



Juho Pajanen

VALIMON AVAINPROSESSIEN HUKKA- LÄMPÖ

Tekniikka
2023

ALKUSANAT

Tahdon esittää alkusanoina kiitokset Alteams Oy: lle, joka antoi mahdollisuuden tämän opinnäytetyön tekemiseen. Kaikkein suurimmat kiitokset tahdon kuitenkin esittää Herralleni ja Vapahtajalleni Jeesukselle Kristukselle, johon uskon, ja joka on minua auttanut antaen voimia ja viisautta halki koko opinnäytetyö prosessin.

Laihialla 27.4.2023

Juho Pajanen

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Juho Pajanen
Opinnäytetyön nimi	Valimon avainprosessien hukkalämpö
Vuosi	2023
Kieli	suomi
Sivumäärä	40 + 4 liitettä
Ohjaaja	Shekhar Satpute

Tutkimuksen lähtökohtana on yrityksessä tunnistettu tarve energiatehokkuuden parantamiselle. Yritykselle on tehty kiinteistön energiatehokkuuteen keskittyvä energiakatselmus. Tuotantoprosesseja ei energiakatselmuksessa tarkasteltu. Opinnäytetyössä selvitetään hukkalämmön muodostumisen taustalla toimivat ilmiöt ja tutkitaan muodostuvan hukkalämmön määrää avainprosesseissa. Avainprosessit ovat sähkö- ja kaasusulatus ja valukoneiden jäähdytys.

Energiatehokkuutta voidaan parantaa vähentämällä ja hyödyntämällä hukkalämpöä. Hukkalämpö on sellaisessa prosessissa olennaisena osana muodostuvaa lämpöä, jossa tarkoituksena ei ole lämmön tuotanto. Energiatehokkuus on prosessiin laitetun energian ja ulos saadun hyödyn suhde. Tutkittavissa prosesseissa hukkalämmön muodostuminen perustuu kolmeen lämmön siirtymistapaan. Lämmön siirtymistavat ovat johtuminen, konvektio ja emittoituminen. Siirtyvän lämmön määrä tutkitaan laskennallisesti. Laskentaa varten mitataan painevalun jäähdytysjärjestelmän jäähdytysnesteiden ja kaasusulatuksen savukaasujen lämpötilat. Uuneista emittoituvan ja uunien sivujen läpi johtuvan lämmön laskemista varten mitataan uunien pintalämpötilat.

Tutkimuksen tuloksena havaittiin emittoituvan lämmön määrän olevan merkittävä. Lämpöä emittoitui suuret määrät etenkin yhdestä uunista. Tämä kertoo uunin olevan muita uuneja huonommassa kunnossa. Valukoneiden jäähdytyksessä ja kaasu-uunin savukaasuissa konvektoitui merkittävä määrä lämpöä. Jäähdytyksessä konvektoitui enemmän lämpöä, kuin kaasusulatuksessa, vaikka kaasusulatuksen lämpötilat ovat huomattavasti korkeampia. Tämä selittyy jäähdytysnesteiden ja savukaasujen tiheyden erolla.

ABSTRACT

Author	Juho Pajanen
Title	Waste heat from foundry key processes
Year	2023
Language	Finnish
Pages	40 + 4 Appendices
Name of Supervisor	Shekhar Satpute

Baseline for research is diagnosed need for improving energy efficiency in company. Energy audit focusing on factory's energy efficiency has been conducted for the company. Manufacturing processes weren't examined in the energy audit. Phenomenon behind waste heat generation will be researched and the amount of generated waste heat in key processes will be investigated in thesis. Key processes are melting by gas and electricity and cooling of the die casting machines.

Energy efficiency can be improved by reducing and utilizing waste heat. Waste heat is heat generated as an essential part of a process which purpose isn't heat generation. Energy efficiency is relation between energy put into a process and output of the process. Waste heat generation in key processes is based on three known ways of heat transfer. Heat transfer ways are conduction, convection and emission. The amount of transferred heat is studied computationally. For calculation, the temperatures of the coolants in die casting cooling system and the flue gases of gas melting are measured. Surface temperatures of the furnaces are measured for calculating the heat emitted from the furnaces and conducted through the sides of the furnaces.

As a result of the research, the amount of heat being emitted was found to be significant. Especially one of the furnaces was emitting a great amount of heat. This tells that the furnace is in worse condition than other furnaces. Amount of convected heat was significant from cooling system of the die casting machines and flue gasses of the gas melting. Cooling convected more heat than gas melting, even though the temperatures were noticeably higher in gas melting. This can be explained by the difference in densities of the coolants and flue gasses.

Keywords waste heat, energy efficiency, aluminum, foundry

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
1.1	Tutkimusasetelma.....	9
2	ALTEAMS ESITTELY	10
3	TIETO PERUSTA.....	12
3.1	Sulatus sähköllä.....	15
3.2	Sulatus kaasulla.....	19
3.3	Valukoneiden jäähditys.....	21
3.4	Ympäristöluvan vaatimukset	24
3.4.1	Seuranta	25
4	TUTKIMUS JA TIETO.....	26
5	TUTKIMUSMENETELMÄ.....	28
5.1	Datan keräys	28
5.2	Datan analysointi	30
6	YHTEENVETO	37
	LÄHTEET	39
	LIITTEET (SALAINEN).....	41

KUVIOLUETTELO

Kuva 1. Tutkimusasetelma.....	9
Kuva 2. Uuneista muodostuvat hukkalämpövirrat. Teollisuusuunien energiatehokkuus. Motiva Oy. 2015.....	133
Kuva 3. Energiatehokkuuden oheishyödyt. Motiva Oy. 2018.	155
Kuva 4. Sähkövastusupokasuunin rakenne.	177
Kuva 5. Kaasu-upokasuunin rakenne.....	200
Kuva 6. Painevalukoneiden jäähdytys.	233
Kuva 7. Uunin eristeiden läpi johtuva lämpö.	311
Kuva 8. Uunin pinnoilta emittoituva lämpö.	322
Kuva 9. Painevalun jäähdytysnesteiden mukana konvektoituva lämpö.	333
Kuva 10. Savukaasujen konvektio.....	355
Kuva 11. Propanin palamista havainnollistava kuva.....	366

LIITELUETTELO (SALAINEN)

LIITE 1. Uunin eristeiden läpi johtuva lämpö

LIITE 2. Uunin pinnoilta emittoituva lämpö

LIITE 3. Jäähdytyksen konvektio

LIITE 4. Kaasu-uunin savukaasujen konvektio

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan avainprosesseissa muodostuvaa hukkalämpöä. Tarkasteltavat avainprosessit ovat valumetallien kaasu- ja sähkösulatus ja paineva-lukoneiden jäähdytys. Työn lopputuloksena saadaan tietoja hukkaan menevästä lämmöstä.

Kappaleessa kaksi esitellään kohdeyritys, Alteams Laihia. Kappaleessa kaksi kerrotaan yrityksen toiminnasta, tuotantoprosesseista ja tehtaasta yleisesti. Kappaleessa kolme selitetään, miten hukkalämpö liittyy energiatehokkuuteen, esitellään avainprosessien toiminta ja hukkalämmön muodostuminen prosessikohtaisesti. Kappaleessa kolme tutustutaan yrityksen ympäristöluvan asettamiin vaatimuksiin ja ympäristöluvan mukaisen seurannan toteuttavaan tahoon. Kappaleessa neljä kerrotaan, mitä tietoa tutkimusta varten kerätään. Kappaleessa 5 kerrotaan opinnäytetyön tutkimustyyppi, datan keräykseen käytettävät menetelmät ja datan analysointi laskukaavoja käyttäen. Kappaleessa kuusi on yhteenveto tutkimuksesta. Kerätty data ja datan analysoinnista saadut tulokset ovat liitteissä 1, 2, 3 ja 4.

Tämä opinnäytetyö tehdään yritykselle pohjaksi, jonka perusteella yritys voi tehdä tulevaisuudessa energiatehokkuus toimenpiteitä prosessien energiatehokkuuden parantamiseksi. Yrityksessä on tunnistettu energiakatselmuksen perusteella tarve energiatehokkuuden parantamiselle. Energiakatselmuksen keskittyi yrityksen kiinteistön energiatehokkuuden tarkastelemiseen, tuotantoprosessit jäivät vähälle huomiolle. Tässä opinnäytetyössä keskitytään tuotantoprosessien tutkimiseen. Yrityksessä on tunnistettu suuri hyödyntämispotentiaali sulatuksen hukkalämmön hyödyntämisessä. Sulatuksessa syntyvän hukkalämmön määrää ei ole kuitenkaan tutkittu.

Alteams saa tästä opinnäytetyöstä perustan avainprosessien energiatehokkuuden parantamiseen tähtääville toimenpiteille. Yritys saa tietoa hukkalämmön muodostumisen taustalla toimivista ilmiöistä ja hukkalämmön laadusta ja määrästä avainprosesseissa.

1.1 Tutkimusasetelma

Opinnäytetyössä tutkitaan avainprosesseissa muodostuvan hukkalämmön määrää ja hukkalämmön muodostumisen taustalla toimivia fysiikan ilmiöitä jokaisen tunnistetun avainprosessin kohdalla. Tutkimuskysymykset ovat: miten hukkalämpö muodostuu ja miten paljon hukkalämpöä muodostuu. Muodostuvan hukkalämmön määrä tutkitaan keräämällä prosesseista tarvittavat tiedot ja suorittamalla tiettyjen prosessien kohdalla mittaukset ja laskemalla mittausjakson aikana muodostuvan hukkalämmön määrä. Kuva 1 havainnollistaa opinnäytetyön tutkimusasetelmaa.



Kuva 1. Tutkimusasetelma.

