

Kaukolämmön menolämpötilan optimointi

Raportti 2021



Energiateollisuus

Kaukolämpö

**Kaukolämmön menolämpötilan optimointi
Raportti 2021**

Energiateollisuus ry Kaukolämpö

Tämä raportti kannustaa selvittämään ja käyttämään verkkokohtaista optimoitua ajotapaa, jossa optimoidaan kaukolämpöjärjestelmän menoveden lämpötilaa. Paikallinen kokonaisuus on aina otettava huomioon, mutta järjestelmän monimutkaisuudesta huolimatta, noudattamalla tiettyjä peruseriaatteita, voidaan verkkokohtaista optimia tavoitella jo verrattain yksinkertaisin toimin. Tärkeintä on koko ajan ymmärtää optimoitavan verkon toiminta, reunaehdot ja rajoitteet – optimoinnissa tulisikin edetä järjestelmällisesti pienin muutoksin kohti optimoitua verkon ajotapaa, varmistaen koko ajan asiakkaan häiriötön ja laadukas lämmöntoimitus.

Tämä raportti perustuu diplomityöhön (*Lauri Laaksonen, Kaukolämmön menoveden lämpötilan taloudellinen optimointi, 2018*), jossa tutkittiin kaukolämpöveden menolämpötilan optimointia Pöyry Finland Oy:n ja Energiateollisuus ry:n toimeksiannosta.

Työryhmä:

Sami Rantio / Loimua Oy
Eetu Järvenpää / Rauman Energia Oy
Harri Muukkonen / AFRY Finland Oy
Harri Hillamo / Energiateollisuus ry (sihteeri)

Lämmönjakelutoimikunta:

Sami Rantio / Loimua Oy (puheenjohtaja)
Juhani Aaltonen / Helen Oy
Marko Pajunen / Tampereen Sähkölaitos Oy
Eetu Järvenpää / Rauman Energia Oy
Pekka Lång / Kuopion Energia Oy
Sanna Perttunen / Turku Energia Oy
Heikki Ojansuu / Vantaan Energia Oy
Mikko Lampinen / Kotkan Energia Oy
Petri Flyktman / Alva yhtiöt Oy
Harri Mäki-Saari / Lahti Energia Oy
Harri Muukkonen / AFRY Finland Oy
Harri Hillamo / Energiateollisuus ry (sihteeri)

SISÄLLYS

1	Raportin tausta ja tavoitteet	5
2	Menolämpötilan optimointi	6
2.1	<i>Menolämpötilan säätökäyrä</i>	6
3	Menolämpötilan optimointi	7
3.1	<i>Menolämpötilan optimin määrittäminen verkostomallilla</i>	7
3.2	<i>Menolämpötilan optimin määrittäminen ilman verkostomallia</i>	7
4	Menolämpötilan vaikutukset	8
4.1	<i>Muuttuva lämmön tuotantokustannus</i>	8
4.2	<i>Menolämpötilan vaikutus paluulämpötilaan</i>	8
4.3	<i>Menolämpötilan vaikutus pumppaukseen</i>	8
4.4	<i>Menolämpötilan vaikutus verkoston lämpöhäviöihin</i>	9
4.5	<i>Menolämpötilan vaikutus savukaasupesurin tuotantoon</i>	10
4.6	<i>Menolämpötilan vaikutus vastapainesähkötuotantoon (CHP)</i>	10
5	Asiakkaan huomioiminen menolämpötilaa optimoidessa	10
6	Verkon haastekohtien ja kriittisten asiakkaiden tunnistaminen	12
7	Menolämpötilan säätötavat	14
7.1	<i>Menolämpötila kaukolämpökuorman funktiona</i>	14
7.2	<i>Lämmön varaaminen kaukolämpöverkkoon</i>	15
7.3	<i>Tuotantoennusteen luominen usean muuttujan avulla</i>	16
7.4	<i>Kelluva menolämpötilan säätö</i>	17
8	Yhteenveto	21

