

# **Ratkaisuja virtalähteiden testauskuorman energiatehostamiseksi**

**Case Kemppe Oy**

## Tiivistelmä

Tekijä(t) Rajala, Miki	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2024
	Sivumäärä 33	
Työn nimi <b>Ratkaisuja virtalähteiden testauskuorman energiatehostamiseksi</b> Case Kemppi Oy		
Tutkinto Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan koulutus		
Toimeksiantajaorganisaatio Kemppi Oy		
Tiivistelmä <p>Työn tavoitteena on hankkia tietoa mahdollisuuksista hyödyntää Kempin tehtaalla virtalähteiden testauksessa syntyvästä lämmöstä käyttökelpoista sähköenergiaa ja vähentää tästä syntyvän energian hukkaa mahdollisimman tehokkaasti. Työn toimeksiantajana toimi Kemppi Oy.</p> <p>Työ käsittelee keinoja muuntaa virtalähteiden testauksessa käytettävien resistiivisten kuormien lämpöenergia takaisin sähköksi eri tavoilla. Lisäksi kiinnitetään huomiota mitä kerätylle sähköenergialle kannattaa tehdä, kannattaako tämä varastoida vai syöttää takaisin sähköverkkoon. Testauksen kulutettujen energia määriä seurattiin, jokaisella testauspisteellä erikseen, jotta saatiin selville, kuinka paljon energiaa mikäkin testauspiste kulutti.</p> <p>Tuloksena voidaan todeta, että hyötysuhteeltaan paras tapa on ehkäistä tilanne missä energiasta muodostuu lämpöä, tämä onnistuu regeneratiivisilla kuormilla. Näiden avulla energia saadaan syötettyä tehokkaasti takaisin sähköverkkoon. Tämän jälkeen jäljelle jäävän ylimääräisen lämmön muuntaminen sähköenergiaksi on vaikeaa toteuttaa kustannustehokkaasti. Tuotettu energia voidaan syöttää suoraan sähköverkkoon, tai luovuttaa akkuvarastoon, riippuen siitä kuinka suuren hyödyn laskee akkuvarastolle.</p>		
Asiasanat Hukkalämpö, akkuvarasto, energiatehokkuus		

## Abstract

Author(s) Miki Rajala	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2024
	Number of Pages 33	
Title of Publication <b>Solutions to increase energy efficiency in power supply testing loads</b> Case Kemppi Oy		
Name of Degree Bachelor of Engineering, Energy and Environmental Engineering		
Organization of the client Kemppi Oy		
Abstract <p>The goal of this thesis is to find solutions on the possibilities of utilizing the heat generated during the testing of the power supplies at the Kemppi's factory to produce usable electrical energy and to reduce the waste energy as efficiently as possible. The work was commissioned by Kemppi Oy.</p> <p>The work considers ways to convert the thermal energy of resistive loads used in power supply testing back into electricity in different ways. Attention is also paid to what to do with the collected electrical energy, whether it should be stored or fed back into the electrical grid. The amounts of energy consumed in testing were monitored separately at each test station to determine how much energy each consumed.</p> <p>In conclusion, the most efficient method is to prevent situations where energy turns into heat, which can be achieved with regenerative loads. By using these loads, energy can be efficiently fed back into the electrical grid. After that it is then difficult to convert the remaining excess heat into electricity in a cost-effective way. Depending on the assessed benefit of the battery storage, the generated energy can be transferred to battery storage or directly fed into the electrical grid.</p>		
Keywords Waste heat, Battery storage, Energy efficiency		

## Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet .....	6
1 Johdanto.....	1
2 Kemppe Oy.....	2
2.1 Kemppe.....	2
2.2 Kempein liiketoiminta.....	2
3 Nykyinen sähköön käyttö Kemppeillä .....	3
3.1 Käytetty sähkö tehtaalla .....	3
3.2 Hitsauskoneiden virtalähteiden testaus .....	3
4 Hukkalämmön talteenotto .....	5
4.1 ORC-järjestelmä.....	5
4.1.1 Toimintaperiaate.....	5
4.1.2 Työaineiden käyttäytyminen .....	6
4.1.3 ORC-järjestelmän tehostaminen.....	8
4.2 Seebeck ilmiö.....	9
4.2.1 TEG-laite .....	9
4.2.2 Tutkimuksia TEG-generaattoreiden Tehokkuudesta ja Tuotantokyvystä.....	10
4.3 Regeneratiivisen kuorman käyttö.....	12
4.4 Hukkalämmön varastointi lämpönä.....	13
5 Sähköön kerääminen Akkuihin.....	14
5.1 Akkuteknologia.....	14
5.2 Akkuvarastojen käyttöikä .....	14
5.3 Akkujen hallintajärjestelmät .....	15
6 Sähköön myynti .....	16
6.1 Tuotetun sähköön myynti sähköverkkoon.....	16
6.2 Sähköön hinta .....	16
7 Tutkimustavat .....	18
7.1 Mittauslaitteisto.....	18
7.2 IoT-mittaus .....	19
8 Tuloksia .....	20
8.1 Mittaustulokset .....	20
8.2 Haasteet.....	21
8.3 ORC-Järjestelmä.....	21
8.4 TEG-Järjestelmä .....	22
8.5 Mahdolliset ratkaisut ongelmiin.....	22

8.6	Regeneratiivinen kuorma ja kustannukset .....	23
9	Yhteenveto ja pohdinta .....	26

Liitteet

## Lyhenteet ja käsitteet

BMS	Akunhallintajärjestelmä hallitsee akkujen tilaa ja suojaa niitä.
GWP	Kertoo kuinka paljon lämpöenergiaa kasvihuonekaasu säilöö ilmakehään verrattuna hiilidioksidiin tietyn ajanjakson aikana
IoT	Internet of Things eli Esineiden internet, laitteet kytketään internettiin mihin nämä voivat syöttää ja ottaa vastaan tietoja
ISO	International Organization for Standardization, kansainvälinen standardointijärjestö
kW	Kilowatti
kWh	Kilowattitunti
MW	Megawatti
ODP	Otsonikatoamispotentiali, kertoo kuinka paljon aine heikentää otsonikerrosta.
ORC	Organic Rankine Cycle eli orgaaninen Rankinen kierto, Muuntaa lämpöenergiaa sähköenergiaksi orgaanista nestettä käyttäen.
TEG laite	Yksittäinen lämpösähkögeneraattori, Muuntaa lämmön suoraan sähköenergiaksi hyödyntäen kahden eri metallin välistä lämpöeroa.
TEG-moduuli	Koostuu useammasta TEG laitteesta, jotka on aseteltu isommaksi kokonaisuudeksi

# 1 Johdanto

Ilmastonmuutoksen ollessa yksi aikamme suurimmista haasteista tarvitsemme pieniäkin keinoja hidastamaan ja ehkäisemään sen vaikutuksia, jotta voimme varmistaa tuleville sukupolville kestävän ja rikkaan elinympäristön. Meidän on pidettävä huolta meidän nykyisistä resursseistamme ja niiden riittävydestä.

Yrityksille syntyy painetta toteuttaa energiatehokkaampia ratkaisuja Euroopan unionin ja valtioiden asettamien ja säättämien rajoitteiden sekä ohjeistuksien mukaisiksi. Tällaisia on esimerkiksi hiilineutraalisuus tavoitteisiin kuuluvat päästövähennystavoitteet, joita pyritään saavuttamaan tukien ja lakisäädöksiä avulla. Esimerkiksi Suomen tavoite on tällä hetkellä olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä ja tämän jälkeen tulevaisuudessa hiilinielujen pitäisi olla suuremmat kuin kasvihuonepäästöjen (Valtioneuvosto 2022, 68–71). Myös Kemppi on asettanut tavoitteeksi saavuttaa hiilineutraalisuus vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteisiin kuuluu muun muassa olla mukana rakentamassa vihreämpää Eurooppaa, tarjoamalla ekologisia ja teknisesti korkeaa laatuista tuotteita. (Ahti-Virtanen 2022)

Opinnäytetyön tavoitteena on kartoittaa ratkaisuja, joilla Kempin nykyisten hitsauskoneiden virtalähteiden testauksessa käytettävässä vastuskuormassa syntyvän hukkalämmön hyödyntämistä sähköntuotannossa tai vastaavasti vastuskuormasta syntyvä hukkalämmön syntyä voitaisiin ehkäistä mahdollisimman kustannustehokkaasti. Tehtaalla syntyvää hukkalämpöä halutaan lähtökohtaisesti lähteä hyödyntämään suoraan tehtaan omaan käyttöön.

Selvityksen kohteena oli tapoja muuntaa tätä hukkalämpöä sähköenergiaksi eritavoilla ja pohtia tämän energian varastoinnin mahdollisuuksia. Regeneratiivisten kuormien käytettäessä, mahdollisen ylijäämä lämpöenergian hyödyntämisen mahdollisuuksia sähköenergiaksi hukkalämmön ehkäisy ja tästä ylijäämän lämpöenergian mahdollinen muuntaminen käytettäväksi sähköenergiaksi.

## 2 Kemppe Oy

### 2.1 Kemppe

Kemppe Oy on suomalainen perheyryty, joka aloitti toimintansa vuonna 1949 Veljekset Kemppeinä Martti Kempin toimesta. Kemppe pyrkii olemaan hitsauksen suunnannäyttäjä ja yryty panostaakin vahvasti tutkimus- ja kehitystyöhön. Kemppe on tunnettu myös useita merkittävistä innovaatioista, kuten ensimmäisestä invertteritekniikalla toimivasta virtalähteestä, jonka se toi markkinoille vuonna 1977. 1993 Kemppe oli myös ensimmäinen hitsausalan yryty, joka siirtyi analogista hitsausteknologiasta digitaaliseen. Yryty onnistui myös saamaan ensimmäisenä hitsauskone valmistajana ISO 9001 laatusertifikaatin 1990-luvulla. Kempin innovatiivisen kehitystyön ansiosta yryty on laajentunut ja hyödyntänyt osaamista elektroniikka alalla. Kempin tuotekehityksen ansiosta on syntynyt Kempower, joka niittää mainetta sähköajoneuvojen latausratkaisujen tarjoajana. Kemppe Group on myös ilmoittanut suunnitelmastaan eriyttää Kemppe Oy:n elektroniikkaliiketoiminnan omaksi yhtiökseen. (Kemppe a.; Kemppe b.; Kempower 2021)

### 2.2 Kempin liiketoiminta

Kemppe keskittyy hitsauslaitteiden, -ohjelmistojen ja -tarvikkeiden suunnitteluun, valmistukseen. Kemppe valmistaa MIG/MAG-hitsauskoneita, TIG-hitsauskoneita sekä puikkohitsauskoneita. Nykypäivänä myös automaatio ja robotiikan lisääntyessä on Kempillä tarjota myös ratkaisuja näihin tarpeisiin. Ohjelmisto puolella hitsauksen seurantaan ja hallintaan liittyvät ohjelmistot ovat myös osa Kempin tuotevalikoimaa, ohjelmistot auttavat laadunvalvontaa ja hitsauksen optimoinnin. Kemppe myös tarjoaa hitsausvarusteita ja tarvikkeita, mitä hitsaamisessa tarvitaan. Kempin tuotteita käyttävät niin yrytykset kuin yksityiset harrastajat. Suurin osa Kempin valmistamista tuotteista menee vientiin. (Kemppe a.)

