



Karelia-ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)

# Hukkalämpö ja sen hyödyntäminen

Pelletin raaka-ainekuivureiden hönkähöyryn  
lämpötehon vaikutukset laitoskokonaisuuden  
energiataseeseen

Taneli Romppanen

Opinnäytetyö, toukokuu 2022

[www.karelia.fi](http://www.karelia.fi)



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Toukokuu 2022**  
**Konetekniikan koulutus**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600

Tekijä(t)  
Taneli Romppanen

Nimeke  
Hukkalämpö ja sen hyödyntäminen – Pelletin raaka-ainekuivureiden hönkähöyryn lämpötehon vaikutukset laitoskokonaisuuden energiataseeseen  
Toimeksiantaja  
Neova Oy

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön lähtökohtana oli tarkastella hukkalämpöä ja sen talteenottoa. Näistä tutkimuksista saadun aineiston perusteella tuli määrittää Neova Groupin pelletitehtaan pelletin raaka-ainekuivureiden hönkähöyrynä tuottama hukkalämmön energiasältö ja sen mahdolliset käyttökohteet. Jo ennen projektin alkua oli kohtuullisen selvää, että hukkalämpö tulitisiin valjastamaan kaukolämpökäyttöön vastaamaan osasta lähi-alueen vaatimasta lämmöntuotosta.

Opinnäytetyössä paneuduttiin hukkalämpökäsitteeseen yleisesti ja tarkasteltiin sen ilmenemismuotoja eri ympäristöissä teollisuudessa sekä arkielämässä. Lisäksi huomioitiin ympäristötietoisuuden vaikutukset hukkalämmön määrän muutoksiin, sekä yleisimmät menetelmät, joilla hukkalämpöä saataisiin tehokkaasti hyödynnettyä eri tilanteissa ja toimintaympäristöissä.

Pelletin raaka-ainekuivureiden tuottama hukkalämmön määrä määritettiin matemaattisesti käytössä olevien suureiden, kuten lämpötilan ja haihtuvan vesimäärän avulla. Laskentaperusteina käytettiin maksimituoton lukuja, jolloin vältyttiin alimitoitukselta. Talteen otettavissa ollut energiamäärä suhteutettiin sitten laitoskokonaisuuden energiataseeseen, jotta nähtiin saatava kokonaisyöty ja mahdollinen lisätarve kaukolämmön lämmöntuotossa.

Kieli  
suomi

Sivuja 41  
Liitteet 1  
Liitesivumäärä 1

Asiasanat  
Hukkalämpö, lämmöntalteenotto, kaukolämpö, lämpöenergia.



**THESIS**  
**May 2022**  
**Degree Programme in Mechanical Engineering**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+ 358 13 260 600

Author (s)  
Taneli Romppanen

Title  
Waste Heat and its Utilization - Effects of the heat output of pellet raw material dryers on the energy balance of the plant as a whole  
Commissioned by  
Neova Oy

Abstract

The starting point for this thesis was to investigate waste heat, waste heat recovery and other methods that can be used to make use of the heat energy that is normally lost in different parts of production processes. The main goal was to gather enough information and data to be able to calculate the amount of heat energy that is now wasted through Neova Oy's pellet factory's pellet raw material drum dryers and the water vapor that they create from moist raw material in the process. The main idea was to determine how much energy could be utilized and what could be the impact to the district heating system and through that to the whole energy balance of the factory complex.

The theory part of this thesis consists of explanation for the waste heat, implications of waste heat in different environments such as productive processes and housing estates. It is also noted, how the knowledge of environmental issues and development impacts the amount of waste heat and the development of key features in waste heat utilization.

The amount of waste heat produced by the dryers is mathematically calculated using known temperatures and the actual mass of water vaporized. Calculations are carried out using maximum production figures to prevent under estimations. Calculated amount of collected energy is then added to the energy balance illustrations of the whole plant

Language  
Finnish

Pages 41  
Appendices 1  
Pages of Appendices 1

Keywords  
waste heat, heat recovery, district heating, heat energy

## Sisältö

1	Johdanto .....	6
1.1	Neova Oy.....	6
1.2	Työn tavoite .....	6
2	Hukkalämpö.....	7
2.1	Tuotannon synnyttämä hukkalämpö .....	7
2.2	Asumisen hukkalämpö.....	10
3	Hukkalämmön hyödyntäminen.....	11
3.1	Teolliset sovellutukset.....	11
3.2	Hukkalämmöstä kaukolämmöksi .....	14
4	Hukkalämmön talteenottometodit .....	16
4.1	Lämmönvaihtimet .....	16
4.2	Lämpöpumput.....	18
5	Opinnäytetyössä käytetyt menetelmät .....	20
6	Kuivureiden hönkähöyryn teho ja sen vaikutus energiataseeseen .....	22
6.1	Lähtölukujen selvittäminen .....	22
6.2	Kuivureiden käyttämä energia .....	25
6.3	Kuivureiden tuottama hönkähöyry .....	27
6.4	Kuivureiden hönkähöyryn sisältämä teho .....	30
6.5	Kaukolämmön lämmöntuottotarve .....	32
6.6	Kokonaislämpöenergian tarve .....	33
6.7	Aktiivihiilitehtaan ja pelletin raaka-ainekuivureiden lämpötehontuotto.....	34
6.8	Lämpötehontuotto suhteessa tarpeeseen.....	36
7	Pohdinta.....	37
	Lähteet.....	39

### Taulukot

Taulukko 1.	Kosteudet eri tuotantovaiheissa eri raaka-aineilla. ....	23
Taulukko 2.	Esimerkkituotantomäärät tonneina kuukausittain eri raaka-aineilla .....	23
Taulukko 3.	Eri raaka-aineiden kuivaukseen käytettävä energia. ....	24
Taulukko 4.	Kuivureiden tehontarve MWh kuukausittain. ....	26
Taulukko 5.	Kuivureiden keskimääräinen tehontarve MW kuukausittain. ....	27
Taulukko 6.	Kuivureiden hönkähöyryn sisältämä teho kuukausittain. ....	32
Taulukko 7.	Kaukolämmön esimerkkitehontarve kuukausittain, MW. ....	33
Taulukko 8.	Jaoteltu kokonaistehontarve kuukausittain. ....	34
Taulukko 9.	Kokonaislämpöteho – Aktiivihiilitehtaan LTO ja hönkähöyry. ....	35
Taulukko 10.	Kokonaislämpöteho ja kokonaislämpötehon tarve.....	36

### Liitteet

Liite 1	Vesihöyryn teho entalpian ja massavirran funktiona.
---------	---

# 1 Johdanto

## 1.1 Neova Oy

Neova Oy on kotimainen yritys, joka on perustettu alun perin jo 1940, mutta tuolloin yrityksen nimi oli Valtion Polttoainetoimisto, josta muodostui sittemmin lyhyemmin suomalaisille tuttu Vapo Oy. Neova Oy on Neova Groupin emoyhtiö ja konserniin kuuluu monia kotimaisia sekä ulkomaisia yrityksiä, joita on ajan oloon sulautettu osaksi yhtiön toimintaa. Myös yrityksen vanha nimi Vapo Oy on osana yhtiön toimintaa, sillä tällä nimellä käydään edelleen muun muassa pellettikauppaa. Konsernin aktiivista toimintaa on 12 eri maassa.

Toiminta Ilomantsissa alkoi jo vuonna 1978 brikettitehtaan rakennuksella. Sittemmin tehdas on nähnyt vilkkaampia ja hiljaisempia ajanjaksoja, kunnes vuodesta 2014 lähtien tehdas on tuottanut pellettiä sekä energiaa ympäristön tarpeisiin. Vuonna 2021 tehdasalueelle Savotantien varteen valmistui aktiivihiilitehdas, joka kykenee tuottamaan pellettitehtaan tuottamasta pelletistä aktiivihiiltä. Aktiivihiiltä käytetään muun muassa suodattimissa ja puhdistusaineissa.

## 1.2 Työn tavoite

Työn lähtökohtana oli täyttää jokin tarve Ilomantsin pellettitehtaalla ja kohteeksi valikoitui pelletin raaka-ainekuivureiden hönkähöyryn mahdollisen lämmöntalteenoton hyödyntämismahdollisuudet ja hukkaenergian määrän määrittäminen laskemalla. Tämä johti teoriaosassa olevan hukkalämmön avaamiseen ja teoriaosassa paneudutaankin hukkalämpöön, sen lähteisiin ja hyödyntämismahdollisuuksiin.

Työn tavoitteena oli selvittää matemaattisesti kuivureiden hukkaan menevän energian määrä ja sen hyödyntämisen aiheuttamat muutokset lämmöntuoton tarpeessa. Talteen otettavissa olevan energian määrä tuli suhteuttaa laitoksen energiataseeseen, jotta saataisiin selville kaukolämmön tuoton tehostuksen

määrä ja vastavuoroisesti muiden lämmöntuottomenetelmien käytön tarpeellisuuden väheneminen. Osatavoitteena oli määrittää, josko mahdollisesti taltioitava lämpöenergia riittäisi olemassa olevien talteen otettujen, sivuvirroissa kulkevien, lämpöenergiavarojen kanssa kaukolämmön tehotarpeen täyttöön vai olisiko muiden lämpöenergiantuottometodien käyttö välttämätöntä.

## **2 Hukkalämpö**

### **2.1 Tuotannon synnyttämä hukkalämpö**

Hukkalämpöä eli ylijäämälämpöä ovat lämpöenergiavirrat, jotka poistuvat tuotantolaitosten prosesseista sivuvirtojen mukana (Lehtinen 2018. 3). Tuotantolaitoksissa, joissa vuotuisasti käytettävät energiamäärät ovat suuria, syntyy usein suurimmat hukkalämpöpäästötkin. Tällaisia tuotannonaloja ovat muun muassa elintarvike-, kemia-, metalli- ja metsäteollisuus. Suoranaista hukkalämpöä voidaan katsoa olevan prosessissa käytettävissä kaasuissa sekä siinä sivutuotteena tulevissa savukaasuissa, jätevesissä, jäähdytysvesissä ja -höyryissä, sekä koneellisen jäähdytyksen lauhdeessa. Näiden sivutuotteiden mukana ilmaan ja ympäristöön pääsee leijona osa prosessiin sisään otettavasta energiasta. Vuonna 2010 tämä on ollut 37 prosentin osuus, mikä tarkoittaa jopa 54 terawattitunnin lukemia. (Motiva 2016. 2–3.)

Suomessa teollisuus on teollisuusalojen kehityksestä ja yhteisistä päämääristä johtuen kuitenkin paremmalla kantilla kuin tuolloin vuonna 2010. Euroopan Unionin vuonna 2015 kustantaman ”Heat Roadmap Europe 2050” -tutkimuksen mukaan Suomen teollisuus tuotti hukkalämpöä hieman yli 20 terawattituntia, mikä on lähes kolmasosa tästä aikaisemmasta laskelmasta reilun kymmenen vuoden takaa. Pyrkimys hiilineutraalisuuteen ja tuotannon optimointiin ovat laske-neet näitä lukuja entisestään, josta esimerkkinä kaukolämmön puolittuneet hiilidioksidipäästöt viimeisen kymmenen vuoden aikana. Nykyisin kaukolämmön hiilidioksidipäästöt ovat kolmen ja puolen megatonnin luokkaa vuositasolla, mutta

tämän odotetaan laskevan edelleen kolmanneksella seuraavassa kymmenessä vuodessa. (Energiateollisuus 2022. 3–9.)

Suurimmat hukkalämpövirrat syntyvät prosesseja lämmittävien laitosten savukaasujen mukana. Nämä ovat olleet usein likaisia, josta lämmöntalteenotto olisi aiheuttanut suuresti kustannuksia laitteiston puhdistamisen osalta. Nykyisin käyttöönotetut savukaasupesurit ovat kuitenkin poistaneet tämän suuret likaantumisongelmat. Biomassan polton lisääntyminen on lisännyt laitosten savukaasujen kosteuspitoisuutta, joka lisää savukaasuihin sitoutuneen energian määrää, tämä helpottaa myös energian talteenottoa. Kosteista savukaasuista saadaan valjastettua lämpöä lauhduttamalla, sillä tiivistyessään vesi sitoo suuria määriä lämpöä. Tähän prosessiin liittyy vahvasti myös savukaasupesurit. Tämä tuo lämmön lisäksi vettä takaisin prosessikiertoon, jolloin sillä voidaan korvata aiemmin käytettyä puhdasta vesijohtovettä. (Savolainen 2020. 1.)

Lämpöä menee hukkaan myös prosessin osissa, jotka usein jätetään huomiotta, sillä lähes poikkeuksetta, tehtiin sitten mitä tahansa, missä prosessin vaiheessa tahansa tai energiaa siirrettäessä, muodostuu monista eri tekijöistä syntyviä häviöitä. Pyörivissä ja liikkuvissa komponenteissa syntyy kitkavoimien seurauksena vastusta halutulle liikkeelle, joka kuluttaa enemmän energiaa kuin optimitilanteessa. Tämä ylimääräinen energia muuttuu näiden samaisten liikettä vastustavien voimien seurauksena lämmöksi, jota on usein hankala hyötykäyttää ja lämpö hukataan monesti suurien tuotantotilojen ilmatilaan. (Hautala ja Peltonen 2011. 32–33, 46.)

Tuotantolaitosten lämpenemistä kitkavoimien seurauksena esiintyy myös muissa tapauksissa, kuin vain ja ainoastaan mekaanisessa liikkeessä. Tällaisia tapauksia ovat muun muassa tuotannossa tarvittavien aineiden ja kaasujen siirto putkistoissa. Vaikka suurimman hukkalämmön voidaankin katsoa putkistojen kohdalla johtuvan huonosta tai puutteellisesta eristyksestä, jolloin kuumina putkessa virtaavat nesteet tai höyryt lämmittävät ympäristöään putken pinnasta tapahtuvan johtumisen avulla, on kuitenkin huomioitava putkessa virtaavan nesteen tai kaasun ja putken sisäpinnan välillä muodostuvat kitkat. (Oulun ammattikorkeakoulu 2014.)

