

MUHOKSEN DATAKESKUKSEN HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN

Jaakko Pellikka, Jonne Karppinen, Iida Pitkänen & Niilo Isokangas
Projektin raportti
Kevät 2026
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijät: Jaakko Pellikka, Jonne Karppinen, Iida Pitkänen & Niilo Isokangas
Opinnäytetyön otsikko: Muhoksen datakeskuksen hukkalämmön hyödyntäminen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2026
Sivumäärä: 55

Työ on osa Oulun Ammattikorkeakoulun Energy Technology and Circular Economy Project- kurssia.

Projekti sai alkunsa Muhoksen kuntaan kaavoitetulle BioPark- alueelle suunnitellusta datakeskushankkeesta. Datakeskuksen on arvioitu olevan sähköteholtaan 500-1000MW, joten hukkalämpöä syntyisi lähes vastaavalla teholla. Datakeskuksen taloudellisen-, ekologisen- sekä sosiaalisen- kestävyys- ja hyväksyttävyyden vuoksi on tärkeää, että hukkalämpöä hyödynnettäisiin mahdollisimman paljon lähialueella.

Työn tavoitteena oli selvittää potentiaalisia hukkalämmön hyödyntäjiä sekä tuottaa Muhoksen kunnalle materiaalia teollisuusalueen markkinoinnin tueksi ja havainnollistaa konkreettisesti hukkalämmön potentiaalia, niin kunnan, kuin yritysten päätöksenteon tueksi.

Hukkalämmön hyödyntämiskohteiksi valittiin Muhoksen kaukolämmön tuotanto, kasvihuonetuotanto, kallioulouhosaltaiden lämmitys, kierrätysmateriaalien- ja kiivaineksen kuivatus/esilämmitys. Laskennan työkaluna käytettiin pääasiassa Excel- taulukkolaskentaohjelmaa. Lähtötietoina ja aineistoina käytettiin haastatteluja, aikaisempia tutkimuksia, tekniikan kaavastoa, opinnäyte- ja diplomitöitä, aiempien energiatekniikan tutkinto- ohjelman kurssien sisältöjä ja omia arvioita.

Työn lopputuloksena voitiin todeta, että alueelle kaavaillun datakeskuksen sähköteho ja sen myötä hukkalämmön lämpöteho on sen verran suuri, että sen täysimääräinen hyödyntäminen lähialueella on liki mahdotonta, mutta hukkalämmön lämpötilan korotus lämpöpumpuilla kuitenkin lisää lämmön hyödyntämismahdollisuuksia. Yhteenvetona todettakoon, että hukkalämpö mahdollistaa merkittäviä kustannussäästöjä sekä ympäristövaikutusten leikkauksia erityisesti lämpöintensiivisissä prosesseissa ja myös varsinaisessa lämmöntuotannossa.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.
SISÄLLYS	VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.
1 EXECUTIVE SUMMARY	VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.
2 JOHDANTO	VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.
3 KAUKOLÄMMÖN PERUSTEET, TUOTANTO JA KUSTANNUKSET	VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.
3.1 Kaukolämmön perusteita	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
3.2 Muhoksen kaukolämpöverkko	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
3.3 Kaukolämpölaitoksien polttoaine	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
3.4 Lämmitysenergian tarve	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
3.5 Hukkalämmöstä kaukolämpöön	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
3.6 Kaukolämmön tuotantokustannukset	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
4 KASVIHUONEIDEN ENERGIATARPEEN ARVIOINTI	VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.
4.1 Kasvihuoneen lämmitysteho ja lämmitysenergian tarve	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
4.2 Lämmitysenergian tarve	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
4.3 Johtumislämpöhäviöt	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
4.4 Lämmön johtuminen maahan kasvihuoneessa	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
4.5 Vuotoilmasta johtuvat lämpöhäviöt	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
4.6 Mitoituslämpötila	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
4.7 Auringon vaikutus kasvihuoneen lämmitykseen	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
4.8 Kasvihuoneen lähtötiedot	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
5 LOUHOSALTAIDEN ENERGIATARPEEN ARVIOINTI	VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.

- 5.1 Ulkoaltaan vedenpinta.....**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 5.2 Säteilyteho**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 5.3 Konvektio**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 5.3.1 Grashofin luku ja Nusseltin luku**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 5.4 Haihtuminen**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 5.4.1 Schmidtin luku ja Sherwoodin luku**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 6 MURSKEEN JA MUOVIN KUIVATUKSEN LÄMPÖ **VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.**
 - 6.1 Kuivausprosessin perusteet ..**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 6.2 Energiantarpeen muodostuminen**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 6.3 Materiaalin lämmitysenergia..**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 6.4 Veden haihduttamiseen tarvittava energia**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 6.5 Kuivausilman merkitys.....**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 6.6 Hukkalämmön hyödyntäminen kuivauksessa**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 6.7 Muovin kuivauksen erityispiirteet**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 6.8 Murskeen kuivauksen erityispiirteet**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 6.9 Yhteenvedo**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 7 KAUKOLÄMMÖN TOTEUTUSOSAVIRHE. **KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.**
 - 7.1 Laskennan rajaukset ja oletukset**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 7.2 Lähtötiedot ja mitoitusarvot ...**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 7.3 Kaukolämpöverkon massavirta**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 7.4 Lämpöpumpun sähköteho**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
 - 7.5 Vuotuinen sähkönkulutus ja kustannus**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**

- 7.6 Tuotettu lämpöenergia ja kustannus**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 8 KASVIHUONEIDEN TOTEUTUSOSAVIRHE. **KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.**
- 8.1 Laskennan rajaukset ja oletukset**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 8.2 Lähtötiedot ja mitoitusarvot ...**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 8.3 Johtumishäviöiden laskenta ..**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 8.4 Lämmön johtuminen maahan**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 8.5 Vuotoilmasta aiheutuva lämpöhäviö**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 8.6 Kasvihuoneen huipputeho**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 8.7 Lämmitysenergian tarve tarkastelujaksolla**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 8.8 Auringon säteilyn huomiointi .**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 9 LOUHOSALTAIDEN TOTEUTUKSEN RAJAUKSET JA OLETUKSET**VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.**
- 9.1 SäteilYTEHON laskenta**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 9.2 Konvektion laskenta**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 9.3 Haihtumisen laskenta**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 10 MUOVIN JA MURSKEEN KUIVATUS TOTEUTUS **VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.**
- 10.1 Laskennan rajaukset ja oletukset**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 10.2 Lähtötiedot ja mitoitusarvot ...**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 10.3 Muovin kuivauksen laskenta .**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 10.4 Murskeen kuivauksen laskenta**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 10.5 Murskeen lämmitys hukkalämmöllä**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 10.6 Tulosten tarkastelu**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 10.7 Yhteenveto**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**
- 11 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET**VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.**

11.1 Kasvihuoneiden tuloksista**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**

11.2 Louhosaltaiden tulokset.....**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**

11.3 Murskeen ja muovin kuivauksen tulokset**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**

11.4 Kaukolämmön laskennan tulosten yhteenveto**Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**

12 POHDINTA/YHTEENVETO**VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.**

LÄHTEET**VIRHE. KIRJANMERKKIÄ EI OLE MÄÄRITETTY.**

1 EXECUTIVE SUMMARY

Introduction

A large-scale data center planned for the BioPark area in Muhos represents a significant opportunity to utilize industrial waste heat as part of the local energy system. Due to the facility's projected size, the amount of recoverable heat would be exceptionally high, making it a strategically relevant energy source for the region. The study looks at practical ways to integrate the waste heat into nearby uses and examines the value this could create for the municipality and local businesses. Based on the findings, most promising applications appear to be district heating, greenhouse cultivation and certain industrial drying or heating processes.

Core insight

The key insight is not that all available heat can be used locally, it cannot. Instead, the real value lies in targeted utilization. When combined with heat pump technology to upgrade temperature levels, waste heat becomes a flexible and economically attractive energy source. Especially in heat-intensive operations, it can significantly lower operating costs while also reducing emissions.

Strategically, using waste heat utilization strengthens the attractiveness of the area for new business activity and supports more sustainable energy use. It should be treated not as a by-product but as a core asset in future planning

Results suggest that the waste heat from the data center could form a meaningful local energy resource, but its utilization requires careful selection of suitable applications. The amount of waste heat is likely to be considerably higher than the current heat demand in the Muhos area, meaning that not all generated heat can realistically be utilized locally. Therefore, the key focus of the study is targeted utilization in applications where the heat demand is high, continuous, and located as close to the data center as possible.

District heating potential

For district heating, the Muhos town center and Leppiniemi district heating networks were examined, along with possible new heat demand in the BioPark area. The district heating demand was estimated at 20 MW, corresponding to an annual heat demand of 54,000 MWh. The waste heat temperature from the data center was estimated at 60 °C, which is not sufficient for direct supply to the district heating network. Therefore, the waste heat was examined with heat pump upgrading to a temperature level of 88 °C. Based on the calculation, the heat pump COP was approximately 7.6, resulting in annual electricity consumption of about 7,079 MWh. With the average electricity price of 2025, the production cost was approximately €286,600 per year, or about €5.31/MWh. In comparison, the fuel cost of district heat produced with forest chips was €39.6/MWh. In practice, this means that heat produced with heat pumps would cost roughly 87% less than heat from forest chips.

Greenhouse applications

For greenhouse cultivation, waste heat proved to be a potential solution, especially for year-round production or an extended growing season. The calculation examined a gable-roof greenhouse measuring 100 meters in length and 12,8 meters in width. The peak heating demand of the greenhouse was approximately 549 kW, and the heating energy demand during the September–May period was approximately 1,203 MWh. When the effect of solar radiation was considered, the heating demand decreased by approximately 168 MWh. The results show that the greenhouse energy demand is strongly concentrated in the winter months, when monthly heating energy demand can reach around 180–200 MWh. This means that waste heat could have a significant effect on the operating costs and profitability of greenhouse cultivation, especially in a cold climate region. In addition, greenhouse production would support local food production, employment, and the circular economy approach of the area.

Alternative use case: Quarry ponds

In the quarry pond analysis, the possibility of using waste heat to heat and maintain large water basins at approximately 30 °C was examined. The study included two quarry ponds located near the data center area, with surface areas of

approximately 2.13 and 2.62 hectares. According to the calculations, maintaining the ponds at this temperature would require a very high continuous heat output. The required heating capacity varied monthly between approximately 38.8 MW and 83.7 MW, and the annual energy demand was approximately 526 GWh. Most of the heat losses were caused by evaporation. Heating the quarry ponds could, at least in theory, absorb a large scale of waste heat, but the energy demand is so high that implementation would require more detailed technical, economic, and environmental impact studies. However, as an application, it could create new value for the area, for example through recreational use, tourism, or thermal energy storage.

Industrial drying applications

In crushed aggregate and plastic drying, the utilization of waste heat proved to be technically justified because drying is an energy-intensive process and is well suited for low-temperature heat utilization. In plastic drying, the calculated heat demand was approximately 0.90 MW and the annual energy demand approximately 5,828 MWh. With a heat pump, the required process temperature can be raised to 80 °C, while annual electricity consumption would remain at approximately 747 MWh. The calculated annual cost savings were approximately €432,000, and the emission reduction was approximately 1,282 tCO₂ per year. In crushed aggregate drying and preheating, the amount of energy that could be replaced with waste heat was estimated at approximately 4,335 MWh per year, corresponding to annual savings of approximately €433,500 and an emission reduction of approximately 954 tCO₂. Based on these results, industrial drying processes are particularly promising applications for waste heat utilization, as their heat demand can be continuous and relatively easy to integrate into local production.

Conclusion

Taken together, the findings suggest that the waste heat from the data center could offer substantial technical and economic benefits in the Muhos area. However, waste heat is not automatically a usable resource; its value is created by matching location, temperature level, transfer distances, and the energy demand

of the end use. Short transfer distances, sufficient and continuous heat demand, and the use of heat pumps are key requirements for profitable utilization.

From a strategic perspective, waste heat utilization could strengthen the attractiveness of the BioPark area for new companies and support the municipality of Muhos in promoting circular economy, energy efficiency, and low-emission industry. The results can be used in regional marketing, preliminary decision-making, and in the planning of energy solutions for potential companies locating in the area. In the future, the calculations should be refined once the actual electrical capacity of the data center, cooling solution, waste heat temperature level, and the energy needs of companies locating in the area become clearer. For now, the results are preliminary, but they clearly point to waste heat being an asset rather than a by-product.

2 JOHDANTO

Projektin tavoitteena on arvioida Muhoksen kunnassa sijaitsevalle teollisuusalueelle suunnitellussa datakeskuksessa syntyvän hukkalämmön käyttömahdollisuuksia. Laskelmien avulla tarkastellaan, kuinka hukkalämpöä voidaan hyödyntää alueen kaukolämmön tuotannossa, yritysalueen energiantarpeissa sekä osana alueelle kohdistuvan, jo käynnissä olevan, Biopark-hankkeen kiertotalousratkaisuja. Laskelmien lopputuloksista muodostetaan lopuksi tiivistetty materiaali tilaajalle, joka tässä työssä on Muhoksen kunta. Tilaaja voi hyödyntää materiaalia kyseisen alueen markkinoinnissa sekä päätöksenteon tukena.

Projektin lähtökohta on haastava, koska alueella ei ole vielä datakeskusta, joka tuottaisi lämpöä, eikä myöskään valmista prosessia, joka olisi tulossa alueelle lämpöä hyödyntämään. Työhön sisältyvät lämmön hyödyntämiskohteet on valittu lähinnä prosessin lämpöintensiivisyyden mukaan ja lähtötiedot täytyy näin ollen perustaa arvioihin, aikaisempiin tutkimuksiin ja laskemiin.