2 ALTEAMS ESITTELY

Alteams Group on valimokonserni, joka kuuluu Kuusakoski konserniin. Alteams Group syntyi 1985 Kuusakosken ostaessa sen aikaisen Laihian Metallin. Alteams Group on yksi suurimpia alumiiniosien valmistajia Euroopassa. Suomen lisäksi Alteams Group:lla on tehtaita Kiinassa, Puolassa ja Intiassa. Maailmanlaajuisesti Alteams Group: n henkilöstö määrä on yli 1 200. Alteams Group: n pääkonttori sijaitsee Laihialla. Alteams on osakeyhtiö, jonka toimiala on kevytmetallien valu. Alteams Group: n liikevaihto vuonna 2021 oli 17 518 000 €. Suomessa tehtaot sijaitsevat Laihialla ja Lopella. Alteams valmistaa kevytmetallituotteita alumiinista.

Laihian tehtaan ja Alteams Groupin toiminta on ISO 9001- ja ISO 14001 -sertifioitua. Lisäksi Alteams Group:lla on autoteollisuuden toimijoilta vaadittu IATF 16949 -sertifiointi.

Alteams Laihian tehdas sijaitsee kirkonkylän alueella Laihian joen vieressä. Valimon lähellä on asutusta ja muuta toimintaa. Asemakaavassa alue on varattu teollisuustoiminnalle. Laihian tehdasalueeseen kuuluu tehdashalli ja erillinen varasto-tila. Tehtaan alueella on ollut valimotoimintaa jo 1960- luvulta lähtien.

Laihian tehtaalla henkilöstöä on noin 120. Henkilöstö on koulutettua ja Alteams Laihia järjestää työntekijöille täsmäkoulutuksia eri työtehtäviin, kuten jäystöön ja sulatukseen. Laihian tehtaan toimihenkilöiden osaamista ylläpidetään esimerkiksi lean six sigma -koulutuksilla.

Laihian tehdasta on laajennettu kahteen kertaan. Tehdasta laajennettiin ensimmäisen kerran 1972 ja toisen kerran 2001, jolloin rakennettiin konepajan puoli. Laihian tehtaan prosesseja ovat valumetallien sulatus sähköllä ja kaasulla, paine-valu, matalapainevalu, koneistus, kitkahitsaus, impregnointi ja tuotteiden jälkikäsittely. Alteams Laihian tärkeimmät asiakkaat ovat erilaisia autoteollisuuden toimijoita, kuten Inmotion Technologies, Jenbacher ja Valmet Automotive. Laihian tehdas on ympäristönsuojelulain mukainen direktiivilaitos, muu valimo tai sulatto,

jonka sulatuskapasiteetti on enintään 20 tonnia vuorokaudessa, mutta vähintään 200 tonnia vuodessa. Laihian tehtaalla käytetään alumiinia vuodessa noin 800 tonnia, määrä vaihtelee tilauskannan mukaan. Laihian tehtaalle alumiini toimitetaan Norjasta, jossa alumiini jalostetaan käyttäen vesivoimaa.¹

¹ Yrityksen energiakatselmus Alteams Oy. 2022. Caverion. Viitattu 2.3.2023

3 TIETO PERUSTA

Hukkalämmöllä tarkoitetaan sitä lämpöä, joka poistuu tehtaasta lämpöenergiavirtana savukaasujen, jäähdytysvesien ja poistoilmojen kautta. Hukkalämpö muodostuu oleellisena osana jotakin prosessia, jonka ensisijaisena tarkoituksena ei ole lämmön tuotanto. Teollisuuden monissa prosesseissa muodostuu lämpöä sivutuotteena. Teollisuudessa käytetystä energiasta 37 % päätyy hukkalämmöksi. Teollisuudessa muodostuu hukkalämpöä 54 TWh vuodessa. Tämä hukkalämpö kulkeutuu teollisuuslaitoksesta pois jäte- ja jäähdytysvesien, prosessi- ja savukaasujen ja prosessien höyryjen mukana. Hukkalämpöä poistuu myös pintojen lämpösäteilyn ja materiaalien läpi johtumisen kautta. ²

Valimoteollisuudessa hukkalämmön muodostuminen on suurta. Hukkalämmön lämpötila voi olla korkea tai matala. Korkealämpöistä hukkalämpöä muodostuu useissa prosesseissa, kuten metallien sulatuksessa ja itse valu prosessissa. Näissä muodostuvan hukkalämmön lämpötila on korkea. Lähes puolet sulatukseen laite-
tusta energiasta päätyy hukkalämmöksi.

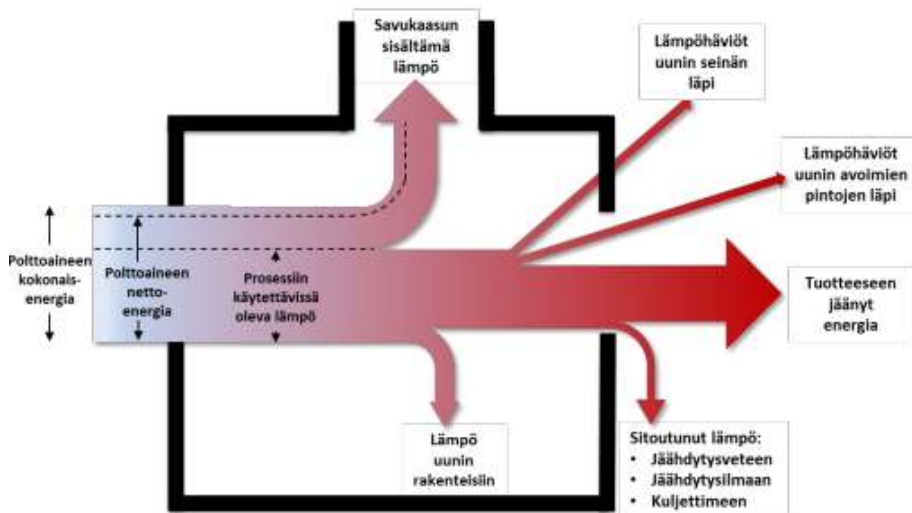
Matalalämpöistä hukkalämpöä muodostuu esimerkiksi valaistuksesta, ja ilmastoinnista. Suuri määrä hukkalämpöä muodostuu prosessien jäähdytysvesistä, uunien palokaasuista ja uunien pintojen lämpösäteilystä. Metallien jalostuksessa hukkalämmön tekninen hyödyntämispotentiaali yli 55 °C lämpötiloissa on 2,0 TWh/a. Alle 55 °C lämpötiloissa tekninen hyödyntämispotentiaali on 0,9 TWh/a. ³

Uunien hukkalämpö poistuu uunista konvektoitumalla uunin savukaasujen mukana, johtumalla uunin seinämien läpi ja emittoitumalla uunin pinnoilta. Uuneissa

² Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Motiva Oy. 2013. Viitattu 17.1.2023. https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf

³ Esiselvitys – Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. Motiva Oy. 2019. Viitattu 17.1.2023. https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf

hukkalämpöä muodostuu myös sitoutumalla uunin rakenteisiin. Kuvassa 2 on esitetty uuneista muodostuvia hukkalämpövirtoja.⁴



Kuva 2. Uuneista muodostuvat hukkalämpövirrat. Teollisuusuunien energiatehokkuus. Motiva Oy. 2015.

Prosessiin laitetusta energiasta 20–50 % menetetään hukkalämpönä jäähdytysvesien mukana. Suurin osa teollisuuden käyttämien vesien hukkalämmöstä on peräisin prosessien jäähdytyksestä. Jäähdytysvedet sisältävät suuren määrän energiaa lämpönä. Tämä energia menee lähes aina hukkaan.⁵ Jäähdytysvedet, joiden lämpötila on alle 100 °C, ovat matalalämpöisiä hukkalämmön lähteitä. Matalalämpöisten jäähdytysvesien hukkalämpö on hankalasti hyödynnettävissä alhaisen lämpötilan takia.⁶

⁴ Teollisuusuunien energiatehokkuus. Motiva Oy. 2015. Viitattu 18.1.2023. https://www.motiva.fi/files/12180/Teollisuusuunien_energiatehokkuus.pdf

⁵ Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Motiva Oy. 2013. Viitattu 17.1.2023. https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf

⁶ Yang, L., Ren, Y., Wang, Z., Hang, Z. & Luo, Y. 2021. Simulation and Economic Research of Circulating Cooling Water Waste Heat and Water Resource Recovery System. *Energies*. Viitattu 19.1.2023. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/9/2496>

Hukkalämmön hyödyntämisessä ensimmäinen vaihe on tunnistaa, mistä hukkalämpöä muodostuu ja miten paljon. Prosessien hukkalämmön hyödyntäminen on yksi keskeisimpiä keinoja energiatehokkuuden parantamisessa. Energiatehokkuudella tarkoitetaan prosessiin laitettun energian määrän ja prosessista saadun tuotteen suhdetta. Energiatehokkuuden parantamisen tarkoitus on siis tuottaa samalla energian määrällä enemmän tuotetta tai sama tuote vähemmällä energialla.⁷ Energiatehokkuuden parantamisella on useita eri hyötyjä yritykselle. Hyötyjä ovat energiakustannusten pienentyminen, tuottavuuden nousu ja sähkön huippukulutuksen pienentyminen. Kuvassa 3 on energiatehokkuuden parantamisella saavutettavia hyötyjä.⁸

⁷ Answer given by Mr Oettinger on behalf of the Commission. P-000887/2011. Euroopan Parlamentti. 2011. Viitattu 21.1.2023. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/P-7-2011-001887-ASW_EN.pdf

⁸ Energiatehokkuuden oheishyödyt yrityksissä – Selvitys. Motiva Oy. 2018. Viitattu 23.1.2023. https://www.motiva.fi/files/15389/Energiatehokkuuden_oheishyodyt_yrityksissa.pdf



Kuva 3. Energiatehokkuuden oheishyödyt. Motiva Oy. 2018.

Hukkalämmön muodostumisen kannalta avainprosesseja ovat ne, joissa hukkalämmön lämpötila on korkein ja sitä muodostuu eniten ja joita ilman valimo ei voi toimia.

3.1 Sulatus sähköllä

Sulatus on valimon prosesseista energiantensiivisin ja myös hukkalämmön kannalta avainprosessi. Yrityksellä on käytössä viisi sähköllä toimivaa sulatusuunia.⁹

Sähkövastuksilla toimivilla sulatusuuneilla sulatetaan tarvittava metalli paine- ja matalapainevalukoneille.

