

KANDIDAATINTYÖ 2022



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan korkeakoulu

Emil Karlsson

Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan korkeakoulu
Automaatio- ja systeemitekniikan tutkinto-ohjelma

Emil Karlsson

Lämpöpumppujen ohjausjärjestelmät vaihtelevissa tilanteissa

Kandidaatintyö

27.4.2022

Työn ohjaaja:

Professori Jaakko Ketomäki

Tekijä: Emil Karlsson	
Työn nimi: Lämpöpumppujen ohjausjärjestelmät vaihtelevissa tilanteissa	
Koulutusohjelma: Automaatio- ja systeemitekniikka	
Päiväys: 27.4.2022	Sivumäärä: 6+19
Vastuupettaja: Yliopistonlehtori Pekka Forsman	
Ohjaaja(t): Professori Jaakko Ketomäki	
Kieli: suomi	
<p>Työssä perehdyttiin erilaisiin ohjauksiin ja säätöihin teollisuuden lämpöpumppujärjestelmien stabiilisuuden parantamiseksi vaihtelevissa tilanteissa, joissa hukkalämmön saatavuudessa tai tarpeessa esiintyy voimakkaita tai nopeita vaihteluita. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.</p> <p>Työssä käsiteltiin teollisuuden hukkalämpöä ja sen hyödyntämistä teollisuudessa. Käytiin läpi, miten erilaiset muutokset hukkalämmön saatavuudessa vaikuttavat lämpöpumppujärjestelmän toimintaan sekä laitoksen toimintaa. Lisäksi käsiteltiin laitoksen prosessien lämmöntarpeen vaihteluiden vaikutuksia toiminnan stabiilisuuteen.</p> <p>Työtä varten etsittiin kattavasti tieteellisiä julkaisuita, joiden pohjalta esitettiin mahdollisia ratkaisuita esimerkiksi anturoinnin, virtausten ohjauksen, kytkentöjen, lämpöenergian varastoinnin ja lämmöntarpeen ennakoimisen toteutuksiin. Lämpöenergian varastoinnin avulla voidaan vastata lyhyellä ja pitkällä aikavälillä laitoksen lämpöenergian tarpeisiin. Anturointien avulla voidaan parantaa datan saantia prosesseista ja lämpövirroista, datan avulla saadaan reagoitua nopeisiin muutoksiin ja ohjattua lämpöpumppujärjestelmää mittausdatan perusteella.</p> <p>Teollisuuden laitoksissa hukkalämpövirrat vaihtelevat, jonka takia lämpöpumpulla hyödynnettävän virran valinnassa on huomioita monia tekijöitä. Linjan etäisyys vaikuttaa lämpöhäviöihin ja paineen laskemiseen linjassa. Lisäämällä linjaan kiertovesipumppu tai säätöventtiili voidaan virtausnopeutta, painetta ja lämpötilaa nostaa linjassa. Takaisin kytkemällä tuotettu lämpöenergia samaan prosessiin, josta hyödynnetty hukkalämpö oli, saadaan tasattua lämpöpiikkejä sekä lämpöpumpulle tasaisempaa lämpövirtaa. Ennakoinnilla voidaan säätää lämpöpumppujärjestelmää tietämällä tuotantoon tulevien tuotteiden aikataulu sekä tuntemalla niiden lämmöntarve. Lisäksi laitoksissa, joissa ulkolämpötila aiheuttaa muutoksia lämpöenergian kulutukseen voidaan sääennusteiden perusteella suuntaa antavasti ennakoida lämpöpumppujärjestelmää. Koneoppimisen avulla voidaan ennakoitua parantaa oppimalla prosessien lämmöntarpeita. Yleisesti kaikki vaihtoehdot, jotka löydettiin omaavat hyviä ja huonoja puolia sekä tietyissä tapauksissa fyysisiä rajoitteita laitosten puolesta.</p>	
Avainsanat: lämpöpumppu, säätölaitteet, anturi, ohjausjärjestelmä, hukkalämpö, teollisuus, energiamurros, varastointi	

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Sisällysluettelo	1
Symbolit ja käsitteet	2
Lyhenteet	3
1 Johdanto	4
1.1 Työn tausta	4
1.2 Työn tavoite	4
1.3 Tutkimuksen rajaukset	5
2 Lämpöpumput	6
2.1 Energiamurros teollisuudessa	6
2.2 Lämpövoimakoneiden toimintaperiaate	7
2.3 Hyötysuhde	8
2.4 Erilaiset lämpöpumput	10
2.5 Lämpöpumppujen ohjausjärjestelmät	12
3 Hukkalämmön ja lämmöntarpeen vaihteluiden vaikutukset	14
3.1 Teollisuuden hukkalämpö ja sen hyödyntäminen	14
3.2 Hukkalämmön saatavuuden vaihtelut	15
3.3 Prosessien lämmöntarpeen vaihtelut	15
4 Ohjaukset lämpöpumpun stabiilisuuden parantamiseksi	16
4.1 Anturoinnit	16
4.2 Virtausten ohjaus ja valinta	16
4.3 Kytkenät	17
4.4 Varastointi	18
4.5 Ennakointi	19
5 Johtopäätökset	21
Lähteet	23

Symbolit ja käsitteet

T_H	Lämpövoimakoneen korkeammassa lämpötilassa oleva lämpövarasto
T_L	Lämpövoimakoneen matalammassa lämpötilassa oleva lämpövarasto
Q_L	Lämpöenergia, matala lämpötila
Q_H	Lämpöenergia, korkea lämpötila
W	Mekaaninen työ
Q_{out}	Lämpöpumpun luovuttama lämpöenergia, [kW]
W_{in}	Lämpöpumpun käyttämiseksi tehty työ, [kW]
T_{out}	Kiertoaineen lämpötila lauhduttimessa, [K]
T_{in}	Kiertoaineen lämpötila höyrystimessä, [K]

Lyhenteet

COP Coefficient of Performance, lämpökerroin

MVR Mechanical Vapor Recompression, mekaaninen komprimointi

PLC Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikkaohjain

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Nykypäivänä teollisuuden kilpailun, ympäristölainsäädännön [1] sekä yleisen kehityksen johdosta monet teollisuuden laitokset ovat ottaneet käyttöön erilaisia keinoja lisätä omaa energiaomavaraisuutta. Teollisuuden laitokset tavoittelevat korkeampaa energiatehokkuutta vastatakseen markkinoiden kiristyneeseen hintakilpailuun sekä pitääkseen tuotantokustannukset matalina. Nykyisessä markkinatilanteessa lämmön ja sähkön hinta on nousemassa. Lämmön hinnan nousuun vaikuttavat monet tekijät, kuten päästökauppa ja poliittiset intressit. Polttoprosessiin perustuva energiantuotannon raaka-aineiden varastointi sekä kuljetuskustannukset ja öljyn hinnannousu. Teollisuuden kannalta oman hukkalämmön käyttäminen omissa prosesseissa nostaa tuotannon kustannustehokkuutta sekä omavaraisuusastetta ostoenergian tarpeen laskiessa. Tähän tarkoitukseen lämpöpumput ovat potentiaalinen ja kilpailukykyinen vaihtoehto, koska lämmön hinta on tällä hetkellä suhteessa kalliimpaa kuin sähkö.

Teollisuudessa lämpöpumput otettiin käyttöön 1970- ja 1980-luvuilla, lähinnä öljyn hinnannousun seurauksena. Lämpöpumppujen suosio jatkui 1980-luvun puoliväliin asti, kunnes öljynhinnan laskun johdosta niiden suosio pieneni.[2] Viime vuosikymmenien aikana niiden käyttö on kasvanut johtuen lämpöpumppujen teknologian kehittymisestä sekä niiden kannattavuuden noususta. Lämpöpumppujen hyötysuhteet ovat parantuneet ja ohjaus sekä säätö automatisoitunut. Lisäksi asennuksen kannalta niiden skaalautuvuus eri asennusympäristöihin on kehittynyt. Pohjimmiltaan lämpöpumppujen toimintaperiaate on kuitenkin pysynyt samana.