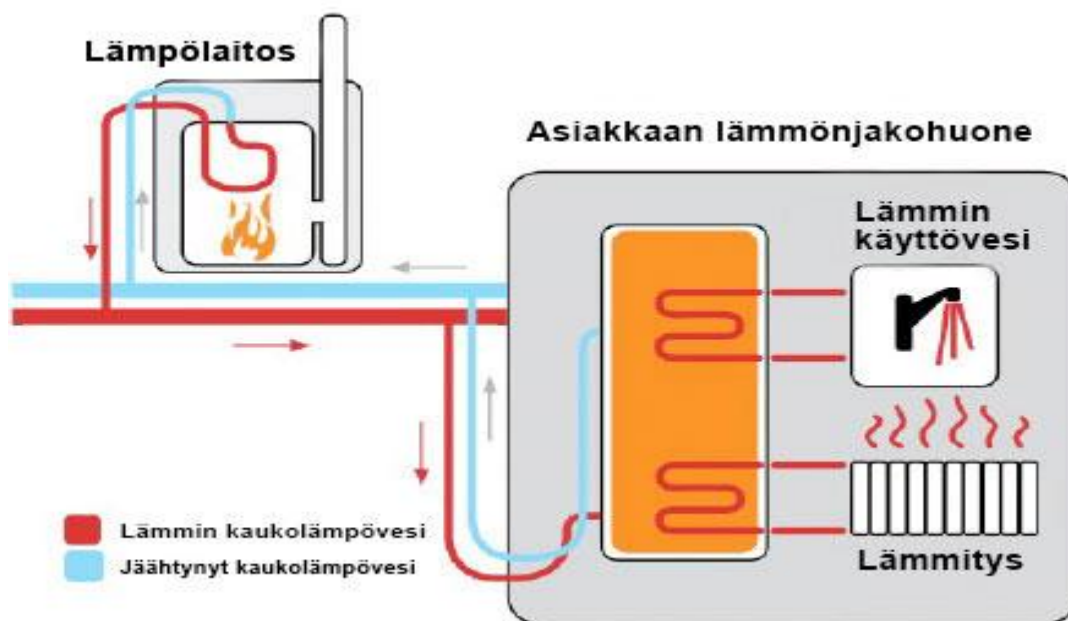
Työn aihe on merkittävä ja hyvin ajankohtainen, koska tällä hetkellä vireillä on suuri määrä datakeskushankkeita ympäri Suomea, viileän ilmaston ja edullisen sähkön vuoksi. Datakeskukset kuluttavat merkittäviä määriä sähköä, josta suurin osa muuttuu lämmöksi. Siksi on sähköverkon ja sähkön tuotannon tasapainon kannalta erittäin tärkeää, että syntyvä lämpö hyödynnetään mahdollisimman tarkasti, jolloin sähkön kulutusta voidaan vastaavasti vähentää muusta lämmöntuotannosta. Datakeskukset ovat Suomessa suhteellisen uusi teollisuudenala, joten hukkalämmön hyödyntämistäkään ei vielä ole tehty suuremmissa mittakaavassa, eikä näin ollen myöskään tutkimustietoa tai laskelmia aiheesta ole juurikaan saatavilla. Tämä projektityö luo lisätietoa ja laskelmia hukkalämmön hyödyntämisen näkökulmasta, jotka voivat osaltaan toimia mahdollisten lämmönkäyttäjien suunnitelmien ja päätösten tukena.

3 KAUKOLÄMMÖN PERUSTEET, TUOTANTO JA KUSTANNUKSET

3.1 Kaukolämmön perusteita

Kaukolämpö, eli keskitetty lämmöntuotanto on yleisin lämmitysmuoto Suomessa. Lämmitysmuoto perustuu kaukolämpölaitokseen, jossa lämpöenergiaa tuotetaan yleensä polttamiseen perustuvalla tekniikalla (metsähake, öljy, bio-/maakaasu, kivihiili, kierrätysmateriaalit/ jätteet). Suurin osa Suomen kaukolämmöstä tuotetaan CHP- laitoksissa (Combined Heat and Power), lämmön ja sähkön yhteistuotantona. Tässä projektissa keskitytään kuitenkin Muhoksen taajaman alueella sijaitsevaan kaukolämpöverkkoon, jossa on pelkästään lämmöntuotantoa. Näin ollen sähköntuotantoa ei huomioida enempää tässä työssä. (Mäkelä & Tuunanen, 2025, 11–18.)

Kaukolämpölaitoksessa syntyvä lämpöenergia siirretään asiakkaille kaksiputkissa kaukolämpöverkossa, jossa on suljettu vesikierto. Asiakkaiden omiin lämmitysjärjestelmiin lämpöenergia siirretään lämmönjakokeskusten lämmönvaihtimien kautta (Kuva 1). Näin ollen kaukolämpölaitoksessa kiertävä vesi ei koskaan kierrä asiakkaiden lämmitysjärjestelmissä (suljettu kierto), jolloin kaukolämpöverkkoa ylläpitävä taho voi paremmin hallita verkossa kiertävän veden puhtautta sekä verkon kunnossapitoa. Kaukolämpöverkossa kiertävän tuloveden lämpötila on yleensä välillä 70–120°C, vuodenajan mukaan. Paluuveden lämpötila sen sijaan on välillä 25–45°C. Jäähdyntynyt paluuvesi palaa takaisin kaukolämpölaitokseen lämmitettäväksi. (Mäkelä & Tuunanen, 2025, 11–18.)



Kuva 1. Kaukolämpö havainnekuva (Kangasalan lämpö Oy s.a.)

Kaukolämpöjärjestelmiä käytetään alueilla, joiden asukastiheys on suhteellisen suuri, koska kaukolämpöverkoston rakentaminen on kallista ja teknistaloudellinen hyöty on sitä parempi, mitä enemmän lämpöä kuluttavia asiakkaita on lähellä kaukolämpölaitosta.

3.2 Muhoksen kaukolämpöverkko

Muhoksen kunnan alueella sijaitsee kolme toisistaan erillistä kaukolämpöverkkoa. Ne sijaitsevat kunnan taajaman, Leppiniemen ja Päivärinteen alueilla. Päivärinteen alueella sijaitseva verkko jätetään tässä työssä maantieteellisen sijaintinsa vuoksi huomiotta, koska välimatkaa datakeskuksen kaava-alueelle kertyy noin 15 kilometriä ja verkko on pieni, joten lämmön siirtäminen kyseiselle alueelle ei olisi edes teoriassa kannattavaa.

Muhoksen taajamassa sijaitsee kaksi kaukolämpölaitosta, jotka ovat yhteisteholtaan noin 16,5 MW: a. Leppiniemen kaukolämpölaitoksen teho sen sijaan on vain noin 1 MW: a, mutta se otettiin edullisen sijaintinsa vuoksi tarkasteluun ja laskentaan mukaan. Lisäksi arvioitiin BioPark- alueelle syntyvän muita mahdollisia kaukolämmönkuluttajia, joten lämmitystehon tarpeeksi arvioitiin kokonaisuudessaan 20 MW: a.

3.3 Kaukolämpölaitoksien polttoaine

Muhoksella sijaitsevat kaukolämpölaitokset käyttävät polttoaineenaan pääasiassa biopolttoaineita, eli käytännössä metsähaketta, mikä on tälle alueelle hyvin tyypillistä. Metsähaketta on hyvin saatavilla lähiseuduilta ja se on kohtalaisen edullista: 39,6 € / MWh, verrattuna kevyeen polttoöljyyn: 103 € / MWh (Tilastokeskus 2025). Hinnoissa ei ole huomioitu päästöoikeusmaksujen vaikutuksia, jotka kasvattaisivat hintaeroa entisestään metsähakkeen hyväksi.

Taajamassa sijaitsevilla kaukolämpölaitoksilla on varajärjestelminä ja huipputehon tuotantoa varten myös mahdollisuus öljyn polttamiseen. Koska todellisesta öljyn polttamisen tarpeesta eikä poltetun öljyn määrästä ollut tietoja saatavilla, jätettiin se kuitenkin huomiotta ja laskennassa käytettiin ainoastaan metsähaketta vertailupolttoaineena.

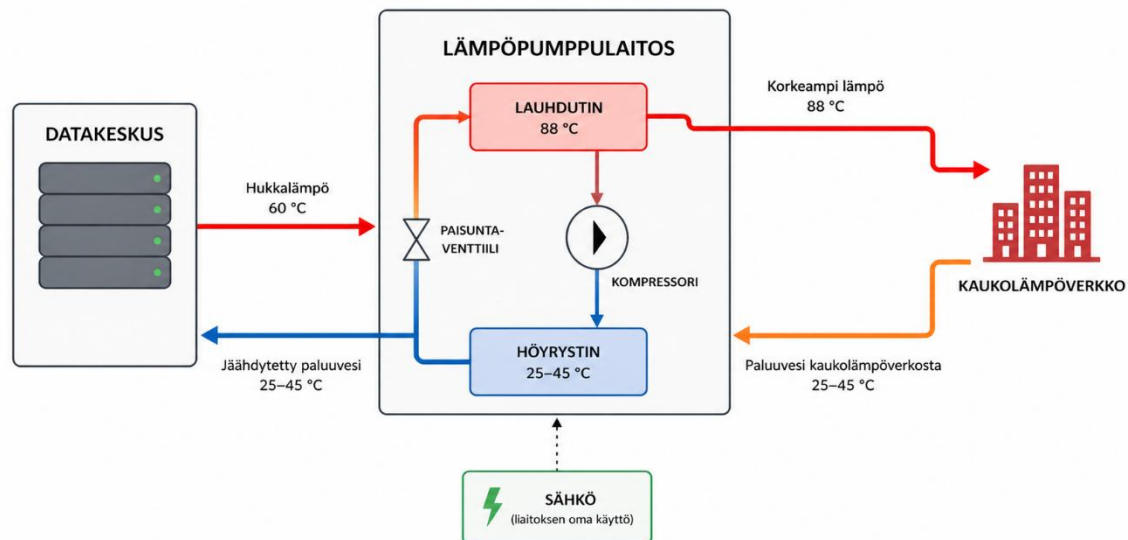
3.4 Lämmitysenergiantarve

Laskettaessa tarkasteltavan alueen vuotuista lämpöenergian tarvetta, käytettiin kaukolämmölle tyypillistä huipunkäyttöaikaa 2700 h / a. Huipunkäyttöaikaa käytetään kuvaamaan aikaa, joka tarvitaan tuottamaan vuotuinen energiamäärä huipputeholla tuotettuna (Mäkelä & Tuunanen, 2025, 32). Näin ollen saadaan laskettua 20 MW:n teholla vuotuiseksi lämmitysenergiantarpeeksi 54 000 MWh: a.

3.5 Hukkalämmöstä kaukolämpöön

Datakeskuksissa syntyvän hukkalämmön lämpötilan taso vaihtelee, keskuksessa käytettävän tekniikan, jäähdytysjärjestelmän sekä keskuksen käyttöasteen mukaan. Lämpötila voi edellä mainituiden tekijöiden mukaan, olla välillä 25–80°C: a. Tarkempaa tiedonsaantia vaikeuttaa se, että serverityypit, sähkötehot ja jopa hukkalämmön lämpötilat, ovat datakeskuksia operoivien yritysten liikesalaisuuksia. Tässä laskennassa arvioidaan hukkalämmön lämpötilaksi 60°C: a.

Kun tarkastellaan kaukolämmön tuloveden lämpötilatasoa, havaitaan, että datakeskuksesta tulevan hukkalämmön lämpötilan taso on liian alhainen syötettäväksi suoraan kaukolämpöverkkoon. Tämä tarkoittaa sitä, että verkkoon syötettävää veden lämpötilaa täytyy ”priimata”, eli korottaa. Yksinkertaisin ja kustannustehokkain tapa lämpötilan korotukseen on lämpöpumppu, joka kykenee tuottamaan lämpöenergiaa moninkertaisen määrän kuluttamaansa sähköenergiaan verrattuna. Tässä tapauksessa lämpöpumpput tuottavat laskennallisesti 60°C:n lähtölämpötilasta, 88°C:n lämpötilassa olevaa vettä kaukolämpöverkkoon. COP-kertoimeksi (Coefficient of Performance) saadaan tällöin ~7,5, joka tarkoittaa sitä, että tuotettua lämpöenergiaa saadaan 7,5-kertainen määrä kulutettuun sähkötehoon verrattuna (CoolPack-ohjelma).