Putkessa virtaavan aineen, sekä putken itsensä ominaisuuksiin ja virtausnopeuksiin suoraan verrannollinen lämpeneminen on tietyissä tapauksissa erittäin helposti havaittavissa. Tällaisia tapauksia ovat muun muassa tuotantolaitteiden liikkeen synnyttäminen paineilmalla tai hydraulikalla. Toimilaitteiden lämpeneminen on suurta, mikäli niiden mitoitus on suunniteltu liian pieneksi, jolloin linjat tai venttiilit rajoittavat käytettävän aineen virtausta. Oikein mitoitettut hydraulijärjestelmät alentavat tätä lämpiämistäipumusta, sillä virtausvastukset ovat pienempiä. (Oulun ammattikorkeakoulu 2014.)

Hukkalämpöä syntyy suurissa määrin myös passiivisesti. Tämä liittyy yleensä paljon sähkönkulkua sisältäviin suuriin muuntajakenttiin, suurten moottoreiden keskittymiin ja datakeskuksiin, kuten serverihuoneisiin ja pienemmässä mittakaavassa yritysten ja oppilaitosten atk-tiloihin. (Väre 2009. 10–13.) Koteloidut sähkölaitteet, kuten tietokoneet, serverikaapit ja sähköpääkeskukset tarvitsevat usein aktiivista jäähdytystä. Tämä tarkoittaa tietenkin sähköllä toimivia puhaltimia, jotka poistavat laitteistokotelosta, ja tietyissä tapauksissa myös erillisistä komponenteista, kuumaa ilmaa luoden samalla kotelon sisälle alipainetta, joka johtaa kylmän ilman läpivirtaukseen kotelon läpi. (Intel 2022.) Tällä tavoin toimiva jäähdytys mahdollistaa komponenttien koon pienentämisen ja se on suoraan verrannollinen komponenttien ja laitekokonaisuuksien valmistuskustannuksiin ja lopulliseen hintaan, sekä materiaalihukkaan. (Valmet 2022.)

Pahimmassa tapauksessa tätä hukkalämpöä syntyy niin paljon, että tuotantotiloja joudutaan keinotekoisesti viilentämään, jolloin hukataan yhä enemmän kallista energiaa. Tällaisesta tapauksesta esimerkiksi suurien yritysten ja oppilaitosten atk-tilat, joissa kymmenet tietokoneet tuottavat hukkalämpöä ja tietoteknisten komponenttien vikaantuvuusriski kasvaa huomattavasti niiden lämpötilan noustessa. Tietokonesalien ja palvelinhuoneiden lämpötilaksi on suositeltu 18–27 °C, joka tarkoittaa käytännössä koneellista ilmanvaihtoa, jossa lämpötilaa seurataan ja säädellään myöskin koneellisesti jäähdyttämällä tai tarpeen mukaan lämmittämällä sisälle otettavaa ilmaa. (Stenberg 2015. 7–8.)



On huomioitavaa myöskin, että sähkötekniisten tilojen ilmankosteus tulisi olla verrattain alhainen tavallisten kotitalouksien sisäilmaa ajatellen. Tämä johtuu lähinnä komponenttien ja liitosten hapettumisriskin pienentämisestä, joka puolestaan tarkoittaa komponenttien ja laitteistojen vikaantumisriskin pienentämistä. Halutun alhaisella kosteudella ja lämpötilalla haetaan toimilaitteisiin toimintavarmuutta, jotta päästään laitteiston uusimisen tavoitesykliin, joka on yksittäisen palvelimen kohdalla kolmesta kahdeksaan vuotta. (Stenberg 2015. 8–9.)

## 2.2 Asumisen hukkalämpö

Lämpöenergiaa hukataan suurissa määrin myös yritys- tai tuotantotoimintaan kuulumattomissa ympäristöissä. Vuosittain ihmisten asumiskulut lisääntyvät tilan vähetessä ja energian hinnan noustessa. Tämä johtaa kooltaan ja kapasiteetiltaan suurempien asuinrakennusten rakentamiseen, jotta saataisiin asuinkustannukset tuotua alas, mikä tarkoittaa käytännössä kerrostaloja. Kerrostalojen rakentamisen yleistyessä, on niiden rakennusmääräyksiin ja toimintavaati-  
muksiin lisätty hukkalämpöä koskevia vaateita. (Karvala 2019.)

Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) raportin (2017) mukaan ihmisen toiminnan aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä 68 prosenttia syntyy Suomessa kotitalouksien kulutuksesta, ja tästä suurin osa (39 %) on peräisin asumisesta, jossa suurimman osan aiheuttavat lämmitys ja sähkön kulutus (72%) (Karvala 2019).

Tämä lukema on huomattavasti suurempi kuin liikkumisen tuottamat ilmasto-  
päästöt, joihin kuuluu yksityiseen kotitalouteen suhteutettu keskimääräinen liik-  
kuminen, jonka osuus kotitalouksien kokonaispäästöistä on vain 19 prosenttiyksikköä. Tästä huolimatta aktiiviset ilmastotoimet ovat keskittyneet liikenteen  
päästöjen vähentämiseen ja monesti asuinrakennusten päästöjä lähdetään kar-  
simaan ainoastaan paikallisesti ja silloinkin taloudellinen etu edellä. (Karvala  
2019.)

Monikerroksiset talot, joissa on lisäksi useita huoneistoja kerroksia kohti, sisältävät paljon pinta-alaa ja paljon ovia, ikkunoita ja tuuletuskanavia, joista kallista  
lämpöä pääsee karkuun hyötykäytöltä jopa 37 prosenttia

kokonaislämmitysenergiasta. (Manner 2022.) Tätä lämpövuotoa vastaan on kehitetty uudenlaisia keinoja eristää ja tiivistää rakennelmia. Lisäksi painovoimaisesta ilmanvaihdosta luopuminen ja koneelliseen ilmanvaihtoon siirtyminen 1950-luvulta alkaen on helpottanut poistoilman lämmön talteenottoa. Aluksi koneellinen ilmanvaihto ei kuitenkaan tuottanut suuria säästöjä lämmityskustannuksissa, vaan oikeastaan siitä aiheutui suuresti lisäkustannuksia. (Westman 2014. 6–9.)

Alun perin ilmanvaihdon koneellisuus tarkoitti käytännössä poistoilmapuhallinta tai huippuimuria, joka imi asuinrakennusten eri huoneisiin haarautuvien ilmanvaihtokanavien kautta yhdestä yhteiskanavasta kosteaa ja kuumaa ilmaa muodostaen täten alipaineen asuinrakennuksen sisälle. Korvausilma imeytyi sitten rakenteiden välistä ja vuotavista tiivisteistä, joka varsinkin talvikausina, kasvatti lämmitysenergian tarvetta. 1980-luvun loppupuolella aloitettiin varsinaisten korvausilmaventtiilien hyödyntäminen, mutta tämä ei poistanut lämmitysongelmaa vaan ainoastaan suurehkon alipaineen rakennusten sisätiloista. Vasta 2003 tuli määräys, jonka mukaan poistoilmasta pitää taltioida lämpöä. (Westman 2014. 8.)

### **3 Hukkalämmön hyödyntäminen**

#### **3.1 Teolliset sovellutukset**

Nykymaailmassa energian markkinahintojen jatkuvasti noustessa keskitytään käytettävissä olevien resurssien tehokkaaseen käyttöön ja hiilidioksidipäästörajoituksiin. Tästä johtuen onkin perusteltua alkaa käyttää hyväksi suuria energiamääriä, jotka ovat sitoutuneet normaalisti hukkaan meneviin palokaasuihin, höyryyn ja muihin prosessien lämmön tuotto- ja poistojärjestelmiin. (Exodraft 2021. 2.) Tällainen toiminta auttaa suoraan yrityksen toiminnan tehostamiseen ja kilpailukyvyyn nostoon, vaikka vihreät arvot tai energiatehokkuus muuten eivät olisikaan päämäärinä itsessään. (Lekkala 2014. 7).

”Lämmöntalteenottoa voidaan hyödyntää monissa teollisuusprosesseissa. Tällaisia ovat muun muassa kuivaus, keittäminen, jäähdytys, lämmitys ja suuria vesimääriä kuluttavat teolliset pesuprosessit. – Energiankäyttö tehostuu, kun talteen otettua energiaa siirretään prosessin eri vaiheiden välillä. Esimerkiksi teollisuudessa on samassa prosessissa usein sekä lämmitys että jäähdytys. – Lämmöntalteenoton avulla pystytään energiansäästön lisäksi usein myös parantamaan itse prosessia, kuten sen läpimenoaikaa ja laatua. Prosessin parannuksista voi olla jopa suurempi hyöty kuin energiatehokkuuden lisääntymisestä ja primäärienergian tarpeen pienenemisestä.” (Finess Energy Oy 2022. 1.)

Vaikkakin olisi monesti kannattavaa hyödyntää hukkaan menevää lämpöenergiaa, saattaa se varsin usein jäädä ajatuksen tasolle tai projektiksi pöytälaatikkoon, sillä lämmöntalteenotto on prosessi, joka vaatii tarkkoja laskelmia, lämmönlähteestä riippuen erilaisia puhdistimia ja keräimiä, sekä muuta laitteistoa. Tämä litania johtaa siihen, että mikäli talteenottoa suunnitellaan johonkin kehityskohteenä olevaan vanhaan prosessiin tai sen osaseen, kertyy kaikista mahdollisista toimista ja laitteista niin suuri kertainvestointisumma, että moni yritys keskittyy muihin asioihin ja pienempiin investointeihin. (Lehtinen 2018. 3–4.)

Teollisista prosesseista saatava talteen otettu hukkalämpö voidaan hyödyntää monin eri keinoin, pääasiassa vaihtoehtoja on kuitenkin kaksi: kaupallinen käyttö tai saadun energian ohjaaminen takaisin omaan prosessiin ja sen hyödyntäminen siellä. Kaupallinen hyödyntäminen käsittää useimmiten kaukolämpösovellutukset tai sähköksi muuttamisen ja sen myymisen valtakunnalliseen sähköverkkoon. Tehtaiden prosessien ulkopuolelle siirretty energia kattaa kuitenkin vain sadasosan teollisuudessa taltioidusta hukkalämmöstä. Omassa prosessissa hukkalämmöstä saatua energiaa käytetään yleensä suoraan lämpönä, mikä vähentää ostoenergian tarvetta. (Lehtinen 2018. 4.)

Mikäli prosessista saatu hukkalämpö halutaan hyödyntää muuttamatta sitä, on energiatehokkuuden kannalta paras vaihtoehto siirtää tätä lämpöenergiaa mahdollisimman vähän. Pitkät lämmönsiirtomatkat kehittyneilläkin menetelmillä johtavat väistämättä energiahäviöihin ja osa lämmöstä häviää siirrossa. Näin ollen maksimihyöty lämpöenergiasta saadaan, mikäli energia voidaan käyttää

lämpönä jo siinä prosessin osassa, missä se on taltioitu. Myös tuotantolaitosten itsensä lämmittäminen on energiatehokkaampi ratkaisu kuin lämmön siirtäminen esimerkiksi kaukolämpöverkkoon, tai sähköntuotantoon. (Sihvola 2019. 26–27.)

Taltioitua hukkalämpöä voi kuitenkin olla kohtuullisen vaikea hyödyntää suoraan lämpönä, sillä keskimääräinen ylijäämälämpövirta on alle 55-asteista. Tämä johtaa yleensä siihen, että talteen saatua lämpöenergiaa joudutaan jatkojalostamaan, jotta lämpimästä saataisiin kuumaa. Tehokkaimpia prosesseja tähän käyttöön ovat niin kutsutut lämpöpumput. Hukkalämmön määrän ja laadun perusteella lämpöpumppu voi laskea tai nostaa kokonaisprosessin kustannuksia, sillä sen käyttö lisää prosessin sähkön- ja/tai höyrynkulutusta ja näin ollen on mahdollista, että kokonaisenergiatarve kasvaa. (Kontu 2013. 3–4.)

Sähköntuotannon katsotaan olevan kannattavaa, mikäli laitos kykenee tuottamaan jatkuvasti tai ainakin vähintään 6000 tuntia vuodessa korkeaenergiapitoista, yli 100-asteista hukkalämpöä. Tämä tarkoittaa käytännössä ORC-tyyppisen laitoksen hyödyntämistä. ORC (Organic Rankine cycle) -prosessissa kierrätetään orgaanista nestettä, kuten silikoniöljyä tai pentaania. Nämä aineet toimivat korkeammissa lämpötiloissa kuin tavan vesi, jopa 350 asteessa, ja niillä on tyyppistä riippuen eri ominaisuuksia, tärkeimpänä kuitenkin se, että ne voitelevat järjestelmää vettä paremmin ja niillä ei ole taipumusta syövyttää esimerkiksi turbiinin siipipyöriä, kuten vedellä kun se korkeissa lämpötiloissa ja paineissa hajoaa vedyksi ja hapeksi aiheuttaen pintoihin eroosiota. (Toholammin energia 2013.)

Sähköntuotantoa on kokeiltu ORC-prosessin ohella myös perinteistä Stirlingmoottoria käyttäen. Skotlantilaisen keksijänsä, pappi Robert Stirlingin vuonna 1816 mukaan nimetty kone hyödyntää kaasujen käyttäytymistä eri lämpötiloissa. (Jarva ja Niskanen 2011. 26.) Stirling-moottori on sisäisiltä komponenteiltaan samankaltainen kuin mikä tahansa muu männän edestakaisesta liikkeestä pyörimisliikkeeksi liike-energiaa muuttava laite, mutta polttomoottoreihin verrattuna se on paljon hiljaisempi ja sen hyötysuhde riippuu vallitsevista olosuhteista, ollen kuitenkin lähtökohtaisesti korkeampi kuin tavallisilla

polttomoottoreilla. Polttomoottorista Stirling-moottorin erottaa se, että palaminen tai muu lämpöenergian tuotto tapahtuu sylinterin ulkopuolella. Tämä ominaisuus johtaa siihen, että energianlähteet ovat periaatteessa rajattomat. (Portillo 2018. 1.)

