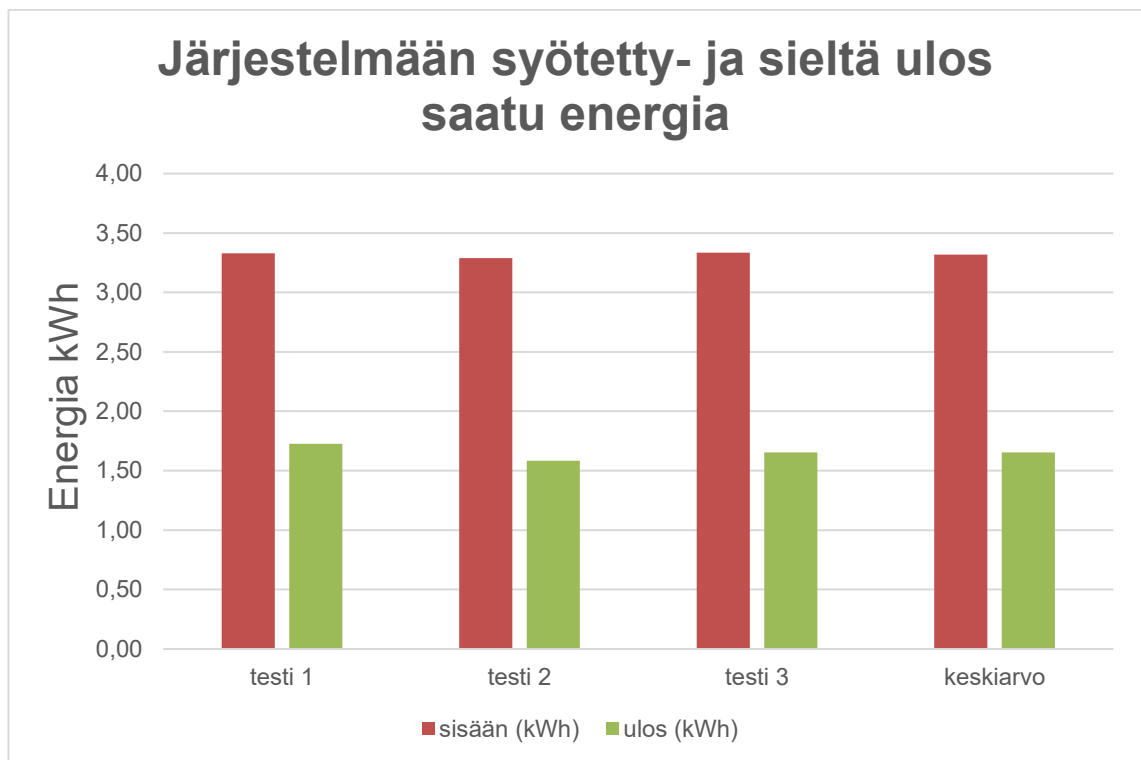
5.3.1 Lämmitys- ja jäähdytysyksi



Kuva 21. Tynnyrin lämmitys- ja jäähdytysyksi ajansuhteen.

Kuvassa 21 esitetty tynnyrin lämmitys ja jäähdytysyksi. Testissä 2 käytettiin suljettua kiertoa jäähdytys vaiheessa ja testissä 3 avointa kiertoa. Testissä 2 aloituslämpötila oli noin 10°C korkeampi, kuin testissä 3. Molemmat saavuttivat silti noin saman huippulämpötilan. Loppulämpötiloissa testien jälkeen oli myös eroja. Suljetulla kierrolla loppulämpötilaksi mitattiin 28,9°C ja avoimella 24,7°C.

5.3.2 Tynnyriin syötetty- ja ulos saatu energia



Kuva 22. Tynnyriin syötetty- ja ulos saatu energia.