Kuva 2. Havainnekuva LP-laitoksesta (ChatGPT 2026)

3.6 Kaukolämmön tuotantokustannukset

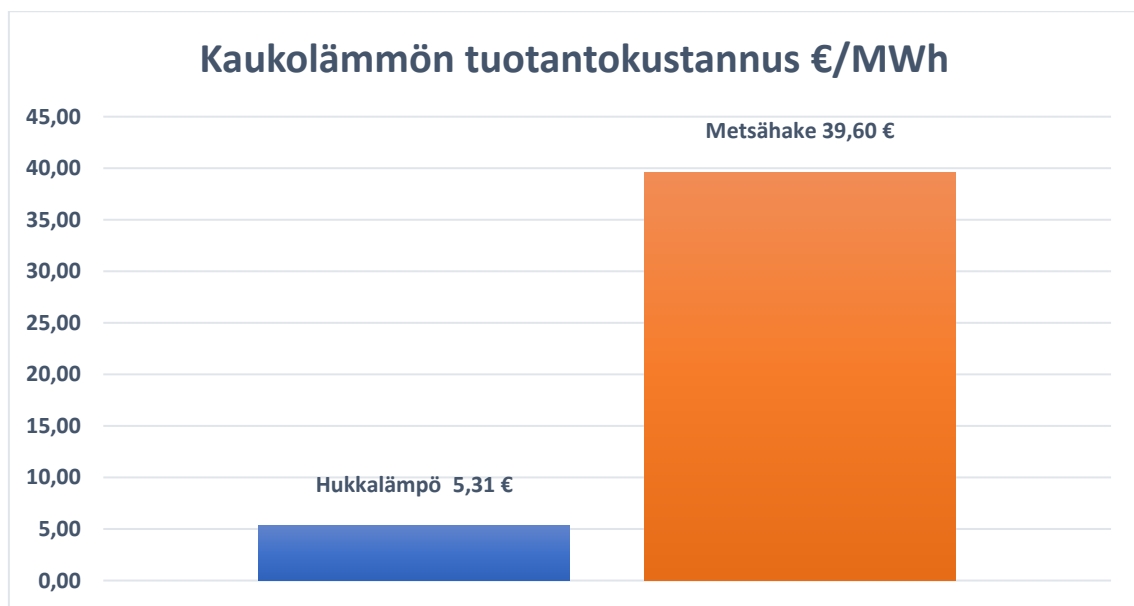
Kaukolämmön tuotantokustannuksia vertailtaessa käytettiin ainoastaan polttoaineen ja sähkön hankintahintoja. Investointi-, korko- tai muita kuluja ei laskentaan huomioitu, koska olemassa olevien, jo melko iäkkäiden, kaukolämpölaitosten ja

vastaavasti uuden lämpöpumppulaitoksen investointikustannusten laskeminen tuotantohintoihin vertailukelpoisesti, olisi ollut hyvin vaikeaa.

Metsähakkeen ostohintana käytettiin vuoden 2025 keskihintaa, joka oli 39,6 € / MWh. Sähkön ostohintana käytettiin myös vuoden 2025 keskihintaa, joka puolestaan oli 40,48 € / MWh. (Tilastokeskus, 2025).

COP- kertoimella 7,5 ja 20 MW:n lämpöteholla, lämpöpumput kuluttivat sähköä vuodessa 7079,07 MWh: a, joka muodosti vuoden 2025 keskihinnalla 286 560,59 €: n tuotantokustannukset. Kun huomioitiin kaukolämpöverkon vuotuinen lämpöenergian kulutus, yksikköhinaksi muodostui 5,31 € / MWh (Kuva 3).

Metsähakkeella tuotettuna, vuotuinen 54 000 MWh: n lämpöenergiamäärä aiheutti 2 138 400 €: n tuotantokustannukset. Yhteenvetona voidaan todeta, että laskennallisesti hukkalämmöstä lämpöpumpuilla tuotettu kaukolämpö on tuotantokustannuksiltaan ~87 % edullisempaa, kuin metsähaketta polttamalla tuotettu kaukolämpö.



Kuva 3. Kaukolämmön tuotannon yksikkökustannus

4 KASVIHUONEIDEN ENERGİATARPEEN ARVİOINTI

4.1 Kasvihuoneen lämmitysteho ja lämmitysenergiantarve

Työn tarkoituksena on mitoittaa kasvihuoneelle lämmitysteho ja lämmitysenergiantarve tietyllä lämmitysajanjaksolla. Lämmitystehontarve saadaan laskettua maan ja rakenteiden kautta aiheutuvien lämmön johtumishäviöiden, sekä vuotoilman aiheuttaman lämmitystehontarpeen perusteella. Tässä työssä ei huomioida lämpöhäviötä ilmanvaihdon aiheuttamana, sillä kun lämmitystehontarve on suuri, kasvihuonetta ei tuuleteta. Lämmitystehontarpeen määrittäminen kasvihuoneelle, lasketaan mitoituspaikkakunnan mitoituslämpötilan ja kasvihuoneen sisälämpötilan avulla. Lämmityksen ajanjakso tässä tapauksessa ajatellaan olevan syyskuun alusta toukokuuhun. (Joki & Juvonen 2021, 7).

4.2 Lämmitysenergiantarve

Lämmitysenergiantarpeen määrittämistä varten tarvitaan lämmitettäville kuukausille lämmitystarveluvut (taulukko 1). Tässä työssä lämmitystarvetta ajateltiin kuukausille syyskuu – toukokuu, joiden yhteenlaskettu lämmitystarveluku olisi 4747 °Cvrk. Lämmitystarveluvut saadaan Ilmatieteenlaitokselta, ja vertailuarvoina käytetään pitkän aikavälin keskiarvoja vuosilta 1991–2020.

Lämmitystarveluku kuvaa lämmitysenergian tarvetta rakennukselle, ja sen käyttö perustuu siihen, että energiankulutus rakennuksella on lähes verrannollinen sisä- ja ulkolämpötilan erotukseen. Lämmitystarvelukuna yleisimmin käytetty on S17, perustuen oletettuun +17°C vuorokausikeskiarvoon sisä- ja ulkolämpötilalle. Vuorokausiarvojen summana muodostuu kuukauden lämmitystarveluku, ja vastaa vasti vuoden arvo kuukausiarvojen summana. (Ilmatieteenlaitos 2026).

Lämmitystarveluvut soveltuvat erityisesti käytettäväksi eri vuosien ja kuukausien lämmitystarpeen keskinäiseen vertailuun sekä energiantarpeen laskennalliseen arviointiin. Tässä työssä kuukausittaisia lämmitystarvelukuja hyödynnetään

kasvihuoneen lämmitysenergian tarpeen määrittämisessä tarkastelujakson eri kuukausille.

Taulukko 1. Lämmitystarveluvut Muhoksen alueella (Ilmatieteenlaitos 2026).

Lämmitystarveluku, S Muhos 1991-2020	h/kk °Cd
Tammi	780
Helmi	712
Maalis	661
Huhti	461
Touko	249
Syys	199
Loka	427
Marras	561
Joulu	697

4.3 Johtumislämpöhäviöt

Lämmönläpäisykertoimen avulla voidaan arvioida rakenteiden kautta tapahtuvia lämpöhäviöitä. Lämmönsiirto rakenteen läpi tapahtuu johtumalla sekä konvektion vaikutuksesta rakenteen sisä- ja ulkopinnoilla. Johtumishäviöiden laskemisessa lämmönläpäisykertoimen lisäksi tarvitaan tarkasteltavan rakenneosan pinta-ala sekä lämpötilat rakenteen molemmin puolin. (Linnavuori 2011, 19).

Rakenteen eri puolilla lämpötilaeron vallitessa syntyy lämpöhäviöitä. Mitä suurempi lämpötila ero on, sitä enemmän rakenteen läpi lämpöä siirtyy. Tästä syystä erityisesti kylmissä olosuhteissa korostuvat rakenteiden kautta tapahtuvat lämpöhäviöt.

4.4 Lämmön johtuminen maahan kasvihuoneessa

Kasvihuoneen maaperän oletetaan olevan salaojitettu soraa ja mursketta, maaperän päällä on lisäksi ohut kangaskerros estämässä rikkaruohojen kasvamista lattian läpi.

Laskennassa maan lämmönvastus voidaan huomioida taulukkoarvojen avulla, jolloin oletuksena olisi, että rakenne on kuivattu ja salaojitettu asianmukaisesti. Tällä yksinkertaistetulla tavalla mahdollistetaan arviointi lämmön johtumisesta maahan ilman tarkempaa lämpövirta-analyysiä. (Suomen rakentamismääräyskokoelma C4 2003, 18.)

Maan kautta tapahtuvaa lämmönsiirtoa tarkastellessa poikkeaa alapohjan alapuolisen maan lämpötila ulkoilman lämpötilasta ja on tyypillisesti tasaisempi vuoden aikana. Laskennassa käytetään tämän vuoksi maan lämpötilaa ulkoilman lämpötilan sijasta. Maan vuotuinen keskilämpötila voidaan arvioida ulkoilman keskilämpötilan perusteella. (Suomen rakentamismääräyskokoelma D5 2012, 18).

Taulukko 2. Alapohjan alapuolisen maan ja ulkoilman vuotuisen keskilämpötilan ero. (D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma 2007, 19.)

Maa-ala	Alapohjan U-arvo, W/m ² K		
	<0,2	0,2 – 0,3	>0,3
	$\Delta T_{\text{maa, vuosi}}, ^\circ\text{C}$		
Savi, salaojitettu hiekka ja sora	5	7	8
Hiesu, moreeni, hieta, salaojittamaton hiekka ja sora	3	5	6
Kallio	2	3	4

4.5 Vuotoilmasta johtuvat lämpöhäviöt

Vuotoilmasta aiheutuu lämpöenergian konvektiotyypistä lämpöenergian siirtymistä tilasta pois. Lämpötehon häviöitä laskettaessa tämä häviö täytyy ottaa huomioon. Rakennusosien tiiveys ja ympärillä vallitsevat olosuhteet määrittävät vuotoilman määrän. Paine-ero rakennusosan eri puolilla aiheuttaa vuotoilmavirran. Vaikutus vuotoilmaan tapahtuu vain ulkovaipan muodostavissa tiloissa. (Linnavuori 2011, 13).

Vuotoilmavirta on arvioitava erikseen tällöin, jos on perusteltuja syitä olettaa rakennus poikkeuksellisen tiiviiksi tai epätiiviksi. (D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma 2007, 52.)

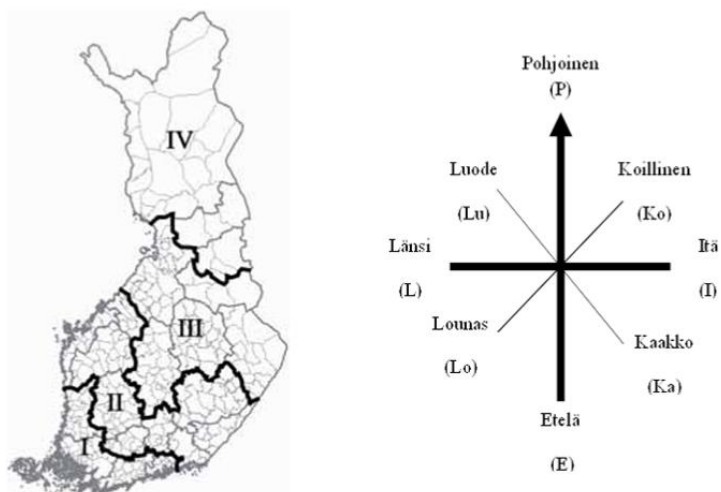
4.6 Mitoituslämpötila

Mitoitus sisälämpötilana käytetään 20 astetta ja ulkolämpötilana käytetään -32 astetta (Taulukko 3).

Taulukko 3. Mitoittavat ulkoilman lämpötilat eri säävyöhykkeillä. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017, liite 1)

<i>Taulukko LI.1. Mitoittavat ulkoilman lämpötilat eri säävyöhykkeillä.</i>	
Säävyöhyke	Mitoittava ulkoilman lämpötila, °C
I	-26
II	-29
III	-32
IV	-38

Kasvihuoneen mitoituslämpötila määräytyy Suomessa sijainnin mukaan. Ku-
vassa 4 näkyy neljä säävyöhykettä, joihin suomi on jaettu. Kun tiedetään kasvi-
huoneen sijainti, voidaan säävyöhyke katsoa kartalta. Tässä tapauksessa Mu-
hos sijoittuu säävyöhykkeelle III. Mitoitusulkolämpötila on siis -32 °C. Kasvihuo-
neen sisälämpötilan arvona käytetään 20 °C.



*Kuva 4. Säävyöhykkeet ja ilmansuuntien lyhenteet. (Ympäristöministeriön ase-
tus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017, liite 1)*

4.7 Auringon vaikutus kasvihuoneen lämmitykseen

Kasvihuoneen energiantarpeen määrittämisessä on otettava huomioon auringon säteily, joka lämmittää kasvihuonetta. Auringon säteilymäärä kasvihuoneen käyttämissä saatiin käyttämällä PVGIS solar radiation työkalua. Työkalulla haettiin auringon säteilymäärä Muhoksen alueella tarkastelujakson aikana.

Auringon lämmittävää infrapunasäteilyä pääsee kasvihuoneen vaipan läpi ja tällä säteilymäärällä on kasvihuoneen lämmitysenergiatarpeeseen merkittävä vaikutus tarkastelujaksolla (Joki & Juvonen 2021, 37). Auringon infrapunasäteilystä osa pääsee kasvihuoneen vaipan läpi. Tässä työssä käytettiin läpäisevyyden arvona 30 % infrapunasäteilyn läpäisevyyden heikkenemisen vaipan likaantumisen takia.

Taulukko 4. Auringon säteilymäärä Muhoksella 2013–2023 (PVGIS Data).

