

Ylijäämälämmön talteenotto ja varastointi

Kjell Strandström

Petri Vesanto

Novox Oy



Uudenmaan liitto
Nylands förbund

TECHVILLA



Kestävää kasvua ja työtä -ohjelma

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Sykli - Energiaväylä

Ylijäämälämmön talteenotto ja varastointi

1 Johdanto

Tämä työ on tehty osana SYKLIn energiaväylä projektia.

Tässä raportissa esitellään mahdollisuudet ottaa talteen lämpöä teollisuuden ylijäämälämmöstä sekä lämmön varastointimenetelmiä. Raportti keskittyy kosteisiin matalalämpöisiin poistokaasuihin, jotka normaalisti johdetaan ilmaan. Poistokaasujen kondensoivilla talteenottojärjestelmillä voidaan myös vähentää ilmapäästöjä, mutta tässä on fokusoitu lämmöntalteenottoon.

Raportin lopussa esitetään esimerkkinä, miten poistokaasujen lämpöä voidaan ottaa talteen Saint Gobain Finlandin lasivillatehtaalta Hyvinkäällä.

2 Ylijäämälämmön määritelmä

Ylijäämälämpö tarkoittaa tässä työssä sellaista lämpöä, jota ei voida prosessissa suoraan käyttää tai kierrättää, eikä tavanomaisilla keinoilla muuttaa sähköksi ja/tai kaukolämmöksi.

2.1 Havaittava lämpö

Havaittava lämpö on energiaa, joka sitoutuu aineeseen ja aiheuttaa lämpötilan muutosta, mutta ei millään tavalla muokkaa itse ainetta. Havaittavan lämmön käyttöpotentiaali riippuu suoraan siitä, kuinka paljon kuumennettua ainetta voidaan jäähdyttää.

Esimerkki: Jos 100 m³/s suuruinen kuiva ilmavirta jäähdytetään 30°C → 20°C, lämpötilamuutoksesta saatu lämpöteho on 1,2 MW

2.2 Latenttilämpö

Latenttilämpö on energiaa, joka sitoutuu tai vapautuu faasimuutoksessa. Aine sitoo ja luovuttaa energiaa ilman että sen lämpötila muuttuu. Tämä tarkoittaa yleensä muutosta kiinteän, nestemäisen ja kaasumaisen olomuotojen välillä. Kyseessä voi myös olla kahden eri kiinteän olomuodon välistä muutosta.

Esimerkki: Jos 100 m³/s suuruinen vesihöyryllä kyllästetty ilmavirta jäähdytetään 30°C → 20°C, lämpöenergiaa saadaan 4,8 MW teholla. Tästä 3,6 MW on latenttilämpöä ja 1,2 MW havaittavaa lämpöä.

3 Ylijäämälämmön talteenotto – tekninen periaate

Ylijäämälämpöä on teollisuudessa ja yhteiskunnassa esimerkiksi poistokaasuihin ja jätevesiin sitoutuneena. Jätevesistä on viime vuosina ryhdytty ottamaan lämpöä talteen lämpöpumpuilla. Teollisuuden kuumista poistokaasuista otetaan nykyisin hyvin lämpöä talteen ja niistä voidaan tehdä sähköä, prosessihöyryä tai kaukolämpöä. Teollisessa toiminnassa on myös matalalämpöistä ylijäämälämpöä kosteissa kaasuissa. Seuraavassa käydään läpi lämmön talteenottomahdollisuuksia näistä kaasuista.

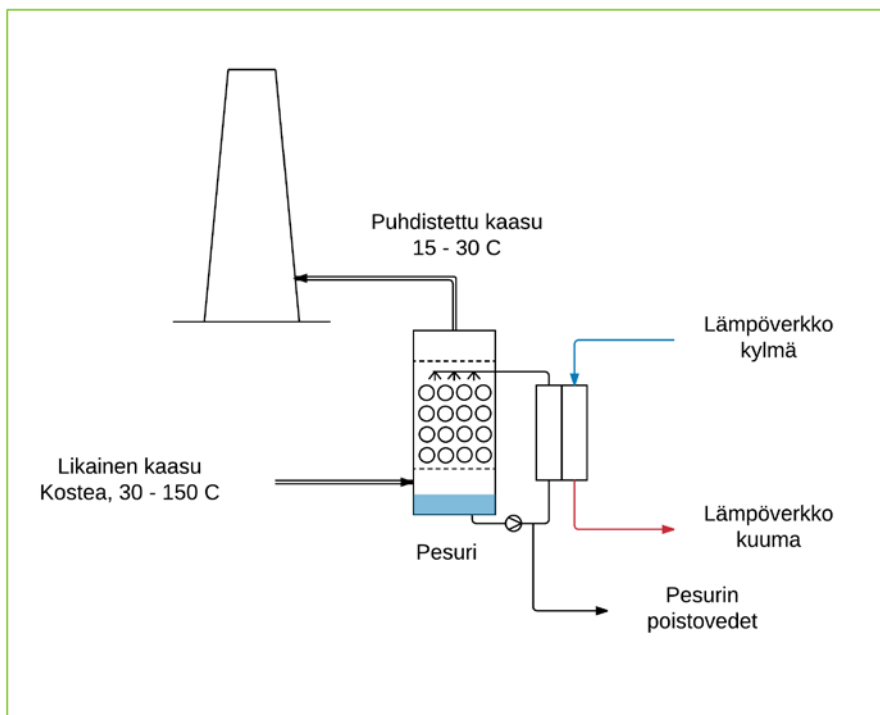
3.1 Kaasun pesuri

Savukaasu- ja prosessikaasupesureita on useita eri tyyppisiä. Pesurit on kehitetty ensisijaisesti kaasun puhdistamista varten. Niissä tapauksissa, jossa otetaan myös lämpöä talteen, käytetään yleisesti kiinteäkerrospesuria.

Kuva 1 esittää kiinteäkerrospesurin toimintaperiaatteen. Likainen kaasua johdetaan pesurin alaosaan, mistä se virtaa ylöspäin kiinteän kerroksen, pedin läpi. Petti koostuu tyypillisesti metallisista tai muovista täytekappaleista jotka voivat olla erikokoisia ja muotoisia. Yleensä täytekappaleet ovat 1 – 10 cm halkaisijaltaan. Pedin yläpuolella ruiskutetaan vettä, joka jäädyttää ja lauhduttaa savukaasut pedissä. Ruiskutusveteen voidaan lisätä myös kemikaaleja, joilla parannetaan pesutulosta.

Täyteainekappaleet aikaansaavat suuren kosketuspinta-alan ruiskutusveden ja kaasun välillä ja tasoittavat kaasun virtauksen pesurin läpi. Kiinteäkerrospesuri poistaa myös partikkeleita, mutta kun kaasussa on runsaasti hiukkasia (esim. savukaasut), suurin osa niistä poistetaan ensin kuivalla menetelmällä (esim. sähkösuodin, pussisuodin).

Pesurin vesi kierrätetään pumpulla pesurin pohjasta ruiskusuuttimien kautta pedin yläpuolelle. Kiertävä pesurivesi jäädytetään lämmönvaihtimessa, jolla lämpö siirretään lämpöverkkoon. Samasta kierrosta myös poistetaan myös vettä. Yleisesti lisävetä ei tarvita.

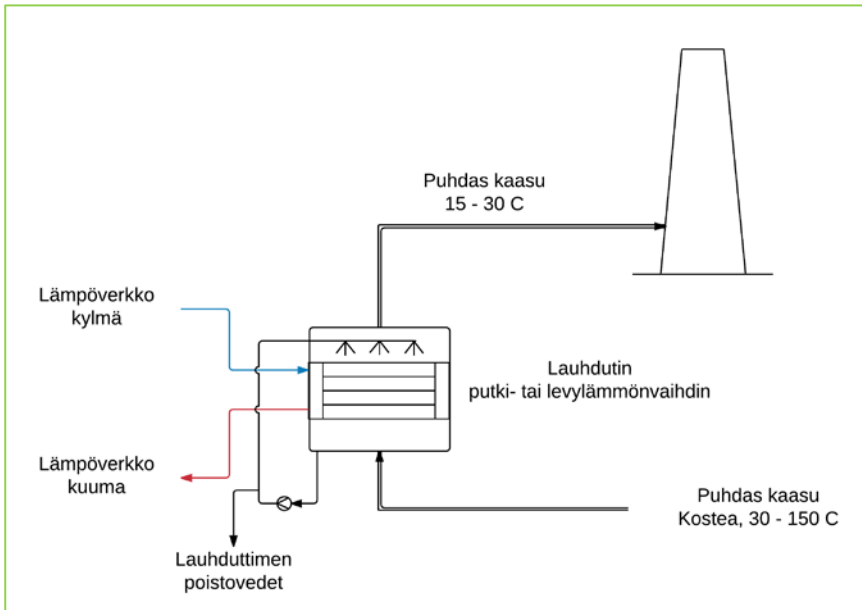


Kuva 1. Lauhdutuslämmöntalteenotto pesurilla

3.2 Lämmönvaihdinlauhdutin

Lämmönvaihdinlauhduttimessa lämpö siirtyy kondensoivasta kaasusta lämpöverkon veteen suoraan ilman väliainekiertoa. Siinä ei ole erillistä kondenssiveden lämmönsiirintä kuten pesurissa. Kuva 2 esittää lämmönvaihtimella toimivan lauhdutuslämmön talteenoton periaatteen.