1 Raportin tausta ja tavoitteet

Tämä raportti kannustaa selvittämään verkkokohtaista optimaalista kaukolämmön jakelun ajotapaa. Optimoinnin tarkoitus on parantaa tuotannon ja jakelun kokonaisuutta, vähentää päästöjä sekä taata laadukasta ja kustannustehokasta lämmitystä asiakkaille. Tässä julkaisussa käsitellään peruseriaatteet kaukolämmön menoveden lämpötilan optimoinnista – esimerkein ja ohjein. Optimointi ja jakelun kehittäminen tulee tehdä asiakkaiden lämmöntoimituksen ja -jakelun laadun ehdoilla.

Optimoitava kaukolämpöjärjestelmä on kokonaisuutena erittäin monimutkainen ja optimointi sisältää riippuvuuksia lämmön tuotannosta ja -jakelusta asiakkaiden talotekniikkaan. Tuotannon ja asiakkaan yhdistävä kaukolämpöverkko on pääsääntöisesti mitoitettu siirtämään tarvittava teho muuttuvan lämmitystarpeen mukaan. Verkkoa ei ole varsinaisesti suunniteltu optimointiin, mutta järjestelmä sisältää luonnostaan jonkin verran joustoa. Tässä raportissa esitetään peruseriaatteita, joilla voidaan tavoitella verkkokohtaista optimia jo verrattain yksinkertaisin toimin. Tärkeintä on koko ajan ymmärtää optimoitavan verkon toiminta, reunaehdot ja rajoitteet – optimoinnissa tulee edetä järjestelmällisesti pienin muutoksin kohti optimoitua verkon ajotapaa varmistuen asiakkaan häiriötön lämmöntoimitus.

Kaukolämmön menoveden lämpötilan säätö on pohjautunut Suomessa suosituksiin, jossa menolämpötilaa säädetään ulkolämpötilan mukaisesti. Vaikka menolämpötilan säätö ulkolämpötilan mukaan vastaakin kohtuullisesti tehotarpeen muutokseen ja kaukolämpöverkon siirtokyvyn optimointiin, ulkolämpötilaan perustuva säätö ei kuitenkaan tyypillisesti vastaa menolämpötilan kokonaisuoptimia. Menolämpötilan optimoinnin hyödyt tulevat pääasiassa laitosten ajomäärien painottumisesta edullisemmalle tuotannolle, savukaasujen lämmöntalteenoton tehostumisesta, sähköntuotannon tehostumisesta, uusista pumppausjärjestelyistä, lämpöhäviöiden pienentymisestä sekä mahdollisesti uusista lämmönlähteistä, joita kaukolämpöverkkoon voidaan paremmin ja taloudellisemmin kytkeä.

Tämä raportti perustuu diplomityöhön (*Lauri Laaksonen, Kaukolämmön menoveden lämpötilan taloudellinen optimointi, 2018*), jossa tutkittiin kaukolämpöveden menolämpötilan optimointia Pöyry Finland Oy:n ja Energiateollisuus ry:n toimeksiannosta. Kirjallisten lähteiden lisäksi työssä hyödynnettiin neljän pohjoismaalaisen kaukolämpöverkon tuntimittausdataa sekä verkostomalleja.

Tässä julkaisussa esitetään menolämpötilan säädön peruseriaatteet sekä säädön vaikutukset tuotantoon ja jakeluun. Tarkemmin vaikutusta tuotannossa, pumppauksessa, verkostohäviöissä ja sähköntuotannossa on arvioitu taustana olevassa diplomityössä esimerkkiverkoissa menolämpötilan muutoksilla perinteiseen ulkolämpötilan mukaan säädettyyn menoveden lämpötilaan nähden.