Auringon keskimääräinen säteilymäärä Muhoksella 2013-2023

Kuukausi	kWh/m ²
Tammi	3,25
Helmi	17,13
Maalis	64,31
Huhti	113,17
Touko	150,67
Kesä	163,1
Heinä	148,96
Elo	109,56
Syys	56,17
Loka	22,24
Marras	4,35
Joulu	0,82

4.8 Kasvihuoneen lähtötiedot

Kasvihuoneen katemateriaaliksi valikoitui tuplamuovikate sen U-arvon ollessa huomattavasti lasin U-arvoa pienempi. Katon materiaalina käytetään lasia. Kasvihuone on harjakattomallinen. Kasvihuoneen mitat ovat pituus 100 m, leveys 12,8 m, harjakorkeus 4 m. Alapohjan pinta-ala 1280 m². Katemateriaalina käytetty tuplamuovin U-arvo 3 W/m²K ja katossa käytetyn lasin U-arvo 5,9 W/m²K.

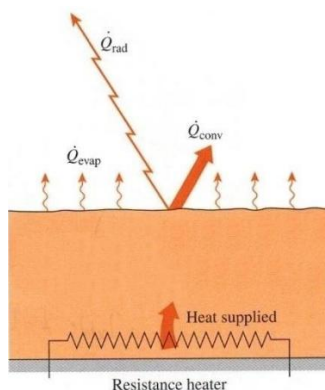
5 LOUHOSALTAIDEN ENERGIATARPEEN ARVIOINTI

Tässä tarkasteltiin datakeskuksen toiminnasta syntyvän hukkalämmön hyödyntämistä vesistön lämmittämiseen. Sijoittamalla hukkalämpö hallitusti vesistöön, voidaan luoda energiatehokas lämmönvarastointijärjestelmä, joka voi toimia esimerkiksi virkistyskäyttönä.

Tarkasteltavana kohteena oli kaksi louhosallasta datakeskuksen alueella. Niiden koot n.2,13 ha ja 2,62 ha. Altain koot mitattiin maanmittauslaitoksen karttapain avulla. Keskisyvyys oletettiin olevan n.10 m. Laskelmien tavoitteena oli määrittää tarvittava energiamäärä veden lämpötilan nostaminen $5^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C}$, lämpötilat ovat arvioita. Lisäksi tarkasteltiin vesistön ylläpidon vaativaa energiankulutusta.

5.1 Ulkoaltaan vedenpinta

Ylläpidettävä lämpö eli lämpöhäviöt laskettiin ilmaan kulkeutuvan lämpöenergian kautta. Vedenpinnalta ilmaan kulkeutuva lämpöenergia muodostuu säteilystä, konvektiosta ja haihtumisesta (Kuva 5). Oletettiin vedenpinnasata nousevan vesihöyryn ja altaan ympäristön olevan ideaalikaasuja. (Nikoskinen 2018, 14.) Ensin laskettiin säteily, sitten konvektio ja lopuksi haihtuminen. Näiden yhteissumalla saatiin ylläpidettävä teho joka kuukaudelle.



Kuva 5. Vedenpinnalta lähtevät lämpövirrat (Nikoskinen 2018, 15.)

5.2 Säteilyteho

Säteily on energiansiirtoa, jonka aiheuttaa sähkömagneettiset aallot tai fotonit (Nikoskinen 2018, 9.) Säteilemällä tapahtuva lämmönsiirto tapahtuu ilman väliainetta. Säteily on ainoa tapa, jolla lämpö voi siirtyä tyhjiössä. Kaikki kappaleet säteilevät energiaa sähkömagneettisen säteilyn muodossa. Tärkein tekijä säteilevässä kappaleessa on lämpötila, koska lämpövirta kasvaa absoluuttisen lämpötilan neljännessä potenssissa (Latvala 2013, 6).

Veden pinnan säteilyteho määräytyy useiden tekijöiden perusteella. Siihen vaikuttavat pinnan emissiivisyys, pinta-ala, Stefan-Boltzmannin vakio sekä veden pinnan lämpötila ja ilmanlämpötila korotettuna neljänteen potenssiin. Emissiivisyys kertoo kappaleen säteilemän energianosuuden kappaleen kokonaisenergian määrästä. Stefan-Boltzmannin vakio on luonnonvakio, joka kertoo täysin mustan kappaleen säteilymäärän (Nikoskinen 2018, 15).

5.3 Konvektio

Konvektio on energian siirtymistä aineen liikkeen mukana, kiinteän pinnan ja vierekkäisen nesteen kesken. Se sisältää johtumisen ja nesteen liikkeen vaikutukset yhdistettynä. Mitä nopeammin neste liikkuu, sitä suurempi energian siirtyminen on aineiden välillä (Nikoskinen 2018, 9.)

Vapaassa konvektiossa liike syntyy lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen seurauksena; lämpimämmän aineen tiheys on pienempi kuin kylmemmän, jolloin syntyy noste, joka saa aineen virtaamaan. Virtaukset sekoittavat ainetta ja samalla parantavat lämmön siirtymistä johtumalla. Maaperässä konvektion vaikutus on yleensä vähäinen, koska ilmiö edellyttää riittävän ison huokostilavuuden, jotta vesi tai ilma pääsee kulkemaan. Pakotettu konvektio on lämmön siirtymistä aineen liikkeen mukana, mutta jokin ulkopuolinen voima aiheuttaa liikkumisen (Latvala 2014, 7–8). Tässä työssä on laskettu vapaan konvektion laskentakaavoilla, olettaen veden liikkeen olevan hyvin hidasta.

5.3.1 Grashofin luku ja Nusseltin luku

Grashofin luku on dimensioton suure, joka ilmaisee, kuinka voimakkaasti aineen tiheyserojen synnyttämä noste vaikuttaa virtaavaan aineeseen verrattuna virtausta vastustaviin kitkavoimiin konvektiossa (Nikoskinen 2018, 18.)

Nusseltin luku on dimensioton suure, joka kuvaa lämmönsiirron tehokkuutta kapaleen pinnalla. Se kertoo, kuinka paljon konvektio tehostaa lämmön siirtymistä esimerkiksi vedestä betoniin verrattuna pelkkään lämmön johtumiseen (Nikoskinen 2018, 13.)

5.4 Haihtuminen

Haihtumisessa tapahtuu faasimuutos, jossa energiaa siirtyy faasimuutoksesta aiheutuneen aineen siirtymisen takia. Esimerkiksi altaan pinnalta vesi haihtuu ilma-kehään vesihöyryksi (Nikoskinen 2018, 9). Vesi siirtyy maanpinnalta ilmakehään haihtumalla. Haihtumista tapahtuu maailmanlaajuisesti. 90 % maapallon ilmakehän kosteudesta johtuu haihtumisesta. Haihtuminen veden kiertokulussa tapahtuu auringonvalon lämmittäessä veden pintaa. Lämpö saa vesimolekyylit liikkumaan yhtä nopeammin. Kun ne liikkuvat nopeasti, haihtuvat ne kaasuna ilmaan (National Geographic.)

5.4.1 Schmidtin luku ja Sherwoodin luku

Schmidtin luku on dimensioton suure, joka kuvaa liikemäärän diffuusion (viskositeetin vaikutuksen) ja aineen diffuusion välistä suhdetta. Sherwoodin luku on dimensioton suure, joka kuvaa kuinka tehokkaasti massa siirtyy nesteeseen ja kiinteään pinnan välillä. (Nikoskinen 2018, 21.)

6 MURSKEEN JA MUOVIN KUIVATUKSEN PERUSTEET JA ENERGIATARPEEN ARVIOINTI

6.1 Kuivausprosessin perusteet

Muovin ja murskeen kuivauksessa tavoitteena on poistaa materiaalista kosteutta sekä tarvittaessa nostaa materiaalin lämpötilaa jatkokäsittelyä varten. Kuivaus on energiasäästöinen prosessi, jossa energiaa kuluu sekä materiaalin lämmittämiseen että veden haihduttamiseen.

Kuivausprosessissa tapahtuu samanaikaisesti lämmön- ja massansiirtoa. Lämpö siirtyy materiaaliin pääasiassa konvektion avulla kuivausilmasta, kun taas kosteus siirtyy materiaalin sisältä pintaan ja poistuu höyrynä ilmavirran mukana. (Motiva 2014)

Kuivausprosessin peruserätykset ovat samat materiaalista riippumatta, ja niitä voidaan soveltaa myös muovin ja murskeen kuivaukseen tässä työssä.

6.2 Energiantarpeen muodostuminen

Kuivauksen kokonaisenergiatarve muodostuu pääasiassa kahdesta tekijästä:

- materiaalin lämmittämisestä
- veden haihduttamisesta

Kuivauksen energiantarpeesta merkittävin osa liittyy veden höyrytämiseen, mikä tekee kosteuspitoisuudesta keskeisen mitoitustekijän (Motiva 2014). Tämän vuoksi jo pieni kosteuspitoisuus materiaalissa voi kasvattaa energiantarvetta merkittävästi.

6.3 Materiaalin lämmitysenergia

Materiaalin lämmittämiseen tarvittava energia riippuu materiaalin massasta, ominaislämpökapasiteetista sekä lämpötilan muutoksesta:

Missä:

- m = massa
- c = ominaislämpökapasiteetti
- ΔT = lämpötilan muutos

Mineraalipohjaisilla materiaaleilla, kuten murskeella, ominaislämpökapasiteetti on tyypillisesti noin 0,8–1,0 kJ/kgK, kun taas muoveilla vastaava arvo on suurempi, noin 1–2 kJ/kgK (Engineering ToolBox).

6.4 Veden haihduttamiseen tarvittava energia

Veden poistaminen materiaalista vaatii merkittävästi energiaa veden höyrystymisen vuoksi. Veden höyrystymislämpö on noin 2257 kJ/kg normaalipaineessa.

$$Q = m_{\text{vesi}} L_v$$

Missä:

Veden höyrystymislämpö vastaa noin 0,627 kWh/kg, mikä mahdollistaa kuivauksen tehontarpeen arvioinnin suoraan poistettavan veden massavirran perusteella. Tällöin tehontarve voidaan esittää muodossa:

$$P = m'_{\text{vesi}} \cdot 0.627$$

missä m'_{vesi} = poistettavan veden massavirta (kg/h).

Käytännön kuivausprosesseissa kaikki energia ei kuitenkaan kohdistu suoraan veden höyrystämiseen, vaan osa energiasta häviää ympäristöön sekä kuluu

materiaalin ja laitteiston lämmittämiseen. Tämän vuoksi laskennassa käytetään korjauskerrointa k , joka huomioi prosessin häviöt ja lisäenergiatarpeet.

Tyypillisesti kuivausprosesseissa kokonaisenergiatarve on noin 1,2–2-kertainen pelkkään veden höyrystymisenergiaan verrattuna, joten tässä työssä käytetty kerroin 1,2–1,6 kuvaa kohtuullisen energiatehokasta kuivausprosessia.

Koska veden höyrystyminen vaatii huomattavasti enemmän energiaa kuin materiaalin lämmittäminen, muodostaa se usein kuivauksen energiantarpeen suurimman yksittäisen osan. (Motiva 2014; Engineering ToolBox).

6.5 Kuivausilman merkitys

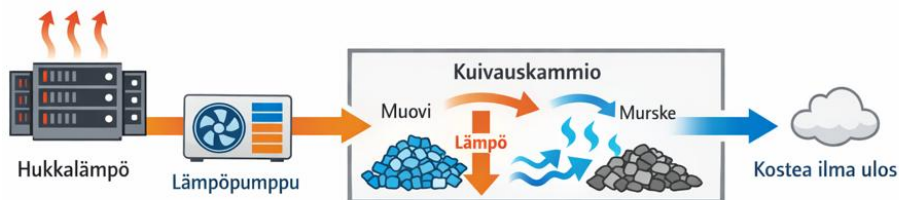
Kuivausprosessin tehokkuuteen vaikuttavat keskeisesti kuivausilman lämpötila, kosteus ja ilmavirta. Korkea lämpötila ja alhainen suhteellinen kosteus tehostavat veden haihtumista materiaalista, kun taas riittävä ilmavirta kuljettaa kosteuden pois materiaalin pinnalta (Motiva 2014).

6.6 Hukkalämmön hyödyntäminen kuivauksessa

Kuivausprosessit soveltuvat hyvin matalalämpöisen hukkalämmön hyödyntämiseen, koska tarvittavat lämpötilatasot ovat usein suhteellisen alhaisia. Hukkalämpöä voidaan hyödyntää joko suoraan tai lämpöpumpun avulla, jolloin lämpötilaa voidaan nostaa prosessille sopivaksi.

Hukkalämmön hyödyntäminen voi parantaa kuivauksen energiatehokkuutta merkittävästi ja vähentää primäärienergian tarvetta (Motiva 2014).

Kuivausprosessin periaate



Kuva 6. Tekoälyn luoma prosessikuva kuivausprosessista

6.7 Muovin kuivauksen erityispiirteet

Muovin kuivauksessa korostuu prosessin hallittavuus ja materiaalin ominaisuuksien säilyminen. Kuivausolosuhteet, kuten lämpötila ja kuivausaika, on sovittava materiaaliakohtaisesti, sillä ominaisuudet voivat muuttua liiallisessa lämpökuormituksessa.

Muovien kuivauksessa kosteuspitoisuudet ovat usein alhaisempia kuin mineraalimateriaaleilla, mutta tarkka kuivaus on silti tärkeää jatkoprosessien kannalta. (Kempeleen jätekuljetus 2026)

6.8 Murskeen kuivauksen erityispiirteet

Murskeen kuivauksessa käsitellään tyypillisesti suuria massoja, ja materiaalin kosteuspitoisuus voi vaihdella merkittävästi olosuhteiden mukaan. Tämän vuoksi prosessi on usein energiavaltaista.