### 3 Nykyinen sähkön käyttö Kempillä

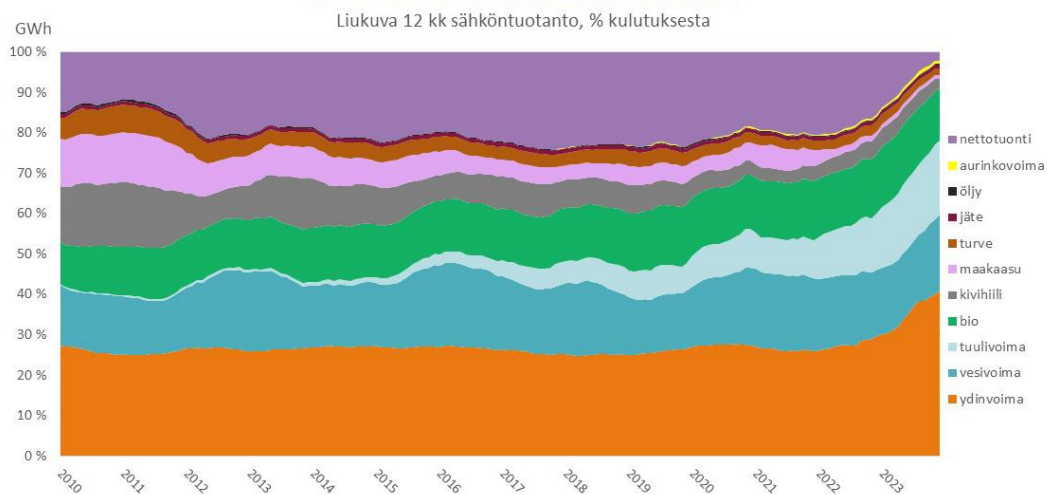
#### 3.1 Käytetty sähkö tehtaalla

Kemppi on asettanut tavoitteeksi saavuttaa hiilineutraalisuus vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteisiin kuuluu muun muassa olla mukana rakentamassa vihreämpää Eurooppaa, tarjoamalla ekologisia ja teknisesti korkealaatuisia tuotteita. (Ahti-Virtanen 2022.)

Kemppin käyttämä sähkö tulee sähköverkosta ja on lähes täysin puhdasta energiaa, mitä Kemppi ostaa sähköyhtiöltä (Takala 2023).

Suomessa sähkön tuotanto on kasvanut juuri tuulivoimaan tehtyjen investointien ja Olkiluoto 3:n käyttöönoton ansiosta. Tuulivoiman kapasiteetti on myös kasvanut huomattavasti, ylittäen 7000 MW:n rajan ja ydinvoiman osuus kulutuksesta on noussut 41 %:iin koko sähkönkulutuksesta. Vesivoiman ja aurinkovoiman tuotanto on myös kasvanut. Samalla fossiilisten polttoaineiden, kuten kivihiiilen ja turpeen käyttö on vähentynyt. Mikä on edistänyt päästöttömän sähköntuotannon osuuden kasvua. Tämän seurauksena hiilivapaan energian osuus kokonaistuotannosta on kasvanut 94 prosenttiin. (Energia.fi 2024.)

### Fossiiliset polttoaineet ja nettotuonti korvattu uusiutuvilla



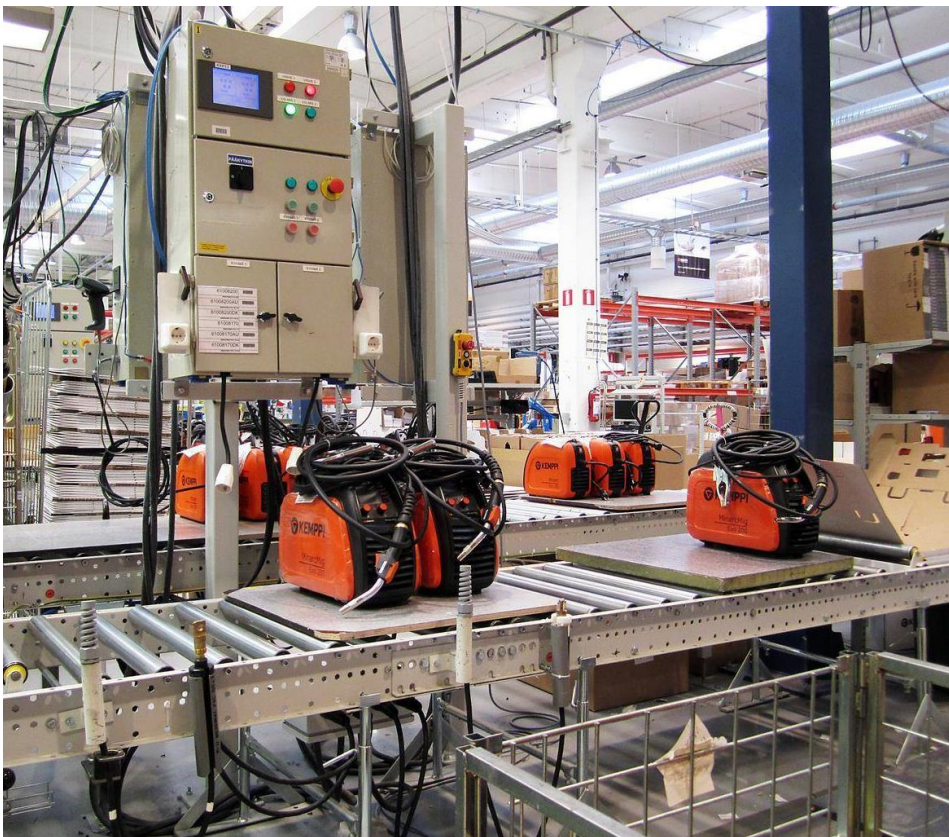
Kuvio 1. Energia lähteiden osuus Suomen sähköntuotannossa (Energia.fi 2024)

#### 3.2 Hitsauskoneiden virtalähteiden testaus

Jokaisella Kempin valmistamalla hitsauskone kokoluokalla on omat testauspisteensä, missä valmiiden hitsauskoneiden virtalähteet testataan linjaston lopussa. Kuviossa 1 näkyy

hitsauskoneiden testauspiste, missä hitsauskoneet odottavat tällä hetkellä testausta. Hitsauskoneiden virtalähteisiin syötetään virtaa ja virtalähteiden käyttämä teho ajetaan testuslaitteen vastuskuormaan, mikä muuntaa sähkön lämpöenergiaksi. Tapahtuma simuloi hitsauskoneella raskasta hitsaamista. Tästä prosessista syntynyt hukkalämpö ohjautuu vastuskuormasta katolle. Talvella osa tästä hukkalämpöenergiasta pystytään hyödyntämään tehtaan lisälämmityksessä.

Vastuskuormien keräämä lämpö kerääntyy tehtaan katon rajaan, missä vastuskuormat sijaitsevat. Nykyisten vastuskuormien ongelmana on kesäisin luotettavuus, vastuskuormat eivät kestä kaikkea lämpöä mitä nämä tuottavat yhdessä ja saattavat rikkoontua ennen aikaisesti.



Kuvio 2. Hitsauskoneiden testauspaikka (ESS Arkisto)

## 4 Hukkalämmön talteenotto

### 4.1 ORC-järjestelmä

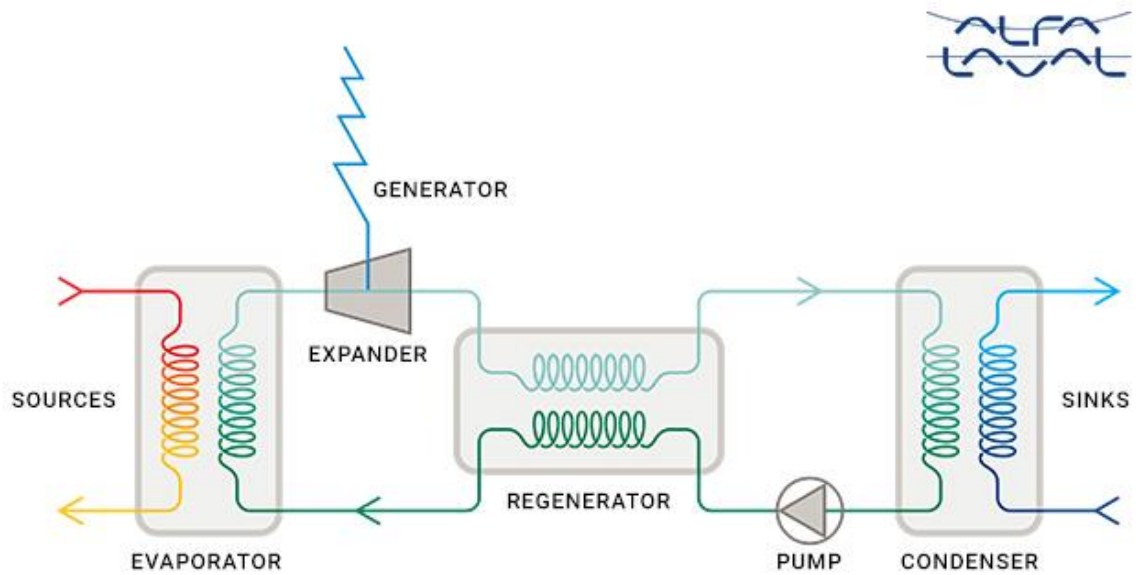
Organic Rankine Cycle- eli ORC-järjestelmä on termodynaaminen prosessi, jossa muissa prosesseissa kertynyt hukkalämpö muunnetaan sähköksi. Järjestelmä perustuu höyryturbiiniin, jossa kiertää veden sijaan orgaanista nestettä (DOE b).

Vettä alhaisemman kiehumispisteen ansiosta orgaaninen aine kykenee höyrystymään alhaisemmissa lämpötiloissa kuin vesi ja tämän ansiosta se soveltuu paremmin alhaisempien hukkalämpöisten kohteiden ratkaisuksi. Mitä suurempi lämpötilaero saadaan luotua ORC-järjestelmään, sitä paremmin järjestelmä tuottaa energiaa. Järjestelmän energialähteenä toimii lämpö missä tahansa muodossa, kunhan kyseessä on hukkalämpö ja sitä voidaan hyödyntää. (Againity 2022.)

Esimerkki tämän hetken matala tehoisesta ORC-järjestelmästä, joka toimii maksimi bruttosähköteholta 10 kWe. Kyseinen laite tarvitsevat 70–120°C hukkalämpöä ja 55–160 kWth lämpöenergiaa toimiakseen. Hukkalämmön kohteen pitäisi olla vettä, höyryä tai öljyä ja kyseisen järjestelmän sisällä työaineena käytettäisiin R1233zd kylmäainetta. (Enogia 2021.)

#### 4.1.1 Toimintaperiaate

ORC-prosessissa aine kiertää suljetussa järjestelmässä seuraavasti, kuten kuviossa 3 on kuvattu. Pumppu välittää työainetta haihduttajaan, haihduttajaa ennen voi järjestelmässä olla erilaisia tapoja kasvattaa työaineen lämpöä mitkä edesauttavat järjestelmän tehokkuutta. Haihduttaja on kytkettynä lämmönlähteeseen, jonka lämmön avulla työaine laajenee höyrystyen kaasuksi ja edeten järjestelmän sisällä, energianmuuntimelle eli esimerkiksi turbiinille, mikä tuottaa mekaanisesta energiasta sähköä. Työainetta voidaan hyötyä käyttää vielä tämän jälkeen esilämmityksessä, missä työaine vapauttaa lämpöenergiaa prosessin alkuvaiheeseen. Järjestelmässä kiertäneen työaineen lämpötila jäähdytetään lopuksi lauhduttimessa, jossa kaasu tiivistyy takaisin nesteeksi, minkä jälkeen siirtyy pumpulle ja jatkaa kiertoa. (DOE b.)



