



Asiakas: HögforsGST Oy

Projekti: Väliottokytkenä ja kaukolämmön paluulämpötila

Projektinumero: 101014649

Raportti

VäliottokytKentä ja kaukolämmön paluulämpötila

2020-08-14

Projekti ID
101014649
Mobile
+358 50 346 1524
E-mail
jesper.laitinen@AFRY.com

Asiakas
HögforsGST Oy

Kaukolämpö ja kaukokylmä, AFRY Finland Oy

Tarkastaja
Jesper Laitinen
14.8.2020

Hyväksyjä
Juha Esterinen
11.8.2020

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Lämmönjakokeskus	5
2.1	VäliottokytKentä	6
2.2	Laskennallinen hyöty	8
2.2.1	Arvojen määrittäminen	9
2.2.2	Laskennan tulokset	12
2.3	Lämmönjakokeskus ja paluulämpötila tulevaisuudessa	13
3	Paluulämpötilan vaikutus kaukolämpöön	15
3.1	Verkon lämpöhäviöt	15
3.2	Verkon pumppaus	16
3.3	Savukaasujen lämmön talteenotto	16
3.4	Sähkön tuotannon osuus yhteistuotannosta	17
3.5	Uudet lämmönlähteet ja lämpöpumput	18
3.6	Lämmön varastointi	19
3.7	Kokonaishyöty	19
4	Yhteenveto	20

Tiivistelmä

HögforsGST on kehittänyt lämmönjakokeskuksiin niin kutsutun väliottokytkennän, joka poikkeaa muista yleisesti käytössä olevista kytkennöistä. Väliottokytkennällä lämpimän käyttöveden lämmönsiirtimeltä poistuvaa kaukolämpövettä hyödynnetään lämmityksen lämmönsiirtimessä, kun käyttövedellä ei ole kulu- tusta tai se on pientä. Tämä ratkaisu parantaa kaukolämpöveden jäähtymää, joka edelleen tehostaa koko kaukolämpöjärjestelmää.

Erityisesti vanhemmissa rakennuksissa lämpimän käyttövesiverkon lämpöhä- viöt voivat olla korkeat. Silloin välioton hyödyt korostuvat, koska kaukolämpö- vesi ei pääse jäähtymään kunnolla korkean lämpimän käyttövesiverkon paluu- lämpötilan sekä virtaaman vuoksi. Tätä huonosti jäähtynyttä kaukolämpövettä voidaan hyödyntää tehokkaasti kiinteistön lämmitykseen, jolloin jäähtymä pa- ranee. Lämmitysverkoston matala paluulämpötila parantaa entisestään vä- lioton hyötyjä, tällaisia kohteita ovat esimerkiksi uudisrakennukset sekä lattia- lämmityskohteet.

Laskennallisesti väliottokytkennällisen lämmönjakokeskuksen jäähtymä voi olla hetkellisesti yli 15 °C parempi kuin ilman väliottoa. Lämmityskauden yli tarkas- teltuna jäähtymä on tuntipainotteisesti noin 9 °C parempi ja vuoden yli 8 °C, jos käyttövedellä ei ole kulutusta. Niiden tuntien osuus, kun käyttövedellä on kulutusta vaihtelevat kiinteistökohtaisesti, mutta jos näitä tunteja on esimer- kiksi kuusi vuorokauden 24 tunnista, niin jäähtymä on keskimäärin noin 6 °C parempi kuin ilman väliottoa vuoden yli tarkasteltuna.

Kaukolämmön paluulämpötilan taso vaikuttaa merkittävästi koko kaukoläm- pöjärjestelmään. Verkon kannalta paluulämpötilan lasku vähentää lämpöhävi- öitä ja pumppauksen tarvetta. Tuotannon näkökulmasta matalalla paluulämpö- tilalla pystyy tehostamaan nykyistä lämmön tuotantoa ja tulevaisuutta ajatellen uudet matalalämpöiset lämmönlähteet soveltuvat entistä paremmin kaukoläm- mitykseen, kun kaukolämmön paluulämpötila on alempi. Karkeana arviona 1 °C:n pudotus paluulämpötilassa voi parantaa kaukolämpöjärjestelmän koko- naishyötysuhdetta noin 1 %:lla.

1 Johdanto

AFRY Finland Oy selvitti HögforsGST Oy:n toimeksiannosta väliottokytkennän ja matalan kaukolämmön paluulämpötilan hyötyjä kaukolämpöjärjestelmään. Selvitys on kaksiosainen. Aluksi perehdytään HögforsGST:n kehittämään väliottokytkentään ja lopuksi käsitellään paluulämpötilan laskun vaikutusta kaukolämpöjärjestelmään.

Energiateollisuus ry:n Julkaisu K1/2013 *Rakennusten kaukolämmitys – Määräykset ja ohjeet* määrittää Suomessa kaukolämpöasiakkaiden kytkentöjä lämmönjakokeskuksille (Energiateollisuus 2014). Tällä hetkellä kiinteistöissä käytetään yleisesti K1:n kolmea tyyppikytkentää: pientalo-, perus- ja välisyöttökytkentää. Väliottokytkentä poikkeaa selkeästi näistä kolmesta kytkennästä. Se mahdollistaa kaukolämpöveden paremman jäähtymän hyödyntämällä lämpimän käyttöveden lämmönsiirtimen kaukolämpövettä lämmityslämmönsiirtimessä lämpimän käyttöveden kulutuksen ollessa hyvin vähäistä tai nolla.

Kaukolämpöverkon paluulämpötila vaikuttaa kaukolämmön tuotantoon. Matala paluulämpötila pystyy hyödyntämään esimerkiksi hukkalämpöä paremmin kuin korkea ja se mahdollistaa paremman tuotannon hyötysuhteen. Myös verkon lämpö- ja painehäviöt laskevat paluulämpötilan laskiessa.

Tämän työn taustalla on ollut AFRYn aikaisempi selvitys Energiateollisuus ry:lle: *Kaukolämpöasiakkaiden mitoituslämpötilan laskeminen*, joka on ollut myös Jesper Laitisen diplomityö. Sitä on hyödynnetty tässä selvityksessä. Se käsittelee tarkemmin kaukolämpöverkon menolämpötilaa ja sen mukaista asiakkaiden tuomitoituslämpötilaa. (Laitinen 2020.)

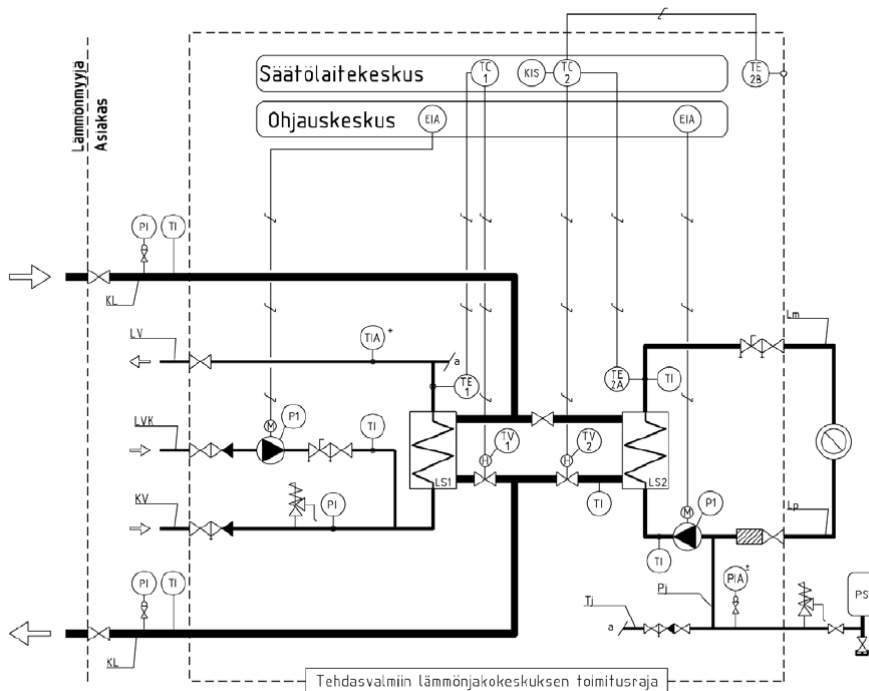
2 Lämmönjakokeskus

Asiakkaan päässä kaukolämpöverkkoa on lämmönjakokeskus, jossa lämpö siirtyy verkosta rakennuksen lämmitysjärjestelmään. Keskus muodostuu muun muassa lämmönvaihtimista, pumpuista, säätö- ja sulkuventtiileistä, paine- ja lämpötila-antureista ja säätökeskuksesta.