16 tunnin kokeiden perusteella tynnyriin meni sisään keskimäärin 3,3 kWh energiaa ja ulos saatiin keskimäärin 1,7 kWh energiaa. Ulos saadun ja sisään menneen energian suhde oli keskimäärin 0,5 eli tynnyrin purkausvaiheessa tynnyriin syötetystä energiasta puolet on saatu ulos. Tynnyrin purkaus vaihe kesti myös 16 tuntia, jolloin tämän aikana puolet energiasta on mennyt tynnyrin ulkoseinämien kautta ulkoilmaan, kun tarkastellaan kuvaa 22. Tynnyriin syötetty- ja ulos saatu energia on laskettu entalpia kaavan 5 mukaan, jolloin saadaan teho ja energia on laskettu erikseen 5 minuutin jaksoilta, jolloin ne on summattu lopuksi yhteen.

Lämmönlähteenä käytettiin 6kW Harvian kiuasta, joka syötti järjestelmään huomattavasti enemmän energiaa mitä tynnyriin syötettiin. Kiuas kulutti energiaa eli syötti ilmakiertoon energiaa keskimäärin 40,9 kWh testien 1–3 välillä. Kun

syöttämää energiaa, saadaan hyötysuhteeksi 0,08, 0,08 ja 0,09, kun tarkastellaan testiä 1,2 ja 3. Suhdeluvut pienenevät entisestään, kun verrataan paljonko tynnyristä, on saatu energiaa ulos, siihen kuinka paljon kiuas on sitä järjestelmään syöttänyt. Testeille 1–3 keskimääräinen suhde tälle oli noin 0,04 eli puolet siitä, mikä oli tapauksessa, jossa verrattiin tynnyriin syötetyn- ja kiukaan järjestelmään luovuttaman energian suhdetta. Tämä johtuu tynnyrin hukkaamasta lämmöstä jäähdytysvaiheen aikana. Lukua 0,04 eli 4 % voidaan tässä tapauksessa pitää järjestelmän lopullisena hyötysuhteena.

5.3.3 Lämpöhukka

Systeemin lämpöhukkaa voitiin mittauksien aikana mitata puhaltimen ja tynnyrin ilman sisääntulon välillä. Juuri puhaltimen jälkeen on asennettu lämpötila anturi ja juuri ennen tynnyrin sisääntuloa on myös anturi. Näiden lämpötila eroa seuraamalla voidaan laskea kyseiselle välille hukcateho eli paljonko lämpöä siirtyy putkien läpi ulkoilmaan eikä tynnyriin.

Taulukko 1. Testien 1–3 hukcatehot ja hukkaenergiat

	Keskihukcateho (kW)	Hukkaenergia (kWh)	He+Te (kWh)	He+Te/Kiuas
Testi 1	0,19	3,15	6,48	0,16
Testi 2	0,16	2,51	5,8	0,15
Testi 3	0,14	2,25	5,58	0,15
Keskiarvo	0,16	2,64	5,95	0,15

Taulukossa 1 on kuvattuna 16 tunnin testien 1–3 keskihukcatehot ja hukkaenergiat lämmityssyklin ajalta. Laskettu keskihukcateho on saatu ilman lämpötilaeron mukaan eikä entalpian muutoksella, joten todellinen hukka on todennäköisesti pienempi. Keskihukcatehoksi saatiin 160W ja keskihukkaenergiaksi saatiin 2,64 kWh testien välille. Taulukossa 1, kolmannessa sarakkeessa on laskettu yhteen jokaiselle testille erikseen

hukkaenergia He ja tynnyriin syötetty energia Te sekä näiden keskiarvo. Neljäs sarake on He ja Te summan ja saunan järjestelmään syöttämän energian suhde.

