TYÖKALUN KEHITTÄMINEN TEOLLISUUDEN HUKKALÄMMÖN TALTEENOTOSSA KÄYTETTÄVÄN TEKNOLOGIAN MÄÄRITTÄMISEEN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2022

Marika Onkalo

Tarkastajat: Professori Teemu Turunen-Saaresti

DI Lauri Pienipaavola

Työn ohjaaja: Olli Nurmesniemi

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Marika Onkalo

Työkalun kehittäminen teollisuuden hukkalämmön talteenotossa käytettävän teknologian määrittämiseen

Diplomityö

2022

92 sivua, 16 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professori Teemu Turunen-Saaresti ja DI Lauri Pienipaavola

Ohjaaja: Olli Nurmesniemi

Avainsanat: Teollisuuden hukkalämpö, lämmöntalteenottoteknologian valinta, matalan lämpötilan hukkalämpö, keskilämpötilan hukkalämpö

Työssä selvitetään teollisuuden matalan ja keskilämpötilan hukkalämmön talteenotossa käytettävän teknologian valintaa. Tarkoituksena on kartoittaa paras teknologia lämmöntalteenottoon huomioiden hukkalämmön ominaisuudet sekä teollisuuskohteen omat tarpeet. Osana työtä kehitetään työkalu teknologian valintaan. Työn tilaajana on Sweco Industry Oy ja työkalua voidaan hyödyntää teollisuuden lämmöntalteenottoselvitysten alkuvaiheessa.

Työn tavoitteena on kehittää helppokäyttöinen Excel-pohjainen työkalu, jonka avulla on mahdollista nopeuttaa investoinnin kannattavuusarvion tekemistä sekä edesauttaa teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämistä. Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään eri lämmöntalteenotto teknologioihin sekä niiden ominaisuuksiin. Katsauksen pohjalta luodaan logiikkakaaviot, joiden mukaan työkalu hakee teknologian eri lämmönkäyttökohteiden mukaan.

Työkalusta saatavilla tuloksilla voidaan verrata hukkalämmön talteenotossa käytettävää teknologiaa sekä teknologialla saavutettavaa energiasäästöä eri lämmönkäyttökohteissa. Työkalun avulla pyritään nostamaan esiin myös uudempia teknologioita sekä muita lämmöntalteenottoinvestoinnissa huomioon otettavia asioita. Työkalun testikäytön tuloksista nähdään, että hukkalämmön sekä lämpönielun lämpötilatasoilla on merkittävä vaikutus talteenotossa käytettävän teknologian valinnassa.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Marika Onkalo

Developing a tool for industrial waste heat recovery technology selection

Master's thesis

2022

92 pages, 16 pictures and 2 attachments

Examiners: Professor Teemu Turunen-Saaresti ja MSc Lauri Pienipaavola

Supervisor: Olli Nurmesniemi

Keywords: Industrial waste heat, Heat recovery technology selection, Low-temperature waste heat, Medium-temperature waste heat

In this thesis method for selection of technology to recover industrial low and medium-temperature waste heat is presented. Aim of the method is to find the best available technology to recover waste heat regarding the plants own needs and properties of waste heat. Also, a tool for choosing the best available technology is developed. Sweco Industry Oy is the master's thesis employer, and the tool can be utilized at the start of the projects in which heat recovery options for industrial plants are discovered.

Aim of the research is to develop user friendly Excel based tool which speeds up the estimation of investments profitability and advance the utilization of industrial waste heat. In literality review different heat recovery technologies and their properties are introduced. Logical diagrams for the tool are created based on the findings of the literature review. Tool is programmed to select technology for different utilization cases according to the logical diagrams.

With tool it is possible to compare the recommended heat recovery technology for different heat sinks and compare the energy savings gained with selected technology. Another goal of the research is to point out heat recovery technologies which aren't that used yet and other important issues which should be considered when an investment on heat recovery is planned. From the results of the test usage of the tool can be seen that the temperature levels of waste heat and the heat sink has significant effect on the selection of the technology.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

Q	energiasisältö	[kW]
q_v	tilavuusvirtaus	[m^3/s]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[J/kg,K]
T	lämpötila	[K]
P	teho	[kW]
E	hukkalämmöstä saatava eksergiavirta	[kWh]
t	aika	[h]
p	paine	[bar, Pa]
W	työn tekemiseen tarvittava energia	[kW]
x	lämmöntalteenoton lämpötilatasojen suhde	
y	jäähdytykseen käytettävän hukkalämmön osuus	

Kreikkalaiset

η	hyötysuhde

Alaindeksit

H	lämpöenergian tuotto
L	jäähdytysenergian tuotto
C	jäähdytys
s	sisään virtaus

u ulosvirtaus

Lyhenteet

COP Coefficient Of Performance, lämpöpumpun hyötysuhde

HL hukkalämpö

LN lämpönielu

LTO lämmöntalteenotto

ORC Organic Rankine Cycle, orgaaninen Rankine -prosessi

TFC Trilaternal Flash Cycle, Trilateral Flash -kierto

TEG Thermoelectric Generator, lämpösähköinen generaattori

UTES Underground Thermal Energy Storage, maanalainen lämpövarasto

CPS Concentrated Solar Power, keskittävä aurinkovoima

PCM Phase Change Material, faasimuutosmateriaali

CHP Combined Heat and Power, lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitos

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto 8
1.1 Työn tausta 8
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus 9

2 Hukkalämpö teollisuudessa 11
2.1 Hukkalämpökohteen tunnistaminen 16
2.2 Hukkalämmön hyödyntämispotentiaalin määrittäminen 18
2.3 Lämmöntalteenotossa käytettävän teknologian määrittäminen 21

3 Teknologiat hukkalämmön hyödyntämiseen 24
3.1 Lämmityksessä ja jäähdytyksessä käytettävät teknologiat 25
3.1.1 Ekonomaiserit 28
3.1.2 Lämpöputket 28
3.1.3 Jätelämpökattilat 29
3.1.4 Rekuperaattori, regeneraattori ja lämpöpyörä 30
3.1.5 Nestekiertoinen lämmönsiirtopatteri 30
3.1.6 Levylämmönsiirrin 31
3.1.7 Lämpöpumput 31
3.2 Sähköntuotannossa käytettävät teknologiat 41
3.2.1 Rankine-prosessi 41
3.2.2 Lämpösähköinen generaattori 50
3.3 Lämmön varastoinnissa käytettävät teknologiat 51
3.3.1 Tuntuvaa lämpöä hyödyntävät varastot 53
3.3.2 Latenttilämpövarastot 53
3.3.3 Termokemialliset lämpövarastot 54
3.3.4 Lämmönvarastointi teknologioiden vertailu 54

4 Lämmöntalteenotossa käytettävän teknologian valinta 59
4.1 Työkalun rakenne 59
4.2 Energiamäärän laskenta 61
4.3 Työkalun käytettävyyden testaus 71
4.4 Tulokset 75

5 Johtopäätökset 83

Lähteet 85

Liitteet

Liite 1. Työkalun rakenne

Liite 2. Työkalun Excel näkymä

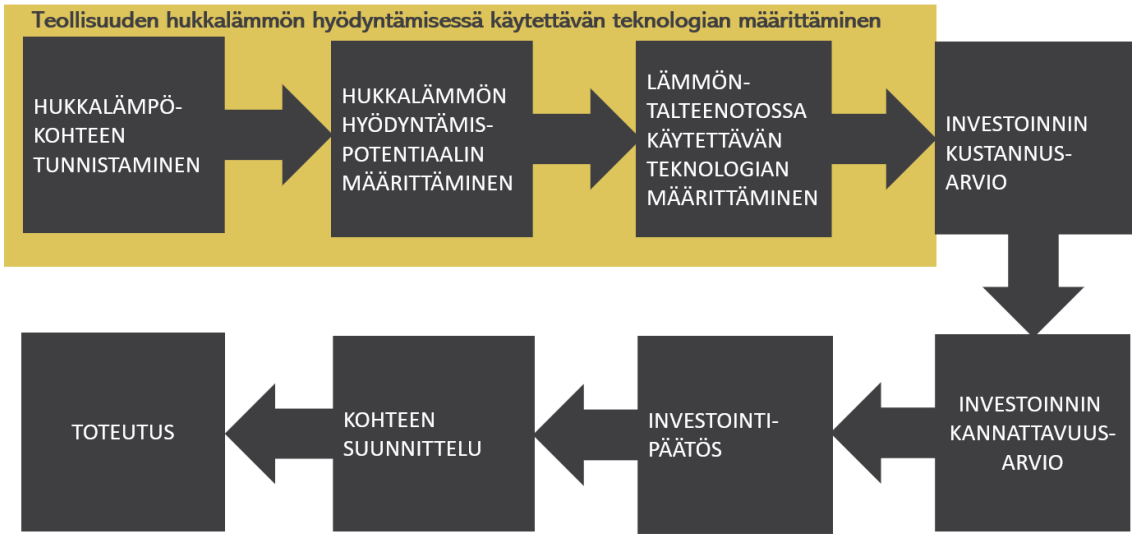
1 Johdanto

Teollisuudessa syntyy paljon hukkalämpöä, josta iso osa on matalan ja keskitason lämpötilassa (<400 °C). Tutkimuksen tavoitteena on selvittää hukkalämmön hyödyntämispotentiaalia sekä lämmöntalteenotossa käytettävän teknologian valintaa matalan ja keskitason lämpötilan hukkalämmön hyödyntämisessä. Samalla tarkoituksena on kehittää Excel-pohjainen työkalu hukkalämmön talteenotossa käytettävän teknologian määrittämiseen, mikä toimii apuna lämmöntalteenotto projektien alkuvaiheessa.

1.1 Työn tausta

Työ on tehty yhteistyössä Sweco Industry Oy:n kanssa, joka on osa Sweco konsernia. Sweco on suunnittelun ja konsultoinnin asiantuntijayritys, jonka liiketoiminnan keskiössä on kestävä kehitys. Swecolla on toimipisteitä 14 maassa Euroopassa ja yhteensä 18 000 työntekijää, joista 3 000 työskentelee Suomessa. Swecon liikevaihto oli yhteensä 2,1 miljardia euroa vuonna 2021. Suomessa yrityksen asiakaskuntaan kuuluu teollisuus, rakentaminen sekä infra. Swecolta on mahdollista saada suunnittelu- ja konsultointipalvelua teollisuusprojektin kaikkiin vaiheisiin. (Sweco, 2022.)

Teollisuuden hukkalämmöntalteenotossa käytettävän teknologian valinta valikoitui diplomityön aiheeksi, sillä helppokäyttöistä, kaikkien saatavilla olevaa valintatyökalua teknologian määritykselle ei ole. Muutamia työkaluja on kehitetty, mutta nämä on kehitetty lisensoiduille ohjelmistoille ja käyttö vaatii asiantuntijaa. Työkalun ja tutkimuksen tavoitteena on helpottaa ja nopeuttaa teollisuuden hukkalämmön talteenoton esisuunnitteluvaihetta, jossa selvitetään investoinnin toteutettavuutta. Työkalu tukee lämmöntalteenottoprojektin alkuvaihetta, joka alkaa hukkalämpökohteen tunnistamisesta, sen hyödyntämispotentiaalin määrittämisestä sekä lämmöntalteenotossa käytettävän teknologian valinnasta, kuten kuvassa 1 on esitetty.



Kuva 1. Teollisuuden hukkalämmön talteenoton investointiprosessin eteneminen ja lämmöntalteenotossa käytettävän teknologian määritys osana prosessia

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tavoitteena on, että työkalun avulla päästä mahdollisimman nopeasti selvittämään mahdollisen investoinnin kustannuksia sekä kannattavuutta, jotka ovat ratkaisevia tekijöitä investointipäätöksen kannalta. Lämmöntalteenotossa käytettävällä teknologialla on merkittävä vaikutus sekä investoinnin kustannuksiin että kannattavuuteen. Lisäksi investoinnin toteutus nopeutuu ja kustannusarvion tarkkuus paranee, kun käytettävä teknologia pystytään määrittämään mahdollisimman varhaisessa vaiheessa.

Työkalulla on tarkoitus saada mahdollisimman nopeasti selville lämmöntalteenotossa käytettävä teknologia sekä teknologialla talteen otettava energiamäärä, jonka avulla voidaan verrata eri lämmöntalteenotto vaihtoehtoja. Työkalun on tarkoitus nopeuttaa ja tarkentaa investoinnin kannattavuuden arviointia. Lisäksi tutkimuksen ja työkalun tavoitteena on edistää teollisuuden hyödyntämättömien hukkalämmönlähteiden käyttöönottoa ja lisätä tietoa vähemmän käytetyistä sekä uudemmista menetelmistä, joilla pystytään hyödyntämään teollisuuden hukkalämpöjä.

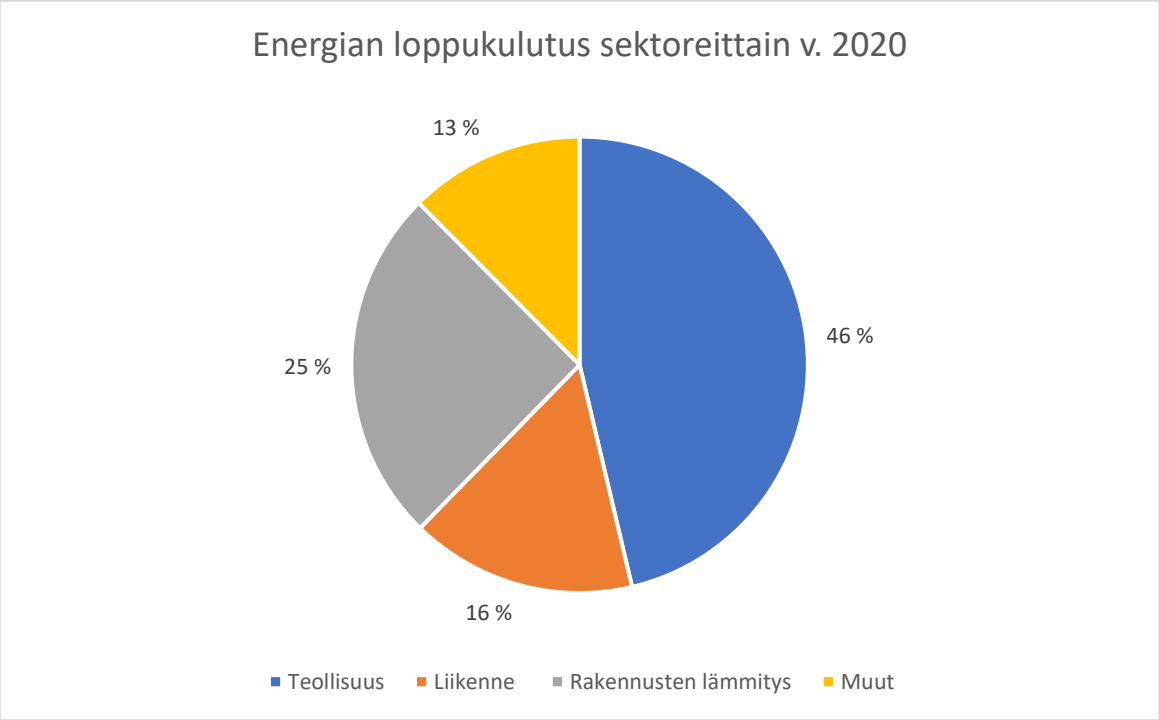
Työssä tarkastellaan teollisuuden lämmöntalteenottokohteita, joissa hukkalämmönlähteiden lämpötila on alle 400 °C. Työkaluun on otettu mukaan teknologiat, jotka on jo kaupallistettu, mutta työkalua voidaan myöhemmin täydentää uudemmilla teknologioilla. Työkalun kehityksessä jouduttiin tekemään tiukempia rajauksia eri teknologioiden välille kuin mitä todellisuudessa olisi tarvittavaa. Lisäksi lämmöntalteenotossa saavutettavaa energianlaskentaa yksinkertaistettiin, jotta työkalun kehitystyöhön käytetty aika saatiin pysymään diplomityölle rajatussa ajassa. Rajaukset on kuitenkin nostettu esiin työkaluun lisätyillä infotekseteillä ja energianlaskuria voidaan hyödyntää eri teknologioiden vertaamiseen.

2 Hukkalämpö teollisuudessa

IPCC:n (2022) raportin mukaan teollisuus on yksi toimialoista, joilla päästöjen kasvu on ollut nopeinta. Vuonna 2019 24 prosenttia maailman kasvihuonekaasupäästöistä tuli teollisuudesta. Teollisuuden päästöt olivat suuremmat kuin minkään muun sektorin, kun otetaan huomioon epäsuorat päästöt energiantuotannosta, jolloin päästöjen osuus nousee 34 prosenttiin. IPCC:n mukaan hiilineutraali teollisuus on mahdollinen ja energiatehokkuudella on edelleen suuri rooli yhdessä muiden keinojen kanssa sen saavuttamiseksi. (Bashmakov et al., 2022, s.4.) Hyödyntämättömiä hukkalämmön lähteitä on edelleen paljon ja ottamalla lämpöä talteen näistä voidaan parantaa energiatehokkuutta (Bashmakov et al., 2022, s. 30).

Suurin osa teollisuuden hukkalämmöstä on matalan lämpötilan hukkalämpöä. Usein näiden kohteiden hyödyntäminen on kuitenkin haastavaa pienen lämpötilaeron takia (Fischedick et al., 2014, s. 755.) Kuitenkin suurin osa teollisuudessa syntyvästä hukkalämmöstä on matalan lämpötilan hukkalämpöä, josta kolmasosa on alle 200 °C ja 25 prosenttia lämpötilassa 200–500 °C (Papapetrou et al., 2018, s. 207). Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään hukkalämmön hyödyntämispotentiaalia sekä sopivinta teknologiaa sen hyödyntämiseen nimenomaan matalan lämpötilan hukkalämmölle.

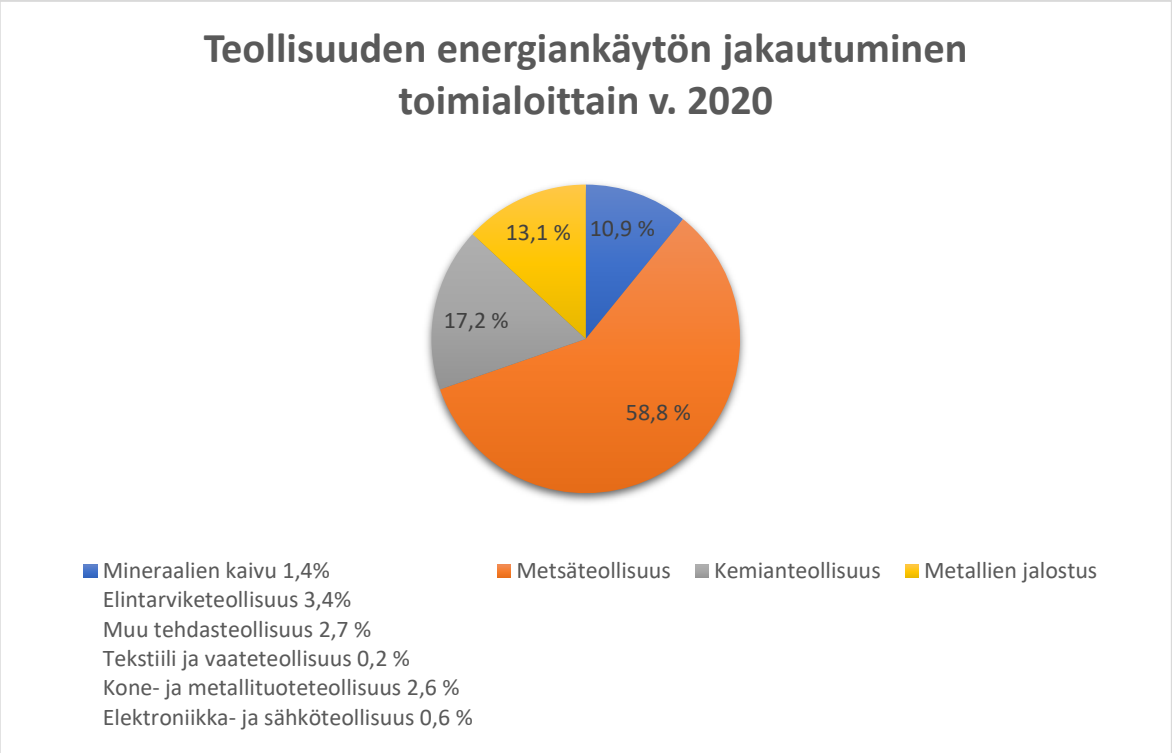
Kuvassa 2 on esitetty energian loppukulutus sektoreittain Suomessa. Kuvasta nähdään, että teollisuuden energiankäyttö on lähes puolet kokonaisenergian käytöstä Suomessa.



Kuva 2. Energian loppukulutus sektoreittain vuonna 2020 (Suomen virallinen tilasto, 2022a)

Kuvassa 2 energialla tarkoitetaan sähkön, kaukolämmön ja polttoaineiden loppukäyttöä ja sektoreille ei ole sisällytetty sähkön ja lämmön tuotantohäviöitä tai muita polttoaineiden jalostuksen konversiohäviöitä (Suomen virallinen tilasto, 2022a).

Kuvassa 3 on esitetty teollisuuden energiankäytön jakautuminen suomessa vuonna 2020. Kuvasta nähdään, että suurinta energiankäyttö on metsäteollisuudessa, joka käyttää yli puolet kaikesta teollisuudessa kulutetusta energiasta. Kemianteollisuus on toiseksi suurin energian kuluttaja 17 % osuudella ja kolmas suurimmista energiaa kuluttavista teollisuuden aloista on metallien jalostus.



Kuva 3. Teollisuuden energiankäytön jakautuminen toimialoittain vuonna 2020 (Suomen virallinen tilasto, 2022b)

Teollisuuden hukkalämpöpotentiaalia on arvioitu useassa eri lähteessä ja arviot teollisuudessa syntyvästä hukkalämmön hyödyntämispotentiaalista on esitetty taulukossa 1. Taulukosta nähdään, että tutkimuksen rajauksista riippuen on arvioitu, että Suomessa hukkalämmön tekninen potentiaali voisi olla jopa 19–23 TWh vuodessa. Nämä arviot perustuvat vuonna 2010 ja 2012 tehtyihin arvioihin. Motiva on päivittänyt YITn tekemän arvion 19 TWh vuonna 2019, skaalaamalla hukkalämpöpotentiaalin energiankäytön perusteella, jolloin arvioksi saatiin 16 TWh. Motivan arvioima hukkalämmön määrä 16 TWh on 12 % koko teollisuuden energiankulutuksesta, joka oli tilastokeskuksen mukaan 137,8 TWh vuonna 2020 (Suomen virallinen tilasto, 2020b). Hukkalämmön osuus koko kaukolämmöntuotannosta, joka oli tilastokeskuksen keräämien tietojen mukaan 35,1 TWh vuonna 2020, on jopa 46 %. Ylijäämälämmön osuus kaukolämmöntuotannossa on ollut selvässä kasvussa viimevuosina. (Suomen virallinen tilasto, 2020a.)

Taulukko 1. Eri selvityksissä raportoituja Suomen hukkalämpöpotentiaaleja sekä selvityksissä käytetty hukkalämmön lämpötilataso, jonka ylittävältä osuudelta hukkalämpö on katsottu olevan hyödynnettävissä

Tekninen potentiaali [TWh/v]	Hyödynnettävissä kl-tuotantoon [TWh/v]	Lämpötila [C]	Selvityksen tekijä	Vuosi	Lähde
7–9	6–7	25	Aalborgin yliopisto	2020	a
23		-	Aalborgin yliopisto	2013	b
6		-	Papapetrou ym.	2018	c
16		35	Motiva	2019	d
19	4–5	35	YIT	2010	d

a: (Fleiter et al., 2020, s. 62, 64)
b: (Connolly et al., 2013, s. 54)
c: (Papapetrou et al., 2018, s. 215)
d: (Motiva, 2019, s. 5)

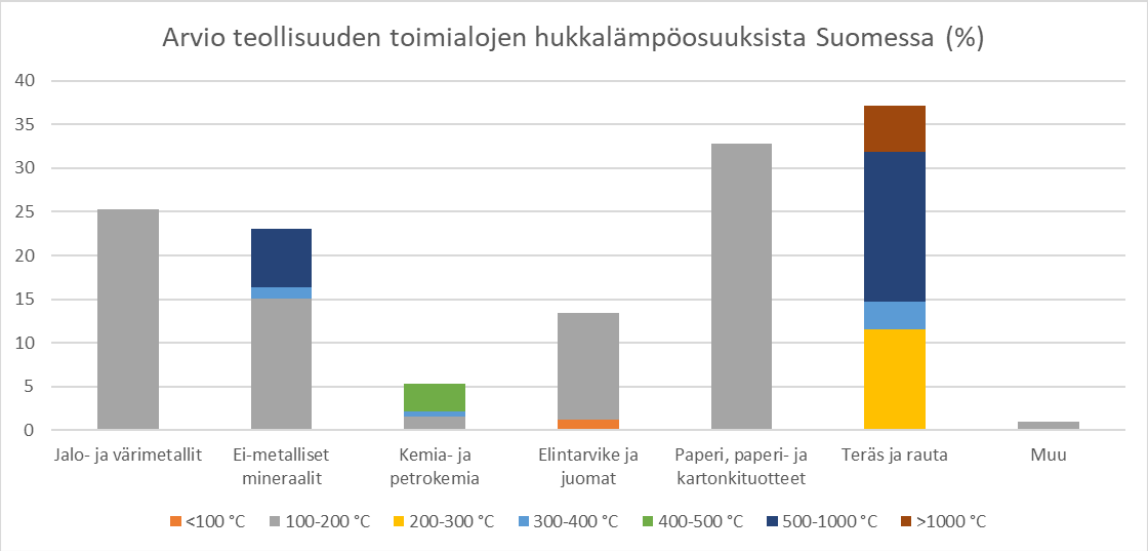
YITn arviossa on lisäksi eritelty tekninen potentiaali, joka oli hyödynnettävissä silloisiin kaukolämpöverkostoihin ja arvioksi saatiin 4–5 TWh/v (Motiva, 2019, s. 8). Aalborgin yliopiston tekemän tutkimuksen mukaan lämpötilatasolla 25 °C kaukolämpöverkoihin hyödynnettävissä oleva potentiaali olisi tutkimuksen rajauksista riippuen 6–7 TWh vuodessa. Luvut vastaavat 11–20 % Suomen kaukolämmöntuotannosta vuonna 2020.

Hallituksen yhteistyössä toimialojen kanssa luomien vähähiilisyystiekarttojen mukaan hukkalämpö nähdään osana teollisuuden vähähiilisyys tavoitteita lähes kaikilla toimialoilla. Tiekartan taustaselvityksen arvion mukaan hukkalämmöllä sekä teollisilla ja geotermisillä lämpöpumpuilla voitaisiin tuottaa kolmannes Suomen kaukolämmönkysynnästä. (Paloneva & Takamäki, 2020, s. 42, 45.)

Taulukkoon listatut tulokset poikkeavat toisistaan osittain paljonkin ja tätä selittää tutkimuksissa käytetyt eri oletukset, rajaukset sekä menetelmät. Esimerkiksi uusimmassa Aalborgin vuonna 2020 julkaisemassa tutkimuksessa on otettu mukaan vain suurimmat teollisuuslaitokset ja laskennassa on huomioitu ainoastaan savukaasuista hyödynnettävissä oleva hukkalämpö (Fleiter et al., 2020, s. 4). Aalborgin aiemmassa tutkimuksessa ei ole tehty rajausta hukkalämmön väliaineen osalta ja hukkalämpöpotentiaalien arviointiin on käytetty lämmöntalteenottokertoimia sekä päästökertoimien ja laitosten raportoitujen päästöjen avulla laskettuja polttoainekulutuksia (Connolly et al., 2013, s. 60).

Sekä Fleiterin (2020, s. 69) että Conollyn (2012, s. 46) tutkimuksien mukaan suurimmat laitokset sijaitsevat lähellä isoja asutuskeskuksia, joten hukkalämpö olisi helposti hyödynnettävissä kaukolämmön tuotantoon. Uudemmassa Conollyn (2020, s. 64) tekemässä tutkimuksessa on laskettu myös erikseen potentiaali hukkalämmöstä, jonka on oletettu syntyvän kaukolämpöalueella. Ero ei ole yhtä suuri kuin YITn selvityksessä, mikä johtunee siitä, että Conollyn (2020, s. 4) tutkimuksessa on otettu mukaan vain isoimmat laitokset. Papapetroun ja kumppaneiden vuonna 2018 tekemästä arviosta on hyvä huomioida, että eri EU-maiden potentiaali perustuu Iso-Britannian teollisuuden potentiaalia selvittäneeseen tutkimukseen (Papapetrou et al., 2018, s. 207).

Papapetroun (2018) ja kumppaneiden tutkimuksessa selvitettiin myös hukkalämmön jakautumista eri lämpötilatasoihin eri teollisuuden aloilla EU maissa ja kuvasta 4 nähdään, että tutkimuksessa tehdyn arvion mukaan suurin osa hukkalämmöstä useimmilla teollisuuden aloilla esiintyisi lämpötilatasossa 100–200 °C. Kuvassa 4 esitetyt osuudet edustavat sitä osuutta kulutetusta lämpöenergiasta, josta muodostuu hukkalämpöä ja se olisi mahdollista saada talteen. Tutkimuksen mukaan yli puolet Suomen teollisuudessa syntyvästä hukkalämmöstä olisi lämpötilatasoltaan alle 400 °C. (Papapetrou et al., 2018, s. 4.)



Kuva 4. Arvio teollisuuden toimialojen hukkalämpöosuuksista Suomessa (Papapetrou et al., 2018)

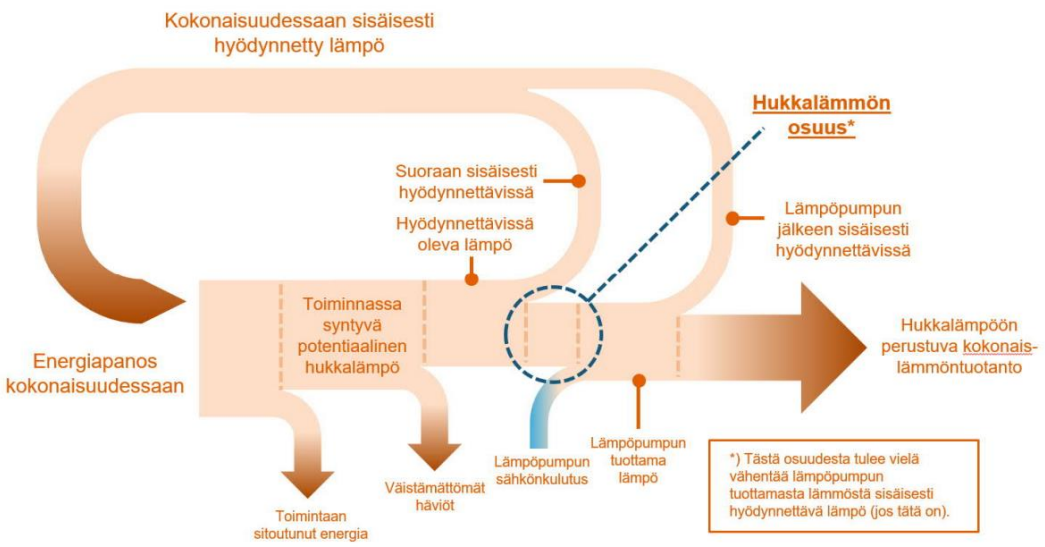
2.1 Hukkalämpökohteen tunnistaminen

Ensimmäinen askel hukkalämmön hyödyntämisessä on hukkalämmön lähteiden ja lämpönielujen tunnistaminen (Woolley et al., 2018, s. 52). Itse hukkalämpö on lämpöenergiaa, joka jää jäljelle häviöiden jälkeen eikä sitä hyödynnetä muuten itse toiminnassa tai prosesseissa. Euroopan parlamentin ja Euroopan unionin neuvoston direktiivin 2018/2001 mukaan:

”Hukkalämmöllä ja -kylmällä tarkoitetaan teollisuus- tai sähköntuotantolaitoksissa tai palvelualalla sivutuotteena väistämättä syntyvää lämpöä tai kylmää, joka katoaisi käyttämättömänä ilmaan tai veteen, jos sitä ei johdettaisi kaukolämmitys- tai jäähdytysjärjestelmään, jos on käytetty tai käytetään yhteistuotantoprosessia tai jos yhteistuotanto ei ole mahdollista;”

Kuvasta 5 nähdään, miten teollisuuden hukkalämmön hyödyntämistä ja toiminnan energiavirtoja on hahmoteltu VTTn raportissa. Kuvaajasta nähdään, että hukkalämpö on se energiavirta, joka prosessissa jää jäljelle itse toimintaan sekä häviöihin kuluneen energian jälkeen. Kuvaajasta nähdään myös, että hukkalämpöä voidaan hyödyntää joko itse prosessissa tai sitten sitä voidaan siirtää prosessin ulkopuolelle ja joskus hukkalämmön hyödyntäminen myös vaatii ulkopuolisten energiavirtojen lisäystä, jotta sitä voidaan hyödyntää. Tämä

tarkoittaa yleensä lämpötilatason nostoa lämpöpumpulla, joka vaatii prosessin ulkopuolista sähköenergiaa. (Rämä & Klobut, 2020, s.16.)