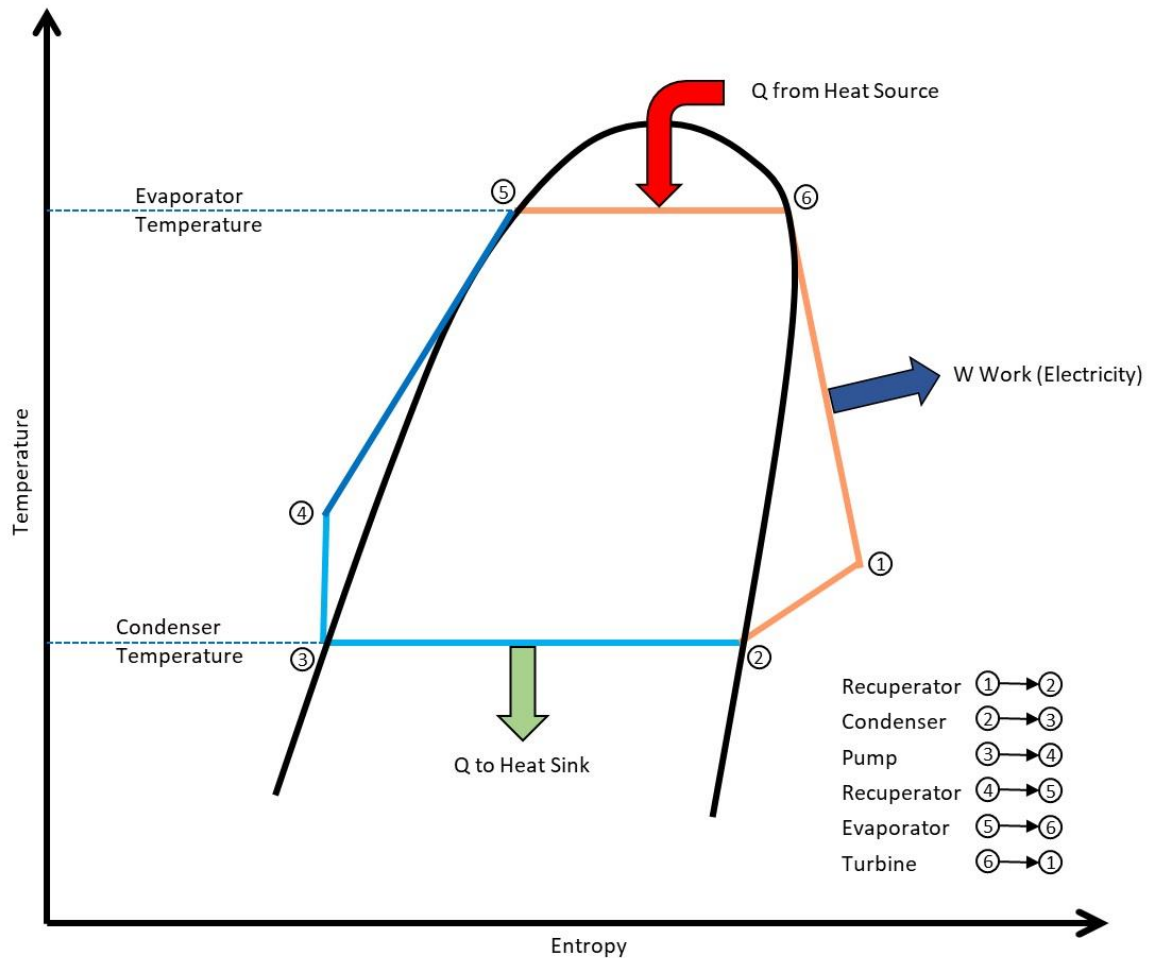
Kuvio 3. ORC-järjestelmän toiminta periaate havainnollistettuna (Alfa Laval)

#### 4.1.2 Työaineiden käyttäytyminen

Lämpötila-entropia-diagrammi eli T-s-diagrammi on termodynamiikassa käytettävä kuvaaja, jota käytetään termodynamiikassa kertomaan lämpötilan ja entropian muutoksia erilaisissa järjestelmissä, kuten esimerkiksi höyryvoima-, kaasuvoima- ja jäähdytysainekierroissa. T-s-diagrammi on tärkeä työkalu termodynaamisen prosessin analyysin ymmärtämisessä, sillä se esittää työaineen tilanmuutokset ORC-prosessissa eri vaiheissa, tämän avulla voidaan vertailla kuhunkin käyttökohteeseen tarvittavan työaineen soveltuvuutta. (Thermodynamics forum 2023)

Työaineiden kiehumispisteet vaihtelevat työaineiden välillä, ja sopiva työaine valitaan aineiden termodynaamisten ominaisuuksien, kuten kyllästysrajapinnan muodon perusteella, minkä voi havainnollistaa T-s-diagrammilla ja myös kuviossa 4 havainnollistetaan. (Mago ym. 2007)

Työaineen valinnassa keskeisiä kriteereitä ovat tyypillisesti termodynaamiset ja fysikaaliset ominaisuudet, kemiallinen vakaus toivotussa lämpötilavälillä, yhteensopivuus, ympäristövaikutukset, turvallisuus sekä tuotannon kustannukset, jotka sisältävät myös aineen saataisuuden. (Groniewsky & Imre 2018.)

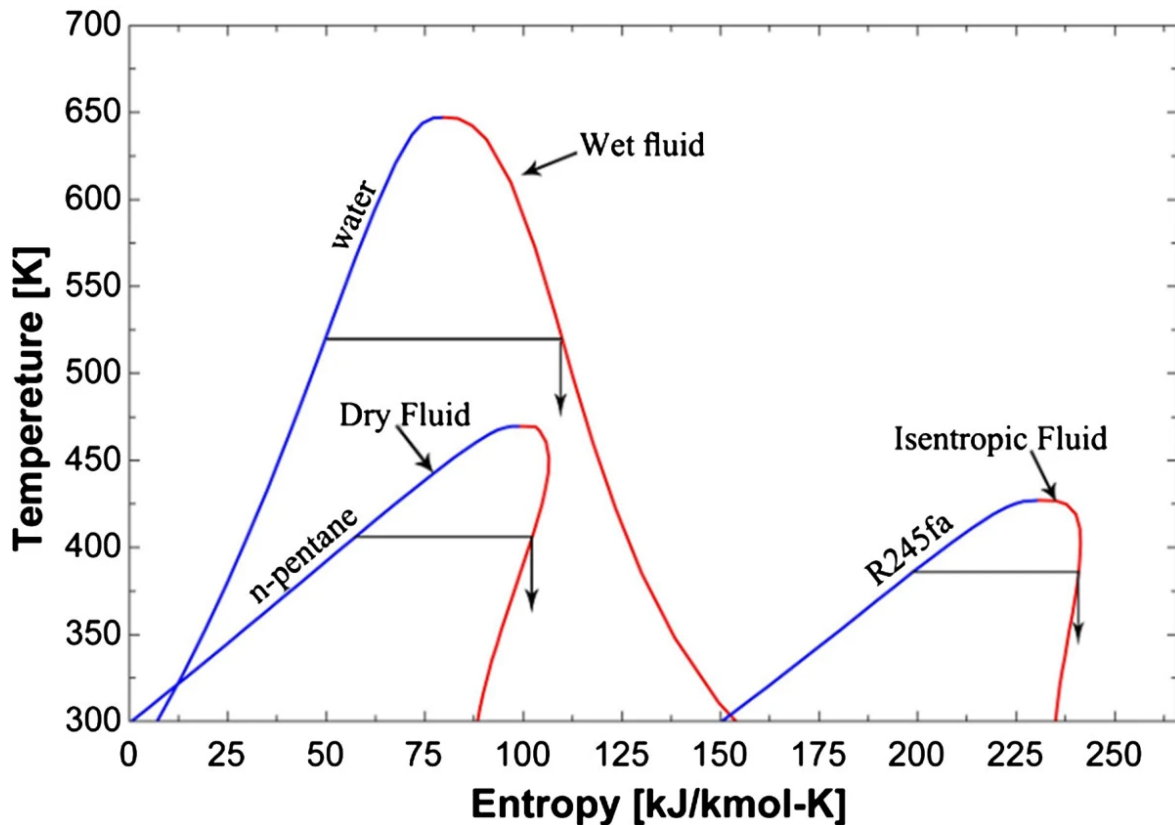


Kuvio 4. T-s-diagrammi ORC-prosessin kierrosta (DOE b.)

Järjestelmässä voidaan käyttää kolmea erityyppistä työainetta. Nämä määritellään kyllästysvesihöyryn käyrän kaltevuuden perusteella kosteisiin, kuiviin ja isentrooppisiin fluideihin, kuten kuviossa 5 on havainnointu. Näiden aineiden eroavaisuuksia entropiassa. Lähtökohteisesti isentrooppiset ja kuivat fluidit voidaan kuitenkin yhdistää. (Groniewsky & Imre 2018.)

Kun kyllästetty höyry laajenee ilman lämmön vaihtoa ympäristön kanssa (adiabaattisesti) ja ilman energiahäviöitä, päättyy kostea fluidi kaksifaasialueelle, missä aine on sekä nestemäisessä että kaasumaisessa muodossa samanaikaisesti. Tällaisissa tapauksissa turbiinista poistuva höyry sisältää merkittävän määrän pisaroita mikä aiheuttaa turbiinin lapojen kulumista, minkä takia kosteat fluidit ovat vähemmän houkutteleviksi matala-arvoisen hukkalämmön talteenotossa. Isentrooppiset ja erityisesti kuivat työaineet päätyvät pääasiassa ylikuumentuneelle alueelle, missä aine esiintyy vain kaasufaasissa ja aineen lämpötila ylittää kiehumispisteen vastaavassa painetilassa. Tämä voi kuitenkin lisätä tiivistysprosessin kuormitusta aineen jäähdytys vaiheessa. (Groniewsky & Imre 2018.)

Työnestettä ja jäähdytysnestettä valittaessa on tärkeää ottaa huomioon niiden jäätymispisteet, jotta voidaan varmistaa järjestelmän luotettavuus myös odottamattomissa olosuhteissa (Quoilin ym. 2013, 176).



Kuvio 5. Käytettävät työaineet esiintyvät 3 eri muodossa. (Bahrami ym. 2013)

#### 4.1.3 ORC-järjestelmän tehostaminen

Erilaisilla lisälämmitys ratkaisuilla on mahdollista tehostaa ORC-järjestelmän tehokkuutta.

Lisälämmitysjärjestelmät esimerkiksi rekuperaattori tai regeneraattori (kuten kuviossa 3) turbiinin ja jäähdyttimen välissä esilämmittävät kiertävää ainetta järjestelmässä ja voivat parantaa järjestelmän tehokkuutta hyötykäyttämällä järjestelmän omaa hukkalämpöä. Näitä on mahdollista yhdistellä ja käyttää useampia samassa järjestelmässä, jos järjestelmän tuottama lämpöenergia on riittävää. (Braumakis & Karellas 2018.)

Hukkalämmön ollessa huomattavan suurta on mahdollista käyttää samaa lämpöenergiaa esilämmittimenä järjestelmässä, tämä tapa parantaa järjestelmän lämmönsiirtokykyä, missä höyrytimessä jo käytettyä lämpöä ohjataan esilämmitykseen ja parannetaan näin

lämmönsiirron tehokkuutta. (Exergy.) Kun järjestelmässä käytettävän aineen tietty kynnyspaine ylitetään ei lisälämmitysjärjestelmä lisää järjestelmän tehokkuutta ja tällöin katoaa lisäjärjestelmän kustannuksia (Ventura & Rowlands 2015).

Järjestelmän toimivuuden kannalta on tärkeää, että tuotettu hukkalämpö pysyy mahdollisimman tasaisena, jotta kiertävä aine pysyy oikeassa koostumuksessa järjestelmän eri vaiheissa, mihin järjestelmä on optimoitu. (Xia ym. 2022)

Työaineiden valinnassa on hyvä ottaa huomioon myös aineiden otsonituhopotentiaali (engl. Ozone depletion potential) eli ODP-arvo ja ilmastonlämmityspotentiaali (engl. Global Warming Potential) eli GWP-arvo. Korkeat arvot omaavat työaineet saattavat joutua tulevaisuudessa käyttörajoitusten kohteeksi. Tämän vuoksi näiden käyttö ei välttämättä ole pitkällä tähtäimellä kustannustehokasta, koska mahdolliset tulevat rajoitukset voivat vaatia niiden korvaamista ympäristöystävällisemmillä vaihtoehdoilla. (Quoilin ym. 2013, 176.)