Teollisuudessa lämpöpumppuja käytetään hukkalämmön uusiokäyttöön, joko takaisin laitoksen tuotantoprosesseihin, kiinteistöjen lämmityskäyttöön tai energian myyntiin kaukolämpöverkkoon. Lämpöpumput ovat myös käytännöllinen ratkaisu taistelussa ilmastonmuutosta vastaan, riippuen lämpöpumpun tyypistä ja tilannekohtaisesta hyötysuhteesta. Teollisuuden kokoluokan lämpöpumpuilla on todettu saavutettavan suuria päästövähennyksiä, erityisesti CO₂-päästöjen osalta.[3]

1.2 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena on selvittää erilaisia mahdollisuuksia teollisuuden lämpöpumppujärjestelmien säätöön vaihtelevissa tilanteissa, kun hukkalämmön saatavuudessa on suuria vaihteluita tai prosessin lämmön tarve vaihtelee.

Ensimmäisessä luvussa johdatellaan aiheeseen ja käydään työn rajaus läpi. Toisessa luvussa käydään läpi lämpöpumpun toimintaperiaatetta ja teollisuudessa käytettävien lämpöpumppujen eri tyyppisiä. Kolmannessa luvussa käsitellään lämpöpumpuissa käytettäviä toimilaitteita sekä ohjausjärjestelmiä. Neljännessä luvussa käydään läpi hukkalämmön ja lämmöntarpeen vaihteluiden vaikutuksia järjestelmään sekä syitä näihin vaihteluihin.

Kaiken edellä mainitun tiedon avulla yritetään löytää mahdollisimman toimivia ja toteutuskelpoisia ratkaisuja: minkälaisilla antureilla, ohjauksen tai toimilaitteiden säädöillä parannettaisiin lämpöpumpun toiminnallisuutta vaihtelevissa tilanteissa. Ratkaisujen täytyy olla toteutettavissa sekä taloudellisesti että rakenteellisesti. Viimeisessä luvussa käydään läpi löydettyjen ratkaisujen toimivuutta sekä järkevyyttä teollisuuden lämpöpumppujärjestelmien toteutuksiin. Työn uskottavuuden ja kattavuuden vuoksi kootaan kattava teoriaosa sekä tarkastellaan lähteitä kriittisesti tehdessä johtopäätöksiä.

1.3 Tutkimuksen rajaukset

Työssä keskitytään teollisuuden kokoluokan lämpöpumppuihin. Alarajana pumppuille pidetään sadan kilowatin tehoa, ylärajaa ei ole. Alle sadan kilowatin lämpöpumput on jätetty pois, koska ne ovat suurilta osin kiinteistön lämmitykseen tarkoitettuja. Muodostetun lämmönkäytön kohteena teollisuuden eri prosessien sovellukset, joissa lämpö on tuotettu suuren kokoluokan lämpöpumppujärjestelmällä. Lämpöpumpulle tuleva hukkalämpö voi olla hyvinkin laajalta lämpötila-alueelta, noin 30–150 celsiusastetta riippuen prosessista, jonka johdosta ei aseteta rajoitusta käytettävän hukkalämmön lämpötilalle. Teollisuuden prosessit vaihtelevat, joten myös hukkalämmön lähteetkin vaihtelevat. Tämän takia ei määritellä hyödynnettävän hukkalämmön lähdettä.

2 Lämpöpumput

Kappaleessa käsitellään energiamurroksen vaikutusta teollisuuteen ja lämpövoimakoneiden toimintaperiaatetta. Lisäksi käydään läpi lämpövoimakoneiden hyötysuhdetta ja sen laskemista. Käsitellään myös neljän eri lämpöpumpputyypin toimintaperiaate sekä lämpöpumppujen ohjausjärjestelmiä.

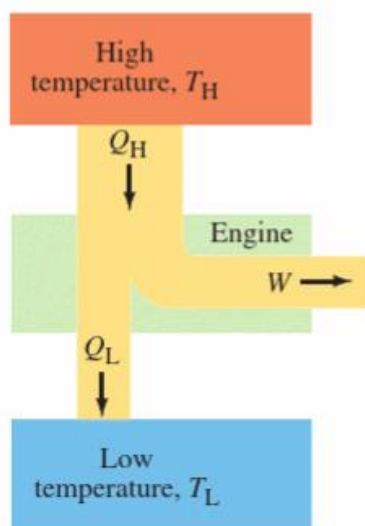
2.1 Energiamurros teollisuudessa

Teollisuudessa lämpöpumppuja on alettu käyttämään yhä enemmän energiamurroksen sekä yleisen maailmantilanteen johdosta. Energiamurroksen syynä ovat halu hillitä ilmastonmuutosta korvaamalla fossiilisia polttoaineita uusiutuvilla energianlähteillä. Maailman tilanteesta johtuvat pakotteet nostavat huomion energiaomavaraisuuteen ja miettimään käytössä olevia energianlähteitä, joista tehdas on riippuvainen. Erityisesti riippuvuutta toisen maan tuottamiin energian lähteisiin, kuten kaasuun tai öljyyn pitäisi vähentää. Tätä varten teollisuuden investoinnit lämpöpumppujärjestelmiin ovat kasvussa, koska ne mahdollistavat tehokkaan energian hyödyntämisen prosesseista samalla vähentäen ulkoisen energian tarvetta ja mahdollistavat matkan kohti päästötöntä tuotantoa. Teollisuuden hukkalämpöä voidaan hyödyntää lämpöpumppujen avulla myös alue- ja kaukolämpö verkossa tai varastoida maakaivoihin omaa käyttöä varten. [4]

Mietittäessä päästöjen määrää, teollisuus aiheutti noin 36 prosenttia maailman kaikista CO₂-päästöistä vuonna 2015, joista noin puolet syntyi polttoaineiden poltosta energiaksi. Näistä polttoaineista lähes 90 prosenttia oli fossiilisia.[5] Tästä johtuen teollisuuden päästöjen vähentäminen vaikuttaa suuresti ilmastonmuutoksen etenemiseen, johon erityisesti fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen edesauttaisi asiaa. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen energiantuotannossa uusiutuvilla energianlähteillä mahdollistaa toisesta maasta riippumattoman energiantuotannon, joka nykyisessä poliittisten pakotteiden tilanteessa loisi varmuutta sekä pitäisi tuotannon kustannukset energiankulutuksen osalta ennalta arvattavimpina.

2.2 Lämpövoimakoneiden toimintaperiaate

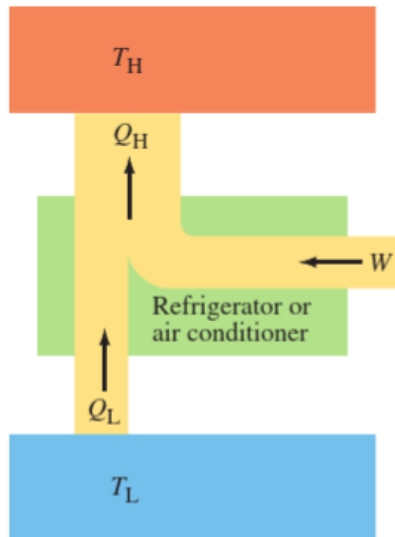
Lämmöntuottaminen tekemällä työtä on helppoa, esimerkiksi sähkömoottorin avulla saadaan tuotettua lämpöenergiaa. Toisaalta työn saaminen lämpöenergiasta on vaikeampaa, mikä onkin osa syynä lämpövoimakoneiden myöhäiseen keksimiseen. Lämpövoimakoneen toiminta perustuu kuumasta energiavarastosta kylmään varastoon virtaavasta lämpöenergiasta. Tästä virtaavasta energiasta osa saadaan muutettua työksi. Käytännön sovelluksina mäännällinen höyrykone ja höyryturbiini, jotka muuttavat paine-erosta syntyvän virtauksen työksi. Tätä voidaan selittää termodynamiikan toisen pääsäännön avulla, jonka mukaan lämmönsiirto tapahtuu luonnollisesti vain pienemmän lämpöenergian ja suuremman lämpötilan omaavasta kappaleesta suuremman lämpöenergian ja pienemmän lämpötilan omaavaan kappaleeseen, eli aina suuremmasta lämpötilasta pienempään. Kuten lämpövoimakoneen kohdalla lämpö ei virtaa matalammasta suurempaan. Kuvassa 1 lämpövoimakoneen periaate havainnollistettuna, jossa T_H osoittaa korkeamman lämpötilan varasto ja T_L osoittaa matalan lämpötilan varasto. Huomataan kuvasta osan energiasta poistuvan W eli työnä. Q_H ja Q_L osoittavat lämpömäärän siirtymistä. [6]