Kuva 5. Shankeyn diagrammi mahdollisesta hukkalämpöjen hyödyntämisestä teollisuudessa (Rämä & Klobut, 2020, s. 16)

Lämmön siirtäminen suoraa samaa lämpötilatasoa olevaan lämpönieluun, joka sijaitsee lähellä hukkalämmönlähdettä, on kuitenkin osoittautunut kustannustehokkaimmaksi tavaksi hyödyntää hukkalämpöä (Woolley et al., 2018, s. 51). Tällöin vältytään investointikustannuksilta, joita lämmön siirtäminen kauemmas tai sen muuttaminen esimerkiksi sähköksi tai kemialliseksi energiaksi vaatisi (Woolley et al., 2018, s. 51). Myös prosessin kokonaishyötysuhde säilyy korkeampana, kun siirto- ja muuntohäviöitä ei synny eikä prosessiin tarvitse lisätä ulkopuolisia energiavirtoja.

Hukkalämmön lähteiden ja lämpönielujen tunnistamisessa voidaan hyödyntää esimerkiksi teollisuuden energiakatselmuksia, jotka tulee toteuttaa Motivan ja Työ- ja elinkeinoministeriön yleisohjeiden mukaisesti. Selvityksen työkustannusosuus on osittain tuettavaa. (Motiva, 2020.) Myös Pinch-analyysiä suositellaan käytettäväksi silloin kun halutaan selvittää, löytyykö laitokselta prosessi- tai lämmityskohteita, joissa hukkalämpöä voitaisiin suoraan hyödyntää (Maaskola & Kataikko, 2014, s. 60).

2.2 Hukkalämmön hyödyntämispotentiaalin määrittäminen

Hukkalämmön hyödyntämispotentiaalin määrittämiseksi lämmönlähteistä ja lämpönieluista tulee tietää vähintäänkin seuraavat aineominaisuudet (Woolley et al., 2018, s. 53):

- Lämmönlähteiden ja -nielujen virtaava aine
- Lämmönlähteen prosessiin tulo- ja lähtölämpötila
- Lämpönielun prosessiin tulo- ja lähtölämpötila
- Ympäristön lämpötila
- Lämmönlähteiden ja -nielujen tilavuusvirtaus

Aineominaisuuksien lisäksi hyödyntämispotentiaalin vaikuttaa se kuinka tasaista hukkalämmön syntyminen prosessissa on ja kuinka hyvin se vastaa lämpönielun energian tarvetta (Woolley et al., 2018, s. 54). Tätä varten on tärkeää kerätä tietoa hukkalämpöä synnyttävän laitteen tai laitoksen käyntiajoista (Law et al., 2016, s. 592–594). Law, Harvey ja Reavy (2016, s. 592–594) ovat tunnistaneet tutkimuksessaan seuraavat laadulliset tekijät lämmönlähteille ja -nieluille, jotka vaikuttavat hukkalämmön hyödyntämiseen:

- kiintoainesisältö sekä kiintoaineen ominaisuudet ja partikkelikoko
- taipumus aiheuttaa lämmönsiirtopintojen likaantumista (nk. Fouling)
- taipumus aiheuttaa korroosiota
- materiaalien yhteensopivuus

Lisäksi he muistuttavat, että on tärkeää ottaa huomioon, vaatiiko uusi lämmöntalteenottojärjestelmä huoltoa, mihin edellä mainitut tekijät oleellisesti vaikuttavat (Law et al., 2016, s. 593.). Woolley, Luo ja Simeone (2018, s. 52) nostavat omassa tutkimuksessaan yhdeksi laadulliseksi tekijäksi myös lämmönlähteen sijainnin vaikutuksen (spatial availability), jolla tarkoitetaan hukkalämmön saavutettavuutta (Woolley et al., 2018, s .52).

Seuraavat lämmönlähteiden ja -nielujen aineominaisuuksia on myös hyvä selvittää, sillä niitä tarvitaan viimeistään, kun halutaan määrittää hukkalämmön hyödyntämisessä käytettävää teknologiaa (Law et al., 2016, s. 593):

- paine
- ominaislämpökapasiteetti
- tiheys
- viskositeetti

Taulukkoon 2 on luokiteltu edellä mainitut lämmönlähteiden ja lämpönielujen ominaisuudet sen mukaan ovatko ne laadullisia vai määrällisiä sekä sen mukaan ovatko ne lämmönlähteen vai lämpönielun ominaisuuksia.

Taulukko 2. Hukkalämmön lähteiden ja lämpönielujen laadulliset ja määrälliset ominaisuudet

	Ominaisuus	Lämmön-lähde	Lämpö-nielu	Lähde
Laadulliset	Lämmönlähteen virtaava aine	x	x	(Woolley et al., 2018, s. 52–54)
	Hukkalämmön ajallinen esiintyminen	x		
	Lämmön tarpeen ajallinen esiintyminen		x	
	Saavutettavuus	x		
	Kiintoainepitoisuus sekä kiintoaineen ominaisuudet ja partikkelikoko	x	x	(Law et al., 2016, s. 593)
	Taipumus aiheuttaa lämmönsiirtopintojen likaantumista (Fouling)	x	x	
	Taipumus aiheuttaa korroosiota	x	x	
	Materiaalien yhteensopivuus	x	x	
Määrälliset	Prosessiin tulo- ja lähtölämpötila	x	x	(Woolley et al., 2018, s. 52–54)
	Ympäristön lämpötila	x	x	
	Tilavuusvirtaus	x	x	
	Paine	x	x	(Law et al., 2016, s. 593)
	Ominaislämpökapasiteetti	x	x	
	Tiheys	x	x	
	Viskositeetti	x	x	

2.3 Lämmöntalteenotossa käytettävän teknologian määrittäminen

Saatavissa oleva hukkalämmön määrä tulee tietää, jotta pystytään määrittämään hukkalämmön talteenotossa käytettävä teknologia. Hukkalämpöä pidetään sitä laadukkaampana mitä korkeampi sen lämpötilataso on. Hukkalämmön energiamäärä pystytään määrittämään yhtälön 1. avulla:

$$Q = q_v \, \rho \, C_p \Delta T \tag{1}$$

jossa Q on energiasisältö [kW], q_v on aineen tilavuusvirta [m^3/s], ρ on virtaavan aineen tiheys [kg/m^3], C_p on aineen ominaislämpökapasiteetti [J/kg,K], ΔT on virtaavan aineen ulos- ja sisääntulon lämpötilan erotus [K] (Jouhara, Hussam et al., 2018, s. 269).

Kertomalla tämä yhtälö Carnotin hyötysuhteella saadaan hukkalämmöstä saatava teho ja integroimalla se ajan suhteen saadaan määriteltyä eksergiavirta eli se osuus lämpöenergiasta, joka on mahdollista muuntaa työksi eli on toisin sanoen hyödynnettävissä (Woolley et al., 2018, s. 53):

$$P = q_v \rho \, C_p \, \Delta T (1 - \frac{T_{amb}}{T_{h,in}}) \tag{2}$$

jossa P on teho [kW], q_v on aineen tilavuusvirta [m^3/s], ρ on virtaavan aineen tiheys [kg/m^3], C_p on aineen ominaislämpökapasiteetti [J/kg,K], ΔT on virtaavan aineen ulos- ja sisääntulon lämpötilan erotus [K], $T_{h,in}$ on virtaavan aineen sisääntulolämpötila [K] ja T_{amb} on ympäristön lämpötila [K].

$$E = \int_0^t P \, dt \tag{3}$$

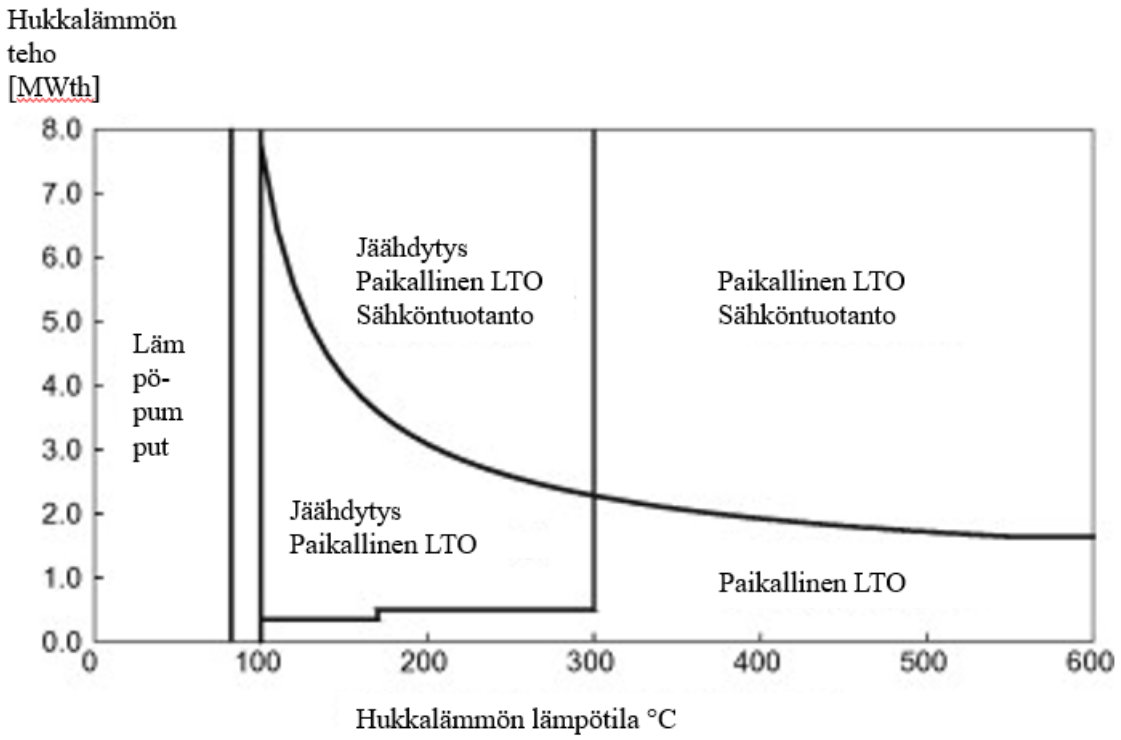
Jossa E on hukkalämmöstä saatava eksergiavirta [kWh] ja P on teho [kW] ja t on aika [h] (Woolley et al., 2018, s. 54).

Lämmöntalteenotossa käytettävän teknologiaan vaikuttavat lämmönlähteestä saatavan energiamäärän lisäksi taulukossa 2 määritellyt lämmönlähteiden ja lämpönielujen määrälliset ja laadulliset ominaisuudet. Woolley (2018, s. 55) on määritellyt teoksessaan seuraavat neljä valintakriteeriä lämmöntalteenottoteknologialle:

1. Lämmönsiirto mekanismi
2. Lämmönsiirtoaineen olomuoto
3. Laitteen koko
4. Operoinnin lämpötilataso

Law (2016, s. 593–596) kumppaneineen ovat hyödyntäneet kehittämänsä työkalun ”teknologian valinta” -vaiheessa kaksivaiheista prosessia, jonka ensimmäisessä vaiheessa selvitetään laitoksen omat tarpeet (lämpönielut) ja mahdolliset intressit hukkalämmön hyödyntämiselle (sähköntuotanto). Teknologian valinnan seuraavassa vaiheessa käytettävää teknologiaa haarukoidaan työkaluun mukaan valittujen teknologioiden teknisten rajoitusten perusteella. (Law et al., 2016, s. 593–596.)

Chowduryn (2018, s. 1159) tutkimuksessa on nostettu lämmönlähteen laadullisten ominaisuuksien ja lämmön määrän lisäksi tärkeiksi ominaisuuksiksi teknologian valinnalle myös hyötysuhde sekä takaisinmaksuaika (Chowdhury et al., 2018, s. 1159). Sekä käytettävän teknologian hyötysuhteella että takaisinmaksuajalla on vaikutusta investoinnin kannattavuuteen ja näin myös vaikutusta teknologian valinta prosessissa, mutta aluksi kannattaa valita tarkempaan tarkasteluun teknologioita, jotka sopivat teknisiltä ominaisuuksiltaan kyseiseen lämmöntalteenotto prosessiin. Kuvaan 6 on jaoteltu eri teknologioiden sopivuutta lämmönlähteen lämpötehon sekä lämpötilan perusteella. Kuvassa paikallisella LTO:lla tarkoitetaan, että hukkalämpö hyödynnetään tehtaalla.



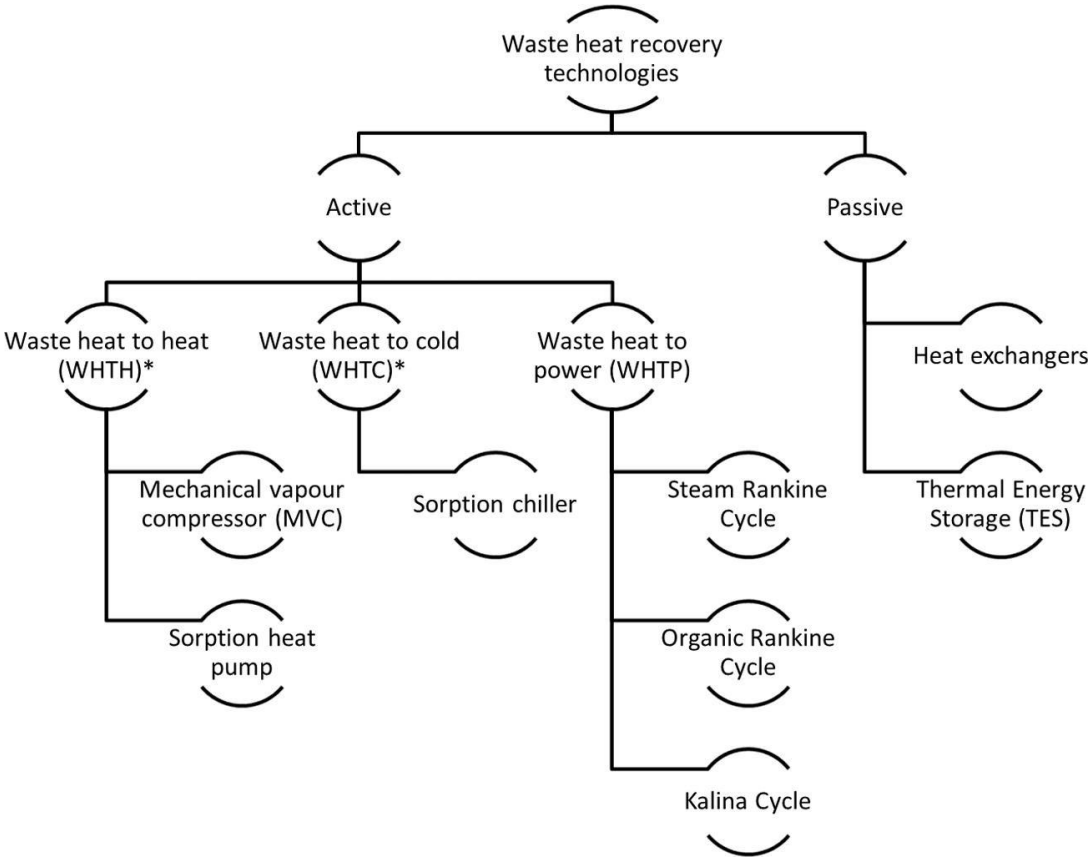
Kuva 6. Lämmöntalteenoton valinta hukkalämmönlähteen lämpötehon ja lämpötilan perusteella (Hammond & Norman, 2014, s. 390, muokattu)

3 Teknologiat hukkalämmön hyödyntämiseen

Lämmöntalteenottoa varten on kehitetty useita eri teknologioita, joiden tarkoitus on ottaa lämpöä talteen prosessista ja siirtää se hyödynnettäväksi. Eri teknologioita voidaan ryhmitellä keskenään useiden eri kriteerien mukaan, mutta yleisesti teknologiat voidaan jaotella seuraavasti (Agathokleous et al., 2019, s. 491):

1. Teknologiat, jotka siirtävät lämpöä korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan
2. Teknologiat, jotka siirtävät lämpöä matalammasta lämpötilasta lämpöä korkeampaan hyödyntäen toista lämmönlähdettä
3. Teknologiat, jotka muuntavat lämpöä sähköksi

Teknologiat hukkalämmön hyödyntämisessä jaetaan usein myös aktiivisiin ja passiivisiin teknologioihin (Brückner et al., 2015, s 158; Chowdhury et al., 2018, s. 1159; Anastasovski, Rasković, Guzović, 2020, s. 3). Tätä jaottelua ja siihen kuuluvia teknologioita on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Hukkalämmön hyödyntämiseen käytettävät teknologiat ja niiden jaottelu (Brückner et al., 2015, s. 159)

3.1 Lämmityksessä ja jäähdytyksessä käytettävät teknologiat

Lämmönsiirtimiä on ehdotettu parhaaksi teknologiaksi lämmöntalteenottoon ja niitä pidetään taloudellisesti kannattavana investointina, sillä niiden avulla lämpöä siirretään toiseen kohteeseen eikä sitä tarvitse varastoida tai muuttaa sähköksi eikä siirtäminen vaadi prosessin ulkopuolista energiaa (Woolley et al., 2018, s 51). Kannattavuus paranee entisestään, jos lämpöä pystytään hyödyntämään itse laitoksessa tai sen läheisyydessä sillä näin vältytään putkistojen, kanavistojen ja lisälaitteiden vaatimista lisäinvestoinneista sekä niiden aiheuttamilta lämpöhäviöiltä. Lämmönsiirrinten hyödyntäminen vaatii kuitenkin lämpönielun, jonka lämpötilataso on sopiva hukkalämmönlähteeseen nähden. (Woolley et al., 2018, s. 51.)

Silloin kun lämpöä ei voida siirtää suoraa lämpönieluun voidaan sen lämpötilaa nostaa lämpöpumpun avulla. Lämpöpumpun lisääminen prosessiin voi parantaa huomattavasti prosessin hyötysuhdetta ja myös takaisinmaksuajat voivat jäädä kohtuulliseksi verrattuna

lämmönsiirtimiin (Men et al., 2021, s. 13). Lämpöpumpuilla voidaan myös hyödyntää hukkalämmön sisältämä energiaa ja tuottaa samalla jäähdytystä prosessiin.

Taulukkoon 3 on kerätty lämmöntalteenotto teknologian valinnassa tarvittavia tietoja eri lämmönsiirtimistä ja lämpöpumpuista. Taulukossa viitatut lämpötilatasot jakaantuvat seuraavasti:

Matala = alle 100 ˚C

Keskitaso = 100–400 ˚C

Korkea = yli 400 ˚C

Taulukko 3. Lämmönsiirrinten ja lämpöpumppujen huomioon otettavat ominaisuudet lämmöntalteenoton teknologian valinnassa (Jouhara et al., 2018)

Tyyppi	Lämpötilataso	Lämmön-lähteen olomuoto	Lämpö-nielun olomuoto	Lämmön-lähteen likaisuus	Lämpö-nielun likaantuminen	Ulkoisen energian tarve
Ekonomaiseri	matala/keskitaso	kaasu	neste		ei	ei
Lämpöputket	keskitaso/korkea	kaasu	kaasu	kyllä	ei	ei
Jätelämpökattila	keskitaso/korkea	kaasu	neste/höyry		ei	ei
Rekuperaattori	matala/korkea	kaasu	kaasu		ei	ei
Regeneraattori	keskitaso/korkea	kaasu	kaasu	kyllä	kyllä	ei
Pyörivä regeneraattori	matala/keskitaso	kaasu	kaasu	kyllä	kyllä	ei
Nestekiertoinen Lämmön-siirtopatteri	keskitaso/korkea	kaasu	kaasu		ei	kyllä
Levylämmönsiirrin	keskitaso/korkea	neste/kaasu	neste	kyllä	ei	ei
Lämpöpumput	matala/keskitaso	neste/kaasu/ kiinteä	neste/kaasu		ei	kyllä

3.1.1 Ekonomaiserit

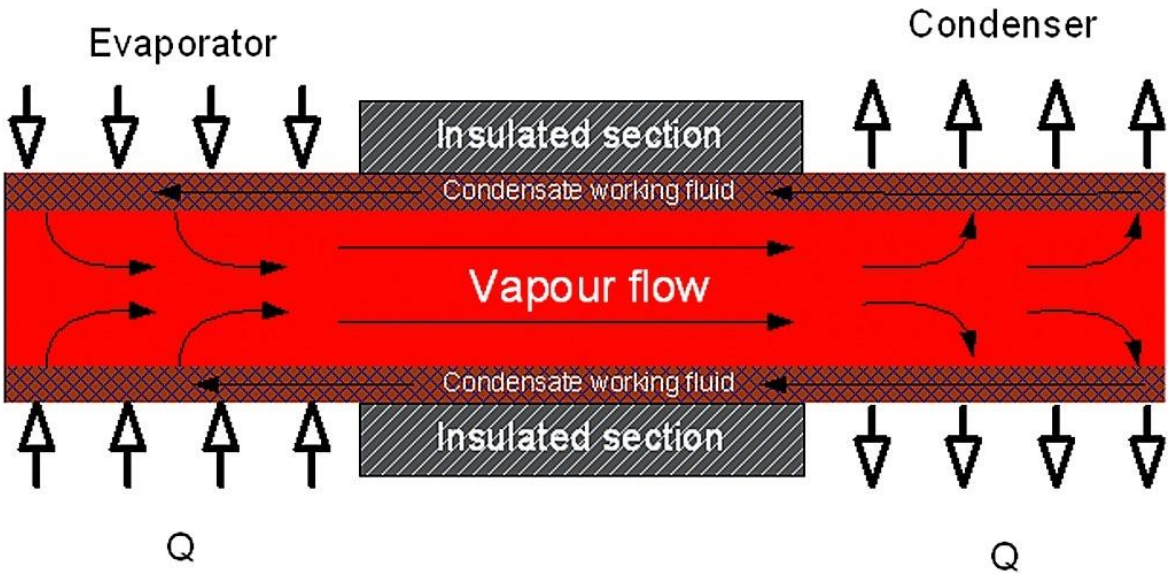
Ripaputki ekonomaiserilla voidaan ottaa talteen matalan ja keskitason hukkalämpöä ja siirtää sitä nesteeseen. Siirtimen putkien metalliset rivat kasvattavat lämmönsiirtopinta-alaa ja näin saadaan lämmönsiirtopinta-ala mahdollisimman suureksi. Lämmitettävä neste kulkee putkien sisällä ja ulkopuolella savukaasu, josta halutaan ottaa lämpöä talteen. Samalla periaatteella toimivia lämmönsiirtimiä ovat ripaputki-, kierreputki- lauhduttavat- ja ei-lauhduttavat ekonomaiserit. Silloin kun ekonomaiserin lämpötilat ovat niin alhaiset, että savukaasu alkaa kondensoitua lämmönsiirtopinta-alaan on syytä valita siirtimen materiaali niin että se kestää hapanta kondenssia. (Jouhara et al., 2018, s. 270–271.)

Ekonomaiserien hyötysuhdetta ja käytettävyyttä on saatu parannettua hyödyntämällä lämpöputkiteknologiaa ekonomaiserien lämmönsiirtimenä. Hanke, jossa on tutkittu eri lämmöntalteenotto teknologioiden hyötyjä, nostaa esiin, että etenkin kondensoivat ekonomaiserit yhdistettynä lämpöputkiin voisi vähentää prosessi häiriöitä, lämmönsiirtimen huollon tarvetta ja teknologia mahdollistaisi oikeilla materiaalivalinnoilla lämmöntalteenotto teknologian asentamisen kohteisiin, jossa lämpöä otetaan talteen happamista savukaasuista ja halutaan maksimoida talteen otettavan lämpöenergian määrä jäähdyttämällä savukaasut alle kastepisteen. Lämpöputkia hyödyntämällä saadaan pienennettyä myös lämmönsiirtimen kokoa. (Agathokleous et al., 2019, s. 492.)

3.1.2 Lämpöputket

Lämpötilatasoltaan lämpöputket sopivat keskisuuren ja korkean lämpötilan hukkalämmön hyödyntämiseen ja putken sisällä oleva lämmönsiirtoaine voidaan valita lämpötilatason mukaan. Lämpöputkia voidaan valmistaa useasta eri materiaalista ja sen valintaan vaikuttaa lämpötilatason lisäksi käytettävän lämmönsiirtonesteen ja materiaalin välinen yhteensopivuus. (Jouhara et al., 2018, s. 273–275.)

Lämpöputket koostuvat nipusta samansuuntaisia putkia, jotka on asennettu säiliön sisälle. Säiliö on jaettu kahteen osioon, jonka toisella puolella kulkee kylmävirtaus ja toisella puolella lämmin. Lämpöputkien sisällä oleva aine toistaa höyrystymisen ja lauhtumisen kiertoa sen mukaan onko se kosketuksissa kylmään vai lämpimään virtaukseen ja samalla putken sisällä oleva aine siirtää lämpöä virtausten välillä. Yksinkertaisen rakenteen ja passiivisen toiminnan ansiosta lämpöputket vaativat vähemmän huoltoa ja ovat pitkäikäisiä verrattuina muihin lämmönsiirtimiin. (Jouhara et al., 2018, s. 273–275.) Kuvassa 8 on esitetty lämpöputken toimintaperiaate ja rakenne.



Kuva 8. Lämpöputken toimintaperiaate ja rakenne (Jouhara, H. et al., 2017, s. 730)

3.1.3 Jätelämpökattilat

Jätelämpökattiloita voidaan hyödyntää höyryn tuottamiseen hukkalämmöstä. Jätelämpökattiloita voidaan hyödyntää, kun hukkalämmönlähteen lämpötilataso on keskisuuri tai korkea ja teknologian hyötysuhdetta voidaan parantaa yhdistämällä järjestelmään muita lämmöntalteenottoteknologioita. (Jouhara et al., 2018, s. 271.)

3.1.4 Rekuperaattori, regeneraattori ja lämpöpyörä

Rekuperaattorit sopivat keskisuuren ja korkean lämpötilan hukkalämmölle. Korkeammissa lämpötiloissa lämmönsiirtimessä voidaan käyttää keraamisia materiaaleja ja keskisuurilla lämpötiloilla metallisia. Kuumat savukaasut johdetaan läpi metallisten putkien tai kanavien, joiden ympärillä kulkee lämmitettävä ilma. Lämpö siirtyy joko johtumalla tai säteilemällä tai sekä että, riippuen rekuperaattorin rakenteesta. (Jouhara et al., 2018, s. 271.)

Regeneraattori hyödyntää korkean lämmönsiirtokapasiteetin omaavia aineita, joihin varastoidaan ensin lämpöä kuumasta savukaasuvirtauksesta ja tämän jälkeen kammioon, jossa väliaine sijaitsee, johdetaan lämmitettävää ilmaa, johon väliaineeseen sitoutunut lämpö siirtyy. Regeneraattorit sopivat likaisille poistokaasuillekin, mutta ovat usein kooltaan suuria, mikä saattaa nostaa investointikustannuksia. (Jouhara et al., 2018, s. 271–272.)

Pyörivät regeneraattorit eli lämpöpyörät koostuvat huokoisesta materiaalista valmistetusta pyörivästä lämmöntalteenotto yksiköstä, jonka läpi kulkee kaksi kanavaa, joista toisessa virtaa kylmä kaasu ja toisessa lämmin. Samalla kun LTO pyörii se siirtää lämpöä kuumasta virtauksesta kylmään. Pyörivä yksikkö ei kuitenkaan sovi silloin kun systeemistä poistettava ilma, josta lämpö otetaan talteen ei ole puhdasta ja systeemiin tuotava lämmitettävä ilma ei saa likaantua. Yksikkö sopii kuitenkin hyvin kohteisiin, jossa poistettavassa ilmassa oleva kosteus halutaan myös hyödyntää lämmön lisäksi. (Jouhara et al., 2018, s. 272.)

3.1.5 Nestekiertoinen lämmönsiirtopatteri

Nestekiertoisissa lämmöntalteenottolaitteissa lämmönsiirtonestettä pumpataan putkistossa, joka yhdistää lämmönlähteestä lämpöä talteen ottavaa lämmönsiirrintä sekä lämpönieluun lämpöä luovuttavaa lämmönsiirrintä. Kyseinen lämmöntalteenotto kytkentä tulee kyseeseen silloin kun kaasuvirtaukset eivät saa likaantumisen tai kosteuden takia sekoittua keskenään tai silloin kun lämmönlähde ja lämpönielu ovat liian kaukana toisistaan suoraa lämmöntalteenottoa varten. Lämmön talteenoton hyötysuhde kuitenkin huononee, sillä pumppu tarvitsee ulkopuolista energiaa toimiakseen. Hyötysuhdetta voidaan parantaa lisäämällä piiriin sekundäärinen lämmönlähde, jolla saadaan nostettua lämmönsiirtonesteen lämpötilaa lisää. (Jouhara et al., 2018, s. 272.)

3.1.6 Levylämmönsiirrin

Levylämmönsiirtimiä käytetään, kun halutaan siirtää lämpöä nesteestä toiseen ilman että saastunut virtaus likaa puhtaan virtauksen. Lämmönsiirtimen sisällä virtaukset voivat kokoonpanosta riippuen kulkea joko yhdessä tai useammassa vaiheessa. Rakenteeltaan levylämmönsiirtimet voivat olla joko tiivisteellisiä, juotettuja tai hitsattuja. Tiivisteellisellä rakenteella mahdollistetaan levylämmönsiirrinten puhdistus ja levyjä lisäämällä voidaan helposti lisätä lämmönsiirtimen kapasiteettia. Tiivisteelliset lämmönsiirtimet myös kestävät paremmin paineen- ja lämpötilanvaihteluja. (Jouhara et al., 2018, s. 273.)

Juotettu levylämmönsiirrin kestää korkeampia paineita ja lämpötiloja, mutta kapasiteetin lisäys ja puhdistus ei ole yhtä helppoa kuin tiivisteellisellä. Rakenne ei ole myöskään yhtä joustava kuin tiivisteellisellä lämmönsiirtimellä, joten prosessiolosuhteet tulisi olla mahdollisimman tasaiset käytettäessä juotettuja lämmönsiirtimiä. (Jouhara et al., 2018, s. 273.)

Hitsatut levylämmönsiirtimet kestävät paremmin paineen ja lämpötilan vaihteluja kuin juotetut. Tämä rakenne kestää myös hyvin korkeita lämpötiloja ja paineita, mutta rakenne ei ole avattavissa tai muokattavissa kuten tiivisteellisellä lämmönsiirtimellä. (Jouhara et al., 2018, s. 273.) Spiraalilämmönsiirtimet ovat myös hitsattuja levylämmönsiirtimiä ja nämä on suunniteltu erityisen likaisille tai muuten koostumukseltaan haasteellisille nesteille (Danfoss; Alfa Laval, 2019).

3.1.7 Lämpöpumput

Lämpöpumppujen osalta tässä työssä käsitellään mekaaniset lämpöpumput ja absorptio lämpöpumput sekä niiden käyttö jäähdytykseen. Lisäksi käydään läpi muita teknologian valinnassa huomioitavia asioita liittyen kylmäaineisiin ja niiden ominaisuuksiin.

3.1.7.1 Lämpöpumput lämmityksessä

Molemmille teknologioille yhteistä on matalamman lämpötilan lämpövirran hyödyntäminen ja lämpövirran lämpötilan nostaminen ja luovuttaminen lämpönieluun alkuperäistä lämpötilaa korkeammassa lämpötilassa. Absorptiolämpöpumppu tarvitsee käyttöenergiaksi höyryä tai kuumaa vettä, kun taas mekaaninen lämpöpumppu vaatii toimiakseen sähköä. Absorptiolämpöpumppua kannattaa harkita silloin kun lähistöllä on saatavissa höyryä tai kuumaa vettä. (Maaskola & Kataikko, 2014, s. 16, 63.) Alla olevassa taulukossa on vertailtu näiden kahden lämpöpumpputeknologian ominaisuuksia.