Lämmönvaihdin voi olla levy- tai putkirakenteinen.



Kuva 2. Lauhdutuslämmöntalteenotto lauhduttimella

4 Ylijäämälämmön varastointi ja lämpöverkko – tekninen periaate

4.1 Matalalämpötilaisen lämpöverkon toimintaperiaate

Matalalämpötilaiseen ylijäämälämpöä hyödyntävään lämpöverkkoon voidaan siirtää lämpöä matalalämpötilaisista lämmönlähteistä kuten kosteista kaasuista. Verkon asiakkaat käyttävät lämpöä joko sellaisenaan tai nostavat sen lämpötilaa sopivaan tasoon omilla lämpöpumpuillaan.

Lämmön lämpötila voidaan myös nostaa tuotantopaikalla normaaliin kaukolämmön lämpötilaan, jolloin lämpöä voidaan syöttää normaalin kaukolämpöverkkoon.

Optimaalinen toteutustapa voi myös olla näiden kahden välimuoto, missä ylijäämälämpö nostetaan tuotantopuolella sopivaan lämpötilaan ja kuluttajat nostavat lämpötila edelleen tarvittavaan lämpötilaan.

Matalalämpöverkon toimintakriteerit ovat:

- Paluulämpötila on tarpeeksi alhainen, jotta ylijäämälämpö saadaan siirtymään siihen
- Menolämpötilan oikea taso määrittyy ylijäämälämmön lämpötilan ja lämpöverkon siirtokapasiteetin mukaan
- Kuluttajat nostavat lämmön lämpötilan omilla lämpöpumpuillaan omiin tarpeisiin sopivaksi

Matalan paluulämmön tarve tekee sen, että matalalämpöverkkoa ei käytännössä voida toteuttaa ilman lämpöpumppuja. Ilman lämpöpumppuja myös meno- ja paluulämpötilan ero jäisi pieneksi, jolloin suuri kapasiteetti tarvitsisi kohtuuttoman suuren virtauksen ja ei olisi taloudellisesti kannattava.

Matalalämpöisen lämpöverkon hyvä puoli on se, että verkon lämpötila ei ole missään korkeampi kuin mitä kuluttaja tarvitsee. Esimerkiksi varastohallin ylläpitolämmitys saattaa onnistua ottamalla lämpöä suoraan matalalämpöverkosta, kun taas käyttöveden lämmitykseen voidaan käyttää saman lämpöverkon energiaa lämpöpumpun avulla.

4.2 Lämpövaraston toimintaperiaate

Lämpövarastot voidaan jakaa kahteen kategoriaan, lyhytaikaisiin varastoihin ja pitkäaikaisvarastoihin.

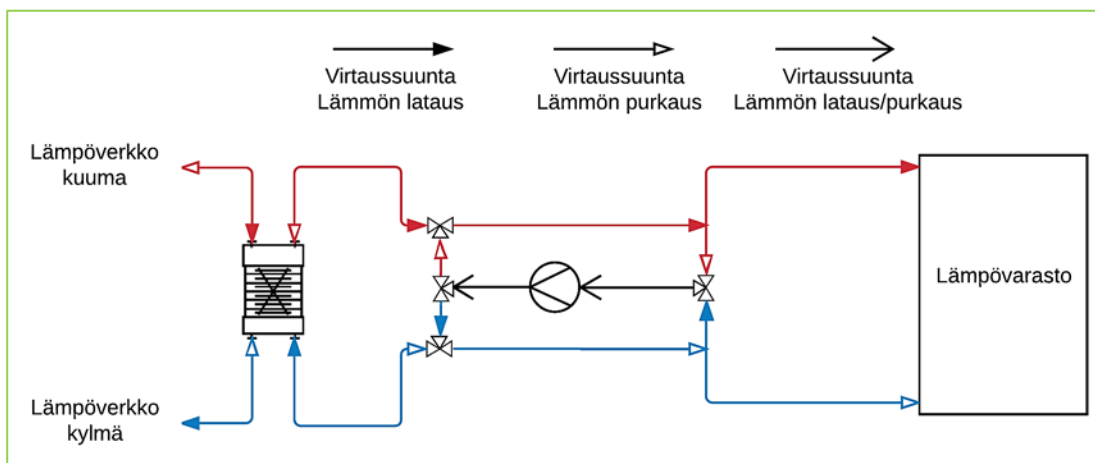
Lyhytaikaisilla varastoilla pyritään tasaamaan vuorokauden tai viikon aikana tapahtuvan lämpöenergian kysynnän muutoksista johtuvaa tuotantotarpeen vaihtelua. Esimerkiksi kaupungissa kaukolämpöä voidaan varastoida suureen vesisäiliöön päivällä, ja yöllä kun kulutus on matala. Lämpöä voidaan sitten siirtää varastosta takaisin verkkoon aamulla ja illalla, kun lämmön kulutus on korkea. Näin lämpöä voidaan tuottaa tasaisemmin, eikä lämmönlähteitä tarvitse säätää tarkalleen kulutuksen mukaan. Tämän lisäksi, jos varasto on varmennettu (on useita varastoja verkossa) lämmöntuotantokapasiteettia ei tarvitse suunnitella maksimikulutuksen mukaan.

Pitkäaikaisvarastossa pyritään varastoimaan lämpöä silloin kuin lämmöntarve on yleisesti alhainen (esim. kesällä tai tehtaan seisokin aikana) ja hyödyntää se silloin kuin lämmöntarve on korkea (esim. talvena tai tehtaan käynnistämisen aikana).

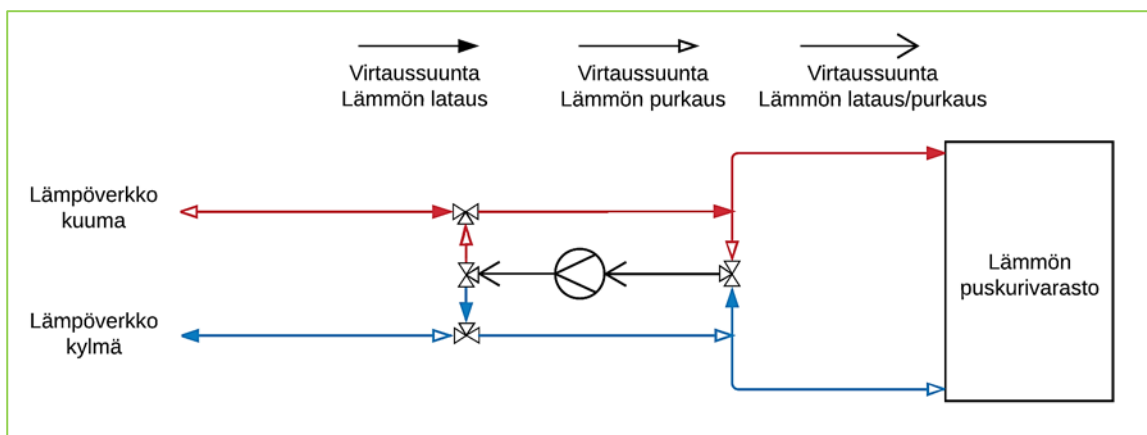
4.3 Yleiset lämmön varastoinnin menetelmät

Tavallisin tapa varastoida lämpöä on vesivarastoissa, jossa energia varastoidaan havaittavana lämpönä. Nämä toimivat lyhytaikaisina varastoina ja tasaavat vuorokausivaihteluita. Tämä on myös ainoa laajasti käytössä oleva lämmön varastointimenetelmä. Vesivarasto on useimmiten maanpäällinen eristetty säiliö, mutta suurimmat varastot voivat olla myös maanalaisia.