Kuva 1: Lämpövoimakoneen toimintaperiaate [6]

Vastakohtana edelliseen on jäähdytyskone, joka toimii käänteisesti verrattuna lämpövoimakoneeseen. Jäähdytyskoneessa lämmönvirtaus saadaan käänteisen suuntaiseksi tekemällä työtä prosessiin. Käytännön esimerkkinä käsitellään jääkaappia, jossa sen sisältä, eli kylmävarastosta siirretään sähköisen kompressorin tekemän työn avulla huoneilmaan eli lämpimään lämpövarastoon lämpöenergiaa.[6] Kuvassa 2

havainnollistettu jäädytyskoneen toimintaperiaate. Kuvassa W kuvastaa systeemiin tehtyä työtä, jonka johdosta saadaan lämpöenergia kylmästä varastosta T_L korkeamman lämpötilan varastoon T_H . Q_H ja Q_L osoittavat lämpömäärän siirtymistä.



Kuva 2: Jäädytyskone tai lämpöpumpun toimintaperiaate [6]

Lämpöpumput toimivat käytännössä samalla periaatteella kuin jäädytyskone, mutta lämmittävät tilaa tai vettä jäädyttämisen sijasta. Niidenkin toiminta vaatii prosessiin tehtyä työtä, jotta lämpöä saadaan siirrettyä matalammasta korkeampaan lämpötilaan. Voidaan ajatella, että lämpöpumput siirtävät lämpöä suljettuun systeemiin, kun jäädytyskoneet taas siirtävät lämpöenergiaa suljetusta systeemistä avoimeen. [7] Monesti teollisuudessa lämpöpumppu voi toimia myös jäädytyskoneena, esimerkiksi prosessissa, jossa jätevesiä pitää viilentää ennen ympäristöön päästämistä. Jätevesi saadaan viilennettyä lämpöpumpun avulla, samalla siirtäen sen lämpöenergia hyötykäyttöön, esimerkiksi kaukolämpöverkkoon. Näin saadaan korvattua jäädytystarvetta sekä lämmitystarvetta samalla laitteella. Monesti teollisuuden systeemit, joita lämpöpumput lämmittävät tai viilentävät eivät ole suoranaisesti eristetty prosessi tai tila, vaan virtaava aine.[3]

2.3 Hyötysuhde

Lämpöpumppujen tehokkuuden tarkasteluun käytetään yleisen käytännön mukaan lämpökerrointa COP (Coefficient of Performance). Lämpökerroin määrittelee, kuinka

moninkertainen lämpöpumpusta hyödyksi saatu lämpöenergia on verrattuna tehdyn työn määrään. [3] Toisin sanoen COP kertoo, kuinka moninkertaisesti energiaa lämpöpumpusta on mahdollista saada verrattuna systeemiin käytettyyn sähkö- tai lämpöenergiaan W nähden.

Lämpökerroin määritellään kaavan 1 mukaisesti [3][8]:

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_{in}} \quad (1)$$

missä

COP = lämpökerroin

Q_{out} = Lämpöpumpun luovuttama lämpöenergia, [kW]

W_{in} = Lämpöpumpun käyttämiseksi tehty työ, [kW]

COP-luvun hyvä vertailukohta on arvo 1, joka vastaa sähkölämmityksellä lämmittämistä verrattuna mekaaniseen lämpöpumppuun. Laskettaessa lämpökerrointa ei laskuissa huomioida lämpöpumpun ottamaa lämpöenergiaa, koska voidaan ajatella sen olevan muualle kelpaamatonta hukkalämpöä. [9][3]

Ideaalinen Carnot-lämpöpumppukierrolle COP-arvo määritellään kaavassa 2 [3]:

$$COP = \frac{T_{out}}{T_{out} - T_{in}} \quad (2)$$

missä

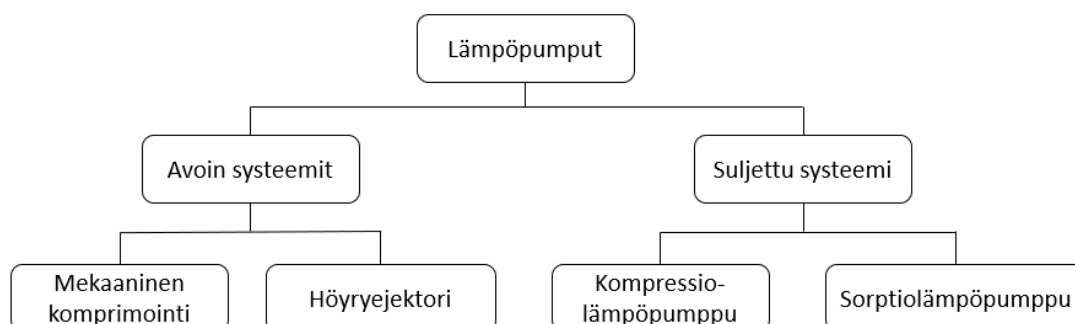
T_{out} = kiertoaineen lämpötila lauhduttimessa, [K]

T_{in} = kiertoaineen lämpötila höyrystimessä, [K]

Lämpöpumppu ei voi saavuttaa lämpöopin toisen pääsäännön perusteella sataprosenttista tehokkuutta. Tätä varten French Carnot kehitti teoreettisen ideaali tilanteen lämpöpumpun, jonka COP-arvo on esitetty yllä. Carnot'n lämpöpumppu perustuu neljään eri vaiheeseen, joiden pitää olla reversiibeileitä eli vaiheiden on voitava tapahtua myös päinvastaiseen suuntaan. [10] Teollisuuden prosesseissa lämpöpumppujen COP-arvot vaihtelevat noin 0,4 aina yli 30:n riippuen kohteesta ja käytettävästä lämpöpumppu prosessista. Käytännössä COP-arvot mekaanisilla lämpöpumpuilla on noin 70 prosenttia ideaalisesta.[3]

2.4 Erilaiset lämpöpumput

Lämpöpumput voidaan jakaa tyyppinsä mukaisesti joko avoimiin tai suljettuihin systeemeihin. Avoimen systeemin lämpöpumpuissa kiertoaine tulee ja poistuu lämpöpumpun kierrosta jokaisen syklin välissä. Suljetun systeemin lämpöpumpuissa kiertoaine pysyy lämpöpumpun kierrossa poistumattomana, koska lämpöenergia siirretään ja tuodaan lämpöpumpun omaan kiertoon lämmönvaihtimen kautta. [11] Lämmönvaihdin mahdollistaa kahden eri kylmäaineen lämpöenergian siirtymisen kuumemmasta viileämpään, ilman näiden kylmäaineiden sekoittumista [9]. Teollisuuden kannalta lämpöpumppu tyyppin valinta pohjautuu käytettävissä oleviin hukkalämpövirtoihin sekä lämpöpumpun tuottamien virtojen takaisin kytkentään [2]. Kuvasta 3 nähdään neljä erityyppistä lämpöpumppua käyttöenergiansa mukaan jaoteltuna kahteen pääryhmään, joiden käyttämä energia on joko mekaanista energiaa tai lämpöä [12].