Murskeen kohdalla energiatehokkuutta voidaan parantaa erityisesti esilämmityksellä, jossa hyödynnetään matalalämpöistä hukkalämpöä ennen varsinaista kuivausprosessia. (Isape Oy 2026)

6.9 Yhteenveto

Muovin ja murskeen kuivauksen energiantarve muodostuu pääosin materiaalin lämmittämisestä sekä veden poistamisesta. Erityisesti veden höyrystyminen on energiankulutuksen kannalta merkittävin tekijä.

Kuivausprosessin energiatehokkuuteen vaikuttavat kuivausilman ominaisuudet sekä käytettävä lämmönlähde. Hukkalämmön hyödyntäminen tarjoaa merkittävän potentiaalin energiankulutuksen vähentämiseen erityisesti matalalämpöisissä kuivausprosesseissa

7 KAUKOLÄMMÖN TOTEUTUSOSA

7.1 Laskennan rajaukset ja oletukset

Kaukolämmön laskennan osalta projekti rajattiin ainoastaan yksinkertaistettuun lämmön tuotantoon. Kaukolämpöverkon tai putkiston mitoituksia ei tässä työssä huomioitu tai laskettu, koska ne voivat muuttua merkittävästi käytännön hankkeiden edetessä ja mahdollisesti vääristäisi laskentaa ratkaisevasti.

Tuotantokustannusten laskennassa huomioitiin ainoastaan kaukolämmön tuottamisesta syntyvät suorat kustannukset, eli lämpöpumppulaitoksen osalta sähkön hankintakustannukset ja nykyisten kaukolämpölaitosten osalta metsähakkeen hankintakustannukset. Laskennassa ei kuitenkaan huomioitu nykyisten lämpölaitosten sähkön kulutusta, koska tietoa siitä ei ollut saatavilla, eikä seikkäänsä pidetty kovin merkittävänä laskennan kannalta. Laskennassa ei otettu huomioon kaukolämmön tuotannon tai siirron lämpöhäviöitä, koska tekniset ratkaisut varmasti tarkentuvat ja muuttuvat merkittävässä määrin käytännön suunnittelussa, mikäli projektissa tarkasteltua vaihtoehtoa lähdetään toteuttamaan investoijan toimesta.

7.2 Lähtötiedot ja mitoitusarvot

Taulukko 5. Kaukolämpö, lähtötiedot

Kaukolämmön huipputeho	20 MW
Verkon menolämpötila	88 °C
Verkon paluulämpötila	35 °C
Hukkalämmön lämpötila	60 °C
Veden ominaislämpökapasiteetti	4,19 kJ / kgK

Lämpöpumpun COP	7,63
Huipunkäyttöaika	2700 h
Sähkön keskihinta	40,48 € / MWh
Metsähakkeen keskihinta	39,6 € / MWh

7.3 Kaukolämpöverkon massavirta

Kaukolämpöverkossa siirrettävä lämpöteho lasketaan:

$$P = \dot{m} c_p \Delta T$$

Missä:

P = lämpöteho (kW)

$\dot{m}$ = massavirta (kg/s)

c_p = veden ominaislämpökapasiteetti

ΔT = meno – ja paluulämpötilan ero

Meno- ja paluulämpötilan ero:

$$\Delta T = 88^\circ\text{C} - 35^\circ\text{C} = 53^\circ\text{C}$$

Massavirta:

$$\dot{m} = \frac{20000 \text{ kW}}{4,19 \text{ kJ/kgK} \times 53^\circ\text{C}} = 90,06 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 90,1 \text{ kg/s}$$

7.4 Lämpöpumpun sähköteho

COP-kertoimen perusteella lämpöpumpun sähköteho saadaan kaavalla:

$$W = \frac{P}{COP}$$

josta seuraa:

$$W = \frac{20MW}{7,63} = 2,62 MW$$

7.5 Vuotuinen sähkönkulutus ja kustannus

$$E = P \times t$$

$$E = 2,63MW \times 2700h = 7079MWh/a$$

Jonka perusteella lasketaan sähkön hankintakustannus:

$$K = E \times \text{sähkön keskihinta}$$

$$K = 7079MWh \times 40,48€/MWh = 286561 €/a$$

7.6 Tuotettu lämpöenergia ja kustannus

$$E_l = 20MW \times 2700h = 54000MWh/a$$

Jonka perusteella lasketaan kaukolämmön tuotantokustannus yksikköä kohden lämpöpumpuilla tuotettuna:

$$c_{\text{lämpöpumppu}} = \frac{286561€/a}{54000MWh/a} = 5,31€/MWh$$

Verrokkina käytetyn, metsähakkeella tuotetun kaukolämmön tuotantokustannus yksikköä kohden on 39,6 € / MWh. Yksikköhintojen perusteella voidaan todeta, kuinka paljon pienempi lämpöpumpuilla tuotetun kaukolämmön tuotantokustannus megawattituntia kohden on, verrattuna metsähakkeella tuotettuun kaukolämpöön:

$$\frac{5,31€/MWh - 39,6€/MWh}{39,6€/MWh} \times 100\% = -86,59\% \approx -87\%$$

8 KASVIHUONEIDEN TOTEUTUSOSA

8.1 Laskennan rajaukset ja oletukset

Tässä laskennassa tehtiin joitain yksinkertaistuksia kuten, kylmäsiltojen vaikutusta ei ole huomioitu, auringon säteilyn vaikutusta arvioitiin yksinkertaistetulla menetelmällä, lisäksi ilmanvaihto perustuu arvioituun ilmanvaihtokertoimeen, ja säteilydata perustuu PVGIS-työkalun pitkän aikavälin keskiarvoihin.

Kasvihuoneen vaipan oletettiin päästävän läpi noin 30 prosenttia auringon infrapunasäteilystä. Läpäisevyyden arvona käytettiin 30 prosenttia, vaipan likaantumisen heikentäessä läpäisyä ajan myötä. Tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina näiden oletusten vuoksi.

Työssä käytetyt lähtötiedot perustuvat osittain arvioihin, koska toimeksiantajalta ei ollut saatavilla tarkkoja teknisiä tietoja tarkasteltavasta kohteesta. Arviot pohjautuvat vastaaviin töihin sekä tyypillisiin kasvihuoneisiin soveltuviin arvioihin.

8.2 Lähtötiedot ja mitoitusarvot

Kasvihuone sijaitsee Muhoksella, joka kuulu säävyöhykkeeseen III (Kuva 4). Laskennassa mitoitus sisälämpötilana käytettiin 20 °C ja mitoitus ulkolämpötilana -32°C. Kasvihuone on harjakattomallinen.

Kasvihuoneen mitat ovat:

- Pituus 100 m
- Leveys 12,8 m
- Harjakorkeus 4 m
- Alapohjan pinta-ala 1280 m²
- Ilmatilavuus 4480 m³
- Vaipan ala 1985,1 m²

Rakenteiden U-arvot:

- Seinät (tuplamuovi): 3 W/m²K
- Katto (lasi): 5,9 W/m²K

8.3 Johtumishäviöiden laskenta

Rakenteiden kautta tapahtuvat lämpöhäviöt on laskettava erikseen jokaiselle materiaalille. Johtumislämpöhäviö määritettiin tässä tapauksessa kaavalla

$$\phi_{\text{johtuminen}} = (U_{\text{lasi}} * A_{\text{katto}} * \Delta T_{\text{mitoitus}}) + ((A_{\text{päädyt}} + A_{\text{sivut}}) * U_{\text{tuplamuovi}} * \Delta T_{\text{mitoitus}}) \quad (\text{Suomen rakentamismääräyskokoelma D5 2012, s. 15}).$$

Laskennan tuloksena yhden kasvihuoneen johtumislämpöhäviöksi saatiin noin 505kW.

8.4 Lämmön johtuminen maahan

Alaohjan kautta maahan johtuva lämpöhäviö määritettiin laskemalla ensin alapohjan lämmönläpäisykerroin, jossa huomioitiin lämmönvastukset sekä rakenteelle että maakerrokselle.

Maakerroksen lämmönvastus laskettiin kaavalla $R_n = \frac{d}{\lambda}$

jossa d on maakerroksen paksuus ja λ lämmönjohtavuus. laskennassa käytettiin arvoja d = 0,2 m ja $\lambda = 1,5 \text{ W/(mK)}$ soralle, jolloin saatiin lämmönvastukseksi maakerrokselle $R_n = 0,133 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Määritettiin alapohjan lämmönläpäisykerroin yhdistämällä rakenteen ja maakerroksen lämmönvastukset $U_{\text{alapohja}} = \frac{1}{0,17 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = 3,296 \text{ W/m}^2\text{K}$

Alapohjan lämmönläpäisykerroimen määrittämisen jälkeen valittiin taulukosta 2 arvo ulkoilman ja maan vuotuisen keskilämpötilan erotukselle, valinta perustui laskettuun alapohjan U-arvoon, jonka perusteella taulukosta saatiin arvo $\Delta T_{\text{maa, vuosi}} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Määritettiin maan vuotuinen keskilämpötila ulkoilman keskilämpötilan avulla kaavalla $T_{maa} = T_{u,vuosi} + \Delta T_{maa,vuosi}$ (D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma 2007, s. 19.) jossa vuotuisena ulkoilman keskilämpötilana käytettiin arvoa 4,5 °C. (Ilmatieteenlaitos 2025).

Alapohjan kautta mahan johtuva lämpöhäviö laskettiin kaavalla $Q_{alapohja} = U_{alapohja} * A_{alapohja} * (T_s - T_{maa})$ (Suomen rakentamismääräyskokoelma D5 2012, s. 16).

jossa alapohjan pinta-alana käytettiin arvoa 1280 m², sisälämpötilana 20 °C ja maan lämpötilana 12,5 °C.

Laskennan tuloksena alapohjan kautta tapahtuva lämpöhäviö on noin $Q_{alapohja} = 31,6kW$.

8.5 Vuotoilmasta aiheutuva lämpöhäviö

Kasvihuoneen vuotoilmavirran selvittämiseksi tarvitaan tieto myös ilmatilavuudesta. Kasvihuoneelle tämä laskettiin ulkovaipan sisäpinnoista mitattuna, koska kasvihuoneen ilmanpitävyydestä ei ole tehty tutkimuksia täytyy laskennassa käytetty vuotoilmakerroin (1/h) arvioida (Böling 2013, 23.)

Vuotoilmavirta laskettiin kaavalla $q_{vuoto} = \frac{n_{vuoto} * V}{3600}$ jossa,

- n_{vuoto} on arvioitu vuotoilmakerroin 0,16 1/h
- V arvioitu ilmatilavuus 4480 m³

Tilavuusvirraksi vuotoilmalle saatiin noin 0,20m³/s.

Vuotoilmasta aiheutuva lämpöhäviö laskettiin kaavalla $\phi_{iv} = q_{vuoto} * \rho * C_p * \Delta T$ (D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma 2007, 20.), jossa ilmalle käytettiin tiheyden (ρ) arvona 1,2 kg/m³, ominaislämpökapasiteettina 1000 J/kgK ja ulkoilman ja sisälämpötilan erotus 52K.

Vuotoilman lämpöhäviöksi laskettiin noin 12,4kW.

8.6 Kasvihuoneen huipputeho

Yhden kasvihuoneen kokonaislämmityshuipputeho saatiin summaamalla kaikki lasketut lämpöhäviöt.

Lämmitystehontarve laskettiin kaavalla $Huipputehontarve = \phi_{joht} + \phi_{alapohj} + \phi_{IV}$ (D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma 2007, 51.)

Laskennan perusteella saatiin kasvihuoneen huipputehontarpeeksi noin 549 kW.

8.7 Lämmitysenergian tarve tarkastelujaksolla

Lämmitysenergian tarve laskettiin tarkastelujakson lämmitystarvelukujen avulla (Taulukko 1). Huipunkäyttöaika määritettiin kaavalla $H = 24 * S / (T_s - T_u)$, jossa S on lämmitystarveluku ja lämpötilaerona käytettiin 52K. Tarkastelujaksolla (syys-toukokuu) lämmitystarveluvuksi saatiin 4747 °Cd, jolloin huipunkäyttöajaksi saatiin 2191 h.

Näiden tietojen pohjalta lämmitysenergian tarve laskettiin kaavalla $Q = \phi * H$, jossa ϕ on kasvihuoneen huipputehontarve kW.

Yhden kasvihuoneen lämmitysenergian tarpeeksi tarkastelujaksolla saatiin noin 1203,1 MWh.

8.8 Auringon säteilyn huomiointi

Auringon säteilymäärän arviointiin Muhoksen alueella käytettiin PVGIS-työkalua, jonka avulla saatiin säteilymääräksi tarkastelujaksolla 432,11 kWh/m² (Taulukko 4). Kasvihuoneen pinta-ala ja 30 % auringon läpäisevyys huomioiden, auringon tuottamaksi lämpöenergiaksi laskettiin kaavalla $Q_{aurinko} = G_{säteily} * A * \tau$ (Hasan-Hriczo, K. 2022, 3).

Auringon tuottamaksi lämpöenergiaksi saatiin 167,9 MWh, tämä energia vähennettiin tuloksista kasvihuoneen lämmitysenergian tarpeesta, jolloin saatiin arvio todellisesta lämmitysenergian tarpeesta huomioiden säteilyn vaikutus.