## 4.2 Seebeck ilmiö

Kyseessä on termosähköinen ilmiö, missä lämpötilaero kahden eri metallin tai puolijohde-materiaalin välillä luo jännitteen. Tämä ilmiö on perustana termoelementeille, joita käytetään esimerkiksi laajasti lämpötilan mittauksessa. Tärkeimmät ominaisuudet sähkön tuotolle Seebeck ilmiössä on Seebeck-kerroin, joka takaa, että materiaali tuottaa suuren jännitteen suhteessa lämpötilaeroon. Materiaalien sähkönjohtavuus on oltava hyvä, jotta jännitehäviöt pysyvät pieninä ja lopuksi on tärkeää, että valitulla materiaaleilla olisi matala lämmönjohtavuus, tämä auttaa ylläpitämään lämpötilaeroa, mikä on välttämätöntä jännitteen tuottamiseksi. (Hänninen 2016.)

### 4.2.1 TEG-laite

TEG-laite (engl. Thermoelectric Generator) eli Lämpösähköinen generaattori on puolijohde laite, joka kiinnittyy suoraan kiinni lämmön lähteeseen. Laite on kompakti eikä tämä sisällä liikkuvia osia. Tästä johtuen laite on myös luotettava ja pitkäikäinen, koska laitteessa ei ole kulumia osia. Laite vaatii huomattavan lämpötilaeron toimiakseen tehokkaasti ja tämä tarkoittaa, että laite vaatii mahdollisen jäähdytysratkaisun laitteen vastapuolelle lämmönlähteestä toimiakseen riittävän tehokkaasti. Jotta TEG laitteella kyettäisiin tuottamaan huomattava määrä sähköä, vaatii tämä useamman kappaleen laitteita luomaan moduulin. Laite itsessään on lähes täysin äänetön. (Thermoelectricsolutions.)

#### 4.2.2 Tutkimuksia TEG-generaattoreiden Tehokkuudesta ja Tuotantokyvystä

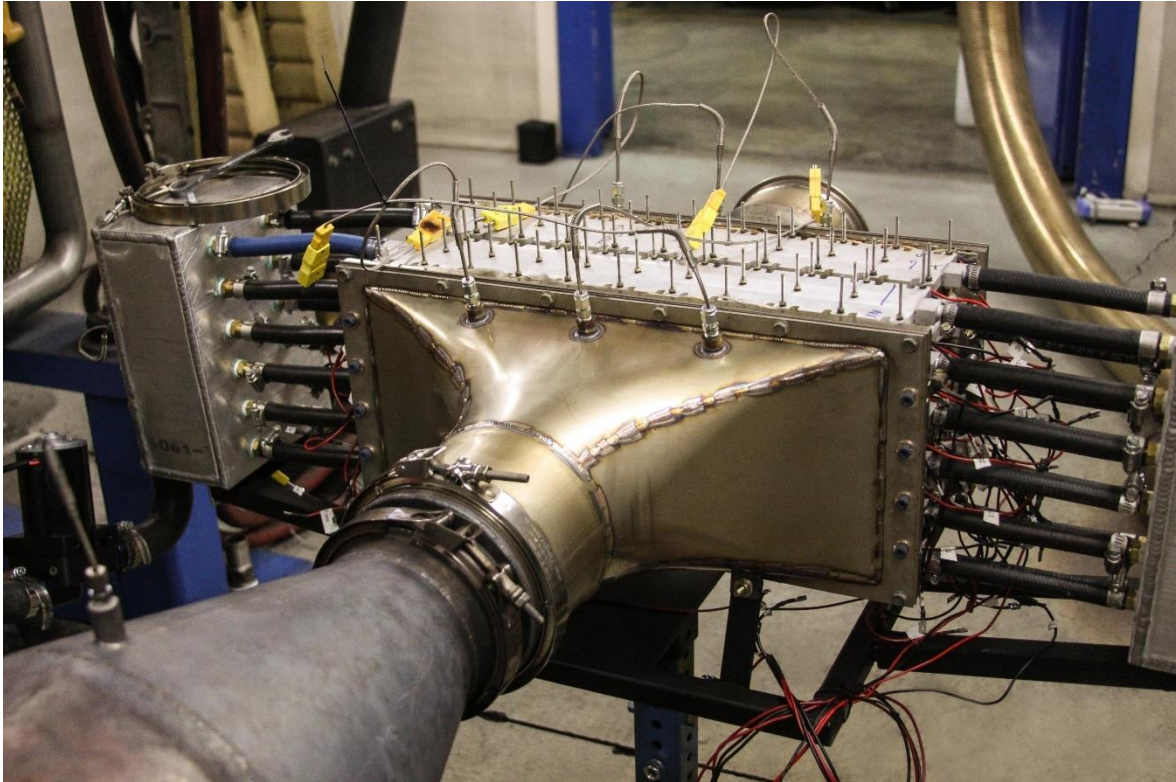
Puolalaisen AGH-yliopiston tutkijat toteavat, että nykyisten TEG generaattorien hyötysuhde on noin 5 % luokkaa, kohteen tuottamasta lämpöenergiasta. He tutkivat lämpötahnan, lämpötyynyn ja puristus jännityksen eroja TEG-generaattorin tuottavuuteen (Górszczak P., ym. 2023).

AltaRock Energyn ja Stanfordin yliopiston tutkijat tutkivat Bottle Rockin geotermisellä kentällä kehittämäänsä kuuden kerroksen TEG-moduulia. Tämä tuotti noin 500 W sähköä 152 °C:n lämpötilaerolla. Kyseisen moduulin yksittäinen TEG-laite kykeni tuottamaan noin 3,9 wattia tehoa kyseisellä lämpötilaerolla. (Li ym. 2022.)

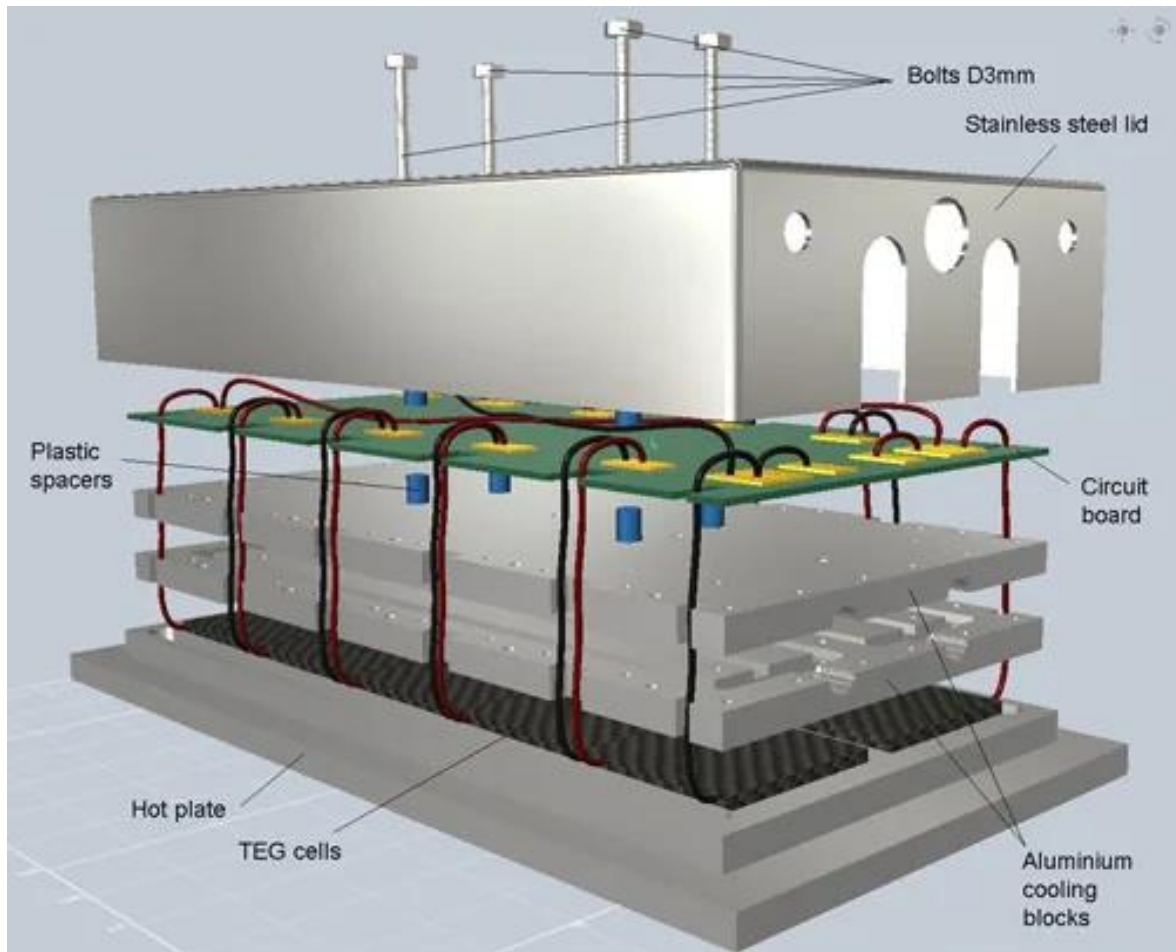
Kiinan Pekingin geotieteiden, Stanfordin yliopiston sekä AltaRock Energyn tutkijat kehittivät viisi kerroksisen TEG-moduulin, jonka läpi virtasi kylmä ja kuuma vesi. Kyseinen moduuli sisälsi 90 yksittäistä TEG-laitetta, ja tuotti 72,2°C lämpötila erolla 45,7W sähköä, yksittäinen TEG-elementti tuotti tällä lämpötilaerolla noin 0,51W. (Li ym. 2020.)

Useamman kerroksen TEG-moduuleissa kiertää lämmittäväneste taikka pakokaasu ja jäädyttäväneste useamman kerroksen läpi samanaikaisesti, mikä lisää moduulin hyötysuhdetta (Li ym. 2020). Kuvio 4:ssä TEG-moduulilla pyritään muuntamaan ajoneuvon pakokaasusta syntyvää hukkalämpöä sähköksi useampikerroksisella (Business Wire. 2014).

Kuviossa 6. Näkyy vaihtoehtoinen tapa millä jäädytinnestettä ohjataan viilentämään alumiinista jäädytin palikka. On kuitenkin huomioitava, että nesteiden pumppaamiseen kuluu myös energiaa mikä vaikuttaa laitteen hyötysuhteeseen.



Kuvio 6. Esimerkki miltä pakokaasun hukkalämmöllä toimiva TEG-moduuli näyttää. (Business Wire. 2014)



Kuvio 7. yksikerroksisen 10 TEG-generaattorin moduuli (Instructables 2012).

### 4.3 Regeneratiivisen kuorman käyttö

Perinteiset sähkökuormat muuntavat sähköenergian pääasiassa hukkalämmöksi, mitä jäähdytetään ilmalla tai vedellä. Erilaisten jäähdytysratkaisujen käyttö lisää myös käyttökustannuksia.

Tämän päivän regeneratiiviset kuormat kierrättävät yli 90 % käytetystä tehosta takaisin sähköverkkoon, tämä vähentää energiankulutusta ja hukkalämpöä merkittävästi. Tämä vähentää myös mahdollisten jäähdytysjärjestelmien käyttötarvetta. (Ni 2024)

Regeneratiiviset kuormat palauttavat testaukseen käytetyn energian takaisin verkkoon sen sijaan, että se muuttuisi sitä lämmöksi, mikä pienentää sähkönkulutuksesta aiheutuvia kustannuksia. Hukkalämmön vähentyessä myös jäähdytyksen tarve pienenee, mikä säästää lisäkustannuksia jäähdytysjärjestelmien ylläpidosta ja käytöstä. Perinteisiin kuormiin verrattuna regeneratiiviset kuormat tuovat merkittäviä säästöjä pitkällä aikavälillä. (Elektro-Automatik 2024)

Perinteisten vastuskuormien korvaaminen on mahdollista regeneratiivisilla kuormilla. Kemppe on testannut EA-ELR 10000 4U laitetta, joka kykenee toimimaan regeneratiivisena sähkökuormana hitsauskoneiden virtalähteiden testauksessa. Laite kykenee palauttamaan suurimman osan käytetystä DC-tehosta takaisin sähköverkkoon. Laitteen valmistaja lupaa, että jopa 96 % hukkalämmöksi joutuvasta energiasta voidaan siirtää takaisin sähköverkkoon AC-sähköksi. Kempillä tehdyissä omissa testeissä 30 kW regeeneratiivista kuormaa ajettiin 20 kW teholla. Tällä käyttöteholla hyötysuhde pysyi noin 93 % luokassa. (Kälviäinen 2024.)