Kuva 3: Lämpöpumpputyypit [12] muokattu

Yllä olevista lämpöpumpuista yleisimpiä ovat kompressipumput, jonkalaista yleensä tarkoitetaan, kun puhutaan yleisesti lämpöpumpusta. Kompressorin sähkömoottorin avulla systeemin paine saadaan nostettua höyrystimeltä lauhduttimelle, jonka johdosta kiertoaineen lämpötila kasvaa. Höyrystimellä systeemin ulkopuolella kulkevasta riittävässä lämpötilassa olevasta virrasta lämpöenergia siirtyy lämmönvaihtimen kautta lämpöpumpun kiertoon höyrystäen kiertoaineen. Kompressori nostaa kaasufaasissa olevan kiertoaineen painetta, jolloin sen lauhtumislämpötilakin nousee. Lauhduttimella kiertoaine lauhtuu takaisin nestefaasiin, luovuttaen lämmönvaihtimen kautta energiaa ulkoiseen virtaan. Lauhduttimen jälkeen paine lasketaan takaisin paineenalennusventtiilin avulla rajoittaen virtausta, venttiili pitää myös paine-eroa höyrystimen ja lauhduttimen välillä. Kompressiolämpöpumppu on suljettu systeemi,

jonka kiertoaine valitaan sovelluskohteen lämpötilojen mukaisesti, usein teollisuudessa sovelluksissa kiertoaineena käytetään vettä. [13]

Sorptiolämpöpumput ovat myös suljetun systeemin pumppuja, mutta toisin kuin kompressiolämpöpumput, sorptiolämpöpumput hyödyntävät käyttöenergianaan lämpöä. Tämän johdosta niitä käytetään, kun ylijäämälämmön oletetaan olevan ilmaista. Niiden toiminta perustuu kahden kiertoaineen suljettuun systeemiin, jossa kaasu liukenee nesteeseen tai kiinteään aineeseen [14]. Kaasun liukenemista nesteeseen kutsutaan absorptioksi ja kaasun sitoutumista molekyylivoimien välityksellä huokoisen aineen huokoiseen sisäpintaan adsorptioksi. Absorptio ja adsorptio ovat eksotermisiä eli lämpöä vapauttavia reaktioita. Desorptio on endoterminen eli lämpöä sitova reaktio, koska kaasu vapautuu kiinteästä aineesta tai nesteestä. Absorptiolämpöpumpussa hyödynnetään absorptiossa ja desorptiossa tapahtuvaa lämmön vapautumista ja sitoutumista, jossa on kompressorilämpöpumpun höyrystimen ja lauhduttimen lisäksi keitin ja imeytin. Absorptiolämpöpumppuprosessin voidaan ajatella olevan lämpöpumpun ja lämpövoimakoneen yhdistelmä. Prosessi ei ole yksinkertainen, koska tietyssä paineessa ja lämpötilassa vallitsee tasapaino kaasun ja nesteeseen absorboituneen kaasun välillä. Lämpötilan tai paineen muuttuminen aiheuttaa tasapainon muutoksen, jolloin kaasua vapautuu tai höyrystyy. [15]

Avoimen systeemin lämpöpumppujärjestelmät ovat harvinaisempia, mutta yksinkertaisuutensa takia investointikustannuksiltaan paljon suljetun systeemin laitteistoja edullisempia. Teollisuudessa avoimia systeemejä käytetään pääasiassa vähentämään suoraan muun lämmityksen tarvetta. [14]

Mekaaninen komprimointi, myöhemmin lyhenteellä MVR (Mechanical Vapor Recompression), perustuu painetason nostoon ja tehdyn työn johdosta lämpöenergia tason nostoon. Sitä on yleensä käytetty teollisuudessa kemian prosesseissa, joissa pienellä höyryn paineen ja lämpötilan nostolla saadaan aikaan korkeampilämpöisempää höyryä. Saadulla höyryllä voidaan höyrystää saman aineen matalammassa paineessa olevaa nestefaasia ja samalla lauhduttaa kompressoitu höyry. [2] MVR pumput vaativat yleensä vain vähän ulkoista työtä, jonka johdosta ne ovat energiatehokkaita ja taloudellisia käyttää [16]. Koska se on avoimen systeemin lämpöpumppu, toimii kiertoaineena teollisuusprosessin oma kaasu, joka useimmiten on vesihöyry [2].

Neljäntenä lämpöpumppu tyyppinä on höyryejektori, joka käyttää kaasufaasissa olevan kiertoaineen paineen nostoon lämpöenergiaa, mekaanisen työn sijasta. Teollisuudessa höyryejektoreja hyödyntäviä, eli termokompressoreita käytetään tyypillisesti elintarvike-, metsä- ja kemianteollisuudessa. [14] Höyryejektori on suutin, jossa matalammassa sekä korkeammassa paineessa olevat höyryt sekoitetaan. Suuttimen kurkun avulla saadaan virtausnopeus nostettua, korkeammassa paineessa olevan höyryn laajentuessa aiheuttaa matalammassa paineessa olevan höyryn puristumista. Suuttimen kurkun jälkeen virtausnopeus laskee ja paine nousee. Lämpöenergia tuodaan yleensä suuttimelle korkeapaineisen sekä korkeammassa lämpötilassa olevan vesihöyryn muodossa. Näin saadaan ulos korkeammassa paineessa ja lämpötilassa oleva virtaus, verrattuna sisään tulleeseen matalapaine virtaukseen. [17]

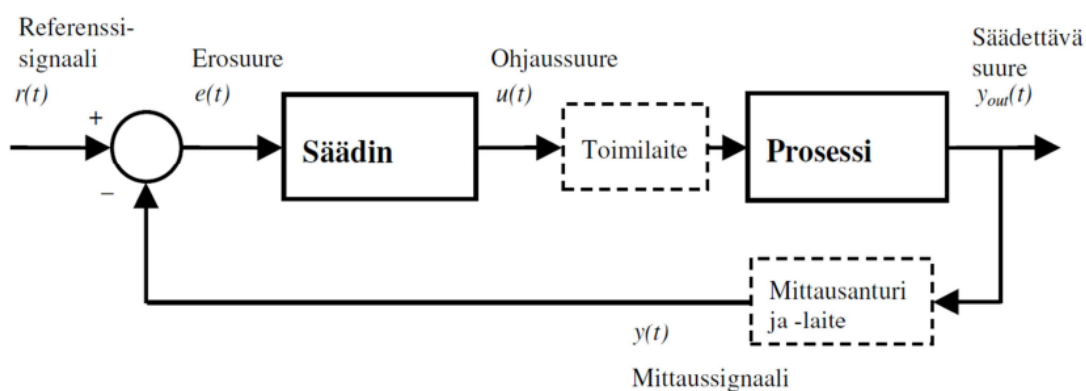
Teollisuuden lämpöpumppuja toimittaa monet eri yritykset, joista esimerkkeinä Oilon sekä Mitsubishi. Molemmat yritykset valmistavat teollisuuteen lämpöpumppuja ja vedenjäähdyttimiä, niin hukkalämmöntalteenottoon ja prosessijäähdytykseen sekä lämmitykseen suunnattuja järjestelmiä. Kokoluokat vaihtelevat noin 100 kW:sta noin 50 MW:n. Lämpöpumppujen toimintaperiaate vaihtelee, mutta tarjolla on niin avoimin kuin suljetun kierron järjestelmiä. [18] Lämpöpumppujen mukana tuleva ohjausjärjestelmä on liitettävissä teollisuuden laitosten omiin automaatiojärjestelmiin, joita käsitellään seuraavassa kappaleessa.

2.5 Lämpöpumppujen ohjausjärjestelmät

Teollisuuden lämpöpumppujärjestelmissä pumppujenohjaus on integroitu laitoksen muuhun automaatiojärjestelmään. Itse lämpöpumppuvalmistaja toteuttaa pumpunohjauksen rajapinnan kautta, jonka kautta ulkoinen automaatiojärjestelmä yhdistyy lämpöpumpun omaan ohjausjärjestelmään [2]. Lämpöpumpun oma automaatio-ohjausjärjestelmä PLC (Programmable Logic Controller), mahdollistaa datan vaihdon laitoksen automaatiojärjestelmän kanssa, kuten lämpötila, virtaus ja muita ohjaukseen tarvittavia suureita. [14]

Säätölaitteiden tarkoitus on ylläpitää asetettuja ohjearvoja kaikissa olosuhteissa lämpöpumpulla tuotettavalle lämpöenergialle. Säätöjärjestelmä, joka on toteutettu hyvin edesauttaa energiatehokkaan toiminnan sekä hyvän lämpötilan luomisessa.