Suomessa kaukolämpöverkot eivät ole suoraan kytkettyjä rakennuksien lämmitysverkkoihin eli kaukolämpöverkon ja rakennuksen vesikierron ovat erillisiä. Lämmönjakokeskuksessa lämpö siirtyy lämmönsiirtimissä kaukolämpöverkon ensiöpuolelta rakennuksen toisiopuolelle. Ensiövirtauksella tarkoitetaan kaukolämpöveden virtausta ja toisiovirtauksella rakennuksessa kiertävän veden virtausta, esimerkiksi radiaattoriverkossa eli patteriverkossa.

Lämmönjakokeskuksessa on yleensä vähintään kaksi lämmönsiirintä: yksi lämpimän käyttöveden lämmitykselle ja yksi tilan lämmitykselle. Lämmityssiirtimiä voi olla useampiakin, esimerkiksi ilmavaihdon tuloilman esilämmitykselle tai lattialämmitykselle. Lämmönsiirtimet kytketään lämmönjakokeskuksessa tyyppillisesti rinnan. Kuva 1 esittää K1:n mukaista peruskytkentää, jossa lämpimän käyttöveden siirrin on vasemmalla ja lämmityksen oikealla.

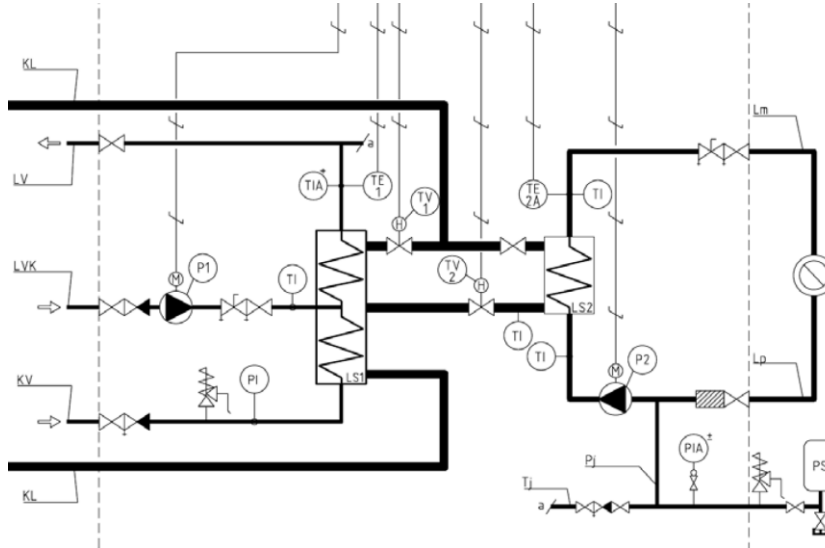
Kuva 1. Peruskytkennän mukainen lämmönjakokeskus (Energiateollisuus 2014)



Erilaisilla keskuskytkennöillä voi saavuttaa etuja esimerkiksi kaukolämmön jäähtymässä. Erityisesti suurissa ja vanhoissa kohteissa lämmönjakokeskuksissa hyödynnetään lämmityssiirtimeltä palaavaa lämmintä vettä

välisyöttökytkennällä käyttöveden esilämmittämisessä, jolloin kytkentä on kuvan 2 mukainen. Vanhemmissa rakennuksissa radiaattoriverkon paluulämpötila on korkea, jolloin sen ensiövirtausta kannattaa hyödyntää vielä käyttöveden lämmittämisessä. Uudemmissa rakennuksissa radiaattoriverkot toimivat matalammilla lämpötiloilla, jolloin välisyötön hyöty on vähäisempi.

Kuva 2. Välisyöttökytkentä (Energiateollisuus 2014)

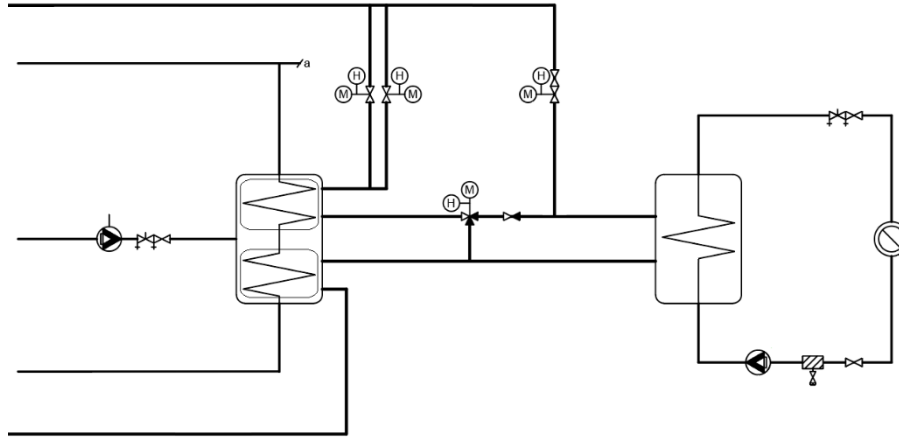


2.1 Väliottokytkentä

HögforsGST on kehittänyt uuden, niin kutsutun väliottokytkennän, jossa käyttövesisiirtimessä jo hyödynnettyä ensiövirtausta voidaan hyödyntää edelleen lämmityssiirtimellä. Tämän jälkeen se palautetaan käyttövesisiirtimelle esilämmittämään käyttövettä kuten normaalissa välisyöttökytkennässäkin. Väliottokytkennästä saadaan suurin hyöty, kun käyttöveden kulutus on nolla ja kun lämmitetään vain käyttöveden kiertoa. Kiertoa pitää lämmittää Legionella-bakteerin torjumiseksi. Legionella-bakteeri voi muodostua ongelmaksi lämpötilan laskiessa alle 50 °C:n (kasvu lämpötila-alueella 20–50 °C). Siksi lämpimän käyttöveden menolämpötilan suositus on 58 °C. Tällä varmistetaan paluulämpötilan pysyvän myös kierron loppupäässä noin 55 °C:ssa.

Väliottokytkennästä on eniten hyötyä lämmityskauden alussa ja lopussa: syksyllä ja keväällä, jolloin lämmityksen tarve on vielä matala ja käyttövesisiirtimessä hieman jäähtynyt vesi riittää vastaamaan hyvin lämmitystarpeeseen. Väliottokytkennällä kaukolämpövesi saadaan jäähtymään viileämmäksi kuin antamalla sen virrata jäähtymättä käyttövesisiirtimen läpi. Kuva 3 esittää väliottokytkentää.