Keskimäärin hukkaenergiaa ja tynnyriin syötettyä energiaa kului 5,95 kWh testiä kohden. Tämä on keskimäärin noin 15 % saunan kuluttamasta energiasta. Kun vähennetään keskimääräisestä saunan kuluttamasta 40,9 kWh energiasta hukkaenergia ja tynnyriin syötetty energia, jäljelle jää 34,95 kWh. Tämä kaikki loppu on myös hukkaenergiaa, joka on mennyt laboratorion ympäristöön tynnyrin ylä- ja alakannen, tynnyrin ja kiukaan välisen putkiston, kiukaan ja puhaltimen välisen putkiston, puhaltimen ja sekä itse kiukaan kautta. Suurin osa häviöistä on todennäköisesti tullut itse kiukaan kautta, sillä lämpötilat ovat kiukaassa kaikkein korkeimmat, jolloin lämpötilaero kiukaan ja ympäristön välillä on suuri. Kiukaassa oli jonkin verran eristys villaa, jolla pyrittiin ehkäisemään lämpöhäviöitä, mutta ilma pääsi nousemaan todennäköisesti silti kiukaan välirakenteen kautta ylöspäin lämmitessään ja näin tehostaen lämpöhukkaa. Myös kiukaan päälle asennettu peltikansi ei ilmeisesti ollut tiivis vaan kuuma ilma pääsi tätä kautta vuotamaan ympäristöön.

6. Tynnyrin skaalaus suuremmalle lämpötila alueelle

Osana järjestelmän kokeita on saatujen tuloksien skaalaus suuremmalle lämpötila alueelle ja näin selvittää metallimassa soveltuvuutta mahdollisesti maalauskuunista saatavan hukkalämmön talteenottoon. Excelissä tuloksia on mahdollista jollain tavalla skaalata ylöspäin, mutta tämä on melko epätarkkaa. Tuloksista saatavista kuvaajista on mahdollista luoda trendiviivat ja niihin liittyvät funktiot. Funktiot antavat kuitenkin melko huonolaatuista skaalattavuutta. Esimerkiksi lineaariset funktiot vain skaalaavat tynnyrin lämpöä ajan suhteen loputtomasti ja lineaarisesti ylöspäin ottamatta huomioon tynnyrin lämpöhukkaa. Toisen asteen funktiot antavat tarkempaa tulosta koska huomioivat tynnyrin lämpenemisen hidastumisen ja niissä järjestelmää pystyi skaalaamaan isommalle alueelle nostamalla kuvitteellista tynnyrin aloituslämpötilaa lämmityssyklin alussa reippaasti korkeammalle. mutta tämän takia tynnyrin lämpötila nousi sitä vähemmän mitä korkeammaksi metallimassan aloitus lämpötilaa nostettiin, eikä näin päästy lähellekään maalauskuunista saatavaan noin 600°C lämpötilaan mihin tynnyrin massan olisi hyvä päästä.

Lähdin tarkastelemaan systeemiä lämpötasapainon kannalta. Tynnyriin menevä lämpö siirtyy itse metallimassaan ja osa menee laboratorion ympäristöön johtumisen, konvektioon ja säteilyn kautta. Tynnyrin lämmitessä laskennallisesti ajansuhteen kaavalla 6, sen lämpöhäviötkin myös nousevat, jolloin tynnyriin kohdistuvaa lämmitystehoa on suurennettava, jotta lämpötila nousisi lineaarisesti ajan kanssa. (Access Science. Heat balance. 2020.)

$$m * c_p * \frac{dT}{dt} + h * A * (T_{tynnyri} - T_{laboratorio}) + \varepsilon * \sigma * A * (T_{tynnyri}^4 - T_{laboratorio}^4) = Q_{sisään} \quad (6)$$

Jossa

m = Tynnyrissä oleva metallin massa

c_p = Raudan ominaislämpökapasiteetti

$\frac{dT}{dt}$ = Raudan lämpötilanmuutos ajan suhteen

h = Lämmönsiirtokerroin
 A = Tynnyrin ulkovaipan pinta-ala
 $T_{tynnyri}$ = Metallimassan lämpötila
 $T_{laboratorio}$ = Laboratorion lämpötila
 ε = emissiivisyys
 σ = Stefanin–Boltzmannin vakio
 $Q_{sisään}$ = Tynnyriin syötetty lämmitysteho