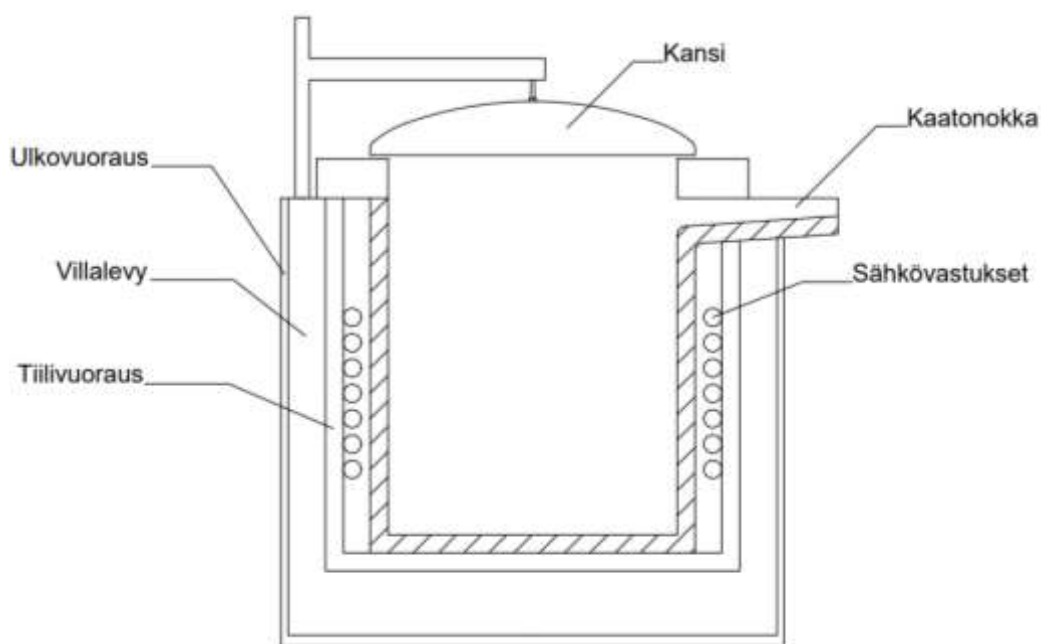
⁹ Pocola, A., Serban, A. & Balan, M. 2017. Complex and Efficient waste heat recovery system in aluminum foundry. Energy Procedia. Viitattu 17.1.2023. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1876610217312596?to-ken=B9942662721E0981B04E3A53590C66B887D360DE38EB60E1E4A5367515E03629DB7E3FDE484D77A359CE03B07255DE38&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230120074743>

Yrityksen sähköuunit ovat sähkövastusupokasuuneja (kuva 4). Upokkaiden materiaalina on piikarbidi, joka on hyvin lämpöä johtavaa materiaalia. Upokkaan lämmön johtavuus on 0,43–0,47 W/(mK). Upokasta vasten ovat sähkövastukset. Sähkövastuksien jälkeen on kaksi eristävää kerrosta. Sisempi eristävä kerros koostuu tulitiilistä. Ulompi eristävä kerros koostuu villalevyistä. Ulomman eristävän kerroksen jälkeen uunissa on himmeästä teräksestä koostuva ulkokuoraus. Kuvassa 4 on sähkövastusupokasuunin rakenne. Uunissa on laitteisto uunin kallistamista varten. Sähkövastukset muuttavat sähköenergian lämpöenergiaksi, joka johtuu upokkaan läpi metalliin sulattaen sen.¹⁰ Johtuminen tarkoittaa lämmön siirtymistä kuumemmasta kylmempään jonkin aineen kautta.¹¹

Sulatettava metalli lisätään uuniin kannen alla olevan aukon kautta. Kannen tulisi olla auki vain lisättäessä metallia uuniin. Muutoin kannen tulee olla suljettu lämpöhäviöiden ja työturvallisuuden vuoksi. Uuneissa pidetään vakio määrä sulaa. Uunit kaadetaan tyhjäksi vain huollon yhteydessä. Huollossa upokkaasta poistetaan sinne kertynyt kuona. Upokkaaseen kertynyt kuona toimii eristeenä hidastaen lämmön johtumista sulatettavaan metalliin. Sulaa metallia uuniin mahtuu kerrallaan 500 kg. Uuniin lisätään sulatettavaa metallia niin paljon kuin kerrallaan mahtuu. Monesti uuni pakataan niin täyteen, ettei uunin kansi mene enää kiinni. Sula metalli siirretään manuaalisesti valukoneille. Siirtämistä varten sula metalli kaadetaan uunia kallistamalla kuljetussenkkaan. Uuni on varustettu kaatonokalla ja kallistavalla koneistolla kaatamista varten. Sulaa täynnä oleva kuljetussenkka kuljetetaan trukilla valukoneelle.

¹⁰ Keskinen, R. & Niemi, P. 2011. Vastusupokasuunit. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Viitattu 17.1.2023. <https://www.valuatlas.fi/tietoaineistot/valumetallien-sulatus/vastusupokasuunit/>

¹¹ Inkinen, P. & Tuohi, J. 1999. Momentti 1 Insinöörifysiikka. 4.-11. painos. Helsinki. Otava. Viitattu 28.1.2023



Kuva 4. Sähkövastusupokasuunin rakenne.

Hukkalämmön lähteenä sähkövastusupokasuunit ovat suuri. Uunit ovat ikääntyneitä, eikä uunien käyttö ole mahdollisimman tehokasta. Lämpöä johtuu uunin rakenteiden läpi eristeistä huolimatta. Lämmön johtumista ja hukkalämmön muodostumista lisäävät uunien rakenteelliset viat. Rakenteellisia vikoja ovat halkeamat eristeissä tai uunin puutteellinen eristys. Uunin rakenteiden läpi johtunut lämpö emittoituu työympäristöön lämpösäteilynä uunin pinnoilta. Emittoitumisessa kappaleen pinnalta lähtee sähkömagneettista säteilyä. Uunin seinämien kautta tapahtuvat lämpöhäviöt ovat alle 10 % uunin kokonaiskulutuksesta. Yrityksen sähköuunit ovat kuitenkin vanhoja, joten tämä osuus voi olla suurempi uuni kohtaisesti. Eristyksessä kansi on uunin heikoin kohta. Kannen rakenne ja eristys on muuta uunia ohuempi.¹²

¹² Teollisuusuunien energiatehokkuus. Motiva Oy. 2015. Viitattu 18.1.2023. https://www.motiva.fi/files/12180/Teollisuusuunien_energiatehokkuus.pdf

Hukkalämpöä muodostuu enemmän, jos uunia ei käytetä järkevästi. Yrityksen tapauksessa uunin ei järkevää käyttöä on täyttää uunin niin täyteen sulatettavaa metallia, ettei uunin kantta pystytä enää sulkemaan. Uunista emittoituu enemmän lämpöä kannen ollessa auki kuin kannen ollessa kiinni. Sulattaminen uunin kansi auki lisää siis hukkalämmön muodostumista. Sulattaminen kansi auki aiheuttaa hukkalämmön lisäksi muitakin haittoja. Kansi auki sulattaminen aiheuttaa epäta-saisen lämmön jakautumisen uunin sisällä ja sen kautta voi vaikuttaa lopputulok-sen laatuun.¹³

Sähköuunit ovat yrityksen uuneista energiatehokkaimpia. Kaasu-uunista konvek-toituu suuri määrä lämpöä kuumien palokaasujen mukana. Konvektioituminen on lämmön siirtymistä, jonkin virtaamaan pääsevän väliaineen kautta. Konvektiossa virtaava väliaine kuljettaa lämmön toiseen paikkaan. Vaikka sähköuuneissa ei ta-pahdu paloprosessia, lämpöä konvektioituu virtaavan ilman mukana pois kannen ja kaatonokan kautta. Tämä on kuitenkin vähäisempää kuin kaasu-uunien poisto-kaasut. Sähköuunit ovatkin kaasu-uuneja energiatehokkaampia. Lämmön poistu-miseen ilman mukana vaikuttaa sähköuuneissa kannen auki pitäminen. Lämpöä pääsee virtaamaan ilman mukana uunista enemmän pois kannen ollessa auki kuin kannen ollessa kiinni.¹⁴

Sähköuunien hukkalämmön muodostumisen taustalla toimivat ilmiöt ovat siis joh-tuminen, emittoituminen ja konvektio. Lämpö johtuu rakenteiden läpi ja sen jäl-keen emittoituu työ ympäristöön sähkömagneettisena säteilynä uunin pintojen

¹³ Keskinen, R. & Niemi, P. 2011. Vastusupokasuunit. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Viitattu 17.1.2023. <https://www.valuatlas.fi/tietoaineistot/valumetallien-sulatus/vastusupokasuunit/>

¹⁴ Keskinen, R. & Niemi, P. 2011. Vastusupokasuunit. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Viitattu 17.1.2023. <https://www.valuatlas.fi/tietoaineistot/valumetallien-sulatus/vastusupokasuunit/>

kautta. Lämpöä konvektoituu kannen ja kaatonokan kautta virtaavan ilman mukana. Konvektoituminen sähköuunien tapauksessa on kuitenkin vähäistä.

3.2 Sulatus kaasulla

Sähköupokasuunien tapaan yrityksen käyttämä kaasu-uuni on upokasuuni. Kaasu-uuneja on käytössä yksi ja sillä sulatetaan metallia matalapainevalukoneille.