Stirling-moottorin on todettu olevan tehokkain moottorityyppi. Tämä johtuu siitä, että moottori on suljettu yksikkö, eikä siinä ole avonaisia imu- tai pakokanavia, kuten normaalisti moottorilta odotetaan. Sen toiminta perustuu siihen, että sen sisällä on kiinteä määrä kaasua, jonka lämpötilaa manipuloimalla saadaan kasvatettua ja laskettua sylinterien sisäisiä paineita. Perusmoottori on kaksisylinterinen, toisessa sylinterissä lämmitetään ilmaa, joka johtaa paineen kasvuun ja männän painumiseen alas, tämä on niin kutsuttu työtahti. Kampiakseli ja kiertokanki kääntävät pyöriessään männän liikkeen ylöspäin, mikä johtaa kompressioon ja paineistunut kuuma kaasu johdetaan kanavaa pitkin toiseen sylinteriin. Toisen sylinterin ympärillä on jäähdytyskomponentti, joka laskee sisälle tulevan kaasun lämpötilaa helpottaen sen puristamista. Kompressoitunut kylmä kaasu sitten palaa samaa kanavaa pitkin kuumapuolen sylinteriin ja sykli alkaa alusta. (Portillo 2018. 2–3.)

Tällainen moottori tarvitsee vain siis ulkoisen lämmönlähteen ja kylmänlähteen. Tähän voidaan soveltaa hukkalämmöstä saatua lämpöenergiaa, mikäli energiasisältöä on tarpeeksi. Investoinnit ja moottorin kuluminen, joka on suurimpia Stirling-moottorin negatiivisia puolia (Portillo 2018. 5), huomioiden, on todettava, että kuumalla hukkalämmöllä, yli 350 °C, on tehokkainta tuottaa sähköä perinteistä höyryturbiiniprosessia käyttäen, mutta matalammissa lämpötiloissa on hyvä ottaa huomioon nämä vaihtoehtoiset sähköntuottomenetelmät, joihin ORC-prosessi, sekä Matalalämpö-Stirling-moottorit kuuluvat. (Pihlainen 2020. 12–13.)

### **3.2 Hukkalämmöstä kaukolämmöksi**

”Kaukolämmitys on keskitetty laajojen alueiden, kuten kokonaisten kaupunkien, niiden osien tai useiden rakennusten muodostaman ryhmän lämmöntuotanto ja

-jakelujärjestelmä. Lämpöenergia kaukolämmitykseen tuotetaan keskitetysti lämmitysvoimalaitoksissa tai lämpökeskuksissa ja jaetaan kaukolämpöverkoston välityksellä asiakkaille.” (Mäkelä ja Tuunanen 2015. 11.)

Kaukolämpösovellutuksia ajatellen on syytä ottaa huomioon, että hukkalämpöä muodostuu ja sitä voidaan tehokkaasti taltioida silloin, kun lämpöä varmastikin tarvitaan. Tämä johtuu siitä, että lämmön varastointi on erittäin vaikeaa ja kustannuksia vaativaa toimintaa. Monet tehtaat keskittävätkin suuremmalti osin tuotantonsa talvikauteen, mikäli niihin on rakennettu lämmöntalteenottojärjestelmät kaukolämpöä ajatellen. Tuotannon keskittäminen talvikauteen laskee lisäksi keinoitekoisen jäähdytyksen tarvetta, sillä luonnollinen jäähdytys on pakkaskeleistä johtuen tehokkaampaa. (Lehtinen 2018. 4)

Lisäksi on otettava huomioon edellä mainittu seikka lämpötilan korkeudesta, jolloin edullisimmaksi tulee tarpeeksi energiasisältöä omaavan hukkalämmön siirtäminen suoraan lämmönvaihtimilla kaukolämpöverkkoon, eikä turhia energiahäviöitä koskien lämmönsiirtoa tai -vaihtoa ajatellen synny. Tämä asia käsittää myös kaukolämpöä tuottavien tehtaiden sijainnin, joka tulisi olla mahdollisuuksien mukaan mahdollisimman lähellä taajama-aluetta, jossa kaukolämpöä käytetään. Usein tehtaat ovatkin rakennettu kauas asutusalueista häiriötekijöiden, kuten melun ja hajun takia, joten kaukolämpöverkon liittymän rakentaminen ja sen ylläpito tulisi liian kalliiksi kannattavuutta huomioiden. (Sihvola 2019. 27.)

Tavoitelämpötilat kaukolämmön tulovedenkierrossa riippuvat kaukolämmön tarpeen määrästä vuodenajasta johtuen, mutta normaalisti tämä tarkoittaa 70 asteesta 120 asteeseen celsiusta. Vastavuoroisesti kierrosta palaava ja jäähtynyt paluuvesi on noin 25–45 °C. Lämpötilaerot voivat siis kesäkaudella olla huomattavankin pieniä, jopa 25 astetta celsiusta. Tämä johtaa siihen, että linjastoon puskehtava energiamäärä jää pieneksi ja tuotantolaitosten lauhteen hukkalämpöä tulee johtaa johonkin muuhun kohteeseen. (Mäkelä ja Tuunanen 2015. 19–20.)

## 4 Hukkalämmön talteenottometodit

### 4.1 Lämmönvaihtimet

Minkä tahansa lämpöenergian tehokas hukkaaminen eli jäähdytys tai kerääminen vaatii jonkinlaista laitekokonaisuutta, jossa lämpöä siirretään haluttuun suuntaan aineesta toiseen mahdollisimman vähän eristävien rajapintojen välityksellä. Tällaisia laitekokonaisuuksia kutsutaan lämmönvaihtimiksi. (Parviainen 2018. 10.) Yksinkertaisimmillaan lämmönvaihdin tarkoittaa paljasta putkea, jota käytetään esimerkiksi usein ajoneuvotekniikassa ohjaustehostimen öljyn jäähdytykseen (Avtotachiki 2020.), sekä tavallisissa kodin kylmälaitteissa kuten jääkaapeissa ja pakastimissa kylmäaineen lauhduttamiseen (Suomen jäähdytys-tekniikan museo 2022).

Teorian tasolla lämmönvaihtimia tarkastellessa voidaan todeta, että se on ”laite, joka siirtää lämpöenergiaa kahden tai useamman eri lämpötiloissa olevien neste- tai kaasuvirtojen välillä. Se voi myös siirtää lämpöenergiaa kiinteän pinnan tai pölymäisen materiaalin ja fluidin välillä. Lämmönvaihtimien yleisimmät käyttökohteet ovat fluidin lämmittäminen ja jäähdyttäminen sekä yksi- ja monikomponenttiliuosten haihduttaminen ja kondensointi. Lämmönvaihtimia voidaan käyttää myös muun muassa lämmön talteenottoon, sterilointiin ja pastörointiin.” (Parviainen 2018. 10.)

Lämmönvaihtimen toimintaperiaate vaikuttaa sen rakenteeseen ja nimitykseen. Lämmönvaihtimia, joissa höyrystetään nestettä kaasuksi, höyrystimet, lämmönvaihtimia, joissa kaasu kondensoidaan nesteeksi, lauhduttimet. Nämä ovat siitä erikoisia, että niissä aineen olomuoto muuttuu ja toiminta eli lämmön siirtyminen on myös tehokkainta. Lämmönvaihtimia, joissa aineen olomuoto ei muutu, ovat muun muassa jäähdyttimet, joissa kiertävän aineen lämpöenergia siirretään ulkopuoliseen aineeseen, sekä lämmittimet, joissa kiertävään aineeseen sidotaan ulkopuolista lämpöä. Yksi vähemmän käytetty lämmönvaihdintyyppi on regeneraattori. Regeneraattorin toiminta perustuu lämmönvaihtimeen virtautettavaan kuumaan aineeseen, josta lämpö sitoutuu viileämpään lämmönvaihdin

rakenteeseen. Lämmennyt lämmönvaihdin tyhjenetään ja sinne syötetään siten kylmempää ainetta, johon lämmönvaihtimen rakenteissa oleva lämpö siirtyy. (Parviainen 2018. 10.)

Ulkomuodoltaan erilaisia lämmönsiirtimiä on lukuisia erilaisia, mutta yleisimmin käytetyt kaksi päätyyppiä ovat putkilämmönvaihdin ja levylämmönvaihdin. Putkilämmönvaihtimet ovat rakenteeltaan yksi tai moniputkisia. Yksiputkisessa versiossa neste tai kaasu liikkuu putken sisällä ja kerää tai luovuttaa lämpöä putken seinämän toisella puolella olevan aineen lämpötilasta riippuen. Putken ympärillä on usein vaippa, jonka sisällä virtaa myös nestettä tai kaasua, mikäli lämmönvaihtimen toimintaa halutaan tehostaa. Moniputkisessa tyypissä jäähdytettävä aine johdetaan yhden ison kollektorin välityksellä pienempiin putkiin, jotka yhdistyvät taas toisesta päästään toiseen kollektoriin. Tällä tavoin saadaan maksimoitua lämpöä välittävien rajapintojen pinta-ala ilman, että virtauksen tarvitsee kärsiä. Tällaisessa kokoonpanossa vaipan sisällä kiertävälle prosessiaineelle on usein rakennettu ohjauslevyjä, jotka pakottavat virtauksen kulkemaan koko lämmönvaihtimen alalta estäen prosessiaineen luonnollisen taipumuksen mennä lyhintä reittiä. Näin saadaan samalla virtauksella maksimoitua vaippapuolen prosessiaineeseen sitoutuva lämmön määrä. (Vahasilta Oy 2022. 1.)

Putkilämmönvaihtimet ovat edelleenkin suosituin lämmönvaihdintyyppi teollisissa sovellutuksissa niiden yksinkertaisen rakenteen, halvan valmistettävyyden, huollettavuuden ja jäykän rakenteen ansiosta, sillä mitä enemmän putkia niin sitä paremmin lämmönsiirrin kantaa itsensä (Vahasilta Oy 2022. 1). Kuitenkin uudentyyppinen ja tehokkaampi levytyyppinen lämmönvaihdin on alkanut myös yleistymään. Levylämmönvaihtimien yleistymistä on helpottanut uusi rakenne, jossa useat levyt kiinnitetään toisiinsa puristamalla kiinnityspulteilla. (WTSML 2019. 1.)

Levylämmönvaihdin käsittää kokonaisuuden, jossa on useita muotoon painettuja levyjä puristettuna yhteen kahden puristuslevyn väliin. Näissä päädyissä sijaitsevilla puristuslevyillä on putkiliitännät prosessiaineita varten. Levyt ovat yleensä suorakulmioita, joiden kulmissa virtauskanavat sijaitsevat ja ne on muotoiltu siten, että kussakin levynvälissä virtaa vain yksi aine, eri aine joka



toisessa välissä. Tällä tavoin saadaan lämmönvaihtimen tehoa nostettua suuresti vain lisäämällä kanavointilevyjä puristuslevyjen väliin. Prosessi aine kulkee näissä levyjen välisissä kanavissa kulmittain ja levyt on muotoon painettuja siten, että siihen on muodostunut aaltomaista kuviota, joka rikkoo aineen virtauskuviota luoden turbulenttisia ominaisuuksia. (WTSML 2019. 1.) Turbulenttinen eli pyörteilevä virtaus, jossa aine sekoittuu jatkuvasti on tehokkaampi lämmönvaihdossa kuin normaalisti putken tai levyn pinnan läheisyyteen syntyvä lineaarinen virtaus. (Hautala ja Peltonen 2011. 167.)

Valmistusmateriaaleina käytetään lähes kaiken tyyppisiä metalliseoksia tarpeesta ja käyttökohteesta riippuen. Materiaalia valittaessa olisi kuitenkin hyvä varmistua tarvittavasta lämmönjohtavuudesta, jotta lämmönvaihtimen mitoitus onnistuisi paremmin. Lisäksi tulee ottaa huomioon lujuudelliset aspektit, sillä mitä ohuempi seinämä, sitä parempi lämmön vaihtuvuus prosessiaineiden välillä. Parhaiten lämpöä johtaa hopea, jolla lämmönjohtavuus on  $430 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ , kalliin hinnan vuoksi käytetään kuitenkin mieluummin kuparia, joka on lähes yhtä tehokas,  $400 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ . (Hautala ja Peltonen 2011. 167.)

Teollisissa sovellutuksissa joudutaan kuitenkin pitäytymään paremmin happoja ja muita kemikaaleja kestävässä materiaaleissa. Alumiinit  $220 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ , seosteilla pienempi ja teräs  $45 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$  ovat eniten käytetyimmät materiaalit lämmönvaihtimissa. Alumiini vain rajatuissa kohteissa kuitenkin, sillä sen sulamispiste on matala,  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ , sekä sillä on huonompi mekaanisen kulutuksen kestävyys kuin monilla teräksillä. (Valtanen 384, 413.) Nykyisin käytetyimpiä teräksiä ovat paljon kulutusta kestävät ruostumattomat teräkset, joilla on kuitenkin verrattain huono lämmönjohtavuus  $10\text{--}30 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$  seostuksesta riippuen, tämä johtaa lämmönvaihdinten koon ja massan kasvuun (Jiangsu 2018. 2).

## 4.2 Lämpöpumput

Lämpöpumppu on käänteisesti toimiva lämpövoimakone. Lämpövoimakoneita ovat esimerkiksi kaikki polttomoottorit, stirling moottorit ja muut moottorit, joiden toiminta vaatii suuria energiamääriä, toisin sanoen lämpöä. Näiden

moottoreiden tai koneiden tuotos on liike-energiaa, jota saadaan lämpöenergiasta ja sen aikaansaamista aineiden ominaisuuksien muutoksista. Lämpövoimakoneen sivutuotteena syntyy hukkalämpöä ja sen määrä saadaan selville koneen tehon perusteella, sillä kaikki poltossa tapahtuvasta energiasta siirtyy eteenpäin energian häviämättömyyden perusteella ja kaikki valjastamaton työ katoaa lämpöenergiana. (Ylinen 2022.)