9 LOUHOSALTAIDEN TOTEUTUKSEN RAJAUKSET JA OLETUKSET

Laskennat on tehty kuvaamaan ylläpitolämmityksen vaatimaa teoreettista minimithehoa. Laskennoissa keskitytään ainoastaan pintahäviöihin, jotka ovat avoimessa vesialtaassa suurin energiahukan lähde. Laskennan ulkopuolelle on jätetty maaperähäviöt, sääilmiöiden vaikutukset ja kaikki muut mahdolliset vaikuttajat. Kallion oletettiin vetävän itseensä tietyn lämpötilan ja pysyvän sitten siinä, joten sekin jätettiin laskuista pois. Tehontarpeen määrittämisessä on huomioitu ainoastaan vedenpinnan ja ulkoilman väliset ilmiöt; säteily, konvektio ja haihtuminen.

Keskeisiä oletuksia on veden lämpötilan pysyminen koko ajan samana (+30°C). Ulkoilman lämpötiloina on käytetty kuukausittaisia keskiarvoja vuodelta 2024 (Kilotavu, *taulukko 6*). Laskenta perustuu vapaaseen konvektioon, tuulta ei ole huomioitu. Haihtumisen korvaamisen uuden veden tarvetta ei ole laskettu mukaan ylläpitotehoon. Veden oletettiin olevan puhdasta vettä, joten käytettiin veden vakioarvoja.

Taulukko 6. Kuukausittaiset lämpötilat keskiarvot vuodelta 2024

	°C
Tammikuu	-13,7
Helmikuu	-7,7
Maaliskuu	-2,1
Huhtikuu	0
Toukokuu	10
Kesäkuu	15,7
Heinäkuu	17,4
Elokuu	16
Syyskuu	12,2
Lokakuu	4,5
Marraskuu	-1,5
Joulukuu	-2,3

9.1 Säteilytehon laskenta

Säteilyteho, joka lähtee altaan pinnasta, laskettiin kaavalla

$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot A_s \cdot \sigma(T_s^4 - T_{surr}^4)$, jossa, ε =emissiivisyys, A_s = altaiden pinta-ala (m^2), σ =Stefan-Boltzmannin vakio ($5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$), T_s =Pintalämpötila (303,15K), T_{surr} = ilman lämpötila (K). (Nikoskinen 2018, 15.)

Taulukko 7. Säteilysteho joka kuukaudelle

	Säteily (MW)
Tammikuu	10,50
Helmikuu	9,33
Maaliskuu	8,16
Huhtikuu	7,71
Toukokuu	5,39
Kesäkuu	3,95
Heinäkuu	3,51
Elokuu	3,87
Syyskuu	4,84
Lokakuu	6,70
Marraskuu	8,03
Joulukuu	8,21

9.2 Konvektion laskenta

Konvektio laskelmat laskettiin vapaan konvektion laskentakaavoilla. Konvektion laskeminen oli moniosainen. Aloitettiin ilman höyrynpaineen laskennalla kaukana vedenpinnasta. Suhteellisena kosteutena pidettiin 70 %. Tämä laskettiin kaavalla $P_{v,\infty} = \phi \cdot P_{sat}, ^\circ C$, jossa, ϕ = suhteellinen kosteusprosentti, $P_{sat}, ^\circ C$ = kylläisen veden paine ilmanlämpötilassa. (Nikoskinen 2018, 16.)

Seuraavaksi laskettiin altaan pinnan vesihöyryn tiheys kaavalla: $\rho_{v,s} = \frac{P_{v,s}}{R_v \cdot T_s}$, jossa, $P_{v,s}$ = kylläisenveden paine pintalämpötilassa (kPa), R_v =höyryn kaasuvakio ($0,4615 kPa \cdot m^3/kg \cdot K$), T_s = Pintalämpötila (K). Nikoskinen 2018,16.) Tiheydeksi saatiin $0,03031 kg/m^3$.

Altaan pinnalla oleva kuivan ilman tiheys laskettiin kaavalla: $\rho_{a,s} = \frac{P_{a,s}}{R_a \cdot T_s}$, jossa, $P_{a,s}$ = ilmanpaine pintalämpötilassa (kPa), R_a = Ilman kaasuvakio ($0,287 kPa \cdot m^3/kg \cdot K$), T_s = Pintalämpötila (K). Nikoskinen 2018, 17.) Tiheydeksi saatiin $1,16460 kg/m^3$.

Altaan pinnalla olevan vesihöyryn tiheys saatiin laskemalla yhteen altaan pinnalla olevan vesihöyryn tiheys ja altaan pinnalla olevan kuivan ilman tiheys (Nikoskinen 2018, 17.)

Seuraavaksi lähdettiin laskemaan allasta ympäröivän vesihöyryn tiheys kaavalla $\rho_{v,\infty} = \frac{P_{v,\infty}}{R_v \cdot T_\infty}$, jossa $P_{v,\infty}$ =kylläisen veden paine ilmanlämpötilassa (kPa), R_v =höyryn kaasuvakio (4615 kPa*m³/kg*K), T_∞ =ilmanlämpötila (K). (Nikoskinen 2018,17.)

Allasta ympäröivän vesihöyryn tiheyden laskettua, päästiin laskemaan seuraavaksi allasta ympäröivän kuivan ilman tiheys kaavalla $\rho_{a,\infty} = \frac{P_{a,\infty}}{R_a \cdot T_\infty}$, jossa $P_{a,\infty}$ =ilmanpaine ilmanlämpötilassa (kPa), R_a =ilman kaasuvakio (0,287kPa*m³/kgK), T_∞ =ilmanlämpötila (K). (Nikoskinen 2018,18.)

Allasta ympäröivän vesihöyryn tiheys ja allasta ympäröivän kuivan ilman tiheys laskettiin yhteen, niin saatiin allasta ympäröivän vesihöyryn tiheys selville (Nikoskinen 2018, 18.)

Molemmille altaille laskettiin ominaispituus kaavalla $L_c = \frac{A_s}{p}$, jossa A_s =vedenpinta-ala (m²), p = vedenpinnan piiri (m). Altaalle 1 (2,13 ha) saatiin ominaispituudeksi n. 35,5 m. Altaalle 2 (2,62 ha) saatiin n.40,31 m (Nikoskinen 2018,18.)

Grashofin luku laskettiin kaavalla $Gr = \frac{g \cdot (\rho_\infty - \rho_s) \cdot L_c^3}{\rho \cdot \nu^2}$, jossa g =putoamiskiihtyvyyden (9,81 m/s²), ρ_∞ =vesihöyryn tiheys ilmassa (kg/m³), ρ_s =vesihöyryn tiheys pinnalla (kg/m³), L_c =ominaispituus (m), ρ =vesihöyryn tiheys keskimäärin (kg/m³), ν =kinemaattinen viskositeetti m²/s. (Nikoskinen 2018, 18.)

Nusseltin luku laskettiin kaavalla $Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/3}$, jossa Gr =grashofin luku, Pr = prandtin luku. (Nikoskinen 2018, 19.)

Vedenpinnalta ilmaan saatava lämmönsiirtokerroin laskettiin kaavalla $h_{conv} = \frac{Nu \cdot k}{L_c}$, jossa k = lämmönjohtavuus (W/mK). (Nikoskinen 2018, 19.)

Näiden laskujen jälkeen päästiin laskemaan luonnollisen konvektion lämmönsiirtoteho kaavalla $\dot{Q}_{conv} = h_{conv} \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty)$ (Nikoskinen 2018, 19.)

Taulukko 8. Konvektio joka kuukaudelle

	Konvektio (MW)
Tammikuu	29,97
Helmikuu	25,45
Maaliskuu	21,24
Huhtikuu	19,62
Toukokuu	12,16
Kesäkuu	8,15
Heinäkuu	7,00
Elokuu	7,94
Syyskuu	10,59
Lokakuu	16,23
Marraskuu	20,77
Joulukuu	21,37

9.3 Haihtumisen laskenta

Veden pinnalta tapahtuvan haihtumisen aiheuttaman lämpöhäviön laskennassa käytettiin lämmön ja massa konvektion samankaltaisuutta. Laskennat aloitettiin laskemalla vesihöyryn liike kerroin vedenpinnasta ilmaan kaavalla $D_{AB} = D_{H_2O-air} \cdot \frac{T}{P}$, jossa D_{H_2O-air} = vesihöyryn diffuusio kerroin ilmassa ($1,87 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$), T =lämpötila (K), P =ilmanpaine (atm). (Nikoskinen 2018,20.)

Konvektiossa laskettu Prandtlin luku korvataan nyt Schmidtin luvulla, laskettiin kaavalla $Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$, jossa ν =kinemaattinen viskositeetti (m^2/s). D_{AB} = diffuusiokerroin (m^2/s) (Nikoskinen 2018, 21.)

Konvektiossa laskettu Nusseltin luku korvataan nyt Sherwoodin luvulla, laskettiin kaavalla $Sh = 0,15 \cdot (Gr \cdot Sc)^{1/3}$. (Nikoskinen 2018, 21.)

Laskettiin massansiirtokerroin vedenpinnalta ilmaan kaavalla $h_{mass} = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L_c}$. (Nikoskinen 2018, 21.)

Haihtumisnopeus vedenpinnalta ilmaan laskettiin kaavalla $\dot{m}_v = h_{mass} \cdot A_s \cdot (\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty})$, jossa A_s =veden pinta-ala (m²), $\rho_{v,s}$ = vesihöyryn tiheys pintalämpötilassa (kg/m³), $\rho_{v,\infty}$ =vesihöyryn tiheys ilmanlämpötilassa (kg/m³).

Haihtumisteho saatiin laskettua kaavalla $\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_v \cdot h_{fg}$, jossa $\dot{m}_v$ = haihtumisnopeus (kg/s), h_{fg} = entalpia (kJ/kg). (Nikoskinen 2018, 22.)

Taulukko 9. Haihtuminen joka kuukaudelle

	Haihtuminen (MW)
Tammikuu	43,23
Helmikuu	42,05
Maaliskuu	40,80
Huhtikuu	39,95
Toukokuu	34,67
Kesäkuu	30,01
Heinäkuu	28,27
Elokuu	29,67
Syyskuu	33,05
Lokakuu	38,02
Marraskuu	40,54
Joulukuu	40,77

10 MUOVIN JA MURSKEEN KUIVATUS TOTEUTUS

10.1 Laskennan rajaukset ja oletukset

Muovin ja murskeen kuivauksen energiantarvetta arvioitiin yksinkertaistetulla laskentamenetelmällä, jossa tarkastelu perustuu poistettavan veden määrään, materiaalin lämmitykseen sekä prosessihäviöitä kuvaavaan korjauskertoimeen. Laskennassa ei huomioitu yksityiskohtaisesti kuivauslaitteiston rakennetta tai kaikkia prosessihäviöitä erikseen, vaan ne sisällytettiin kokonaisuutta kuvaavaan kertoi-
meen.

Lisäksi oletettiin, että kuivauksen prosessi toimii tasaisella teholla koko käyttö-
ajan. Hukkalämmön oletettiin olevan jatkuvasti saatavilla, ja sen hyödyntämistä
tarkasteltiin joko suoraan tai lämpöpumpun avulla. Tuloksia voidaan pitää suun-
taa antavina näiden oletusten vuoksi.

10.2 Lähtötiedot ja mitoitusarvot

Muovin kuivauksessa käytettiin märän materiaalin massavirtaa 10 t/h, alkukos-
teutta 12 % ja loppukosteutta 1 %. Käyttöajaksi oletettiin 6500 h/a. Korjauskerto-
mena käytettiin arvoa 1,3. Hukkalämmön lämpötilaksi oletettiin 65 °C ja prosessin
tavoitelämpötilaksi 80 °C, minkä vuoksi lämpöpumpun käyttö oli tarpeen. Lämpö-
pumpun lämpökertoimena (COP) käytettiin arvoa 7,8. Joka saatiin Coolpack- so-
velluksesta.

Murskeen kuivauksessa käytettiin märän materiaalin massavirtaa 100 t/h, alku-
kosteutta 5 % ja loppukosteutta 0,5 %. Käyttöajaksi oletettiin 2000 h/a ja korjaus-
kertoimena käytettiin arvoa 1,4. Lisäksi murskeen osalta tarkasteltiin materiaalin
esilämmitystä hukkalämmöllä lämpötilavälillä 15 °C → 65 °C. Kiviaineksen omi-
naislämpökapasiteettina käytettiin arvoa 0,85 kJ/kgK.

10.3 Muovin kuivauksen laskenta

Muovin kuivauksessa poistettavan veden määrä määritettiin materiaalivirran ja kosteuspitoisuuden muutoksen perusteella. Laskennan tuloksena poistettavan veden määräksi saatiin 1,1 t/h. Pelkkään veden höyrystymiseen perustuva tehontarve oli tällöin 0,69 MW. Kun huomioitiin korjauskerroin 1,3, muovin kuivauksen kokonaistehoksi saatiin 0,90 MW.

Vuotuinen energiantarve laskettiin kokonaistehon ja käyttöajan perusteella. Muovin kuivauksen vuotuiseksi energiantarpeeksi saatiin 5827,97 MWh/a.

Koska käytettävissä olevan hukkalämmön lämpötila (65 °C) on alhaisempi kuin prosessin vaatima lämpötila (80 °C), ei hukkalämpöä voida hyödyntää suoraan. Tämän vuoksi kuivauksessa käytetään lämpöpumppua, jolla lämpötila nostetaan prosessille sopivaksi. Lämpöpumpun lämpökertoimella 7,8 vuotuisesti sähkönkulutukseksi saatiin 747,18 MWh/a.