Kuva 3. Väliottokytkenä (Hartman 2020a)

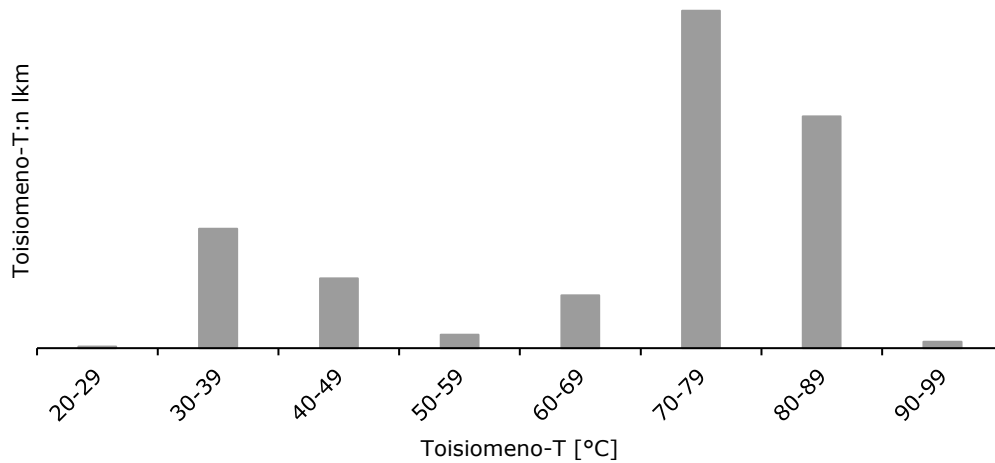


Väliottokytkenässä voidaan ajatella käyttövedellä olevan kaksi lämmönsiirrintä. Yksi lämpimän käyttövesiverkon lämpimänä pitämiseen (yläosa kuvassa) ja toinen kulutuksen korvaavan käyttöveden lämmittämiseen (alaosa). Käyttöveden kulutuksen aikana molemmat siirtimet siirtävät lämpöä käyttöveteen ja kulutuksen laskiessa nollaan on käytössä vain verkkoa lämpimänä pitävä siirrin, jonka jälkeistä kaukolämpövedtä hyödynnetään sen jälkeen lämmityspuolella.

Väliottokytkenästä saatavat hyödyt riippuvat lämmityksen toisiolämpötiloista. Pääsääntöisesti mitä vanhempi rakennus on kyseessä, sitä korkeammat ovat sen toisiolämpötilat, jolloin saatava hyöty on pienempi heikon jäähtymän vuoksi. Radiaattorilämmitteisten uudisrakennusten K1:n mukaiset meno—paluu -toisiolämpötilat ovat 45—30 °C (suositus) ja 60—30 °C (poikkeustapaukset). Olemassa oleville radiaattorilämmitteisille rakennuksille toisiolämpötilat ovat 80—60 °C (ennen 1983) ja 70—40 °C (jälkeen 1983). (Energiateollisuus ry 2014.)

Tässä selvityksessä perehdytään tarkemmin kahteen toisiolämpötilaohjelmaan: 70—40 °C ja 45—30 °C. Toisiolämpötilaohjelma 70—40 °C on yleinen ohjelma olemassa olevissa rakennuksissa ja 45—30 °C on K1:n suositus radiaattorilämmitteisille uudisrakennuksille. Toisiolämpötilaohjelma 45—30 °C on myös lähellä lattialämmityksen lämpötilatasoja, jolloin tulokset ovat vertailukelpoisia myös lattialämmitteisiin rakennuksiin.

Kuva 4 esittää toisiolämpötilojen lukumääriä Espoon kaukolämpöverkossa. Kuvan 80-89 °C -asiakkaat (lämpötila-alue) voi olettaa 80—60 °C -asiakkaiksi, 70-79 taas 70—40 °C -asiakkaiksi ja niin edelleen. Lämpötila-alueena ilmoittaminen johtuu joistain K1:stä poikkeavista mitoituksista. (Hölsä 2020.)



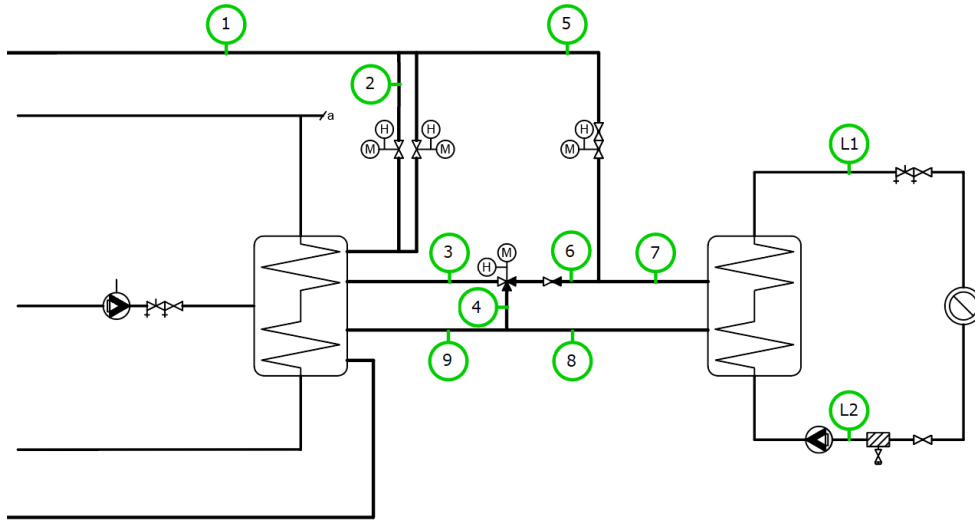
Kuva 4. Espoon kaukolämpöverkon lämmityksen toisiomenolämpötiloja (Hölsä 2020)

Kuvasta 4 nähdään, että toisiomenolämpötilat 70 °C ja 80 °C ovat yleisimmät kyseisessä verkossa. Espoon rakennuskanta on kuitenkin erilainen kuin esimerkiksi Helsingin, missä rakennuskanta on vanhempaa ja yli puolet toisiomenomitoituslämpötiloista on 80 °C (Alen 2020). Uudisrakennusten lämpötilasuositus 45–30 °C sijaitsee keskikohdilla uudempia ja siten matalia lämpötilatasoja. Erityisesti lämmityksen toisiopuolen paluulämpötilalla on merkitystä väliottokytkennän kannalta.

2.2 Laskennallinen hyöty

Väliottokytkennästä saatavan hyödyn määrittämiseksi laskettiin aluksi kaukolämmön paluulämpötila ulkolämpötilan funktiona peruskytkennällä. Jonka jälkeen laskettiin paluulämpötila ulkolämpötilan funktiona väliottokytkennällä. Kuva 5 hahmottaa kaukolämpöveden virtaamaa eri kohdissa lämmönjakokeskusta. Väliottokytkentä sisältää välisyöttökytkennän. Siitä on kuitenkin hyötyä vain silloin kun käyttövedellä on kulutusta – tilanteessa, jota tämä työ ei tarkastele.

Kuva 5. Väliottokytkenän pisteet (Hartman 2020a)



Peruskytkennällä lämpimän käyttöveden kiertoa lämmittävä kaukolämpövesi virtaisi pisteiden 1-2-3-4-9 kautta ja lämmityksen kaukolämpövesi pisteiden 1-5-7-8-9 kautta. Väliotossa kaukolämpövesi kiertää lämmittäen sekä käyttöveden että lämmityksen pisteiden 1-2-3-6-7-8-9 kautta, silloin kun kaiken käyttövesisiirtimeltä palaavan kaukolämpöveden voi hyödyntää lämmityksessä. Välioton lämmön ollessa riittämätön lämmitykseen voidaan pisteen 5 kautta ottaa lisää kuumaa kaukolämpövedettä. Jos lämmityksessä ei ole kulutusta, niin käyttövesisiirtimeltä palaava vesi ohitetaan pisteen 4 kautta. Tämä tilanne on tyyppillinen kesäaikaan, jolloin väliottokytkenä ei poikkea peruskytkennästä. Pisteen 9 jälkeen kaukolämpövedettä on mahdollista hyödyntää vielä kulutuksen korvaavan käyttöveden esilämmittämiseen.

2.2.1 Arvojen määrittäminen

K1:n mukaisesti kaukolämpövesi saapuu asiakkaalle 70–115 °C-asteisena. Vesi on noin 70 °C kun ulkolämpötila on noin 5–10 °C tai sen yli, ja jonka alle ulkolämpötilan laskettua tulolämpötila nousee lineaarisesti ulkolämpötilan mukaan siten, että tulolämpötila on 115 °C kun ulkolämpötila on mitoittavassa ulkolämpötilassa. Eteläisimmässä säävyöhykkeessä I mitoittava ulkolämpötila on -26 °C. Mitoittava ulkolämpötila toteutuu harvoin. Se kuvaa äärimmäisen kylmiä olosuhteita. Esimerkiksi Helsingissä Kaisaniemen sääaseman viimeisen 10 vuoden kylmimmän tunnin ulkolämpötila oli -25,9 °C (Ilmatieteen laitos 2020a).