Lämpöpumpuilla siirretään lämpöenergiaa systeemistä toiseen. Tähän operaatioon tarvitaan kuitenkin ulkopuolista energiaa, joka on usein sähkön muodossa. Lämpöä siirretään haluttuun suuntaan prosessissa riippuen laitteiston rakenteesta, kesällä ilmalämpöpumppu siirtää lämpöä rakennuksen sisältä ulos ja talvella ulkoa sisälle. Tämä ei kuitenkaan onnistu ilman ulkoisen energian mahdollistamaa työtä. Ulkoisella energialla nostetaan prosessiaineen painetta, joka saa aikaan olomuodon muutosta. Lämpöpumpuissa käytetään normaalioloissa kaasuja, joiden lämpötilan muutokset ovat rajuja suhteessa paineen muutoksiin. (Suomen työkalu Oy 2022. 1.)

Paineen noustessa jonkinlaisen kompressorin toimesta kaasu lämpenee voimakkaasti. Kompressorilta kuuma kaasu johdetaan putkia pitkin lauhduttimeen, jossa kaasun lämpö siirtyy kylmempään prosessiaineeseen, esimerkiksi ilmaan tai veteen. Jäähtyessään korkeapaineinen kaasu muuttuu nesteeksi korkean paineen aiheuttaman nousseen kiehumispisteen takia. Paine pysyy siis samana, mutta lämpötilan muuttuessa myös olomuoto muuttuu. (Suomen työkalu Oy 2022. 2.)

Lauhduktimessa nesteytetty kaasu johdetaan jonkinlaiseen paisuntaventtiiliin, joka on käytännössä kuristusventtiili, joka rajoittaa virtauspinta-alaa kasvattaen itse virtausta ja samalla fysiikan lakien mukaisesti romahduttaen nesteen paineen. Paineen radikaali putoaminen saa aikaan voimakasta jäähtymistä nesteessä. Kylmä, matalapaineinen neste johdetaan sitten putkea pitkin höyrystimeen, jossa on taas tarkoitus aiheuttaa olomuodon muutos. (Suomen työkalu Oy 2022. 3.)

Höyrystimessä kylmää nestettä lämmitetään toisella prosessiaineella, jolloin matalapaineinen viileä neste saavuttaa kiehumispisteensä ja kaasuuntuu sitoen

voimakkaasti lämpöä. Höyrystimeltä viileä, matalapaineinen kaasu johdetaan takaisin kompressorille paineistusta varten. Usein ennen kompressoria on vielä nesteenerotinsäiliö, johon kaasuuntumaton neste keräytyy ja kaasuuntuu virtaavan kaasun ja ympäristön lämmön seurauksena. Tämä prosessi toistaa itseään ja halutusta kohteesta saadaan kylmä tai kuuma. (Suomen työkalu Oy 2022. 4.)

Lämpöpumppuja on saatavilla eri tehoisia ja erilaisiin käyttötarpeisiin. Jo pelkästään kiinteistöjen lämmitykseen käytettävien lämpöpumppujen skaala on laaja. Löytyy eri tehoisia ja kokoisia, sekä eri prosessiaineilla toimivia. Toimintaperiaate on kuitenkin kaikilla lämpöpumpuilla aivan sama. Nykyisin lämpöä voidaan ottaa talteen poistoilmasta, ulkoilmasta, vesistä, maasta tai kalliosta. Mikäli kiinteistöjen lämmityksessä siirrytään sähköpattereista käyttämään lämpöpumppuja, soidaan saavuttaa suuriakin säästöjä. Lisäksi lämpöpumppujen yksityiskäyttöä kannustetaan ilmastosyistä suomalla muun muassa verohelpotuksia. Vanhoja kiinteistöjä ajatellen lämpöpumpun käyttöönotto on myös siltä osin kannattavaa, että se vähentää lämmityksestä koituvaa vaivaa ja varsinkin asuinkiinteistöjen kohdalla, toimii jopa myyntihinnan kasvattajana. (Onninen Oy 2022.)

## **5 Opinnäytetyössä käytetyt menetelmät**

Työtä suunniteltaessa määritettiin pohjakysymys, jossa pyrittiin saamaan selville, kuinka selvitetään kuivureiden tuottaman vesihöyryn määrä ja kuinka paljon tästä höyrystä saatava energia vaikuttaa koko laitospompleksin energiataaseeseen. Tämä asettelu johti sitten siihen, että vaikka kuivureiden hönkähöyryn tuotto niitten maksimikapasiteetin ollessa käytössä on suhteellisen helposti selvitettävissä, ei se kuitenkaan pidä todellisuudessa paikkaansa. Höyryn määrään vaikuttavat nimittäin monet eri tekijät.

Jotta saataisiin selville realistiset lukemat muodostuvan vesihöyryn määrälle, tulee seurata eri materiaalien pelletöintimääriä, niiden vuodenaajoista vaihtuvia kosteuslukemia, jotka saadaan laboratorio-olosuhteissa suoritetuissa mittauksissa, sekä kosteuden vaihtelua pelletöintiprosessin aikana, sillä vastaanottoon

vietävää raaka-ainetta ei punnita vaan käytetyn raaka-aineen määrä tulee ratkaista valmiin tuotteen määrästä. Höyryn määrään vaikuttaa lisäksi kuivureita lämmittävän lauhteen lämpötila ja virtaus.

Tarkastelemalla kuivureiden hönkähöyryn tehoa, ratkaistaan mahdollisen lämmöntalteenottojärjestelmän vaikutus kaukolämmöntuotannon tarpeisiin. Tämä tarkoittaa lähinnä sitä, että esitetään laskennallinen oletamus kaukolämmön tarpeesta ja suhteutetaan siihen kulloinkin saatavilla olevien lämmöntuottomethodien tuottamat energiamäärät. Tavoitteena olisi, että aktiivihilitehtaan ja kuivureiden lämmöntalteenotoista saataisiin tarpeeksi lämpöenergiaa, jotta voimalaitosta ei tarvitsisi erikseen käyttää lisälämmöntuottoon.

Tarkasteltavat suureet:

Raaka-aineen kosteus, m-%

Kuivatun raaka-aineen kosteus, m-%

Pelletin kosteus, m-%

Pelletin tuotanto, kg/h tai t/h

Kuivureiden hönkähöyryn lämpö, °C

Kuivureiden hönkähöyryn paine, bar tai Pa

Aktiivihilitehtaan kaukolämmöntuotto, MW

Kaukolämmön tarve, MW

Laskettavat suureet:

Kuiva-aineen määrä, tonnia

Raaka-aineen määrä, tonnia

Hönkähöyryn määrä, tonnia

Hönkähöyryn energiamäärä eli ominaiskokonaisentalpia, kJ/kg

Hönkähöyryn tuottama energia, W tai MW

Voimalatoksen lämmöntuottotarve, MW

Hahmotelmavaiheessa käytettiin tuotannon osalta omavaltaisia, mutta lähellä totuutta olevia lukuja ja niiden mukaisesti tarkasteltiin energian tarvetta ja sen saantia. Vesihöyryn energiasisältö eli entalpia katsottiin Mollier hs -piirroksesta vallitsevan paineen ja lämpötilan avulla. Tämä visuaalinen tarkastelu johtaa

kuitenkin helposti virheisiin, joten varsinaisessa laskennassa päätettiin käyttää Microsoft Excelin termodynamiikan apuohjelmaa, joka sisältää muun muassa erilaisia kylmäaineiden ja vesihöyryn entalpia- ja entropialaskureita.

Tämä kyseinen lisäosa on ladattavissa ilmaiseksi National Science Foundationin ylläpitämältä sivustolta Excel In Mechanical Engineering. Käyttämällä koneellista laskentaa vältetään inhimillisiltä virheiltä ja data on helposti käytettävissä ja muokattavissa visuaaliseksi taulukoksi luennan helpottamista varten. Kaikki muu tarvittava laskenta suoritetaan myös käyttämällä Excelin laskentatoimintoja, jolloin matemaattiset operaatiot voidaan suorittaa suoraan taulukkomuodossa ja saatavien lukujen asiayhteys on helposti nähtävissä. Lisäksi saaduista luvuista saadaan tällöin muodostettua kuvaajia, jotka ovat helposti päivitettävissä, mikäli lähtölukuja täytyy muuttaa.

Lopputulena saadaan kolme joukkoa kuukausittaisia teholumkia. Nämä teholumkemat kuuluvat pelletöinnin tarpeelle, kaukolämmön tarpeelle ja määritettävän kuivureiden lämmönoton tuotolle. Tähän litaniaan, kun lisätään vielä toiminnassa olevan aktiivihilitehtaan uunin lämmöntalteenoton tuotto, niin saadaan aikaan lukujoukko, joka kuvastaa koko laitosalueen energiatasetta, poissulkien voimalaitoksen tuotto, joka näillä lämmöntalteenottojärjestelmillä halutaankin poissulkea.

## **6 Kuivureiden hönkähöyryn teho ja sen vaikutus energiataaseeseen**

### **6.1 Lähtölukujen selvittäminen**

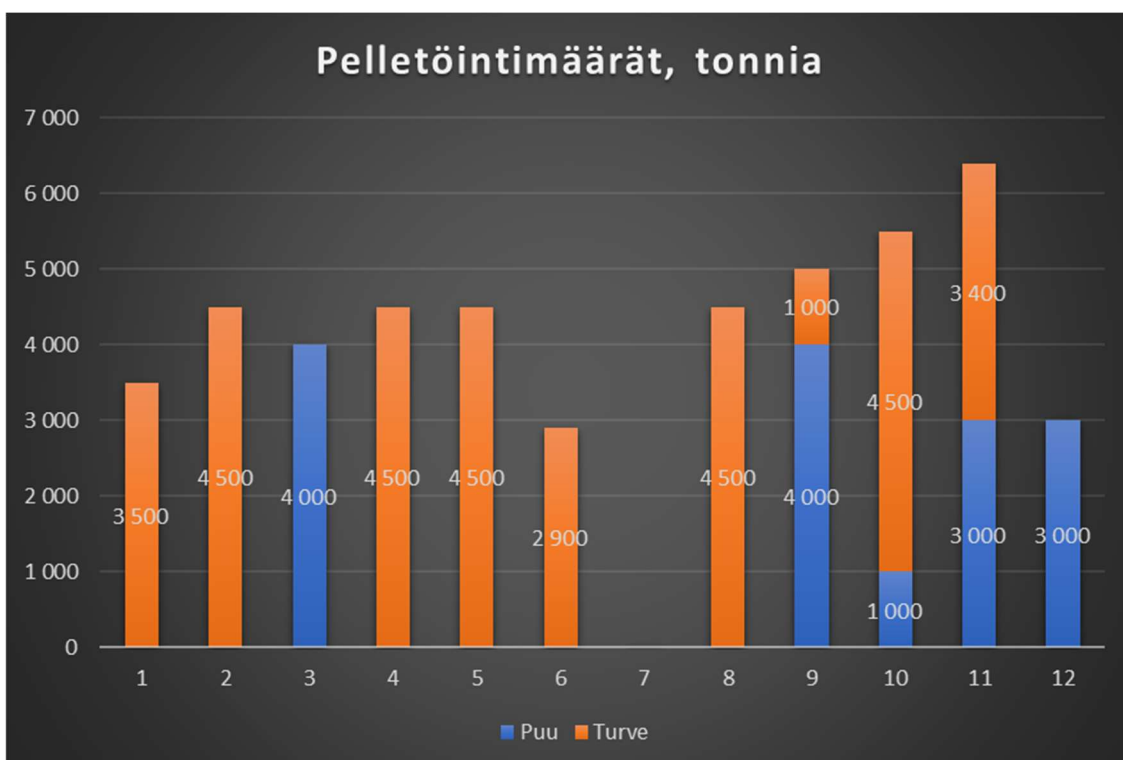
Jotta voitaisiin määrittää kuivureille menevää tai niiltä saatavaa energian määrää, täytyy ensin määritellä lähtöparametrit. Tämä tarkoittaa sitä, että pitää karottaa mistä saadaan energiaa ja minkä verran ja mihin sitä sitten menee. Energian kulutukseen pelletöinnissä vaikuttaa tuotantomäärät ja pelletöitävä raaka-aine, sillä puun ja turpeen ominaisuudet ovat erilaisia. Lähtökohtaisesti puupuru

on mäempää kuin pelletöitävä turve, joten siitä haihdutetaan ennen pelletöintiä enemmän kosteuttakin pois, mikä johtaa suurempaan energiasisältöön ja suurempaan hönkähöyryn tehontuottoon.

Tarkat luvut saadaan tuotantolaitoksen raportoinnista halutulla tarkkuudella, jopa vuorokohtaisestikin, mutta koska tämän ei katsota olevan järkevää tarkasteltaessa vuosi- tai kuukausitason tuotantoa, päädytään käyttämään kosteudessa pitkän ajan keskimääriä, sekä tuotantomäärissä keskimääräisiä tuotantomääriä kuukausittain. Seuraavissa taulukoissa nähdään edellä mainittuja lukuja. Taulukko 1 kertoo pelletöitävän materiaalin keskiarvokosteuksia eri tuotantovaiheissa ja taulukko 2 eri raaka-aineiden pelletöintimääriä.

raaka-aine	puru	turve
kosteus ennen kuivureita, %	50,63	46
kosteus ennen pelletöintiä, %	12,12	15,08
pelletin kosteus, %	8,31	10,65

Taulukko 1. Kosteudet eri tuotantovaiheissa eri raaka-aineilla.