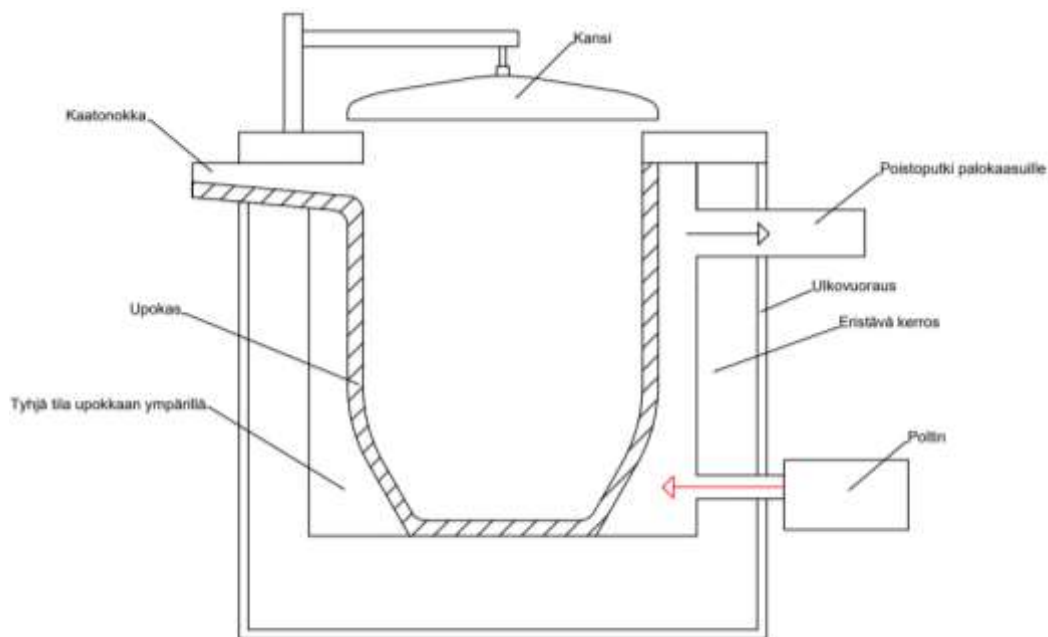
Kuvassa 5 on kaasu-upokasuunin rakenne. Kaasu-uunissa käytetään piikarbidi upokasta, joka on hyvin lämmön johtavaa materiaalia. Upokkaan lämmön johtavuus on 0,43–0,47 W/(mK). Kaasu-uunissa on vain yksi eristävä kerros, joka koostuu tiilivuorauksesta. Kaasu-uunissa on upokkaan ja eristävän kerroksen välissä tyhjä tila, jossa ilma ja savukaasut mahtuvat virtaamaan. Eristävien kerrosten jälkeen on himmeästä teräksestä koostuva ulkovuoraus. Uunin poltin on sijoitettu uunin alosaan. Uunin poistoputki on uunin yläosassa. Poistoputken kautta uunin savukaasut ohjataan pihalle.¹⁵

Metalli sulatetaan kaasu-uunissa polttamalla propaania. Propaani poltetaan polttimella. Kaasu johdetaan säiliöstä polttimeen putkea pitkin. Polttimen liekki on suunnattu upokkaan sivuun. Polttimen sijoituksen vuoksi kuumat savukaasut nousevat ylöspäin upokkaan ja uunin seinien välissä. Kuumat savukaasut kiertävät noustessaan upokasta, lämmittäen sulatettavaa metallia matkallaan kohti poistoputkea. Savukaasut saavat aikaan metallin tasaisemman lämpenemisen. Kaasuliekin ja savukaasujen lämpö johtuu metalliin upokkaan läpi. Propaaniliekin lämpötila on 1 000 °C. Sula metalli ja savukaasut eivät pääse kosketuksiin toistensa

¹⁵ Keskinen, R. & Niemi, P. Upokasuunit. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. 2011. Viitattu 17.1.2023. <https://www.valuatlas.fi/tietoaaineistot/valumetallien-sulatus/upokasuunit/>

kanssa. Uuni on päällä koko ajan paitsi huoltokatkojen aikana. Kaasu-uuni on sähköuunien tapaan kallistettava. Kaasu-uunissa on koneisto uunin kallistamista varten.¹⁶

Sähköuunien tapaan kaasu-uuniin lisätään sulatettava metalli uunin päällä olevan aukon kautta. Uunin päällä oleva aukko on suljettu kannella.



Kuva 5. Kaasu-upokasuunin rakenne.

Kaasu-uunin suurin hukkalämmön lähde ovat savukaasut. Lämpöenergia konvektoituu savukaasujen mukana ulos. Hukkalämmön muodostumista ei voida välttää sulatettaessa alumiinia kaasulla. Savukaasut eivät ole kaasu-uunissa ainoa hukkalämmön lähde. Uunin tulenkestävät rakenteet varastoivat itseensä lämpöä. Uunin rakenteiden läpi johtuu lämpöä ja uunin pinnat emittoivat lämpöä sähköuunien

¹⁶ Environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. International Journal of Thermofluids. Viitattu 17.1.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202719300072>

tapaan.¹⁷ Uunin lämpövuodot lisäävät hukkalämmön muodostumista. Uunin kannen ja kaatonokan kautta virtaavan ilman mukana uunista konvektoituu lämpöä. Tämä on kuitenkin vähäistä verrattuna savukaasujen mukana konvektoituvaan lämpöön. Sähköuunien tapaan, uunin eristyksen heikoin kohta on uunin kansi. Kannen rakenne ja eristys ovat muuta uunia ohuempia.¹⁸

Uunin vääränlainen käyttö lisää hukkalämmön muodostumista. Uuni täytetään useasti niin täyteen sulatettavaa metallia, ettei uunin kantta saada suljettua. Avoin uunin kannen kautta lämpöä konvektoituu ilmavirtauksen mukana. Lämpöä emittoituu uunista enemmän kannen ollessa auki, kuin kannen ollessa kiinni. Kaasu-uunin vääränlainen käyttö lisää siis hukkalämmön muodostumista samoin kuin sähköuunin vääränlainen käyttö.

Kaasu-uunin hukkalämmön muodostumisen taustalla toimivat ilmiöt ovat johtuminen, emittoituminen ja konvektoituminen. Suurin osa hukkalämmöstä muodostuu konvektoitumalla palokaasujen mukana. Uunin rakenteiden läpi johtuu lämpöä, joka emittoituu uunin pinnoilta työympäristöön.

3.3 Valukoneiden jäähdytys

Jäähdytettäviä koneita ovat yrityksen painevalukoneet. Koneiden jäähdytys tapahtuu jäähdytysjärjestelmällä. Kuvassa 6 on jäähdytysjärjestelmän rakenne. Jäähdytysnesteellä tarkoitetaan sitä nestettä, joka kiertää koneiden suljetussa kierrossa sitoen itseensä lämpöä koneista. Jäähdytysnesteinä toimii vesi. Valukoneista

¹⁷ Keskinen, R. & Niemi, P. 2011. Vastusupokasuunit. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Viitattu 17.1.2023. <https://www.valuatlas.fi/tietoaineistot/valumetallien-sulatus/vastusupokasuunit/>

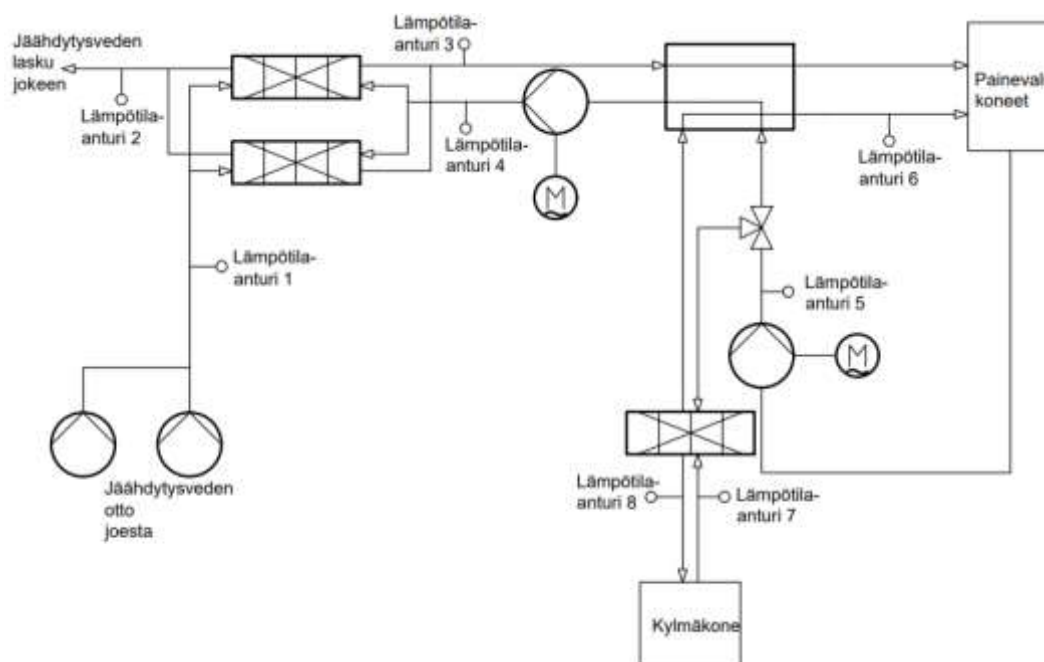
¹⁸ Teollisuusuunien energiatehokkuus. Motiva Oy. 2015. Viitattu 18.1.2023. https://www.motiva.fi/files/12180/Teollisuusuunien_energiatehokkuus.pdf

jäähdytysneste kiertää lämmönvaihtimille. Lämmönvaihtimet toimivat lämmönvaihtopinnoilla. Lämmönvaihtimille otetaan kylmää vettä vieressä virtaavasta Laihian joesta. Jokivesi sitoo itseensä jäähdytysnesteestä lämpöä. Lämmennyt jokivesi lasketaan takaisin Laihian jokeen. Jokivesikierron vesi ja valukoneiden sisäsenkierron jäähdytysneste eivät sekoitu keskenään.