Lämmönjakokeskuksessa kaukolämpövesi tulisi saada jäähtymään mahdollisimman viileäksi, mutta jäähtymä riippuu voimakkaasti rakennuksen toisiolämpötiloista. Jos käyttövedellä ei ole kulutusta, niin kaukolämpövesi voi jäähtyä parhaimmillaan käyttövesipuolella lämpimän käyttövesiverkon paluulämpötilaan, joka on noin 55 °C. Tässä selvityksessä kaukolämpöveden oletetaan

jäähtyvän yhden asteen päähän tästä lämpötilasta eli 56 °C:een. Jos käyttövedellä on kulutusta, niin kaukolämpövesi on mahdollista saada jäähtymään huomattavasti viileämmäksi, koska kiinteistöön saapuva talousvesi on noin 5–10 °C. Tämä työ ei kuitenkaan tarkastele tämän prosessin vaikutusta kaukolämmön paluulämpötilaan, kuten edellä on mainittu.

Lämmityksessä (radiaattori, lattia tai koneellinen tuloilma) kaukolämpöveden jäähtymä vaihtelee suuresti eri kohteiden välillä. Nyrkkisääntönä vanhat radiaattorilämmitteiset rakennukset toimivat korkeilla lämpötiloilla ja lattialämmitteiset uudisrakennukset matalilla lämpötiloilla, jolloin niiden aiheuttama jäähtymä on eri suuruusluokkaa. Väliottokytkennästä on sitä enemmän hyötyä, mitä matalampi lämmityksen paluulämpötila on. Toisaalta, väliottokytkennästä on hyötyä myös lämpimän käyttövesiverkon lämpöhäviöiden ollessa korkeat. Ne ovat usein korkeat vanhemmissa rakennuksissa heikon eristyksen vuoksi. Väliotosta on siis hyötyä uusissa rakennuksissa lämmityksen matalan lämpötilatason ansiosta ja vanhoissa lämpimän käyttövesiverkon korkeiden lämpöhäviöiden seurauksena.

Laskennan vertailukohtana on kaksi saman kokoluokan kerrostaloa valituilla toisiolämpötiloilla 70–40 °C ja 45–30 °C. Kokoluokan määrittämiseksi käytetään käyttövesilämmönsiirtimen tehoa 200 kW. Tämä vastaa keskikokoisen kerrostalon lämmönjakokeskusta. Tällöin tyypillisesti olemassa olevan rakennuksen lämmityksen lämmönsiirtimen teho asettuu 100 ja 200 kW:n välille ja uudisrakennuksen 30 ja 70 kW:n välille. Täten laskennassa käytetään lämmitystehoina 150 ja 50 kW olemassa olevalle ja uudisrakennukselle.

Lämpimän käyttövesiverkon lämpöhäviöt ovat luokkaa 10 % maksimilämmitystehosta. Suuret lämpöhäviöt johtuvat pääosin eristyksen puutteesta ja siinä missä lämmitystehon tarve on laskenut energiatehokkuuden myötä, myös lämpimän käyttövesiverkon häviöt ovat laskeneet. Olemassa olevalle rakennukselle laskennalliset lämpimän käyttövesiverkon lämpöhäviöt ovat siis 15 kW ja uudisrakennukselle 5 kW.

Lämmityksen toisiolämpötiloina käytetään laskennassa edellä mainittuja radiaattorilämmitteisien rakennuksien lämpötiloja. Kaukolämpöveden oletetaan jäähtyvän lineaarisesti 1–3 °C päähän näistä toisiopuolien paluulämpötiloista. Jäähtymä muuttuu ulkolämpötilan mukaisesti siten, että mitoittavassa ulkolämpötilassa lämpötilaero on 3 °C (K1:n mukainen asteisuus) ja lämmityskauden lopussa 1 °C. Lämmityskauden loppu määritetään ulkolämpötilaan 17 °C. Lämmityskauden lopussa lämmityksen toisiomenolämpötila oletetaan 26–27 °C:een ja paluulämpötila 25 °C:een ja muissa tapauksissa lineaarisesti mitoittavan ulkolämpötilan ja lämmityskauden lopun ulkolämpötilan asettamien arvojen väliin. Taulukkoon 1 on koottu lämmönjakokeskuksen eri pisteiden lämpötilat mitoittavassa ulkolämpötilassa ja lämmityskauden lopuilla (ulkolämpötila 16 °C) valituille toisiolämpötiloille silloin kun käyttövedellä ei ole kulutusta.

Taulukko 1. Lämmönjakokeskuksen lämpötiloja sen eri pisteissä

Toisiolämpötilaohjelma		70-40 °C		45-30 °C	
Piste	Ulkolämpötila	-26 °C	16 °C	-26 °C	16 °C
L1	Toisiolämmitys [°C]	70	27	45	26
L2		40	25	30	25
1	Ei väliottoa [°C]	115	70	115	70
2		115	70	115	70
3		56	56	56	56
4		56	56	56	56
5		115	70	115	70
6		-	-	-	-
7		115	70	115	70
8		43	26	33	26
9		44	54	36	54
1	Väliotto [°C]	115	70	115	70
2		115	70	115	70
3		56	56	56	56
4		56	56	56	56
5		115	70	115	70
6		56	56	56	56
7		108	56	108	56
8		43	26	33	26
9		43	53	33	53

Lämpötilat eri pisteissä on laskettu massa- ja energiataseiden ja kaavan 1 avulla.

$$Q' = c_p m' \Delta T \quad (1)$$

missä Q' on lämpöteho [W]

c_p on veden ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]

m' on veden massavirta [kg/s]

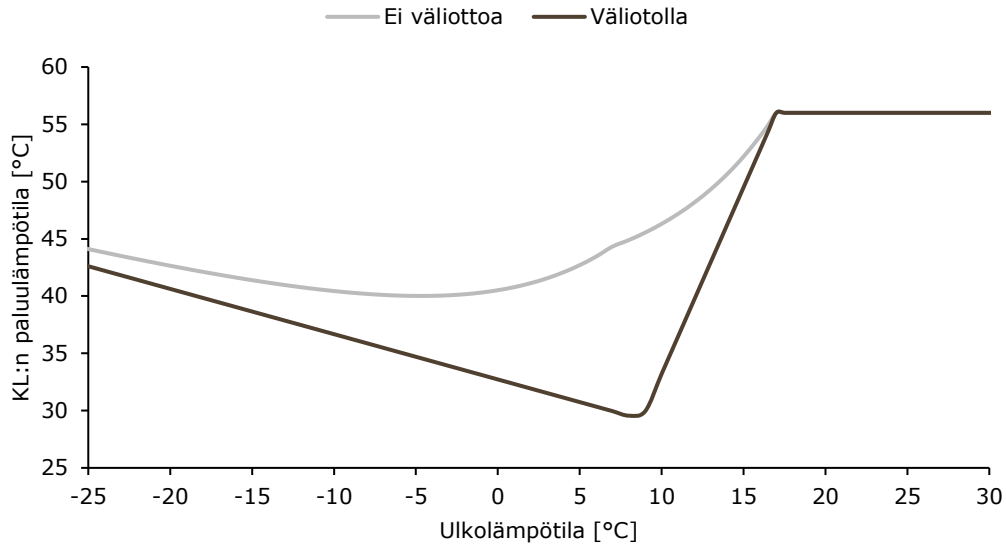
ΔT on lämpötilaero ensiöpuolen tulo- ja paluulämpötilan välillä [K]

Laskennassa on käytetty veden ominaislämpökapasiteetin arvona 4,17 kJ/kgK. Huomion arvoista on myös se, etteivät lineaariset säätökäyrät kuvaa täysin tarkasti todellisuutta.