Taulukko 4. Mekaanisen ja absorptiolämpöpumpun ominaisuuksia (Maaskola & Kataikko, 2014, s. 20)

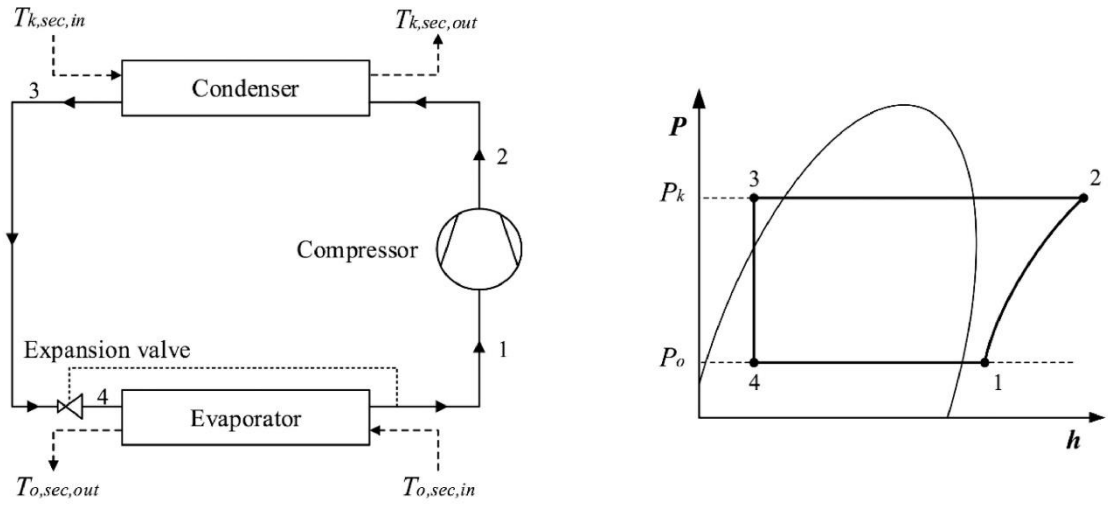
Lämpöpumpputyyppi	Mekaaninen	Absorptio
Käyttöenergia	sähkö	kuumavesi tai höyry
Korkein luovutuslämpötila	120	95
COP	2,6–7,5	1,5–1,7
Kiertoaine	halogenoidut hiilivedyt, ammoniakki, hiilivedyt, CO2	vesi/litiumbromidi, ammoniakki/vesi
Osakuormaominaisuudet	hyvät	erinomaiset
Korroosiolle altis	ei	seurattava
Likaantumiselle altis	ei	ei

Taulukossa 4 oleva COP-arvo kuvaa hyötysuhdetta ja se saadaan alla olevan yhtälön avulla:

$$COP = \frac{Q_H}{W_{in}} \tag{4}$$

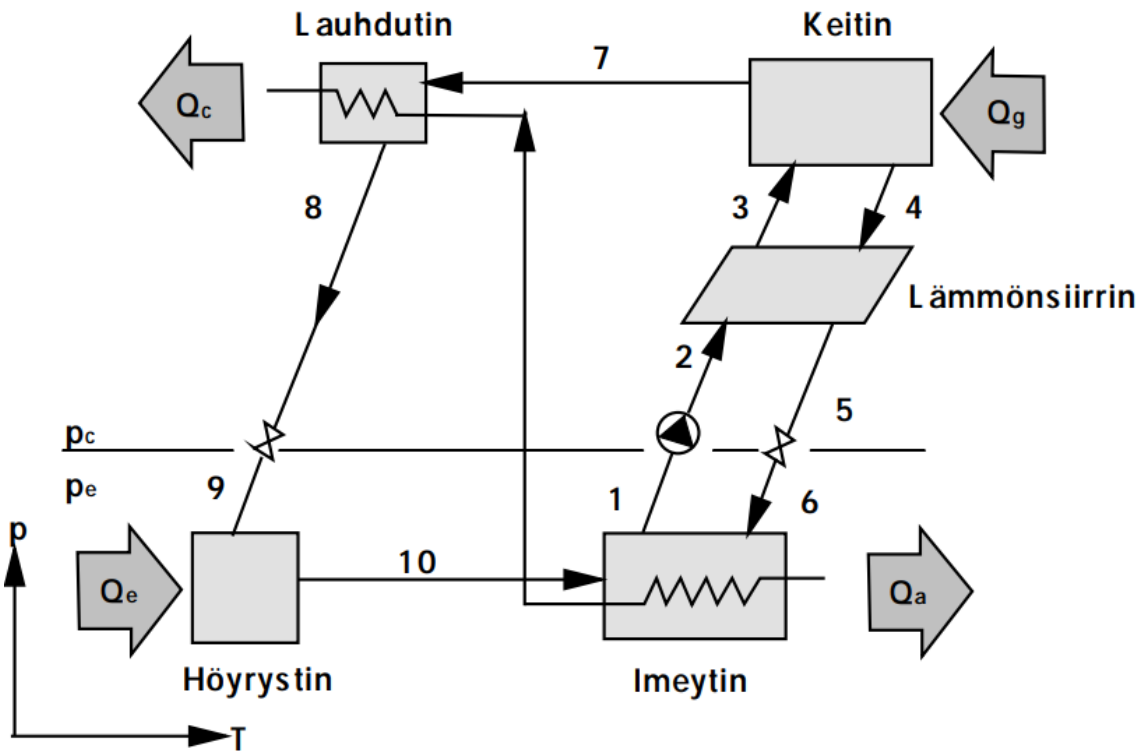
Jossa *COP* (Coefficient of performance) on lämpöpumpun hyötysuhde, Q_H on lämpöpumpun tuottama lämpöenergia [kW] ja W_{in} on lämpöpumpun käyttämä energia [kW] (Lun & Tung, 2020, s.28.)

Kuvassa 9 on esitetty mekaanisen lämpöpumpun pääkomponentit sekä kierron vaiheet log p,h -kuvaajassa. Höyrystimessä lämpö siirtyy lämmönlähteen väliaineesta lämpöpumpussa kiertävään kylmäaineeseen, joka höyrystyy (4–1). Kompressorissa kylmäaineen paine nostetaan ja samalla kylmäaineen lämpötila nousee (1–2). Lauhduttimessa kylmäaine luovuttaa lämmön lämpönielun väliaineeseen ja samalla kylmäaine lauhtuu ja palaa nestemäiseen olomuotoon (2–3). Lopuksi kylmäaine kulkee paisuntaventtiilin läpi ja kylmäaineen paine putoaa (3–4). (Mateu-Royo et al., 2018, s. 230–231.)



Kuva 9. Mekaanisen lämpöpumpun pääkomponentit (Mateu-Royo et al., 2018, s. 231, muokattu)

Kuvassa 10 on esitetty absorptiolämpöpumpun pääkomponentit. Keittimen käyttöenergiana käytetään lämmintä vettä, savukaasua tai höyryä, jota täytyy olla saatavilla lämpöpumpun läheisyydessä. Höyrystimessä hyödynnetään matalamman lämpötilan ylijäämälämpöä ja molemmista lauhduttimesta ja imeyttimestä saadaan keskitason lämpöä siirrettäväksi lämmitettävään kohteeseen. Liuos kiertää imeyttimen ja höyrystimen välillä pumpun ja paisuntaventtiilin avulla ja liuottimen lämmönsiirtimessä liuos ottaa lopun lämmön talteen kiehuttimelle palaavasta liuoksesta. Yleisesti käytetyt liuokset ovat veden ja ammoniakin yhdistelmä sekä veden ja litiuminbromidin yhdistelmä. (Xu & Wang, 2017, s. 415.)



Kuva 10. Absorptiolämpöpumpun pääkomponentit ja toimintaperiaate (Koljonen & Sipilä, 1998, s. 13)

3.1.7.2 Lämpöpumput jäähdytyksessä

Absorptiojäähdytin toimii samalla periaatteella kuin absorptiolämpöpumppu, mutta silloin lämmönlähteen tilalla on jäähdytettävä kohde, joka jäähtyy höyrystimessä (Koljonen & Sipilä, 1998, s. 14). Lämpöpumpputeknologiaa voidaan hyödyntää yhtäaikaiseen jäähdytykseen ja lämmitykseen, jos tarkasteltavassa kohteessa on sekä jäähdytyksen että lämmityksen tarvetta ja näiden energia- ja lämpötilatasot ovat sopivat (Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä, 2016). Lämpöpumput vaativat sähköistä työtä, jotta lämmön siirtyminen alemmalta lämpötilatasolta ylemmälle on mahdollista, kuten raportin alkupuolella kuvassa 5 on esitetty. Absorptioprosessissa tämä työ (exergia) tuotetaan systeemiin lämpöenergian avulla (Koljonen & Sipilä, 1998, s. 11.) Tämän takia sen sähköntarve on huomattavasti pienempi kuin mekaanisella lämpöpumpulla.

Taulukkoon 5 on kerätty absorptio- ja mekaanisen lämpöpumpun ominaisuuksia jäähdytyskäytössä. Taulukosta nähdään, että ammoniakki-vesi absorptiojäähdyttimellä saadaan tarvittaessa jäähdytettyä alle 0 asteen lämpötilaan. Matalimmillaan lämpöpumpuilla pystytään hyödyntämään jopa 20 asteista hukkalämpöä, mutta tällöin myös lämpöpumpun hyötysuhde jää matalammaksi kuin mitä se olisi, jos hyödynnettävän hukkalämmön lämpötila olisi korkeampi.

Taulukko 5. Absorptiojäähdyttimen ja lämpöpumpun ominaisuuksia jäähdytyksessä

Teknologia	Absorptio; 1-vaiheinen	Absorptio; 2-vaiheinen	Absorptio; 1-vaiheinen	Absorptio; 2-vaiheinen	Mekaaninen
Kiertoaine	Vesi-litium-bromidi	Vesi-litium-bromidi	Ammoniakki-Vesi	Ammoniakki-Vesi	Kylmäaine
Jäähdytyslämpötila [°C]	5–10	5–10	-60–0	5–10	5–15
COP_C	0,5–0,7	1,0–1,2	0,25–0,6	0,5–0,6	1,1–2,0
Lämmönlähteenlämpötila [°C]	80–120	120–170	100–200	80–120	20–90
Jäähdytysteho [kW]	35–7000	20–11,630	10–6500	10–30	100–1000(-Wnet)
Huomiot	-Käyttää vettä kylmäaineena -Kiteytymisen ehkäisy vaatii vesijäähdytteisen imeyttimen -Matala paine	-Käyttää vettä kylmäaineena -Kiteytymisen ehkäisy vaatii vesijäähdytteisen imeyttimen -Matala paine	-Kylmäaine vaatii rektifioinnin -Ympäristöystävällinen kiertoaine -Kiteytymisen ehkäisyä ei tarvita -korkea paine	-Kylmäaine vaatii rektifioinnin -Ympäristöystävällinen kiertoaine -Kiteytymisen ehkäisyä ei tarvita -korkea paine	- Jäähdytyksen yhteydessä voidaan tuottaa kuumaa, jopa 130 °C lämpöistä vettä - COP_C on arvioitu oletuksella COP_C=COP-1, kun lt=5–15 °C
Lähteet	(Deng et al., 2011)	(Deng et al., 2011)	(Deng et al., 2011)	(Deng et al., 2011)	(Calefa)

Taulukossa 5 oleva COP-arvo kuvaa lämpöpumpun jäähdytyksen termistä hyötysuhdetta ja on hyvä huomioida, ettei hyötysuhde ota kantaa lämpöpumpun sähkökulutukseen. Jos absorptiolämpöpumpun käyttöenergiana voidaan hyödyntää hukkalämpöä, sen kannattavuus voi olla huonommasta termisestä hyötysuhteesta huolimatta parempi. Jäähdytyksen terminen hyötysuhde saadaan alla olevan yhtälön avulla:

$$COP_C = \frac{Q_L}{W_{in}} \tag{5}$$

Jossa COP_C (Coefficient of performance) on lämpöpumpun jäähdytyksen hyötysuhde, Q_L on lämpöpumpun tuottama jäähdytys [kW] ja W_{in} on lämpöpumpun käyttämä energia [kW] (Lun & Tung, 2020, s. 28.)

3.1.7.3 Lämpöpumput lämmityksessä ja jäähdytyksessä

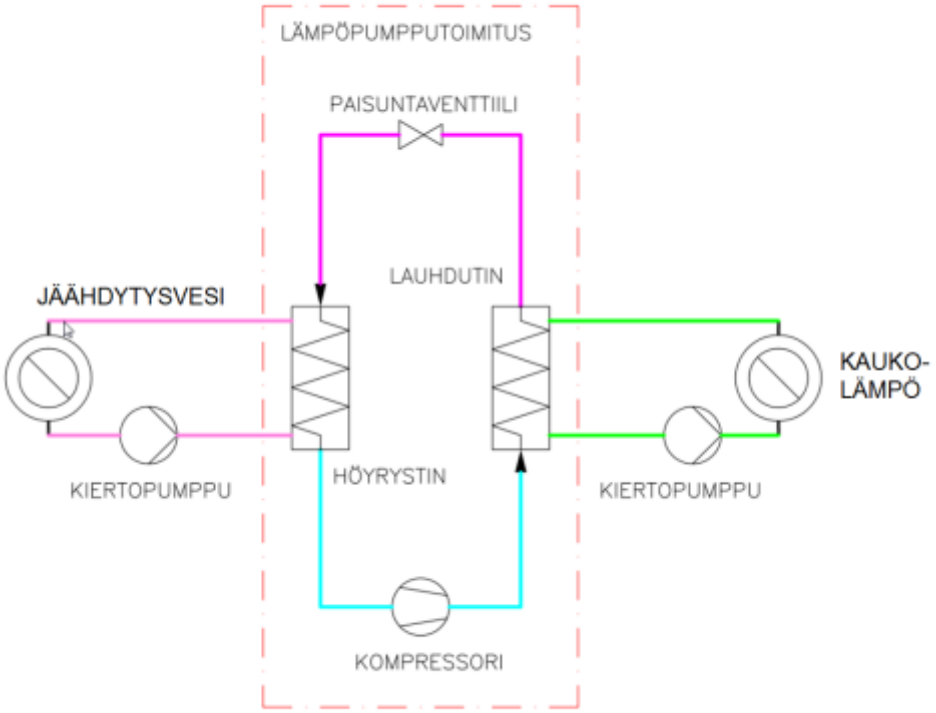
Kaukolämpöjärjestelmissä voidaan lämpöpumpuilla hyödyntää esimerkiksi jätevesien ja kaukojäähdytyksen paluulinjan ylijäämälämpöä ja tuottaa lämpöä kaukolämmitysverkkoon samalla kun jäähdytetään jätevesiä tai kaukojäähdytyksen paluulinjan vettä niin että vesi voi palata uudestaan kaukojäähdytysasiakkaiden menolinjoihin. Kaukolämmön paluuvettä voidaan hyödyntää myös lämpöpumppujen lämmönlähteenä ja tällöin saadaan myös paluuveden lämpötilaa laskettua lisää, joka tehostaa laitoksella olevien savukaasulauhduttimien lämmöntalteenottoa ja samalla koko laitoksen hyötysuhdetta. (Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä, 2016.)

Kaukolämmityksen yhteydessä ylijäämälämmön hyödyntäminen lämpöpumpulla on saatu kannattavaksi lisäämällä kaukojäädytyksen tuotanto kaukolämmityksen tuotantoon samalla lämpöpumpulla kuten Energiateollisuuden teettämässä selvityksessä on todettu (Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä, 2016). Lämpöpumpun lämmityksen ja jäähdytyksen yhteistuotannon hyötysuhdetta voidaan myös kuvata COP-arvolla alla olevan yhtälön mukaisesti:

$$COP_{HC} = \frac{Q_H + Q_L}{W_{in}} \tag{6}$$

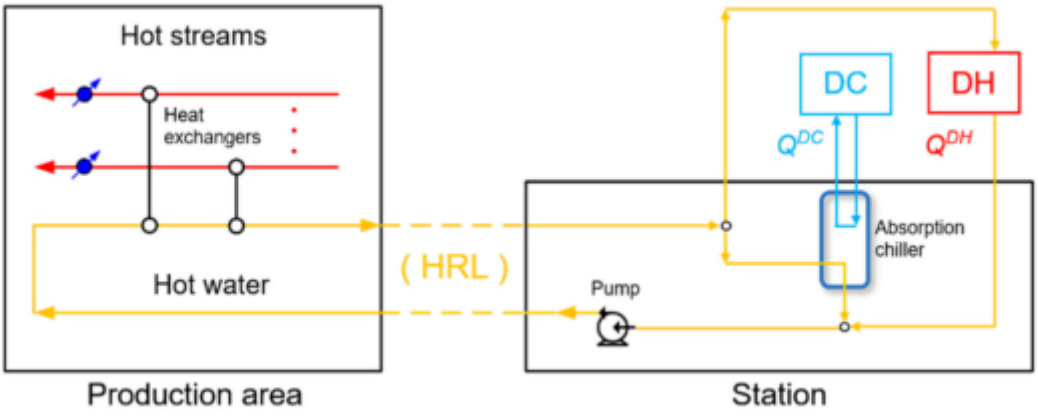
Jossa COP_{HC} (Coefficient of performance) on lämpöpumpun lämmityksen ja jäähdytyksen yhteistuotannon hyötysuhde, Q_H on lämpöpumpun tuottama lämpöenergia [kW], Q_L on lämpöpumpun tuottama jäähdytys [kW] ja W_{in} on lämpöpumpun käyttämä energia [kW] (Lun & Tung, 2020, s. 28.)

Kuvassa 11 on esitetty periaatteellinen kytkentä lämpöpumpulle, jolla halutaan hyödyntää teollisuuskohteen jäähdytysvesikierrossa syntyvää hukkalämpöä jäähdyttämällä virtausta ja samalla tuottaa lämpöä kaukolämpöverkkoon



Kuva 11. Prosessijäähdytyksen ja kaukolämmön tuottaminen teollisuuskohteen jäähdytyksen hukkalämmöstä lämpöpumpulla (Maaskola & Kataikko, 2014, s. 26)

Kuvassa 12 hukkalämpöä hyödynnetään erillisen lämmöntalteenottokierron (HRL) avulla, jolla voidaan siirtää lämmönsiirtimillä hukkalämmöstä talteen otettua lämpöä joko suoraa kaukolämpöverkkoon (DH) tai/ja absorptiojäähdyttimen käyttöön, jotta saadaan jäähdytystä kaukokylmän kiertoon (DC) (Zhang, L. et al., 2021, s. 3).



Kuva 12. Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön ja -kylmän tuotannossa (Zhang et al., 2021, s. 3)

Kuten kuvasta 12 nähdään, kun halutaan hyödyntää hukkalämpöä sekä lämmön- että jäähdytyksen tuottamiseen absorptioteknologian käyttäminen edellyttää lämmönlähteen riittävän korkeaa lämpötilaa, jotta sitä voidaan hyödyntää sekä suoraan lämmitykseen että käyttövoimaksi absorptiojäähdyttimelle. Taulukosta 5 nähdään, että lämpötilan tulisi olla vähintään 80 °C, jotta se on riittävän lämmintä absorptiojäähdyttimen käyttövoimaksi.

Absorptiolaitteet vaativat erillisen välijäähdytyksen laitteistossa syntyvän hukkalämmön poistamiseksi. Välikierron lämpötilataso on noin 30 °C, joten sen hyödyntäminen lämmityskäyttöön on haastavaa sillä lämpötilaa ei voida korotta erillisellä lämpöpumpulla kuten voidaan tarvittaessa tehdä hyödynnettäessä kompressoriteknologiaan perustuvia jäähdytyslaitteistoja. (Laitinen et al., 2016, s. 19, 48.)

Tutkimuksessa, jossa selvitettiin pelkän absorptioteknologian hyödyntämistä kaukolämmön ja -jäähdytyksen tuottamiseksi hukkalämmöstä eri kytkentävaihtoehdoilla, tultiin siihen johtopäätökseen, että vaihtoehdot, jossa tuotetaan pelkkää kaukolämpöä tai sekä lämmitystä ja jäähdytystä silloin kun käytössä on erillinen jäähdytystorni, olivat kannattavimmat. Tutkimuksessa nostettiin kuitenkin esiin, että yhteistuotannossa jäähdytyksen määrä jäi vähäiseksi. (Atienza-Márquez et al., 2019, s. 17.)

3.1.7.4 Lämpöpumpputeknologian valinnassa huomioitavaa

Ympäristö- ja turvallisuusasiat on hyvä huomioida jo siinä vaiheessa, kun valitaan lämmityksessä ja jäähdytyksessä käytettävää teknologiaa. Kun mietitään lämpöpumppu investoinnin kannattavuutta kaukolämmön tuotannossa, on tärkeää muistaa tarkastella myös sähköverkon riittävyyttä sekä hyödynnettävän hukkalämmön saatavuutta ja hintaa (Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä, 2016, s. 24–25).

Lämpöpumppu ja jäähdytyslaitteita hankittaessa on myös syytä muistaa tarkastella hankittavan laitteiston kylmäaineen GWP-arvoa. GWP (Global Warming Potential) -arvo kertoo kylmäaineen vaikutuksesta ilmastonmuutokseen verrattuna hiilidioksidiin, jonka GWP-arvo on 1. Fluorihiilivedyt on yksi sellainen kylmäaineiden ryhmä, joiden käyttöä halutaan vähentää niiden korkean GWP-arvon takia. Fluorihiilivedyt ovat yleisesti käytössä lämpöpumpuissa ja kylmäkoneikoissa ja niiden käyttöä on pyritty vähentämään lainsäädännöllä ja kansainvälisillä sopimuksilla, kuten Euroopan parlamentin F-kaasuasetus (2014) ja Montrealin pöytäkirjan erillinen Kigali-sopimus. Fluorihiilivetyjä lämpöpumpuissa ja kylmäaineissa pyritään korvaamaan ns. luonnollisilla kylmäaineilla kuten hiilidioksidilla ja butaanilla ja uusien korvaavien aineiden ominaisuuksia on tutkittu ja esitelty esimerkiksi Mateu-Royo ym. tutkimuksissa (Mateu-Royo et al., 2021; Mateu-Royo et al., 2018).

Fluorihiilivetyjä korvaavia kylmäaineita käytettäessä on kuitenkin muistettava, että osa on herkästi syttyviä, myrkyllisiä (kuten ammoniakki) tai ilmaa raskaampia ja täten happea syrjäyttäviä. Turvallisuusriskit tulee ottaa huomioon laitteita suunniteltaessa, valmistettaessa, käytettäessä sekä huollettaessa ja kyseisiin osa-alueisiin on kerätty ohjeistusta eurooppalaiseen kylmälaitestandardi sarjaan 378 (Luca Tarantolo, 2020).

3.2 Sähköntuotannossa käytettävät teknologiat

Tässä kappaleessa käydään läpi eri teknologioita, joita voidaan hyödyntää, kun halutaan tuottaa sähköä hukkalämmöstä. Alla olevaan taulukkoon on kerätty yhteenveto kyseisten teknologioiden ominaisuuksista. Taulukossa esiintyvät lyhenteet ovat ORC (Organic Rankine Cycle, TFC (Trilateral Flash Cycle) sekä lämpösähköinen generaattori, TEG (Thermoelectric Generator) ja teknologioiden ominaisuudet käydään tarkemmin läpi myöhemmin.

Taulukko 6. Sähköntuotanto teknologioiden vertailua

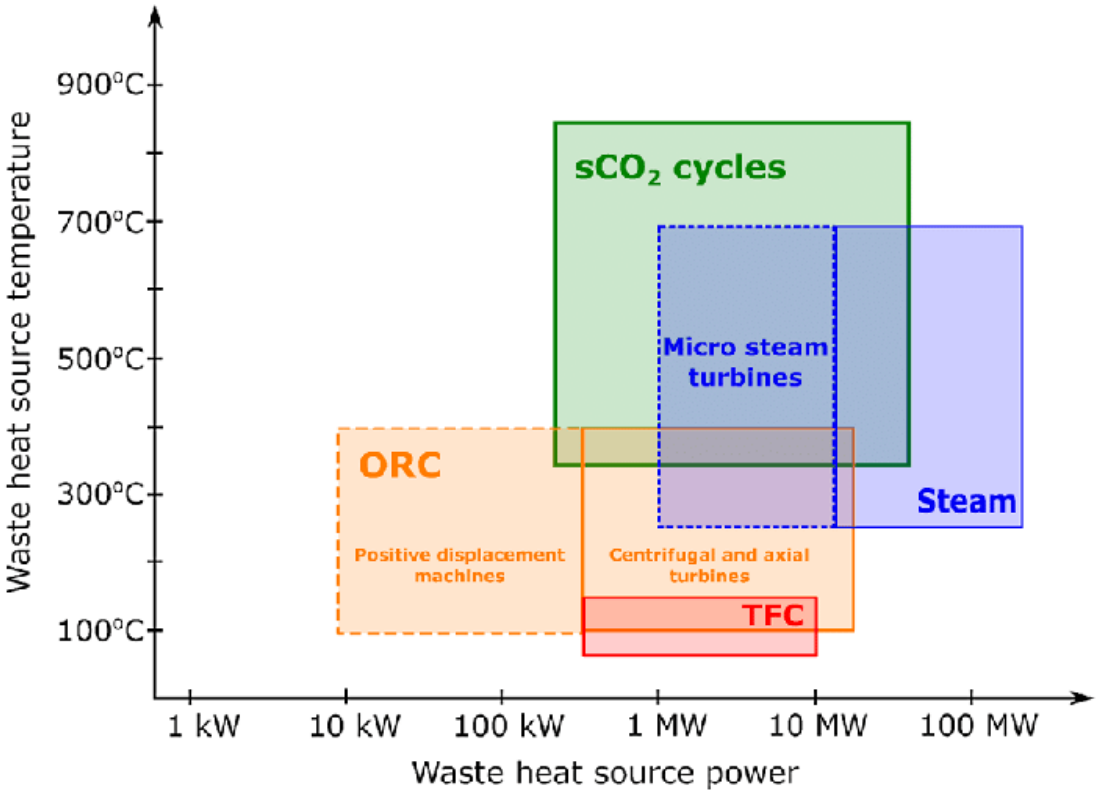
	Lämmönlähteen lämpötila [°C]	Sähköntuotannon hyötysuhde [%]	Lämmönlähteen olomuoto [a]
ORC	100–400	8–13	Kaasu, neste
TFC	70–200	3–8	Kaasu, neste
Kalina	100-	12–17	Kaasu, neste
TEG	27–815	5–15	Kaasu, neste

[a](Broberg Viklund & Johansson, 2014)

3.2.1 Rankine-prosessi

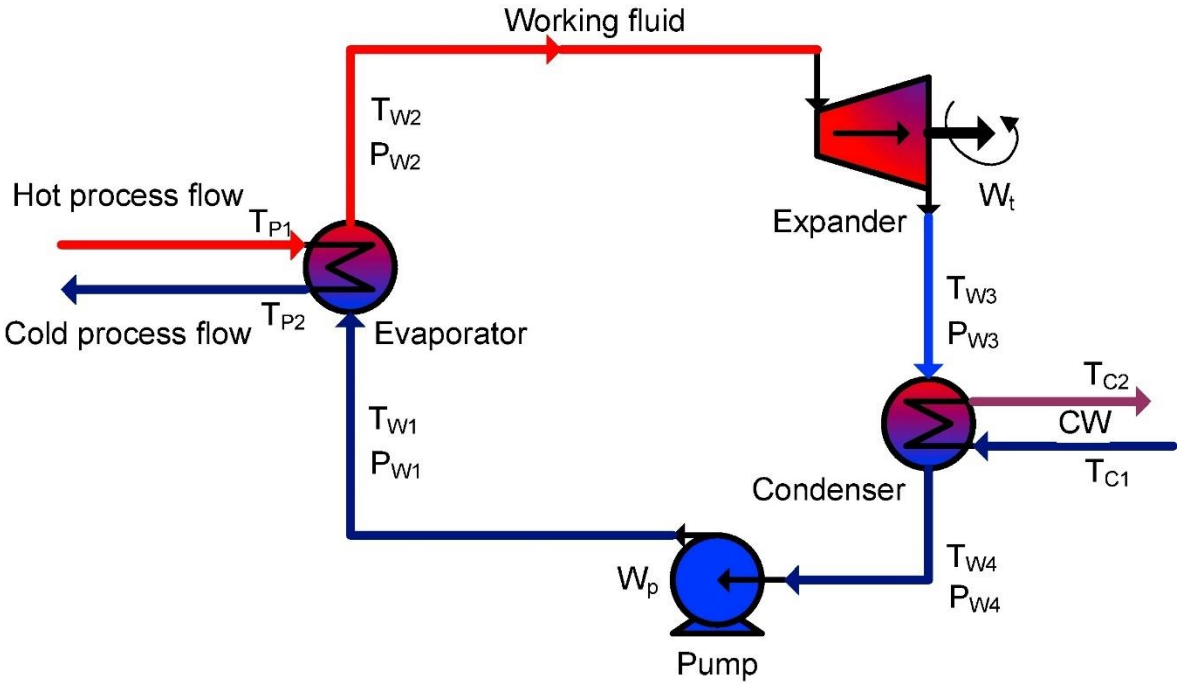
Rankine-prosessi on yleisesti käytössä sähköntuotannossa ja sitä hyödynnetään esimerkiksi ydinvoimaloissa, kivihiilivoimaloissa ja muissa korkean lämpötilan voimalaitoksissa. Näissä voimaloissa vesi on paras kiertoaine, mutta matalamman lämpötilan sähköntuotannossa vesi ja etenkin vesihöyryn termodynaamiset ominaisuudet tuottavat ongelmia, kuten kalliit ja isot turbiinit, monivaiheinen prosessi ja lauhteen syntyminen turbiinissa. Näistä syistä orgaaniset kiertoaineet sopivat paremmin matalamman lämpötilan sähköntuotantoon. (Macchi & Astolfi, 2017, s. 14.)

Kuvassa 13 on jaoteltu eri sähköä lämmöstä tuottavien prosessien toiminta-alueet hukkalämmön lämpötilan ja tehon perusteella. Kuvasta nähdään, että matalamman lämpötilan ja pienemmän koon laitoksille orgaaniset kiertoaineet ovat sopivampia kuin vesihöyry, jonka avulla tehdään sähköä ajamalla höyry mikroturbiinin läpi. Mikroturbiini on hyötysuhteeltaan huonompi kuin perinteinen voimalaitosturbiini (Marchionni et al., 2020)



Kuva 13. Eri sähköä lämmöstä tuottavien prosessien toiminta-alueet hukkalämmön lämpötilan ja tehon perusteella jaoteltuna (Marchionni et al., 2020)

Kuvassa 14 on esitelty yksinkertaistettu kuvat (orgaanisesta) Rankinen-prosessista. Höyrystimessä kiertoaine höyrystyy ja kun kiertoaine paisuu turbiinissa, joka on kytketty generaattoriin, syntyy sähköä. Turbiinin jälkeen kiertoaine lauhtuu lauhduttimessa nesteeksi, jonka pumppu palauttaa takaisin höyrystimelle ja kierto alkaa uudestaan. Orgaaninen Rankine-prosessi eroaa tavanomaisesta ainoastaan siinä, että kiertoaineena ei ole vesi. (Varga & Palotai, 2017, s.1287.)



Kuva 14. Yksinkertaistettu kuva Rankine-prosessista (Varga & Palotai, 2017, s. 1288)

3.2.1.1 Orgaaninen Rankine -prosessi

Orgaanisen Rankine -prosessin etuna on se, että sen avulla voidaan tuottaa sähköä myös matalamman lämmön hukkalämmöstä, sillä jo 100 asteen lämpöistä hukkalämpöä voidaan hyödyntää sähköntuotantoon ORC-laitteistolla (Motiva, 2019). Sekä Motivan (2019, s. 66) esiselvityksessä että orgaanisen rankinen kierron haasteita ja tulevaisuuden näkymiä tutkivassa artikkelissa nostetaan esille se, että ORC-laitteiston lämmönlähteen pysyvyys tulee olla hyvä ja huipunkäyttöaika suuri, jotta investointi on kannattava, sillä sähköntuotannon hyötysuhde on ORC-laitteistolla suhteellisen huono n. 8–13 % (Loni et al., 2021, s. 25).

Lisäksi sähkön ja hyödynnettävän hukkalämmön hinnalla on suuri vaikutus laitteiston kannattavuuteen. Artikkelissa nostetaan myös esiin, että laitteistoa tulisi kehittää edullisemmaksi, jotta investointikustannuksia saadaan pienemmäksi. Myös turbiinien isentrooppista hyötysuhdetta tulisi pyrkiä nostamaan. Huonon hyötysuhteen parantamiseksi artikkelissa nostetaan esiin, että yhteistuotannolla voidaan parantaa laitteiston kokonaishyötysuhdetta. Yhteistuotanto voidaan toteuttaa tuottamalla samalla sähkön lisäksi esimerkiksi lämpöä, jäähdytystä, puhdasta vettä tai vetyä. (Loni et al., 2021, s. 25.)

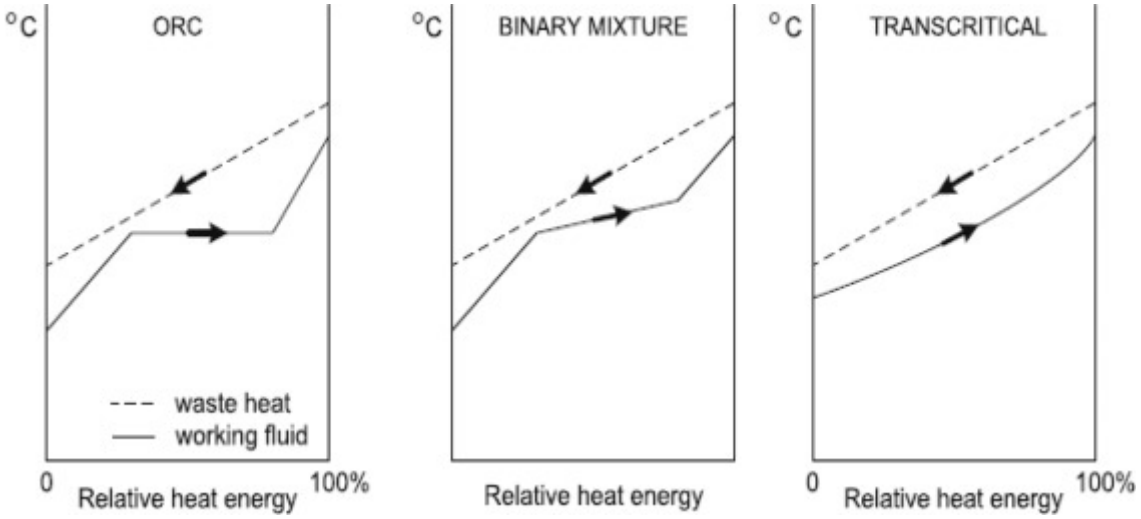
ORC-laitteisto vaatii toimiakseen myös lämpönielun, joka on matalammassa lämpötilassa kuin lämmönlähteen lämpötila (Motiva, 2019, s. 46). Lämmönlähteen ja -nielun välisellä lämpötilaerolla on myös voimakas vaikutus yhdessä lämmönlähteen lämpötilatason kanssa laitteiston hyötysuhteeseen (Motiva, 2019, s. 38). Usein lämpönielun lämpötilatason tulee olla niin matala, ettei sitä voida enää hyödyntää lämmönlähteenä muissa prosesseissa. Kannattavuuden kannalta on tärkeää, että lämmönlähde sijaitsee mahdollisimman lähellä ORC-laitteistoa, jottei kovin iso osa tuotetusta sähköstä kuluisi hukkalämmön väliaineen pumppaukseen. Etenkin matalissa alle 100 asteen lämpötiloissa pumppauskustannukset heikentävät kannattavuutta. Alle 100 m siirtoetäisyyksiä voidaan pitää vielä kohtuullisina. (Motiva, 2019, s. 66.)