Yksinkertaisin tapa varastoida lämpöä on nostaa itse verkossa olevan veden lämpötilaa. Vesivarastot suunnitellaan niin että vesi kerrostuu hyvin, eli kylmä vesi on pohjalla ja kuuma vesi ylhäällä ja ne sekoittuvat mahdollisimman vähän. Kun lämpövarastoa ladataan, kylmää vesi otetaan säiliön pohjalta ja kuuma vesi syötetään varaston yläosaan. Varastovesi voi kiertää lämmönvaihtimen kautta, jossa lämpö siirtyy kaukolämpövedestä varastoveteen (Kuva 3) tai kylmä vesi voidaan pumpata suoraan kaukolämmön paluulinjaan ja kuuma vesi vastaavasti otetaan kaukolämmön menolinjasta (Kuva 4). Tällainen kaukolämmön suora varastointi on yleisemmin käytössä oleva menetelmä kuin lämmönvaihtimien avulla toimiva menetelmä.



Kuva 3. Lämpövaraston toimintaperiaate, jossa lämmönvaraston vesi ei ole kosketuksissa kaukolämpöveden kanssa.

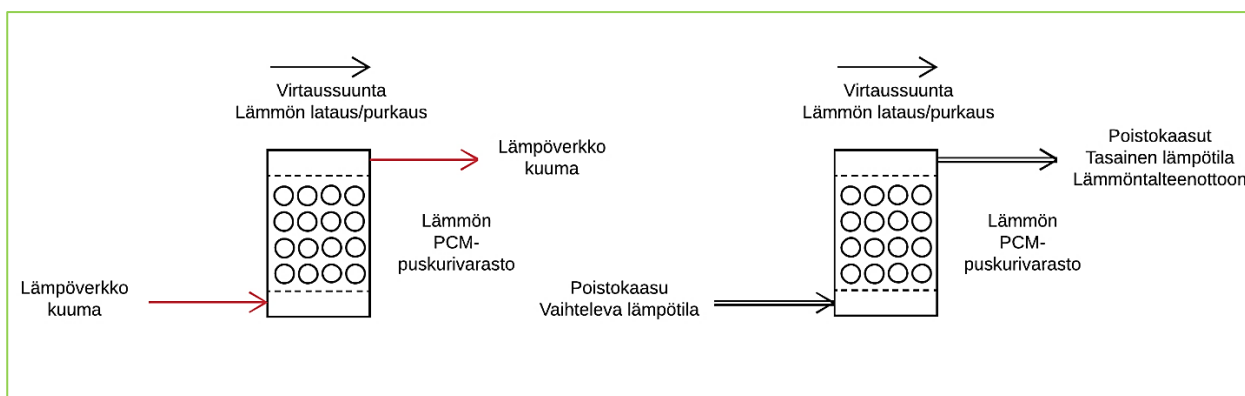


Kuva 4. Lämpövaraston toimintaperiaate, jossa kaukolämpövesi siirtyy suoraan varastoon.

Kuva 5 esittää faasimuutokseen perustuvan lämmön varastoinnin toimintaperiaatteen. Faasimuutosmateriaali (PCM = Phase Change Material) varastoi lämpöä faasimuutoksen (latenttilämpö) avulla, joten varastointilämpötila voi olla vakio. Tyypilliseen PCM aineeseen saatava lämpömäärä vastaa samaa lämpömäärää, joka voidaan varastoida samaan tilavuuteen vettä 30 – 60 asteen lämpötilaerolla.

PCM varastot eivät juuri ole kilpailukykyisiä veden kanssa, mutta matalalämpöisissä verkoissa, joissa lämpötilaerot ovat pieniä PCM materiaalit voivat olla kilpailukykyisiä.

Useimmiten PCM varastoja käytetään tasaamaan lämpövaihteluja esimerkiksi ilmanvaihdossa tai elektroniikassa.



Kuva 5. Faasimuutosmateriaalilla (PCM) toimiva puskurivarasto, jossa puskuroidaan lämmöntuotannossa olevia muuttuvia lämpötilatasoja sekä pidetään lämpöverkkoon menevä vesi tasalämpöisenä.

4.4 Muut varastointimenetelmät

Lämpöä voidaan myös varastoida maahan (esim. kallioon). Tällaisia varastoja on koemielessä rakennettu lämmön pitkäaikaisvarastoiksi. Menetelmä ei ole kuitenkaan toistaiseksi osoittautunut kilpailukykyiseksi.

Myös maanaltaisia vesialtaita voidaan käyttää lämmön varastointiin. Tämän tyyppisessä pitkäaikaisvarastoissa varaston tilavuuden on oltava suuri, jos lämpö varastoidaan matalalämpöisenä. Korkealämpöisenä varastona lämpöhäviöt nousevat helposti suuriksi.

Termokemiallinen lämmönvarastointi perustuu "sorption"-prosessissa vapautuvaan tai sitoutuvaan reaktiolämpöön. Näissä absorboitu tai adsorboitu nestemäinen tai kaasumainen työaine erotellaan sorbentista lämmön avulla. Kun aineet yhdistetään takaisin, tapahtuu vastakkainen reaktio ja kemiallinen energia vapautuu lämpönä. Tällä tavalla lämpöä voidaan varastoida pitkiksi ajoiksi periaatteella ilman häviöitä. Nämä menetelmät ovat vielä kehitysvaiheessa ja niiden ongelmana on reaktioiden toistettavuus.

5 Ylijäämälämmön talteenoton projektin toteutus

Tässä osiossa oletetaan, että matalalämpöinen ylijäämälämpö siirretään matalalämpöiseen lämpöverkkoon ja lämmön kuuluspäässä lämpötila nostetaan oikeaan tasoon ja varmistetaan että paluulämpö on riittävän alhainen.

5.1 Toteutustapa

Matalalämpöisen ylijäämälämmön talteenotto ja matalalämpöisen lämpöverkon käyttö vaatii paljon enemmän yhteistyötä lämmöntuottajan ja -kuluttajan välillä kuin tavanomaisessa kaukolämpöverkossa. Tavallisessa kaukolämpöverkossa lämpö siirtyy käyttäjälle valmiiksi oikealla lämpötasolla mistä se otetaan käyttöön lämmönvaihtimella. Tällä tavalla lämmön tuottajalla ja kuluttajalla on suoraviivainen myyjä – asiakas suhde.

Matalalämpöverkossa osa lämmöntuotannosta tapahtuu kuluttajapäässä kun lämpötila nostetaan lämpöpumpulla oikeaan tasoon. Koska lämpöverkossa halutaan välttää liian suuria virtauksia, halutaan suhteellinen suuri lämpötilaero meno- ja paluulinjan välissä. Tämä tarkoittaa käytännössä että matalalämpöisen verkon paluulinjan lämpötila on oltava erittäin alhainen. Kuitenkin kuluttajapään lämpöpumpun COP on korkeampi mitä vähemmän sillä voidaan laskea paluuv veden lämpötila. Kuluttajalle ei ole myöskään aina kannattavaa pyrkiä tasamaan kulutustaan. Tämä on kuitenkin matalalämpöverkon toiminnan kannalta tärkeää, koska ylijäämälämmön virtaa ei voida säätää, ja ylijäämälämpöä halutaan yleisesti välttää eikä lisätä.

Kuluttajan vaikutus matalalämpöverkon toimivuuteen on merkittävä ja sen vuoksi toiminnan onnistuminen edellyttää myös uudenlaisia toimintamalleja ja sopimuksia. Toiminta voidaan järjestää esimerkiksi seuraavilla tavoin:

1. Lämmön tuottaja ottaa ylijäämälämpöä talteen ja siirtää lämpöä lämpöverkoston. Kuluttaja nostaa omilla lämpöpumpuillaan lämpötilan oikeaan tasoon. Tätä tapaa käytettäessä on luotava kannustimia kuluttajalle käyttää sellaista teknologiaa, joka on koko lämpöverkon ja kaikkein siihen kytkeytyneiden toimijoiden edun mukaista. Tämä voi tarkoittaa esim. lämpövarastoa sekä lämpöpumppuja, jotka alentavat lämpöverkon lämpötilaa mahdollisimman paljon. Esimerkiksi kuluttajan käyttämä veden virtausmäärään perustuvaa veloitus (kulutetun energian sijaan) ja myös huipputehoon perustuvaa maksu voisivat kannustaa tarvittaviin investointeihin.
2. Lämmöntuottaja omistaa sekä lämmöntalteenottolaitteistot että kuluttajapäässä toimivat lämpöpumput ja lämpövarastot. Tällöin lämmöntuottaja myy lämpöä kuluttajalle kokonaispalveluna, jossa tuottaja varmistaa toimivan ja optimoidun lämmön. Tässä ratkaisussa kuluttaja luovuttaa tarvittavia tiloja lämmöntuottajalle ja lämmöntuottaja tekee tarvittavat investoinnit. Tämä palvelu voi olla kiinteän hintainen.