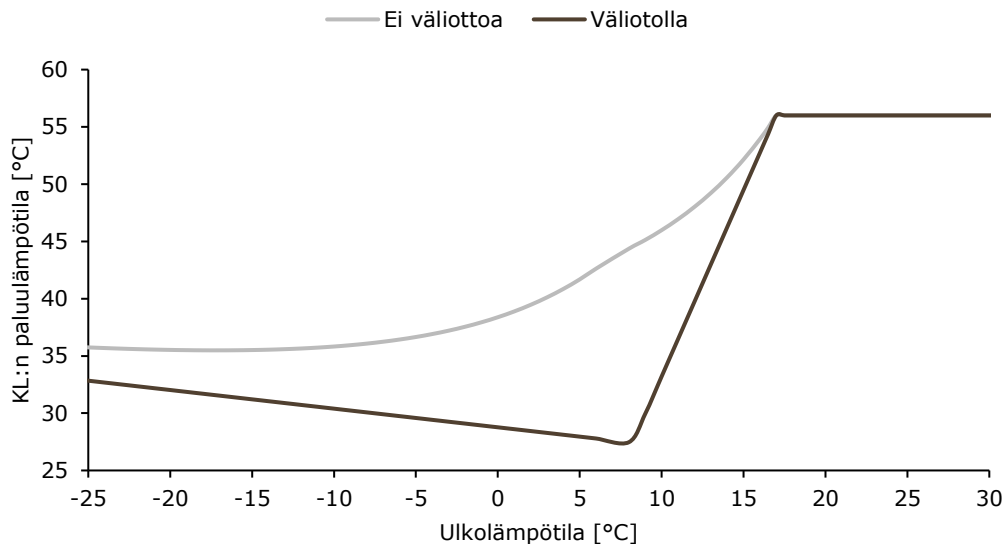
2.2.2 Laskennan tulokset

Samaa laskentatapaa käyttäen voidaan laskea väliottokytkennän jäähtymän ero peruskytkentään mille tahansa ulkolämpötilalle. Kuvat 6 ja 7 kuvaavat eri kytkentöjen kaukolämmön paluulämpötiloja toisiolämpötiloilla 70–40 °C ja 45–30 °C ulkolämpötilan funktiona.

Kuva 6. Kaukolämmön paluulämpötila ilman ja välioton kanssa 70–40 °C -rakennukselle



Kuva 7. Kaukolämmön paluulämpötila ilman ja välioton kanssa 45–30 °C -rakennukselle



Laskennallisesti väliottokytkennän hyöty on suurimmillaan peruskytkentään verrattuna ulkolämpötilan ollessa noin 8–9 °C, jos lämpimän käyttövesiverkon

lämpöhäviöt ovat 10 % lämmitystehosta. Tällöin laskennallinen jäähtymä on noin 16–17 °C parempi kuin ilman väliottoa toisiolämpötiloista riippumatta.

Mitä suuremmat käyttövesikierron lämpöhäviöt ovat suhteessa lämmitystehoon, sitä alhaisemmille ulkolämpötiloille väliottokytkennän maksimihyöty sijoittuu. Kuvista voi nähdä, että lämmityksen toisiopuolen paluulämpötilalla on suuri vaikutus siihen, kuinka viileäksi kaukolämpövesi voidaan saada jäähtymään. Kun käyttövedellä on kulutusta, niin kaukolämpövesi voidaan saada jäähtymään hetkellisesti viileämmäksi.

Vuoden yli tarkasteltuna toisiolämpötiloilla 70–40 °C väliottokytkennän jäähtymä on keskimäärin 7,3 °C parempi kuin ilman kytkentää ja toisiolämpötiloilla 45–30 °C se on 8,3 °C parempi silloin kun käyttövedellä ei ole kulutusta. Lämmityskauden yli vastaavat luvut ovat 8,3 °C ja 9,5 °C. Laskentaan on käytetty Ilmatieteen laitoksen energialaskennan testivuotta vyöhykkeissä I ja II eli eteläisessä Suomessa (Ilmatieteen laitos 2020b). Testivuodessa on eniten tunteja 1 °C tuntumassa vyöhykkeissä I ja II, jolloin väliottokytkennän hyöty on noin 9 °C kun käyttövedellä ei ole kulutusta.

Lähes 10 °C:lla paraneva jäähtymä lämmityskaudella olisi varsin merkittävä koko kaukolämpöjärjestelmän kannattavuudelle. Tietysti tämä edellyttää, että kaikki kaukolämpöverkon lämmönjakokeskukset olisivat väliotollisia. Aluksi kaukolämpöyhtiön kannattaisikin kiinnittää huomiota suuriin asiakkaisiin. Jäähtymän vaikutuksesta kaukolämpöjärjestelmälle lisää luvussa 3.

Erottelemalla käyttöveden lämmitysprosessi käytännössä kahdelle lämmönsiirtimelle voidaan eliminoida välisyöttökytkennälle ominainen ongelma uudisrakennuksissa, jolloin lämmitykseltä palaava, käyttöveden esilämmittämiseen tarkoitettu, kaukolämpövesi alkaa lämmitä lämpimän käyttövesikierron virralla. Väliottokytkennällisessä keskuksessa tämä on huomioitu siirtämällä käyttöveden kierron ja lämmityksen kaukolämmön paluun yhteet eri puolille käyttöveden lämmönsiirrintä, jolloin tämän ei-toivotun ilmiön vaikutus on vähäisempi. Väliotossa optimoidaan myös käyttövesisiirtimen levyjako perinteisen 50/50% -jaon sijaan, jolloin ylimitoituksen ja siten tarpeettoman kustannusten kasvun vaara on vähäisempi. (Hartman 2020b.)

2.3 Lämmönjakokeskus ja paluulämpötila tulevaisuudessa

Gadd ja Werner ovat tutkineet lämmönjakokeskusten toimintaa Ruotsissa ja tunnistaneet joukosta heikosti toimivien, ja siten huonosti jäähdyttävien, lämmönjakokeskusten määrää kahdessa kaukolämpöverkossa Helsingborgissa ja Ängelholmossa. Tutkituista 135 keskuksista lähes 70 %:n katsottiin jäähdyttävän heikosti (lämpötilaero alle 46 °C). Tilanteen voi olettaa olevan samankaltainen suomalaisissa kaukolämpöverkoissa. Tunnistamalla heikosti toimivat keskukset ja puuttamalla niiden toimintaan voidaan saada koko kaukolämpöjärjestelmä toimimaan optimaalisemmin. (Gadd ja Werner 2014.)

Lämmönjakokeskuksien uusinnan myötä jäähtymä paranee usean tekijän ansiosta. Uudet keskuksat mitaavat ja säätävät tarkemmin, ja siten ne säätävät paremmin vaihteleviin olosuhteisiin. Keskuksia on myös mahdollista etäohjata, jolloin kynnyks säätää yksittäisiä keskuksia laskee. Vanhassa toimintamallissa "hälytys" on tullut asiakkaalta, vasta kun keskuksen heikko toiminta on alkanut vaikuttaa asumismukavuuteen. Osa uusista keskuksista etähälyttää, jolloin poikkeuksiin on helppo reagoida ajoissa. Usein myös uusinnan yhteydessä asiakkaiden toisiopuoleen kiinnitetään huomiota, jolloin esimerkiksi radiaattori-verkko ja lämmönjakokeskus saadaan toimimaan paremmin yhdessä. Uusi lämmönjakokeskus myös toimii todennäköisesti lähempänä sen suunnitteluarvoja, mikä edelleen parantaa säädettävyyttä.