Taulukko 2. Esimerkkituotantomäärät tonneina kuukausittain eri raaka-aineilla.

Kuten taulukosta 1 voidaan havaita, vaihtelee kosteus eri tuotantovaiheissa suuresti ja vaikka puristusvaiheessa tapahtuva kosteuden haihtuminen on helpposti sivuutettu, on se silti huomioitavan suurta. Tämä asia pitää ottaa huomioon tulevissa laskelmissa, sillä vain valmis pelletti punnitaan ja usean prosentin kosteusvaihtelut vaikuttavat suuresti tuotteen massaan. Käytettävä raaka-aineen määrä on siis ratkaistava laskennalla ottaen huomioon massavaihtelut raaka-aineesta valmiiksi tuotteeksi. Taulukosta voidaan lisäksi havaita, että vaikka turve on lähtökohtaisesti kuivempaa kuin puupuru, pelletöidään sitä kuitenkin huomattavan paljon kosteampana. Tämä johtuu käytännössä opitusta asiasta, sillä hieman kosteampana turve on paremmin puristettavissa laadukkaaksi pelletiksi.

Eri raaka-aineiden käyttö määräytyy aktiivihiilitehtaan tarpeiden mukaisesti, sillä pääosassa turvepelletti menee prosessin sisäiseen tuotantoon aktiivihiilen raaka-aineeksi. Puupelletti on ominaisuuksiltaan soveltuvaa kiinteistöjen kattiloissa poltettavaksi, sitä markkinoidaankin kotitalouskäytöstä lähtien erilaisiin lämmitysratkaisuihin. Taulukko 2 osoittaa esimerkkituotantomäärien lisäksi mahdollista raaka-aineen vaihtuvuutta pelletöintiprosessissa.

Eri raaka-aineiden erikorkuiset kosteusprosentit johtavat siihen, että eri raaka-aineiden kuivaamiseen kuluva energia vaihtelee. Puu on märempää ja sitä kuivataan enemmän ennen puristamista ja turve on kuivempaa, mutta se myös jätetään kosteammaksi puristusta ajatellen. Ajodataraportoinnista saadaan selville tarkat lämpöenergiankulutusluvut painotonna kohden eri raaka-aineille niiden keskimääräisillä kosteusprosentteilla, nämä luvut nähtävissä taulukossa 3.

Puupelletti höyryn kulutus, MWh/t	0,9
Turvepelletti höyryn kulutus, MWh/t	0,8

Taulukko 3. Eri raaka-aineiden kuivaukseen käytettävä energia.

Kuivureiden höyrynkulutusta tarkastellessa on syytä huomioida, että annetut luvut ovat käytännössä todettuja lukemia. Laboratorio-olosuhteissa suoritettavat mittaukset voivat vaihdella kuivatusprosessin lukujen kanssa, sillä

laboratoriossa ei kyetä kompensoimaan laitekohtaisia lämpövuotoja ja näin ol-  
len höyrynkulutusluvut ovat teoriatasolla matalammat.

## 6.2 Kuivureiden käyttämä energia

Yhdistämällä taulukoiden 2 ja 3 tiedot, voidaan ratkaista kuukausittainen te-  
hontarve megawattitunteina kullekin raaka-aineelle, sekä yhteenlaskettuna.  
Tämä tapahtuu käytännössä kertomalla tuotantomäärät oikeilla kertoimilla. Käy-  
tännössä on todettu rumpukuivureiden vaativan tehoa purua kuivattaessa 0,9  
MWh tonnia kohden, turpeella tämä sama tehontarve on 0,8 MWh/t. Sijoitta-  
malla taulukoiden 2 ja 3 arvot yhtälöihin 1 ja 2, saadaan kuukausittainen kuivu-  
reiden lämpötehontarve kaavion 4 mukaisesti.

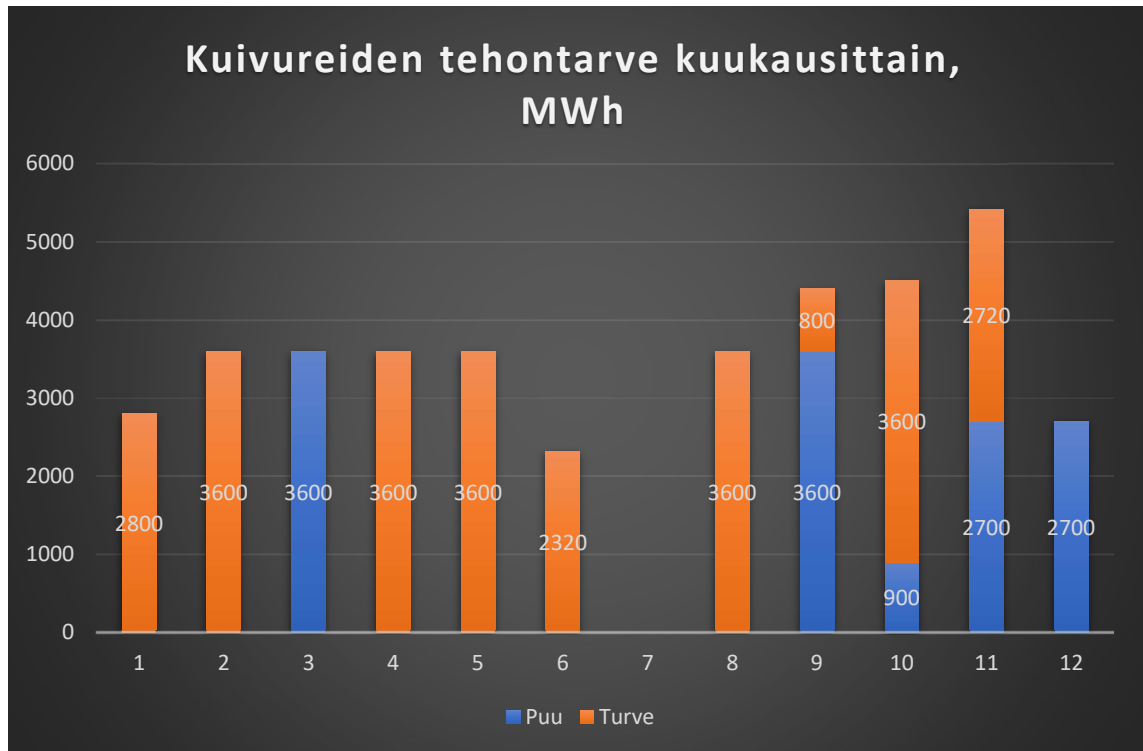
$$m_p * P_{kp} = P_p \quad (1)$$

missä  $m_p$  = tuotettu puupelletti  
 $P_{kp}$  = puupelletin raaka-aineen kuivatukseen kuluva energia  
 $P_p$  = puupelletöinnin vaatima lämpöenergia

$$m_t * P_{kt} = P_t \quad (2)$$

missä  $m_t$  = tuotettu turvepelletti  
 $P_{kt}$  = turvepelletin raaka-aineen kuivatukseen kuluva energia  
 $P_t$  = turvepelletöinnin vaatima lämpöenergia





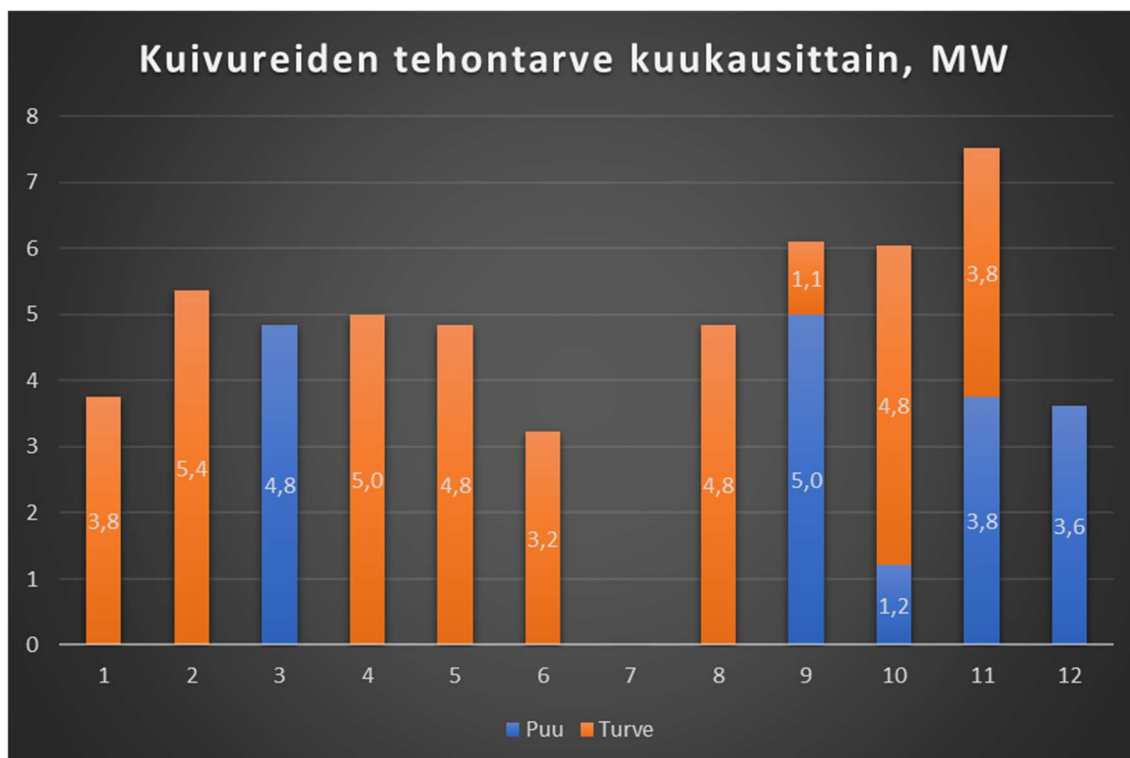
Taulukko 4. Kuivureiden tehontarve MWh kuukausittain.

Mikäli taulukon 4 arvot halutaan esittää helpommin ymmärrettävinä megawatteina, tulee luvuista jakaa tunnit pois. Koska megawattitunnit on ilmoitettu kuukausikohtaisesti, tulee ottaa huomioon kuukauden vuorokausimäärä. Yksinkertaisimmillaan megawattitunnit saadaan muutettua megawateiksi yhtälön 3 mukaisesti.

$$MW = \frac{MWh}{h} = \frac{MWh}{d \cdot 24} \quad (3)$$

missä  $d$  = päiviä kuukaudessa

Laskemalla auki taulukon 4 tiedot yhtälön 3 mukaisesti kuukausi kerrallaan, saadaan arvot kuukausittaisesta kuivureiden lämpötehontarpeesta megawattitunteina. Tämä kuukausittainen tehontarve on esitetty raaka-aineet eriteltyinä taulukossa 5.



Taulukko 5. Kuivureiden keskimääräinen tehontarve MW kuukausittain.

Taulukon 5 graafinen esitys mukaillee hyvin taulukkoa 4, mutta luvut ovat nyt paremmin ymmärrettävinä megawatteina. Heinäkuun kohdalla voidaan huomata tehtaan seisakkikuukausi, jolloin pelletöintiä ei tapahdu.

### 6.3 Kuivureiden tuottama hönkähöyry

Kuten jo aiemmin on käynyt ilmi, vaikuttaa raaka-aine suuresti kuivureissa haihdutetun kosteuden määrään. Tämä tarkoittaa käytännössä hönkähöyryn määrää. Hönkähöyryä muodostuu, kun aktiivihilitehtaan tai voimalaitoksen lauhdeella lämmitettävä kuivuri lämmittää sisällään olevaa raaka-ainetta, josta haihtuva kosteus muodostuu korkealämpötilaiseksi vesihöyryksi. Tästä vesihöyrystä on tarkoitus ottaa hukkalämpö talteen suoraan kaukolämpövesikiertoon, jolloin muiden prosessin osien kaukolämmöntuottotarve laskee.

Hönkähöyryn määrään vaikuttaa siis raaka-aine ja sen kosteus, jotka ovat esitetty taulukossa 1, kunkin raaka-aineen tuotantomäärä, jotka näkyvät taulukossa 2. Höyryn tuotantoon vaikuttaa lisäksi kuivureita lämmittävän lauhteen

virtausnopeus, sillä lauhde tulee kuivureihin erittäin korkeassa lämpötilassa. Laskemalla lämmittävän lauhteen virtausnopeutta saataisiin nostettua kuivureiden tehoa ja näin ollen myös höyryn tuottoa. Kuitenkin lauhteen lämpötila pyritään normaalisti pitämään vakiona johtuen siitä, että lauhteella itselläänkin lämmitetään kaukolämpöverkkoa ja lauhteen lämpötilan suuri laskeminen nostaisi sen edelleen lämmitystarvetta voimalaitosprosessissa sähköntuotantoa ajatellen, jätetään sen lämpötilavaihtelut siis huomiotta.