Koska matalalämpöverkkoja ei vielä ole toteutettu Suomessa ja kuluttajalle energia-asiat harvoin kuuluvat ydinosaamiseen, vaihtoehto 2 tai sen kaltainen toimintatapa vaikuttaa tällä hetkellä toimivammalta. Pienessä pilottiverkossa voi olla järkevä muodostaa yhteisomisteinen yhtiö, joka omistaa, optimoi ja operoi matalalämpöverkkoa. Erillinen yhtiö voi näin keskittyä uuden toimintamallin kehittämiseen, sekä sopivien teknisten ratkaisujen hakemiseen.

5.2 Ylijäämlämmön talteenoton vaihtoehdot

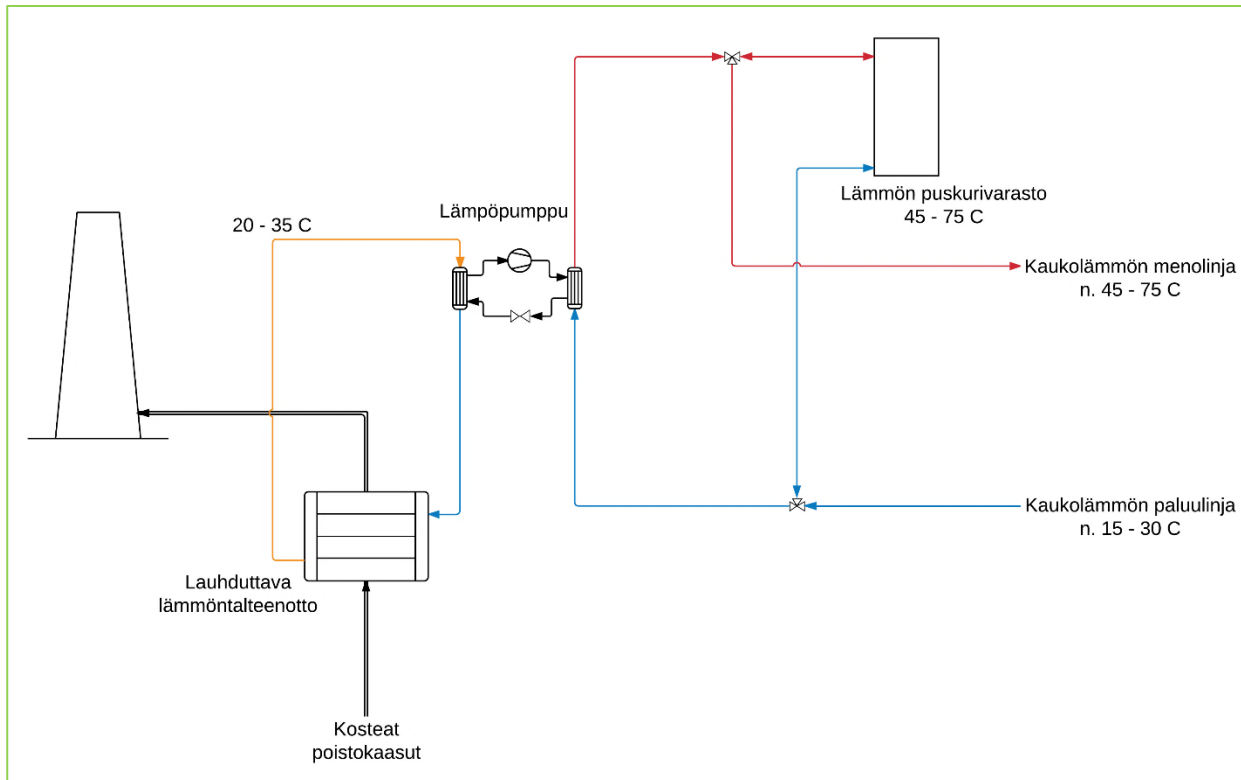
Tässä osiossa on oletettu että ylijäämlämpö on matalassa lämpötilassa. Lämmöntalteenotossa tarvitaan silloin lämpöpumppu kahdesta syystä:

1. Menoveden lämpötila on nostettava sopivaan tasoon
2. Paluuveden lämpötila on pidettävä mahdollisimman alhaisena että saadaan mahdollisimman paljon lämpöä talteen.

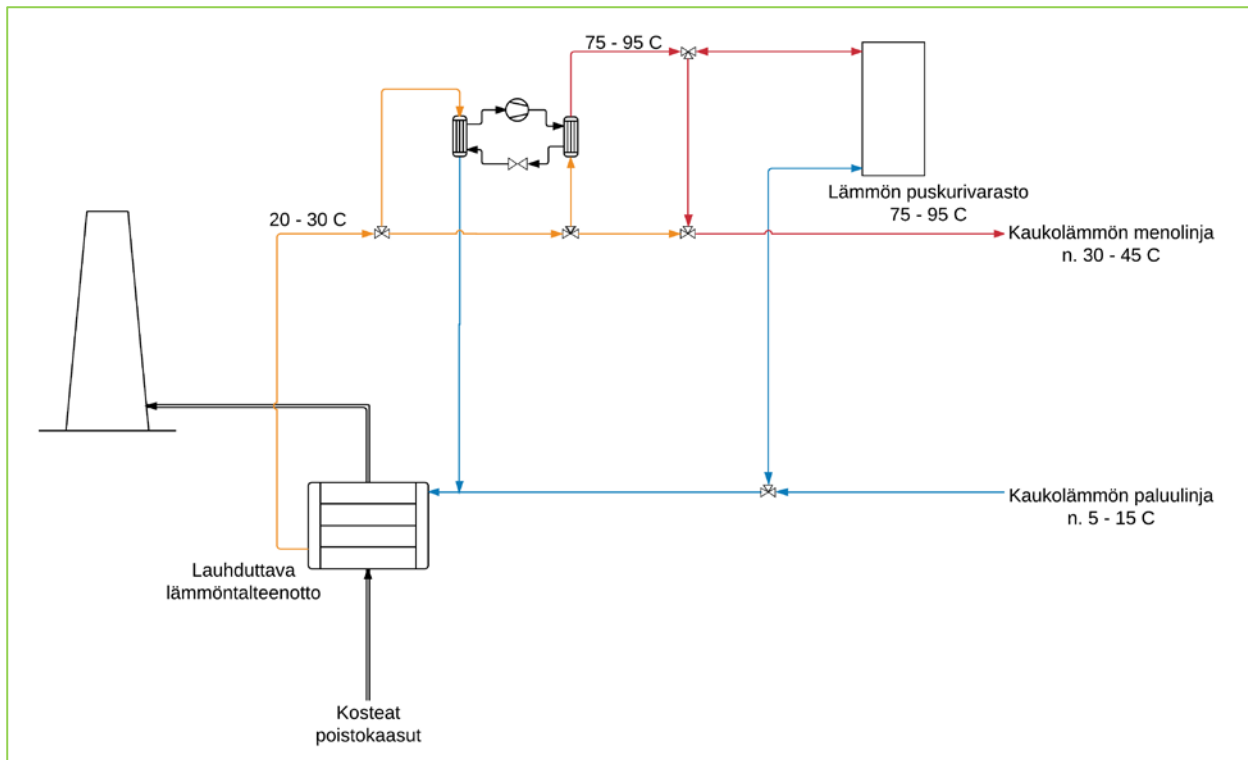
Seuraavissa kuvissa (Kuva 6 ja Kuva 7) esitetään kaksi eri kytkentätapaa lämmöntalteenoton ja lämpöverkon välille. Ensimmäisessä kuvassa (vaihtoehto 1) lämpöpumpun höyrystin on kytketty erillisellä kierrolla lämmön talteenoton lauhduttimeen ja lämpöpumpun lauhdutin on kytketty lämpöverkkoon. Lämpöpumppu nostaa koko lämpöverkon virtauksen lämpöverkon tavoitelämpöön. Lämpövarasto varastoi energiaa lämpöverkon lämpötilassa.