Lisäksi, lämmönjakokeskuksen asteisuus (lämmityksen ensiö- ja toisiopuolien paluulämpötilojen ero) laskee lähes poikkeuksetta uusinnan yhteydessä K1:n vanhemmasta suosituksesta 5 °C:sta uudempaan 3 °C:een, jonka seurauksena jäähtymä paranee myös lämmityskaudelle tyypillisissä olosuhteissa. Asteisuuden voi myös "ylimitoittaa" esimerkiksi 1 °C:lle, joka edelleen parantaa jäähtymää. Kaukolämmön tulomitoituslämpötilan voi ennustaa laskevan tulevaisuudessa ja ylimitoittamalla asteisuuden voi varmistaa lämmönjakokeskuksen toiminnan myös jatkossa, vaikka tulomitoituslämpötila laskisikin. Lämmityksen lämmönsiirrin tulomitoituslämpötilalla 115 °C ja asteisuudella 1 °C vastaa pyöreästi siirrintä tulomitoituslämpötilalla 90 °C ja asteisuudella 3 °C.

Lämmönjakokeskuksia olisi hyvä seurata proaktiivisesti ja säätää tarvittaessa. Nykyinen reaktiivinen ja passiivinen toimintamalli, jossa asiakasta ei kannusteta seuraamaan lämmitysjärjestelmänsä toimintaa ei ole optimaalinen. Ratkaisuna tähän voisi olla siirtää lämmönjakokeskuksen omistajuutta ja/tai opeointivastuuta kaukolämpöyhtiölle tai jollekin muulle kolmannelle osapuolelle, jolla olisi ymmärrystä tekniikasta ja halua optimoida kaukolämpöjärjestelmää. Tällöin keskus ei unohtuisi toimimaan samoilla säädöillä vuosiksi käyttöönoton jälkeen.

Väliottokytkennän lisääminen luonnollisen laiteuusintasyklin seurauksena saataviin hyötyihin nopeuttaisi entisestään paluulämpötilan laskua, joka edelleen parantaisi kaukolämmön monipuolisuutta, ympäristöystävällisyyttä ja kannattavuutta.

3 Paluulämpötilan vaikutus kaukolämpöön

Kaukolämmön paluulämpötilalla on suuri merkitys sekä lämmön tuotannolle että sen jakelulle. Tuotannon hyötysuhde voi olla riippuvainen paluulämpötilasta. Mitä viileämpää paluuvesi on, sitä paremmin se pystyy ottamaan lämpöä talteen mistä tahansa lämmönlähteestä. Oli kyseessä sitten nopeasti biokattiloissa yleistyvät savukaasujen lämmön talteenotto (LTO) -tekniikat tai todennäköisesti tulevaisuudessa yleistyvät matalalämpöiset lämmönlähteet. Myös verkon lämpöhäviöt ja pumppauksen painehäviöt laskevat paluulämpötilan laskevissa.

Selkeyden vuoksi jäähtymän paranema on vakioitu 6 °C:een seuraavien alalukujen laskennassa. Oletuksen taustalla on arvio väliottokytken 8 °C:n paremmasta jäähtymästä vuoden yli tarkasteltuna ja arvio 18 tunnista vuorokaudessa, kun käyttövedelle ei ole kulutusta (75 %).

3.1 Verkon lämpöhäviöt

Lämpöhäviöiden muutoksen arvioimiseksi paluulämpötilan funktiona voidaan käyttää seuraavaa kaavaa 2 (Koskelainen ym. 2006).

$$Q'_h = 2(K_1 - K_2) \left[\frac{T_m + T_p}{2} - T_g \right] \quad (2)$$

missä Q'_h on lämpöhäviö [W]

K on lämmönläpäisyluvut kaukolämpöputkille [W/K]

T_m on verkon menolämpötila [K]

T_p on verkon paluulämpötila [K]

T_g on maaperän lämpötila [K]

Koska vain paluulämpötila muuttuu ja muut arvot voidaan vakioida, saadaan uusien ja vanhojen lämpötilaerojen aiheuttamien lämpöhäviöiden suhteeksi seuraava kaava 3.

$$\frac{Q'_{h,u}}{Q'_{h,v}} = \frac{T_{m,u} + T_{p,u} - 2T_{g,u}}{T_{m,v} + T_{p,v} - 2T_{g,v}} \quad (3)$$

missä $Q'_{h,u}$ on uusien lämpöhäviöiden suhteellinen osuus

$Q'_{h,v}$ on vanhojen lämpöhäviöiden suhteellinen osuus jne.

Kaavan perusteella verkon lämpöhäviöt laskisivat noin 5 % paluulämpötilan laskiessa esimerkiksi 50 °C:sta 44 °C:een menolämpötilan ollessa 80 °C ja maaperän lämpötilan ollessa 6 °C. Jos verkon lämpöhäviöt ovat noin 10 %

tuotetusta lämmöstä, niin tällöin tuotannon polttoaineenkulutus lämmön tuotannossa laskisi noin 0,5 % verkon paluulämpötilan laskiessa 6 °C.

3.2 Verkon pumppaus

Tarvittava vesivirta laskee, kun asiakkaan jäähtymä paranee. Asiakkaille toimitetaan sama energiamäärä samalla teholla, mutta virtaus laskee lämpötilaeron kasvaessa lämmönjakokeskuksen yli aikaisemman kaavan 1 mukaisesti. Sen mukaisesti veden massavirta asiakkaalle laskee 17 %, jos lämpötilaero lämmönjakokeskuksen yli kasvaa 6 °C:lla paluulämpötilan laskiessa 50 °C:sta 44 °C:een.

Pumppauksen tilavuusvirta, massavirta, pyörimisnopeus, nostokorkeus, paineero ja tarvittava sähköteho riippuvat affiniteettisäännöistä. Tehon tarve muun muassa kasvaa massavirran suhteen kuutioon kaavan 4 mukaisesti.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{m'_1}{m'_2}\right)^3 \quad (4)$$

missä P on sähköteho [W]

Jolloin jäähtymän parantuessa 6 °C pumppauksen sähkötehon tarve laskee 42 %. Kaukolämmössä pumppausenergian osuus lämmön hankinnasta oli 0,70 % vuonna 2017 pumppausenergian ilmoittaneissa yhtiöissä (Energiateollisuus 2018). On hyvä huomioida, että pumppujen kuluttama sähkö muuttuu lämmöksi, eikä se siis mene hukkaan. Sähkö on kuitenkin kaukolämpöyhtiölle polttoainetta arvokkaampaa. Jos referenssiksi otetaan polttoaineen hinnaksi 20 €/MWh ja sähkön hinnaksi voimalaitoksella 40 €/MWh, niin säästöä muodostuu 20 €/MWh lämpöä, joka on tehty pumppujen kuluttaman sähkön sijaan polttoaineella, jolloin järjestelmän kannattavuus paranee noin 0,2 %:lla.

Kaukolämpöverkon välityskapasiteetin kannalta pumpattavan massavirran lasku on myös olennaista – paluulämpötilan laskun ansiosta voidaan välttää merkittäviäkin verkosto- ja pumppaamoinvestointeja.

3.3 Savukaasujen lämmön talteenotto

Savukaasuista on mahdollista ottaa lämpöä talteen myös happokastepistettä matalammilla lämpötiloilla (<150 °C), jos savukaasut käsitellään savukaasupesurissa savukanavien materiaaleille vaarattomiksi tai savukanavat ovat korroosionkestävää materiaalia. Savukaasupesureista käytetään myös nimitystä savukaasulauhdutin, koska ”pestyt” savukaasut lauhdutetaan ottaen niistä latenttilämpö talteen.

Pudottamalla kaukolämpöverkon paluulämpötilaa savukaasuista saadaan ennistä enemmän lämpöä talteen. Jotta savukaasut lauhtuvat, on niiden ympäristön lämpötilan oltava alle kastepisteen, jota paluulämpötila epäsuorasti

jäähdyttää. Kastepiste riippuu voimakkaasti savukaasujen sisältämän vesihöyryn määrästä. Mitä enemmän savukaasuissa on kosteutta, niin sitä korkeammalla lämpötilalla ne lauhtuvat. Savukaasujen vesihöyryn osuus määräytyy polttoaineen ja palamisilman kosteuden mukaan. Pesurin lämmön talteenottoa voi tehostaa esimerkiksi palamisilman kostuttimella. Taulukosta 2 voi nähdä savukaasujen kylläisen lämpötilan polttoaineen kosteusprosentin mukaan ilman palamisilman kostutusta (Hakulinen 2010).