Voidakseen ratkaista tuotettu höyryn määrä, täytyy ensin määritellä lähtökohdat laskelmille. Ratkaistaan ensin kummallekin raaka-aineelle yhtä tuotettua pellettitonnia kohden kuiva-ainemäärä yhtälöiden 4 ja 5 mukaisesti. Valmiista pellettitonnista saadaan ratkaistua kuiva-aineen määrä vähentämällä siitä sisältyvä kosteus. Kosteuden massaprosentit saadaan taulukosta 1.

$$k_p = m_p - m_p * \frac{H_{pp}}{100} = 917 \text{ kg} \quad (4)$$

missä  $k_p$  = kuiva-aineen massa tuotetussa puupellettitonnissa  
 $m_p$  = tuotettu puupellettitonni  
 $H_{pp}$  = valmiin puupelletin kosteus massaprosentteina

$$k_t = m_t - m_t * \frac{H_{tp}}{100} = 894 \text{ kg} \quad (5)$$

missä  $k_t$  = kuiva-aineen massa tuotetussa turvepellettitonnissa  
 $m_t$  = tuotettu turvepellettitonni  
 $H_{tp}$  = valmiin turvepelletin kosteus massaprosentteina

Kun on määritetty kuiva-aineen osuus jokaista tuotettua pellettitonnia kohden eri raaka-aineilla, voidaan määrittää kuiva-aineen massan avulla pellettitonnin valmistamiseen tarvittava raaka-aineen määrä. Raaka-aineiden määrät saadaan lisäämällä raaka-aineiden kosteudet taulukosta 1 kuiva-aineen määriin massoina. Nämä laskennat suoritetaan yhtälöissä 6 ja 7.

$$r_p = \frac{\frac{k_p}{100-H_p}}{100} = 1857 \text{ kg} \quad (6)$$

missä  $r_p$  = puupellettitonnin vaatima raaka-aineen massa  
 $k_p$  = kuiva-aineen massa tuotetussa puupellettitonnissa  
 $H_p$  = purun kosteus

$$r_t = \frac{\frac{k_t}{100-H_t}}{100} = 1655 \text{ kg} \quad (7)$$

missä  $r_t$  = turvepellettitonnin vaatima raaka-aineen massa  
 $k_t$  = kuiva-aineen massa tuotetussa turvepellettitonnissa  
 $H_t$  = turpeen kosteus

Realistisen höyryn määrän selvittämiseksi on huomioitava puristusvaiheessa haihtuva kosteus. Kuivureissa haihtuvan vesihöyryn määrä saadaan vähentämällä kuivatun raaka-aineen massa ennen puristamista kuivaamattoman raaka-aineen massasta. Kuivatun raaka-aineen massa saadaan laskettua taulukon 1 kosteusprosenttien mukaisesti. Raaka-ainekohtaisesti nämä laskut suoritetaan yhtälöissä 8 ja 9.

$$s_p = r_p - \frac{\frac{k_p}{100-H_{kp}}}{100} = 814 \text{ kg} \quad (8)$$

missä  $s_p$  = purun kuivauksen tuottama hönkähöyry  
 $r_p$  = puupellettitonnin vaatima raaka-aineen massa  
 $k_p$  = kuiva-aineen massa tuotetussa puupellettitonnissa  
 $H_{kp}$  = kuivatun purun kosteus

$$s_t = r_t - \frac{\frac{k_t}{100-H_{kt}}}{100} = 602 \text{ kg} \quad (9)$$

missä  $s_t$  = turpeen kuivauksen tuottama hönkähöyry  
 $r_t$  = turvepellettitonnin vaatima raaka-aineen massa  
 $k_t$  = kuiva-aineen massa tuotetussa turvepellettitonnissa

$$H_{kt} = \text{kuivatun turpeen kosteus}$$

#### 6.4 Kuivureiden hönkähöyryn sisältämä teho

Kuten jo aiemmin on käynyt ilmi, vaikuttaa raaka-aine suuresti kuivureissa haihdutetun kosteuden määrään. Tämä tarkoittaa käytännössä hönkähöyryn määrää. Hönkähöyryä muodostuu, kun aktiivihiilitehtaan tai voimalaitoksen lauh-teella lämmitettävä kuivuri lämmittää sisällään olevaa raaka-ainetta, josta haihtuva kosteus muodostuu korkealämpötilaiseksi vesihöyryksi. Tästä vesihöyrystä on tarkoitus ottaa hukkalämpö talteen suoraan kaukolämpövesikiertoon, jolloin muiden prosessin osien kaukolämmöntuottotarve laskee.

Hönkähöyryn määrään vaikuttaa siis raaka-aine ja sen kosteus, jotka ovat esitetty taulukossa 1, kunkin raaka-aineen tuotantomäärä, jotka näkyvät taulukossa 2. Höyryn tuotantoon vaikuttaa lisäksi kuivureita lämmittävän lauhteen virtausnopeus, sillä lauhde tulee kuivureihin erittäin korkeassa lämpötilassa. Laskemalla lämmittävän lauhteen virtausnopeutta saataisiin nostettua kuivureiden tehoa ja näin ollen myös höyryn tuottoa. Kuitenkin lauhteen lämpötila pyritään normaalisti pitämään vakiona johtuen siitä, että lauhteella itselläänkin lämmitetään kaukolämpöverkkoa ja lauhteen lämpötilan suuri laskeminen nostaisi sen edelleen lämmitystarvetta voimalaitosprosessissa sähköntuotantoa ajatellen, jätetään sen lämpötilavaihtelut siis huomiotta.

Liitteenä 1 olevasta taulukosta voi nähdä hönkähöyryn tehon muodostumisen ominaisentalpian ja höyryn virtauksen funktiona. Ominaisentalpia on yleinen keino esittää energiamääriä höyrytekniikassa ja sen yksikkönä käytetään J/kg.

Ominaisentalpia kertoo yksiselitteisesti prosessiaineen sisältämän energian kilogrammaa kohti jossakin lämpötilassa  $T$ , paineessa  $p$  ja jollakin ominaistilavuuden  $V$  arvolla verrattuna sovittuun referenssitasoon (Vesterinen 2012. 16–17).

Entalpia on normaalipaineessa 105 celsiusasteen lämpötilassa olevalle vesihöyrylle noin 2685,9 kJ/kg.

Jos laskennan helpottamiseksi oletetaan tuotannon olevan tasan tonni valmista tuotetta tuntia kohden niin vesihöyryn teho saadaan helposti ratkaistua käyttämällä 6.3 kohdassa ratkaistuja vesihöyryn määriä. Tehon yksikön ollessa W tai toisin sanoen J/s, niin on ratkaistava tuotettavan höyryn määrä sekunnissa ja kerrottava se entalpialla, jonka vakioarvo on määritetty edellä. Suoritetaan hönkähöyrytehon laskut kaavoilla 10 ja 11.

$$P_{sp} = 2685,8 \frac{kJ}{kg} * \frac{s_p}{3600 s} = 607 W \quad (10)$$

missä  $P_{sp}$  = puun kuivauksesta saatavan hönkähöyryn teho

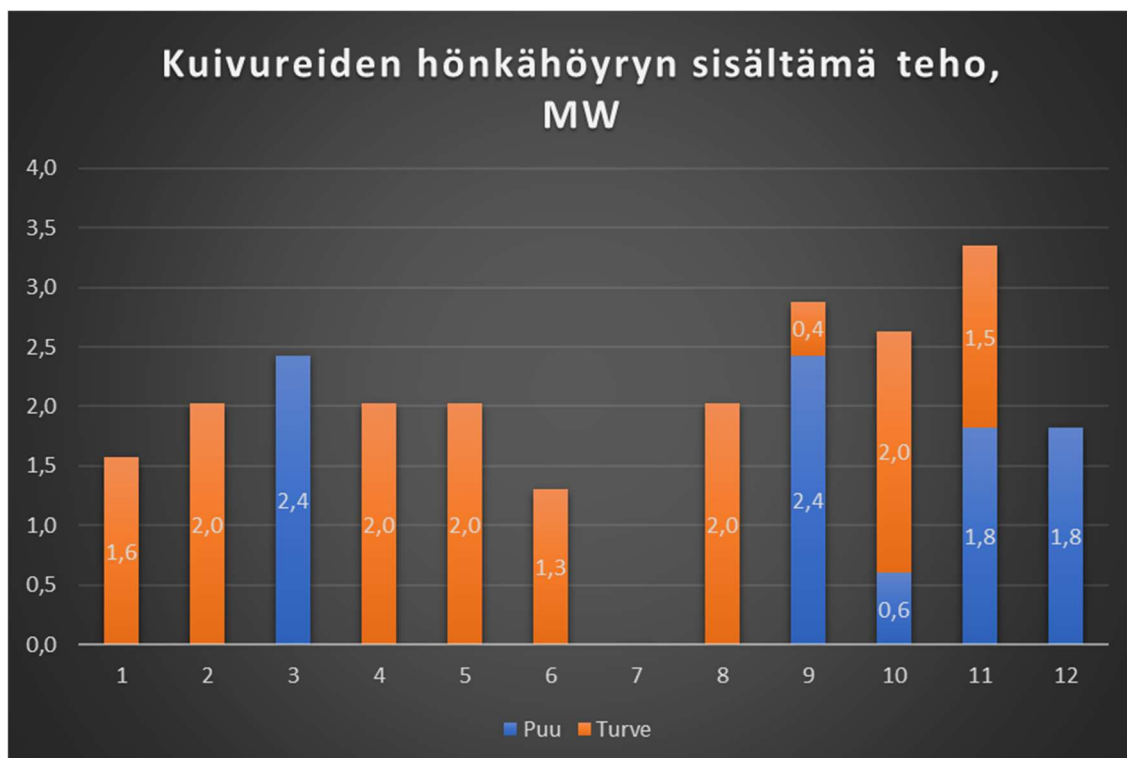
$s_p$  = Puun kuivauksen tuottama hönkähöyry

$$P_{st} = 2685,8 \frac{kJ}{kg} * \frac{s_t}{3600 s} = 449 W \quad (11)$$

missä  $P_{st}$  = turpeen kuivauksesta saatavan hönkähöyryn teho

$s_t$  = turpeen kuivauksen tuottama hönkähöyry

Suhteuttamalla nämä yhtälöistä 10 ja 11 saadut teholumemat kuukausittaiseen tuotantoon, kuten taulukossa 2 on esitetty, saadaan keskimääräinen hönkähöyryn tuottama teho kuukausittain. Raaka-ainekohtainen hönkähöyryn teho esitetty kuukausittain taulukossa 6.

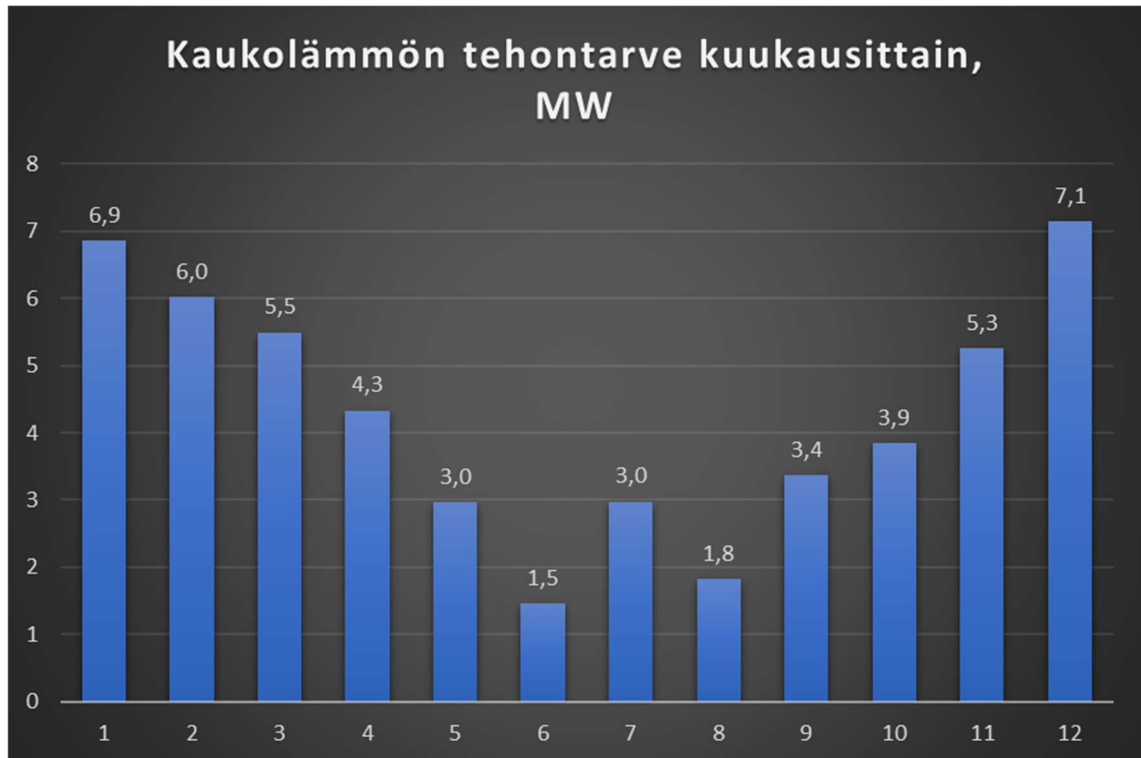


Taulukko 6. Kuivureiden hönkähöyryn sisältämä teho kuukausittain.

Mikäli verrataan taulukkoa 6 taulukoihin 5 ja 2, huomataan kuivausmäärien olevan verrannollisia tehontarpeeseen, mutta myös kuivureiden lämpötehon palautusprosentin kasvavan tuotannon lisääntyessä. On toki huomioitavaa, että hönkähöyryn sisältämää tehoa ei välttämättä kaikkea ole mahdollista taltioida laitteistojen rakenteesta riippuen.

## 6.5 Kaukolämmön lämmöntuottotarve

Neova Oy:n tarjotessa kaukolämmöntuotantoa lähialueen kaukolämpöimijoille usean vuoden ajan, on kaukolämmön menekki ja täten myös kaukolämmön lämmöntuottotarve vakioitunut lähelle tiettyjä teholumkia. Käytettäkään tässä työssä seuraavassa taulukossa 7 esitettäviä esimerkkilukemia, joista käy ilmi keskimääräinen kaukolämmön tarve kuukausitasolla. Näitä lukemia tarkasteltaessa on huomioitava, että ne ovat tosiaankin vain keskimääräisiä arvioita, eivätkä edusta tai näytä todellisia piikkitehontarpeen vaihteluita.