Toisessa kuvassa (vaihtoehto 2) lämpöverkon vesi johdetaan lämmön talteenoton lauhduttimeen ja sen jälkeen lämpöpumppuun, osin höyrystimeen ja osin lauhduttimeen. Lämpöpumppu nostaa veden lämpötilan korkeammalle kuin lämpöverkon tavoitelämpötila ja verkon lämpötila säädetään sopivaksi lämpöpumpun ohituksella. Täällä tavalla voidaan varastoida lämpöä korkeamassa lämpötilassa ja saada lämpövaraston energiasisältö suuremmaksi kuin vaihtoehdossa 1.

Ensimmäisen vaihtoehdon etu on, että lämpöverkon paluulämpötila ja lämmön talteenoton lauhduttimeen menevän veden lämpötila ovat toisistaan riippumattomia. Toisessa vaihtoehdossa taas ei ole kahta erillistä kiertoa ja tämä sopii hyvin silloin kun lämpöverkon paluulämpötila on alhainen. Lämpöpumpun rikkoutuessa toisessa vaihtoehdossa lämmönsaanti rajoittuu mutta ei lakkaa täysin kuten ensimmäisessä vaihtoehdossa.



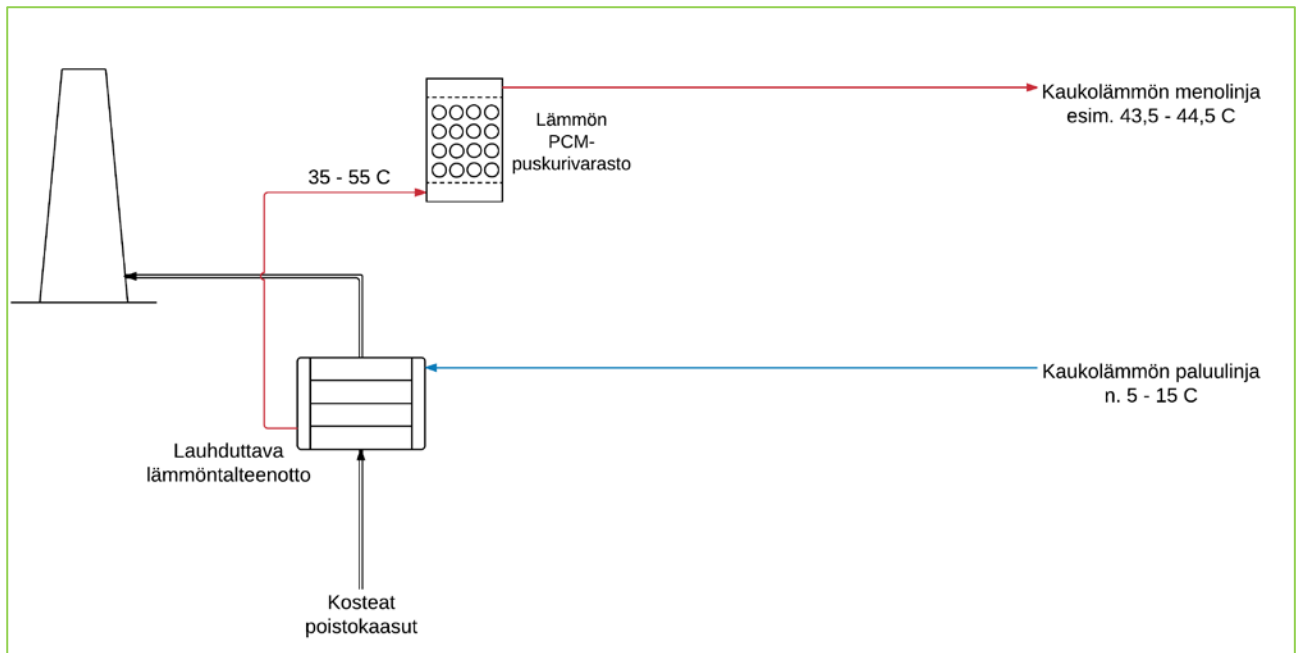
Kuva 6. Poistokaasujen lauhdutus erillisellä kierrolla sekä lämmön nosto lämpöpumpulla ja lämmön puskurivarasto lämpöverkon lämpötilassa



Kuva 7. Poistokaasujen lauhdutus lämpöverkon vedellä sekä lämmön nosto lämpöpumpulla ja korkealämpötilainen puskurivarasto

Kuva 8 näyttää poistokaasujen lämmöntalteenoton, johon on liitetty PCM puskurivarasto. Tämän kaltainen vaihtoehto toimii hyvin silloin kun lämpö voidaan ottaa talteen ilman lämpöpumppua, mutta ylijäämälämmön lämpötila vaihtelee. Koska PCM varasto toimii vakiolämpötilassa, se ei tarvitse suuria lämpötilaeroja pystyäkseen varastoimaan suuria määriä lämpöä. PCM varasto puskuroid näin lämpöä ja lämpöverkon menolämpötila pysyy vakiona. PCM varastoi siis energiaa tuotannon, ei kulutuksen ehdolla. Kulutuspuolella tarvitaan erillinen varasto.

Jos poistokaasu on puhdasta (esim. lämmin ilma) PCM varasto voidaan laittaa myös kaasupuolelle.



Kuva 8. Poistokaasujen lauhdutus sekä lämmön taseaus ja puskurivarasto faasimuutosmateriaalilla.

6 Esimerkki matalalämpöisen ylijäämälämmön talteenotosta: Saint Gobain Finlandin Hyvinkään lasivillatehdas

6.1 Lähtökohdat ja taustaoletukset

Esimerkin laadinnassa on käytetty perustana aikaisemmin tehtyjä Energiaväylä-hankkeen selvityksiä:

- Energiaväylän kuluttajan lämpöpumppukeskus, Kari Kauppila EnerSys CM Oy
- Matalalämpötilaisten jätelämpövirtojen hyödyntäminen lämpöpumpuilla:
Case Energiaväylä, Hanna Suhonen, kandidaattityö, Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto

Muut lähtötiedot ja oletukset:

- Poistokaasujen ominaisuudet perustuvat Saint Gobain Finlandilta saatuihin tietoihin.
- Lauhduttimen kustannusarviot ja tekniset mitoitus perustuvat laitevalmistajalta saatuihin tietoihin
- Lämpöverkko toteutetaan matalalämpöisenä (menoveden lämpötila 45°C)
- Lämpöverkon paluulämpötila on alhainen (n. 10°C)
- Talteenotto perustuu vaihtoehtoon, jossa verkon paluuvesi viedään lämmöntalteenottolauhduttimeen (Kuva 7)

Tässä selvityksessä on tarkastettu lämmöntalteenottoa puhtaista poistokaasuista nykyisten poistokaasupesureiden jälkeen. Tämä tarkoittaa että järjestelmä on kohtuullisen itsenäinen, ja se ei vaikuttaa nykyisen järjestelmän toimintaan.

Toinen tapa olisi ottaa lämpöä talteen suoraan nykyisten pesureiden pesuvesistä. Tämä tapa sisältää monia epävarmuustekijöitä likaisen pesuveden vuoksi ja nykyisten pesureiden toimintaa lämmöntuottajina. Tämän vaihtoehdon toimivuuden varmistamiseksi laitteistojen toiminta olisi testattava.

Tässä selvityksessä on haettu ratkaisu joka on mahdollisimman varmatoiminen jo tämän hetken tiedon valossa.

6.2 Talteenottotapa

Koska Hyvinkään tehtaalla kaasut on jo puhdistettu, lämmöntalteenotossa voidaan käyttää suoraa lauhdutusta (putki- tai levylämmönvaihdin).

Lauhduttimelta tulevan lämmitetyn veden lämpötila nostetaan lämpöpumpun avulla.

6.3 Ylijäämälämmön määrä ja virtaukset

Taulukko 1 näyttää lämmöntalteenoton tunnusluvut. Lauhdutin tuottaa noin 6,1 MW lämpöä ja laskee poistokaasun lämpötilaa noin 14°C. Samalla muodostuu noin 1,8 kg/s lauhdevettä.