Taulukko 2. Savukaasujen kylläinen lämpötila (Hakulinen 2010)

Polttoaineen kosteus [%]	Kylläinen lämpötila [°C]
60	68,4
50	64,0
40	60,0

Joissain tapauksissa paluuv veden lämpötilan lasku saattaa mahdollistaa savukaasujen lauhtuttamisen ja siten lämmön talteenoton niistä. Kuten mainittua, kuivaan savukaasuun on mahdollista myös lisätä kosteutta, jotta siitä saadaan tehokkaasti lämpöä talteen. Pesurin tehon osuuden arvioinnissa kattilatehosta voidaan käyttää seuraavaa korrelaatiokaavaa 5.

$$Q'_{p\%} = 0,848 \mu - 0,0106 T_p + 0,297 \quad (5)$$

missä $Q'_{p\%}$ on pesurin tehon osuus kattilatehosta

μ on kosteuden osuus polttoaineen massasta

Kaavan perusteella paluulämpötilan laskiessa 50 °C:sta 44 °C:een ja polttoaineen kosteuden ollessa 50 %, pesurin tehon osuus kattilatehosta kasvaa noin 6 %. Tällöin pesurin tehon osuus kattilatehosta nousee noin viidesosasta neljäsosaan ja polttoaineenkulutus laskee sen seurauksena noin 5 %, kun aikaisempi lämmön tuotannon yhdistetty hyötysuhde on ollut 100 %. Tarkemmissa laskelmissa tulisi ottaa huomioon myös esimerkiksi kattilateho, palamisilman kosteus, polttoainejakeiden osuudet ja savukaasujen lämpötila ennen pesuria.

Kosteita puuperäisiä polttoaineita saadaan esimerkiksi metsäteollisuuden sivuvirroista, joista on mahdollista ottaa lämpöä talteen entistä enemmän LTO-tekniikan avulla. Tällöin myös paluulämpötilan merkitys korostuu.

3.4 Sähkön tuotannon osuus yhteistuotannosta

Voimalaitoksen rakennusastetta on mahdollista nostaa, jos verkon paluulämpötila laskee. Rakennusasteella tarkoitetaan sähkön osuutta sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Kaukolämmön kysynnän pysyessä vakiona, sähkön

tuotannon kasvatus kasvattaisi polttoaineenkulutusta. Tämänhetkisillä sähkön ja polttoaineiden hinnoilla ei välttämättä kannata siirtää lämmön tuotantoa pois pääkattilalta, jos se tarkoittaisi lämmön tuotannon siirtymistä apukattiloille.

Rakennusastetta voi nostaa väliotollisella turbiinilla. Väliottoturbiinissa on vähintään kaksi kaukolämmön lämmönsiirrintä: vastapainesiirrin turbiinin loppupäässä esilämmittää kaukolämpöveden, jonka jälkeen väliottosiirrin lämmittää kaukolämpöveden haluttuun menolämpötilaan väliottohöyryllä. Verkon paluulämpötilan laskiessa kaukolämpökuormaa voidaan siirtää väliottosiirtimeltä vastapainesiirtimelle, joka edelleen kasvattaa sähkön tuotannon osuutta, koska turbiinin perään virtaavan vastapainehöyryn osuus kokonaishöyryvirrasta kasvaa. Höyry myös jäähtyy viileämmäksi matalan paluulämpötilan avulla. Höyryä ei kuitenkaan saa päästää lauhtumaan liikaa, jonka seurauksena se voisi olla vahingollista turbiinille.

Pöyryn 2010 selvityksen mukaan sähkötehon lisäys on noin 0,1 % laskettua paluulämpötila-astetta kohti (Hakulinen 2010). Samassa selvityksessä on tutkittu myös yhteistuotannon ja LTO:n yhteistoimintaa paluulämpötilan laskiessa.

3.5 Uudet lämmönlähteet ja lämpöpumput

Kaukolämmön tuotanto painottuu Suomessa polttotekniikkaan. Jos tulevaisuudessa halutaan käyttää muitakin tuotantotekniikoita, niin kaukolämpöverkon lämpötilatason merkitys korostuu. Matalalla paluulämpötilalla voi ottaa erityisesti matalalämpötilaisista lämmönlähteistä paremmin lämpöä talteen. Esimerkiksi teollisuuden hukkalämmön lämpötila voi olla tasolla, jolloin se ei nykyisellään riitä vastaamaan kaukolämmön lämpötilatasoon, mutta laskemalla paluulämpötilaa, hukkalämpöä voisi alkaa hyödyntämään kaukolämmössä myös ilman lämpöpumppua.

Hukkalämpöjen lisäksi esimerkiksi myös geotermisen lämmön siirto tehostuu paluulämpötilan laskiessa. Jos samalla voitaisiin laskea menolämpötilaa, niin lämpökaivoa ei tarvitsisi porata yhtä syväälle kuin korkealla menolämpötilalla, joka edelleen parantaisi kyseisen tuotantomuodon kannattavuutta. Vastaavia vaikutuksia nähtäisiin myös esimerkiksi aurinkokaukolämmön kanssa.

Lämpöpumpun hyötysuhde paranee, kun sen tuottaman lämmön lämpötilataso lähestyy lämmönlähteen lämpötilatasoa. Paluulämpötila on osa tätä yhtälöä. Lämpöpumpun hyötysuhdekertoimen (Coefficient of Performance, COP) kannalta kaukolämmön menolämpötilan lasku on tärkeää. Tyypillisesti lämpöpumppu on edullista kytkeä sarjaan muun lämmön tuotannon kanssa siten, ettei pumpun tarvitse tuottaa verkon korkeaa menolämpötilaa (esilämmitys). Ideaalitapauksessa tulevaisuudessa lasketaan sekä meno- että paluulämpötilaa kaukolämmössä. Menolämpötilan lasku vaatii tosin lämmönjakokeskusten mitoituslämpötilan alentamisen. Ja jotta koko kaukolämpöverkossa voitaisiin laskea menolämpötilaa pysyvästi, niin vähintään kaikkien lämmönjakokeskusten

toimivuus tulee varmistaa matalammalla menolämpötilalla. Asiaa on selvitetty tarkemmin AFRYn aikaisemmassa selvityksessä (Laitinen 2020).

3.6 Lämmön varastointi

Kaukolämpöä varastoidaan kaukolämpöakkuihin, joiden kapasiteetti perustuu niiden tilavuuden lisäksi verkon meno- ja paluulämpötilan eroon. Mitä suurempi lämpötilaero, sitä enemmän akkuun voi varastoida lämpöä. Akun lataus- ja purkuteho ovat myös suoraan verrannollisia lämpötilaeroon. Paluulämpötilan laskiessa 50 °C:sta 44 °C:een akun kapasiteetti, purku- ja lataustehot kasvavat 17 %. Aivan kuten verkon pumppauksenkin tapauksessa (kaava 1). Tämä vähentää akun tilavuuden tarvetta, joka edelleen laskee sen investointikustannusta, joka on luokkaa 300 €/m³ (Guelpa ja Verda).

3.7 Kokonaishyöty

Tämän selvityksen perusteella verkon lämpöhäviöiden, pumppauksen ja tuotannon LTO:n tehostumisen ansiosta paluulämpötilan laskiessa 6 °C tuotannon yhteenlaskettu laskennallinen tehostuminen on noin 6 %. Kaukolämpöjärjestelmä on voimakkaasti sidoksissa sen toimintalämpötiloihin. Paluulämpötilan lasku parantaa kaukolämpöjärjestelmän hyötysuhdetta. Tarkat arvot ovat kuitenkin järjestelmäkohtaisia ja ne tulisikin laskea järjestelmäkohtaisesti.