Taloudellisessa tarkastelussa vertailuenergian hintana käytettiin 85 €/MWh. Tällä oletuksella vuotuisesti kustannussäästöksi saatiin 431 867,15 €/a. Päästökertoimella 220 kgCO₂/MWh laskettuna hiilidioksidipäästöjen vähenemäksi saatiin 1282,15 t/a.

10.4 Murskeen kuivauksen laskenta

Murskeen kuivauksessa poistettavan veden määrä määritettiin materiaalivirran ja kosteuspitoisuuden muutoksen perusteella. Laskennan tuloksena poistettavan veden määräksi saatiin 4,5 t/h. Pelkkään veden höyrystymiseen perustuva tehontarve oli 2,82 MW. Korjauskertoimen 1,4 avulla murskeen kuivauksen kokonaistehoksi saatiin 3,95 MW.

Vuotuinen energiantarve oli tällöin 7900,2 MWh/a käyttöajan ollessa 2000 h/a.

Lisäksi tarkasteltiin tilannetta, jossa kosteutta poistetaan osittain ennen varsinaista kuivainta. Tällöin energiansäästöksi saatiin 1755,6 MWh/a, mikä vastaa

noin 175 560 €/a kustannussäästöä ja 386,2 t/a hiilidioksidipäästöjen vähene-
mää.

10.5 Murskeen lämmitys hukkalämmöllä

Murskeen kuivauksen yhteydessä tarkasteltiin materiaalin esilämmitystä hukka-
lämmöllä ennen varsinaista kuivausprosessia. Kuivan kiviaineksen massavirtana
käytettiin arvoa 95 t/h. Materiaali lämmitettiin lämpötilasta 15 °C lämpötilaan 65
°C.

Näillä lähtötiedoilla murskeen lämmitystehoksi saatiin 1,122 MW ja vuotuiseksi
energiantarpeeksi 2580 MWh/a

Kun huomioidaan sekä hukkalämmöllä toteutettava osittainen kosteudenpoisto
että murskeen esilämmitys, hukkalämmöllä korvattavaksi kokonaisenergiämää-
räksi saadaan noin 4335 MWh/a. Korvattavan energian hinnalla 100 €/MWh tämä
vastaa noin 433 500 €/a kustannussäästöä. Päästökertoimella 220 kgCO₂/MWh
hiilidioksidipäästöjen vähenemäksi saadaan noin 954 tCO₂/a

10.6 Tulosten tarkastelu

Tulosten perusteella muovin ja murskeen kuivauksessa energiantarpeen muo-
dostuminen eroaa toisistaan. Muovin kuivauksessa energiantarve muodostuu
pääasiassa kosteuden poistosta, kun taas murskeen kuivauksessa merkittävä
osa energiasta kuluu suuren materiaalmassan lämmittämiseen.

Molemmissa tapauksissa hukkalämmön hyödyntäminen parantaa prosessin
energiatehokkuutta merkittävästi. Muovin kuivauksessa hukkalämpö voidaan
hyödyntää lämpöpumpun avulla koko lämmöntarpeen kattamiseen. Murskeen
kuivauksessa hukkalämpö soveltuu erityisesti materiaalin esilämmitykseen sekä
osittaiseen kosteuden poistoon ennen varsinaista kuivausprosessia.

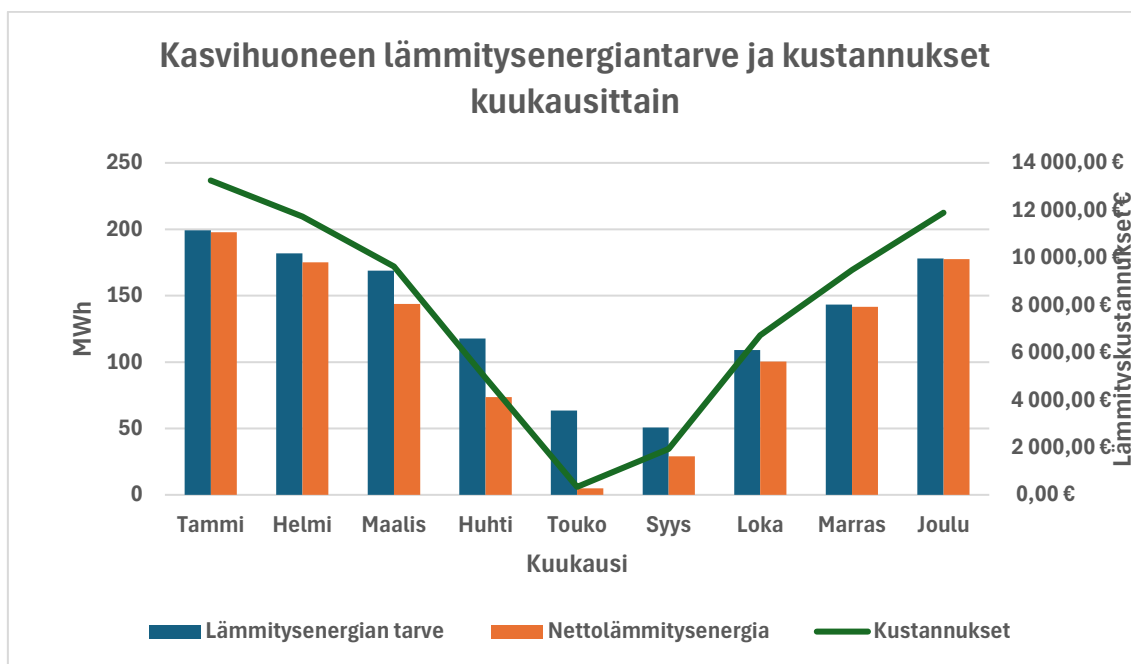
10.7 Yhteenveto

Muovin ja murskeen kuivauksen toteutusosan perusteella voidaan todeta, että hukkalämmöllä on merkittävä potentiaali kuivatusprosessien energiankulutuksen vähentämisessä. Muovin kuivauksessa korostuu veden höyrystymiseen liittyvä energiantarve, kun taas murskeen tapauksessa suuri materiaalivirta lisää lämmitysenergian osuutta kokonaisuudessa.

Hukkalämmön hyödyntäminen yhdessä lämpöpumppuratkaisujen kanssa mahdollistaa energiatehokkaan ja vähäpäästöisen kuivauksen. Tulosten perusteella saavutettavat energiansäästöt, kustannushyödyt ja päästövähennykset ovat merkittäviä, mikä tekee tarkastelluista ratkaisuista potentiaalisia vaihtoehtoja datakeskuksen hukkalämmön hyödyntämiseen.

11 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

11.1 Kasvihuoneiden tuloksista



Kuva 7. Kasvihuoneen lämmitysenergiantarve ja kustannukset kuukausittain

Kasvihuoneen lämmitysenergiantarve vaihtelee merkittävästi tarkastelujakson aikana (Kuva 8), ja suurimmat energiantarpeet sijoittuvat talvikuukausiin, jolloin energiantarve kuukausittain on noin 180-200MWh. Kevät- ja syyskaudella lämmitysenergiantarve vastaavasti pienenee selvästi ja on alhaisimmillaan kuukaudessa vain muutamia kymmeniä megawattitunteja. Nettolämmitysenergia pienenee auringon säteily huomioiden kaikissa kuukausissa, ja koko tarkastelujaksolla sen vaikutus on yhteensä noin 168 MWh. Keväällä vaikutus korostuu erityisesti, jolloin auringon säteilyenergia kattaa lämmitystarpeesta merkittävän osan.

Lämmityskustannukset ovat suurimmillaan talvikaudella ja seuraavat suoraan energiantarvetta, kuukausikustannukset nousevat yli 10 000 euroon, kun lämpimäpinä kuukausina kustannukset jäävät huomattavasti pienemmiksi.

Tulokset ovat suuruusluokaltaan samankaltaisia kuin referensseinä käytetyt työt, esimerkiksi opinnäytetyö (Böling 2013). Laskennassa käytetyt lähtötiedot

perustuivat osittain variointeihin, jonka vuoksi voidaan pitää tuloksia suuntaa antavina, mutta niiden perusteella voidaan arvioida kasvihuoneen kustannusten suuruusluokkaa ja lämmitysenergian tarvetta. Tulokset ovat yleistettävissä vastaaviin kohteisiin, mikäli geometria, rakenteet ja käyttöolosuhteet ovat vertailukelpoisia.

Tulokset vastaavat työn tavoitteita, sillä niiden avulla kasvihuoneen lämmitysenergian tarvetta ja kustannusten suuruusluokkaa pystyttiin arvioimaan tarkastelujaksolla. Jatkokehityksessä voitaisiin parantaa laskennan tarkkuutta hyödyntämällä kohdekohtaisia tarkempia lähtötietoja sekä esimerkiksi huomioimalla tarkemmin kylmäsiltojen ja ilmanvaihdon vaikutus ja auringon säteilyn ajallinen vaihtelu.

11.2 Louhosaltaiden tulokset

Louhosaltaiden ylläpitolämmitys vaatii merkittävän jatkuvan tehon, joka vaihtelee ulkoilman lämpötilan mukaan, isoimmat energiantarpeet ovat talvikuukausina (*Kuva 9*). Kokonaistehontarve on suurimmillaan tammikuussa, jolloin se vaatii 83,7 megawattia, alhaisin tehontarve taas on heinäkuussa, jolloin tehontarve puutoaa 38,8 megawattiin (*Taulukko 10*). Tuloksista huomaa, kuinka haihtuminen on selkeästi isoin osa häviöistä. Kesäkuukausina korostuu haihdunnan suhteellinen osuus, kun lämpötilaerot pienevät. Vuosittainen lämmitysenergian tarve on n. 526GWh.

Tulokset vastaavat hyvin asetettuja tavoitteita, sillä työssä onnistuttiin määrittämään louhosaltaiden ylläpitolämmityksen vaatima teoreettinen energiantarve ja havainnollistamaan sen vaihtelu kausittain. Tulokset vahvistavat aikaisempaa tietoa siitä, että avoimissa, suurissa vesialtaissa pintahäviöt varsinkin haihtuminen on iso osa.

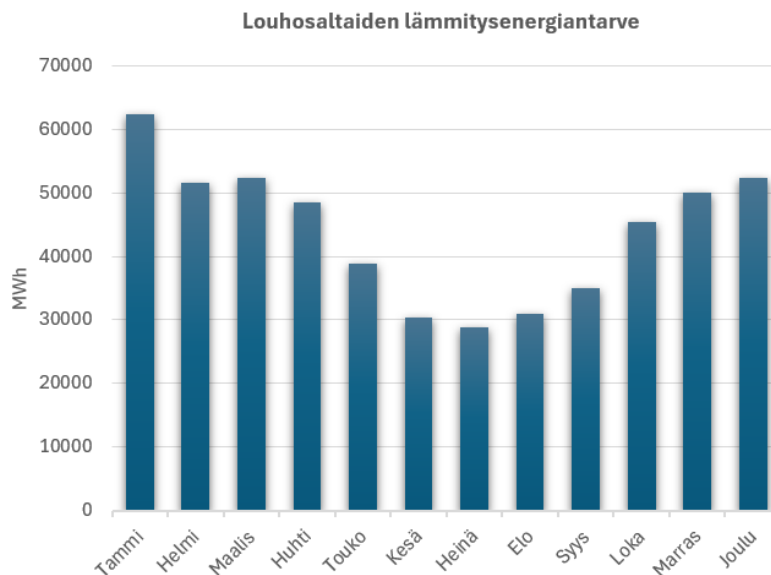
Tulosten luotettavuutta tukee se, että laskennassa käytettiin selkeitä fysiikan kaavoja. Lisäksi samantyyilisestä, tosin pienemmästä altaasta oli tehty laskenta ja opinnäytetyö (Nikoskinen 2018.) On kuitenkin huomioitava, että lasketut pintahäviöt ovat vain yksi osa energiantarvetta. Todellisuudessa lisäksi tulee sääolosuhteet kuten tuuli sekä maaperähäviöt. Tämä tarkoittaa sitä, että tuloksia täytyy

pitää pohjana vain minimikapasiteetin määrittämiselle. Jatkokehityksessä laskennan tarkkuutta voitaisiin parantaa hyödyntämällä tuulimittauksia sekä huomioimalla maaperään johtuvan lämmön ja täydennysveden lämmitystarpeen vaikutukset.

Vaikka vastaavaa laskelmaa tämmöisestä ei tietävästi ole, tulokset osoittavat konseptissa potentiaalisuutta. Laskelmassa on osoitus siitä, miten teollinen hukka voidaan muuttaa paikallisesti arvoksi, kuten virkistysalueeksi. Samalla datakeskuksen jäähdytyskustannukset mahdollisesti vähenisivät.

Taulukko 10. Kuukausittaiset tulokset

	Lämpötila (K)	Säteily (MW)	Konvektio (MW)	Haihtuminen (MW)	YHTEENSÄ (MW)
Tammikuu	259,45	10,50	29,97	43,23	83,7
Helmikuu	265,45	9,33	25,45	42,05	76,8
Maaliskuu	271,05	8,16	21,24	40,80	70,2
Huhtikuu	273,15	7,71	19,62	39,95	67,3
Toukokuu	283,15	5,39	12,16	34,67	52,2
Kesäkuu	288,85	3,95	8,15	30,01	42,1
Heinäkuu	290,55	3,51	6,996	28,27	38,8
Elokuu	289,15	3,87	7,94	29,67	41,5
Syyskuu	285,35	4,84	10,59	33,05	48,5
Lokakuu	277,65	6,70	16,23	38,02	60,9
Marraskuu	271,65	8,03	20,77	40,54	69,3
Joulukuu	270,85	8,21	21,37	40,77	70,4



Kuva 8. Louhosaltaiden lämmitysenergian tarve kuukausittain

11.3 Murskeen ja muovin kuivauksen tulokset

Murskeen ja muovin kuivatus osoittautui merkittäväksi ja jatkuvaa lämpötehoa vaativaksi prosessiksi, jossa energiantarve määräytyy ensisijaisesti poistettavan kosteuden mukaan. Kuivauksen energiantarve vaihtelee prosessikohtaisesti, mutta keskeisenä havaintona voidaan todeta, että veden haihduttaminen muodostaa selvästi suurimman osan kokonaisenergiantarpeesta.