Taulukko 1. Lämmöntalteenoton tunnusluvut

Tehtaan poistokaasu, saapuva	Lämpötila	°C	30
	Suhteellinen kosteus	%-RH	100
	Virtaus	kg/s	114,4
Tehtaan poistokaasu, lähtevä	Lämpötila	°C	16
	Suhteellinen kosteus	%-RH	100
	Virtaus	kg/s	112,6
	Lauhdevesi	kg/s	1,8
Poistokaasulauhdutin	Saapuvan veden lämpötila	°C	10
	Lähtevän veden lämpötila	°C	22
	Lämpöverkon veden virtaus	kg/s	120,6
	Lämpöteho	MW	6,1

Lämmön talteenoton lauhdutin on mitoitettu niin, että sen kapasiteetti riittää virtausteknisesti myös tilanteessa, jossa sille tuotavan kaukolämpöveden lämpötila olisi 5 °C, jolloin lauhduttimella saataisiin talteen käytännössä poistokaasuvirrasta teknisesti talteen otettavissa oleva noin 7 MW lämpöteho.

Lämpöpumpun avulla nostetaan lämpöverkkoon menevä vesi lämpötilaan 45°C. Lämpöpumpulle viedään vain osa lauhduttimesta tulevasta vedestä ja tämän veden lämpötila nostetaan 75 asteiseksi ja minkä jälkeen se sekoitetaan lämpöpumpun ohitusveteen.

Lämpöpumpun COP on n. 3,3 (Taulukko 2) mutta koska ainoastaan osa lämmitysvedestä menee lämpöpumpun kautta, järjestelmän kokonais-COP on noin 5.

Taulukko 2. Lämpöpumpun ominaisuudet

Lämpöpumpun tuottama lämmitysveden lämpötila:			45°C	75°C
Höyrystin	Veden lämpötila sisään	°C	22	
	Veden lämpötila ulos	°C	10	
Lauhdutin	Veden lämpötila sisään	°C	22	
	Veden lämpötila ulos	°C	45	75
Tehokkuus	Lämpöpumpun ideaalisuuskerroin		0,65	
	COP		5,3	3,3

6.4 Lämmön puskurointi

Lämpö voidaan varastoida joko lämpöverkon lämpötilassa tai korkeamassa lämpötilassa. Hyvinkään tehtaalla on olemassa kolme 200 m³ säiliötä, joita voidaan käyttää lämmön varastoinnissa. Tässä on oletettu, että varastoon saadaan varastoitua 85% niiden teoreettisesta kapasiteetista.

Taulukko 3 esittää lämpövaraston ominaisuudet riippuen siitä, varastoidaanko 45 tai 75 asteista vettä. Tässä on oletettu, että lämpövarastoa käytettäisiin 75 asteisena. Lämpövaraston energiasisältö nousee korkeaksi, kun käytössä on 65°C lämpötilaero.

Taulukko 3. Lämpövaraston ominaisuudet

Lämpövaraston lämpötila:		45°C	75°C
Lämpövaraston tilaavuus	m ³	3 x 200	
Lämpöverkon paluulämpötila	°C	10	
Lämpövaraston lämpötila	°C	45	75
Lämpövaraston energiasisältö täytenä	MWh	20,7	38,5

6.5 Talteenottojärjestelmän toiminta

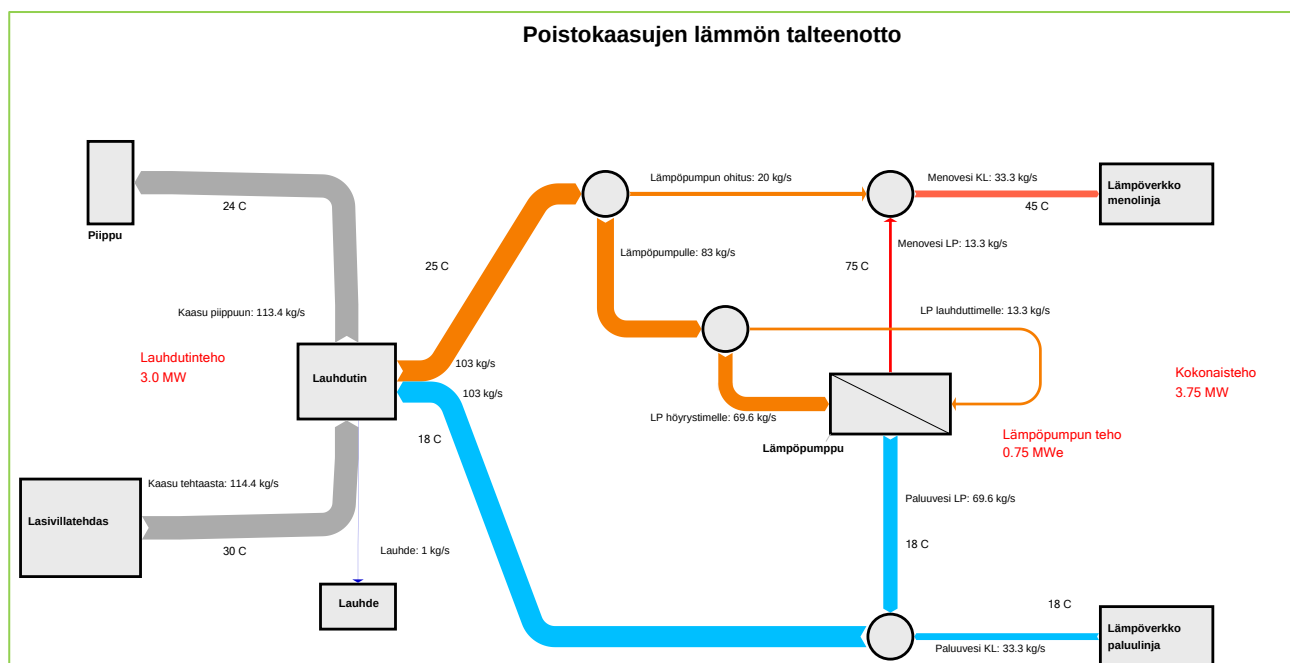
Energiaväylässä vuotuinen energiatarve on noin 14 GWh. Laskennallinen huipputeho on 11,9 MW, mutta käytännössä tehontarve ylittää 7 MW erittäin harvoin. Tämä tarkoittaa, että yllä mainitun lauhduttimen ympärille ei verkon nyt tiedossa olevalla kuormalla kannata taloudellisesti rakentaa talteenottojärjestelmä joka toimii lauhduttimen täydellä kapasiteetilla. Vuotuinen huipun käytön aikaa tulisi näin tehtynä erittäin lyhyt.

Lauhduttimen kokoa ei ole kuitenkaan pienennetty, koska kun siitä otetaan vähemmän tehoa, sen toimintalämpötilapiste nousee, mikä vähentää lämpöpumpun sähkönkulutusta.

Täysikokoinen lauhdutin mahdollistaa myös energiaväylän laajentaminen myöhemmässä vaiheessa lisäämällä lämpöpumppuja ja laajentamalla verkkoa.

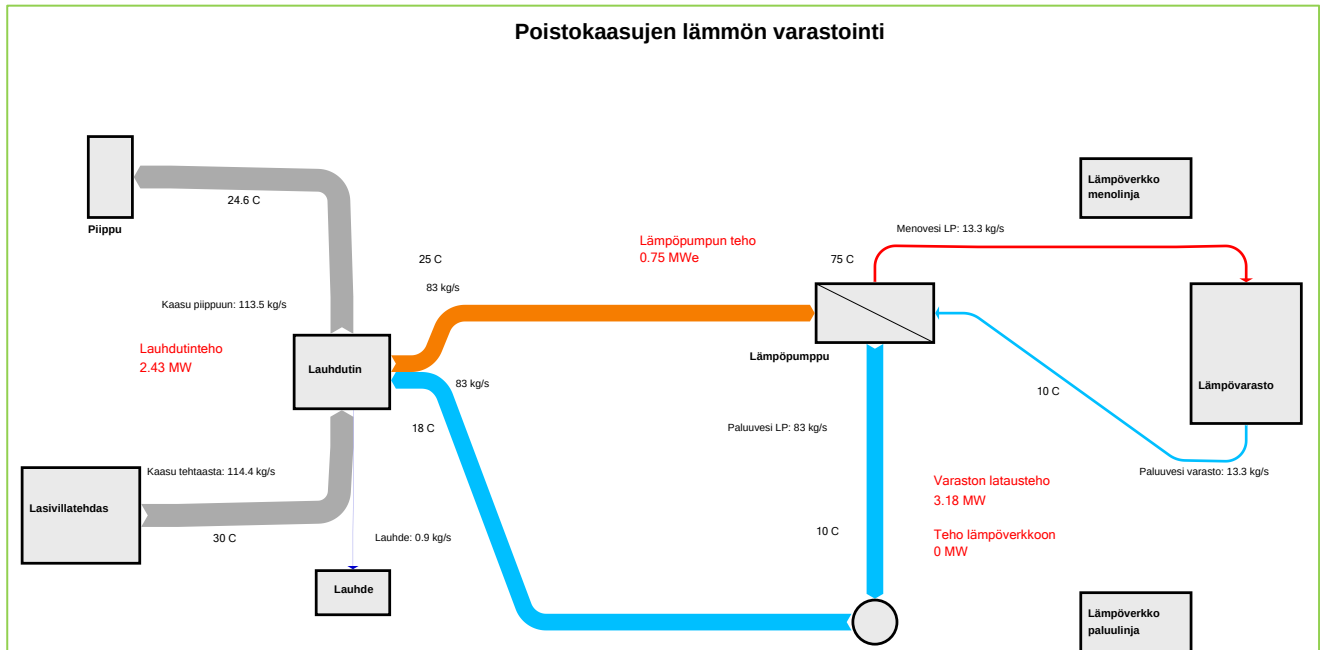
Järjestelmää mitoittaessa on periaatteena ollut, että lauhdutinteho on n. 3 MW ja lämpöpumppu mitoitetaan niin että se pystyy nostamaan lämpöverkon lämpötila 45 asteiseksi (Kuva 9).