Koneiden sisäisen kierron ja jokivesikierron lämpötilaa seurataan lämpötila-antureilla. Jokiveden virtauksen seuraamiseen ei ole mittareita. Virtaama nähdään vettä kierrättävän pumpun valmistajan tarjoamasta materiaalista. Materiaalissa on pumpun taajuutta vastaava vesimäärä, jonka pumppu siirtää. Virtaama määritetään pumpun taajuuden perusteella. Taajuuden seuraaminen on mahdollista paikan päällä konehuoneessa. Mittarien lukemista varten on lämmönvaihtinkonehuoneessa taulu, josta nähdään tarkemmin prosessin eri vaiheen lämpötilat, paineet ja pumpun käyntitaajuus. Kuvassa 5 nähdään lämpötila-antureiden sijainti jäähdytysjärjestelmässä. Joesta otettavan veden lämpötilaa seurataan lämpötila-anturilla 1. Jokeen laskettavan veden lämpötilaa seuraa anturi 2. Lämmönvaihtimilta painevalukoneille lähtevän nesteen lämpötilaa seurataan anturilla 3. Painevalukoneilta lämmönvaihtimille tulevan nesteen lämpötilaa seurataan anturilla 4. Lämpötila-antureilla 5, 6, 7 ja 8 seurataan kylmäkoneen kierron lämpötiloja.

Painevalukoneita jäähdytetään myös erillisellä tehtaan tilojen ulkopuolella olevalla jäähdytinkoneella "kylmäkoneella" (kuva 6). Valukoneiden ja kylmäkoneen välissä on lämmönvaihdin. Kylmäkoneella ja valukoneilla on kummallakin oma suljettu kierto. Kylmäkoneen kierrossa jäähdytysnesteinä toimii glykoliseos. Kylmäkoneessa on sisäänrakennettu ohjaus- ja automaatiojärjestelmä, joka säätelee koneen toimintaa pitäen kylmäkoneesta tulevan nesteen lämpötilan vakiona. Kylmäkone jäähdyttää valukoneita poistaen jäähdytysnesteestä lämpöä ulkoilmaan. Kylmäkoneelta lämmönvaihtimelle tulevan ja lämmönvaihtimelta kylmäkoneelle menevän nesteen lämpötilaa seurataan lämpötila-antureilla. Lämpötila-antureilla seurataan myös valukoneilta lämmönvaihtimelle tulevan ja lämmönvaihtimelta

valukoneille lähtevän nesteen lämpötilaa. Lämpötila-anturilla 5 seurataan valukoneilta lämmönvaihtimelle tulevan nesteen lämpötilaa. Anturilla 6 seurataan lämmönvaihtimelta valukoneille menevän nesteen lämpötilaa. Anturilla 7 seurataan kylmäkoneelta lämmönvaihtimelle tulevan glykoliseoksen lämpötilaa. Anturilla 8 seurataan lämmönvaihtimelta kylmäkoneelle tulevan glykoliseoksen lämpötilaa.



Kuva 6. Painevalukoneiden jäähdytys.

Jäähdytysjärjestelmä on dokumentoitu. Dokumentoinnissa on lueteltu kaikki järjestelmän osat. Piirroksista käy ilmi mitta-antureiden sijoitukset, pumput, venttiilit, lämmönvaihtimet ja säiliöt. Dokumentaatiosta käy myös ilmi kylmäkoneen jäähdytysnesteen ominaislämpökapasiteetti ja tiheys. Kylmäkoneen jäähdytysnestekierron tilavuusvirta ja koneen jäähdytysteho on myös dokumentoitu.

Jäähdytysjärjestelmässä lämpöä ei juurikaan johdu. Emittoituminen on vähäistä. Jäähdytysjärjestelmän hukkalämpö muodostuu suurimmilta osin pakotetulla konvektiolla glykoliseoksen ja jokiveden mukana. Pakotettu konvektio tarkoittaa ko-

neellisesti tehostettua tai aikaansaattua virtausta. Jäähdytysjärjestelmässä nesteen kierto ei perustu luonnollisiin tiheyden tai lämpötilan eroihin vaan pumpuilla aikaansaatuun virtaukseen.¹⁹

3.4 Ympäristöluvan vaatimukset

Ympäristöluvan yritykselle on myöntänyt sen aikainen Länsi-Suomen Ympäristökeskus, nykyinen ELY-keskus. Yritys tarvitsee ympäristöluvan ympäristönsuojelulain 28§: n nojalla. Ympäristölupa on myönnetty 2004.

Ympäristölupa velvoittaa yritystä seuraamaan jäähdytysveden virtaamaa ja lämpötilan nousua. Ympäristöluvassa on määrätty jäähdytysveden virtaamalle enimmäismäärä, jota yrityksen ei saa ylittää. Ympäristöluvan mukaan yrityksellä on lupa ottaa Laihian joesta jäähdytysvettä enintään 100 m³/h. Lämpimiä jäähdytysvesiä yritys saa laskea Laihian jokeen enintään 100 m³/h, kun jäähdytysveden lämpötilannousu on enintään 2,7 °C. Luvassa on määrätty jokeen päätyvälle lämpimälle jäähdytysvedelle suurin hyväksyttävä lämpökuorma. Suurin hyväksyttävä lämpökuorma on 11 kJ/l.

Yritys on veloitettu tarkkailemaan Laihian jokeen laskettavan jäähdytysveden määrää, jäähdytysveden lämmönnousua ja lämpökuormaa. Tulokset yritys raportoi Etelä-Pohjanmaan ELY-keskukselle.²⁰

¹⁹ Inkinen, P. & Tuohi, J. 1999. Momentti 1 Insinöörfysiikka. 4.-11. painos. Helsinki. Otava. Viitattu 28.1.2023

²⁰ Ympäristölupapäätös 0801Y4115-111. Länsi-Suomen Ympäristökeskus. 2004. Viitattu 16.1.2023. [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa/Entisen_LansiSuomen_ymparistokeskuksen_y\(26313\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa/Entisen_LansiSuomen_ymparistokeskuksen_y(26313))

3.4.1 Seuranta

Seurannan yritykselle toteuttaa kuukausittain ulkopuolinen yritys, Tenospa Ky. Jokivesilämpötilan seurannan lisäksi Tenospa tekee yritykselle kiinteistöjen ja koneiden korjaus-, huolto- ja asennustoimenpiteitä. Tenospa on hoitanut yrityksen tiloja perustamisestaan, vuodesta 2018 lähtien.

Tenospa on perustettu 2018. Kokemusta alalta on kuitenkin jo vuodesta 1986 lähtien. Tenospa on teollisuuden kunnossapitopalveluihin erikoistuva yritys. Teollisuuden kunnossapitopalveluiden lisäksi Tenospa tarkastaa ja huoltaa henkilönostimia ja korjaa ja huoltaa perävaunuja. Katsastuspalveluihin Tenospalla on henkilösertifikaatti. Näiden lisäksi Tenospalla on useita eri henkilönostimia ja muita koneita ja laitteita, joita se vuokraa.

4 TUTKIMUS JA TIETO

Tutkimusta varten kerätään tarvittavat tiedot prosesseista. Tietojen keräämistä varten on tunnistettu hukkalämmön muodostumisen taustalla toimivat ilmiöt. Tunnistettuja hukkalämmön muodostumisen aiheuttavia ilmiöitä on kolme. Hankittavat tiedot perustuvat näihin kolmeen lämmönsiirtymistapaan, jotka ovat johtuminen, konvektio ja emittoituminen. Näiden lämmönsiirtymistapojen pohjalta kerätään tarvittavat tiedot, jotta voidaan laskemalla selvittää muodostuvan hukkalämmön määrä prosesseittain.

Uunien seinämien läpi siirtyy lämpöenergiaa johtamalla eristekerrosten läpi. Tämän siirtyvän lämmön määrän selvittämiseksi tarvittavia tietoja ovat uunin sivujen pinta-alat, uunin sisälämpötila, uunin pinnan lämpötila, tiilivuorauksen ja villallevyn paksuus ja eristeiden lämmönjohtokertoimet. Eristeiden läpi uunin pintoihin johtunut lämpö saa aikaan uunin pintojen lämpötilan nousemisen, tällä on vaikutus seuraavaan ilmiöön, emittoitumiseen.

Uunien eristeiden läpi johtunut lämpö emittoituu sähkömagneettisena säteilyä uunin pinnoilta tehtaan työympäristöön. Emittoituvan lämmön määrän selvittämistä varten tarvittavia tietoja ovat uunin pinta materiaalin emissiivisyys, Stefan-Boltzmannin vakio, uunin sivun pinta-ala, uunin pinnan lämpötila ja tehtaan lämpötila. Emissiivisyys on materiaali kohtainen suhdeluku, joka ilmaisee kappaleen emittoivan säteilyn määrän. Emissiivisyys on välillä 0–1. Nämä tiedot tarvitaan tehtaan työympäristöön emittoituvan sähkömagneettisen lämpösäteilyn laskemista varten. Uuneista emittoituva lämpösäteily on tehtaan ”sisäistä” hukkalämpöä.

Painevalun jäädytyksessä hukkalämpöä muodostuu konvektiolla. Tämä on kaasuuunin tapaan tehtaan ulkopuolelle kulkeutuvaa hukkalämpöä. Painevalun jäädytyksessä siirtyvän lämmön määrän laskemista varten tarvittavat tiedot ovat jokiveden ja glykoliseoksen tiheydet. Jokivesikierron ja kylmäkoneen kierron tilavuusvirta. Jokiveden ja glykoliseoksen ominaislämpökapasiteetit. Lämmönvaihtimilta

tulevan lämmentyneen jäähdytysnesteen lämpötila ja lämmönvaihtimille palaavan kylmän jäähdytysnesteen lämpötila.

Kaasu-uunista hukkalämpöä muodostuu konvektoitumalla. Tämä on tehtaan ulkopuolelle kulkeutuvaa hukkalämpöä. Kaasu-uunin konvektiolla siirtyvän lämmön laskemiseksi tarvitaan savukaasujen ominaislämpökapasiteetit, savukaasujen lämpötila piipun päässä, prosessiin syötetty lämpötila, eli propaanin palamislämpötila, mittauksen aika, palaneen propaanin massa ja muodostuneiden savukaasujen massa. Mittauksen aikana muodostuneiden savukaasujen massa lasketaan mittauksen aikana palaneen propaanin massan ja palamisen reaktioyhtälön avulla.