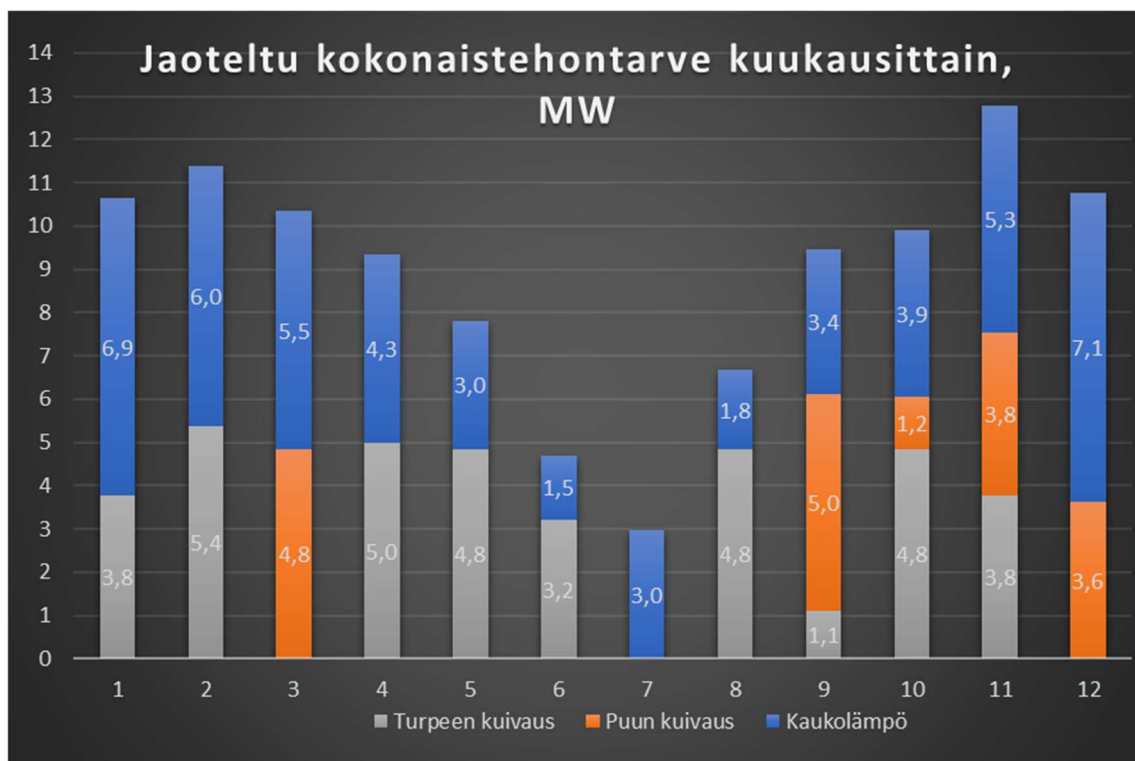
Taulukko 7. Kaukolämmön esimerkkitehontarve kuukausittain, MW.

Kaukolämmön tehontarvetta tarkkailtaessa voidaan huomata suurimman osan lämpötehontarpeesta sijoittuvan talvikauteen. Tämä johtuu suoraan vallitsevista sääolosuhteista, sillä kylminä kausina tarvitaan lämmitystä, mutta kesäkuukausina lämmöntarve lämpötilan kasvaessa pienenee. Kaukolämmön tehontarve vaihtelee vuosittain ulkolämpötiloista johtuen, joten tulevaisuuden tarkka arviointi on mahdotonta.

## 6.6 Kokonaislämpöenergian tarve

Kun liitetään yhteen käydyt asiat kohdista 6.2 Kuivureiden käyttämä energia ja 6.3 Kaukolämmön lämmöntuottotarve, saadaan selville syntyvä kokonaislämpöenergian tarve kuukausitasolla. Tämä on esitetty seuraavassa taulukossa 8.





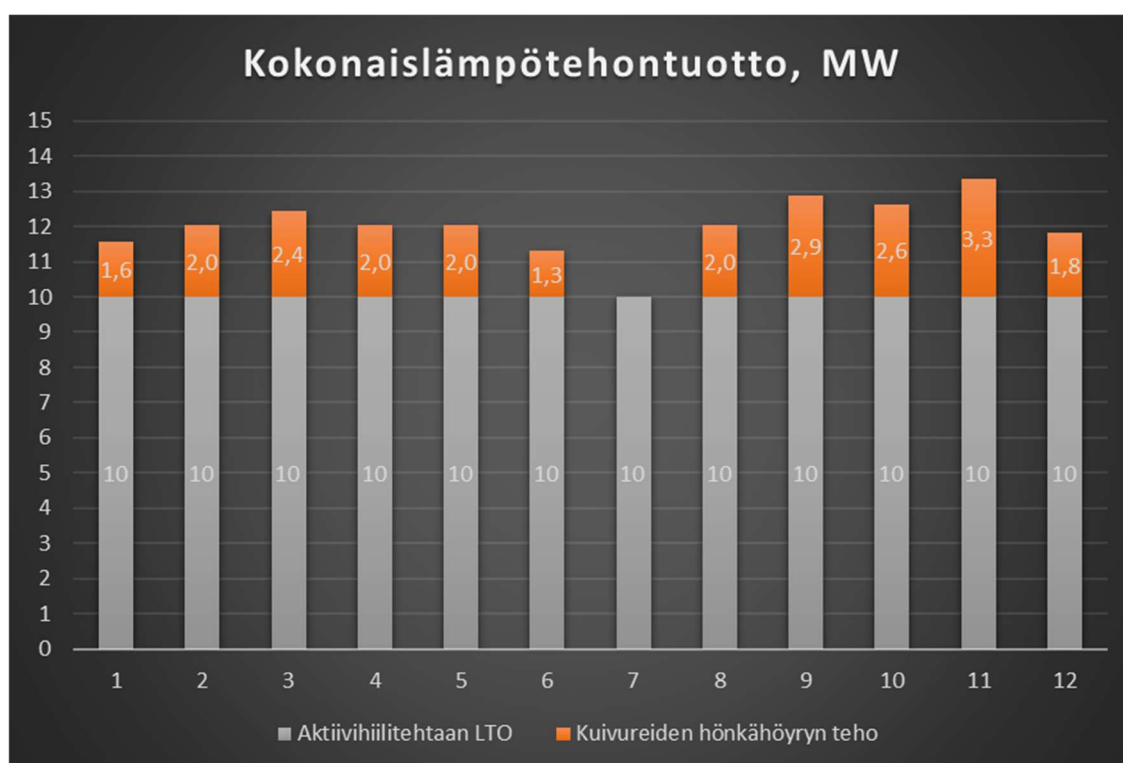
Taulukko 8. Jaoteltu kokonaistehontarve kuukausittain.

Kokonaistehontarpeen graafisesta esityksestä on helppo havaita piikkejä. Esimerkiksi marraskuussa on suuri tehontarvepiikki, sillä kelit ovat kylmiä, joka johtaa lämmityksen tarpeeseen, mutta marraskuussa myös pelletöidään huomattava määrä. Onkin tarpeen miettiä, voiko pelletöintiä jakaa viereisille kuukausille, jolloin suurilta piikeiltä vältyttäisiin.

## 6.7 Aktiivihiilitehtaan ja pelletin raaka-ainekuivureiden lämpötehotuotto

Jotta saataisiin määritettyä koko laitospompleksin energiatasetta, täytyy ottaa huomioon mahdollisuuksien mukaan kaikki käytettävissä olevat sivuvirtojen lämmöntuottomäärät. Tähän asti on laskettu vain pelletin raaka-ainekuivureiden tuottaman hönkähöyryn sisältämää lämpöenergiaa, mutta lämmöntuoton ja kaukolämmöntuoton selkärangan toimii suurempia energiavirtoja tuottavat prosessin osat. Opinnäytetyön toteutus suunnitelman mukaisesti pyritään laskemalla osoittamaan voimalaitospompleksin aktiivisen käytön tarpeettomuus kaukolämmöntuotannossa sen säilyessä kuitenkin puskurinomaisena reservinä.

Suuren lämpöenergian sivuvirtana tuottava aktiivihiilitehdas ja sen prosessin osat kykenevät kattamaan suurimman osan kaukolämmön lämmitystarpeesta laitoksen ollessa käytössä. On arvioitu, että aktiivihiilitehdas kykenee tässä esimerkkitapauksessa tuottamaan 10 MW tasaista lämpöenergiavirtaa. Yhdistämällä kuivureiden tuottaman hönkähöyryn ja aktiivihiilitehtaan lämmöntalteenoton tehot, saadaan seuraavanlainen kaavion 9 mukainen tilanne.

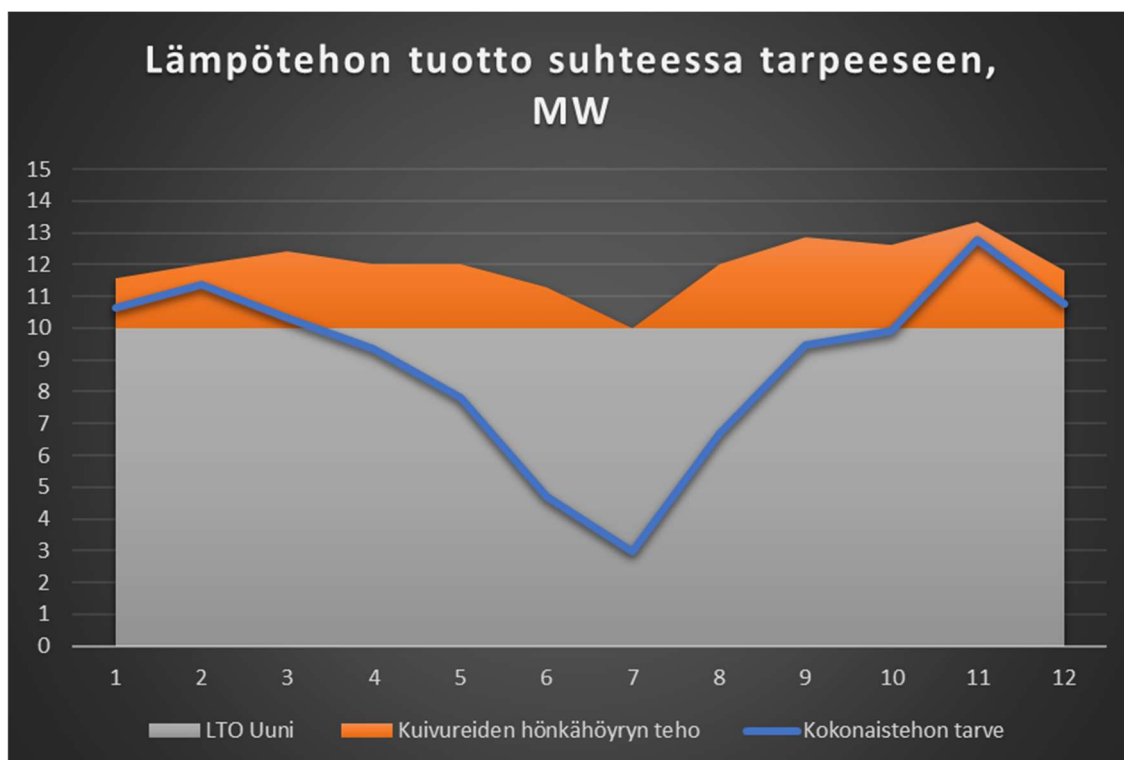


Taulukko 9. Kokonaislämpöteho – Aktiivihiilitehtaan LTO ja hönkähöyry.

Taulukkoa 9 tarkasteltaessa on hyvä huomioida, että siinä ei ole otettu kantaa voimalaitoksen mahdollisesta käytöstä johtuvaan lämpötehoon. Lisäksi aktiivihiilitehtaan tuottama 10 MW:n tasaenergia on vain arvio, mutta lähtökohteisesti on oletettava aktiivihiiliuunin pyörivän jatkuvasti huomioiden sen toimintamallit. Mikäli taulukkoja 8 ja 9 vertaillaan, voidaan jo silmämääräisesti huomata oletetun tuoton olevan tarvetta suurempi, mutta tarkastellaan tätä tarkemmin seuraavassa luvussa.

## 6.8 Lämpötehotuotto suhteessa tarpeeseen

Suhteuttamalla arvioitu aktiivihiilitehtaan lämmöntalteenoton synnyttämä teho sekä pelletin raaka-ainekuivureiden aikaansaaman hönkähöyryn teho yhdessä kuivureiden vaatiman lämpötehon, sekä kaukolämmön lämmöntuottotarpeen kanssa, saadaan kuvaaja, josta voidaan tarkastella kokonaislämpötehotuoton kapasiteettia tarvittavaan kokonaislämpötehon tarpeeseen. Mikäli kokonaistehontarvetta mukaileva kuvaaja ei nouse kaaviossa 10 kokonaislämpötehotuoton kuvaajan yläpuolelle, voidaan todeta, että mahdollinen pelletin raaka-ainekuivureiden hönkähöyryn lämmöntalteenotto yhdessä aktiivihiilitehtaan lämmöntalteenoton kanssa riittää tehollisesti. Tämä poistaisi tarpeen käyttää voimalaitoksen polttokattilaa kaukolämmöntuotannossa.



Taulukko 10. Kokonaislämpöteho ja kokonaislämpötehon tarve.

Yllä olevaa kaaviota tarkasteltaessa voidaan todeta, että marraskuussa tapahtuva tehontarpeen piikki ei saavuta kokonaislämpötehotuoton kuvaajaa tarpeen ollessa noin 12,8 MW ja tuoton 13,3 MW. Todettakoon kuitenkin, että nämä kyseessä olevat tehokerrat ovat kuukausien keskimääräisiä lukemia, eivätkä ne kykene ottamaan kantaa nopeista sään muutoksista johtuviin

päiväkohtaisiin tehontarpeen piikkeihin, jolloin tarve saattaa hetkellisesti nousta tuotantokapasiteettia korkeammaksi. Taulukon 10 perusteella voidaan todeta, että lämmöntalteenottoa pelletin raaka-ainekuivureilta olisi syytä kehittää ja investoinnit tehokkaan lämmöntalteenottolaitteiston hankintaan ovat ainakin energiataseen kannalta suositeltavia.