Matalien hukkalämpölähteiden hyödyntämisen kannattavuutta ja lämmönlähteen ja orgaanisen kiertoaineen lämpötilaprofiilien yhteensopimattomuuden teknillisiä haasteita on pyritty ratkaisemaan lisäämällä lämmöntalteenottojärjestelmään lämpöpumppu, joka nostaa hukkalämmön lämpötilatasoa ennen ORC-laitteistoa. Alustavissa tutkimuksissa lämpöpumpun lisäämisellä on todettu olevan positiivisia vaikutuksia sekä laitteiston hyötysuhteen että kannattavuuden kannalta, silloin kun prosessin olosuhteet ovat siihen sopivat ja laitteistot oikein mitoitetut. (Liu et al., 2021, s. 1; Yu, Gundersen, Feng, 2018, s. 330.) Loni kumppaneineen muistuttaa myös, että niissä tapauksissa, joissa hyödynnetään savukaasujen hukkalämpöä, poistuvan lämpövirran lämpötilatasossa tulee ottaa huomioon myös savukaasujen kastepiste, jotta vältytään korroosio-ongelmilta (Loni et al., 2021, s. 25).

Kuten aiemmin todettiin lämpöpumppujen kohdalla, myös ORC-laitteistojen kiertoaineissa tulee suosia luonnollisia kiertoaineita ja kiertoaineita, joilla on matala GWP-arvo. Etenkin ylikriittisellä hiilidioksidilla on huomattu olevan hyviä ominaisuuksia kiertoaineena (Loni et al., 2021, s. 25).

3.2.1.2 Transkriittinen hiilidioksidi kierto

Transkriittisen hiilidioksidin etuna verrattuna useimpiin muihin orgaanisiin kiertoaineisiin on se, ettei sen käyttö vaadi tasaista höyrystymislämpötilaa. Transkriittisellä hiilidioksidilla saavutetaan siis parempi vastaavuus hukkalämmönlähteen lämpötilatason kanssa, kuten kuvasta 15 nähdään. Kun kiertoaine lämmitetään suoraa nestemäisestä muodosta höyryksi, saavutetaan lisäksi pienemmät exergiahäviöt. (Sarkar, 2015, s. 435.)



Kuva 15. Lämmönlähteen ja kiertoaineen lämpötilatasojen vastaavuudet orgaanisella kiertoaineella, binäärisellä seoksella ja transkriittisellä kiertoaineella (Sarkar, 2015, s. 436)

Transkriittisen hiilidioksidikierron pääkomponentit ovat samat kuin Rankine-prosessissa, mitkä esitettiin kuvassa 14. Hiilidioksidin etuja Rankine-prosessin kiertoaineena ovat muun muassa sen matala kriittinen piste, vakaus, vähäiset ympäristövaikutukset ja matala hinta. Hiilidioksidi ei myöskään ole myrkyllinen, räjähtävä, syttyvä tai korrosoiva. Trankriittistä CO2-kiertoa voidaan käyttää myös sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. (Sarkar, 2015, s. 438, 445–446.).

3.2.1.3 Trilateral Flash -kierto

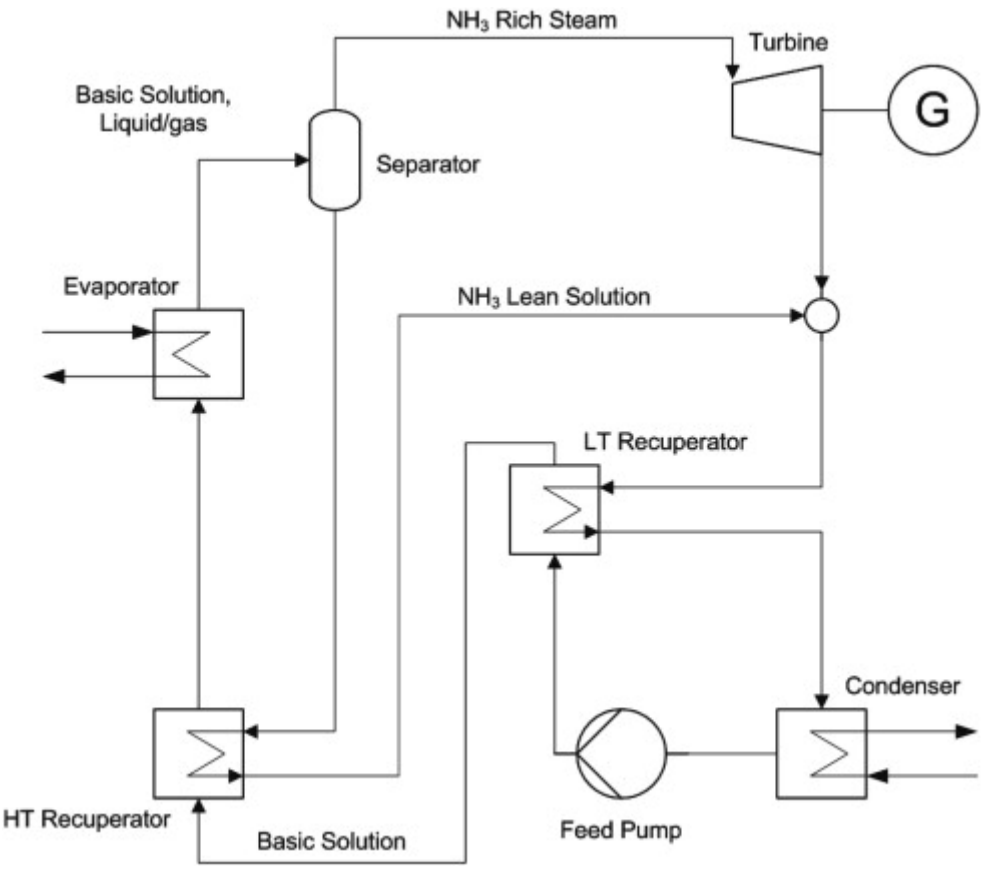
Trilateral Flash -kierto tai TFC (Trilateral Flash Cycle) on muunnos orgaanisesta Rankine -prosessista. Käytännössä siinä on samat komponentin kuin Rankine -prosessissa, mutta orgaaninen aine pysyy kuitenkin koko ajan nestemäisessä muodossa ja ennen turbiinille saapumista neste ohjataan suuttimen läpi (Iqbal et al., 2017, s. 494). Alle 100 asteen hukkalämmön hyödyntämisessä TFC:llä voidaan saavuttaa jopa 50 % suurempi energiantuottopotentiaali verrattuna tavanomaiseen ORC-teknologiaan. TFC:llä pystytään hyödyntämään 70 % lämmönlähteen lämpöenergiasta missä ORC:lla voidaan hyödyntää 20 % (Iqbal et al., 2019, s. 213–214).

Kuten kuvasta 13 nähdään niin TFC-kierto voi olla potentiaalinen vaihtoehto matalan lämpötilan hukkalämmön hyödyntämiselle sähköntuotannossa. Teknologia ongelmana on kuitenkin ollut löytää sopivaa turbiinia eikä muutamaa demolaitosta lukuun ottamatta ole raportoitu käytössä olevista laitoksista (Oyedepo & Fakeye, 2021, s. 333).

3.2.1.4 Kalina-prosessi

Kalina-prosessi on samantapainen prosessi kuin ORC, mutta siinä on kiertoaineena ammoniakin ja veden sekoitus. Kalina-prosessissa höyrystyminen ei ole isoterminen prosessi, joten prosessin lämpötilamuutos vastaa paremmin hukkalämmön lämpötilanmuutosta ja samalla lämpötilaerojen keskiarvo väliaineiden välillä pienenee. Kalina-prosessilla on kuitenkin monimutkaisempi rakenne ja sen toiminta vaatii enemmän komponentteja kuten erottimia ja lämmönsiirtimiä, jotka nostavat kustannuksia. (Iqbal et al., 2020, s. 20.)

Kuvassa 15 on esitetty myös binäärisen seoksen lämpötilatason vastaavuus lämmönlähteen lämpötilatason kanssa lämmönsiirtymisen aikana. Kuvasta nähdään, että Kalina-prosessissa lämpötilaero on pienempi kuin ORCilla, mutta kuitenkin suurempi kuin transkriittisillä liuoksilla. Kalina-prosessilla päästään laskennallisesti matalan lämpötilan hukkalämpöä hyödyntäessä 12–17 % hyötysuhteisiin (Ogriseck, 2009, s. 2844). Kuvassa 16 näkyy Kalina prosessin pääkomponentit, jotka ovat samat kuin aiemmin esitetyn ORC-laitoksen pääkomponentit lukuun ottamatta rekuperaattoria ja erotinta.

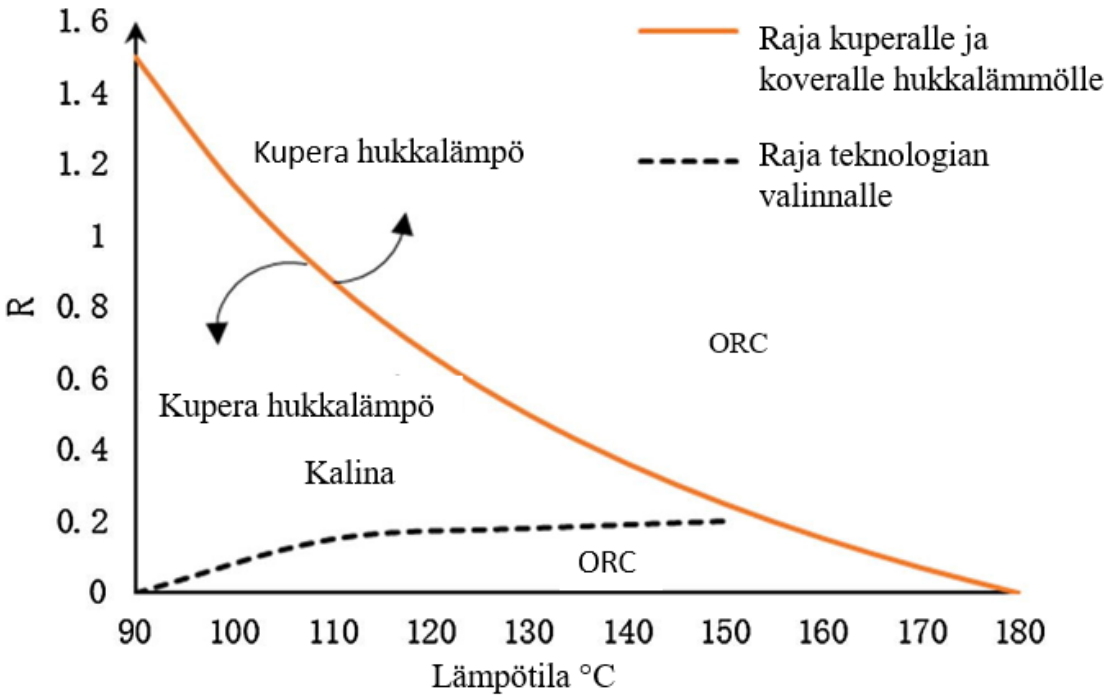


Kuva 16. Rekuperaattorilla ja erottimella varustettu Kalina-prosessi (Ogriseck, 2009, s. 2844)

3.2.1.5 Rankine-prosessien vertailu

Kalina prosessi on yhdessä ORC:in kanssa yleisimmät teknologiat, joita käytetään sähkön tuottamiseksi hukkalämmöstä. Kalina ja ORC prosessia on verrattu keskenään useissa tutkimuksissa ja esimerkiksi Wang (2017, s. 483) kumppaneineen selvitti tutkimuksessaan, että useampia eri hukkalämmön lähteitä käytettäessä parhaiten soveltuva teknologia oli riippuvainen hukkalämmön lämpötilakäyrästä niin että käyrän ollessa suora tai kovera Kalina prosessi sopii parhaiten ja lämpötilakäyrän ollessa kupera, ORC-prosessi sopi paremmin lämmöntalteenottoon, kuten kuvasta 17 nähdään. Kyseisessä tutkimuksessa hukkalämmön lähteiden lämpötila oli alle 180 °C. Kuvassa y-akselilla esiintyvä suhdeluku R kertoo kuinka kupera tai kovera hukkalämmönlähteiden lämpötilakäyrä on. Suhdeluku R saadaan, kun

lämpötilakäyrä jaetaan kuperimmasta tai koverimmasta kohdasta ja tämän kohdan yläpuolella oleva lämpö jaetaan kohdan alapuolelle jäävällä lämmöllä. (Wang et al., 2017, s. 285.)

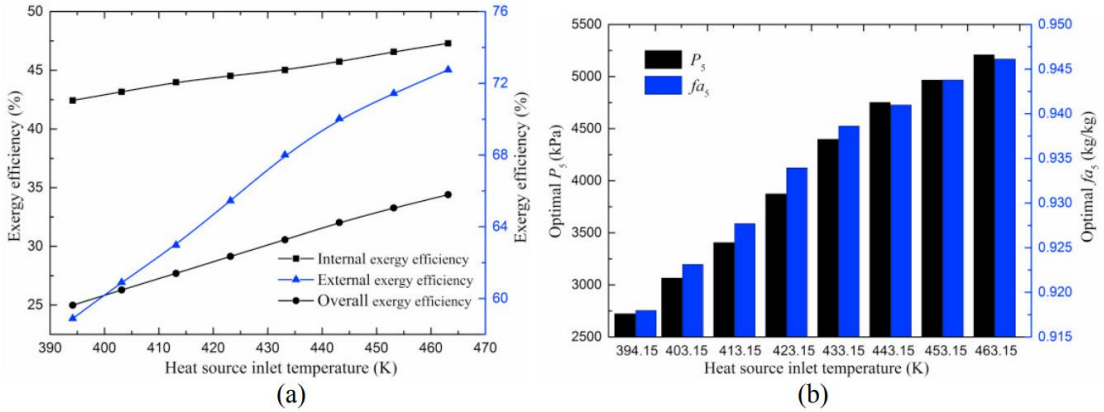


Kuva 17. Hukkalämmön lämpötilakäyrän muodon vaikutus ORC ja Kalina sähköntuotantoteknologioiden valintaan (Wang et al., 2017, s. 491, muokattu)

Nematin (2017, s. 1) verratessa ORCia ja Kalinaa toisiinsa asetelmassa, jossa ORC/Kalina toimii osana yhteistuotantolaitosta, joka tuottaa 30 MW sähköä ja 14 kg/s höyryä, ORC osoittautui paremmaksi teknologiaksi. Yhteistuotantolaitos koostuu kaasuturbiinista sekä höyrynkehittimestä sekä ORC- tai Kalina prosessista. (Nemati et al., 2017, s. 1.) Fiaschin (2017) verratessa ORCia Kalinaan geotermisten laitosten lämmön hyödyntämisessä osoittautui ORC paremmaksi 200 °C lämpötilassa ja 6 MW teholla, kun taas Kalina sopi paremmin 100 °C lämpötilaan ja 500 kW tehoon (Fiaschi et al., 2017, s. 514).

Jouhara (2018, s. 276) on myös artikkelissaan eritellyt eri tutkimuksien tuloksia, missä on verrattu ORCia ja Kalinaa keskenään ja tuloksissa Kalina-prosessi on osoittautunut paremmaksi matemaattisissa mallinnuksissa (Jouhara et al., 2018, s. 276.) Zhang (2012, s. 5311-5313) on taulukoinut tutkimukseensa tarkemmin eri Kalina-prosessien hyötysuhteita verrattuna ORC-prosessiin ja eritellyt Jonnsonin (2003) väitöskirjatutkimuksen tuloksia Kalina-prosessin hyötysuhteista (Zhang, X. et al., 2012, s. 5311-5313). Kaiken kaikkiaan tutkimustulokset

osoittavat, että sopivin teknologia on hyvin tapauskohtaista. Long (2019, s. 1358–1359) esittelee tutkimuksessaan Kalina-prosessille parhaiten optimoidut olosuhteet, kun halutaan hyödyntää matalan lämpötilan hukkalämpöä. Kuvasta 18 nähdään, että hyötysuhde nousee lämpötilan noustessa ja samoin prosessin optimaalinen painetaso nousee lämpötilan noustessa (Long et al., 2019, s. 1358–1359).



Kuva 18. Kokonaishyötysuhde (exergia) sekä sisäinen ja ulkoinen hyötysuhde eri lämpötiloissa sekä optimaaliset höyrystymispaineet sekä ammoniakkikoostumukset lämmönlähteen eri lämpötiloissa (Long et al., 2019, s. 1359)

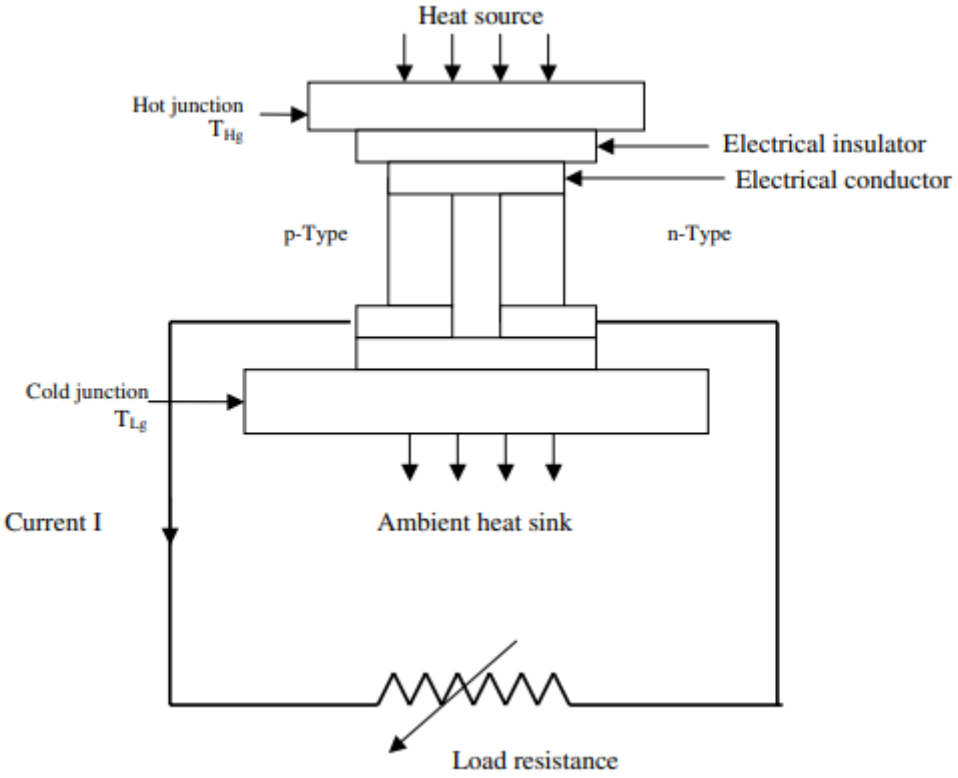
Tutkimuksessa, jossa verrattiin keskenään exergian ja kannattavuuden osalta ORC:ia, Kalinaa ja Trilateral Flash-kiertoa hukkalämmön hyödyntämiseen sementtiteollisuudessa ORC osoittautui parhaaksi teknologiaksi tehon ja kustannusten osalta. Tutkimuksessa nostettiin kuitenkin esiin, että Kalina-prosessissa on paras kokonaishyötysuhde ja pienemmän laitoskokonsa ansiosta se saattaa olla parempi vaihtoehto silloin, jos halutaan parantaa olemassa olevan sementtitehtaan energiatehokkuutta hyödyntämällä hukkalämpöä sähköntuotantoon. Korkean painetason ja monimutkaisen rakenteen johdosta Kalinan investointikustannukset nousevat kuitenkin suureksi verrattuna ORC:iin eikä Kalinan parempi nettoteho riittänyt kattamaan kustannuksia. (Fierro et al., 2022, s. 17.)

Transkriittinen CO2-kierto sopii paremmin korkeamman lämpötilan hukkalämmön hyödyntämiseen (yli 400 °C) kuten teollisuuden lämmöntalteenotot tai kaasuturbiinien savukaasut. Kun pois luetaan syttyvät kiertoaineet orgaanisista kiertoprosesseista, transkriittinen CO2-kierto on parempi vaihtoehto jopa jo 350 ja sitä kuumempien hukkalämmönlähteiden hyödyntämiseen. (Astolfi et al., 2017, s. 977–978.) Marchionni ja kumppanit olivat omassa

tutkimuksessaan päätyneet myös alarajaan 350 °C transkriittisen hiilidioksidikierron osalta, kuten kuvasta 13 voi nähdä (Marchionni et al., 2020, s. 1). Oikealla mitoituksella ja hyödynnettäessä korkean lämpötilan hukkalämpöä transkriittisen CO2-kierron lauhdelämpö voi olla riittävä lämmittämään tai jopa pyörittämään TFC-prosessia (Agathokleous et al., 2019, s. 492).

3.2.2 Lämpösähköinen generaattori

Lämpösähköinen generaattori, (thermoelectric generator=TEG) on Seebeck-efektiä hyödyntävää teknologiaa, jossa puolijohteiset materiaalit tuottavat sähköä hyödyntämällä lämmönlähteen ja lämpönielun välistä lämpötilaeroa (Enescu, 2019, s. 2). TEG laite koostuu yksinkertaisimmillaan termoparista, P- ja N-tyypin termoelementistä niin kutsutuista jaloista, jotka ovat sähköisesti kytkettynä sarjaan ja termisesti rinnan (Enescu, 2019, s. 6). Lämpösähköisen generaattorin yksinkertaistettu toiminta on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. TEG:in toimintaperiaate (Khattab & El Shenawy, 2006, s. 411)

Lämmönlähteen ja lämpönielun aiheuttaman lämpötilaeron seurauksena virtapiirissä saadaan kiertämään sähkövirta kulutusjohteen läpi. Sähkötehon suuruus riippuu lämpötilaerosta sekä puolijohteisten materiaalien ominaisuuksista sekä kulutusjohteesta. (Khattab & El Shenawy, 2006, s. 411.)

TEG:in etuna pidetään sitä, ettei teknologia sisällä liikkuvia osia tai erillisiä kiertoaineita, mikä vähentää huollon tarvetta sekä kustannuksia. Teknologian etuja on myös pitkäikäisyys, skaalautuvuus, äänettömyys ja lisäksi ne on helppo asentaa oleviin järjestelmiin, sillä ne eivät vaadi tiettyä asennussuuntaa. (Champier, 2017, s. 168.)

Enescu on kirjassaan selvittänyt, että TEG:in sähköntuotannon hyötysuhde on rajoittunut välille 5–15 % ja uusimmilla materiaaleilla on raportoitu saavutettavan jo yli 10 % hyötysuhteita (Enescu, 2019). Oyedebon ja Fakeyen tutkimuksessa viitattiin Bendigin (2015) tutkimukseen, jonka mukaan alle 400 asteen lämpötilassa hyötysuhde olisi alle 10 % ja 400–1000 asteen lämpötilassa alle 20 % (Oyedepo & Fakeye, 2021, s. 334). TEG:llä voidaan hyödyntää sekä matalan, keskitason että korkean lämpötilan hukkalämpöä kuten jäähdytysvesien (27–88 °C), kuivaus ja leivontauunien (230–600 °C) ja metalli- ja sementtiteollisuuden uunien sekä vetylaitosten (650–815 °C) hukkalämpöä (Zeb et al., 2017, s. 1146).

3.3 Lämmön varastoinnissa käytettävät teknologiat

Hukkalämmön varastointi saattaa olla ratkaisu silloin kun lämmönlähteen ja lämmöntarpeen välillä on joko ajallinen tai sijainnillinen este. Varastoimalla lämpöä myöhempää käyttöä varten voidaan tasoittaa lämmöntarpeen ja hukkalämmön syntymisen eriaikaisuutta. Silloin kun lämmönlähde ja lämpönielu ovat lähellä toisiaan, voidaan hyödyntää kohteeseen asennettavia lämpövarastoja ja siirrettäviä lämpövarastoja silloin kun välimatka on suurempi. (Miró et al., 2016, s. 284.)

Lisäämällä lämpövaraston energiajärjestelmään voidaan saavuttaa seuraavia etuja (Cabeza, 2015, s. 2):

- Järjestelmän parempi taloudellinen tuottavuus pääoma- ja operointikustannusten pienentyessä
- Parempi hyötysuhde kun energiaa pystytään hyödyntämään tehokkaammin
- Vähemmän saasteita ja CO2-päästöjä
- Järjestelmän parempi luotettavuus ja suorituskyky

Kylmän ja lämpimän lämpöenergian varastointiteknologiat voidaan jakaa seuraaviin kolmeen tyyppiin (Thermal energy storage: technology brief, 2013, s.5):

1. Tuntuvanlämmön varastot, jossa energia varastoituu väliaineeseen
2. Latenttilämpövarastot, jossa energian varastoinnissa hyödynnetään faasimuutosmateriaaleja
3. Termokemialliset varastot, joissa energia varastoituu kemiallisten reaktioiden avulla

Kyseisillä teknologioilla voidaan varastoida lämpöenergiaa aina -40 asteesta yli 400 asteeseen (Thermal energy storage: technology brief, 2013, s.5).

EASE (The European Association for Storage of Energy) on yhdessä EERAn (The European Energy Research Alliance) kanssa koonnut tiekartan Euroopan energian varastointi teknologian kehitykselle vuoteen 2030 ja arvioinut samalla jokaisen teknologian teknologista kypsyyttä sekä selvittänyt onko kyseisiä teknologioita jo kaupallistettu. Tiekartassa korostettiin, että oikean varastointiteknologian valinta on hyvin tapauskohtaista, mutta esimerkiksi kaukolämmityksen ja jäähdytyksen tehokkuuden parantamisessa tuntuvanlämmön varastot ovat tyypillisimpiä ja suosituimpia vaihtoehtoja. Teollisuuden hukkalämmön hyödyntämisessä taas jokaista kolmea teknologiatyyppiä voidaan tarvittaessa hyödyntää. (Becker et al., 2017, s. 93.)

Alla käydään tarkemmin läpi eri lämmönvarastointiteknologioiden toimintaperiaatteita sekä esimerkkejä niiden mahdollisista käyttökohteista. EESAN ja ERAN (2017) tiekartan mukaan termokemialliset lämpövarastot ovat teknologian osalta vielä kehitysvaiheessa eikä kaupallisia sovelluksia ole vielä saatavissa absorptiolämpöpumppuja lukuun ottamatta, joten termokemiallisista lämpövarastoista ei käydä tässä työssä läpi erillisiä esimerkkejä. (Becker et al., 2017, s. 105.)

3.3.1 Tuntuvaa lämpöä hyödyntävät varastot

Tuntuvaa lämpöä hyödyntävät varastot ovat käytetyin lämmönvarastointiteknologia. Teknologian perustuu lämpöenergian varastointiin korkean lämpökapasiteetin omaavaan väliaineeseen nostattamalla tai laskemalla väliaineen lämpötilaa. Väliaine voi olla kiinteää tai nestemäistä ja sen varastoima lämpöenergia voidaan siirtää joko suoraan tai epäsuorasti prosessiin. (Becker et al., 2017, s. 94.)

Alle 120 asteen lämpötiloissa käytetään usein vettä väliaineena, sillä se on ympäristöystävällinen ja halpa eikä se ole myrkyllistä. Maanalaisia lämpövarastoja hyödynnetään usein silloin kun varaston kapasiteetti on suuri (UTES=Underground Thermal Energy Storage) ja energiaa halutaan varastoida matalammassa lämpötilassa. Korkean lämpötilan sovelluksissa hyödynnetään yleensä sulasuolavarastoja, jotka ovat jo laajasti käytössä keskitetyissä aurinkovoimaloissa (CSP-plants). (Becker et al., 2017, s. 94.)

3.3.2 Latenttilämpövarastot

Latenttilämpövarastoissa lämpöenergian varastointi perustuu materiaalissa tapahtuvaan faasimuutokseen, jonka aikana energiaa joko sitoutuu tai sitä vapautuu lämpötilan pysyessä muuttumattomana. Yleensä energiaa sitoutuu aineen muuttuessa nestemäiseksi ja jälleen vapautuu aineen palautuessa kiinteään muotoon. Latenttilämpövarastoissa hyödynnettäviä materiaaleja kutsutaan faasimuutosmateriaaleiksi (PCM=Phase Change Materials). (Becker et al., 2017, s. 92; Cabeza, 2015, s. 4–5.)

Tunnetuin ja käytetyin faasimuutosmateriaali on vesi (Cabeza, 2015, s. 7). Veden ja vesipitoisten suolaliuosten käyttö faasimuutosmateriaaleina on jo kaupallistettu ja useita muita materiaaleja ja niiden käyttöä latenttilämpövarastoissa tutkitaan parhaillaan (Becker et al., 2017, s. 99). Kaupallistamisen esteenä on ollut, että materiaalien käytön esteeksi on muodostunut esimerkiksi faasimuutos, alijäätyminen, korroosio, stabiliteetti pitkällä ajalla ja matala lämmönjohtavuus, joihin liittyviä ongelmia ei ole pystytty vielä ratkaisemaan (Cabeza, 2015, s. 7).

3.3.3 Termokemialliset lämpövarastot

Termokemialliset lämpövarastot perustuvat kemiallisiin reaktioihin ja teknologiat jaetaan sen mukaan, tapahtuuko lämmönvarastointi kemiallisen reaktion vai sorption avulla. Kemiallisissa reaktioissa energiaa varastoidaan palautuvan kemiallisen reaktion lämpönä. Sorptiossa lämpöenergia sitoutuu joko adsorption tai absorption avulla. Adsorptiossa reagoivat aineet erotetaan varaston latauksen aikana ja lämpöä voidaan purkaa varastosta reagoivien aineiden yhdistyessä. Sorptiota voidaan hyödyntää sekä lämpövarastoissa sekä lämpöpumpuissa, joita on jo markkinoilla. (Becker et al., 2017, s. 92, 103.) Termikemiallisia lämpövarastoja ei ole vielä markkinoilla johtuen lähinnä materiaalien hinnoista (Becker et al., 2017, s. 105).

3.3.4 Lämmönvarastointi teknologioiden vertailu

IRENAN (2013) julkaisussa on määritetty seuraavat ominaisuudet lämpövarastoille (Thermal energy storage: technology brief, 2013, s. 5):

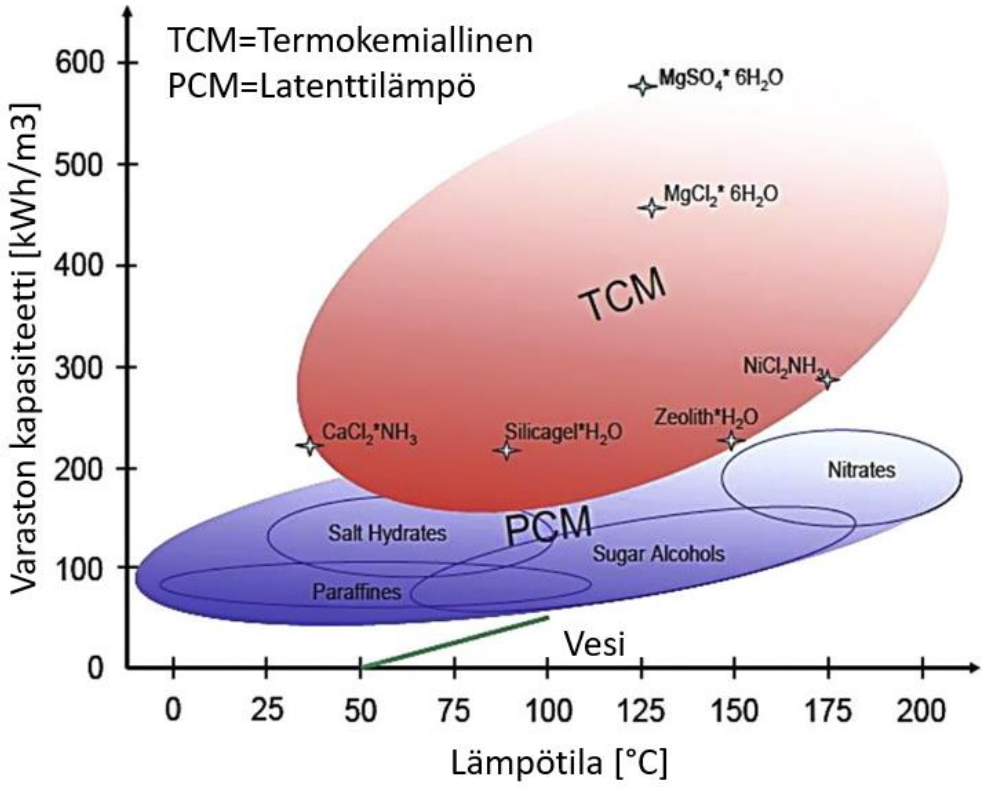
- Kapasiteetti, joka kertoo, kuinka paljon energiaa lämpövarasto pystyy varastoimaan väliaineen painoyksikköä/tilavuusyksikköä kohden
- Teho, joka kertoo, kuinka nopeaa lämpöenergia saadaan purettua varastosta tai varastoitua siihen
- Varastointi aika, joka kertoo, kuinka pitkäksi aikaa energiaa pystytään varastoimaan alkaen tunneista, päiviin, viikkoihin ja kuukausiin.
- Purku- ja latausajat, jotka määrittävät kuinka paljon aikaa tarvitaan varaston purkamiseen
- Hinta, joka voidaan määrittää joko kapasiteetin (€/kwh) tai tehon (€/kW) mukaan.