2 Menolämpötilan optimointi

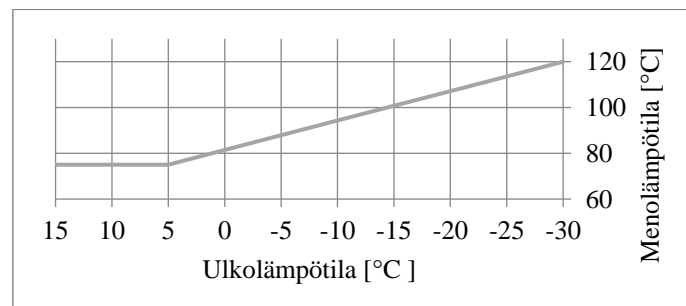
Menolämpötila vaikuttaa kaukolämpöjärjestelmän kaikkiin osiin; tuotantoon, jakeluun ja asiakkaisiin. Menolämpötilan säädössä periaatteena on taata laadukas ja luotettava lämmöntoimitus asiakkaille, huomioiden vaikutukset tuotannossa ja jakeluhäviöissä. Perusperiaate kaukolämmön menolämpötilan säädöstä pohjautuu kaukolämpöverkon energiataseeseen.

Menolämpötilan optimoinnin periaatteena on optimoida verkon käytöllä kaukolämmön tuotantoa ottaen huomioon myös tuotetun sähkön. Menolämpötilan optimin määrittäminen jakeluverkoston osalta voidaan tehdä tarkastelemalla lämpöhäviöiden, pumppauksen sekä sähkön- ja lämmöntuotannon kustannuksia verkostomallinnuksella määritettyjen arvojen pohjalta. Menolämpötilan vaikutuksia tulee samanaikaisesti jakeluverkoston kanssa tarkastella tuotantolaitosten ja näiden polttoaine- sekä käyttökulujen kautta. Muutoksissa tulee huomioida myös tuotannon prosessilaitteiden toiminta kuten vaikutukset vastapainesähköntuotantoon sekä savukaasupesurin lämmöntalteenottoon. Optimointi tulee toteuttaa kokonaisuuden osalta, vain yhtä osiota tarkastelemalla ei todennäköisesti päädytä optimiin.

Uudet polyuretaanieristetyt kaukolämpöjohdot, toisipuolen lämmönluovutuksen mitoittaminen alemmille lämpötiloille, asiakkaiden energiatehokkuussaneeraukset ja uudet säätö- ja automaatiojärjestelmät uusine säätötapoineen ovat johtaneet tilanteeseen, jossa käytössä olevaa verkon ajotapaa on mahdollista päivittää teknistaloudellisesti tehokkaammaksi.

2.1 Menolämpötilan säätökäyrä

Ulkolämpötilamittaukseen perustuva menolämpötilan säätö ei vastaa suoraan verkon todellista kysyntää tai pumppauksen tarvetta. Myös muut parametrit kuten kellonaika, viikonpäivä, tuulisuus, aurinkoisuus ja sademäärä vaikuttavat kaukolämmön kysyntään ja pumppaukseen. Todellinen menolämpötilaan vaikuttava parametri on lämmönkysyntä ja tavoiteltu virtaus, joiden avulla voidaan määrittää tarvittava jäähtymä.



Kuva 1: Kaukolämmön menolämpötilan perinteinen ohjauskäyrä ulkolämpötilan funktiona.

Menolämpötilan säätökäyrä (Kuva 1) asettuu tietyssä ulkolämpötilassa tyypillisesti (ei lämmitystarvetta) vain käyttöveden ja peruskulutuksen tarpeisiin. Tällöin

menolämpötilaksi valitaan vakio menolämpötila. Lämmitystarpeen (tehotarpeen) kasvaessa menolämpötilaa nostetaan, jotta verkon energianvälityskyky kattaa kasvaneen kulutuksen. Esitetty säätökäyrä on käytännössä tyypillisesti korjattu niin, että se vastaa paremmin kyseisen kaukolämpöverkon erityispiirteitä pumppauksen ja verkossa tapahtuvien lämpöhäviöiden osalta.