Yhtälössä käytetään raudan ominaislämpökapasiteetin arvoa 450 J/kg*K kaikissa lämpötiloissa, vaikka todellisuudessa tämä muuttuu lämpötilan muuttuessa jonkin verran. Tynnyrissä olevan metallimassan lämpötilan muutos on laskettu tynnyrille tehtyjen testien perusteella. Tässä tapauksessa on käytetty testiä 2, joka oli 16 tunnin mittainen lämmityksen kannalta. Tynnyrin lämpötilanmuutos mitattiin 5 minuutin välein kyseisessä testissä. Näistä lämpötilan muutoksista laskin keskiarvon, jolloin tynnyrin lämpö nousee keskimäärin 0,18 C°/5min.

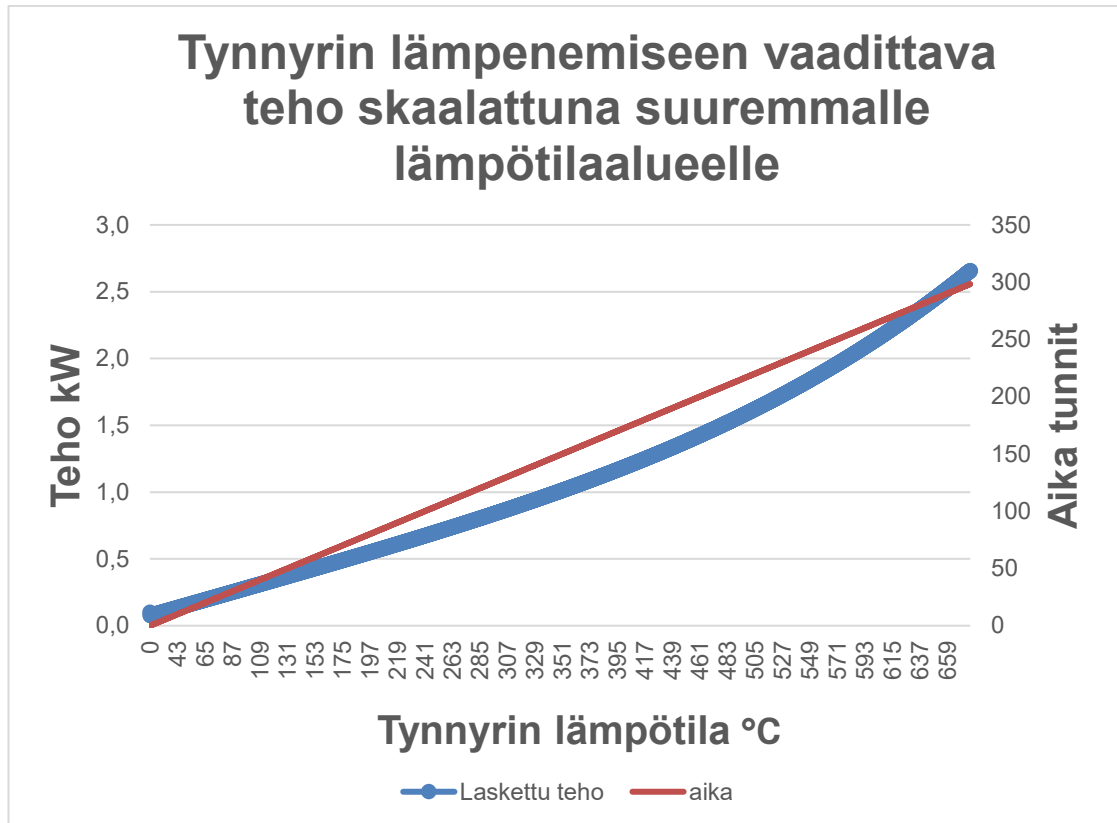
Tynnyrin lämmön noustessa, myös sen häviöt nousevat. Tynnyrin vaipan ulkopinnalle on siis määritettävä h tai U arvo, joka kertoo lämmönsiirtymisen tehokkuudesta johtumisen ja konvektion välityksellä tynnyrin vaipan ulkopinnasta laboratorioon $h * A * (T_{tynnyri} - T_{laboratorio})$. U/h arvo on muotoa W/m²K. (The Engineering ToolBox 2004.) Tässä tapauksessa arvon määrittäminen tehtiin myös tynnyriin tehtyjen kokeiden perusteella. Ensimmäisessä vaiheessa määritettiin tynnyrin hukateho. Hukateho saadaan, kun vähennetään tynnyriin menneestä energiasta, sieltä ulos saatu energia ja tämä jaetaan ajalla eli lämmitys ja jäähdytysyökin yhteenlasketulla ajalla. Tässä tapauksessa käytettiin myös testin 2 dataa. Tynnyriin meni yhteensä noin 14,6 MJ energiaa ja sieltä saatiin ulos noin 6,4 MJ energiaa. Näiden erotus 8,2 MJ on hukkaan mennyt lämpö, joka on vapautunut lämmitys ja jäähdytysyökin aikana. Näiden yhteenlaskettu kesto oli 1920 minuuttia. Hukatehoksi saadaan tällöin noin 71 W. Vaipan-ala laskettiin tynnyrin alkuperäisten piirustuksien mukaan, eli siinä on huomioitu vain osuus, jossa itse metallimassa sijaitsee. Alaksi saatiin 0,7 m². Todellisuudessa vaipanala eroaa piirustuksissa olevista, sillä tynnyrin