Taulukkoon 7 on eritelty eli lämmönvarastotyyppien ominaisuuksia. Taulukosta nähdään, että suurin varaston teho saavutetaan tuntuvanlämmön varastoilla, jotka ovat kuitenkin hyötysuhteeltaan huonompia kuin latentti- ja termokemialliset lämpövarastot. Toisaalta taulukossa suurin varastointiaika (kk) on tuntuvan lämmön varastoilla, joita voidaan käyttää kausivarastoina. Tämä on hyvä huomioida arvioitaessa tuntuvan lämmön varaston hyötysuhdetta olettaen, että lyhyemmän ajan varastoinnissa lämpöhäviöiden määrä ei ehdi kasvaa yhtä suureksi kuin kausivarastoinnissa.

Taulukko 7. Eri lämpövarastotyyppien ominaisuuksia (Thermal energy storage: technology brief, 2013, s. 20)

Tyyppi	Kapasiteetti [kWh/tn]	Teho [kW]	Hyötysuhde [%]	Varastointiaika [t, vrk, vk, kk]
Tuntuvalämpö	10–50	1–10 000	50–90	vrk-kk
Latenttilämpö (PCM)	50–150	1–1 000	75–90	t-vk
Termokemiallinen	120–250	10–1 000	75–100	t-vrk

Kuvaan 20 on eritelty eri varastointiteknologiaa hyödyntävien tyyppien varaston kapasiteetti suhteessa lämpötilaan. Cabeza (2015, s. 9) kertoo julkaisussaan, että vesi edustaa kuvassa tuntuvanlämmön varastointiteknologioita. Kuvasta nähdään, että vesi pystyy sitomaan itseensä vähemmän energiaa suhteessa tilavuuteen kuin termokemialliset tai latenttilämpövarastot. Cabezan (2015, s.10) julkaisun mukaan, jos vettä käytetään tuntuvan lämpöenergian varastoinnissa, veden lämpötilan on pysyttävä välillä 0–100 °C, kuten se on alla olevassa kuvassa esitetty. Kuvaan rajatut termokemiallisten ja latenttilämpövarastojen alueet eivät ole tarkkoja rajoja käytettävälle teknologialle vaan kyseisiä teknologioita pystytään hyödyntämään myös korkeammissa lämpötiloissa (Cabeza, 2015, s. 9). Cabeza (2015, s. 10) viittaa lisäksi aiempaan tutkimukseensa (2012), jonka mukaan veden etuna tuntuvanlämmönvarastona verrattuna latenttilämpövarastoihin on sen edullisuus, lämmönsiirtimen yksinkertainen rakenne sekä pitkäikäisyys.



Kuva 20. Termokemiallisen, latentti ja tuntuvaa lämpöä (vesi) hyödyntävien lämpövarastojen kapasiteetteja eri lämpötiloissa (Gude, 2015, s. 888, muokattu)

Lisäksi taulukkoon 8 on eritelty eri lämpövarastotyyppien kapasiteetteja niissä tyypillisesti käytettävien väliaineiden mukaan eriteltynä (Cabeza, 2015, s. 6) alkuperäinen lähde (Cabeza, 2012). Kuten taulukosta nähdään vesi voi olla väliaineena myös latenttilämpövarastossa ja vesi onkin yksi tunnetuimmista ja käytetyimmistä, sillä jäätä on jo kauan hyödynnetty kylmävarastona (Cabeza, 2015).

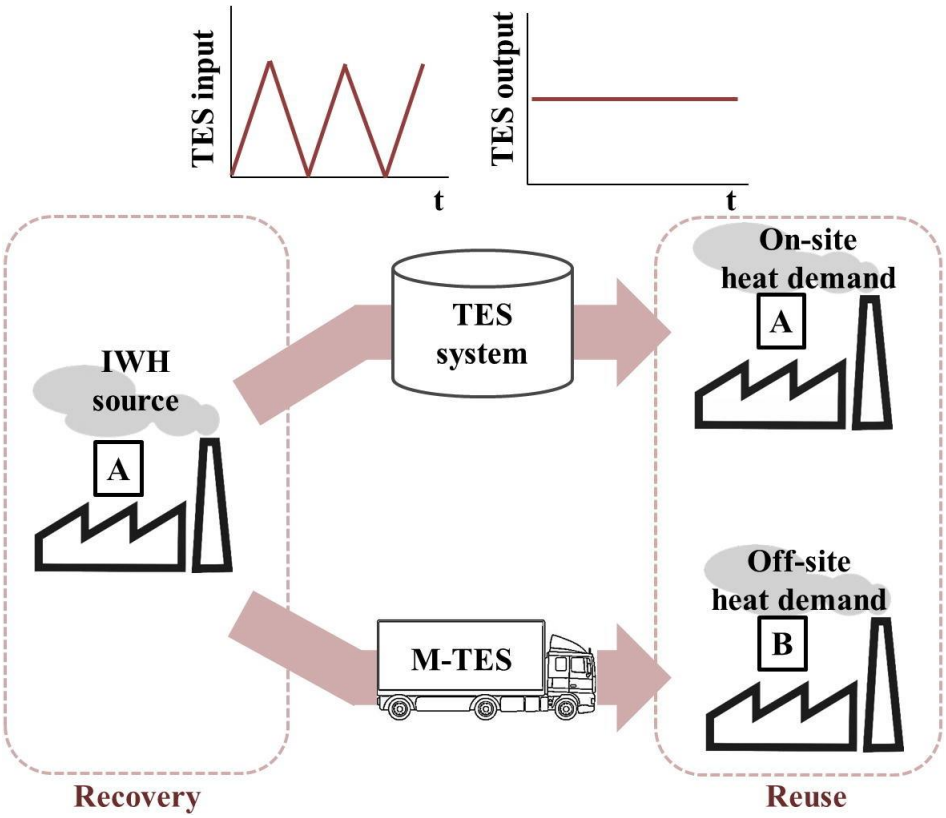
Taulukko 8. Eri lämmönvarastointiteknologiatyyppien energian varastointitiheyksiä varastoinnissa käytettävien väliaineiden mukaan eriteltynä (Cabeza, 2015, s. 6) Alkuperäinen lähde (Cabeza, 2012).

Varastointi-teknologian tyyppi	Materiaali	Varastoitua energiaa [MJ/m3]	Varastoitua energiaa [kJ/m3]	Kommentit
Tuntuvalämpö	Graniitti	50	17	ΔT = 20 °C
	Vesi	84	84	ΔT = 20 °C
Latenttilämpö	Vesi	306	330	$T_{sulamis}$= 0 °C
	Parafiini	180	200	$T_{sulamis}$= 5–130 °C
	Suolahydraatti	300	200	$T_{sulamis}$= 5–130 °C
	Suola	600–1500	300–700	$T_{sulamis}$= 300–800 °C
Termo-kemiallinen	H_2 kaasu (hapettuminen)	22	120000	300 K, 1 bar
	H_2 kaasu (hapettuminen)	2160	120000	300 K, 200 bar
	H_2 neste (hapettuminen)	8400	120000	20 K, 1 bar
	Fossiilinen kaasu	32	-	300 K, 1 bar
	Bensiini	33000	43200	

Lämpövarastoilla voidaan nostaa lämmöntalteenoton hyötysuhdetta. Esimerkiksi kaukokylmää ja -lämpöä tuottavan biopolttoainetta polttavan CHP-laitoksen yhteyteen maahan sijoitettava lämpövarasto, jossa vesi toimii lämmönvarastoinnin väliaineena, on tutkittu nostavan laitoksen kannattavuutta ja myös hyötysuhde voi nousta 50 %:sta 65 %:iin. Kannattavuuden

osalta tulee kuitenkin huomioida kaukolämmön ja -kylmän kysynnän pysyvyys sekä biopolttoaineiden hinnan vaihteluiden vaikutukset. (Dominković et al., 2015, s. 98.)

Miró (2016) tarkasteli ryhmänsä kanssa noin 50 tapaustutkimusta, joissa oli selvitetty teollisuuskohteiden hukkalämmön (IWH) talteenottojärjestelmiä, sekä kohteeseen asennettavia (TES) että liikkuvia (M-TES) lämpövarastoja, joiden toimintaa on tarkemmin havainnollistettu kuvalla 21. Kun lämmönkäyttökohde on teollisuuskohteen ulkopuolella, voidaan myös käyttää kaukolämpö- ja -kylmäverkkoja energian siirtämiseen siirrettävien lämpövarastojen sijaan, kunhan investointikustannukset ja kohteiden välinen sijainti eivät kasva liian suureksi (Miró et al., 2016, s. 296.)



Kuva 21. Teollisuuden hukkalämmön (IWH) talteenoton toimintaperiaate kohteeseen asennettavalla (TES) lämpövarastolla ja siirrettävällä (M-TES) lämpövarastolla (Miró et al., 2016, s. 286)

4 Lämmöntalteenotossa käytettävän teknologian valinta

Kun halutaan määritellä hukkalämmöntalteenotossa käytettävä teknologia, aluksi määritellään hukkalämmön ja lämpönielun laadulliset ja määrälliset ominaisuudet sekä saatavissa olevan lämpöteho ja energiamäärä, jotta voidaan määrittää hukkalämmön hyödyntämispotentiaali. Lisäksi parhaan teknologian määrittämiseen käytetään apuna kirjallisuuskatsauksessa selvitettyjä teknologioiden ominaisuuksia erilaisten hukkalämpöjen hyödyntämisessä.

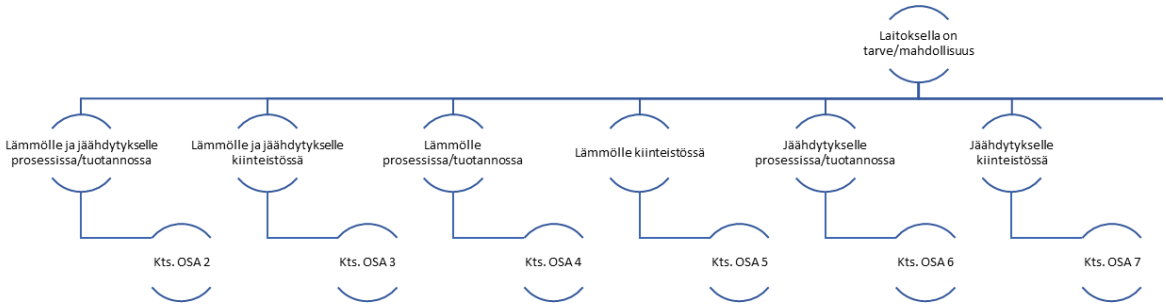
Työkalu kehitetään Excel-pohjaiseksi niin että teknologian määrittämisessä huomioidaan teollisuuskohteen omat tarpeet. Työkalun toimivuutta testataan teollisuuskohteista kerätyillä tiedoilla, missä on tämän tutkimuksen ulkopuolisten selvitysten mukaan saatavilla hukkalämpöä ja kohteista on selvitetty hukkalämmön ominaisuudet sekä mahdolliset hyödyntämiskohteet.

Työkaluun sisällytetään lisäksi energianlaskenta, jotta saadaan arvio talteen otettavasta energiamäärästä sekä energiansäästöstä eri lämmöntalteenottotapausten vertailua varten. Energialaskentaa varten lämmöntalteenotto prosessit mallinnetaan yksinkertaisten teknologia ja lämpönielukohtaisten energiataseiden avulla ja laskennassa huomioidaan eri teknologioiden hyötysuhteet. Energiataseet sekä yhtälöt esitetään kappaleessa 4.2 ”Energiamäärän laskenta”.

4.1 Työkalun rakenne

Kuvasta 22 nähdään osa työkalun rakenteesta. Työkalua käytettäessä on tarkoitus aloittaa hyödyntämiskohteiden selvittäminen niin että etusijalla on lämmityksen ja jäähdytyksen yhteistuotanto, jolloin lämmöntalteenoton kokonaishyötysuhde on parempi verrattuna siihen, että hukkalämpöä hyödynnetään pelkästään lämmitykseen. Työkalun järjestyksessä painotetaan hukkalämmön hyödyntämistä tuotantolaitoksen omiin tarpeisiin ennen kuin kiinteistön lämmitykseen/jäähdytykseen tai energianmyyntiin. Työkalulla on kuitenkin mahdollista selvittää hyödyntämistä useampaan kohteeseen yhtäaikaisesti. Teknologian määrityksessä on huomioitu lämpönielujen erilaiset ominaisuudet ja työkalun toiminta logiikka on esitetty

jokaisen lämpönielun osalta omalla sivullaan (osat 2–11). Osat on liitetty raportin liitteeksi I ja niistä nähdään lämpönielukohtaisesti millä ehdoilla päädytään eri teknologioihin.



Kuva 22. Osa työkalun rakenteesta. Työkalun koko rakenne on esitetty liitteessä I.

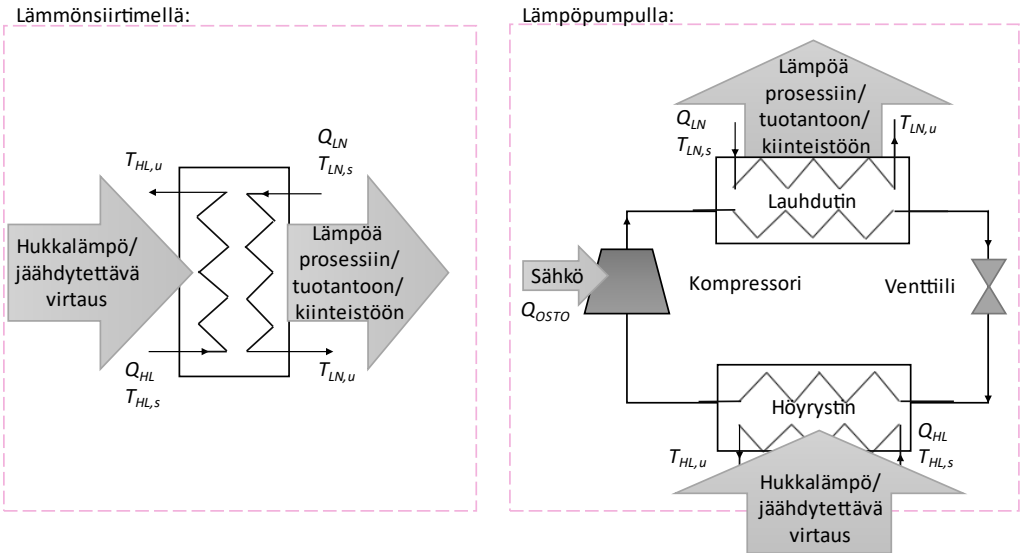
Liitteenä olevista työkalun rakennekaavioista nähdään, että tärkeimmät tekijät teknologian valinnassa on hukkalämmön lämpötila sekä hukkalämmön ja lämpönielun lämpötilatasot. Varastoinnin tarpeellisuutta määrittäessä taas hukkalämmön ja lämpönielun esiintymisen yhtäaikaisuus sekä ajallinen ja määrällinen tasaisuus. Tuloksien tulkintaa on tarkennettu lisäämällä huomautustekstit kohtiin, jolloin työkalussa on jouduttu tekemään rajauksia sen käytettävyyden vuoksi. Lisäksi työkalun käytön helpottamiseksi työkaluun on lisätty huomautuksena infotekstejä, kuten ” Laskuri tarvitsee joko tehon tai virtaavan aineen lämpötilat ja virtauksen” tai ” Jos lämmönlähteelle ei anneta prosessista lähtölämpötilaa, laskuri käyttää ympäristön lämpötilaa”

Työkalun kokoamisessa rakennekaavioiden mukaisesti on käytetty Microsoftin Excel-ohjelmistoa ja sen valmiita PHAKU-, JOS-, JA-, TAI-, ONTYHJÄ-funktiota, sekä näiden yhdistelmiä. Liitteessä II on esitetty työkalun etulehti sekä välilehti, joka sisältää lämpönielujen ominaisuudet. Liitteestä nähdään, että etulehdellä esitetään tulosten lisäksi hukkalämmön ominaisuudet sekä laskennan avustavat tulokset sekä käytetyt avustavat arvot. Etulehdellä näkyy myös infotekstit, jotka tulee huomioida tuloksia tulkittaessa. Käytettävyyden helpottamiseksi ja tulosten nopeuttamiseksi työkaluun on syötetty valmiiksi

ominaislämpökapasiteetti ja tiheys ilmalle, vedelle ja savukaasulle, mutta työkaluun on myös mahdollista lisätä omia arvoja, jos käytetään muita aineita lämmönsiirrossa.

4.2 Energiamäärän laskenta

Lämpönielun osalta työkaluun voi syöttää jokaiselle lämpönielulle omat lähtötiedot, jotka ovat vastaavat kuin hukkalämmölle syötettävät lähtötiedot. Energiamäärän laskennassa hyödynnetään yhtälöä 1 sekä prosessien vuosittaisia käyntiaikoja. Alla olevissa kuvissa on esitetty lämmöntalteenoton periaatekuvat teknologiakohtaisesti. Silloin kun prosessista saatava hukkalämpövirta on myös jäähdytettävä energiavirta, voidaan hyödyntää lämmönsiirrintä tai lämpöpumppua, riippuen lämmöntalteenoton lämpötilatasoista. Lämpöpumpun tyyppi määräytyy sen mukaan, onko laitoksella saatavilla kuuma vettä tai höyryä absorptiolämpöpumpun käyttöenergiaksi. Jos käytetään absorptiolämpöpumppua, kuvassa 23 tuotavan sähkön tilalla on prosessiin tuotava kuuma höyry tai vesi.



Kuva 23. Lämmityksen ja jäähdytyksen tuottaminen prosessiin/tuotantoon/kiinteistöön lämmönsiirtimellä tai lämpöpumpulla

Liitteestä 1 nähdään, että kun työkalu selvittää käytettävää teknologiaa sekä lämmitykseen että jäähdytykseen prosessissa tai tuotannossa, on myös mahdollista päätyä teknologiaan, jossa yhdistetään lämmönsiirrin ja absorptiojäähdytin. Tähän päädytään hukkalämpövirran ollessa yli 100 °C ja kun hukkalämpövirta halutaan jäähdyttää kylmemmäksi kuin mitä prosessiin tuleva lämpönielun virtaus on. Kyseisessä tapauksessa kytkentä on sama kuin kuvassa 24.

Alla olevissa yhtälöissä on esitetty energian nettosäästö, kun halutaan hyödyntää hukkalämpöä tuotannon ja prosessin lämmitykseen ja jäähdytykseen eri teknologioilla. Yhtälössä esiintyvät Q_{HL} ja Q_{LN} viittaavat hukkalämmön energiasisältöön sekä lämpönielun energiasisältöön eli tuotannon ja prosessin lämmitykseen tarvittavaan energiamäärään. Q_{HL} ja Q_{LN} on merkitty myös kuvaan 23. $Q_{JÄÄHDYTYS,OLEVA}$ tarkoittaa olevan jäähdytysjärjestelmän energiankulutusta, joka säästettäisiin, jos jäähdytys toteutetaan uudella lämmöntalteenottojärjestelmällä.

Energiasäästö lämmönsiirtimellä:

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} > Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = \mathrm{Q_{LN}} + Q_{JÄÄHDYTYS,OLEVA} \tag{7}$$

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} < Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = \mathrm{Q_{HL}} * \eta_{LTO} + Q_{JÄÄHDYTYS,OLEVA} \tag{8}$$

jossa Q on energiasisältö [kWh], *HL* viittaa hukkalämpöön, *LN* viittaa lämpönieluun, *SÄÄSTÖ* viittaa säästettävään energiaan, *JÄÄHDYTYS,OLEVA* viittaa korvattavan jäähdytysjärjestelmän tarvittavaan ostoenergiaan ja η_{LTO} on käytettävän teknologian hyötysuhde.

Kun hukkalämmön tulolämpötila on pienempi kuin lämpönielun lähtölämpötila, lämmöntalteenotto toimii pelkästään esilämmittimenä lämmitettävälle virtaukselle. Silloin yllä olevissa yhtälöissä 7 ja 8 energiasisältö tulee kertoa lämmöntalteenoton lämpötiloista saatavalla kertoimella, jotta energiasäästö laskenta huomioi ainoastaan sen osuuden hukkalämpövirrasta, jonka lämpötila riittää lämmittämään lämpönielun virtausta. Kerroin saadaan yhtälöllä 9 ja siinä esiintyvät tilapisteet on esitetty myös kuvassa 23:

$$x = \frac{T_{HL,s} - T_{LN,s}}{T_{LN,u} - T_{LN,s}} \tag{9}$$

jossa T on virtaavan aineen lähtölämpötila [K] ja *HL* viittaa hukkalämpöön, *LN* viittaa lämpönieluun, *s* viittaa lämmöntalteenoton sisääntuloon ja *u* viittaa lämmöntalteenoton ulostuloon.

Jos hukkalämmön määrä on pienempi kuin lämpönielun määrä ja hukkalämmön energiamäärä jää pienemmäksi kuin kertoimella *x* kerrottu osuus tarvittavasta lämpönielun energiamäärästä ei tarvitse käyttää kerrointa *x*, sillä hukkalämmön energiamäärä riittää ainoastaan kattamaan sen osuuden lämpönielun energiamäärästä kuin $T_{HL,s}$ arvolla on mahdollista saavuttaa.

Energiasäästö absorptio tai mekaanisella lämpöpumpulla:

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} > Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = Q_{LN} - Q_{OSTO} + Q_{JÄÄHDYTYS,OLEVA} \quad (10)$$

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} < Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = Q_{HL}\eta_{LTO} - Q_{OSTO} + Q_{JÄÄHDYTYS,OLEVA} \quad (11)$$

jossa *Q* on energiasisältö [kWh], *HL* viittaa hukkalämpöön, *LN* viittaa lämpönieluun, *SÄÄSTÖ* viittaa säästettävään energiaan, *OSTO* viittaa tarvittavaan ostoenergiaan, *JÄÄHDYTYS,OLEVA* viittaa korvattavan jäähdytysjärjestelmän tarvittavaan ostoenergiaan ja η_{LTO} on käytettävän teknologian hyötysuhde.

Lämpöpumppujen energiasäästöä laskettaessa on työkalussa otettu huomioon lämpöpumpulla saavutettava yläraja 120 °C korvaamalla yhtälöstä 9 $T_{HL,s}$ lämpötila-arvolla 120 °C ja kertomalla tällä kertoimella yhtälöt 10 ja 11 samalla periaatteella kuin lämmönsiirtimillä. Jos hukkalämmön määrä on pienempi kuin lämpönielun määrä ja hukkalämmön energiamäärä jää pienemmäksi kuin kertoimella kerrottu osuus tarvittavasta lämpönielun energiamäärästä ei tarvitse käyttää kerrointa, sillä hukkalämmön energiamäärä riittää ainoastaan kattamaan sen osuuden lämpönielun energiamäärästä kuin lämpötilalla 120 °C on mahdollista saavuttaa.

Energiasäästö absorptiojäähdyttimellä ja lämmönsiirtimellä:

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} > Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = Q_{LN} - Q_{OSTO} + Q_{JÄÄHDYTYS,OLEVA} \quad (12)$$

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} < Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = yQ_{HL}\eta_{LTO,LS} - Q_{OSTO} + Q_{JÄÄHDYTYS,OLEVA} + (1-y)Q_{HL}\eta_{LTO,ABS} \quad (13)$$

jossa *Q* on energiasisältö [kWh], *HL* viittaa hukkalämpöön, *LN* viittaa lämpönieluun, *SÄÄSTÖ* viittaa säästettävään energiaan, *OSTO* viittaa tarvittavaan ostoenergiaan, *JÄÄHDYTYS,OLEVA* viittaa korvattavan jäähdytysjärjestelmän tarvittavaan ostoenergiaan ja η_{LTO} on

käytettävän teknologian hyötysuhde, jossa *LS* viittaa lämmönsiirtimeen ja *ABS* absorptio-jäähdyttimeen.

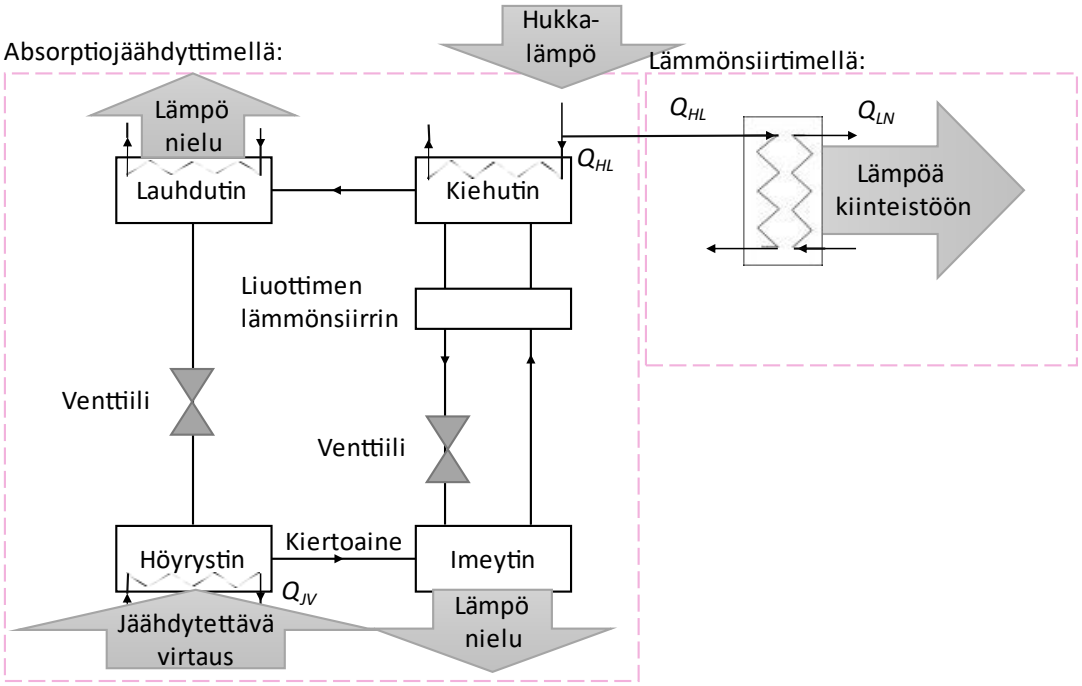
Kun hukkalämmön tulolämpötila on pienempi kuin lämpönielun lähtölämpötila, lämmöntalteenotto toimii pelkästään esilämmittimenä lämmitettävälle virtaukselle. Silloin yllä olevista yhtälöistä Q_{LN} ja Q_{HL} tulee kertoa yhtälössä 9 esitetyllä kertoimella x. Yhtälöissä 12 ja 13 esitetty kerroin *y* huomioi jäähdytykseen käytettävän hukkalämmön osuuden ja se saadaan yhtälöllä 14:

$$y = \frac{T_{HL,s} - T_{LN,s}}{T_{HL,s} - T_{HL,u}} \tag{14}$$

jossa *T* on virtaavan aineen lähtölämpötila [K] ja *HL* viittaa hukkalämpöön, *LN* viittaa lämpönieluun, *s* viittaa lämmöntalteenoton sisääntuloon ja *u* viittaa lämmöntalteenoton ulostuloon.

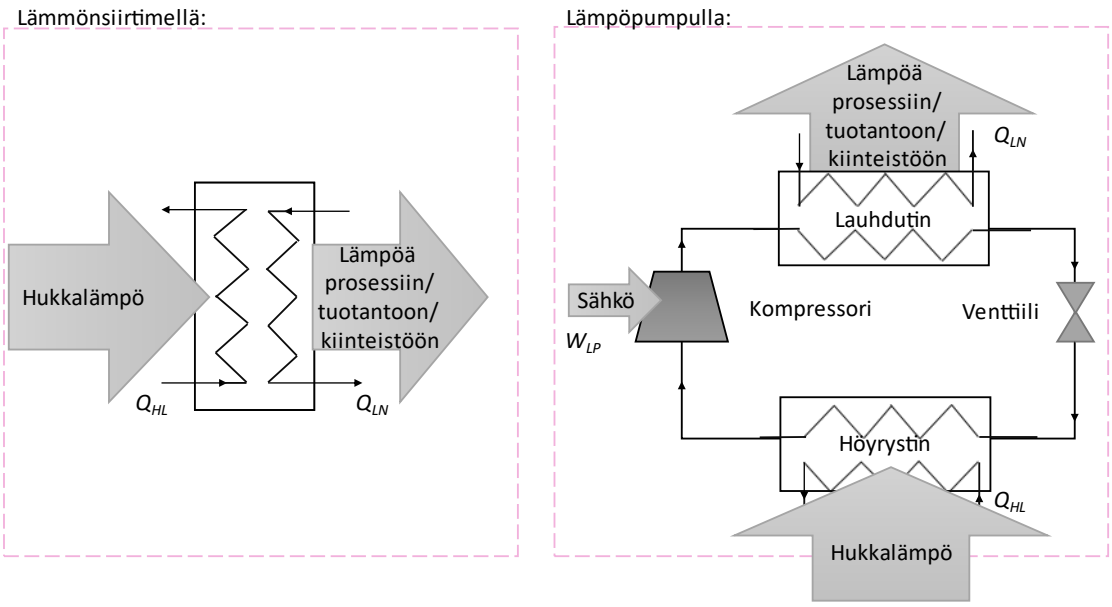
Absorptiojäähdytintä ja lämmönsiirrintä voidaan hyödyntää myös silloin kun halutaan lämmittää ja jäähdyttää kiinteistöä hukkalämpövirralla ja hukkalämpö ei ole jäähdytettävänä virtauksena, kuten aiemmissa esimerkeissä. Tällöin hukkalämmön lämpötila on oltava riittävä, jotta sitä voidaan hyödyntää suoraan sekä lämmitykseen että absorptiojäähdyttimen käyttöenergiaksi. Periaatekuva kytkennästä on esitetty kuvassa 24. Kun halutaan hyödyntää hukkalämpöä kiinteistön lämmitykseen ja jäähdytykseen, saadaan energiasäästö laskettua yhtälöllä 12 tai 13. Tällöin lämpönielun kohdalle tulee syöttää jäähdytyksen ja lämmityksen yhteenlaskettu tehon tarve.

Hukkalämmön hyödyntämisessä kiinteistön jäähdytykseen ja lämmitykseen on kuitenkin hyvä huomata jäähdytys- ja lämmitystarpeiden ajallinen esiintyminen. Yleensä nämä esiintyvät kiinteistöissä samanaikaisesti vain kesäisin, jolloin tarvitaan sekä lämmintä käyttövettä että tilojen jäähdytystä. Joissakin kiinteistöissä jäähdytystarve voi olla myös ympärivuotista ja silloin alla olevan vaihtoehdon kannattavuus paranee.



Kuva 24. Jäähdytyksen ja lämmityksen tuottaminen prosessiin/tuotantoon/kiinteistöön lämmönsiirtimellä ja absorptiojäähdyttimellä

Kuvassa 25 on esitetty periaatekuva, kun hukkalämpöä halutaan hyödyntää pelkästään lämmitykseen. Erona aiempaan tilanteeseen on se, että hukkalämmön virtausta hyödynnetään lämpönielun lämpötilan nostamiseen, mutta hukkalämpövirtauksen jäähdytys ei ole tavoitteena. Nämä kaksi hukkalämmön hyödyntämistapaa on kuitenkin haluttu erottaa työkalussa, jotta huomataan tarkastella myös laitoksella olevien jäähdytettävien lämpövirtojen hukkalämmön hyödyntämispotentiaalia. Myös lämmityksessä lämpöpumpun tyyppi määräytyy sen mukaan, onko laitoksella saatavilla kuuma vettä tai höyryä absorptiolämpöpumpun käyttöenergiaksi.



Kuva 25. Lämmityksen tuottaminen prosessiin/tuotantoon/kiinteistöön

Alla olevissa yhtälöissä on esitetty energian nettosäästön laskenta, kun halutaan hyödyntää hukkalämpöä tuotannon, prosessin tai kiinteistön lämmitykseen eri teknologioilla.

Energiasäästö lämmönsiirtimellä:

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} > Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = \mathrm{Q_{LN}} \tag{15}$$

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} < Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = \mathrm{Q_{HL}} * \eta_{LTO} \tag{16}$$

jossa Q on energiasisältö [kWh], HL viittaa hukkalämpöön, LN viittaa lämpönieluun, $SÄÄSTÖ$ viittaa säästettävään energiaan ja η_{LTO} on käytettävän teknologian hyötysuhde.

Kun hukkalämmön tulolämpötila on pienempi kuin lämpönielun lähtölämpötila, lämmöntalteenotto toimii pelkästään esilämmittimenä lämmitettävälle virtaukselle. Silloin yllä olevat yhtälöt tulee kertoa lämmöntalteenoton lämpötiloista saatavalla kertoimella x, joka on esitetty yhtälössä 9.

Yhtälöitä 17 ja 18 käytetään, kun hukkalämpöä hyödynnetään absorptio tai mekaanisella lämpöpumpulla.

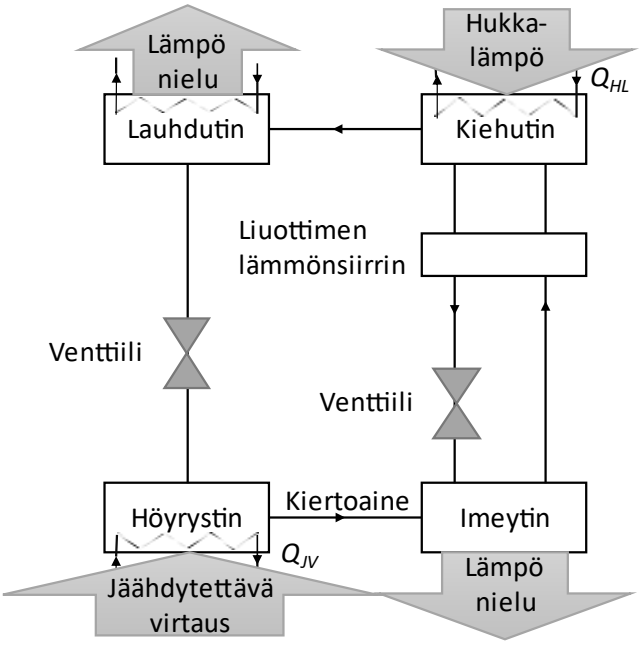
$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} > Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = Q_{LN} - Q_{OSTO} \quad (17)$$

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} < Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = Q_{HL}\eta_{LTO} - Q_{OSTO} \quad (18)$$

jossa Q on energiasisältö [kWh], *HL* viittaa hukkalämpöön, *LN* viittaa lämpönieluun, *SÄÄSTÖ* viittaa säästettävään energiaan, *OSTO* viittaa tarvittavaan ostoenergiaan ja η_{LTO} on käytettävän teknologian hyötysuhde.