5 TUTKIMUSMENETELMÄ

Tämä opinnäytetyö on luonteeltaan kvalitatiivinen tutkimus vastattavien kysymysten vuoksi. Miten hukkalämpö muodostuu? Miten paljon hukkalämpöä muodostuu? ²¹ Kysymyksillä pyritään siis ymmärtämään hukkalämmön takana toimivaa ilmiötä, että voidaan selvittää muodostuvan hukkalämmön määrä. ²²

5.1 Datan keräys

Datan keräämisen käytettävät menetelmät ovat tehtaan dokumentaation tutkiminen, arvojen hakeminen luotettavista lähteistä ja konkreettiset mittaukset.

Uunin eristeiden läpi johtuvan lämmön laskemista varten uunin sivujen pinta-alat haetaan uunin teknisistä tiedoista. Uunin eristeet on vaihdettu, joten uusille eristeille paksuudet haetaan kunnossapidon dokumentaatiosta. Eristeiden lämmönjohtokertoimet selvitetään valmistajan materiaalista. Tehtaan lämpötila mitataan lämpömittarilla. Uunin sisälämpötila on sama kuin sulan lämpötila. Sulan metallin lämpötila nähdään sulatuksen dokumenteista. Mittaustulokset ja kerätty data kootaan uuni kohtaiseen taulukkoon, josta ilmenee, mistä uunista mittausta on tehty. Taulukointia varten uunit numeroidaan tehtaan pohjapiirrokseen. Kerätyt tiedot ovat liitteessä 1.

Uunin pinnoilta emittoituvan lämmön laskemiseen haetaan Stefan-Boltzmannin vakio Tekniikan Kaavastosta. Pinnan materiaalin emissiivisyys on materiaalista riippuva ainekohtainen suhdeluku, joka haetaan CRC Handbook of Chemistry and Physics Online: sta. Uunin sivun pinta-ala haetaan uunin teknisistä tiedoista. Uunin

²¹ Kvalitatiivinen eli laadullinen tutkimus. Taloustutkimus Oy. Viitattu 14.2.2023. <https://www.taloustutkimus.fi/tuotteet-palvelut/kvalitatiivinen-tutkimus.html>

²² Tuomivaara, T. 2005. Kvantitatiivinen ja kvalitatiivinen tutkimus. Tieteellisen tutkimuksen perusteet. Viitattu 14.2.2023. <https://www.mv.helsinki.fi/home/ttuomiva/Y125luku6.pdf>

sivujen ja tehtaan lämpötilat mitataan. Tehtaan lämpötila mitataan lämpömittarilla. Uunin pintojen lämpötilojen mittaus toteutetaan kertaluontoisena mittauksena jokaiselle uunille. Käytettävä lämpömittari on Trifitec TR-47 -laserlämpömittari. Uunin lämpötila mitataan uunin sivun keskeltä. Uunit numeroidaan tehtaan pohjapiirrookseen. Mittaustulokset ja kerätty data kerätään taulukkoon, josta ilmenee, mistä uunista mittaus on tehty. Kerätyt tiedot ovat liitteessä 2.

Painevalun jäähtyksen kylmäkoneen glykoliseokselle tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja tilavuusvirta haetaan kylmäkoneen teknisistä tiedoista. Jokivedelle tiheys ja ominaislämpökapasiteetti haetaan Tekniikan Kaavastosta. Jokivesikierron tilavuusvirta nähdään pumpun käyntitajuudesta. Lämmönvaihtimille tulevien ja lämmönvaihtimilta lähtevien jäähdytysnesteiden lämpötilat mitataan antureiden paikalle asennettavilla termoelementeillä. Mittaus kestää viikon. Mitattava data tallennetaan TESTO 176 T4 -lämpötilaloggerilla. Loggeri ohjelmoidaan tallentamaan mittaustulos tunnin välein. Mittauksen tulokset kootaan taulukkoon. Kerätyt tiedot ovat liitteessä 3.

Kaasusulatuksen savukaasuille, vedelle ja hiilidioksidille, ominaislämpökapasiteetit ja moolimassat haetaan Tekniikan Kaavastosta. Savukaasujen massa nähdään propaanin palamisen reaktioyhtälöstä kuvasta 10. Propaanin palamislämpötila selvitetään prosessin tiedoista. Palaneen propaanin määränä käytetään keskiarvoa viimeisen kuluneen vuoden ajalta. Savukaasujen lämpötila mitataan poistoputken päähän asennettavalla termoelementillä viikon kestäväällä mittauksella. Mitattava data tallennetaan TESTO 176 T4 -lämpötilaloggerilla. Loggeri ohjelmoidaan tallentamaan mittaustuloksen tunnin välein. Mittauksen tiedot kootaan taulukkoon. Kerätyt tiedot ovat liitteessä 4.

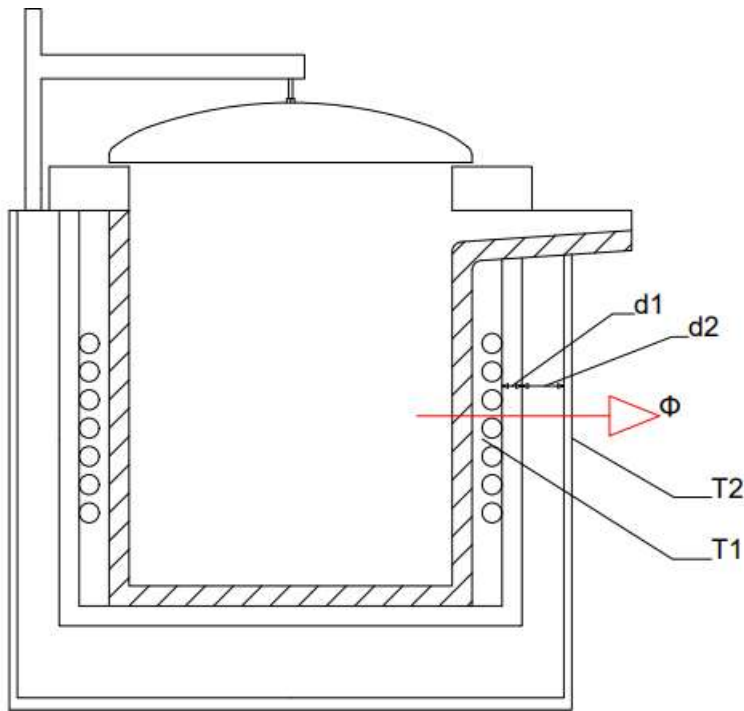
5.2 Datan analysointi

Sulatuksessa uunin eristeiden läpi johtuva lämpöenergia lasketaan kaavalla 1.²³ Kuva 7 havainnollistaa lämmön johtumisen laskemista. Kaasu-uunin kohdalla johtuvan lämpövirran laskeminen tapahtuu samalla kaavalla 1. Kaasu-uunin kohdalla kaavasta jätetään vain pois villalevyn paksuus ja lämmönjohtokerroin, koska kaasu-uunissa on vain yksi eristekerros. Kerätty data käsitellään Excel ohjelmistolla, jolla lasketaan uunin pintojen läpi johtuva lämpövirta käyttäen kaavaa 1. Tuloksena saadaan uunin pinnan läpi johtuva lämpövirta. Laskutulokset ovat liitteessä 1.

²³ Inkinen, P. & Tuohi, J. 1999. Momentti 1 Insinöörifysiikka. 4.-11. painos. Helsinki. Otava. Viitattu 28.1.2023

$$\Phi = \frac{A(T_1 - T_2)}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}}, \text{ jossa} \quad \Phi = \text{johtuva lämpövirta (W)} \quad (1)$$

A = uunin sivun pinta-ala (m^2)
 T_1 = uunin sisälämpötila (K)
 T_2 = uunin pinnan lämpötila (K)
 d_1 = tiilivuorauksen paksuus (m)
 d_2 = villalevyn paksuus (m)
 λ_1 = tiilivuorauksen lämmönjohtavuuskerroin ($\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$)
 λ_2 = villalevyn lämmönjohtavuuskerroin ($\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$)



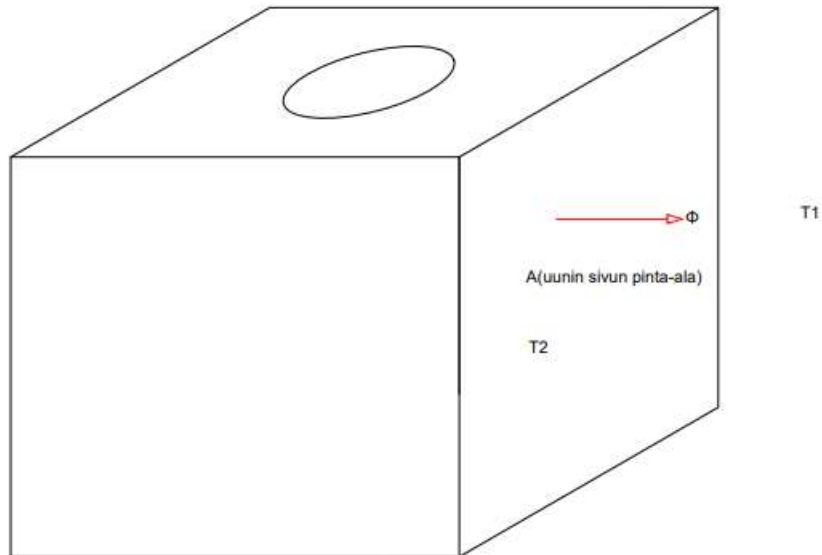
Kuva 7. Uunin eristeiden läpi johtuva lämpö.

Uunin sivuilta työympäristöön emittoituva lämpösäteily lasketaan kaavalla 2.²⁴ Kuva 8 havainnollistaa säteilytehon laskemista. Kerätty data käsitellään Excel ohjelmistolla, jolla lasketaan uunien pinnoilta emittoiva lämpöteho käyttäen kaavaa 2. Tulokseksi saadaan uunin pinnalta säteilevän sähkömagneettisen lämpösäteilyn säteilyteho, eli miten paljon lämpöä uunin pinnat säteilevät tehtaan sisätiloihin. Laskutulokset ovat liitteessä 2.