rakenne on hiukan erilainen alkuperäiseen malliin verrattuna. Todellista arvoa alalle ei tiedetä tynnyriin tehtyjen muutosten takia ja tästä ei ole olemassa myöskään tarkkoja piirustuksia. Tynnyrin lämpötilaero laboratorioon määritettiin jäähdetyssyklin tynnyrin aloituslämpötilan ja laboratorion lämpötilan erotuksen, sekä tynnyrin lopetuslämpötilan jäähdetyksen jälkeen ja laboratorion lämpötilan erotuksen, jolloin näistä otettiin keskiarvo. Keskimääräiseksi lämpötilaeroksi tynnyrin ja laboratorion välille saatiin 26,8 °C. Teho saatiin vähentämällä tynnyriin menneestä energiasta sieltä ulos saatu energia ja tämä jaettiin ajalla. Näiden tietojen pohjalta voidaan määrittää vaipalle lämmönsiirtokerroin. (The Engineering ToolBox 2004.)

$$h = \frac{w}{m^2 * K} = \frac{71 W}{0,7 m^2 * 26,8 °C} = 3,79 \frac{w}{m^2 * K} \quad (7)$$

Seuraavaksi laskennassa huomioidaan tynnyrin hukkaama lämpö ympäristöön lämpösäteilyn kautta. Hukkalämpösäteilyn laskennassa käytetään Stefan-Boltzmannin lakia $\varepsilon * \sigma * A * (T_{tynnyri}^4 - T_{laboratorio}^4)$. Laissa oleellista on emissiivisyys ε , joka on kappaleen lähettämän säteilyn määrä verrattuna täysin mustaan kappaleeseen. Mustalla tämä on 1, muilla pienempi. Suurilla heijastavuuksilla omaavilla kappaleilla emissiivisyys on tyypillisesti pieni. Tässä tapauksessa käytetään alumiinille tyypillistä emissiivisyys arvoa 0,1, sillä tynnyri on vuorattu eristevillalla, jossa on hyvin heijastava alumiininen ulkopinta. (Lienhard V & Lienhard IV. 2024, 545.)