Pienempien virtalähteiden testaaminen samalla regeneratiivisella kuormalla voi olla mahdollista, jos testattavat virtalähteet ovat saman tehoisia, eikä tästä synny häiriöitä. (Kälviäinen 2024.)

#### 4.4 Hukkalämmön varastointi lämpönä

Hukkalämpö voidaan varastoida kausivarastoihin, mihin lämpöenergiaa kerätään kesäkauna ja valjastetaan käyttöön talvikaudeksi. Kausivarastoja käytetään normaalisti aurinkoenergian ja teollisen hukkalämmön säilömiseen. Varastojen on oltava kooltaan huomattavan kokoisia, jotta lämpö säilyy varastossa eikä karkaa varastosta ennen hyödyntämistä. Järjestelmät sijaitsevat pääsääntöisesti maan alla ja käytettäviä varastointi tapoja maaperästä riippuen käytetään tavallisemmin porakaivokenttiä, pohjavesivarantoja ja kaivantovarastoja. Suomessa onnistunut kausilämpövarasto löytyy Finn Springin tehtaalta, missä tuotettu hukkalämpö varastoidaan ja hyötykäytetään talvikaudella toimistotilojen lämmittämiseen. Kyseisen lämpövaraston maksimilämpötila on 65 asteessa ja varaston energiateho on 100kw. (Motiva 2024; KS Geoenergi.)

## 5 Sähkön kerääminen Akkuihin

### 5.1 Akkuteknologia

Akkuteknologia on keskeinen tekijä teollisuuden siirtymässä kohti kestävämpää ja energia-  
tehokkaampaa tuotantoa. Energian varastointiratkaisut, kuten akkujärjestelmät mahdollis-  
tavat energian tehokkaamman hyödyntämisen teollisuuslaitoksissa. (VTT Research.)

Koko ajan kehitetään entistä tehokkaampia, kevyempiä, turvallisempia ja edullisempia ak-  
kuja, jotka on valmistettu kestävästi ja vastuullisesti hankituista materiaaleista. Akut ovat  
nykypäivänä jo keskeinen osa liikenteen sähköistymistä sekä tulevaisuuden energiajärjes-  
telmiä, joissa käyttäjät, kuten kotitaloudet ja yritykset, voivat itsenäisesti käyttää, varastoida  
ja myydä sähköä verkkoon akkuja hyödyntämällä. Esimerkiksi litiumioniakut ovat suosittuja  
sähköajoneuvoissa ja kiinteissä asennuksissa niiden hyvien ominaisuuksien ja kustannus-  
tehokkuuden vuoksi. (VTT Research.)

Sähkön tuotannossa on normaalia, että lyhyellä aikavälillä tuotettavan sähkön määrä on  
melko kiinteä, vaikka sähkön kysyntä vaihtelee vuorokauden aikana. Sähkövarastointitek-  
nologia auttaa tasaamaan tätä vaihtelua, sillä varastoitua sähköä voidaan käyttää huippu-  
kulutushetkinä. Akkutekniikka on erityisen hyödyllistä silloin, kun sitä käytetään paljon uu-  
siutuvan energian, kuten tuuli- ja aurinkovoiman kanssa, joiden tuotantoa ei voida suoraan  
säädellä. (DOE a.)

Akkuvarastoa voi myös hyötyä käyttää lataamalla suoraan verkkovirtaa, kun sähkö on hal-  
vimillaan. Energiaa voidaan taas tällöin käyttää silloin, kun sähkön hinta on korkeammalla.  
Tällä tavoin energiankustannuksia voidaan optimoida ja hyödyntää verkkovirtaa tehok-  
kaasti. Varastoidun energian käyttäminen on myös hyvä tapa ehkäistä mahdollisia sähkön  
saatavuuteen liittyviä epävarmuuksia, joita tulevaisuudessa voi syntyä. (Cactos.)

### 5.2 Akkuvarastojen käyttöikä

Litiumioniakut toimivat ionien liikkumisen varassa positiivisen ja negatiivisen elektrodin vä-  
lillä. Akun suorituskyky kuitenkin heikkenee ajan myötä johtuen latauskiertojen määrästä,  
lämpötilasta ja akun ajallisesta vanhenemisesta. (Batteryuniversity 2023.)

Nykyisin parhaiden akkujen kuten esimerkiksi sähköautoissa käytettävien akkujen kehitys  
on johtanut akkuihin, jotka kestävät jopa 5000 latauskiertoa. Akun lataussyklien määrä ei  
kuitenkaan ole ainoa käyttöiän määrittäjä, tähän vaikuttaa myös lataussyklien syvyys (engl.  
Depth of Discharge, DoD) vaikuttaa merkittävästi akun elinikään. Esimerkiksi, jos akkua  
ladataan vain 80 % maksimikapasiteetista ja puretaan 20 % ennen uudelleenlatausta, voi

akun elinikä moninkertaistua verrattuna täyteen lataukseen ja purkaukseen. (Batteryuniversity 2023.)

Litiumioniakut ovat myös herkkiä lämpötilalle. Korkea lämpötila nopeuttaa akkujen kapasiteetin vähenemistä ja lyhentää näiden elinikää. Valmistajat testaavat akkuja usein 25 °C lämpötilassa, mutta todellisissa käyttöolosuhteissa akkujen lämpötila voi nousta paljon korkeammaksi, mikä nopeuttaa kapasiteetin heikkenemistä. (Batteryuniversity 2023.)

Se kuinka suurella latausjännitteellä litiumioniakkuja ladataan vaikuttaa akkujenkäyttöikään. Latausjännitteen pienentämisellä voidaan pidentää akkujen käyttöikä. Esimerkiksi akkukennojen lataustehon tiputtaminen 4,20 voltista 4,10 volttiin voi pidentää latauskiertojen määrää 600–1000 sykliin. Jokainen 0,10 voltin pudotus latausjännitteessä voi kaksinkertaistaa akun kestoiän, tämä tosin vähentää samalla akun varastointikapasiteettia. (Batteryuniversity 2023.)

### 5.3 Akkujen hallintajärjestelmät

BMS (engl. Battery management system) eli Akkujen hallintajärjestelmää on tapa hallita ja valvoa akuston toimintaa. Hyvä hallintajärjestelmä on ehdoton etu akustolle, koska tämä parantaa akkujen käyttöikä ja turvallisuutta valvomalla niiden latausta, purkautumista ja yleistä kuntoa. Se myös suojaa akkuja mahdollisilta vahingoilta, jotka voivat johtua ylikuormituksesta tai muista riskitekijöistä. Parempien akkuhallintajärjestelmien avulla voidaan hoitaa automaattisesti akkujen lataaminen sähkön ollessa halvempaa ja sen purkamisesta käyttöön, kun sähkö on kalliimpaa. Hallintajärjestelmä voi myös kerätä ja analysoida tietoa eri lähteistä, kuten sääennusteista ja kiinteistön energiankulutuksesta, tuottaen päivittäin optimaalisia toimintaohjeita ilman käyttäjän jatkuvaa seuranta. (Cactos.)

## 6 Sähkön myynti

### 6.1 Tuotetun sähkön myynti sähköverkkoon

Sähkön syöttämisestä verkkoon pitää pyytää lupa paikalliselta sähköverkkoyhtiöltä, tämän takia kannattaa olla yhteydessä etukäteen ennen hankintoja paikalliseen sähköverkkoyhtiöön (Lahti energia). Myytäessä sähköä sähköverkkoon, sähköyhtiöiden välillä on eroja sähkön ostoehdoissa ja hinnoissa. Yleisesti pientuotannossa tuotettu sähkö vähennetään käytetystä sähköstä. Sähköverkosta käytetystä sähköstä on maksettava aina kuitenkin sähkön-siirtomaksu riippumatta siitä, kuinka paljon sähköä tuotetaan ja kulutetaan. Sähköyhtiöstä riippuen joutuu verkkoon syötetystä sähköstä maksamaan verkkopalvelumaksua, mikä on maksimissaan 0,07 snt/kWh. (Motiva 2024)

### 6.2 Sähkön hinta

Suomen pörssisähkön keskihinta nousi huomattavasti keskiarvoon nähden joulukuussa 2021 ja koko vuoden 2022 pörssisähkön keskimääräinen tuntihinta oli 18,74 snt/kWh. vuoden 2023 sähköhinta palautui lähemmäs totuttua normaalia ja oli tällöin 6,68 snt/kWh (Oma-voima.fi) tai lähteestä riippuen 7,02 snt/kWh (Jalli). Kyseiset hinnat on laskettu arvonlisäveron kanssa.

Sähkönhinnan huiput sijoittuvat usein arki-aamuihin ja alkuiltoihin, tällöin sähkön kulutus on tavallisesti korkeimmillaan ja tämän takia sähkön hinta voi olla moninkertainen päivän keskiarvoon verrattuna. Talvikaudella sähköä kuluu huomattava määrä lämmittämiseen ja sähkön hinta voi vaihdella huomattavasti päivien välillä riippuen ulkolämpötiloista. Pitkittyneiden pakkasjaksojen aikana on mahdollista, että sähköstä voi tulla jopa pulaa, mikä nostaa hintoja entisestään (Cygnel 2022).

Sähkön kulutus Suomessa on laskenut merkittävästi, saavuttaen alhaisimman tason 2000-luvulla, johtuen pääasiassa teollisuuden vähentyneestä kysynnästä. Myös kotitaloudet ovat vähentäneet sähkönkulutusta, vaikka sähkön hinta oli pysynyt kohtuullisena alkuvuodesta 2023 (2024 energia.fi). Mahdolliset tulevaisuuden investoinnit saattavat lisätä sähkön tarvetta huomattavasti verrattuna nykypäivään. Esimerkiksi David Sundénin selvityksen mukaan Ruotsin suunnitelmat, jotka liittyvät muun muassa vihreän teräksen ja kemikaalien tuotantoon maan pohjoisosissa, saattavat aiheuttaa merkittävän sähkön hinnan nousun Suomessa. Ruotsin valtion kaivosyhtiö LKAB ja kolme muuta yhtiötä suunnittelevat toimia, jotka lisäisivät sähkön kulutusta 40 terawattituntia vuoteen 2030 mennessä. Tämä voi johdattaa sähkön hinnan merkittävään nousuun erityisesti Suomessa, jossa sähkön hinta on tiiviisti sidoksissa Pohjois-Ruotsin hintatasoon. (HS talous 2024).

Ruotsin kansantaloustieteen professori Magnus Henrekson toteaaakin, että on selvää, ettei suunnitelma toimi ja että koko Pohjoismaiden kotitaloudet ja yritykset kärsivät seurauksista. Myöskään kaikkien investointien samanaikainen toteutuminen ei olisi kannattavaa, yrityksille itselleen, koska he tarvitsevat yhtä lailla halpaa sähköä (policyinstituet.se 2024). Huomion arvoinen asia on myös se, että myös sähkön tuotanto kasvaa kysynnän kasvaessa.

Myös sähkön hinnan vaihteluun tuodaan lisää ratkaisuja tulevaisuudessa. Esimerkiksi akkusähkövarastot auttavat tasaamaan sähkön hinnan vaihtelua kulutuspiikkien aikana. Esimerkkinä tästä on Helen, joka on pystyttämässä Suomeen 36 kontin kokoista litiumioniakuista koostuvaa akkusähkövarastoa Nurmijärvelle, mikä on 40MW teholtaan huomattavan suuri Suomen akkuvarastojen mittakaavassa. (Uusiteknologia.fi 2024.)