Kun hukkalämmön tulolämpötila on pienempi kuin lämpönielun lähtölämpötila, lämmöntalteenotto toimii pelkästään esilämmittimenä lämmitettävälle virtaukselle. Silloin yllä olevista yhtälöistä Q_{LN} ja Q_{HL} tulee kertoa yhtälössä 9 esitetyllä kertoimella x.

Kun hukkalämpöä halutaan hyödyntää pelkästään jäähdytyksen tuotantoon, syötetään haluttu jäähdytettävän virtauksen tiedot lämpönielun sijaan. Kuvasta 26 nähdään jäähdytyksen periaatekuva. Työkaluun on otettu mukaan ammoniakki-vesi absorptiojäähdytin sekä vesi-Litiumbromidi absorptiojäähdytin, joista ammoniakki-vesi jäähdyttimellä päästään alle 0 asteen lämpötiloihin.



Kuva 26. Jäähdytyksen tuottaminen prosessiin/tuotantoon/kiinteistöön absorptiojäähdyttimellä

Energiasäästö absorptiojäähdyttimellä:

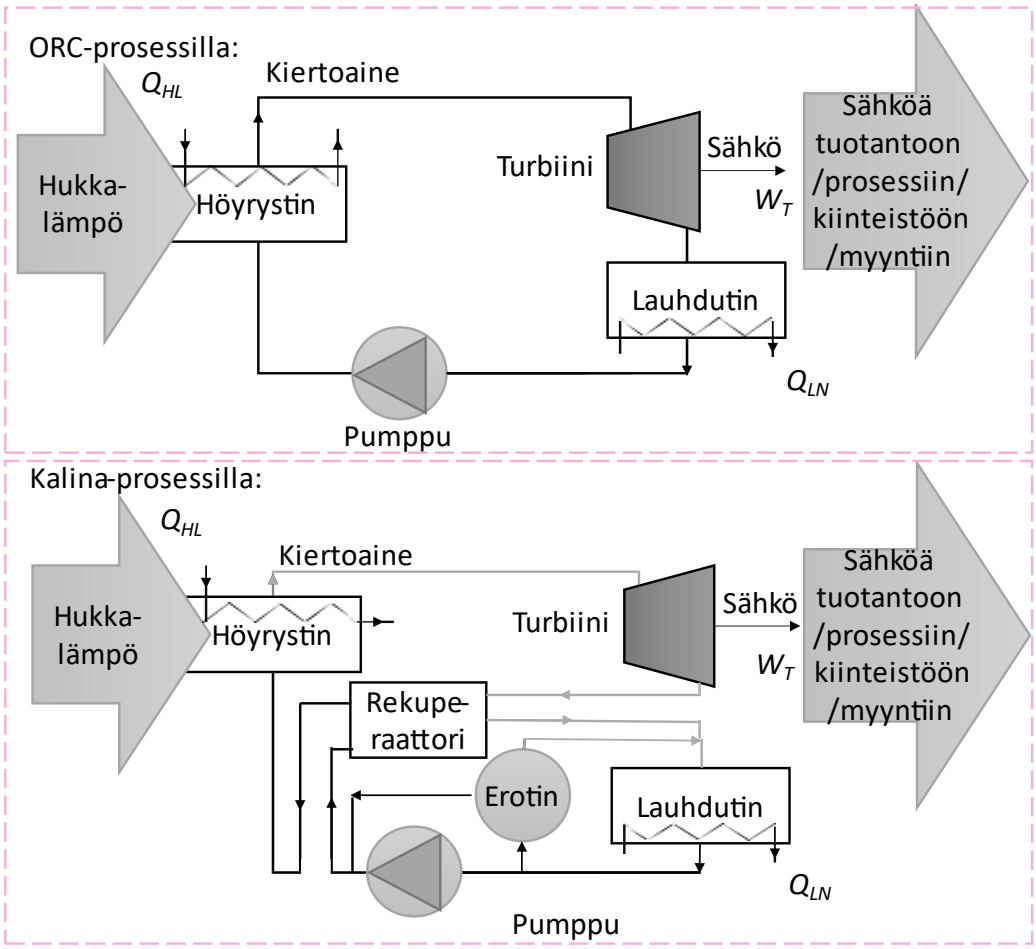
$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} > Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = Q_{LN} - Q_{OSTO} + Q_{JÄÄHDYTYS,OLEVA} \quad (19)$$

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} < Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = Q_{HL}\eta_{LTO,ABS} - Q_{OSTO} + Q_{JÄÄHDYTYS,OLEVA} \quad (20)$$

jossa Q on energiasisältö [kWh], *HL* viittaa hukkalämpöön, *LN* viittaa lämpönieluun, *SÄÄSTÖ* viittaa säästettävään energiaan, *OSTO* viittaa tarvittavaan ostoenergiaan, *JÄÄHDYTYS,OLEVA* viittaa korvattavan jäähdytysjärjestelmän tarvittavaan ostoenergiaan ja η_{LTO} on käytettävän teknologian hyötysuhde, jossa *LS* viittaa lämmönsiirtimeen ja *ABS* absorptiojäähdyttimeen.

Kuvassa 27 on esitetty periaatekuva hukkalämmön hyödyntämisestä sähköntuotantoon. Kun selvitetään hukkalämmön hyödyntämistä sähköntuotantoon, lämpönielun tarkoitus on eri kuin silloin, jos hukkalämpöä hyödynnetään lämmöntuotantoon, jolloin lämpönielu

tarkoittaa lämmitettävää virtausta. Sähköntuotannossa lämpönielun ominaisuuksia ei ole välttämätöntä täyttää laskuriin, mutta teknologia vaatii lämpönielun toimiakseen. Tuotetun sähkön määrän laskennassa hyödynnetään kirjallisuusosiossa selvitettyjä hyötysuhteita ja oletuksena on, että kaikki hukkalämpö hyödynnetään sähköntuotantoon.



Kuva 27. Hukkalämmön hyödyntäminen sähköntuotantoon

Laskettaessa energiasäästöä lämmön tai sähkönmyynnille tai sähköntuotannolle laskuri olettaa, että kaikki hukkalämpö hyödynnetään, mikäli lämpönielun kohdalle ei ole syötetty haluttua tehoa. huomioiden kuitenkin käytettävän teknologian hyötysuhde lämpönielun lämpötila sekä seuraava ehto:

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} > Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = Q_{LN} - Q_{OSTO} \tag{21}$$

$$JOS\ Q_{HL}\eta_{LTO} < Q_{LN} \rightarrow Q_{SÄÄSTÖ} = Q_{HL} * \eta_{LTO} \tag{22}$$

jossa Q on energiasisältö [kW], HL viittaa hukkalämpöön, LN viittaa lämpönieluun, $SÄÄSTÖ$ viittaa säästettävään energiaan, $OSTO$ viittaa tarvittavaan ostoenergiaan. ja η_{LTO} on käytettävän teknologian hyötysuhde.

Kiinteistön lämmitystä ja jäähdytystä sekä sähkön tuotantoa ja myyntiä lukuun ottamatta lämpönielulle pitää syöttää joko tehon tarve tai lämpötilat ja virtaavan aineen määrä, jotta työkalun energialaskuri toimii ja Excel pystyy määrittämään käytettävän teknologian. Jos työkalun lähtötietoihin syötetään ainoastaan tarvittava teho, loppulämpötila lasketaan yhtälön 7. avulla, joka on johdettu yhtälöstä 1:

$$Q = V\rho C_p(T_2 - T_1) \rightarrow T_2 = \frac{Q}{V\rho C_p} + T_1 \tag{22}$$

jossa Q on energiasisältö [kW], V on aineen tilavuusvirta [m^3/s], ρ on virtaavan aineen tiheys [kg/m^3], C_p on aineen ominaislämpökapasiteetti [J/kg,K], T_2 on virtaavan aineen lähtölämpötila [K] ja T_1 on virtaavan aineen tulolämpötila [K]

Taulukkoon 9 on listattu laskurin käyttämät hyötysuhteet, joita voi tarvittaessa muokata laskurissa. Lämpöpumppujen COP-arvoja käytetään laskemaan lämpöpumppujen sähkönkulutusta. Hyötysuhteet ja COP-arvot ovat keskiarvoja kirjallisuusosiossa esitellyistä arvoista lukuun ottamatta tuntuvan lämmön varastoa, jossa on käytetty hyötysuhdetta 0,9 lähteestä saatujen hyötysuhteiden liukuman 0,5 ja 0,9 keskiarvon 0,7 sijaan, koska oletuksena on, että varastointi on lyhytaikaista. Jos lämpöä varastoidaan pitempiaikaisesti, tulisi hyötysuhdetta pienentää. Sähköntuotannon hyötysuhde ottaa huomioon laitteiston tarvitseman sähkönkulutuksen, muttei tarvittavia ulkoisia pumppauksia, joten laskurin lähtötietokenttään syötetään arvio laitteiston etäisyydestä hukkalämmönlähteeseen sekä prosessia lauhduttavaan lämpönieluun. Jos yhteismatka ylittää 100 m laskuri varoittaa, että pumppauskustannukset voivat viedä kannattavuuden investoinnilta.

Taulukko 9. Teollisuuden LTO-laskuriin syötetyt hyötysuhteet.

Teknologiat:	Hyötysuhde	COP
Lämmönsiirrin	1,00	
Lämmönsiirrin(esilämmitys)	1,00	
Lämpöpumppu	1,00	5,05
Abs.Lämpöpumppu	1,00	1,60
Abs.Jäähdytin(NH3)		0,73
Abs.Jäähdytin(LiBr)		0,73
Lämpöpumppu+ORC/Kalina	0,13	5,05
ORC/Kalina	0,13	
Tuntuvan lämmön varasto	0,90	
Latenttilämpövarasto	0,83	

4.3 Työkalun käytettävyyden testaus

Teollisuuden lämmöntalteenotoissa käytettävän teknologian valitsemiseen kehitetyn laskurin käytettävyyttä testattiin tämän työn ulkopuolisessa selvityksessä kerätyillä tiedoilla. Hyödynnetyssä selvityksessä oli kerätty sähköpostikyselyllä tietoa Pohjoissuomessa ja Keskipohjanmaalla olevien teollisuuslaitosten:

1. Hyödynnetyistä sekä hyödyntämättömistä hukkalämmönlähteistä
2. Mahdollisista hyödyntämiskohteista, jos laitoksella esiintyy hukkalämpöä
3. Laitoksen kiinnostuksesta selvittää hyödyntämättömien hukkalämmönlähteiden hyödyntämispotentiaalia
4. Laitoksen kiinnostusta investoida hukkalämpöä hyödyntävään teknologiaan (Isomursu et al., 2022).

Hyödyntämättömistä hukkalämmönlähteistä kerättiin tieto hukkalämpövirran aineen olomuodosta, lämpötilasta sekä arvio hukkalämpövirran määrästä (Isomursu et al., 2022). Vastaukset jäivät osittain puutteellisiksi, mutta aineistosta saatiin hyödynnettäväksi yhteensä neljä eri hukkalämpövirtaa, joiden ominaisuudet on esitetty alla olevassa taulukossa.

Taulukko 10. Työkalun testauksessa käytettyjen hukkalämpölähteiden lyhenteet ja ominaisuudet (Isomursu et al., 2022)

Hukkalämpö	Lämpötila [C]	Olomuoto	Määrä	Käyttöaika
HL1	35–69	Vesi	1 500 m3/h	8 760
HL2	35–69	Vesi	60 m3/h	8 400
HL3	35–69	Vesi	900 m3/h	8 700
HL4	201–400	Savukaasu	60 000 m3/h	8 760

Selvityksessä kysyttiin, mihin hukkalämpöä laitoksella voitaisiin hyödyntää, mutta lämpönielujen ominaisuuksista ei kerätty tarkemmin tietoa, joten työkalun testauksessa käytettiin lämpönielujen tyypillisiä ominaisuuksia. Työkalun testauksessa hyödynnettävät lämpötilat kiinteistön lämmitykselle ja lämmönmyynnille on kerätty kaukolämmön mitoituslämpötiloista (K1) (Energiateollisuus ry, 2021, s.8). Mitoituslämpötilat jäähdytykselle on kerätty ohjeesta J1 Liite 12 (Energiateollisuus ry, 2014). Rakennuksen lämmöntarpeet on arvioitu taulukossa 11 esitetyillä ominaislämpö ja -jäähdytystehoilla sekä lämpö- ja jäähdytysindekseille tyyppiteollisuusrakennukselle, jonka pinta-ala on 2000 m^2, korkeus 4 m ja tilavuus 8000 m^3. Ominaislämpöteho ja lämpöindeksi on saatu Mäkelän ja Tuunasen kirjoittamasta kaukolämpö oppaasta ja näiden osalta alkuperäinen lähde on ollut Energiateollisuus ry:n Kaukolämmön käsikirja (Mäkelä & Tuunanen, 2015, s. 20).

Taulukko 11. Tulosten testauksessa käytetyt teollisuuskiinteistön ominaislämpö- ja jäähdytystehot sekä lämpö- ja jäähdytysindeksit

Ominaislämpöteho	28	W/m^3	(Mäkelä & Tuunanen, 2015, s. 20)
Lämpöindeksi	58	$kWh/m^3,v$	(Mäkelä & Tuunanen, 2015, s. 20)
Ominaisjäähdytysteho	38	W/m^2	
Ominaisjäähdytysindeksi	11	$kWh/m^2,v$	

Taulukossa 12 on kootusti työkalun testauksessa käytetyt varastoinnin määritykseen tarvittavat lähtötiedot.

Taulukko 12. Lämmön varastointitarpeen määrityksessä käytetyt lähtötiedot

	HL1	HL2	HL3	HL4
Esiintyykö hukkalämpö ja lämpönielu samanaikaisesti?	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä
Hukkalämmön ajallinen esiintyminen tasaista	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä
Hukkalämmön määrällinen esiintyminen tasaista	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä
Ajallinen esiintyminen tasaista (Lämpönielut 1–9)	Ei	Ei	Kyllä	Ei
Määrällinen esiintyminen tasaista (Lämpönielut 1–9)	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä

Taulukossa 13 on kootusti työkalun testauksessa käytetyt lämpönielujen arvot, jotka on saatu kappaleessa aiemmin mainituista lähteistä lukuun ottamatta prosessin lämmitykseen ja jäähdytykseen tarvittavia lähtötietoja, jotka keksittiin kuvitteelliseen kohteeseen pelkästään työkalun testausta varten. Lämmöntuotannossa myyntiä varten sekä sähköntuotannossa on ajateltu, että kaikki syntyvä hukkalämpö pyritään hyödyntämään.

Taulukko 13. Työkalun testauksessa käytetyt lämpönielujen ominaisuudet

Ly-henne	Lämpönielu	Olo-muoto	Tulo-lämpö-tila [C]	Lähtö-lämpö-tila [C]	Tilavuus-virtaus [m3/h]	Lämmitys-tehontarve [kW]	Jäähdy-tysenergi-antarve [kW]
LN1	Prosessin/tuotannon lämmitys/jäähdytys	Ilma	25	200	2000		
LN2	Kiinteistön lämmitys/jäähdytys	Vesi	30/16	60/8		224	76
LN3	Prosessin/tuotannon lämmitys	Ilma	35	300	2000		
LN4	Kiinteistön lämmitys	Vesi	30	60		224	
LN5	Prosessin/tuotannon jäähdytys	Ilma	25	-10	2000		
LN6	Kiinteistön jäähdytys	Vesi	16	8			76
LN7	Sähköntuotanto omaan käyttöön	Vesi	25			$=Q_{HL}$	
LN8	Lämmönmyynti	Vesi	33	90		$=Q_{HL}$	
LN9	Sähkönmyynti	Vesi	25			$=Q_{HL}$	

4.4 Tulokset

Taulukossa 14 on esitetty kootusti tulokset, jotka työkalun testauksessa saatiin edellä mainituilla lähtötiedoilla. Taulukoissa 15 ja 16 on esitetty tarkemmat tulokset hukkalämmönlähteiden HL1 ja HL4 osalta sekä teknologioilla saavutettava energiansäästö. Hukkalämmönlähteitä HL2 ja HL3 ei käydä tarkemmin läpi, sillä tulokset ovat samankaltaiset hukkalämmönlähteen HL1 kanssa johtuen työkaluun syötettyjen lähtötietojen samanlaisuudesta.

Taulukon 14 tuloksista nähdään, että vaikka hukkalämmön määrä muuttuu ensimmäisellä kolmella hukkalämmönlähteellä käytettävä teknologia ei kuitenkaan muutu vaan työkalu ehdottaa hukkalämmönlähteille HL1, HL2 ja HL3 lämpöpumppua tai lämpöpumppua ja ORC/Kalinaa lämmöntalteenottoteknologiaksi kaikille muille lämpönieluille paitsi LN2:lle, LN5:lle ja LN6:lle. Edellä mainituille lämpönielulle työkalu antaa vastaukseksi, ettei ”hukkalämpö voida hyödyntää”, sillä hukkalämmön lämpötila on niin matala, ettei sitä pystytä hyödyntämään jäähdytykseen. Se että työkalu ehdottaa ensimmäiselle kolmelle hukkalämmönlähteelle samaa lämmöntalteenottoteknologiaa, johtuu siitä, että hukkalämmön ja lämpönielun lämpötilatasot eivät muutu hukkalämmönlähteiden välillä. Varastoinnin osalta kolmen ensimmäisen hukkalämmönlähteen osalta on eroa, sillä HL3:n ei Hl1:stä ja HL2:sta poiketen tarvitse varastointia. Tämä johtuu siitä, että annettujen lähtötietojen mukaan hukkalämmön ja lämpönielun ajallinen ja määrällinen esiintyminen on tasaista ja yhtäaikaista.

Viimeiselle hukkalämmön lähteelle työkalu antaa lämmitykseen ja jäähdytykseen teknologiaksi lämmönsiirtimen tai absorptio jäähdyttimen ja lämmönsiirtimen ja sähköntuotantoon ORC/Kalinaa lämmöntalteenottoteknologiaksi. Prosessin lämmitykseen (LN3) työkalu ehdottaa lämmönsiirrintä esilämmittimeksi, sillä tässä tapauksessa lämpönielun lähtölämpötila on 300 °C, kuten taulukosta 13 nähdään ja hukkalämmön tulolämpötilan keskiarvo on 300 ja tällöin ottaen huomioon lämmönsiirtimen asteisuus, hukkalämmöllä ei välttämättä saada nostettua lämpönielun lähtölämpötilaa haluttuun 300 asteeseen. Varastointiteknologiaksi työkalu ehdottaa viimeiselle hukkalämmönlähteelle (LN4) latenttilämpövarastoa, johtuen hukkalämmön korkeasta lämpötilasta.

Taulukko 14. Työkalusta tuloksena saatavat teknologia testi hukkalämmön ja lämpönielujen tiedoilla. Taulukossa käytetyt lyhenteet: LP=Lämpöpumppu, LS=Lämmönsiirrin, HL=Hukkalämpö, LL-varastointi=Latenttilämpövarasto, TL-varastointi=Tuntuvan lämmön varasto

		HL1	HL2	HL3	HL4
LN1	LTO-teknologia	LP	LP	LP	LS
	Varastointi	TL-varastointi	TL-varastointi	Ei varastointia	LL-varastointi
LN2	LTO-teknologia	HL ei voida hyödyntää	HL ei voida hyödyntää	HL ei voida hyödyntää	Abs.jäähdytin (LiBr)+LS
	Varastointi	-	-	-	LL-varastointi
LN3	LTO-teknologia	LP	LP	LP	LS(esilämmitys)
	Varastointi	TL-varastointi	TL-varastointi	Ei varastointia	LL-varastointi
LN4	LTO-teknologia	LP	LP	LP	LS
	Varastointi	TL-varastointi	TL-varastointi	Ei varastointia	LL-varastointi
LN5	LTO-teknologia	HL ei voida hyödyntää	HL ei voida hyödyntää	HL ei voida hyödyntää	Abs.jäähdytin (NH3)
	Varastointi	-	-	-	LL-varastointi
LN6	LTO-teknologia	HL ei voida hyödyntää	HL ei voida hyödyntää	HL ei voida hyödyntää	Abs.jäähdytin (LiBr)
	Varastointi	-	-	-	LL-varastointi
LN7	LTO-teknologia	LP+ORC/Kalina	LP+ORC/Kalina	LP+ORC/Kalina	ORC/Kalina
	Varastointi	TL-varastointi	TL-varastointi	Ei varastointia	LL-varastointi
LN8	LTO-teknologia	LP	LP	LP	LS
	Varastointi	TL-varastointi	TL-varastointi	Ei varastointia	LL-varastointi
LN9	LTO-teknologia	LP+ORC/Kalina	LP+ORC/Kalina	LP+ORC/Kalina	ORC/Kalina
	Varastointi	TL-varastointi	TL-varastointi	Ei varastointia	LL-varastointi

Taulukkoon 15 on kerätty tulokset työkalun ehdottamat teknologiat ensimmäiselle hukkalämmönlähteen (HL1) eri lämpönieluilla sekä energiansäästön laskennan tulokset. Tuloksista nähdään, että työkalu ehdottaa lämpöpumppua niissä tapauksissa, joissa hukkalämpöä voidaan hyödyntää, eli lämpönieluille LN1, LN3, LN4 ja LN8 sekä lämpöpumppua ja ORC/Kalinaa lämpönieluille LN7 ja LN9, johtuen hukkalämmön matalasta lämpötilasta verrattuna lämpönielujen lämpötilaan. Työkalun laskemasta energiansäästöstä nähdään, että suurimmat säästöt saavutettaisiin sähköntuotannolla (LN7) 38 099 MWh/v ja -myynnillä (LN9) 38 099 MWh/v tai lämmönmyynnillä (LN8) 304 790 MWh/v, jos hukkalämpöä hyödynnetään pelkästään yhteen lämpönieluun. Tämä johtuu lähtötiedoissa tehdystä oletuksesta, että lämpönieluilla LN7-9 kaikki hukkalämpö hyödynnettäisiin, kun taas muissa tapauksissa lämpönielun energiantarve ei ole yhtä suuri kuin hukkalämmön määrä.

Kun lämpönieluja LN7-LN9 ei oteta huomioon suurimman säästön saisi, kun hukkalämpö olisi jäähdytettävänä virtauksena ja siitä saatava hukkalämpö hyödynnettäisiin prosessissa/tuotannossa (LN1). Tällöin saavutettava säästö olisi 534 MWh/v. Energiansäästö silloin kun hukkalämpöä hyödynnettäisiin prosessin/tuotannon lämmitykseen (LN3) olisi 501 MWh/v ja 369 MWh/v silloin kun hukkalämpö hyödynnettäisiin kiinteistön lämmitykseen (LN4).

Olosuhteista riippuen hukkalämpöä voidaan kuitenkin hyödyntää useampaan kohteeseen ja hukkalämmönlähteen HL1 energia riittäisi sekä prosessin että kiinteistön lämmitykseen (LN1, LN3 ja LN4). Lisäksi hyödynnettäessä hukkalämpöä sekä jäähdytykseen että lämmitykseen saadaan lisää säästöjä myös olevan jäähdytysjärjestelmän korvaamisesta, jota ei ole työkalun testauksessa huomioitu, sillä olevalle jäähdytysjärjestelmälle ei ole syötetty energiankulutustietoja lähtötietoihin.

Taulukko 15. Työkalusta saatavat tulokset hukkalämmönlähteellä HL1

LN1	LTO-Teknologia	Lämpöpumppu
	Varastointi	Tuntuvan lämmön varasto
	Energiasäästö [MWh/v]	534
LN2	LTO-Teknologia	Hukkalämpöä ei voida hyödyntää
	Varastointi	-
	Energiasäästö [MWh/v]	-
LN3	LTO-Teknologia	Lämpöpumppu
	Varastointi	Tuntuvan lämmön varasto
	Energiasäästö [MWh/v]	501
LN4	LTO-Teknologia	Lämpöpumppu
	Varastointi	Tuntuvan lämmön varasto
	Energiasäästö [MWh/v]	369
LN5	LTO-Teknologia	Hukkalämpöä ei voida hyödyntää
	Varastointi	-
	Energiasäästö [MWh/v]	-
LN6	LTO-Teknologia	Hukkalämpöä ei voida hyödyntää
	Varastointi	-
	Energiasäästö [MWh/v]	-
LN7	LTO-Teknologia	Lämpöpumppu+ORC/Kalina
	Varastointi	Tuntuvan lämmön varasto
	Energiasäästö [MWh/v]	38 099
LN8	LTO-Teknologia	Lämpöpumppu
	Varastointi	Tuntuvan lämmön varasto
	Energiasäästö [MWh/v]	304 790
LN9	LTO-Teknologia	Lämpöpumppu+ORC/Kalina
	Varastointi	Tuntuvan lämmön varasto
	Energiasäästö [MWh/v]	38 099

Taulukosta 16 nähdään, että hukkalämmön lämpötilan ja väliaineen vaihtuessa myös teknologiat sekä niiden energiasäästöpotentiaali muuttuvat merkittävästi. Työkalu ei enää ehdota lämpöpumppua vaan nyt kun hukkalämpö on riittävän lämmintä, sitä voidaan hyödyntää suoraa lämmönsiirtimillä, absorptiojäähdyttimellä sekä sähkötuotannossa ORC tai Kalina-laitteistolla. Silloin kun hukkalämpö virtaus on jäähdytettävänä virtauksena, josta siirretään lämpöä prosessiin tai tuotantoon (LN1) ehdotettu teknologia lämmönsiirrin ja saavutettu energiasäästö 1102 MWh/v. Tällöin hukkalämmön lämpötila riittää lämmittämään lämpönielua, sillä hukkalämmönlähteen HL4 tulolämpötila on keskimäärin 300 °C ja lämpönielun LN1 lähtölämpötila on 200 °C.

Hyödynnettäessä hukkalämpöä kiinteistön jäähdytykseen ja lämmitykseen (LN2) ehdotettu teknologia on absorptiojäähdytin ja lämmönsiirrin ja saavutettu energiasäästö 2 628 MWh/v. Hyödynnettäessä hukkalämpöä prosessin lämmitykseen (LN3) energiasäästö on 1 669 MWh/v ja kiinteistön lämmitykseen (LN4) 460 MWh/v. Hyödynnettäessä hukkalämpöä prosessin jäähdytykseen (LN5) energiasäästö on 220 MWh/v ja kiinteistön jäähdytykseen (LN5) 22 MWh/v. Edelleen lämmön myynti (LN8) on kannattavin vaihtoehto energiansäästön kannalta, sillä oletuksella, että kaikki lämpö voidaan hyödyntää, jolloin saavutettaisiin 46 941 MWh/v energiansäästö, kun sähköntuotannolla (LN7) ja sähkönmyynnillä (LN9) saavutettaisiin 5 868 MWh/v energiansäästö.

Sähköntuotannon hyötysuhteena käytetään työkaluun syötettyä 0,13, mutta työkalusta löytyy omalta riviltä yhtälössä 2 esitetty Carnotin hyötysuhde, joka oli HL1:lle 0,08 ja HL4:lle 0,48. Tästä nähdään, että se osuus hukkalämmöstä, joka on mahdollista muuttaa työksi kasvaa myös lämpötilan kasvaessa ja tätä voi hyödyntää, jos haluaa päivittää työkalussa olevia hyötysuhteita. Hyötysuhteissa on kuitenkin hyvä pysyä taulukossa 6 esitettyjen sähköntuotantomuotojen hyötysuhteiden rajoissa, ellei jo tiedetä mahdollisen tulevan sähköntuotantolaitteiston hyötysuhdetta.

Taulukko 16. Työkalusta saatavat tulokset hukkalämmönlähteellä HL4

LN1	LTO-Teknologia	Lämmönsiirrin
	Varastointi	Latenttilämpövarasto
	Energiasäästö [MWh/v]	1 102
LN2	LTO-Teknologia	Abs.jäähdytin+ Lämmönsiirrin
	Varastointi	Latenttilämpövarasto
	Energiasäästö [MWh/v]	2 628
LN3	LTO-Teknologia	Lämmönsiirrin (esilämmitys)
	Varastointi	Latenttilämpövarasto
	Energiasäästö [MWh/v]	1 669
LN4	LTO-Teknologia	LS
	Varastointi	Latenttilämpövarasto
	Energiasäästö [MWh/v]	460
LN5	LTO-Teknologia	Abs.jäähdytin(NH3)
	Varastointi	Latenttilämpövarasto
	Energiasäästö [MWh/v]	220
LN6	LTO-Teknologia	Abs.jäähdytin(LiBr)
	Varastointi	Latenttilämpövarasto
	Energiasäästö [MWh/v]	22
LN7	LTO-Teknologia	ORC/Kalina
	Varastointi	Latenttilämpövarasto
	Energiasäästö [MWh/v]	5 868
LN8	LTO-Teknologia	Lämmönsiirrin
	Varastointi	Latenttilämpövarasto
	Energiasäästö [MWh/v]	46 941
LN9	LTO-Teknologia	ORC/Kalina
	Varastointi	Latenttilämpövarasto
	Energiasäästö [MWh/v]	5 868

Lopulliseen teknologian valintaan vaikuttaa se, minkälaiset mahdollisuudet teollisuusyrityksellä on myydä sähköä tai lämpöä sekä onko laitoksella kiinnostusta investoida kyseiseen teknologiaan ja mahdollisesti uuteen liiketoimintaan. Työkalusta saadaankin paras hyöty silloin kun se täytetään yhdessä laitoksen käytöstä sekä kehityksestä vastaavien toimihenkilöiden kanssa, sillä tällöin voidaan jo alkuvaiheessa ottaa kantaa edellä mainittuihin kysymyksiin ja saadaan haettua mahdollisimman luotettavat mittaustiedot hukkalämmön ja lämpönielun lähtötietoihin. Työkalu on lisäksi pyritty rakentamaan niin, että siinä huomioidaan ensisijaisesti laitoksen omat tarpeet ja huomautetaan, jos jokin teknologia ei välttämättä ole kannattavaa annetuilla lähtötiedoilla. Lopullisen kustannusarvion ja kannattavuuslaskelman avulla saadaan varmistus teknologian kannattavuudelle.

Työkalulla saadaan tavoitteiden mukaisesti selvitettyä, mikä teknologia on paras annetuilla reunaehdoilla. Talteen otettavan energianmäärän laskennassa työkalu huomioi automaattisesti, jos koko energiamäärää ei saada talteen siinä tapauksessa, että hukkalämmön määrä on suurempi kuin lämpönielun tarve. Työkalun energialaskuri huomioi myös lämmönlähteen ja lämpönielun lämpötilatasot, mutta laskenta ei ota tarkemmin huomioon hukkalämmön ja lämmöntarpeen ajallista esiintymistä ja niiden yhteensopivuutta. Tätä on pyritty tasoittamaan varastointiteknologian lisäämisellä tarvittaessa lämmöntalteenottojärjestelmään. Lisäksi laskuri hyödyntää työkaluun syötettyjä teknologioiden hyötysuhteita, jotka perustuvat lähdeaineistoon eivätkä todennäköisesti vastaa lopullista lämmöntalteenotto järjestelmän hyötysudetta. Tarkempi energialaskenta on syytä tehdä lämmöntalteenotto selvityksen edetessä ennen investoinnin kannattavuusarviota.

Työkalulla saatavia tuloksia tulkitessa on hyvä myös huomioida, että teknologian valinta ja energialaskenta perustuu lähtötietona annettuihin hukkalämmön ja lämpönielun arvoihin eikä laskuri ota tarkemmin huomioon esimerkiksi lämpötilojen suuria vaihteluita. Lähtötietona tulisi pyrkiä antamaan keskiarvoja, jotta energiamäärän laskenta vastaisi mahdollisimman hyvin koko vuoden keskiarvoa. Lämpötilojen osalta suuret vaihtelut ja lämpötilojen huono pysyvyys huonontavat työkalun luotettavuutta, sillä sen antamat tulokset perustuvat suurelta osin lämpötilatasoihin. Jos lämpötiloissa on paljon vaihtelua, työkalulla voi testata tuloksia hukkalämmön minimi- ja maksimilämpötilassa ja näin selvittää, mikä vaikutus lämpötilan heilahtelulla on tuloksiin.

Työkalussa on osittain vedetty selkeämpiä rajauksia eri teknologioiden välillä työkalun rakenteen yksinkertaistamiseksi kuin mitä teknologioiden välillä välttämättä todellisuudessa on, mikä osaltaan huonontaa työkalun luotettavuutta. Rajauksien vaikutuksen vähentämiseksi työkaluun on lisätty infotekstit, siltä osin, kun rajauksia on jouduttu tekemään, jotta käyttäjän harkinnan mukaan myös työkalun poissulkemia teknologioita voidaan tarvittaessa ottaa mukaan tarkasteluun. Lisäksi, jos halutaan tarkastella useampaa hukkalämmönlähdettä, täytyy Excel välissä tallentaa uudeksi tai kopioida laskenta sivut uudelle välilehdelle samaan työkirjaan. Excelin rakenne on pyritty tekemään niin selkeäksi, että se voidaan liittää raportin liitteeksi ja useamman hukkalämmönlähteen tarkastelulla samassa työkirjassa työkalun ulkoasu ei enää pysyisi yhtä selkeänä.