## 7 Pohdinta

Työn tavoitteena oli määrittää pellettitehtaan raaka-ainekuivureiden hönkähöyryn energiasisältö ja sen tuottama teho esimerkkitapauksen mukaisilla tuotantoluvuilla. Esimerkkitapauksena pidettiin vuotta, jolloin tuotettiin, sekä puupellettiä lämmitykseen, että turvepellettiä aktiivihillitehtaan tarpeisiin. Vaikka luvut ovatkin vain suuntaa antavia määritelmiä, joilla ei tässä tapauksessa ole välttämättä mitään tekemistä todellisten tuotantomäärien kanssa, antavat ne kuitenkin selkeän kuvan energiataseen muodostumisesta. Tuotantomäärien muuttuessa pysyvät käytetyn ja tuotetun energian määrät kuitenkin samoina suhteessa tuotettuihin tonnimääriin.

Laskennassa määritettiin saatavilla oleva hönkähöyryn maksimiteho, jonka rumpukuivurit ovat kykeneväisiä tuottamaan annetuilla tuotantoluvuilla ja käytettävillä kosteusarvoilla. Ne eivät siis huomioi mahdollisia häviöitä, joita voi syntyä hukkalämmön talteenotto-prosessissa, mikä on valitettavaa, mutta syntyvä hukka johtuu aina käytettävissä olevasta laitteistosta, jolloin järjestelmän hyötysuhteen arvioiminen kannattaa suorittaa varsinaista laitteistohankintaa suoritettaessa mahdollisen kilpailutuksen aikana. Kuitenkin laskelmissa käytetyt kuivureiden energiatarvemäärät sitoutuvat käytäntöön, eli tarvittava energia vastaa reaalitytöitä tuotannossa käytetyillä tuotantoluvuilla.

Työn tietoperusteessa käsiteltiin hukkalämpöä laajana käsitteenä ja sitä avattiin siten, että lähestulkoon kaikki seikat hukkalämmöstä ja siihen liittyvistä prosesseista tulisi selvitettyä ja avattua ainakin lyhyesti. Osa tiedoista on hyvää yleisistä tietoa arkielämän asioista, joihin jokaisen olisi hyvä kiinnittää huomiota

voidakseen omalta kohdaltaan olla mukana luomassa vihreää huomista. Osa tiedosta taas painottuu lähemmäs teknillisiä asioita, jotka eivät ole osa jokaisen jokapäiväistä elämää, mutta jotka kuitenkin herättivät itsessä kiinnostusta. Hukkalämmön tutkiminen olikin myös itselle silmiä avaava kokemus, joka varmasti tulee vaikuttamaan tulevaisuuden toimintaan. Mielestäni muidenkin toimijoiden olisi hyvä harrastaa ristitieteellistä tutkintaa, joka avartaa omia katsontakantoja ja mahdollisesti vaikuttaa myös tuleviin suunnitelmaprojekteihin. Useissa projekteissa on nimittäin hyötyä monialaosaamisesta tai ainakin siitä, että on kykeneväinen kommunikoimaan muiden alojen ammattilaisten kanssa.

Suurehkona osana työtä esiintyy kaukolämpö tai yleisestikin myytävissä oleva energia, kuten sähkö. Monien yritysten pitäisi määritellä omaa toiminnan tasoaan ja suorittaa laskelmia, josko niiden tuotannon sivuvirroista saataisiin valjastettua normaalisti hukkaan menevää energiaa kaupalliseen käyttöön. Vaikka lämmöntuottokykyä ei riittäisikään suuressa mittakaavassa, niin olisi hyvä huomata omasta tuotantoprosessista ne prosessin osaset, jotka tuottavat hukkaa tai tarvetta. Kun saadaan nimettyä nämä edellä mainitut seikat, voidaan sitten tarkastella, olisiko mahdollista yhdistää esimerkiksi hukkalämmön tuotto ja lämpöenergian tarve, joidenkin prosessin osien välillä. Talouslaskelmien varaan jää sitten kunkin ratkaisun kannattavuuden määrittäminen, mutta lämmöntalteenotto on aina yksi askel kohti energiavapautta.

Toiminnallisen osuuden selkärankana toimivat Excel-laskelmat ja -taulukot aktiivisesti päivittyvine kaavioineen ovat varmasti tilaajalle käyttökelpoisempaa materiaalia kuin itse raportti esimerkkilukuineen. Luotuja laskelmia voidaan käyttää tarkasteltaessa niiden tarkoitusta vastaavaa kuivureiden lämmöntalteenottoon liittyviä laitehankintoja, mutta myös nykyisen tilanteen mukaisia energiataselukuja. Mikäli on tarve esittää tehokkaasti yhteen koottuja tuotantomääriin perustuvia energialukuja, ovat kaaviot nopeasti päivitettävissä voimassa oleviin tuotantolukemiin. Lisäksi olemassa oleviin taulukoihin on helppo lisätä mahdollisesti hankittavan lämmöntalteenottoyksikön hyötysuhde hönkähöyryn energiatehon kertoimena, jolloin arvot päivittyvät automaattisesti kaavioihin.

## Lähteet

- Ali-Lekkala, J. 2014. Korkeapaineisen lämmönvaihtimen suunnittelu ja valmistus. Turun ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201404084031>. 15.2.2022.
- Avtotachiki. 2020. Ohjaustehostin. Huolto ja viat. <https://avtotachki.com/fi/gidrousilitel-rulya/>. 23.2.2022.
- Energiateollisuus. 2022. Energia-alan vähähiilisyystiekartta. [https://energia.fi/files/6691/Energia-alan\\_vahahiilisyystiekartta\\_paivitetty\\_1\\_2022.pdf](https://energia.fi/files/6691/Energia-alan_vahahiilisyystiekartta_paivitetty_1_2022.pdf). 28.2.2022.
- Engineering ToolBox. 2022. Steam and Vapor Enthalpy. [https://www.engineeringtoolbox.com/steam-vapor-enthalpy-d\\_160.html](https://www.engineeringtoolbox.com/steam-vapor-enthalpy-d_160.html). 20.4.2022
- Exodraft. 2021. Heat recovery. Flea gas, steam and process heat that benefits the bottom line. <https://www.exodraft-heatrecovery.com/flue-gas-heat-recovery/>. 20.4.2022.
- Finess Energy Oy. 2022. Energy Saving Solutions. Prosessin lämmöntalteenotto. <https://finess.fi/toimialat/teollisuus/prosessin-lammontalteenotto/>. 12.3.2022.
- Hautala, M. ja Peltonen, H. 2011. Insinöörin (AMK) Fysiikka osa 1. Lahti: Lahden Teho-Opetus Oy.
- Hämäläinen, J. 2011. Turbiinin tiivistehöyryn lämmöntalteenotto. Lappeenranta teknillinen yliopisto. Energiatekniikka. Kandidaatintyö. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/67428>. 24.3.2022.
- Intel. 2022. PC Cooling: The Importance of Keeping Your PC Cool. <https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/pc-cooling-the-importance-of-keeping-your-pc-cool.html>. 8.3.2022.
- Jarva, K. ja Niskanen, M. 2011. Stirling-moottori puukaasukäytössä. Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikka. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2011072912542>. 20.3.2022.
- Jiangsu Jianghehai Stainless Steel Co., Ltd. 2018. Physical Properties of Stainless Steel. <http://m.fi.jianghehaiss.com/info/physical-properties-of-stainless-steel-26226304.html>. 21.3.2022
- Kontu, J. 2013. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Helsinki: Motiva Oy.
- Lehtinen, H. 2018. Prosessilämmön talteenottojärjestelmän esiselvitys ja muutokset. Turun ammattikorkeakoulu. Energia ja ympäristötekniikka. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018121722018>. 24.2.2022.
- Logstor. 2015. Kaukolämpö käsikirja. <https://www.logstor.com/media/1987/kaukol%C3%A9mp%C3%B4k%C3%A9sikirja-2015.pdf>. 7.3.2022.
- Manner, K. 2022. Poistoilman lämmön talteenotolla saadaan hukkalämpö hyötykäyttöön. Tom Allen Senera. <https://www.tomallensenera.fi/blogi/poistoilman-lammon-talteenotolla-saadaan-hukkalampo-hyotykyttoon>. 8.3.2022.
- Motiva Oy. 2016. Energiatehokas lämmönsiirto. [https://www.motiva.fi/files/11106/Energiatehokas\\_lammonsiirto.pdf](https://www.motiva.fi/files/11106/Energiatehokas_lammonsiirto.pdf). 20.2.2022
- Mäkelä, V-M. ja Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Oppimateriaalia. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-588-506-7>. 2.3.2022.

- Onninen Oy. 2022. Lämpöpumput. <https://www.onninen.fi/lampo-ja-vesi-seka-prosessiputkistot/lampopumput/c/196>. 28.3.2022.
- Oulun ammattikorkeakoulu. 2014. Energia- ja ympäristötekniikan opetusmateriaali. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwimlsaagpb2AhXpk4sKHSi-CI8QFnoEC-CEQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.oamk.fi%2F~kurki%2Fautomaatiolabrat%2FVoimalaitosautomatio%2FINSTRU\\_2014\\_vk%25203%2520ja%25204\\_Virtausyht%2584I%2594t.doc&usg=AOvVaw1BQJOeQMhCLweFLyeMtRsg](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwimlsaagpb2AhXpk4sKHSi-CI8QFnoEC-CEQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.oamk.fi%2F~kurki%2Fautomaatiolabrat%2FVoimalaitosautomatio%2FINSTRU_2014_vk%25203%2520ja%25204_Virtausyht%2584I%2594t.doc&usg=AOvVaw1BQJOeQMhCLweFLyeMtRsg). 23.2.2022.
- Parviainen, J. 2018. Lämmönvaihtimen tehokkuuden seuranta ja optimointi. Oulun yliopisto. Prosessitekniikka. Diplomityö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201805091626>. 24.3.2022.
- Pihlainen, I. 2020. Teknologiaselvitys: Hukkalämmöstä hyötyenergiaa. Prizztech Oy. <https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/teknologiaselvitys-hukkala-cc-88mmo-cc-88sta-cc-88-hyo-cc-88tyenergiaa.pdf>. 25.3.2022.
- Portillo, G. 2018. El motor Stirling. <https://www.renovablesverdes.com/motor-stirling/>. 20.3.2022.
- Ryynänen, J. 2016. Lämmöntalteenotto. Savonia ammattikorkeakoulu. Energia-tekniikka. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2016060111423>. 12.3.2022.
- Savolainen, P. 2020. Savukaasujen hukkalämpö talteen. Turku Energia. <https://www.turkuenergia.fi/valopilkku/vastuullisuus/savukaasujen-hukkalam-po-talteen/>. 23.3.2022
- Sihvola, V. 2019. Teollisuuden hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkossa. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Energia- ja ympäristötekniikka. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019053113857>. 16.3.2022.
- Sinivuori, S. 2016. Erityyppisten lämmönsiirtimien mitoitustapaukset. Oulun ammattikorkeakoulu. Energiatekniikka. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201604295492>. 17.3.2022.
- Stenberg, S-A. 2015 Tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksien teknis-taloudellinen optimointi. Aalto-yliopisto. LVI-tekniikka. Diplomityö. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201512165760>. 20.3.2022.
- Suomen jäähdytystekniikan museo. 2022. Historiallisen kylmää – Jääkaapin toimintaperiaate. <http://www.kylmamuseo.fi/jaakaappi.shtml>. 23.2.2022.
- Suomen työkalu Oy. 2022. Ilmastointijärjestelmän toimintaperiaate. STG Group. <https://www.suomentyokalu.fi/tekninen-tuki/ilmastointijarjestelman-toimintaperiaate.html>. 27.3.2022.
- Suorsa, T. 2013. Prosessihöyryn käyttötutkimus Oulun keskuspesulassa. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201305137988>. 2.3.2022.
- Toholammin energia. 2013. <https://www.toholamminenergia.fi/lammityskattilat/orc-voimalaitos/>. 26.2.2022
- Vahasilta Oy. 2022. Putkilämmönvaihtimet ja -siirtimet. <https://vahasilta.fi/putkilammonvaihtimet/>. 14.3.2022.
- Valmet. 2022. Material efficiency: Use less, get more. <https://www.valmet.com/media/articles/all-articles/material-efficiency-use-less-get-more/>. 8.3.2022.

- Valtanen, E. 2016. Tekniikan Taulukkokirja. Jyväskylä: Genesis-Kirjat Oy.
- Vesterinen, E. 2012. Energialaitoksen raportoinnin kehittäminen. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2012090513393>. 12.3.2022.
- Väre, J. 2009. Atk-konesalien jäähdytys. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Talotekniikka. Insinöörityö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-200904081931>. 21.3.2022.
- Westman, M. 2014. Poistoilman lämmön talteenotto, kannattavuus ja käyttömahdollisuudet kaukolämpökerrostaloissa. Arcada. Hajautetut energijärjestelmät. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201405229318>. 20.2.2022.
- WTSML Heat Transfer Technology Co., Ltd. 2019. What is the structure of the plate heat exchanger? <http://fi.heatexchangersgas-ket.com/news/what-is-the-structure-of-the-plate-heat-exchanger-28114343.html>. 20.3.2022.



Liite 1

hämähäkki	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5500	5750	6000	6250	6500	6750	7000	7250	7500	
250	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35	0,42	0,49	0,56	0,63	0,69	0,76	0,83	0,90	0,97	1,04	1,11	1,18	1,25	1,32	1,39	1,46	1,53	1,60	1,67	1,74	1,81	1,88	1,94	2,01	2,08	
500																															
750																															
1000																															
1250																															
1500																															
1750																															
2000																															
2250																															
2500																															
2750																															
3000																															
3250																															
3500																															
3750																															
4000																															
4250																															
4500																															
4750																															
5000																															
5250																															
5500																															
5750																															
6000																															
6250																															
6500																															
6750																															
7000																															
7250																															
7500																															

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki

hämähäkki