## 7 Tutkimustavat

### 7.1 Mittauslaitteisto

Sensorfact tarjoaa IoT-pohjaisia energianhallintaratkaisuja, joiden avulla voidaan seurata teollisuuskoneiden ja laitteiden energiankulutusta. Käytännössä minkä tahansa laitteen tai tuotantokoneen seuranta onnistuu, mikä toimii sähköllä. Sensorfact tarjoaa myös ratkaisuja paineilman, kaasun ja veden seurantaan toimivia seurantalaitteita (Sensorfact 2024). Tässä opinnäytetyössä keskityttiin seuraamaan hitsauskoneiden testaamiseen käytettävien testauslaitteiden sähkönkulutusta Sensorfactin sähköhallinta järjestelmällä. Järjestelmään kuuluva mittausanturi sijoitettiin mitattavien testauslaitteiden virtakaapelin ympärille, josta laite lähettää dataa eteenpäin verkkoon. Järjestelmä mahdollistaa tarkan energiankulutuksen seurannan reaaliajassa. (Sensorfact 2024)



Kuvio 8. Mitattavan laitteen virtakaapeliin kiinnitettävä mittauslaite (Sensorfact 2024)

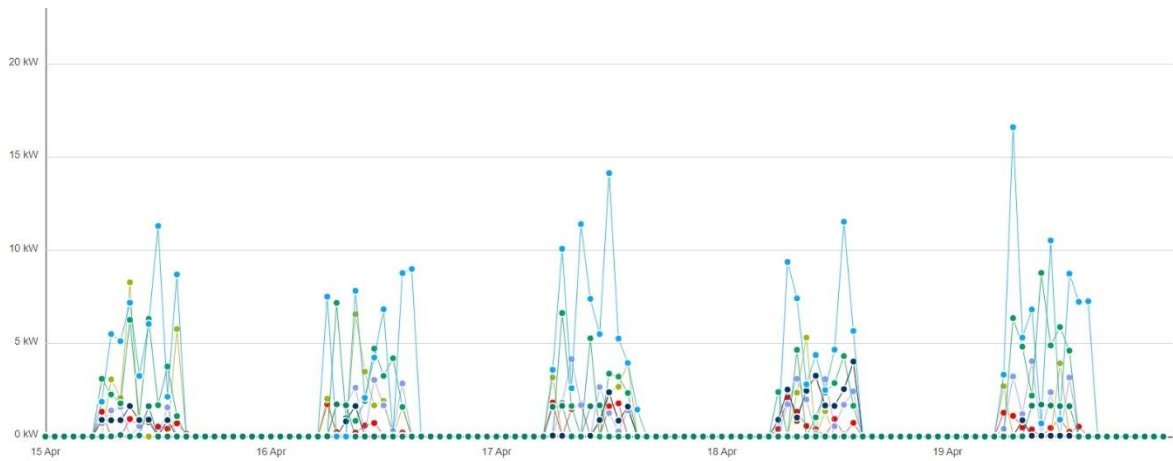
## 7.2 IoT-mittaus

IoT-mittaus on työkalu, jossa laitteet ja sensorit keräävät dataa ympäristöstään tai toiminoistaan. Tämä data voidaan lähettää langattoman verkon kautta pilvipalveluihin tai keskusjärjestelmiin säilöön analysoitavaksi ja hyödynnettäväksi. Tämä mahdollistaa energian käytön mittaamisen, jota IoT-anturit siis lähettävät laitteista mittaustietoja kaksisuuntaisen verkon välityksellä. On myös mahdollista hallita tiettyjä manuaalisia laitteita etänä ja näin hallita energian käyttöä. Kuitenkin tärkein ominaisuus on saada mitattu data helposti luettavaan muotoon pilveen (Digita 2022).

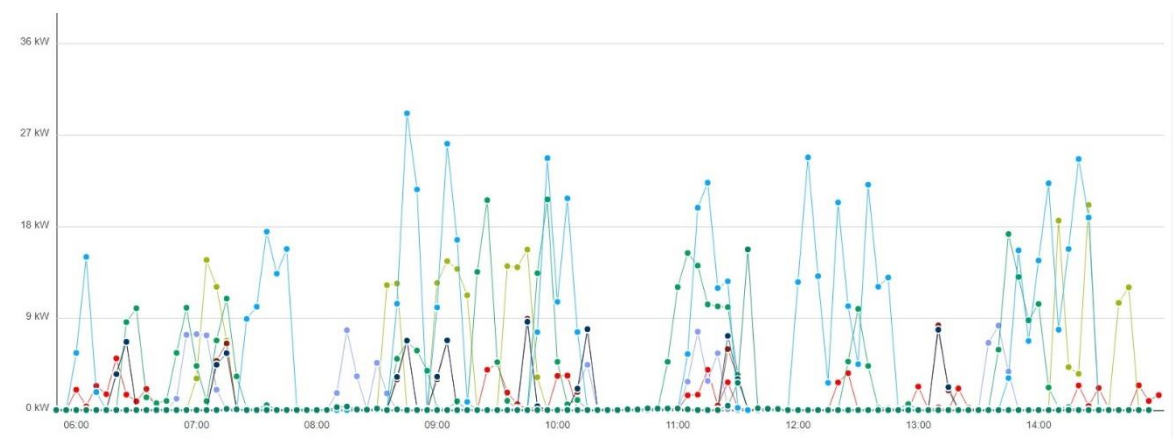
## 8 Tuloksia

### 8.1 Mittaustulokset

Virtalähteiden testaukseen kulutettavaa energian määrää seurattiin jokaisella testauspisteellä. Testausta suoritettiin useamman kuukauden ajan ja saatujen tuloksien perusteella pystytään näkemään, kunkin testauspisteen kuluttama energiamäärä ja kuinka paljon energiasta muodostuu lämpöenergiaa vastuskuormassa. Kuviossa 9 on seuranta yhdeltä viikolta ja tästä voidaan tehdä huomioita, kuinka paljon eri testauspisteiden käyttö vaihtelee päivittäin. Yhden työpäivän aikana vaihtelua syntyy huomattavasti enemmän, kuten Kuviossa 10 voidaan päätellä. Työntekijöiden tauot ja erityisesti tuotteiden menekki määrittelee vahvasti, kuinka paljon päivä aikana hitsauskoneita ehditään testata.



Kuvio 9. Viikon aikana käytetty sähköenergian määrä kullakin testauspisteellä, jokainen väri kuvaa testauspistettä



Kuvio 10. Yhden työpäivän aikana kulutettu energian määrä eri testauspisteillä, jokainen väri kuvaa testauspistettä

Suurimpien virtalähteiden testauspiste kuluttaa 45–75 kWh sähköä työpäivän aikana. Tämä on huomattavasti suurempi määrä kuin pienempien hitsausvirtalähteiden testauspisteillä. Pienimmät testauspisteet kuluttavat energiaa työpäivän aikana noin 10–15 kWh edestä.

## 8.2 Haasteet

Testauslaitteiden käyttöaste on rajallinen. Testaaminen ei siis ole täysin jatkuvaa, vaan hitsauslaitteita testataan sykleittäin ja energian kulutus tällöin vaihtelee. Työajan ollessa viitenä päivänä viikossa ja kahdeksan tuntia päivässä jää käyttöaste vuodessa suhteellisen pieneksi, eli esimerkiksi vuonna 2024 työpäiviä on 252, mahdolliset vuosilomat ja työajan lyhennykset voivat pienentää testauslaitteiston käyttöaikaa (Juhlapyhät.fi). Lähtökohtaisesti vuodessa on noin 2016 tuntia käyttöaikaa generaattorille mahdollista tuottaa sähköenergiaa.

Hukkalämmön kohteen pinta-ala on huomioitava myös, jos hukkalämmön kohteen pinta-ala on pieni, Lämpö ei pääse johtumaan tarvittavan tehokkaasti ORC- tai TEG-järjestelmään. Myös aineiden lämmönjohtavuuteen pitää kiinnittää huomiota, varsinkin jos kyseessä on pienikokoinen laite, tässä tapauksessa vastuskuorma. Kyseisten kohteiden kontaktipinnat eivät välttämättä sovellu suoraan lämmön siirtoon, johtuen sähköjärjestelmien aiheuttamista riskeistä. Lämmönsiirron välillä pitäisi minimoida aineiden ja materiaalien määrä, koska jokainen erilainen materiaali ja aine johtaa lämpöä eri tehokkuuksilla.

ORC- ja TEG-järjestelmät vaativat jäähdyttämistä toimiakseen ja lämpötila eroilla saadaan tuotettua parempi hyötysuhde. Jäähdytystä tarvitaan myös pitämään testauksen vastuskuormat viileänä. Jäähdytysratkaisun ollessa liian heikko ei energiaa synny ja vastuskuormat vikaantuvat, kun nämä eivät kykene luovuttamaan pois hukkalämpöä.

ORC- ja TEG-järjestelmien hyötysuhteet muuntaessa lämpöenergiaa sähköenergiaksi 60–120 C° lämmöstä on 4–10 % luokkaa. Lämpötilaerojen kasvaessa hyötysuhde kasvaa paremmaksi.

## 8.3 ORC-järjestelmä

ORC-järjestelmä vaatii hukkalämmön kohteelta tasaisen lämmön ja energian tuoton, jotta järjestelmän sisällä liikkuva työaine kykenee tuottamaan energiaa toivotulla tavalla. Optimaalisessa tilanteessa järjestelmässä kiertävä aine kulki lämmön lähteen läpi tai olisi kosketuksissa tähän suoraan. On kuitenkin ongelmallista ja epäkäytännöllistä täyttää vastuskuormaa nesteellä, joka ei johda sähköä ja kykenee luovuttamaan lämpöä hyvin.

Järjestelmässä käytettävän aineen valinta on haasteellista tilanteessa, missä järjestelmässä kiertävä työaine olisi suoraan kosketuksissa sähköä johtavien komponenttien kanssa. Syynä tähän on työaineiden tarkat vaatimukset ORC-järjestelmässä, missä työaine on suunniteltu kiertämään ORC-järjestelmässä tietyllä lämpötila alueella optimaalisesti. Todennäköisin ratkaisu on kiinnittää laite mahdolliseen takakanteen niin, ettei tämä estä järjestelmän huoltamista tai vaaranna muuten työympäristöä, tällöin kuitenkin lämpöenergiaa pääsee tehokkaammin karkaamaan hyötykäytöstä. ORC-järjestelmä ei vain oikein sovellu käytettäväksi järjestelmään, missä lämpöenergian määrä vaihtelee käytön mukaan huomattavasti.

#### 8.4 TEG-Järjestelmä

Markkinoilla ei juuri ole valmiita TEG-järjestelmiä tarjoavia yrityksiä tällä hetkellä, tarjolla on kuitenkin yksittäisiä moduuleita, mistä voidaan rakentaa järjestelmä kokonaisuuksia. TEG-järjestelmän työnesteen ominaisuuksilta ei vaadita yhtä paljon kuin ORC-järjestelmässä. TEG-järjestelmä kykenee toimimaan myös ilman työnesteitä, TEG-laite voidaan liittää suoraan hukkalämmön kohteen kylkeen kiinni tasaiselle pinnalle. Ongelmana tässä on kohteen pinta-ala, mikä rajoittaa useampien generaattorien käytön samassa hukkalämmönkohteessa. Tätä rajoittavaa tekijää voidaan kuitenkin kiertää, luomalla kuvion 6 kaltainen moduuli, missä hukkalämpö ja jäähdyttävä aine kulkevat TEG-moduulin läpi esimerkiksi ristiin omissa kerroksissa. Tämän kaltainen järjestelmä vaatii kuitenkin pumppuja, joilla lämpöä siirretään järjestelmässä ja nämä kuluttavat sähköenergiaa. TEG-järjestelmän tehokkuus perustuu kuitenkin lämpötila eroihin kuuman ja kylmän puolen välillä, joten on tärkeää löytää hyvä ratkaisu viilentämään TEG-generaattorin kylmää puolta.