5 Johtopäätökset

Työn aikana saatiin kehitettyä työkalu, joka käy teknologian valintaan sekä eri lämpönielujen vertailuun. Työkalulla voidaan nopeuttaa lämmöntalteenottoprosessien alkuvaihetta etenkin, jos työkalun täyttö tehdään yhdessä tehtaan henkilökunnan kanssa, jotta saadaan heti alussa kartoitettua tehtaan omat tarpeet sekä olevien hukkalämmönlähteiden ja lämpönielujen ominaisuudet. Työkalun tavoitteena oli, että siitä tulisi helppokäyttöinen. Työkalun käytettävyyttä ei kuitenkaan testattu muiden kuin työkalun kehittäjän toimesta, joten sen käyttöä olisi vielä hyvä testata muidenkin käytössä sekä oikeissa teollisuuskohteissa, jotta sen käytettävyyttä voidaan tarvittaessa parantaa testeistä saatujen tulosten perusteella.

Työkalulla voidaan tarkastella, mikä teknologia käy lämmöntalteenottoon ja mikä vaikutus lämpönielun ominaisuuksilla on teknologian valintaan sekä talteen otettavaan energiamäärään. Lämmöntalteenoton kannattavuuden arviointi vaatii lämmöntalteenoton toteutuksen tarkemman tarkastelun sekä hukkalämmön ja lämpönielun kulutusprofiilien yhteensovittamisen ja varmistuksen varastoinnin tarpeellisuudelle. Näin saadaan määritettyä tarkempi energiasäästö ja investoinnin hinta kannattavuuden arviointia varten.

Työkalun energialaskuri huomioi myös lämmönlähteen ja lämpönielun lämpötilatasot energialaskennassa, mutta laskenta ei ota tarkemmin huomioon hukkalämmön ja lämmöntarpeen ajallista esiintymistä ja niiden yhteensopivuutta. Tätä on pyritty tasoittamaan lisäämällä varastointiteknologia mukaan lämmöntalteenottoon. Lisäksi työkalun rakenteen yksinkertaistamiseksi jouduttiin tekemään selkeämpiä rajauksia eri teknologioiden välille kuin mitä todellisuudessa olisi tarve, mikä on pyritty huomioimaan työkaluun lisätyillä infoteksteillä, jotta käyttäjä voi halutessaan ottaa mukaan tarkasteluun myös pois rajattuja teknologioita.

Työkalun testauksessa huomattiin, että lämpötilatasoilla on merkitystä teknologian valintaan ja matalammilla lämpötiloilla korostui lämpöpumput, kuten aiemmissakin tutkimuksissa on havaittu. Työkalulla oli mahdollista tarkastella saman hukkalämmönlähteen hyödyntämistä useampaan lämpönieluun ja vertailla niihin ehdotettuja lämmöntalteenottoteknologioita sekä niillä saavutettavia energiasäästöjä. Työkalua on hyvä vielä testata oleviin lämmöntalteenottokohteisiin ja verrata antaako se saman teknologian tulokseksi kuin kohteeseen on valittu ja onko energiasäästö laskelmat samansuuntaisia kuin toteutuneet.

Teollisuudessa syntyy paljon hukkalämpöä ja teollisuuden hukkalämmöntalteenotot ovat paljon tutkittu aihe. Tutkimuksessa onnistuttiin hyvin rajaamaan lähdeaineistoa ja ottamaan mukaan uusimmat ja olennaisimmat tutkimukset. Työkalussa teknologian valinta perustuu pääosin tutkimuksista kerättyihin tietoihin eikä laitevalmistajien dataa ole hyödynnetty. Tämä tulisi huomioida lämmöntalteenottoselvityksen edetessä ja ottaa laitetoimittajat mukaan mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, jotta tuloksia voidaan tarvittaessa päivittää. Mahdollisuuksien mukaan kerätyllä datalla voidaan myös päivittää työkaluun syötettyjä teknologioiden ominaisuuksia.

Lähteet

Agathokleous R, Bianchi G, Panayiotou G, Arestia L, Argyrou MC, Georgiou GS, Tassou SA, Jouhara H, Kalogirou SA, Florides GA, Christodoulides P (2019) Waste Heat Recovery in the EU industry and proposed new technologies. Energy Procedia 161: 489–496.

Alfa Laval (2019) Alfa Lavalin Hitsatut Spiraalilämmönvaitimet Tuote-esite.

Anastasovski A, Rasković P, Guzović Z (2020) A review of heat integration approaches for organic rankine cycle with waste heat in production processes. Energy Conversion and Management 221: 113175.

Astolfi M, Lasala S, Macchi E (2017) Selection Maps For ORC And CO2 Systems For Low-Medium Temperature Heat Sources. Energy Procedia 129: 971–978.

Atienza-Márquez A, Bruno JC, Coronas A (2019) Recovery and Transport of Industrial Waste Heat for Their Use in Urban District Heating and Cooling Networks Using Absorption Systems. Applied Sciences 10(1): 291.

Bashmakov IA, L.J. Nilsson, A. Acquaye, C. Bataille, J.M. Cullen, S. de la Rue du Can, et al., (2022) Industry. in IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. Van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (Eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Becker B, Gil-Bardaji ME, Durant J, Clerens P, Noe M, (2017) Joint EASE/EERA Recommendations for a European energy storage technology development roadmap 2017 update. The European Association for Storage of Energy (EASE), The European Energy Research Alliance, (EERA).

Broberg Viklund S, Johansson MT (2014) Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO2 emission reduction. Energy Conversion and Management 77: 369–379.

Brückner S, Liu S, Miró L, Radspieler M, Cabeza LF, Lävemann E (2015) Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. Applied Energy 151: 157–167.

Cabeza L (2015) Introduction to Thermal Energy Storage (TES) Systems. Elsevier.

Cabeza L (2012) 3.07 - Thermal Energy Storage. In: Sayigh A (ed) Comprehensive Renewable Energy. Oxford: Elsevier, 211–253.

Calefa HotLevel® -Kuumalämpöpumppu Mullisti Energiantuotannon. [Verkkosivu]. [Viitattu 7.5.2022] Saataviss: https://www.calefa.fi/hotlevel/#.

Champier D (2017) Thermoelectric generators: A review of applications. Energy Conversion and Management 140: 167–181.

Chowdhury JI, Hu Y, Haltas I, Balta-Ozkan N, Matthew GJ, Varga L (2018) Reducing industrial energy demand in the UK: A review of energy efficiency technologies and energy saving potential in selected sectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews 94: 1153–1178.

Connolly D, Mathiesen BV, Østergaard PA, Möller B, Nielsen S, Lund H, Trier D, Persson U, Nilsson D, Werner S (2013) Heat Roadmap Europe 2. Second Pre-Study for the EU27. Department of development and Planning, Aalborg University.

Danfoss SONDEX-Spiraalilämmönsiirtimet. [Verkkosivu]. [Viitattu 13.4.2022]. Saatavissa: https://www.danfoss.com/fi-fi/products/dhs/heat-exchangers/welded-heat-exchangers/sondex-spiral-heat-exchangers/#tab-overview.

Deng J, Wang RZ, Han GY (2011) A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems. Progress in Energy and Combustion Science 37(2): 172–203.

Dominković DF, Ćosić B, Bačelić Medić Z, Duić N (2015) A hybrid optimization model of biomass trigeneration system combined with pit thermal energy storage. Energy Conversion and Management 104: 90–99.

Energiateollisuus ry (2021) Rakennusten Kaukolämmitys. Määräykset Ja Ohjeet. Julkaisu K1/2021. Energiateollisuus ry.

Energiateollisuus ry (2014) Rakennusten Kaukojäähdytys. Yhtenäiset Laatuvaatimukset, Suositukset Ja Ohjeet. Julkaisu J1/2014. Energiateollisuus ry.

Enescu D (2019) Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications. IntechOpen.

Fiaschi D, Manfrida G, Rogai E, Talluri L (2017) Exergoeconomic analysis and comparison between ORC and Kalina cycles to exploit low and medium-high temperature heat from two different geothermal sites. Energy Conversion and Management 154: 503–516.

Fierro JJ, Hernández-Gómez C, Marenco-Porto CA, Nieto-Londoño C, Escudero-Atehortua A, Giraldo M, Jouhara H, Wrobel LC (2022) Exergo-economic comparison of waste heat recovery cycles for a cement industry case study. Energy Conversion and Management: X 13: 100180.

Fischedick M., J. Roy, A. Abdel-Aziz, A. Acquaye, J.M. Allwood, J.-P. Ceron, Y. Geng, H. Kheshgi, A. Lanza, D. Perczyk, L. Price,E. Santalla, C. Sheinbaum, and K. Tanaka, 2014: Industry. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer,O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Fleiter T, Manz P, Neuwirth M, Mildner F, Persson U, Kermeli K, Crijns-Graus W, Rutten C (2020) Documentation on excess heat potentials of industrial sites including open data file with selected potentials.

Gude VG (2015) Energy storage for desalination processes powered by renewable energy and waste heat sources. Applied Energy 137: 877–898.

Hammond GP, Norman JB (2014) Heat recovery opportunities in UK industry. Applied Energy 116: 387–397.

Iqbal MA, Rana S, Ahmadi M, Date A, Akbarzadeh A (2020) Experimental study on the prospect of low-temperature heat to power generation using Trilateral Flash Cycle (TFC). Applied Thermal Engineering 172: 115139.

Iqbal MA, Rana S, Ahmadi M, Date A, Akbarzadeh A (2019) Trilateral Flash Cycle (TFC): a promising thermodynamic cycle for low grade heat to power generation. Energy Procedia 160: 208–214.

Iqbal MA, Ahmadi M, Melhem F, Rana S, Akbarzadeh A, Date A (2017) Power Generation from Low Grade Heat Using Trilateral Flash Cycle. Energy Procedia 110: 492–497.

Isomursu A, Juntunen A, Särkelä T, Väänänen O, (2022) Hukkalämmön Hyödyntäminen Teollisuudessa. Kyselytulosten koonti.

Jouhara H, Chauhan A, Nannou T, Almahmoud S, Delpech B, Wrobel LC (2017) Heat pipe based systems - Advances and applications. Energy 128: 729–754.

Jouhara H, Khordehgah N, Almahmoud S, Delpech B, Chauhan A, Tassou SA (2018) Waste heat recovery technologies and applications. Thermal Science and Engineering Progress 6: 268–289.

Khattab NM, El Shenawy ET (2006) Optimal operation of thermoelectric cooler driven by solar thermoelectric generator. Energy Conversion and Management 47(4): 407–426.

Koljonen T, Sipilä K, (1998) Uudemman Absorptiojäähdytystekniikan Soveltaminen Kaukojäähdytyksessä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT).

Laitinen A, Rämä M, Airaksinen M, (2016) Jäähdytyksen Teknologiset Ratkaisut. VTT. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Law R, Harvey A, Reay D (2016) A knowledge-based system for low-grade waste heat recovery in the process industries. Applied Thermal Engineering 94: 590–599.

Liu L, Wu J, Zhong F, Gao N, Cui G (2021) Development of a novel cogeneration system by combing organic rankine cycle and heat pump cycle for waste heat recovery. Energy 217: 119445.

Long R, Kuang Z, Li B, Liu Z, Liu W (2019) Exergy analysis and performance optimization of Kalina cycle system 11 (KCS-11) for low grade waste heat recovery. Energy Procedia 158: 1354–1359.

Loni R, Najafi G, Bellos E, Rajaee F, Said Z, Mazlan M (2021) A review of industrial waste heat recovery system for power generation with Organic Rankine Cycle: Recent challenges and future outlook. Journal of Cleaner Production 287: 125070.

Luca Tarantolo (2020) Johdanto Kylmälaitestandardiin EN 378. AREA - The Voice of European Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pump Contractors. Stig Rath.

Lun YHV and Tung SLD, (2020) Heat Pumps for Sustainable Heating and Cooling. Cham: Springer International Publishing.

Maaskola I, Kataikko M, (2014) Ylijäämälämmön Taloudellinen Hyödyntäminen. Lämpöpumppu- Ja ORC-Sovellukset. Motiva. Helsinki: Motiva Oy.

Macchi E and Astolfi M, (2017) Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications. Amsterdam, Netherlands: Woodhead Publishing.

Mäkelä V, Tuunanen J, (2015) Suomalainen Kaukolämmitys. Mikkelin ammattikorkeakoulu.

Marchionni M, Bianchi G, Tassou SA (2020) Review of supercritical carbon dioxide (sCO2) technologies for high-grade waste heat to power conversion. SN Applied Sciences 2(4).

Mateu-Royo C, Arpagaus C, Mota-Babiloni A, Navarro-Esbrí J, Bertsch SS (2021) Advanced high temperature heat pump configurations using low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery: A comprehensive study. Energy Conversion and Management 229: 113752.

Mateu-Royo C, Navarro-Esbrí J, Mota-Babiloni A, Amat-Albuixech M, Molés F (2018) Theoretical evaluation of different high-temperature heat pump configurations for low-grade waste heat recovery. International Journal of Refrigeration 90: 229–237.

Men Y, Liu X, Zhang T (2021) A review of boiler waste heat recovery technologies in the medium-low temperature range. Energy 237: 121560.

Miró L, Gasia J, Cabeza LF (2016) Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review. Applied Energy 179: 284–301.

Motiva (2020) Teollisuuden Energia-Analyysi. [Verkkosivu]. [Viitattu 20.6.2022]. Saatavissa: motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmustoiminta/tem_n_tukemat_energiakatselmukset/energiakatselmusmallit/teollisuuden_energia-analyysi.

Motiva (2019) Esiselvitys: Ylijäämälämmön Potentiaali Teollisuudessa. Motiva. Helsinki: Motiva Oy.

Nemati A, Nami H, Ranjbar F, Yari M (2017) A comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: A case study for CGAM cogeneration system. Case Studies in Thermal Engineering 9: 1–13.

Ogriseck S (2009) Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study. Applied Thermal Engineering 29(14): 2843–2848.

Oyedepo SO, Fakeye BA (2021) Waste heat recovery technologies: pathway to sustainable energy development. Journal of Thermal Engineering 7(1): 324–348.

Paloneva M, Takamäki S, (2020) Yhteenveto Toimialojen Vähähiilitiekartoista. Työ- ja elinkeinoministeriö. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö.

Papapetrou M, Kosmadakis G, Cipollina A, La Commare U, Micale G (2018) Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country. Applied Thermal Engineering 138: 207–216.

Rämä M, Klobut K, (2020) Hukkalämpö Kaukolämpöjärjestelmissä. VTT. Helsinki: VTT.

Sarkar J (2015) Review and future trends of supercritical CO2 Rankine cycle for low-grade heat conversion. Renewable and Sustainable Energy Reviews 48: 434–451.

Suomen virallinen tilasto (2022a) (SVT): Energia 2021. [Verrkoaineisto]. [Viitattu 6.4.2022]. Saatavissa: https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2021/alku.htm

Suomen virallinen tilasto (2022b) (SVT): Teollisuuden Energiankäyttö Toimialoittain. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.4.2022]. Saatavissa: https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__tene/statfin_tene_pxt_11wy.px/

Suomen virallinen tilasto (2020a) SVT: Teollisuuden Energiankäyttö [Verkkojulkaisu]. ISSN=1798-775X. 2020, Liitetaulukko 1. Teollisuuden Energiankäyttö Energialähteittäin

Vuonna 2020. Helsinki: Tilastokeskus. [Viitattu 3.11., 2022]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/tene/2020/tene_2020_2021-11-01_tau_001_fi.html.

Suomen virallinen tilasto (2020b) SVT: Sähkön Ja Lämmön Tuotanto [Verkkojulkaisu]. ISSN=1798–5072. 2020. Helsinki: Tilastokeskus. [Viitattu 11.3., 2022]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_tie_001_fi.html.

Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä (2016) Suuret Lämpöpumput Kaukolämpöjärjestelmässä. Energiateollisuus ry. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.6.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/993/Suuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf

Sweco (2022) Sweco. Transforming Society Together. Yritysesittelyn esitysmateriaali.

Thermal energy storage: technology brief (2013) Thermal Energy Storage: Technology Brief. IEA-ETSAP, Irena.

Varga Z, Palotai B (2017) Comparison of low temperature waste heat recovery methods. Energy 137: 1286–1292.

Wang Y, Tang Q, Wang M, Feng X (2017) Thermodynamic performance comparison between ORC and Kalina cycles for multi-stream waste heat recovery. Energy Conversion and Management 143: 482–492.

Woolley E, Luo Y, Simeone A (2018) Industrial waste heat recovery: A systematic approach. Sustainable Energy Technologies and Assessments 29: 50–59.

Xu Z, Wang R (2017) Absorption heat pump for waste heat reuse; current states and future development. Frontiers in Energy; Frontiers in Energy 11(4): 414–436.

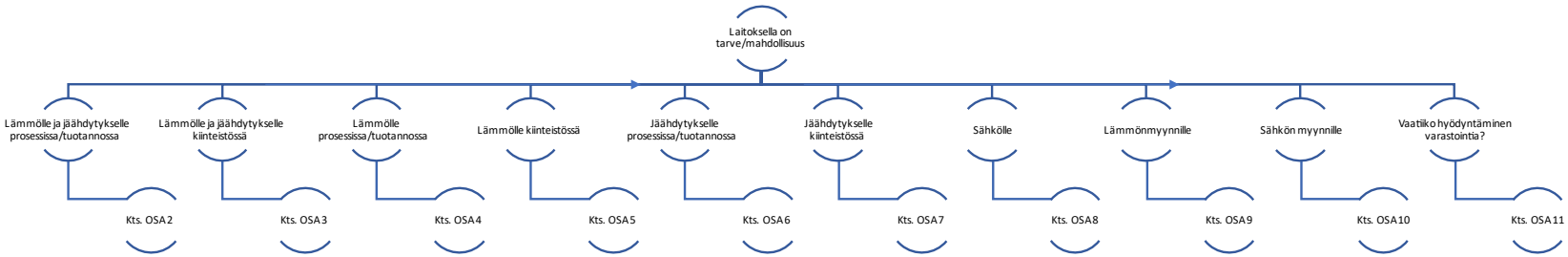
Yu H, Gundersen T, Feng X (2018) Process integration of organic Rankine cycle (ORC) and heat pump for low temperature waste heat recovery. Energy 160: 330–340.

Zeb K, Ali SM, Khan B, Mehmood CA, Tareen N, Din W, Farid U, Haider A (2017) A survey on waste heat recovery: Electric power generation and potential prospects within Pakistan. Renewable and Sustainable Energy Reviews 75: 1142–1155.

Zhang L, Wang Y, Feng X (2021) A Framework for Design and Operation Optimization for Utilizing Low-Grade Industrial Waste Heat in District Heating and Cooling. Energies (Basel) 14(2190): 2190.

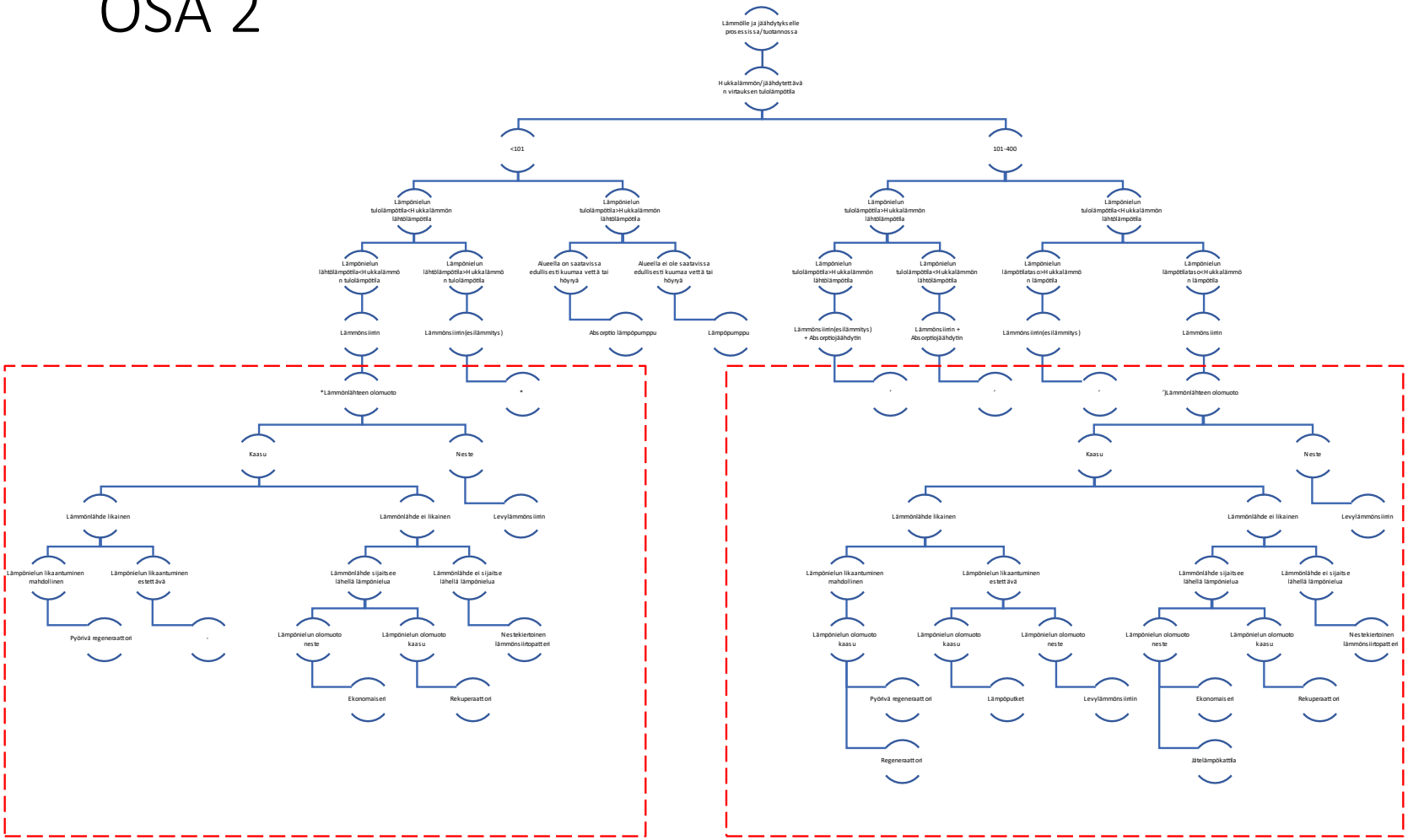
Zhang X, He M, Zhang Y (2012) A review of research on the Kalina cycle. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16(7): 5309–5318.