Järjestelmät koostuvat usein monista yksittäisistä piireistä, joiden tarkoituksena on pitää säädettävä suure asetettujen arvojen sisällä. Suljettu säätöpiiri koostuu usein seuraavista osista: säädin ja toimilaitte sekä anturi tai lähetin. Esimerkiksi lämpöpumpussa säätimeen on kytketty sisään tulevan ja ulosmenevän kiertoaineen lämpötila-anturit sekä säätöventtiilistä. Ulosmenevän kiertoainevirran lämpötilaa säädetään halutun esiasetuksen perusteella. Kuvassa 3 nähdään lohkokaavio suljetusta säätöpiiristä, jossa referenssisignaaliilla kuvataan asetusarvoa säätökäyrään. Säädin vertaa anturilta saapuvaa mitta-arvoa referenssisignaaliin ja lähettää ohjausviestin näiden suureiden erotuksella toimilaitteelle. Lämpöpumpun tapauksessa toimilaitteena voi toimia esimerkiksi kompressorin. Säädettävä suure on ulosmenevän kiertoaineen virtaama. [19]



Kuva 3. Lohkokaavio suljetusta säätöpiiristä.

Teollisuuden automaatiojärjestelmä Metso DNA, on yksi käytetyistä käyttöliittymistä teollisuudenlaitoksissa. Se on kehitetty Metso Oy:n toimesta prosessiautomaatioon, jonka kautta voidaan hallinnoida prosesseja ja vastaanottaa mittaustietoja sekä lähettää ohjaustietoja. Se perustuu dynaamiseen sovellusverkkoon, joka perustuu tietämyksen ja informaation vapaaseen verkottamiseen, ohjausautomaatiikkaan ja sulautettuihin kenttäohjauksiin.[20] Käyttöliittymään saadaan koko teollisuudenlaitoksen toiminnanohjaus, kuten toimilohko-, sekvenssi-, säätö-, kenttä-, laitteisto-, piiri- ja logiikkakaaviot. Suunnittelija pystyy toteuttamaan mallin laitoksesta, jonka avulla nähdään heti mahdolliset virheet sekä debuggaus tiedot. Tiedonvälitys perustuu OPC-palvelimen avulla vapaaseen tiedonsiirtoon. [21]

3 Hukkalämmön ja lämmöntarpeen vaihteluiden vaikutukset

Kappaleessa käydään läpi teollisuuden hukkalämmön määritelmä ja laitoksen hukkalämmön saatavuuden vaihteluiden vaikutuksia ja prosessien lämmön tarpeen vaihteluiden vaikutuksia.

3.1 Teollisuuden hukkalämpö ja sen hyödyntäminen

Monet teollisuuden prosessit vaativat lämpöä, mutta käyttävät vain osan tästä energiasta. Näiden prosessien käyttämää energiaa kutsutaan primäärienergiaksi, kun se on hankittu laitoksen ulkopuolelta tai sen itsensä valmistamaa polttoainetta tai sähköä. Primäärienergia on energiaa, johon ei ole kohdistettu laitoksessa minkäänlaisia muuntoprosesseja. Ilman primäärienergiaa mikään laitos ei pystyisi operoimaan. Suurin osa käytetystä primäärienergiasta hyödynnetään lämpönä laitoksen muissa prosesseissa. Tätä energiaa kutsutaan sekundaarilämmöksi. [22]

Sekundaarilämmöstä ylijäänyttä energiaa kutsutaan hukkalämmöksi, jonka lämpötila vaihtelee pääasiassa noin 30 °C ja 200 °C väliltä [2]. Tämä hukkalämpö poistuu laitoksen prosesseista riippuen esimerkiksi jäähdytysnesteveden, jäteveden, poistoilmojen tai koneellisen jäähdytyksen lauhdelämmön mukana [19]. Hukkalämmön lämpötilalla on vaikutusta sen uudelleen hyödyntämiseen, yli 55 °C ylijäämälämpö voidaan siirtää suoraan lämmönsiirtimen avulla kaukolämpöverkon paluuvesilinjaan. Alle 55 °C ylijäämälämpö vaatii sen hyödyntämiseen lämpöpumpun, jolla sen lämpötila saadaan nostettua tarpeeksi korkeaksi hyödyntämistä varten. Ylijäämälämmön hyödyntämiseen vaikuttavat myös laitoksen käyttöaste, kaukolämpöverkkoon mahtuvan lämmön määrä sekä lämpötilan vaihtelut vuodenaikojen mukaan. [23]

Laitoksesta riippuen hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpulla vaatii sopivan hukkalämpö virran sekä käyttökelpoisen kohteen. Usein hyödyntämiseen soveltuva kohde löytyy laitoksen omista prosesseista tai sen teollisuusalueelta. Teollisuusalueella hukkalämpöä voidaan käyttää omien prosessien lisäksi rakennusten lämmitykseen. [14] Kuten edellä mainittiin, voidaan hukkalämpöä hyödyntää myös alueen kaukolämpöverkossa, jos tehdasalueelta ei löydy sopivaa käyttökohdetta.

Lämpöpumpun vuosittaisten käyttötuntien kannalta tärkeää on lämmönlähteen ja generoitavan lämmön aikasidonnaisuus. Paras tilanne on silloin, kun hukkalämpöä saadaan lämmönlähteestä, joka on jatkuvasti käytettävissä ja tuotetulle lämmölle on aina kysyntää. Teollisuudessa tämä tarkoittaa keskeyttämättömällä syklillä pyörivää tuotantolaitosta ja aina ajossa olevaa prosessiosaa. Aina tämä ei ole mahdollista erinäisistä syistä, jolloin tuotantoprosessin syklisyydestä johtuen lämpöpumpulle tulevan lämmönlähteen lämpötilatasossa on voimakasta vaihtelua. Tämä aiheuttaa myös voimakasta vaihtelua generoitavaan lämpötehoon. Tuotannosta ja kulutuksesta johtuvia vaihteluita voidaan tasata varastoimalla lämpöä. Tyypillisesti lämpövarastot ovat lämmönlähteenä toimivan veden tai lämmitetyn veden säiliöitä. [14]

3.2 Hukkalämmön saatavuuden vaihtelut

Kuten aiemmin on todettu teollisuuden prosessit eroavat toisistaan, joka aiheuttaa hukkalämpövirtojen yksilöllisyyden, jonka johdosta jokaisen lämpöpumpputermostuksen toteutus täytyy suunnitella käytännössä aina tapauskohtaisesti. Hukkalämmön faasi ja lämpötila sekä virtausnopeus on otettava huomioon järjestelmän toteutuksessa. Lisäksi hukkalämmön saatavuuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten laitoksen tuotannon vaihtelu, joka voidaan havaita vuodenajan tai vuorokaudenajan mukaan. Vuodenaikavaihtelu voi aiheuttaa hukkalämpövirtojen lämpötiloissa huomattavia eroja kesän ja talven välillä. Vuodenaikavaihtelusta johtuvat lämpöerot ilmenevät järjestelmässä dynaamisesti. [24] Esimerkiksi jäteveden saatavuuteen vaikuttaa sen sisältämien jätteiden erotusmenetelmä ja niistä johtuvat lämmönhäviöt sekä mahdolliset häviöt pitkästä kytkennästä johtuen [14].