Hukkalämpötilojen laskennassa on käytetty laboratorion lämpötilana 21 °C.



Kuva 23. Lämpötasapaino yhtälöllä skaalattu tynnyri 90,2 litran täytöllä.

Kuvassa 23 esitetty tynnyrin lämmitykseen tiettyyn lämpötilaan vaadittava lämmitysteho sekä tiettyyn lämpötilaan pääsemiseen vaadittu aika. Käyrä on laskettu alkuperäisissä piirustuksissa lasketun metallimassan tilavuuden mukaan eli 90,2 litraa. Massa on laskettu käyttämällä kaavassa 4 laskettua metallimassan tiheyttä 3040 kg/m^3 . Näin saadaan metallin massaksi 274,8 kg. Kuvaaja kuvaa tynnyriä sen kokeellisten todettujen lämmönsiirto ominaisuuksien mukaan suuremmilla lämpötila alueilla. Laskentaa on mahdollista skaalata eri metallin massamäärillä. Massamäärän lisäys lisää lineaarisesti tynnyrin vaipan pinta-alaa ja näin se vaikuttaa häviöiden laskentaan.

Taulukko 2. Tynnyri skaalattuna eri metallimassoille ja lämpötiloille.

274,8 kg Massa (laboratorion tynnyrin täyttö)						
Lämpötila °C	100	200	300	400	500	600
Lämmitysteho kW	0,3	0,6	0,8	1,2	1,6	2,1
Aika tunnit	36	81	127	172	218	263
400 kg Massa						
Lämpötila °C	100	200	300	400	500	600
Lämmitysteho kW	0,4	0,8	1,2	1,7	2,3	3,1
Aika tunnit	36	81	127	172	218	263
600 kg Massa						
Lämpötila °C	100	200	300	400	500	600
Lämmitysteho kW	0,6	1,2	1,9	2,6	3,5	4,7
Aika tunnit	36	81	127	172	218	263
800 kg Massa						
Lämpötila °C	100	200	300	400	500	600
Lämmitysteho kW	0,8	1,6	2,5	3,4	4,6	6,2
Aika tunnit	36	81	127	172	218	263
1000 kg Massa						
Lämpötila °C	100	200	300	400	500	600
Lämmitysteho kW	1	2	3,1	4,3	5,8	7,8
Aika tunnit	36	81	127	172	218	263
2000 kg Massa						
Lämpötila °C	100	200	300	400	500	600
Lämmitysteho kW	2,1	4,1	6,2	8,6	11,6	15,5
Aika tunnit	36	81	127	172	218	263

Taulukossa 2 kuvattuna tynnyrin lämpenemiseen vaadittava lämmitysteho lämpötila asteikolla 100–600 °C eri metallin massamäärillä. Laskennallisesti skaalattuna laboratorion tynnyri 274 kg täytöllä vaatisi 2,1 kW lämmitys tehon. Tällä saavutettaisiin 600 °C lämpötila. Kun massaa lähdetään lisäämään, niin vaadittu lämmitysteho nousee rajusti tynnyrin vaipan pinta-alan kasvaessa, joka aiheuttaa lämpöhäviötä. Esimerkiksi 2000 kg massalla ja 600 °C lämpötilassa, tynnyri vaatii jo 15,5 kW tehon. Tästä määrästä 14,9 kW menee pelkästään häviöihin. Nämä on laskettu kaavan 6 mukaan. Laskelma olettaa tynnyrin lämpötilan nousevan lineaarisesti 0,18 °C viiden minuutin aikana. Lämpötilan nousu on saatu laskemalla tynnyrin keskimääräinen lämpötilan muutos 5 minuutin aikana tynnyriin tehtyjen testien perusteella.