Lämpöpumpun maksimitehontarve on näin laskettu olevan 0,75 MW.

**Kuva 9.** Isoverin Hyvinkään tehtaan lämmöntalteenoton sankey-kaavio

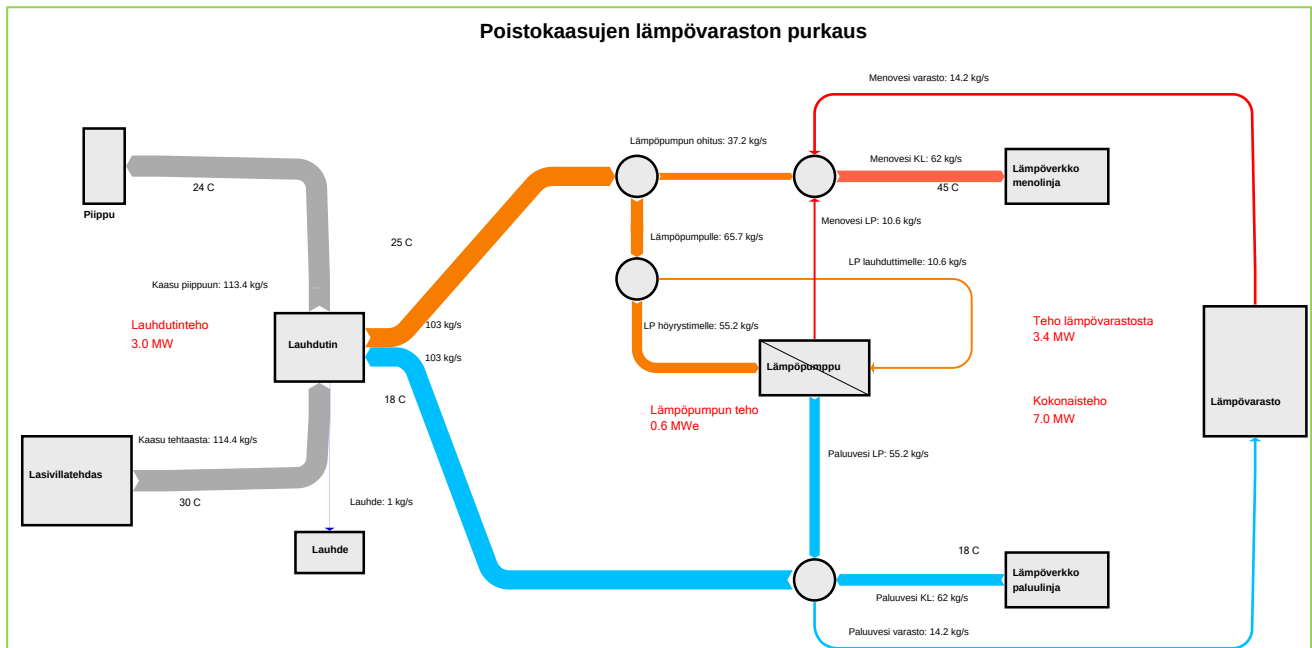
Kuva 10 näyttää yksinkertaistetun tilanteen, jossa lämpövarastoa ladataan ilman, että lämpöä toimitetaan verkkoon. Koska lämpö varastoidaan 75 asteisena, tässä tilanteessa kaikki

lauhduttimen tuottama lämmitysvesi johdetaan lämpöpumpulle. Tämä pienentää lämpöpumpun lämmitystehoa noin puolella megawatilla, koska lämpöpumppu on mitoitettu ottamaan vastaan ainoastaan osa vedestä kun poistokaasulauhdutin ottaa talteen 3 MW. Lämpövarasto voidaan täyttää noin 12 tunnissa tällä tavalla, silloin kun aloitellaan tyhjästä varastosta.



Kuva 10. Isoverin Hyvinkään tehtaan lämmöntalteenoton sankey kaavio, lämmön varastointi

Kuva 11 näyttää tilanteen, jossa lämpövarastoa puretaan niin, että kokonaisteho verkkoon on 7 MW. Tässä tilanteessa lämpöpumpun tehontarve laskee koska kun lämpövarasto syöttää 75 asteista vettä verkkoon, lämpöpumppu ei tarvitse nostaa lauhduttimen tuottaman lämmitysveden lämpöä yhtä paljon. Lämpövarastosta voidaan hetkellisesti ottaa myös niin paljon tehoa että lämpöpumppu voidaan sammuttaa ilman että verkon veden lämpötila laskee. Näin lämpöpumppu voi toimia myös sähkön kulutusjoustona.



Kuva 11. Isoverin Hyvinkään tehtaan lämmöntalteenoton sankey kaavio, lämpövaraston purkaus

Käytännössä lämpövarastoa käytetään kuvien 10 ja 11 esittämien tilanteiden välialueella, sen mukaan kuin verkossa tarvitaan lämpöä. Suurimmillaan verkkoon voidaan toimittaa lämpöä noin 10 MW teholla, kun järjestelmällä tuotetaan lämpöä suurimmalla mahdollisella teholla poistokaasusta ja samalla puretaan lämpövarastoa.

Lämmöntuotannossa tarvitaan varajärjestelmä siitä varalta, että lämmöntarve on korkea, kun lämpövarasto on tyhjä, tai jos lämmöntalteenottojärjestelmä on poissa käytöstä. Koska alueella on jo maakaasuverkko, varajärjestelmäksi suositellaan maakaasukattila.

Maakaasukattila pitäisi mitoittaa maksimienergiantarpeen mukaan. Maakaasukattila voidaan suunnitella siten, että sillä on myös mahdollista korvata lämpöpumpun käyttö hetkellisesti, jolloin lämpöpumpun voidaan näinkin käyttää sähkön kysyntäjoustoon.

Taulukko 4. Lämmön riittävyys eri lämmöntarpeilla kun lämpövarasto on täynnä alussa. Kolme viimeistä riviä kuvaa tilannetta kun lauhdutin on pois käytöstä.

Lämpötehon tarve MW	Varaston lämmitysteho MW	Lauhduttimen lämmitysteho MW	Lämpöpumpun sähkäteho MW	Varaston riittävyys h
4	0.25	3	0.75	135
5	1.3	3	0.7	26
6	2.4	3	0.6	14
7	3.4	3	0.6	10
1	1	0	0	34
3	3	0	0	11
7	7	0	0	4,8

Yllä oleva taulukko osoittaa kuinka hyvin varasto riittää riippuen verkon lämmöntarpeesta. Lämpövarasto pystyy hyvin paikkaamaan lyhytaikaisia piikkejä lämmitystarpeessa, mutta kun lämmitystarve nousee pitkäaikaiseksi korkeaksi, tarvitaan varajärjestelmä. Kylmänä vuodenaikana varastot myös latautuvat hitaammin koska lämmöntarvetta on ympäri vuorokauden.