Tarkastelussa murskeen massavirta oli 100 t/h, jossa kosteuspitoisuus laski 5 %:sta 0,5 %:iin. Muovin osalta massavirta oli 10 t/h ja kosteuspitoisuus laski 12 %:sta 1 %:iin. Näissä olosuhteissa kuivauksen energiantarve muodostui pääosin veden faasimuutokseen sitoutuvasta energiasta, kun taas materiaalin lämmittämisen osuus jäi selvästi pienemmäksi. Tämä korostaa kuivauksen termodynaamista luonnetta, jossa latenttilämpö hallitsee kokonaisenergiankulutusta.

Muovin kuivauksessa laskennallinen tehontarve oli noin 0,9 MW, mikä huomioi prosessihäviöt korjauskertoimen avulla. Tämä osoittaa, että suhteellisen pienelläkin massavirralla voidaan saavuttaa merkittävä energiankäyttö, mikäli poistettava kosteus on suuri. Murskeen kuivauksessa energiantarve kasvaa huomattavasti suuremman massavirran vuoksi, vaikka kosteuspitoisuus on alhaisempi. Laskennallinen tehontarve murskeen kuivaukselle ja esilämmitykselle on yhteensä noin 5,1 MW, josta suurin osa muodostuu veden haihduttamiseen tarvittavasta energiasta ja pienempi osa materiaalin lämmittämisestä. Näin ollen kokonaisenergiantarve muodostuu massavirran ja kosteuden yhteisvaikutuksesta.

Tämä tarkoittaa, että murskeen kuivatus on selvästi suurempi ja tasaisempi hukkalämmön hyödyntämiskohde kuin muovin kuivatus, mikä tekee siitä erityisen kiinnostavan teollisen mittakaavan sovelluksena.

Tuloksista voidaan havaita, että hukkalämmön hyödyntäminen kuivauksessa on teknisesti perusteltua erityisesti silloin, kun käytettävissä on tasainen ja riittävän korkea lämpötilataso. Laskennassa käytettiin hukkalämmön lämpötilana noin 60–65 °C, mikä soveltuu hyvin esikuivaukseen tai matalalämpöiseen kuivaukseen.

esimerkiksi lämpöpumppuratkaisun avulla. Lämpöpumpun käyttö mahdollistaa prosessin energiatehokkuuden parantamisen nostamalla lämpötilatasoa tarvittaessa, jolloin saavutetaan riittävä kuivumisteho myös vaativammissa olosuhteissa.

Tulokset vastaavat työn tavoitteita, sillä niiden avulla pystyttiin arvioimaan kuivauksen energiantarve sekä tunnistamaan keskeiset siihen vaikuttavat tekijät. Erityisesti veden poistoon liittyvä energiantarve korostui, mikä tukee aiempaa tietoa kuivatusprosessien energiavaltaisuudesta.

Tulosten luotettavuutta tukee se, että laskenta perustuu tunnettuihin lämpöopin periaatteisiin, kuten veden höyrystymislämpöön ja materiaalien ominaislämpökapasiteetteihin. On kuitenkin huomioitava, että todellisessa prosessissa kuivaukseen vaikuttavat useat lisätekijät, kuten ilmanvaihto, kuivurin rakenne, materiaalin raekoko, sekä ympäristöolosuhteet. Näin ollen esitetyt tulokset kuvaavat teoreettista minimienergiantarvetta.

Jatkokehityksessä tarkkuutta voitaisiin parantaa huomioimalla kuivurin todellinen hyötysuhde, ilman kosteuspitoisuus sekä prosessin dynaaminen käyttäytyminen. Lisäksi kuivauksen integrointi osaksi laajempaa energiajärjestelmää, kuten datakeskuksen hukkalämmön hyödyntämistä, tarjoaa merkittävää potentiaalia energiatehokkuuden ja kustannussäästöjen näkökulmasta.

Tulokset osoittavat, että murskeen ja muovin kuivatus voivat toimia tehokkaina hukkalämmön hyödyntämiskohteina. Prosessi mahdollistaa matalalämpöisen energian jalostamisen hyödylliseen käyttöön, mikä tukee kiertotaloutta ja parantaa kokonaisjärjestelmän energiatehokkuutta.

11.4 Kaukolämmön laskennan tulosten yhteenveto

Datakeskuksen hukkalämmöstä tuotetun kaukolämmön tuotantokustannukset ovat laskennan perusteella noin 87%: a pienemmät, kuin vastaavan lämpö määrän tuottaminen metsähaketta polttamalla. Tuotantotapaa voidaan näin ollen pitää varsin kannattavana vaihtoehtona. Huomioitavaa on myös kaukolämpöä tuotettavan yksikön CO₂-päästöjen merkittävä vähentyminen, ja sitä kautta myös päästöoikeusmaksujen pienentyminen, tämä myös lisää osaltaan kannattavuutta. Lisäksi kaikki hukkalämmön hyödyntäminen vähentää datakeskuksen jäähdytystarvetta, joka parantaa datakeskuksen hyötysuhdetta, vähentää yleisesti lämmitykseen käytettävän sähkön käyttöä (sähkökattiloiden tarve KL-tuotannossa, alueelle syntyvien yritysten kiinteistöjen lämmitys jne.) ja vahvistaa sosiaalista hyväksyttävyyttä sekä ekologisuutta.

Lämpöpumppulaitoksen ja kaukolämpöputkiston kokonaisinvestoinnin suuruus vaikuttaa kuitenkin paljon investoinnin takaisinmaksuaikaan ja tuottoon. Datakeskuksen valmistumisen aikana vallitseva geopoliittinen tilanne sekä yleinen talouspoliittinen tilanne Suomessa, tulevat kuitenkin vaikuttamaan merkittävästi investoinnin kannattavuuteen ja toteutettavuuteen.

12 POHDINTA/YHTEENVETO

Työn päätarkoituksena oli selvittää Muhoksen kunnan alueelle suunnitellun datakeskuksen tuottaman hukkalämmön hyödyntämistä ja osin myös hyödyntämisen taloudellista kannattavuutta. Tulokset olivat selkeät; hukkalämmön hyödyntäminen, varsinkin paljon lämpöä käyttävissä prosesseissa, voi olla taloudellisesti hyvinkin kannattavaa. Tutkimuskysymyksiin työ antoi vastauksia;

- hukkalämpö on teknisesti hyödynnettävissä, kun hyödyntäminen tapahtuu mahdollisimman lähellä tuotantoa ja hukkalämmön lämpötila on riittävän korkea
- useassa tapauksessa matalalämpöinen hukkalämpö on priimattava lämpöpumpuilla, jotta se on kannattavasti hyödynnettävissä
- hukkalämpö voidaan integroida osaksi paikallista lämmönjakelua, syöttämällä priimattua hukkalämpöä jo olemassa oleviin, paikallisiin kaukolämpöverkkoihin
- paikallinen energiainfrastrukturi rajoittaa hukkalämmön hyödyntämistä lähinnä suhteellisen pitkien siirtomatkojen vuoksi (kaukolämpö), lisäksi tarkastelussa olleelta lähialueelta jakeluverkko ja lämmön käyttäjät puuttuvat kokonaan.

Huomion arvoista hukkalämmön hyödyntämisessä on myönteisten ympäristövaikutusten lisäksi, datakeskusten sosiaalisen hyväksyttävyyden kasvu sekä sähköverkon tasapainottaminen, vaikkakaan tämä työ ei ota kantaa näihin seikkoihin.

Työhön valittiin hyödyntämiskohteiksi mahdollisimman lämpöintensiiviset prosessit. Kohteiden valintaa ei tilaajan tai muidenkaan toimesta juurikaan ohjattu tai rajattu, koska tiedossa ei vielä ollut yrityksiä, jotka olisivat sitoutuneet alueelle tulemaan. Tämä teki lähtötietojen hankinnan ja laskennan rajaamisen hieman haastavaksi, koska ei ollut konkreettisia toimijoita, joiden tarpeisiin laskelmat tehtäisiin. Lähtötiedot perustuvat samoista syistä, hyvin pitkälti arvioihin. Näiden tietojen pohjalta on myös vaikeaa arvioida laskelmien realistisuutta ja sovellettavuutta suoraan käytännön prosesseihin. Jatkotutkimusaiheena olisikin

mielenkiintoista verrata laskelmia käytännön prosesseihin, mikäli datakeskus ja aiheena olleita hukkalämmönkäyttäjiä alueelle tulee.

LÄHTEET

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017. Luettavissa: <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2017/1010>
Luettu: 7.4.2026.

Joki-Juvonen, J. 2021. Energiatehokkaan järjestelmän mitoitus kasvihuoneeseen. Opinnäytetyö. Karelia Ammattikorkeakoulu. Energia- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma. Luettavissa https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/500771/Joki_Tuomas_Juvonen_Joni_2021_05_31.pdf?sequence=2
Luettu 6.4.2026

Kangasalan Lämpö Oy s.a. Kuva. Artikkelissa Kaukolämpö. Luettavissa: <https://kangasalanlampo.fi/kaukolampo/>

Linnavuori, S. 2011. Kiinteistön lämpöhäviöiden laskeminen. Opinnäytetyö. Talotekniikan koulutusohjelma. Luettavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/32403/Linnavuori_Sakari.pdf?sequence= Luettu: 30.3.2026

Mäkelä, V-M. & Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Oppimateriaali. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Tammerprint Oy.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D5. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2007.
Ympäristöministeriö.
Luettavissa: https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/D5_2007_fi.pdf.
Luettu: 2.4.2026.

Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Lämmöneristys. Ohjeet 2003.
Ympäristöministeriö.
Luettavissa: <https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/c4.pdf>.
Luettu: 7.4.2026.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D5. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2012.
Ympäristöministeriö.

Luettavissa: https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/D5_2012.pdf.

Luettu: 7.4.2026.

Ilmatieteen laitos. 2026. Lämmitystarveluku eli astepäiväluku. Luettavissa:

<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>. Luettu: 1.4.2026.

PVGIS. Photovoltaic Geographical Information System. Euroopan komissio.

Luettavissa: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/.

Luettu: 7.4.2026.

Novagric, 2016. Plastics for greenhouses. Luettavissa: <https://www.novagric.com/en/greenhouses-apr/greenhouses-supplies/plastic-greenhouses>.

Luettu: 2.2.2026.

Ilmatieteenlaitos 2025. Vuoden 2025 sääyhteenveto. Luettavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2025>

Luettu: 10.2.2026

Böling, A. 2013. Kasvihuoneiden lämmöntarpeen selvitys ja lämmitystehontarpeen laskentasovellus. Opinnäytetyö. Talotekniikan koulutusohjelma. Metropolia ammattikorkeakoulu.

Luettavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/60334/Opinnaytetyo_Anders_Boling.pdf?sequence=1

Luettu: 10.2.2026

Hasan-Hriczo, K. 2022. Heating a greenhouse using a solar air collector assisted by thermal storage. A simulation study. Luettavissa:

https://real.mtak.hu/163933/1/1856_doi.pdf Luettu: 20.2.2026.

Nikoskinen, M. 2018. Tehon- ja energiatarpeen laskenta ulkoaltaan ja rakennuskannan kokonaisuudessa. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, energiatekniikan koulutusohjelma. Luettavissa:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/159494/Nikoskinen_Miro.pdf;jsessionid=117ABEB77FCCE30E66134059E6DA486C?sequence=1 Luettu: 7.4.2026

Kilotavu. Taulukkotilasto. Keskilämpötila. Luettavissa: <https://kilotavu.com/asema-tilasto.php?asema=101799>

Luettu: 17.3.2026

Latvala, J. 2014. Konvektiivinen lämmönsiirtyminen ratapenkereessä. Diplomi-työ. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan koulutusohjelma. Luettavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/22259/latvala.pdf;jsessionid=4629AA2144C988357D0B51D42550E3CE?sequence=3> Luettu:14.4.2026.

Education. National Geographic. Evaporation. 29.4.2024. Luettavissa: <https://education.nationalgeographic.org/resource/evaporation/> Luettu: 16.4.2026

Motiva, Polttoaineen kuivaustekniikat. 2.9.2025. Luettavissa: <https://www.motiva.fi/wp-content/uploads/sites/2/2025/10/Ylijaamalammon-taloudellinen-hyodyntaminen-%E2%80%93-Polttoaineen-kuivaustekniikat.pdf> Luettu: 16.4.2026

The Engineering toolbox. 29.4.2026. Luettavissa: [Water - Enthalpy and Entropy vs. Temperature](#) Luettu 29.4.2026

Isola, Sami 18.2.2026. Haastattelu murskeen kuivauksesta. Yritys : Isape Oy. Suullinen tiedonanto.

Kivioja, Tapio 24.2.2026. Haastattelu muovin kuivauksesta: Yritys : Kempeleen jätekuljetus Oy. Suullinen tiedonanto.