6.1 Tynnyriin mennyt energia ja sieltä ulos saatu energia eri lämpötiloilla ja täyttömäärillä.

Alla olevassa taulukossa 3 kuvattuna laskennalliset tulokset tynnyriin mentävästä ja sieltä ulos saatavasta energiasta. Tynnyriin mennyt energia on laskettu kuvion 15 mukaan eri täyttömäärille. Lämmitysenergian laskennassa on huomioitu lämmitystehton muutos tynnyrin lämmitessä ajansuhteen. Tynnyristä ulos saatu energia on laskettu massan lämpötilanmuutoksen ja raudan ominaislämpökapasiteetin 0,45 kJ/k*kg mukaan. Siinä ei ole mukana jäähtyöksessä tapahtuvia häviöitä.

Taulukko 3. Taulukossa kuvattuna tynnyriin syötetty energia ja tynnyristä saatava energia ulos.

Määrä kg	Tynnyri sisään/ulos saatu energia kWh					
	600–21	500–21	400–21	300–21	200–21	100–21
274,8	250/20	165/16	103/13	57/10	25/6	7/2,7
400	364/29	241/24	150/19	84/14	37/9	10/4
600	547/43	362/36	226/28	126/21	56/13	14/6
800	731/58	484/48	302/38	168/28	75/18	19/8
1000	914/73	605/60	378/47	210/35	94/22	24/10
2000	1829/145	1210/120	756/95	420/70	188/45	48/20

7. Loppupäätelmät

Metallimassan potentiaalinen käyttö lämpöä varaavana materiaalilla on mahdollista. LTO-järjestelmää suunnitellessa on tärkeää ottaa huomioon, kuinka suurta uunia ollaan uudelleen lämmittämässä maalausunista uudelleen käyttöön hyödynnetyllä lämmöllä. Metallimassan määrällä on tälle suuri vaikutus. Suuremmilla massa määrillä saadaan varastoitua huomattavasti enemmän energiaa massaan ja näin saadaan lämmitettyä suurempia kiinteistöjä.

Oleellista mahdollisesti käyttöön tulevasta LTO-järjestelmässä on eristäminen, sillä 600 °C lämpötilassa lämpöhäviöt ovat huomattavia, jos eristys on tehty puutteellisesti. Puutteellisella eristyksellä lämpö ohjautuu väärään paikkaan ja päätyy ei halutusti järjestelmää ympäröivään ympäristöön. LTO-järjestelmän lämmönsiirtimen termoteknisiin ominaisuuksiin on syytä kiinnittää huomiota. Laboratorio testien perusteella tynnyriin siirtynyt lämpö kiukaasta oli melko vähäistä. Mittauksiin perustuen järjestelmän alhaista 4 % hyötysuhdetta voidaan parantaa kehittämällä LTO-järjestelmään tehokkaampi lämmönsiirrin, jossa maksimoidaan lämmönsiirto pinta-ala, sekä saadaan ilma virtaukset mahdollisimman korkeiksi ja turbulenttisiksi. Lämmönsiirto pinta-alaa voidaan työstää esimerkiksi poimuiseksi, joka saa ilman pyörteiseksi tehostaen lämmön siirtoa. Myös LTO-järjestelmän lämmönsiirtimen materiaalin tulisi olla ominaisuuksiltaan sellainen, jossa on mahdollisimman hyvä lämmönjohtavuus ja lämmönsiirtimen materiaalin tulisi olla mahdollisimman ohutta ilman ja metallimassan välillä, kuitenkin niin paksua että siirtimen rakenne pysyy kasassa.

Tulevaa potentiaalista LTO-järjestelmän siirrintä ajatellen, olisi hyvä kenties käyttää saman tyyppistä putkien läpivienti rakennetta, mutta putket kiertävät siirtimessä jousimaisesti ja putket ovat ripaputkea, jolloin saadaan lämmönsiirto pinta-alaa kasvatettua huomattavasti. Putkien läpimitta tulisi olla myös mahdollisimman pieni, jolloin ilmavirtaukset putkissa kasvavat huomattavasti.