6.6 Talouslaskelmat

Talouslaskelmien pohjana on käytetty laitetoimittajan budjettitarjousta poistokaasulauhduttimelle. Lämmöntalteenottolauhduttimesta saataisiin 6 – 7 MW lämpöteho riippuen paluuveden lämpötilasta. Lauhdutinta on tässä kuitenkin tarkoitus käyttää pienemmällä, 3,0 MW teholla, jolloin sen toimintalämpötilapiste on korkeampi ja lämpöpumpun sähkökäyttö on saatu optimoitua pienemmäksi.

▪ Lauhduttimen lämmöntalteenotto	3,0 MW
▪ Lämpöpumppu sähkönkäyttö	0,75 MW
▪ Kaukolämpötuotannon kokonaisteho	3,75 MW
▪ Muu sähkön käyttö	0,15 MW
▪ Lämpöverkon paluulämpötila	18°C
▪ Lämpötila lauhduttimen jälkeen	25°C
▪ Lämpöverkon menolämpötila	45°C

Näillä arvoilla huipun käytön aikaa on oletettu olevan 3000 h/a.

6.6.1 Investointikustannukset

Taulukko 5 näyttää tämänhetkisen investointiarvion. Lämpöpumpun investointikustannus (900 €/kW sähköteho) perustuu Hanna Suhosen kandidaattityössä olevaan Oilonin arvioon.

Taulukko 5. Talteenottolaitteiston investointikulut. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa on vertailuna investointikulut, jos veden lämpötila nostetaan 75°C.

Investoinnit	45°C	75°C
Lauhdutin	1 600 000 €	1 600 000 €
Lämpöpumppu (900 €/kWh sähköteho)	675 000 €	1 170 000 €
Lämpövarasto (olemassa olevien säiliöiden muutokset)	200 000 €	200 000 €
Muut laitteet sekä rakentaminen	600 000 €	600 000 €
Nettoinvestointi	2 875 000 €	3 570 000 €
Investoinnin pitoaika	15 v	15 v
Rahoitus korko	3 %	3 %
Investointikustannukset	240 000 €/v	300 000 €/v

6.6.2 Käyttökustannukset

Taulukko 6 näyttää tämänhetkisen arvion vuotuisiin käyttökustannuksiin. Sähkön hinta on oletettu olevan 80 €/MWh, tämä on sama mitä on käytetty energiaväylän siirtoverkon selvityksessä. Kunnossapitokustannusten on oletettu olevan 2% kokonaisinvestoinnista vuodessa. Huipun käyttöaika on oletettu olevan 3000 h/a.

Taulukko 6. Talteenottolaitteiston vuotuiset käyttökulut. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa on vertailuna investointikulut, jos veden lämpötila nostetaan 75°C.

Käyttökulut vuodessa	45°C	75°C
Lämpöpumpun sähkönkulutus	180 000 €	310 000 €
Muu sähkönkulutus	35 000 €	35 000 €
Kunnossapito	55 000 €	70 000 €
Henkilöstö, yleiskulut ja hallinto	20 000 €	20 000 €
Vuotuiset kokonaiskulut	290 000 €	435 000 €

6.6.3 Lämmöntalteenoton kokonaiskustannukset

Kokonaiskustannukset ovat näiden laskelmien mukaan noin 530 000 €/a.

Kun lämmöntalteenoton maksimiteho on 3,75 MW ja huipun käyttöaika 3000 h/a, lämmön kokonaiskustannukseksi tulee 47 €/MWh.

Tämän laskelman mukaan tuotettaisiin 11 250 MWh/a lämpöenergiaa 45 asteisena vetenä. Kun lämmitysvesi nostetaan 75 asteeseen käyttökohteissa, voidaan olettaa, että lopullinen lämmön kustannus on noin 55 – 65 €/MWh.

6.7 Riskitarkastelu

Investointiarviot sekä käyttökulut ovat vielä epävarmoja. Varsinkin lämpöpumpun investointiarviossa ja käyttökustannuksissa on epävarmuutta. Talteenottolaitteisto (sekä lauhdutin että lämpöpumppu) on koeteltua tekniikkaa, joten vaikka matalalämpöinen lämpöverkko on uusi asia, mitään suuria teknisiä riskejä laitteiston puolella ei ole. Järjestelmä ei myöskään tuo mukanaan mitään sellaista mikä olisi turvallisuusmielessä erityisen riskialtista.

On kuitenkin varmistettava, että lauhduttava poistokaasu on kaikin puolin sopivaa lauhduttimelle.

Kun lämpöverkosto toteutetaan matalalämpöisenä, on olemassa riski bakteerien kasvusta matalalämpötilaisessa vedessä. Tämä on otettava suunnittelussa huomioon.

Muut riskit ovat tavanomaisia asennustyön riskejä.

7 Päätelmät

Tässä raportissa on käyty läpi matalalämpöisen ylijäämälämmön talteenottotapojen sekä lämmön varastoinnin vaihtoehtoja. Tarkastelussa on ollut erityisesti matalalämpöiset kosteat poistokaasut. Lämmön talteenotto voidaan toteuttaa tällaisissa kohteissa pitkälti jo kaukolämmöntuotannossa olevalla tekniikalla.

Lämmönvarastoinnissa vesivarastot ovat käytetyimmät nykyisissä kaukolämpöverkoissa. Vesivarasto on useimmiten paras tekniikka myös matalalämpöverkoissa, mutta koska tässä sekä lämpötilat, että meno ja paluulinjojen lämpötilaerot ovat matalampia, myös muut varastotavat voivat olla kannattavia (esim. kalliovarasto tai PCM varasto).

Esimerkkitapauksena on tarkasteltu lämmöntalteenoton mahdollisuuksia Saint Gobain Finlandin Hyvinkään lasivillatehtaan poistokaasuista. Poistokaasuissa on 6 – 7 MW lämmöntalteenottopotentiaali. Suunnitteilla olevassa lämpöverkossa ei ole kuitenkaan niin paljon lämmönkäyttöä, että lämmöntalteenotto kannattaa toteuttaa näin suurella teholla. Nyt on oletettu että lämmöntalteenotto on 3 MW ja kokonaislämpöteho 3,75 MW. Lämmön hinnaksi saatiin noin 47 €/MWh (45°C) ja kokonaislämmöntuotanto 11 250 MWh/a.

Tämän selvityksen mukaan talteenottolauhduttimen kapasiteetti antaa järjestelmälle suurta laajennusvaraa.

Potentiaalinen lämmöntuotanto on:

▪ Huipun käyttöaika	8000 h/a
▪ Lämmöntalteenotto	6 MW
▪ Kokonaislämpöteho	7,5 MW
▪ Lämpöveden menolämpötila	45°C
▪ Vuotuinen lämmöntuotanto	60 000 MWh

Maksimimitoituksen mukaisessa käytössä lämmön hinta olisi luokkaa 25 €/MWh ja 75 asteisena noin 35 €/MWh.

7.1 Suositukset

Yllä oleva alustava selvitys lämmöntalteenotosta Hyvinkään lasivillatehtaan poistokaasuista osoittaa että järjestelmässä on hyvää potentiaalia. Lämmöntalteenotto jää pienen lämmönkysynnän vuoksi kuitenkin kauas sen mahdollisesta enimmäiskapasiteettista, joten lisäkäyttöä järjestelmällä tuotettavalle lämmölle olisi hyvä löytää.

Lämpöpumpun mitoitus kannattaa myös optimoida niin että se on optimaalinen myös lämmön käytön vaihtelujen suhteen. Lämpöpumpun mitoitus vaikuttaa lämpövaraston latautumisnopeuteen ja sitä kautta siihen, miten lämpövarastosta saadaan paras mahdollinen hyöty.

Kannattavuuslaskelmissa ei ole otettu huomioon sähkön kulutusjouston tuomia lisämahdollisuuksia. Tätä kannattaa tarkastella jatkoselvityksissä.

Tässä tarkastelussa on oletettu että lämpöverkko toimii matalassa lämpötilassa. Tämä valittiin sen vuoksi että silloin on mahdollista nostaa lämpötila sopivaan tasoon jokaisen kuluttajan luona. Tässä järjestelmässä kannatta nostaa lämpötila korkeaksi ainoastaan siellä missä korkeampaa lämpötilaa tarvitaan, muuten sähkönkulutus nousee turhaan. Seuraavassa vaiheessa kannattaa tarkistaa myös mikä olisi lämpöverkon optimilämpötila kulutuksen sekä lämpötilatarpeen perusteella.