²⁴ Inkinen, P. & Tuohi, J. 1999. Momentti 1 Insinöörifysiikka. 4.-11. painos. Helsinki. Otava. Viitattu 28.1.2023

$$\Phi = \varepsilon \sigma A (T_2^4 - T_1^4), \text{ jossa} \quad \Phi = \text{pinnalta emittoituva lämpöteho (W)} \quad (2)$$

$\varepsilon = \text{emissiivisyys}$
 $\sigma = \text{Stefan-Boltzmannin vakio } \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}\right)$
 $A = \text{uunin sivun pinta-ala (m}^2\text{)}$
 $T_2 = \text{uunin pinnan lämpötila (K)}$
 $T_1 = \text{tehtaan lämpötila (K)}$



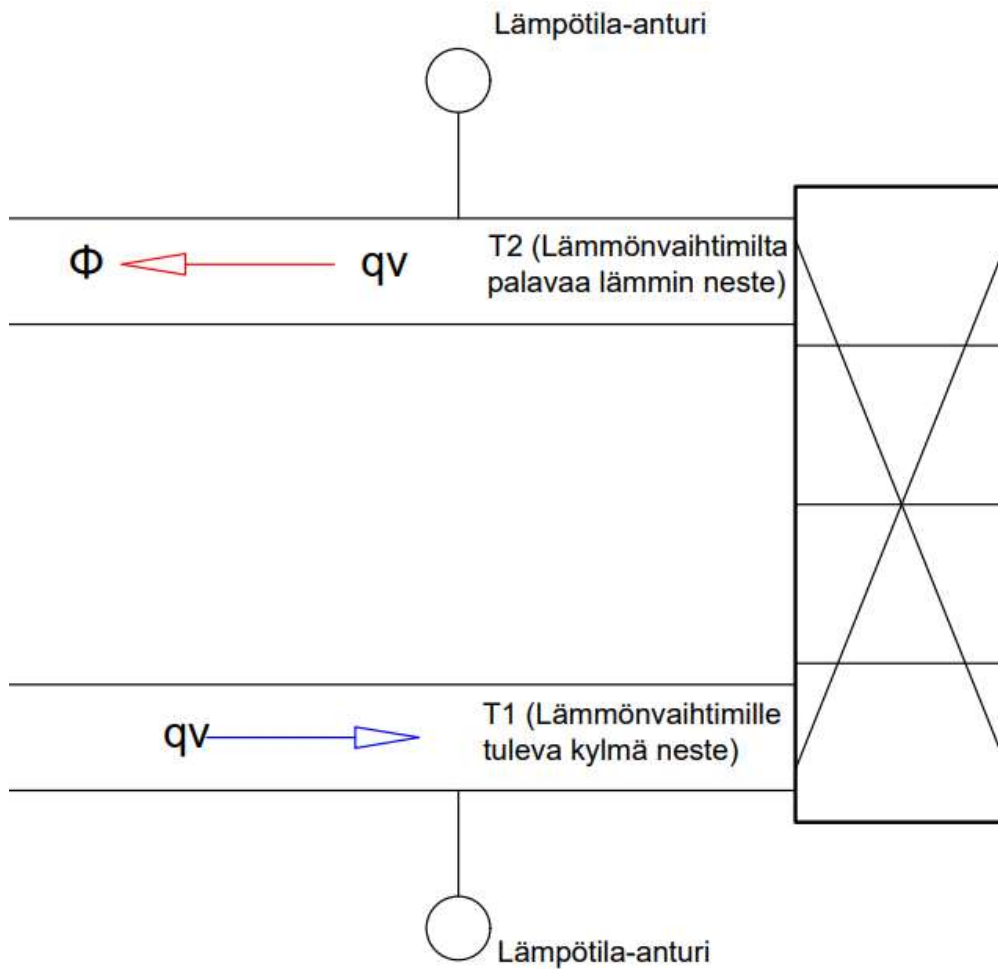
Kuva 8. Uunin pinnoilta emittoituva lämpö.

Painevalun jäähtymisen jokivesikierron mukana konvektoituva ja kylmäkoneen glykoliseoksen mukana konvektoituva lämpöenergia lasketaan kaavalla 3.²⁵ Kuva 9 havainnollistaa konvektoituvan lämpöenergian laskemista. Konvektoituvan lämmön määrä lasketaan Excelillä käyttäen kaavaa 3. Kaava kirjoitetaan Exceliin ja kaavaan syötetään laskemista varten kerätyt ja mitatut tiedot. Tuloksena saadaan kylmäkoneen ja jokivesikierron konvektoima lämpöenergia. Laskutulokset ovat liitteessä 3.

²⁵ Inkinen, P. & Tuohi, J. 1999. Momentti 1 Insinöörifysiikka. 4.-11. painos. Helsinki. Otava. Viitattu 28.1.2023

$$\Phi = \rho q_v c (T_2 - T_1), \text{ jossa } \Phi = \text{konvektoituva lämpö (W)} \quad (3)$$

$\rho = \text{tiheys } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$
 $q_v = \text{tilavuusvirta } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$
 $c = \text{ominaislämpökapasiteetti } \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)$
 $T_2 = \text{lämmönvaihtimilta palaavan nesteen lämpötila (K)}$
 $T_1 = \text{lämmönvaihtimille tulevan nesteen lämpötila (K)}$



Kuva 9. Painevalun jäähdytysnesteiden mukana konvektoituva lämpö.

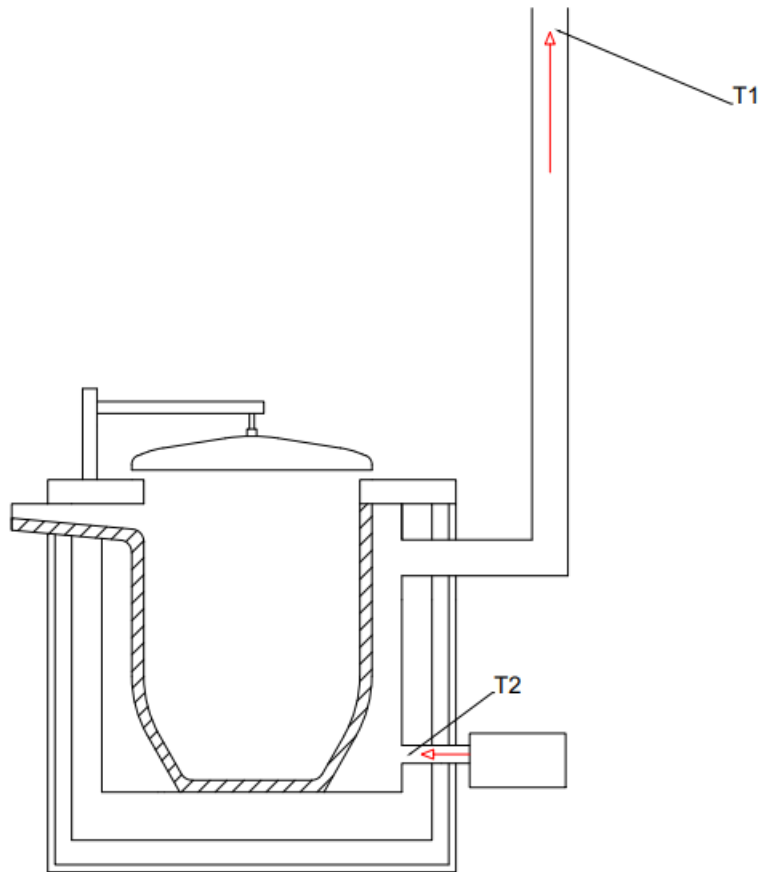
Kaasusulatusuunin savukaasujen mukana konvektoituva lämpöenergia lasketaan kaavalla 4.²⁶ Ominaislämpökapasiteettina käytetään hiilidioksidin ja veden ominaislämpökapasiteettien painotettua keskiarvoa. Painotettu keskiarvo lasketaan muodostuvien savukaasujen massaprocenteilla. Kuva 10 havainnollistaa konvektion laskemista. Konvektoituvan lämmön määrä lasketaan Excelillä käyttäen kaavaa 4. Kaava kirjoitetaan Exceliin ja kaavaan syötetään laskemista varten kerätyt ja mitatut tiedot. Tuloksena saadaan savukaasujen mukana konvektoituva lämpöenergia. Laskutulokset ovat liitteessä 4.

²⁶ Inkinen, P. & Tuohi, J. 1999. Momentti 1 Insinöörifysiikka. 4.-11. painos. Helsinki. Otava. Viitattu 28.1.2023

$$\Phi = \frac{m}{t} c (T_2 - T_1), \text{ jossa} \quad \Phi = \text{konvektoituva lämpö (W)}$$

$m = \text{muodostuneiden savukaasujen massa (kg)}$
 $t = \text{mittauksen aika (s)}$
 $c = \text{ominaislämpökapasiteetti } \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$
 $T_2 = \text{prosessiin syötetty lämpötila/propanin palamislämpötila (K)}$
 $T_1 = \text{savukaasujen lämpötila piipun päässä (K)}$

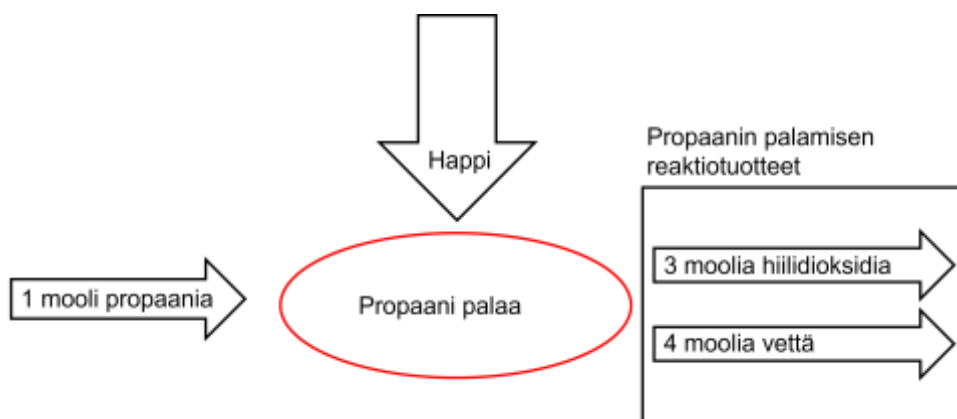
(4)



Kuva 10. Savukaasujen konvektio.