TEOLLISUUDEN LTOt – TYÖKALUN RAKENNE



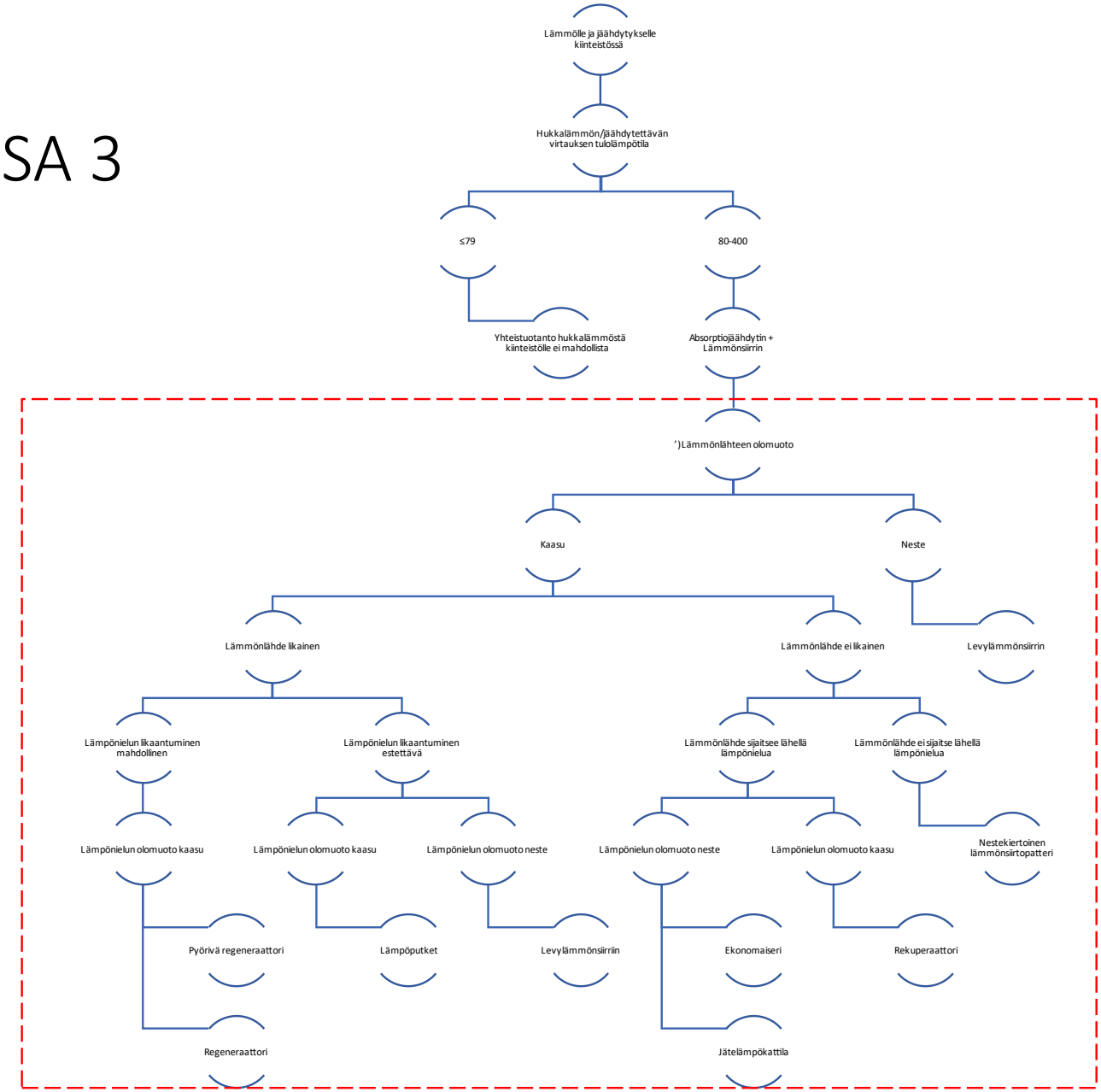
OSA 2

Rajattu pois työkalusta

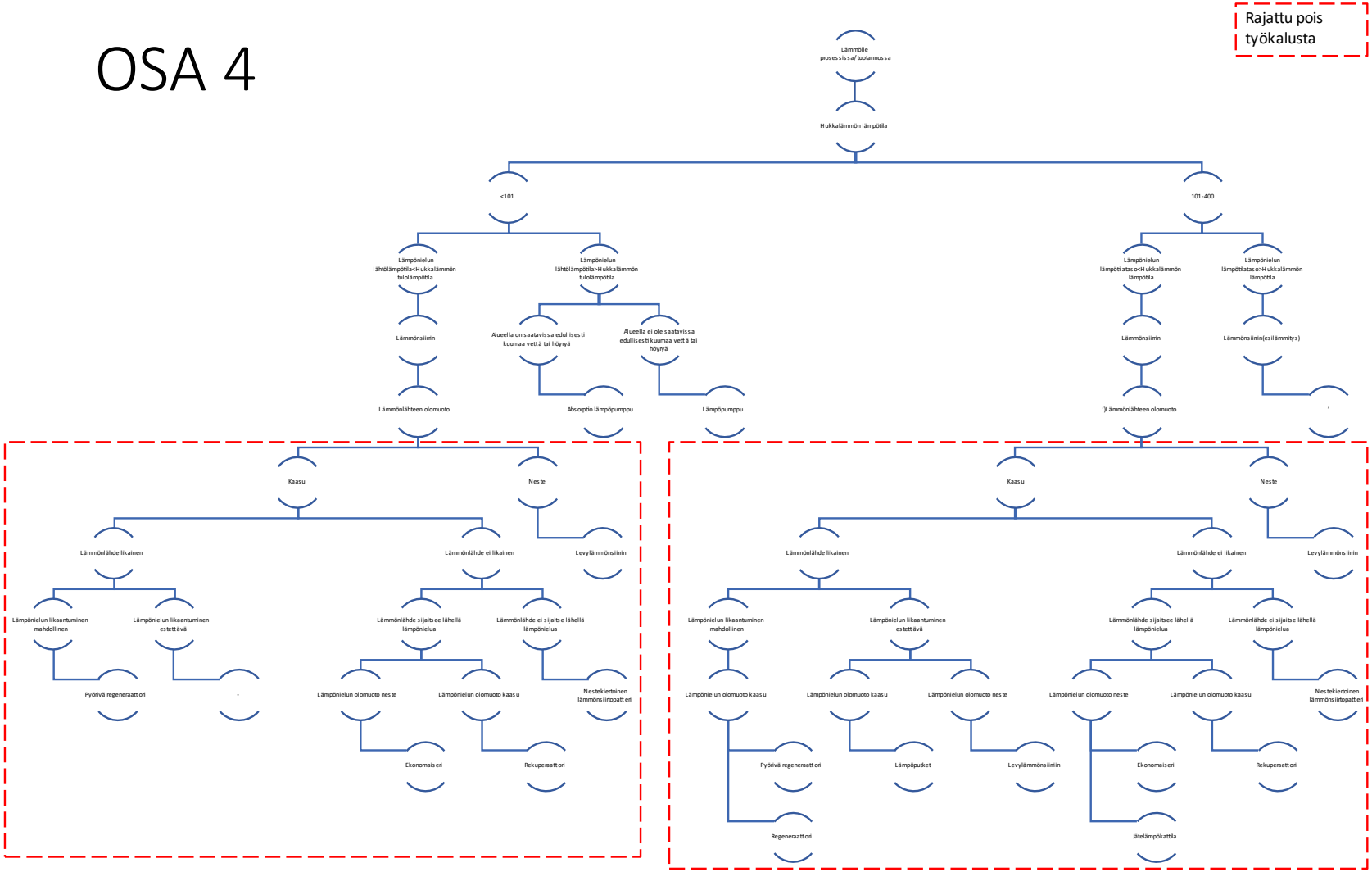


OSA 3

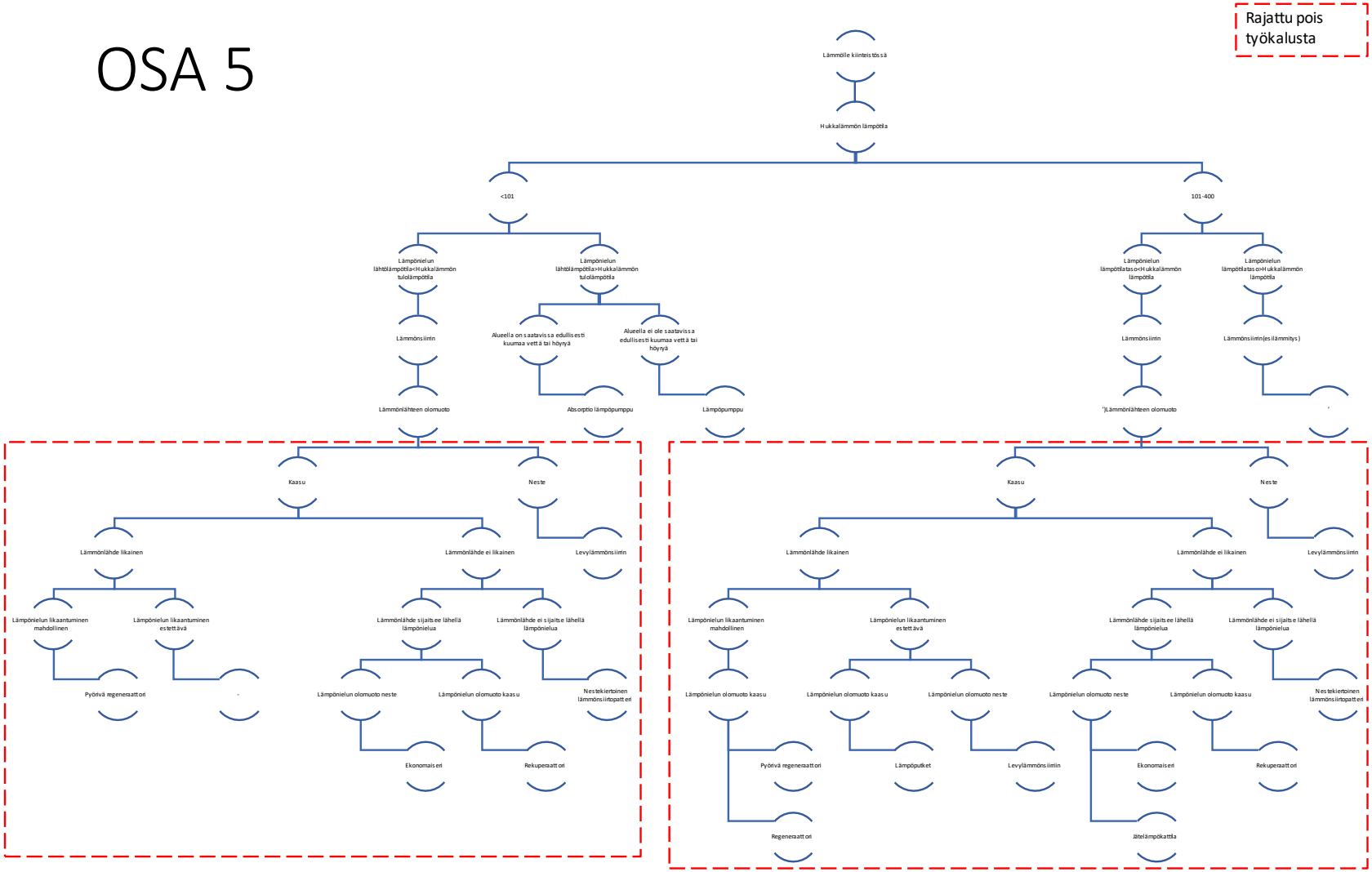
Rajattu pois
työkalusta



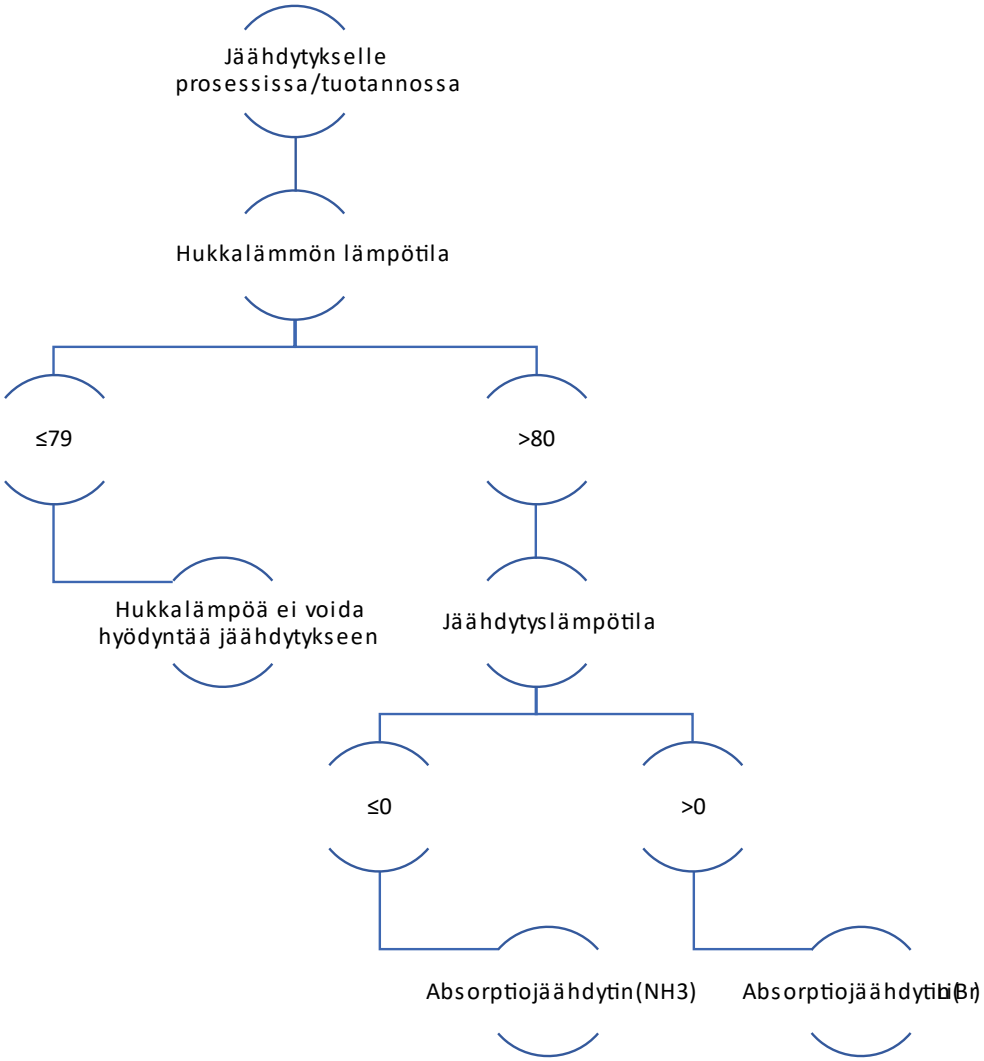
OSA 4


Rajattu pois
työkalusta
Lämmöile
prosessissa/tuotannossa
Hukkalämmön lämpötila
<101
101-400
Lämpönielun
lähtölämpötila<Hukkalämmön
tulolämpötila
Lämpönielun
lähtölämpötila>Hukkalämmön
tulolämpötila
Lämpönielun
lämpötilatas<Hukkalämmön
lämpötila
Lämpönielun
lämpötilatas>Hukkalämmön
lämpötila
Lämmönsiirtin
Alueella on saatavissa edullisesti
kuumaa vettä tai höyryä
Alueella ei ole saatavissa
edullisesti kuumaa vettä tai
höyryä
Lämmönsiirtin
Lämmönsiirtin(eslämmitys)
Lämmönlähteen olomuoto
Absorptio lämpöpumppu
Lämpöpumppu
?)Lämmönlähteen olomuoto
Kaasu
Neste
Kaasu
Neste
Lämmönlähde liikainen
Lämmönlähde ei liikainen
Levylämmönsiirtin
Lämmönlähde liikainen
Lämmönlähde ei liikainen
Levylämmönsiirtin
Lämpönielun likaantuminen
mahdollinen
Lämpönielun likaantuminen
estettävä
Lämmönlähde sijaitsee lähellä
lämpönielua
Lämmönlähde ei sijaitse lähellä
lämpönielua
Lämpönielun likaantuminen
mahdollinen
Lämpönielun likaantuminen
estettävä
Lämmönlähde sijaitsee lähellä
lämpönielua
Lämmönlähde ei sijaitse lähellä
lämpönielua
Pyörivä regeneraattori
-
Lämpönielun olomuoto neste
Lämpönielun olomuoto kaasu
Nestekiertoinen
lämmönsiirtopatteri
Lämpönielun olomuoto kaasu
Lämpönielun olomuoto kaasu
Lämpönielun olomuoto neste
Lämpönielun olomuoto neste
Lämpönielun olomuoto kaasu
Nestekiertoinen
lämmönsiirtopatteri
Ekonomaiseri
Rekuperaattori
Pyörivä regeneraattori
Lämpöputket
Levylämmönsiirtin
Ekonomaiseri
Rekuperaattori
Regeneraattori
Jätelämpökattila

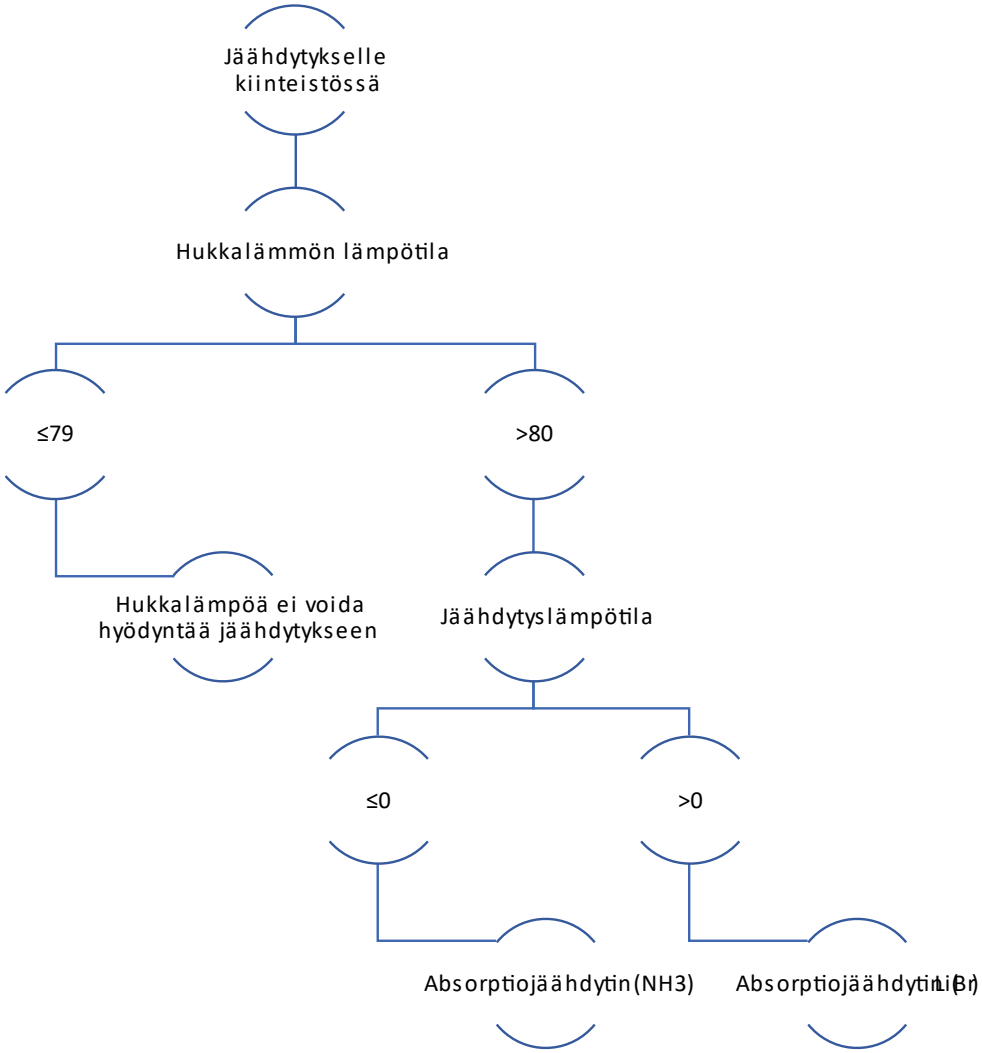
OSA 5


Rajattu pois
työkalusta
Lämmölle kiinteistössä
Hukkalämmön lämpötila
<101
101-400
Lämpönielun lähtölämpötila<Hukkalämmön tulolämpötila
Lämpönielun lähtölämpötila>Hukkalämmön tulolämpötila
Lämpönielun lämpötilatason<Hukkalämmön lämpötila
Lämpönielun lämpötilatason>Hukkalämmön lämpötila
Lämmönsiirtin
Alueella on saatavissa edullisesti kuumaa vettä tai höyryä
Alueella ei ole saatavissa edullisesti kuumaa vettä tai höyryä
Lämmönsiirtin
Lämmönsiirtin(ei lämmitys)
Lämmönlähteen olomuoto
Absorptio lämpöpumppu
Lämpöpumppu
?)Lämmönlähteen olomuoto
Kaasu
Neste
Kaasu
Neste
Lämmönlähde liikainen
Lämmönlähde ei liikainen
Levylämmönsiirtin
Lämmönlähde liikainen
Lämmönlähde ei liikainen
Levylämmönsiirtin
Lämpönielun liikaantuminen mahdollinen
Lämpönielun liikaantuminen estettävä
Lämmönlähde sijaitsee lähellä lämpönielua
Lämmönlähde ei sijaitse lähellä lämpönielua
Lämpönielun liikaantuminen mahdollinen
Lämpönielun liikaantuminen estettävä
Lämmönlähde sijaitsee lähellä lämpönielua
Lämmönlähde ei sijaitse lähellä lämpönielua
Pyörivä regeneraattori
-
Lämpönielun olomuoto neste
Lämpönielun olomuoto kaasu
Nestekiertoinen lämmönsiirtopatteri
Lämpönielun olomuoto kaasu
Lämpönielun olomuoto kaasu
Lämpönielun olomuoto neste
Lämpönielun olomuoto neste
Lämpönielun olomuoto kaasu
Nestekiertoinen lämmönsiirtopatteri
Ekonomaiseri
Rekuperaattori
Pyörivä regeneraattori
Lämpöputket
Levylämmönsiirtin
Ekonomaiseri
Rekuperaattori
Regeneraattori
Jätelämpökattila

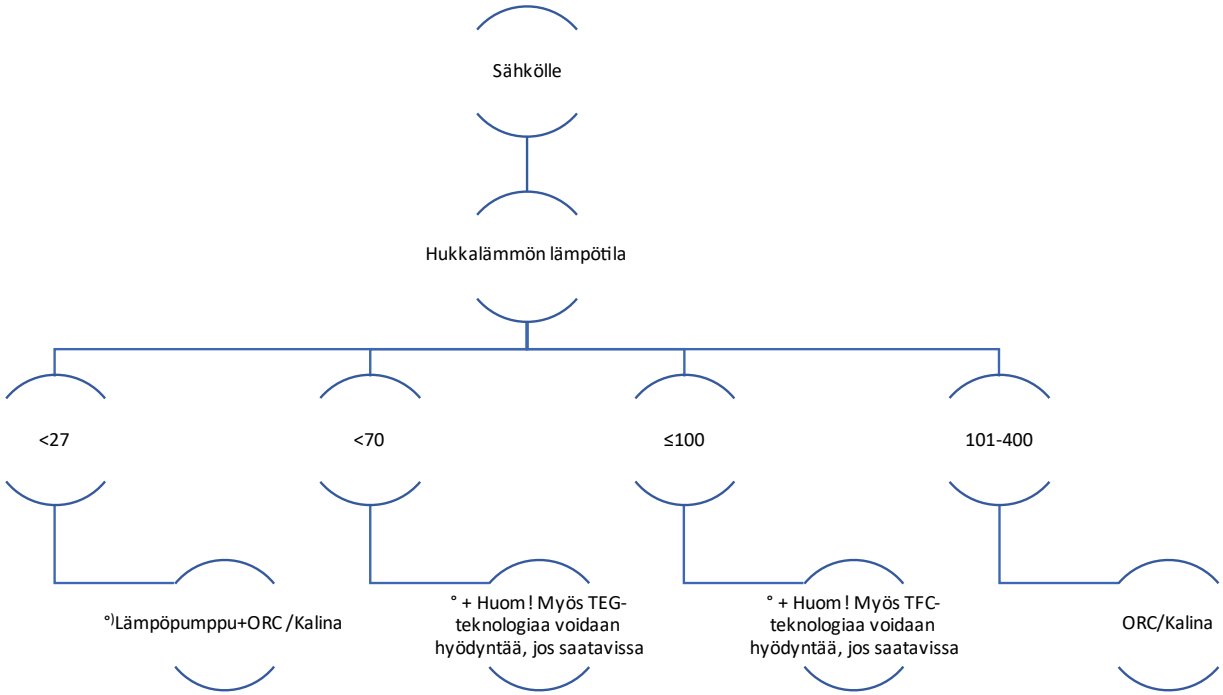
OSA 6


Jäähdytykselle prosessissa/tuotannossa
Hukkalämmön lämpötila
≤79
>80
Hukkalämpöä ei voida hyödyntää jäähdytykseen
Jäähdytyslämpötila
≤0
>0
Absorptiojäähdytin(NH3)
Absorptiojäähdytin(LiBr)

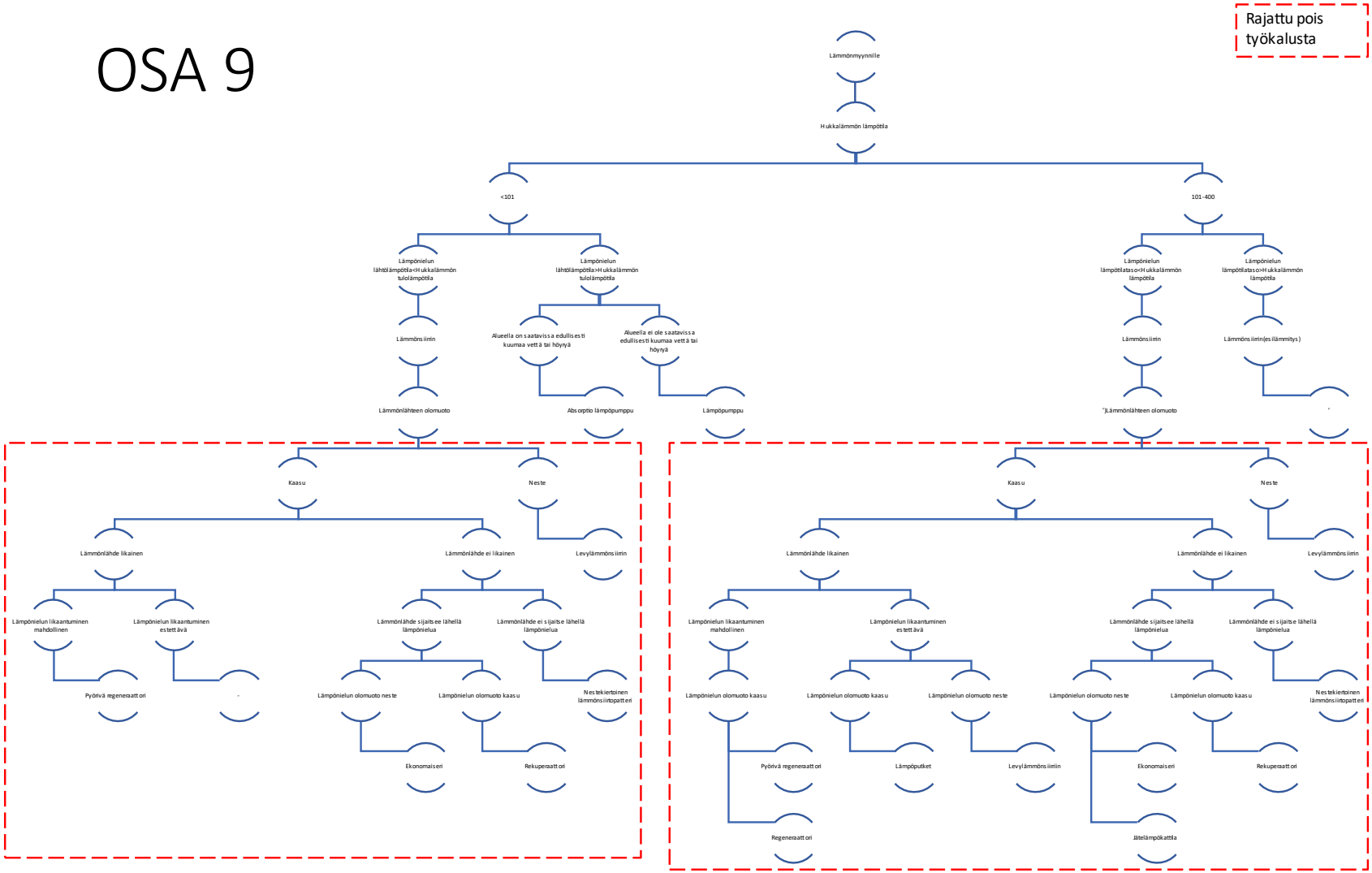
OSA 7


Jäähdytykselle kiinteistössä
Hukkalämmön lämpötila
≤79
>80
Hukkalämpöä ei voida hyödyntää jäähdytykseen
Jäähdytyslämpötila
≤0
>0
Absorptiojäähdytin (NH3)
Absorptiojäähdytin (LiBr)

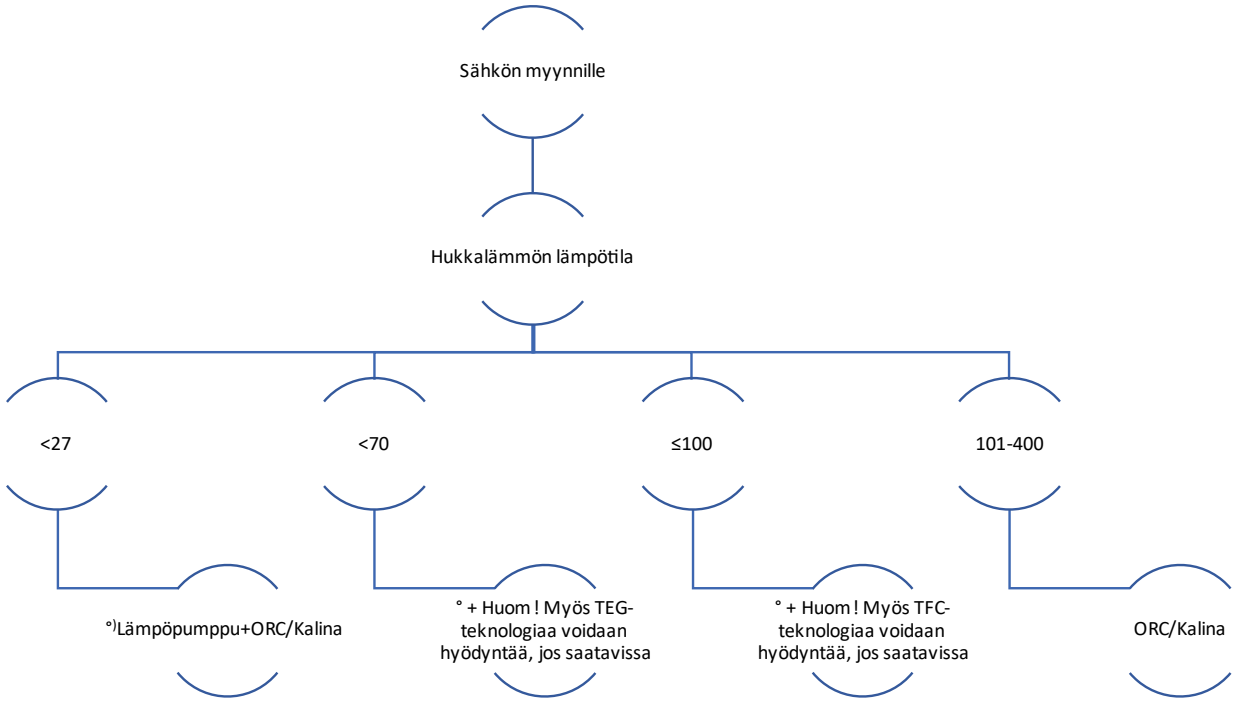
OSA 8


Sähkölle
Hukkalämmön lämpötila
<27
<70
≤100
101-400
°)Lämpöpumppu+ORC /Kalina
° + Huom ! Myös TEG-teknologiaa voidaan hyödyntää, jos saatavissa
° + Huom ! Myös TFC-teknologiaa voidaan hyödyntää, jos saatavissa
ORC/Kalina

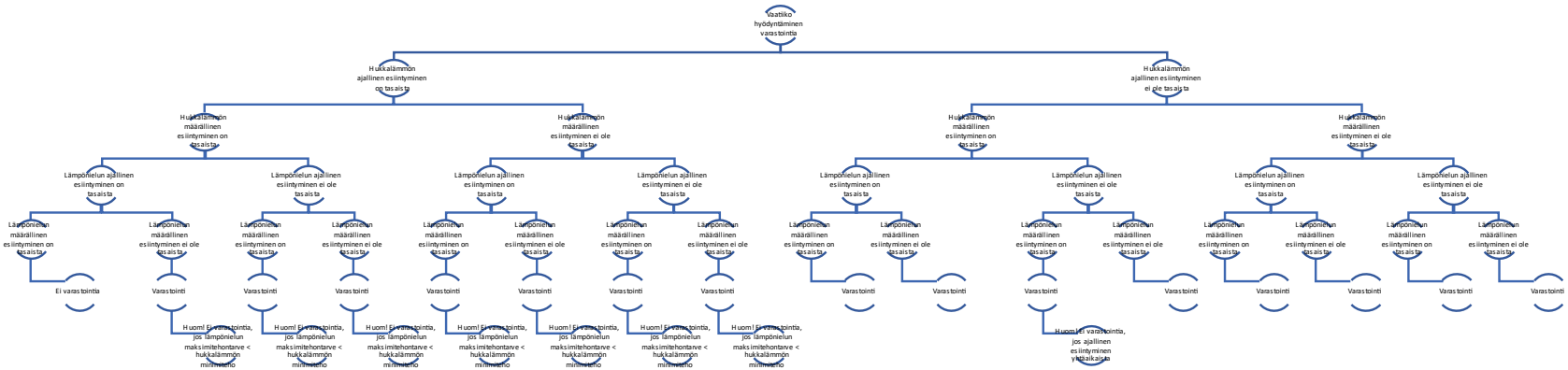
OSA 9


Rajattu pois
työkalusta
Lämmönmyynniile
Hukkalämmön lämpötila
<101
101-400
Lämpönielun lähtölämpötila<Hukkalämmön tulolämpötila
Lämpönielun lähtölämpötila>Hukkalämmön tulolämpötila
Lämpönielun lämpötilatasa<Hukkalämmön lämpötila
Lämpönielun lämpötilatasa>Hukkalämmön lämpötila
Lämmönsiirtin
Alueella on saatavissa edullisesti kuumaa vettä tai höyryä
Alueella ei ole saatavissa edullisesti kuumaa vettä tai höyryä
Lämmönsiirtin
Lämmönsiirtin(es.lämmitys)
Lämmönlähteen olomuoto
Absorptio lämpöpumppu
Lämpöpumppu
'|Lämmönlähteen olomuoto
Kaasu
Neste
Lämmönlähde likainen
Lämmönlähde ei likainen
Levylämmönsiirtin
Lämpönielun likaantuminen mahdollinen
Lämpönielun likaantuminen estettävä
Lämmönlähde sijaitsee lähellä lämpönielua
Lämmönlähde ei sijaitse lähellä lämpönielua
Pyörivä regeneraattori
Lämpönielun olomuoto neste
Lämpönielun olomuoto kaasu
Nestekiertoinen lämmönsiirtopatteri
Ekonomaiseri
Rekuperaattori
Lämpöputket
Regeneraattori
Jätelämpökattila

OSA 10


Sähkön myynnille
Hukkalämmön lämpötila
<27
<70
≤100
101-400
°)Lämpöpumppu+ORC/Kalina
° + Huom ! Myös TEG-teknologiaa voidaan hyödyntää, jos saatavissa
° + Huom ! Myös TFC-teknologiaa voidaan hyödyntää, jos saatavissa
ORC/Kalina

OSA 11



Huom! Jos lämpönielun minimitehontarve > hukkalämmön maksimiteho -> ei varastointia

Syötettävät
Avustavat/Laskenta
TULOKSET

HUKKALÄMMÖNLÄHDE

Ominaisuus	Lämmönlähde	Yksikkö
Virtaava aine		
Ajallinen esiintyminen tasaista		
Määrällinen esiintyminen tasaista		
Prosessin vuosittainen käyntiaika		h/v
Etäisyys LTOsta		m
Prosessiin tulolämpötila		°C
	273,15	K
Prosessista lähtölämpötila		°C
	273,15	K
Ympäristön lämpötila		°C
	273,15	K
Virtaavan aineen määrä		m3/h
Tilavuusvirtaus	0,0000	m3/s
Paine		bar
	.	Pa
Ominaislämpökapasiteetti	lisää arvo	kJ/kgK
Tiheys	lisää arvo	kg/m3
Viskositeetti		
Onko laitoksella saatavilla yli 80 C vettä tai höyryä		

LTO-teknologia

Laitoksella on tarve/kiinnostusta/mahdollisuus:	Vastaus	Teknologia
Lämmölle ja jäähdytykselle prosessissa/tuotannossa		-
Lämmölle ja jäähdytykselle kiinteistössä		-
Lämmölle prosessissa/tuotannossa		-
Lämmölle kiinteistössä		-
Jäähdytykselle prosessissa/tuotannossa		-
Jäähdytykselle kiinteistössä		-
Sähkölle		-
Lämmönmyynnille		-
Sähkönmyynnille		-

VARASTOINTIteknologian tarve

Kohde johon hukkalämpö hyödynnetään:	Esiintyykö hukkalämpö ja lämpönielu samanaikaisesti	Lämmönvarastointi teknologia
Lämmitykseen ja jäähdytykseen prosessissa/tuotannossa		-
Lämmitykseen ja jäähdytykseen kiinteistössä		-
Lämmitykseen prosessissa/tuotannossa		-
Lämmitykseen kiinteistössä		-
Jäähdytykseen prosessissa/tuotannossa		-
Jäähdytykseen kiinteistössä		-
Sähköntuotantoon		-
Lämmönmyyntiin		-
Sähkönmyyntiin		-

TEHO JA ENERGIAMÄÄRÄ

Sarake1	Lämpöteho [kW]	Energiamäärä [MWh/v]	Carnot	Eksergiavirta [MWh/v]
Lämmönlähde (hyödynnettävissä)	#ARVO!	#ARVO!	0,00	#ARVO!
Olevan jäähdytyksen energiankulutus				
Oleva kiinteistön jäähdytys				
Oleva kiinteistön lämmitys				

Lämpönielu (tarvittava)	Lämpöteho [kW]	Energiamäärä [MWh/v]	Ostoenergia [MWh/v]	Energiansäästö [MWh/v]
Lämmölle ja jäähdytykselle prosessissa/tuotannossa	#ARVO!	#ARVO!	#ARVO!	**#ARVO!**
Lämmölle ja jäähdytykselle kiinteistössä	#ARVO!	#ARVO!	#ARVO!	**#ARVO!**
Lämmölle prosessissa/tuotannossa	#ARVO!	#ARVO!	#ARVO!	**#ARVO!**
Lämmölle kiinteistössä	#ARVO!	#ARVO!	#ARVO!	**#ARVO!**
Jäähdytykselle prosessissa/tuotannossa	#ARVO!	#ARVO!	#ARVO!	**#ARVO!**
Jäähdytykselle kiinteistössä	#ARVO!	#ARVO!	#ARVO!	**#ARVO!**
Sähkölle	#ARVO!	#ARVO!	#ARVO!	**#ARVO!**
Lämmönmyynti	#ARVO!	#ARVO!	#ARVO!	**#ARVO!**
Sähkön myynti	#ARVO!	#ARVO!	#ARVO!	**#ARVO!**

Teknologiat:	Hyötysuhde	COP_H	COP_C	COP_{HC}
Lämmönsiirrin	1,00			
Lämmönsiirrin(esilämmitys)	1,00			
Lämmönsiirrin+Abs.Jäähdytin(NH3)	1,00		0,73	
Lämmönsiirrin+Abs.Jäähdytin(LiBr)	1,00		0,73	
Lämmönsiirrin(esilämmitys)+Abs.Jäähdytin(NH3)	1,00		0,73	
Lämmönsiirrin(esilämmitys)+Abs.Jäähdytin(LiBr)	1,00		0,73	
Lämpöpumppu	1,00	5,05	1,55	2,55
Abs.Lämpöpumppu	1,00	1,60		
Abs.Jäähdytin(NH3)	1,00		0,73	
Abs.Jäähdytin(LiBr)	1,00		0,73	
Lämpöpumppu+ORC/Kalina	0,13	5,05		
ORC/Kalina	0,13			
Tuntuvan lämmön varasto	0,90			
Latenttilämpövarasto	0,83			

z

Huom, energiasäästöllä viitataan lämmöntalteenotolla saatavaan netto energiaan (hukkalämmön määrä * lämmöntalteenottoteknologian hyötysuhde - tarvittava ostoenergia)

Huomio! Numero 1	Jos lämmönlähteelle ei anneta prosessista lähtölämpötilaa, laskuri käyttää ympäristön lämpötilaa
Huomio! Numero 2	Lämpönielun lähtötiedot puutteelisia -> teknologian valinta ja energialaskurin tiedot virheellisiä
Huomio! Numero 3	Lämpönielu vaatii lisälämmitystä
Huomio! Numero 4	Jos ΦLN,min < ΦHL,max tai ΦLN,max < ΦHL,min -> ei varastointia
Huomio! Numero 5	Lämpötilan pysyvyys parantaa työkalun luotettavuutta
Huomio! Numero 6	Jos jäähdytys lämpötila yli 30 astetta voidaan käyttää ulkoilmaa
Huomio! Numero 7	Aiemmin käytetyn jäähdytyslaitteiston vaatima energia säästetään ja se voidaan huomioida energialaskurissa täyttämällä tiedot kohtaan
Huomio! Numero 8	Jos hukkalämpövirtaus liikaista, tiedot voi tarkentaa riveille 8-11

LÄMPÖNIELU																			
Ominaisuus	Lämmölle ja jäähdytykselle prosessissa/tuotannossa		Lämmölle ja jäähdytykselle kiinteistössä		Lämmölle prosessissa/tuotannossa		Lämmölle kiinteistössä		Jäähdytykselle prosessissa/ tuotannossa		Jäähdytykselle kiinteistössä		Sähkölle		Lämmönmynti		Sähkönmynti		**Yksikkö**
Virtaava aine																			
Ajallinen esiintyminen tasaista																			
Määrällinen esiintyminen tasaista																			
Prosessin vuosittainen käyntiaika																			h/v
Etäisyys LTOsta																			m
Prosessiin tulolämpötila																			°C
	273,15		273,15		273,15		273,15		273,15		273,15		273,15		273,15		273,15		K
Prosessista lähtölämpötila																			°C
	#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		K
Ympäristön lämpötila																			°C
	273,15		273,15		273,15		273,15		273,15		273,15		273,15		273,15		273,15		K
Virtaavan aineen määrä		m3/h		m3/h		m3/h		m3/s		m3/h		m3/s		m3/s		m3/s		m3/s	
Tilavuusvirtaus	0,00	m3/s	0,00	m3/s	0,00	m3/s	0,00	m3/s	0,00	m3/s	0,00	m3/s	0,00	m3/s	0,00	m3/s	0,00	m3/s	
Paine																			bar
	-		-		-		-		-		-		-		-		-		Pa
Ominaislämpökapasiteetti	lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		kJ/kgK
Tiheys	lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		lisää arvo		kg/m3
Viskositeetti																			
Tehontarve (laskenta)	#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		#ARVO!		kW
Tehotarve (annettu)																			kW
Huomautukset:	**Huom! Nro1**		**Huom! Nro1**		**Huom! Nro1**		**Huom! Nro1**		**Huom! Nro1**		**Huom! Nro1**		**Huom! Nro1**		**Huom! Nro1**		**Huom! Nro1**		

Huom! Numero 1 Laskuri tarvitsee joko tehon tai virtaavan aineen lämpötilat ja virtauksen

Huom! Numero 2 Lämpönielun kohdalle syötetään jäähdytyksen ja lämmityksen yhteenlaskettu tehontarve, kun hukkalämpöä hyödynnetään kiinteistön lämmitykseen ja jäähdytykseen

Syötettävät
Avustavat/Laskenta
TULOKSET