Tämä lisää myös painehäviötä järjestelmässä, jota voidaan ehkäistä sileällä putkimateriaalilla.

Lämmin kiitos Yap Jun Tingille testien suorittamisesta ULLEVI laboratoriossa.

Lähteet

Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2018. Ympäristöministeriö. Helsinki. Viitattu 6.10.2024.

https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81_75E1_4CA0_B208_B0ACB60A267F-133692.pdf

ULLEVI – Uutta liiketoimintaa lämpöenergian varastoinnista 2023. Turun ammattikorkeakoulu. Viitattu 17.10.2024.

<https://www.turkuamk.fi/fi/tutkimus-kehitys-ja-innovaatiot/hae-projekteja/ullevi-uutta-liiketoimintaa-lampoenergian-varastoi/>

Paul J. LaNasa & E. Loy Upp. 2014. Fluid flow measurement. ScienceDirect. Viitattu 13.1.2025. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/reynolds-number>.

Pukkila, O. 1986. Puhallintekninen käsikirja. Ilmateollisuus Oy. Viitattu 13.1.2025.

What is volume flow rate? n.d. Khan Academy. Viitattu: 24.1.2025.

<https://www.khanacademy.org/science/properties-of-matter-essentials/x56fba1647ecc4dbb:how-does-a-cricket-bowler-make-the-ball-swing/x56fba1647ecc4dbb:streamline-and-turbulent-flow/a/what-is-volume-flow-rate>

Onninen. n.d. Kanavapuhallin CK 125 C1 EC-Y2. Viitattu: 24.1.2025.

<https://www.onninen.fi/online-kanavapuhallin-online-ck-125-c1-ec-y2/p/CJG319>

Wibolo, A.; Made, A A I. & Sudirman, A A I. 2021. Experimental study of air velocity effect of heat transfer in distillation condenser. Iopscience. Viitattu: 24.1.2025. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1175/1/012014>

Boundary Layer and Promoting Turbulent Flow 2022. Conflux. Viitattu: 24.1.2025 <https://www.confluxtechnology.com/boundary-layer-and-promoting-turbulent-flow/>

ScienceDirect. Nusselt Number. Viitattu: 24.1.2025.

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nusselt-number>

Gnielinski Equation. Nuclear power. Viitattu: 24.1.2025. <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/convection-convective-heat-transfer/gnielinski-equation/>

Harvia. Ohjauskeskus Harvia C170VKK 17,0 kW valkoinen. viitattu: 12.3.2025. <https://www.harvia.com/fi/tuotteet/C170400VKK/c170vkk-170-kw-valkoinen>

SFS-EN 933-1. 2013. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Viitattu: 12.4.2025. <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/9/201534.html.stx#>

The Engineering ToolBox (2004). *Heat Transmission Loss through Building Elements*. Viitattu 10.9.2025 https://www.engineeringtoolbox.com/heat-loss-transmission-d_748.html

Lienhard V, J. & Lienhard IV, J. 2024. Heat Transfer Textbook. 6. Cambridge, Massachusetts, U.S.A. Viitattu: 10.9.2025. <https://ahtt.mit.edu/wp-content/uploads/2024/04/AHTTv600.pdf>

Access Science. Heat balance. 2020. Department of engineering science, University of Oxford. Viitattu:10.9.2025. <https://www.accessscience.com/content/article/a310400>

Energy-models n.d. Energy, Enthalpy, Sensible and Latent Heat. Viitattu 10.9.2025. <https://energy-models.com/training/13-energy-enthalpy-sensible-and-latent-heat>

Earthdata. N.d. Air Mass/Density. Viitattu 23.10.2025. <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/atmosphere/air-mass-density>

Jun Ting, J. 2025. Thermal energy storage with valorisation of industrial solid wastes. Internship Report. Département Génie Énergétique et Environnement. New Energy Research Center (NERC) Turku.