3.3 Prosessien lämmöntarpeen vaihtelut

Teollisuuden prosessien vaihtelevuus sekä prosessintyyppi vaikuttavat siihen kuluvaan lämpöenergiämäärään. Monesti prosessit ovat suhteellisen vakiollisia tai muuten ennakoitavissa lämmönkulutukseltaan, mutta sykliset prosessit ovat luonteeltaan vain hetkittäin lämpöenergiaa vaativia. Tällöin lämpöpumpputermostuksen soveltuvuus ja käytettävyys kyseisen prosessin kanssa on harkittava. Erityisesti elintarviketeollisuudessa sykliset prosessit ovat yleisiä, kun tiettyä tuotetta valmistetaan vain tietyn erän verran, jonka jälkeen vaihdetaan tuotettavaa tuotetta. [14]

4 Ohjaukset lämpöpumpun stabiilisuuden parantamiseksi

Kappaleessa käydään läpi erilaisia ratkaisuita lämpöpumppujen stabiilisuuden parantamiseksi. Tarkasteluna on anturoinnit, virtausten ohjaukset, kytkennät, varastointi ja ennakointi.

4.1 Anturoinnit

Teollisuuden lämpöpumppujärjestelmät sisältävät automaatiojärjestelmän, jonka avulla antureilta tulevat arvot saadaan koottua. Eri antureita eli kenttälaitteita ovat esimerkiksi lämpötila-, paineanturi ja energiamittari. Antureilta saadaan mittausdataa reaaliaikaisesti, jota käytetään esimerkiksi lämpöpumpun ja toimilaitteiden ohjaukseen. Anturit siirtävät dataa laitoksen automaatiojärjestelmään reaaliaikaisesti. Eri anturit käyttävät joko analogista tai digitaalista viestintäverkkoa siirtääkseen datan ohjausjärjestelmälle. Anturoinnit mittaamaan useasta kohdasta linjaa sekä prosessin sisälle, jotta saadaan nopeammin dataa lämpöenergian kulutuksesta prosessissa sekä mahdollisesti lämpöpumppujärjestelmän lämmöntuotannon heikentymisestä. [19]

Höyrystinprosesseissa, joissa hukkalämpö on ilmavirtaan sitoutunutta, voidaan lämpöpumppujärjestelmän stabiilisuutta parantaa lisäämällä ilmavirtaa mittaava anturi. Anturoinnin avulla voidaan ennakoida järjestelmälle saapuvan ilmavirran vaihteluita. Teollisuuden höyrystinprosesseissa linjat likaantuvat ilman mukana kulkeutuvista partikkeleista, mikä tukkeuttaa linjoja ja aiheuttaa ongelmia lämpövirran kulkemisessa. Näitäkin tilanteita voidaan havaita ilmavirta antureiden avulla. [25]

4.2 Virtausten ohjaus ja valinta

Hukkalämpövirtojen vaihteluita aiheuttaa esimerkiksi prosessien vaihtelevat tarpeet, paineen- tai lämmönhäviöt putkissa, joita esiintyy erityisesti pidemmissä kytkennöissä. Lämpöpumpulle meneviä lämpövirtoja valittaessa täytyy ottaa huomioon niiden etäisyys, virtaava aine, lämmönlähteen käytettävyys sekä helposti hyödynnettävyys. Monissa laitoksissa edellä mainitut edellytykset toteutuvat vain harvoissa virroissa. Hyödynnettäväksi soveltuvien virtojen perusteella valitaan myös niiden ohjaus sekä mahdollinen takaisinkytkentä. [14]

Virtauksia voidaan ohjata yksinkertaisesti säätöventtiileitä käyttäen. Säätöventtiilin ohjaus tapahtuu toimilaitteen avulla. Venttiili mitoitetaan lämmönsiirtimen mitoitusarvojen mukaisilla lämpötiloilla, tehoilla, paine-eroilla ja virroilla. Säätöventtiilin avulla voidaan vaikuttaa esimerkiksi hukkalämpövirtojen aiheuttamiin muutoksiin virtausnopeuden suoralla ohjauksella, kuten paineen, lämpötilan ja nestetason arvoihin säätöventtiilin säädöllä. Usein säätöventtiilit liitetään ohjausjärjestelmissä analogiseen lähtöön, säätö tapahtuu PID-säätöä käyttäen. PID-säätimen ongelmana on sen heilahtelu, jota voidaan pienentää lisäämällä esimerkiksi toinen säädin. [19]

Virtausten heikentyessä pitkillä matkoilla voidaan systeemiin kytkeä kiertovesipumppuja, joiden tarkoituksena on kierrättää vettä jatkuvasti niiden läpi. Yleensä kiertovesipumput ovat sopiva ratkaisu paluulinjoihin, jolloin saadaan putken virtaamaa nostettua. Pumppuja voidaan kytkeä tilanteesta riippuen sarjaan tai rinnan, riippuen halutusta ja tarvitusta vaikutuksesta virtaukseen. Sarjan kytkettäessä saavutetaan korkeampi paine putkeen ja nostokorkeus suuremmaksi, joka soveltuu erityisesti tilanteisiin, joissa putkisto on ylöspäin menevä. Rinnan kytkennällä saadaan virtaamaa suuremmaksi, jolloin pitkillä linjoilla virtaus saadaan pidettyä korkeana. Näitä voidaan hyödyntää vaihteleviin tilanteisiin esimerkiksi tekemällä rinnakkaisen linjan päälinjan kanssa, jossa pumput sijaitsevat ja joka voidaan ottaa käyttöön virtauksen tai paineen laskiessa nopeasti. [19]

4.3 Kytkennät

Yleisesti laitoksen lämpöpumppujärjestelmän suunnittelussa tulisi ottaa huomioon lämmönlähde, lämpöpumpputekniikka, lämpövaatimukset ja mahdolliset vaihtelevuudet lämmönsaatavuudessa tai tarpeessa. Tietyissä tilanteissa voidaan lämpöpumppujärjestelmän lisäksi asentaa toinen lämpöpumppujärjestelmä, jolloin nopeiden vaihteluiden aiheuttamiin lämmöntarpeen muutoksiin voidaan vastata ja pitää järjestelmät stabiilimpana. Hukkalämpövirtojen välille voidaan liittää putkiyhteyksiä, joiden avulla saadaan enemmän lämpöenergiaa kulkemaan samalla matkalla. [26]

Teollisuuden lämpöpumppujärjestelmien kytkentöjen avulla pystytään vaikuttamaan systeemin varmuuteen ja toiminnan jatkuvuuteen. Peruskytkennän muuttamisen avulla

pystytään nostamaan suotuisammaksi lämpöpumpun lämpötilatasoja ja lämpökerrointa. Kaskadikytkentä on yksi jo teollisuudessa käytössä olevista keinoista lämpöpumppujen uudelleen kytkentään. Tämän tyyppinen kytkentä on käytössä suljetun systeemin lämpöpumpuissa, joissa kaksi eri kiertoainetta ja piiriä on erotettu toisistaan lämmönsiirtimen avulla. [27]

Lämpöenergian tarpeen tai saatavuuden muutoksia voidaan stabiloida hyödynnetyn hukkalämpövirran takaisinkytkennällä samaan prosessiin. Tällöin saadaan tasattua lämpöenergia piikkejä prosessissa ja lämpöpumpulle saadaan tasaisempi lämpövirta. [19]

4.4 Varastointi

Ajallisen tuotannon ja kysynnän yhteensopivuuden haasteellisuuden takia tietyissä teollisuuden prosesseissa lämmönvarastoinnin avulla, voidaan edesauttaa vaihtelevuudesta johtuvia muutoksia. Varastoinnin suunnitteluun vaikuttaa laitoksen prosessit sekä lämmöntarpeen suuruus. Lämmönvälivarastoinnin avulla saadaan puskurivarasto, josta tarpeen mukaan voidaan vapauttaa lämpöenergiaa laitoksen käyttöön. Lyhyen aikavälin vaihteluiden tasaamiseksi riittää suhteellisen pieni varasto, kun taas vuodenaikavaihtelusta johtuvan lämmöntarpeen tasaamiseen tarvitaan huomattavasti suurempi varasto. Varaston ominaisuuksien kannalta on huomioita myös lataus- ja purkuteho, varastoinnin lämpötila sekä varastoitava aikaväli. Teollisuuden hukkalämmön varastointiin soveltuu parhaiten keskipitkän tai pitkän varastointiajan lämpövarastot. Lyhyen aikavälin varastoinnilla tarkoitetaan vuorokausitason vaihtelun tasaamista. Keskipitkällä varastointiajalla tarkoitetaan vuorokausien mittaisia ajanjaksoja ja pitkän ajanjakson varastoinnilla tarkoitetaan lämmönvarastointia viikosta kuukausien mittaiseen jaksoon. [28]