Lämmönjakokeskuksen laiteusintasykli on pitkä, kun keskuksen tekninen käyttöikä voi olla yli 20 vuotta. Näin laiteusinnoilla saavutettava jäähtymäparanema koko kaukolämpöjärjestelmän kannalta kehittyy hitaasti. Hyvän jäähtymän tuomat edut menevät kaukolämpöyhtiöille, jonka takia heidän olisikin hyvä miettiä tapoja kannustaa asiakkaita energiatehokkuuden lisäksi tehokkaaseen kaukolämpöveden jäähdytykseen. Jotkin kaukolämpöyhtiöt ovatkin ottaneet käyttöön jäähtymähyvityksen, joka palkitsee asiakkaan hyvästä jäähtymästä. Yleisesti käytetty kaukolämmön hinnoittelumalli, joka muodostuu energia- ja tehomaksusta (perusmaksu), voi sellaisenaan huomioida jäähtymän kuitenkin heikosti. Käytännössä lämmitysenergiaa kuluu rakennuksen lämmittämiseen saman verran ja liitântätehokin pysyy käytännössä samana lämmönjakokeskuksen varustelutasosta huolimatta. Jos tehomaksun perusteena on vesivirta, niin maksu voi laskea jäähtymän parantuessa, mutta sen referenssinä voi toimia ajanhetki, jolloin lämmön kulutus on suurimmillaan, joka taas vastaa heikosti normaalia tilannetta lämmityskaudella. Siis esimerkiksi silloin, kun väliotosta olisi hyötyä, jolloin alennus ei ole verrattavissa jäähtymään. Väliotto-kytkentä vähentää vesivirtaa vähintään noin 2 % (mitoitettavassa ulkolämpötilassa) 70–40 °C -asiakkaalle. Tämä vastaa neljän vesivirtaa maksuperusteena käyttävän kaukolämpöyhtiön hinnoittelun mukaisesti noin 100 euron säästöjä vuodessa asiakkaalle, jonka sopimusteho on luokkaa 200 kW (Helen 2020, Oulun Energia 2020, Lahti Energia 2020 ja Keravan Energia 2020). Jos vesivirta lasketaan toteuman perusteella, niin säästö voi olla satoja euroja vuodessa.

4 Yhteenveto

HögforsGST on toimittamassa väliottokytkenällisiä lämmönjakokeskuksia asiakkailleen lämmityskaudelle 2020–2021. Konseptin toimivuutta on testattu HögforsGST:n tehtaalla, mutta todellisen maailman tuloksia aletaan saada siis loppuvuodesta 2020. Teoriassa väliottokytkentä ei ole monimutkainen, jolloin sen voi ennustaa nostavan lämmönjakokeskuksen hintaa vain kohtuullisesti. HögforsGST on antanut arvion noin 10 %:n hinnan noususta välioton lisäämisestä keskuksiin, joissa on jo valmiiksi väliottokytkentää tukevaa tekniikkaa (anturit, edistynyt ohjauskeskus, tekoäly, tietotekniikkayhteys, etäohjaus- ja -seuranta). (Hartman 2020c.)

Väliottokytkenän jäähtymä on parhaimmillaan laskennallisesti 16–17 °C:sta parempi kuin peruskytkenän jäähtymä. Eniten kytkennästä on hyötyä lämmityskauden alussa ja lopussa. Vuoden yli tarkasteltuna hyöty on laskennallisesti noin 8 °C silloin kun käyttövedellä ei ole kulutusta. Vanhemmissa rakennuksissa kytkennän hyöty saadaan korkeiden lämpimän käyttövesiverkon lämpöhäviöiden ansiosta ja uudemmissa rakennuksissa lämmityksen matalien toisiopuolen paluulämpötilojen ansiosta. Yhdistämällä väliottokytkentä lämmönjakokeskusten muuhun kehitykseen ja uusiin mitoituslämpötiloihin jäähtymän voi arvioida paranevan noin 10 °C:sta vuoden yli tarkasteltuna uusituissa kohteissa.

Jäähtymän rooli on iso kaukolämpöjärjestelmälle – oli kyseessä sitten perinteinen yhteistuotantomalli tai jotain hajautetumpaa. Siksi jäähtymää kannattaa seurata ja yrittää parantaa sitä eri tavoin. Tulevaisuudessa lämpötilatasojen merkitys kaukolämmössä tulee entisestään korostumaan. Kun nykyinen kaukolämpöjärjestelmä muuttuu entistä energiatehokkaammaksi ja uudet lämmönlähteet tulevat yhteensopiviksi sen kanssa, niin tämä kehitys tulee syrjäyttämään lämmön tuotannosta ensisijaisesti fossiilisia polttoaineita ja turvetta. Muutoksen vauhdittamiseksi tarvitaan kuitenkin uusia ratkaisuja. Väliottokytkentä on osa tätä kehityssuuntaa.

Lähdeluettelo

Alen, M. 2020. Tekninen asiakaspalvelu päällikkö. Helsinki: Helen Oy. Sähköpostikeskustelu 16.3.2020.

Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. 2020b. [Verkkoaineisto]. Helsinki: Ilmatieteen laitos. [Viitattu 15.7.2020]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>.

Gadd, H. & Werner, S. 2014. Fault detection in district heating substations. Helsingborg ja Halmstad, Ruotsi.

Guelpa, E & Verda, V. 2019. Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review. Torino, Italia.

Hakulinen, A. 2010. Kaukolämpöjärjestelmän paluuveden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä. Vantaa: Pöyry Finland Oy.

Hartman, A. 2020a-c. Toimitusjohtaja. Leppävirta: HögforsGST Oy. Sähköpostikeskustelut 30.6.2020—10.8.2020.

Havaintojen lataus. 2020a. [Verkkoaineisto]. Helsinki: Ilmatieteen laitos. [Viitattu 27.7.2020]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>.

Hölsä, A. 2020. Tekninen palvelupäällikkö. Espoo: Fortum Power and Heat Oy. Sähköpostikeskustelu 16.3.2020.

K1/2013. 2014. Rakennusten kaukolämmitys – Määräykset ja ohjeet. Helsinki: Energiateollisuus ry. 92 s. ISBN 978-952-5615-42-5.

Kaukolämmön energia- ja vesivirtamaksut 1.5.2020 alkaen. 2020. [Verkkoaineisto]. Helsinki: Helen Oy. [Viitattu 13.8.2020]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/globalassets/hinnastot-ja-sopimusehdot/lampo-ja-jaahdytys/kotitaloudet/kaukolammon-energia-ja-vesivirtamaksut-01052020.pdf>.

Kaukolämmön käyttötaloudelliset tunnusluvut 2017. 2018. Helsinki: Energiateollisuus ry. 26 s.

Kaukolämpöhinnasto. 2020. [Verkkoaineisto]. Kerava: Keravan Energia Oy. [Viitattu 13.8.2020]. Saatavissa: https://www.keravanenergia.fi/application/files/5815/4359/5313/kaukolampo_hinnasto_kerava_LVV_010119_alv24.pdf.

Koskelainen, L., Saarela, R. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus ry. 566 s. ISBN 952-5615-08-1.

Laitinen, J. 2020. Kaukolämpöasiakkaiden mitoituuslämpötilan laskeminen. Vantaa: AFRY Finland Oy.

Laskentakaavat. 2020. [Verkkoaineisto]. Oulu: Oulun Energia Oy. [Viitattu 13.8.2020]. Saatavissa: <https://www.ouluenergia.fi/lampo/kaukolampo/hinnasto/kaukolammon-energia-ja-perusmaksut/laskentakaavat>.

Lämpömaksuhinnasto. 2020. [Verkkoaineisto]. Lahti: Lahti Energia Oy. [Viitattu 13.8.2020]. Saatavissa: <https://www.lahtienergia.fi/fi/lampo/hinnastot-sopimusehdot/kaukolammon-hinnat>.