#### 8.5 Mahdolliset ratkaisut ongelmiin.

Parhaan lämmönsiirron saavuttamiseksi on suunniteltava järjestelmä, joka rajoittaa mahdollisimman vähän lämmön kulkua aineiden ja materiaalien kautta lämmönlähteen ja sitä hyödyntävän kohteen välillä. Tällöin energia saadaan parhaiten talteen, järjestelmä on nopeammin käyttö valmiudessa tuottamassa energiaa, eikä tällöin tarvitse odottaa lämmön siirtymistä kappaleesta toiseen. Ylimääräinen hukkalämpö ei myöskään vapaudu yhtä tehokkaasti ympäristöön vaan päättyy hyötykäytettäväksi, kun lämpöä johtavia materiaalikerroksia on vähemmän. Näin hukkalämpö saadaan paremmin talteen ja järjestelmällä on kyky tuottaa energiaa parhaalla mahdollisella tavalla.

Optimaalisessa järjestelmässä ORC- tai TEG-järjestelmän työaineen tulisi virrata sähkökaapin läpi niin, että se ei aiheuta korroosiota komponenteille. Lisäksi on tärkeä huomioida, että työaineen sähkönjohtavuus on mahdollisimman olematon, jotta sähköisiä häiriöitä ei

esiinny. Mikäli hukkalämpöä syntyy riittävästi, on myös mahdollista liittää sähkökaapin kylkeen lämmönvaraaja, joka kerää kaapin tuottaman hukkalämmön ja kierrättää tämän energiaksi.

Käytettäessä järjestelmää, missä työaine on yhteydessä sähköisten komponenttien kanssa. Järjestelmän toiminta varmuuden kannalta on tärkeää, että tämänkaltaisessa järjestelmässä kiinnitetään huomiota järjestelmän huollettavuuteen. Sähköä tuottavan laitteiston, sekä hukkalämmön kohteen komponenttien mahdolliset huoltotoimenpiteet ja viallisten komponenttien vaihtaminen on haastavaa, koska järjestelmän sisällä kiertävän työaine on koko ajan kosketuksissa komponentteihin. Järjestelmän tulisi olla modulaarinen ja modulaarisen järjestelmän mahdollisia huonoja puolia on lisääntyvien kustannuksien lisäksi mahdolliset vuodot, mitä voi syntyä liitoskohtiin.

Linjastolle pitäisi luoda tilanne, missä testattavia laitteita on puskurina odottamassa testattavaksi pääsyä, jotta työmäärä pysyisi mahdollisimman tasaisena päivän aikana.

## 8.6 Regeneratiivinen kuorma ja kustannukset

Regeneroivalla kuormalla voidaan vähentää lämpöenergian syntyä huomattavasti. Hallin viilennyskustannuksien pieneneminen, työntekijöiden työolojen paraneminen kesäkaudella, sekä lämpötaukojen väheneminen. Regeneroivan kuorman hyötysuhde on korkea huipputeholla käytettäessä, mikä on noin 90 % käytetystä energiasta, tästä jäljelle jäävää lämpöenergiaa on vaikea hyödyntää nykyisin tunnetuilla keinoilla ja nykyiset ratkaisut ovat erittäin kustannustehottomia pienissä lämpöenergia määrissä.

Huomioitavaa on kuinka monta vastuskuormaa kannattaa vaihtaa regeneroiviin kuormiin, testauspisteiden käyttöasteen vaihtelee ja testattavien laitteiden tehot vaihtelevat huomattavasti. Vaihtoehtona on selvittää, missä määrin testauspisteiden vastuskuormia voidaan yhdistää yhteen regeneratiiviseen kuormaan, niin ettei tämä häiritse testaustuloksia, tai kuormita regeneratiivisia kuormia liikaa.

On myös kiinnitettävä huomiota mahdollisiin talvikauden lisääntyviin lämmityskustannuksiin, kun vastuskuormat eivät tuottaisi lämpöä entisellä teholla. Tällöin energiaa kuluu mahdollisesti tehtaan lämmittämiseen ja kesäkaudella mahdollisesti tehtaan viilentäminen voi onnistua tehokkaammin.

Regeneratiivisten kuormien takaisinmaksuajat vaihtelevat testauskuormien koon mukaan, suurempien kuormissa hyödyt on ymmärrettävästi huomattavammat. Laitteiden takaisinmaksuaika voidaan määrittää vertailemalla niiden käytöstä syntyviä säästöjä nykyisten kuormien käyttöön liittyviin kustannuksiin. Kustannukset ovat kuitenkin vain arvioita

tulevaisuudesta ja tulevaisuuden muutoksista. Sähkön hinnanvaihtelu tulevaisuudessa voi vaihdella, mutta nykyinen sähkön vuotuinen keskihinta on ollut 7 snt/kWh, on kuitenkin huomioitava, että sähkön hintapiikit sijoittuvat usein juuri normaalin työpäivän keskelle ja halvempaa yösähköä ei päästä hyödyntämään. Tämän takia sähkön keskihinnat on todennäköisesti korkeammat.

Kesälomakausi ajoittuu myös normaalisti halvan sähkön aikakaudelle. Tällöin tuotanto ei välttämättä käy täydellä teholla ja hyötyä halvasta sähköstä ei saada täysin hyödynnettyä ja vuotuinen sähkönkeskihinta yrityksille voi olla huomattavasti korkeampi kuin yleinen vuoden keskihinta.

Kempille tarjottujen regeneratiivisten sähkökuormien kappale hinnaksi annettiin 25200 € Kälviäisen mukaan. Hinnan avulla voidaan laskea takaisinmaksu aika, jokaiselle laitteelle. Laitteiden asennuskuluja ei ole määritetty, näiden kustannukset lisäävät takaisinmaksuaikaa.

$$Takaisinmaksuaika = \frac{\text{Laitteen hinta (€)}}{\text{Käytetty sähkö(kWh)} \times \text{Hyötysuhdeprosentti} \times \text{Sähkönhinta} \left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right) \times \text{Työpäivät}} \quad (1)$$

Kaavaa (1) täyttäessä voidaan käyttää eri arvoja. Esimerkiksi käytetty sähkö vaihtelee päivittäin ja riippuen testattavien virtalähteiden koosta, suurimpien virtalähteiden testauskuorma kulutti keväällä keskimäärin noin 60 kWh sähköä päivässä, kuten kuvioista 9 ja 10 voidaan todeta. Regeneratiivisen kuorman hyötysuhde on ollut Kempin testeissä 93 %, mikä on hyvin lähellä valmistajan lupaamaa hyötysuhdetta. Sähkön hinta vaihtelee vuodesta ja eri olosuhteiden takia välillä huomattavastikin. Vuodessa on keskimäärin noin 252 työpäivää, tämä vaihtelee muutamilla päivillä riippuen juhlapyhistä ja myös tehtaan saamien tilauksien mukaan. Sähkön hinnalla on suuri merkitys takaisinmaksu aikaan, 7 snt/kWh sähkönhinnalla takaisin maksu aika on noin 25.5 vuotta. Arkiaamuisin sähkö on kuitenkin useimmiten hieman kalliimpaa ja todennäköinen keskiarvo on huomattavasti korkeammalla tehtaan käyttötunneilla. Esimerkiksi jo 11snt/kWh sähkön keskihinnalla takaisinmaksuaika tippuu jo noin 16 vuoteen. On otettava huomioon kuitenkin, että on hyvin vaikeaa määrittää paljonko, sähkönhinta tulee vaihtelevaan tulevaisuudessa.

Pienempien kuormien sähkönkulutus on kuitenkin huomattavasti pienempi ja päivittäisen kulutuksen ollessa esimerkiksi 10 kWh luokkaa takaisinmaksuaika nousee 11snt/kWh sähkönhinnalla noin 98 vuoteen, tämän lisäksi laitteiston tehosuhte voi myös kärsiä. Ongelmaan voi olla osana ratkaisu, missä samoja pienempiä virtalähteitä voitaisiin ajaa saman testauskuorman läpi, jos laitteisto tähän kykenisi. Tällöin takaisinmaksuaika voidaan jakaa useamman laitteen kanssa.

Nykyisten vastuskuormien ongelmat toimintavarmuudessa tuovat mahdollisia lisäkuluja, joilta voidaan näiltä välttyä järjestelmää uusimalla. Mahdolliset tuotannon seisahdukset, huolto- ja korjauskulut, jotka aiheutuvat nykyisistä vastuskuormista lisäävät regeneratiivisten kuormien hyötyjä, mikäli nämä toimivat paremmalla toiminta varmuudella.

## 9 Yhteenveto ja pohdinta

Regeneroivalla kuormalla estetään huomattava määrä hukkalämmön syntyä, mikä on selvä etu verrattuna järjestelmiin, mitkä muuntavat lämpöä sähköenergiaksi. Tällä tavalla tehtaan sisälämpötilan aleneminen kesällä, tuo kustannussäästöjä tehtaan ja vastuskuormien jäähdytyskustannuksissa ja työntekijöiden mahdolliset lämpötautot vähenevät.

Regeneroivan kuorman tuottaman energian syöttäminen verkkoon on toimiva ratkaisu, sillä regeneroiva kuorman tuottaman sähkön siirtämiseksi sähköverkkoon ei tarvita muuntajaa, kun laite itsessään toimii käytännössä muuntajana. Riippuen sähköyhtiön ehdoista sähkön verkkoon siirtämisen hinnoista on kuitenkin huomioitava sähkön siirtomaksut. Siirtomaksu on maksettava kaikesta sähköverkosta otetusta energiasta.

Regeneroivien kuormien käyttö ei välttämättä ole pienempien virtalähteiden testauksessa kustannustehokasta, ellei näiden nykyisten lämpökuormien käytöstä tule ylimääräisiä huoltokuluja huomattavasti ja regeneroivien virtalähteiden luotettavuus ylittää nykyisten lämpökuormien luotettavuuden. Regeneroivien kuormiin siirtyminen vaiheittain voi myös tällöin olla kannattava ratkaisu, tällöin nähdään regeneroivien kuormien tuotantovarmuus ja soveltuvuus tehdasympäristössä.

Akkuteknologian käyttö sähköenergian talteenottajana voi koosta ja hinnasta riippuen toimia kustannustehokkaana ratkaisuna, sekä toiminta varmuuden takaajana tulevaisuudessa. On kuitenkin huomioitava akkuvaraston koko, sillä esimerkiksi sähkökatkon aikana, kuinka paljon energiaa kuluu tehtaan toiminnalliseen pyörittämiseen. Akkuvarasto mahdollistaa sähkön keräämisen sähköverkosta silloin, kun sen hinta on alimmillaan ja tämän kerätyn energian käyttämisen silloin, kun sähkön hinta on korkeimmillaan. Tämän lisäksi regeneroivien kuormien tuottaman sähkön sijoittaminen akkuvarastoon vähentää tuotetun sähkön verran sähkönsiirtomaksuja. Itsessään tämä ei ole kustannustehokas ratkaisu, mutta yhdistettynä älykkääseen energiavarastointijärjestelmään, joka hyödyntää pörssisähkön hintojen muutoksia voi järjestelmä maksaa itsensä takaisin tulevaisuudessa. Myös tehtaan toimintavarmuuden lisääminen mahdollisten sähkökatkosten varalle voi tuoda järjestelmälle lisäarvoa.

Tulevaisuudessa tuotantoa ylöspäin skaalattaessa, tai tuotteiden tuotantomäärät nousevat menekin noustessa on regeneratiivisten kuormien käyttö huomattavasti kannattavampaa. Nykyisten lämpöä tuottavien vastuskuormat voidaan jättää myös varajärjestelmäksi, mikä voi tuoda varmuutta tuotannon jatkuvuuteen, jos regeneratiivisten kuormien käytössä tapahtuu odottamattomia ongelmia. Ongelmia voi tuottaa kuitenkin järjestelmien välinen vaihdettavuus, mikä voi olla haasteellista ja järjestelmän korjaaminen on todennäköisesti

nopeampaa, kuin testauskuormien vaihtaminen regeneratiivisista kuormista takaisin vastakuormiin.