Eri lämpövarastot voidaan jakaa kolmeen erityyppiseen, tuntuvan lämmönvarastoon, faasimuutosvarastoon ja termokemialliset varastot. Näistä yleisin käytössä oleva menetelmä on tuntuvan lämmönvarastointi, joka perustuu varastoitavan aineen lämpökapasiteettiin ja lämpötilan muutokseen. Yleisesti teollisuudessa lämpövarastot on toteutettu varaajalla. Varastointiajat voivat vaihdella päivistä jopa vuoteen ja varastointimateriaalina teollisuudessa usein käytetty vettä. Tämän tyyppin varaston mitoitus riippuu varastointiajasta. Kausivarastointi ja päivävarastointi vaativat

kapasiteetiltaan erikokoiset lämpövarastot. [28] Lämpövarastossa pyritään pitämään lämpökerrostumia, joita purku- ja latauskytkentöjen avulla pyritään estämään sekoittumasta. Veden ominaispainon muutokset lämpötilaan verrattuna aiheuttaa luonnostaan lämpimän veden kerrostumisen varaajan yläosaan ja viileän veden varaajan alaosaan. Nykyajan varaajissa käytetään kaksiosaista rakennetta, joissa välilevyn avulla erotetaan lämmin ja viileä vesi. [19]

Termokemiallinen varastointi on kallein näistä kolmesta ja sen soveltaminen teollisuudessa ei ole vielä käytössä. Se perustuu reversiibelien reaktioiden sitomaan ja vapauttamaan lämpöön. Latausvaiheessa lämpöenergia sitoutuu varastointimateriaaleihin ja purkautuessa vapauttaa energian ympäristöön. Varastoinnin aika vaihtelee tunneista päiviin. Tutkimuksen mukaan termokemialliset varastot soveltuisivat pitkään varastointiin olemattomien lämpöhäviöiden takia. [28]

Kolmantena on faasimuutosvarastot, jotka perustuvat olomuodon muutokseen. Yleensä lämpöenergiaa varastoidaan sulamislämpöön, koska aineen höyrystyminen aiheuttaisi tilavuuden suuren muutoksen. Varastointiaika tämän tyyppisissä varastoissa vaihtelee tunneista viikkoon. [28]

Lämpövarastot ovat kaupallistumisen kannalta alkuvaiheessa, koska teknologinen valmiusaste ja taloudellinen kannattavuus ovat vielä alhaiset [29]. Taloudellinen kannattavuus perustuu suureen alkuinvestointiin, joka sitoo rahaa pitkäksi aikaa, jolloin tuoton pitäisi olla varmaa. Toisaalta ne ovat helposti muokattavissa eri varastokapasiteeteille ja eri lämpötilatasoille. Lisäksi valmistusmateriaalit ovat usein myrkyttömiä ja siten ympäristöystävällinen ratkaisu. [28]

4.5 Ennakointi

Ennakoinnin avulla pystytään toteuttamaan tarvittavan lämpöenergian laskelmointia esimerkiksi prosessin ja ulkolämpötilan perusteella. Vuodenaikavaihtelusta johtuvaa lämpötilan vaihtelua voidaan ennakoida päivätasollakin sääennusteiden perusteella. Ennakointi mahdollistaa lämmöntuotannon kasvattamisen säätilan muutoksien perusteella. [30]

Teollisuudessa voidaan hyödyntää ennakoituihin koneoppimista, joka oppii systeemin lämmöntarpeita ja nopeiden muutosten syntymistä. Koneoppimisen avulla järjestelmästä saadaan älykäs ja järjestelmä oppii koko ajan lisää, joka auttaa optimoimaan lämpöpumppujärjestelmän tehokkuutta. Koneoppimisen avulla riippumatta laitoksen prosessien syklisyydestä, voidaan tuotantoon tulevien tuotteiden energian tarvetta ennakoida ja oppia tuotannon ollessa käynnissä. [31] Ilman koneoppimistakin voidaan tuotannon tuntemisella säätää ja ennakoida mahdollisia lämpöenergian kulutuksen vaihteluita. Kun tiedetään tuotantoon tulevan tuotteen jäähtymisen tai lämmityksen tarve, voidaan lämpöpumppujärjestelmää

5 Johtopäätökset

Tämä kandidaatintyö tarkasteli teollisuuden lämpöpumppujärjestelmien ohjausten parantamista ja käytön stabilisointia vaihtelevissa tilanteissa. Vaihtelevilla tilanteilla tarkoitetaan esimerkiksi hukkalämmön saatavuudessa tai tarpeessa esiintyviä nopeita ja ennakoimattomia vaihteluita. Vaihtelevuudessa otettiin huomioon myös prosessien lämmöntarpeiden ennakoimattomat vaihtelut.

Työn alussa käytiin läpi taustaa lämpöpumppujärjestelmien suosiolle ja maailman nykytilanteen vaikutusta asiaan. Työtaustoittamisen jälkeen esiteltiin lämpövoimakoneen toimintaperiaatetta. Lämpövoimakoneet toimivat kahden erilämpötilaisen lämpövaraston avulla, joissa virtaus tapahtuu luonnollisesti kuumasta viileään. Tällöin systeemistä voidaan ottaa ulos työtä. Jäähdytyskone toimii päinvastaisesti ja virtauksen synnyttämiseksi systeemiin on tehtävä työtä. Lämpöpumput perustuvat toiminnaltaan jäähdytyskoneisiin eli lämpöpumppujärjestelmiin on tehtävä ulkoista työtä.

Työssä käsiteltiin hukkalämpöä, joka on laitoksen sekundaarienergiasta ylijäänyttä lämpöenergiaa. Hukkalämpö on uudelleen hyödynnettävissä laitoksen prosesseihin lämpöpumppujärjestelmien avulla. Hukkalämmön uudelleen hyödyntämisellä saadaan vähennettyä ulkoisen primäärienergian tarvetta. Hukkalämmön vaihteluiden taustalla teollisuuden laitoksissa voivat olla esimerkiksi vuodenaikavaihtelu, tuotannon sykliisyys tai hukkavirtalinjojen pitkät etäisyydet.

Lämmönvaihteluiden ennakoimiseen ja lämpöpumppujärjestelmän toiminnan stabiloimiseen löydettiin monia ratkaisuja. Ratkaisuja etsittiin anturoinneilla, virtausten ohjauksella, kytkennöillä, varastoinnilla ja ennakoinnilla. Anturoinneilla voidaan havaita lämmön, paineen tai virtauksen häviöt, joiden perusteella lämpöpumpun toimintaa saadaan ohjattua. Anturointeja lisäämällä useaan kohtaan prosessia ja linjoja parannetaan datan saantia lämpöenergian kulutuksesta ja tuotannosta.

Lämpöpumppujärjestelmässä hyödynnettävät hukkalämpövirrat pitää olla sopivia etäisyydeltään, käytettävyydeltään ja virtaava aine tai höyry. Erityisesti hukkalämpövirran etäisyys saattaa aiheuttaa lämmönhäviöitä. Jos lämpövirrasta on saatavilla lämpöä vain syklisesti, on lämpöpumpulle tuotava lämpöenergiaa myös

vaihtoehtovirrasta. Hukkalämpövirroissa tapahtuvia paineen ja lämmönmuutoksia voidaan stabiloida säätöventtiilien avulla. Säätöventtiileitä asentamalla hukkalämpövirran putkeen saadaan anturidatan perusteella rajoitettua tai vapautettua virran kulkua tilanteen mukaan. Kiertovesipumppujen avulla voidaan parantaa virtausta, etenkin pitkillä etäisyyksillä sekä nostaa painetta tai virtausta putkessa. Takaisin kytkemällä tuotettu lämpöenergia takaisin samaan prosessiin saadaan tasattua lämpöpiikkejä ja lämpöpumpulle tasaisempi lämpövirta.