Mittauksen aikana syntyneiden savukaasujen massa saadaan propanin palamisreaktion yhtälöstä. Kuva 11 havainnollistaa propanin palamisreaktiota. Kuvasta 10 havaitaan palamisessa muodostuneen veden ainemäärän olevan neljä kertaa

ja muodostuneen hiilidioksidin ainemäärän olevan kolme kertaa palaneen propanin ainemäärä. Muodostuneiden savukaasujen massa voidaan laskea savukaasujen ainemääriä ja palamisreaktion stoikiomerisia kertoimia hyödyntämällä.²⁷



Kuva 11. Propanin palamista havainnollistava kuva.

²⁷ Teollisuusuunien energiatehokkuus. Motiva Oy. 2015. Viitattu 18.1.2023. https://www.motiva.fi/files/12180/Teollisuusuunien_energiatehokkuus.pdf

6 YHTEENVETO

Hukkalämpö on sitä lämpöä, joka muodostuu olennaisena osana prosessia, jonka tarkoituksena ei ole tuottaa lämpöä. Hukkalämpö muodostuu yrityksen tapauksessa kolmella eri lämmön siirtymistavalla, jotka ovat johtuminen, emittio ja konvektio. Jokaisessa tutkitussa avainprosessissa muodostuu hukkalämpöä. Yrityksen tapauksessa olisikin järkevämpi sanoa, että muodostuva ylimääräinen hyödyntämätön lämpö ei ole hukkalämpöä vaan sivutuote, jonka hyödyntäminen on ympäristön ja talouden kannalta erittäin järkevä toimenpide.

Sähköuunien rakenteiden läpi johtui vähemmän lämpöä, kuin kaasuuunin, vaikka kaasuuuni on yrityksen uuneista modernein. Tämä selittyy kaasuuunin ja sähköuunien rakenteellisilla eroilla. Kaasuuunissa on vain yksi eristävä kerron, sähköuuneissa eristäviä kerroksia sen sijaan on kaksi.

Emittoitumisessa syntyvän hukkalämmön määrä on merkittävä. Yhdestä yrityksen uunista emittoituva lämmön määrä oli huomattavasti muita uuneja suurempi. Mittaukset olivat kuitenkin kertaluontoisia. Mittaukset on syytä toistaa uudelleen tulosten luotettavuuden arvioimiseksi, tuloksiin vaikuttaa uunien käyttö lämpötilan mittauksen hetkellä, onko uuni ylläpito vai sulatus vaiheessa. Kuitenkin tulokset ovat luotettavat ja ne kertovat mittaushetkellä muodostuneen hukkalämmön määrän.

Valukoneiden jäähtymisen ja kaasuuunin konvektion tutkimisessa hyödynnetyt mittaukset olivat kestoltaan lyhyitä. Jäähtymisen mittausjakson aikana muodostuneeseen hukkalämpöön vaikuttaa suuresti mahdollinen useita päiviä kestävä muotin vaihto tai konerikko. Mittauksen aikana yhden painevalukoneen muotti vaihdettiin, konerikkoja ei ollut. Muotin vaihdosta huolimatta muodostuneen hukkalämmön määrä oli merkittävä ja se soveltuisi käytettäväksi kiinteistön lämmittämiseen. Jäähtymisen hukkalämpö on matalalämpöistä hukkalämpöä. Jäähtymisen lämpökuorma pysyi hyvin ympäristöluvan asettamassa rajassa. Jäähtymisessä muodostui hukkalämpöä enemmän kuin odotin, huomattavan paljon

enemmän kuin kaasu-uunin savukaasujen mukana. Tämän selittää se, että savukaasujen tiheys on huomattavasti veden ja glykolin tiheyttä pienempi. Savukaasujen ominaislämpökapasiteetti on myös pienempi kuin nestemäisen veden tai glykoliseoksen.

Kaasusulatuksen mittaustulokset ovat hyvät, niillä saatiin hyvä kuva sulatuksen savukaasujen lämpötilasta. Mittauksen aikana ei sattunut konerikkoa tai tuotanto katkosta, joka olisi vaikuttanut mittauksen tulokseen. Muodostuva hukkalämpö oli korkea lämpöistä hukkalämpöä ja hukkalämmön määrä on merkittävä. Hukkalämmöllä voisi lämmittää prosessiin laitettavaa ilmaa tai hyödyntää tehtaan kiinteistön lämmittämiseen.

Avainprosesseissa muodostuva hukkalämpö on hyvin hyödyntämiskelpoista ja sen hyödyntäminen on järkevä toimenpide. Hukkalämpöä hyödyntämällä saataisiin tehtaan energiatehokkuutta parannettua huomattavasti. Hukkalämpöä hyödyntämällä voitaisiin myös leikata yrityksen tilojen lämmityksen kustannuksissa. Jäähdytyksen hukkalämpö soveltuu erittäin hyvin tehtaan tilojen lämmitykseen, etenkin jäähdytyksessä muodostuva matala lämpöinen hukkalämpö olisi hyvin lämpöpumpuilla hyödynnettävissä tehtaan tilojen lämmitykseen. Kaasu-sulatuksen korkea lämpöinen hukkalämpö on myös hyvin hyödynnettävissä, hukkalämpöä voisi hyödyntää esimerkiksi sulatettavan metallin esilämmitykseen tai prosessi-ilma lämmittämiseen.

Jatkotoimenpiteenä ehdotan lämmön talteenottokeinojen tutkimista ja kannattavuuslaskelmien tekemistä erilaisille lämmöntalteenotto keinoille. Jäähdytyksen kohdalle suosittelen myös lisätutkimuksia mittauksen aikana tapahtuneen muotinvaihdon vuoksi. Yrityksen sähköuunien uusimista on myös syytä harkita.

LÄHTEET

Answer given by Mr Oettinger on behalf of the Commission. P-000887/2011. Euroopan Parlamentti. 2011. Viitattu 21.1.2023. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/P-7-2011-001887-ASW_EN.pdf

Brough, D. & Jouhara, H. The aluminum industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. International Journal of Thermofluids. Viitattu 17.1.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202719300072>

Energiatehokkuuden oheishyödyt yrityksissä – Selvitys. Motiva Oy. 2018. Viitattu 23.1.2023. https://www.motiva.fi/files/15389/Energiatehokkuuden_oheishyodyt_yrityksissa.pdf

Esiselvitys – Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. Motiva Oy. 2019. Viitattu 17.1.2023. [https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys - Ylijaamalammon potentiaali teollisuudessa.pdf](https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf)

Inkinen, P. & Tuohi, J. 1999. Momentti 1 Insinöörifysiikka. 4.–11. painos. Helsinki. Otava. Viitattu 28.1.2023

Keskinen, R. & Niemi, P. 2011. Upokasuunit. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Viitattu 17.1.2023. <https://www.valuatlas.fi/tietoaineistot/valumetallien-sulatus/upokasuunit/>

Keskinen, R. & Niemi, P. 2011. Vastusupokasuunit. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto. Viitattu 17.1.2023. <https://www.valuatlas.fi/tietoaineistot/valumetallien-sulatus/vastusupokasuunit/>

Kvalitatiivinen eli laadullinen tutkimus. Taloustutkimus Oy. Viitattu 14.2.2023. <https://www.taloustutkimus.fi/tuotteet-palvelut/kvalitatiivinen-tutkimus.html>

Lehtimäki, A. 2003. Painevalumuotti ja -valu. Viitattu 20.1.2023. <https://tuotantovaline-kirjasarja.vmv-palvelut.com/lataa-kirjat-pdf/08-painevalumuotti-valu.pdf>

Pocola, A., Serban, A. & Balan, M. 2017. Complex and Efficient waste heat recovery system in aluminum foundry. Energy Procedia. Viitattu 17.1.2023. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1876610217312596?token=B9942662721E0981B04E3A53590C66B887D360DE38EB60E1E4A5367515E03629DB7E3FDE484D77A359CE03B07255DE38&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230120074743>

Teollisuuden uunit ja energiatehokkuus. Motiva Oy. 2015. Viitattu 18.1.2023. [https://www.motiva.fi/files/12181/Teollisuuden uunit ja energiatehokkuus.pdf](https://www.motiva.fi/files/12181/Teollisuuden_uunit_ja_energiatehokkuus.pdf)

Teollisuusunien energiatehokkuus. Motiva Oy. 2015. Viitattu 18.1.2023. https://www.motiva.fi/files/12180/Teollisuusunien_energiatehokkuus.pdf

Tuomivaara, T. 2005. Kvantitatiivinen ja kvalitatiivinen tutkimus. Tieteellisen tutkimuksen perusteet. Viitattu 14.2.2023. <https://www.mv.helsinki.fi/home/ttuomiva/Y125luku6.pdf>

Tuotannon hukkalämpöhyödyksi. Motiva Oy. 2013. Viitattu 17.1.2023. https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf

Yang, L., Ren, Y., Wang, Z., Hang, Z. & Luo, Y. 2021. Simulation and Economic Research of Circulating Cooling Water Waste Heat and Water Resource Recovery System. Energies. Viitattu 19.1.2023. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/9/2496>

Ympäristölupapäätös O801Y4115-111. Länsi-Suomen Ympäristökeskus. 2004. Viitattu 16.1.2023. [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovai_kutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa/Entisen_LansiSuomen_ymparistokeskuksen_y\(26313\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovai_kutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa/Entisen_LansiSuomen_ymparistokeskuksen_y(26313))

Yrityksen energiakatselmus Alteams Oy. 2022. Caverion. Viitattu 2.3.2023

LIITTEET (SALAINEN)

LIITE 1

LIITE 2

LIITE 3

LIITE 4