Tulevaisuuden sähköhinnat vaikuttavat suuresti energiatehokkaampien laitteiden takaisinmaksu aikaan. Hintojen muutoksia on hyvin vaikea arvioida pidemmällä tähtäimellä, markkinatalouden ansiosta hinnat kuitenkin tulevat todennäköisesti pysymään suhteellisen vakiona. Suurempien hinnanmuutoksien tapahtuessa, joko uusia yrityksiä löytää pohjoismaisille markkinoille, jotka kuluttavat halpaa sähköä. Vastaavasti hintojen noustessa luodaan lisää sähköä tuottavia laitoksia. Piikkihintoihin voi tulevaisuudessa vaikuttaa tulevat sähkövarastot, jotka auttavat hillitsemään hintapiikkejä, tarjoamalla sähköä sähköverkkoon hintojen ollessa korkeimmillaan. Odottamattomien tapahtumien osalta voi regeneratiiviset kuormat tuoda kustannushelpotuksia tulevaisuudessa, jos sähköhinnoissa tapahtuu muutoksia.

## Lähteet

Againity 2022. ORC System. Viitattu 11.1.2024. Saatavissa <https://againity.fi/orc/>

Ahti-Virtanen, J. 2022. Kemppe: Vihreään siirtymään tarvitaan paljon hitsaamista. Viitattu 6.12.2023. Saatavissa <https://www.projektuutiset.fi/kemppi-vihraan-siirtymaan-tarvitaan-paljon-hitsaamista/>

Alfa Laval. Organic Rankine Cycle (ORC). Viitattu 17.3.2024. Saatavilla <https://www.alfalaval.com.au/industries/energy-and-utilities/sustainable-solutions/sustainable-solutions/energy-efficiency/waste-heat-recovery/orc/>

Groniewsky, A. & Attila, I. 2018. Prediction of the ORC Working Fluid's Temperature-Entropy Saturation Boundary Using Redlich-Kwong Equation of State. Viitattu 18.2.2024. Saatavissa <https://www.mdpi.com/1099-4300/20/2/93>

Business wire 2014. 1,000 Watt High-Temperature Thermoelectric Generator for U.S. Military. Viitattu 16.2.2024. Saatavissa <https://www.business-wire.com/news/home/20141203005186/en/GMZ-Energy-Announces-1000-Watt-High-Temperature-Thermoelectric-Generator-for-U.S.-Military>

Cactos. Enemmän kuin sähköverkko. Viitattu 17.5.2024. Saatavissa <https://www.cactos.fi/>

Carlos Ventura & Andrew Rowlands 2015. Recuperated power cycle analysis model: Investigation and optimisation of low-to-moderate resource temperature Organic Rankine Cycles. Viitattu 1.3.2024. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215012657?via%3Dihub>

Cygnel, S. 2022. Näin vältät aamun ja alkuillan sähköruuhkan. Viitattu 2.10.2024. Saatavissa <https://www.fingridlehti.fi/nain-valtat-aamun-ja-alkuillan-sahkoruuhkan/>

Digita. Digitaalinen IoT-verkko mukana energiansäästötalkoissa. Viitattu 12.11.2023. Saatavissa <https://www.digita.fi/etusivu/palvelut-yrityksille/iot/iot-palvelut/digitaalinen-iot-verkko-mukana-energiensaastotalkoissa/>

DOE a. Energy Storage RD&D. Viitattu 17.1.2024. Saatavissa <https://www.energy.gov/oe/energy-storage-rdd>

DOE b. Viitattu 3.12.2023. Saatavissa <https://chp.ecatalog.ornl.gov/benefits/>

Electratherm. Organic rankine system. Viitattu 15.1.2024. Saatavissa <https://electratherm.com/organic-rankine-cycle-basics/>

Elektro-Automatik 2024. Regeneratiivisia kuormia tarjoava yritys. Viitattu 25.9.2024. Saatavissa <https://elektroautomatik.com/en/>

Energiateollisuus ry 2024. Sähkövuosi 2023: Puhdas sähköntuotanto kasvoi, päästöt ja hinnat romahtivat Viitattu 15.1.2024. Saatavissa <https://energia.fi/tiedotteet/sahkovuosi-2023-puhdas-sahkontuotanto-kasvoi-paastot-ja-hinnat-romahtivat/>

Enogia 2021. ORC ENO-10LT Datasheet. Viitattu 4.3.2024. Saatavissa <https://enogia.com/wp-content/uploads/2021/10/10LT-EN.pdf>

Euroopan parlamentti 2023. Mitä hiilineutraalius tarkoittaa ja miten se saavutetaan 2050 mennessä? Viitattu 20.1.2024. Saatavissa <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20190926STO62270/mita-hiilineutraalius-tarkoittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-menessa>

ESS Arkisto. Kemppe osti yrityksen norjasta. Viitattu 2.4.2024. Saatavissa <https://www.ess.fi/paikalliset/366005>

Exenergy. ORC system. Viitattu 2.3.2024. Saatavissa <https://www.exergy-orc.com/technology/orc/>

Hänninen, V. 2016. Pienenergiaa hukkalämmöstä. Viitattu 10.2.2024. Saatavissa <https://www.nanobitteja.fi/katsausartikkelit2016/lamposahko>

HS 2024. Selvitys: Sähkö uhkaa kallistua rajusti Suomessa, syynä Ruotsin suunnitelmat. Viitattu 30.1.2024. Saatavissa <https://www.hs.fi/talous/art-2000010152792.html>

Instructables 2012. Thermoelectric Power Generation (TEG). Viitattu 16.2.2024. Saatavissa <https://www.instructables.com/Thermoelectric-Power-Generation/>

Jalli, A. Sähkön keskihinta vuonna 2023. Viitattu 2.10.2024. Saatavissa <https://www.nodesk.fi/sahkon-keskihinta-2023/>

Juhlapyhä.fi. Työpäivät 2024. viitattu 20.4.2024. Saatavissa <https://www.juhlapyhat.fi/tyopaivat>

Kewen Li, Geoffrey Garrison, Michael Moore, Yuhao Zhu, Changwei Liu, Roland Horne & Susan Petty 2020. An expandable thermoelectric power generator and the experimental studies on power output. Viitattu 7.2.2024. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931020331410>

Kewen Li, Geoffrey Garrison, Roland Horne, Michael Moore & Susan Petty 2022. Thermoelectric Generator Application and Pilot Test in a Geothermal Field. Viitattu 7.2.2024.

Saatavissa <https://www.energy.ca.gov/publications/2022/thermoelectric-generator-application-and-pilot-test-geothermal-field>

Kempower 2021. Kempowerin listautuminen 202. Viitattu 7.3.2024. Saatavissa <https://investors.kempower.com/fi/listautuminen/>

Kemppi a. Kemppi 70 vuotta. Viitattu 15.1.2024. Saatavissa <https://www.kemppi.com/fi-FI/yritys/kemppi/kemppi-70/>

Kemppi b. Kemppi Group Oy julkistaa suunnitelman eriyttää Kemppi Oy:n elektroniikkaliiketoiminnan omaksi yhtiöksi. Viitattu 7.3.2024. Saatavissa <https://www.kemppi.com/fi-FI/uutiset-tapahtumat/uutinen/kemppi-group-oy-julkistaa-suunnitelman-eriyttaa-kemppi-oy-n-elektroniikkaliiketo/>

Kemppi c. Toimintamallit. Viitattu 25.1.2024. Saatavissa <https://www.kemppi.com/fi-FI/yri-tys/kestava-kehitys/toimintamallit-2/>

Konstantinos Braimakis & Sotirios Karellas 2018. Energetic optimization of regenerative Organic Rankine Cycle (ORC) configurations. Viitattu 1.3.2024. Saatavissa <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.saimia.fi/science/article/pii/S0196890417312529?via%3Dihub>

KS Geoenergi. Lämmön kausivarastointi yleistyy. Viitattu 26.4.2024. Saatavissa <https://www.ks-geoenergi.fi/fi/lammon-kausivarastointi>

Kälviäinen, V. 2024. Laboratory Manager Kemppi Oy, Sähköposti keskustelu. Viitattu 2.4.2024

Lahti energia. Pientuotantoilmoitus. Viitattu 18.5.2024. Saatavissa <https://www.lahtienergia.fi/lahti-energia-sahkoverkko/asiakkaan-sahkontuotanto/pientuotantoilmoitus/>

Mohammad Bahrami, Ali Hamidi & Soheil Porkhial 2013. Työaineiden termodynaamiset ominaisuudet. Viitattu 19.1.2024. Saatavissa <https://link.springer.com/article/10.1186/2251-6832-4-12/figures/3>

Motiva 2024. Kausivarastointi. Viitattu 17.5.2024. Saatavissa [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman\\_kaytto/aurinkolammon\\_varastointi/kausivarastointi](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelman_kaytto/aurinkolammon_varastointi/kausivarastointi)

Ni 2024. The Benefits of Regenerative Loads & Sources: Removing the Cost of Heat. Viitattu 25.9.2024. Saatavissa <https://www.ni.com/en/shop/power-electronics-test-systems/regenerative-loads-sources-removing-cost-heat.html>

Omavoima 2022. Sähkön hintahistoria. Viitattu 2.10.2024. Saatavissa <https://omavoima.fi/spot-sahkon-hintahistoria/>

Pedro Mago, Louay Chamra & Chandra Somayaji. 2007. Performance analysis of different working fluids for use in organic Rankine cycles. Viitattu 15.2.2024. Saatavissa [https://www.researchgate.net/publication/245392530\\_Performance\\_analysis\\_of\\_different\\_working\\_fluids\\_for\\_use\\_in\\_organic\\_Rankine\\_cycles](https://www.researchgate.net/publication/245392530_Performance_analysis_of_different_working_fluids_for_use_in_organic_Rankine_cycles)

Piggott, A. How Thermoelectric Generators Work Viitattu 17.2.2024 Saatavissa <https://thermoelectricsolutions.com/how-thermoelectric-generators-work/>

Piotr Górszczak, Marcin Rywotycki, Sławomir Kąc & Maciej Borówka. 2023. Increase in the efficiency of electricity production with a thermoelectric generator (TEG). Viitattu 11.2.2024. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12703-2>

Policyinstitutet 2024. Ny rapport: Företagens planer hotar Nordens elpriser och ekonomi. Viitattu 30.1.2024. Saatavissa <https://policyinstitutet.se/2024/01/30/ny-rapport-foretagens-planer-hotar-nordens-elpriser-och-ekonomi/>

Sensorfact 2024. IoT energian seuranta laitteita tarjoava yritys. Viitattu 22.2.2024. Saatavissa <https://www.sensorfact.eu/>

SFS. ISO 14000 Ympäristöjohtamisen standardisarja Viitattu 25.1.2024. Saatavissa <https://sfs.fi/standardeista/tutustu-standardeihin/suosittu-standardit/iso-14000-ymparistojohtamisen-standardisarja/>

Sylvain Quoilin, Martijn Van Den Broek, Sébastien Declaye, Pierre Dewallef & Vincent Lemort. 2013. Viitattu 22.2.2024. Saatavissa <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/138756/1/1-s2.0-S1364032113000592-main.pdf>

Takala, J. 2023. Tehdasvierailu Kempillä. 24.11.2023

Thermodynamics forum. 2023. Temperature-Entropy(T-s) Diagram. Viitattu 20.3.2024. Saatavissa <https://www.thermodynamics-forum.com/post/temperature-entropy-t-s-diagram>

Turboden 2024. Againtyn vankka ORC-järjestelmä muuttaa lämmön sähköksi. Viitattu 15.1.2024. Saatavissa <https://www.turboden.com/products/2463/orc-system>

Valtioneuvosto 2022. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. Viitattu 21.1.2024. Saatavissa [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164321/TEM\\_2022\\_53.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164321/TEM_2022_53.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

VTT Research. Akkuteknologiat. Viitattu 16.1.2024. Saatavissa <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/akkuteknologiat#uuden>

Xiaoxia Xia, Zhipeng Liu, Zhiqi Wang, Tong Sun, Hualong Zhang, Sifeng Zhang 2022. Thermo-economic-environmental optimization design of dual-loop organic Rankine cycle under fluctuating heat source temperature. Viitattu 20.2.2024. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544222030304> 20.2.2024