Nopeisiin vaihteluihin parhaiten soveltuva toteutus on lämmönvarastointi, koska varastosta voidaan purkaa lämpöenergiaa nopeasti prosessiin lämmöntarpeen kasvaessa. Energia varastoidaan veteen, joka luonnostaan asettuu varastoon kerroksittain lämpötilan mukaan. Varastojen avulla saadaan vuorokausi kuin vuodenaika vaihteluista johtuvia lämmöntarpeen tai tuotannon muutoksia stabiloitua. Varastoon voidaan tuottaa energiaa tuotannon lämmöntarpeen laskiessa.

Ennakoinnin avulla voidaan tulevien tuotteiden tuotanto aikataulu tietämällä ennakoida lämpöpumppujärjestelmän lämmöntuotannon tarvetta. Lisäksi laitoksissa, joissa hukkalämmön lämpötilaan vaikuttaa ilmanlämpötila, voidaan sääennusteiden perusteella ennakoida suuntaa antavasti. Koneoppimisen avulla ennakointia saadaan parannettua ja tuotannon lämmöntarvetta ennakoitua.

Lämpöpumppujärjestelmän pitäminen stabiilina parantaa hyötysuhdetta ja tämän takia mahdollistaa taloudellisen hyödyn saamisen. Yleisesti kaikki yllä olevat vaihtoehdot sisältävät hyviä ja huonoja puolia, joten toteutukset täytyy miettiä jokaisen teollisuuden laitoksen kohdalla erikseen. Lisäksi toiset ratkaisusta eivät ole fyysisesti mahdollisia toteuttaa tietyissä laitoksissa.

Lähteet

1. Euroopan ympäristökeskus. Teollisuus, 2019. [Viitattu 26.2.2022] Saatavissa: <https://www.eea.europa.eu/fi/themes/industry/intro>
2. Maaskola I. & Kataikko M. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen, Motiva Oy. Helsinki. 2014. Verkkojulkaisu. [Viitattu 11.2.2022] Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu- ja_ORC-sovellukset.pdf
3. Chua KJ & Chou SK & Yang WM. Advantages in heat pump systems: A review. Applied energy. Vol. 87:12. 2010. S. 3611–3624. Verkkojulkaisu [Viitattu 12.2.2022] DOI 10.1016/j.apenergy.2010.06.014.
4. Harmaala P. Lämpöpumppulaitoksilla saavutetaan energiaomavaraisuus, ja siitä kiittää myös kukkaro. Calefa Oy. Hollola. 2022. [Viitattu 18.3.2022] Saatavissa: <https://www.calefa.fi/lampopumppulaitoksilla-saavutetaan-energiaomavaraisuus-ja-siita-kiittaa-myos-kukkaro/>
5. McMillan C. A. & Ruth M. Using facility-level emissions data to estimate the technical potential of alternative thermal sources to meet industrial heat demand. Applied Energy. Vol. 239. 2019. S. 1077-90. [Viitattu 18.3.2022] DOI 10.1016/j.apenergy.2019.01.077.
6. Giancoli D.C. Physics: principles with applications. Global edition. Harlow, England. 2016. 1058 s. ISBN 1292057122
7. Hundy G.H. & Trot A.R. & Welch T. Refrigeration, Air conditioning and Heat pumps. 5. painos. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier. 2016. 473 s. ISBN 0081006470
8. Wikstén R. Lämpövoimaprocessit. 4. painos. Helsinki, Otatieto Helsinki University Press. 2009. 164 s. ISBN: 978-951-672-365-8
9. Aittomäki A. & Aalto E. Kylmäteknikka. Helsinki, Suomen kylmäyhdistys. 2008. 406 s. ISBN 978-951-96449-6-7
10. Young H. D. & Freedman R. A & Ford A. L. University Physics with modern physics. 14. painos. Harlow: Pearson. 2016. 1593 s. ISBN 978-1-292-10031-9
11. Teiniranta L. Heating and Cooling with a Heat Pump. Maisterintyö. Jyväskylän-yliopisto, fysiikan osasto. Jyväskylä. 2010. 104 s.
12. Arpagaus C. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. Energy. Vol. 152. 2018. S. 985-1010. [Viitattu 19.3.2022] DOI 10.1016/j.energy.2018.03.166

13. Koskelainen L. & Saarela L. & Sipilä K. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus. 2006. 566 s. ISBN 952-5615-08-1
14. Luoranan J. Teollisen kokoluokan lämpöpumpukoneikon tekniikka ja talous. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Energia- ja LVI-tekniikka. Espoo. 2017. 101 s.
15. Koljonen T. & Sipilä K. Uudemman absorbtiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 1998. 55 s. Verkkojulkaisu. [Viitattu 20.3.2022] ISBN 951-38-5335-7
16. Vlachev S. & Nenov N. & Georgiev V. & Valchev S. Determination of coefficient of performance of mechanical vapour recompression heat pump. E3S web of conferences. Vol. 112:01013. 2019. 10 s. [Viitattu 22.3.2022] ISSN 2267-1242. DOI 10.1051/e3sconf/201911201013
17. Atmaca M. & Ezgi C. Three-dimensional CFD modeling of a steam ejector. Energy Sources: Taylor and Francis. 2019. S. 1-12. Verkkojulkaisu. [Viitattu 25.3.2022] DOI 10.1080/15567036.2019.1649326
18. Oilon Oy. Teollisuuden lämpöpumput. Verkkojulkaisu. [Viitattu 4.4.2022] Saatavissa: <https://oilon.com/fi/tuotteet/teollisuuslampopumput/>
19. Syrjäläinen R. Hybridilämmitysjärjestelmän kytkennät. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu, automaatiotekniikka. Helsinki. 2015. 66 s.
20. Jaako I. Metso DNA -oppimisympäristö. Insinöörityö. Lapin ammattikorkeakoulu, sähkötekniikka. Lappi. 2017. 58 s.
21. Ehrenpreis M. Creation of simulation environment for Metso DNA-automation system. Metropolia Ammattikorkeakoulu, automaatiotekniikka. Helsinki. 2015. 67 s.
22. Nivalainen S. Liiketoimintamalli teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntämisestä kaukolämpöverkoissa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energia- ja ympäristötekniikan osasto. Lappeenranta. 2011. 91 s.
23. YIT & Energiateollisuus ry & Työ- ja elinkeinoministeriö. Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä. YIT Teollisuus- ja verkkopalvelut Oy. 2010.
24. Sihvola V. Teollisuuden hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkossa. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Jyväskylä. 2019. 59 s.
25. Bellanco I. & Fuentes E. & Vallés M. & Salom J. A review of the fault behavior of heat pumps and measurement, detection and diagnosis methods including

- virtual sensors. *Journal of Building Engineering*. Vol: 39. 2021. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102254
26. Sayegh MA. & Jadwiszczak P. & Axcell BP. Niemierka E. & Brys K. & Jouhara H. Heat pump placement, connection, and operational modes in European district heating. *Energy and buildings*. Vol:166. 2018. S.122-144. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.02.006
27. Lehikoinen M. Kuumalämpöpumpun käyttömahdollisuudet liikekiinteistössä. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 2020. 79 s.
28. Salonen N. Teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntäminen. Diplomityö. Tampereen yliopisto, ympäristö- ja energiatekniikan ohjelma. 2020. 68 s
29. Miró, L., Gasia, J., & Cabeza, L. F. Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review. *Applied Energy*. Vol:179. 2016. S. 284-301, DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.147
30. Rolando D. & Madani H. & Braida G. & Tomasetig R. & Mohammadi Z. Heat pump system control: the potential improvement based on perfect prediction of weather forecast and user occupancy. 12th IEA Heat Pump Conference. 2017. S. 1-9.
31. Diez-Olivian A. & Del Ser J. & Galar D. & Sierra B. Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0. *Information Fusion*. Vol: 50. 2019. S. 92-111. DOI: 10.1016/j.inffus.2018.10.005