3 Menolämpötilan optimointi

3.1 Menolämpötilan optimin määrittäminen verkostomallilla

Ensisijaisesti verkoston käytön ja menolämpötilan optimointiin olisi käytettävä verkostomallinnusta, kuitenkin jo tässä ohjeistuksessa esitettyjä periaatteita käyttäen päästään hyviin lopputuloksiin. Olennaista onnistumisen kannalta on optimoitavan verkon tuntemus, järjestelmällinen eteneminen projektissa ja uuden ajotavan seuranta sekä tarvittaessa kehittäminen.

Menolämpötilan muutoksen vaikutuksia pumppaukseen, verkostohäviöihin ja tuotantoon tulisi tarkastella 3–8 eri kuormatilanteessa riippuen kaukolämpöverkon koosta ja tuotantoyksiköiden määrästä. Minimi- ja maksimikuormatilanteiden lisäksi menolämpötilan vaikutuksia kaukolämpöverkossa olisi syytä tarkastella jokaisen tuotantoyksikön käynnistystä vastaavilla kaukolämpötehoilla, sillä tyypillisesti juuri eri tuotantoyksiköiden käynnistykset vaikuttavat eniten kaukolämpöjärjestelmään.

3.2 Menolämpötilan optimin määrittäminen ilman verkostomallia

Menolämpötilan optimin määrittäminen voidaan toteuttaa verkostomallin sijaan myös tuntimittauksiin ja verkoston dimensioihin perustuen. Optimointi toteutetaan samalla periaatteella kuin verkostomallinnuksen avulla, tarkastelemalla menolämpötilan muutoksen kustannusvaikutuksia useassa eri tuotantopisteessä:

- Pumppauksen sähkönkäytön muutos voidaan arvioida muodostamalla verkostolle nostokorkeuden käyrä tilavuusvirran funktiona.
- Verkon lämpöhäviöt voidaan määrittää hyödyntämällä Energiateollisuuden vuonna 2016 julkaisemaa kaukolämpöjohtojen eristepaksuuden optimointityökalua.
- Mahdollisen sähkötuotannon ja savukaasupesurin lämmöntuotannon mallinnus voidaan tehdä erikseen.

Pumppauksen sähkönkäytön muutoksen arvioimiseksi verkostolle muodostetaan ominaiskäyrä nostokorkeudesta virtauksen funktiona. Ominaiskäyrän määrittäminen on parasta tehdä päätuotantolaitoksen kaukolämpöpumpun tuntimittausten perusteella, sillä valtaosa vuotuisesta kiertopumppauksesta tapahtuu kyseisestä pisteestä.

Menolämpötilan alaraja voidaan määrittää perustuen verkoston putkistokäyrään. Käyrästä voidaan määrittää maksimivirtaama, jolla verkostossa saadaan lämpö siirrettyä. Optimointiin tarvittavan putkistokäyrän muodostaminen suurelle kaukolämpöverkolle voi olla erittäin hankalaa, johtuen pumppauksen sijainnista eri puolella kaukolämpöverkkoa. Edellä esitelty menetelmä sopiikin parhaiten kaukolämpöverkoille, missä suurin osa kaukolämmön pumppauksesta toteutetaan yhdestä pisteestä – suuremmille verkoille suositeltavaa on verkostomallinnuksen käyttö.

4 Menolämpötilan vaikutukset

4.1 Muuttuva lämmön tuotantokustannus

Kaukolämmön menolämpötilaa taloudellisesti optimoidessa on tunnettava lämmöntuotannon muuttuva kustannus. Lämmöntuotannon muuttuvassa tuotantokustannuksessa ei oteta huomioon laitoksen elinkaaren kiinteitä kustannuksia. Olemassa olevien verkkojen ja laitosten optimoinnissa vain tuotantokustannuksen muuttuva osuus merkitsee optimointia tehtäessä.

4.2 Menolämpötilan vaikutus paluulämpötilaan

Ensisijaisesti kaukolämmön paluulämpötilan määrittää menolämpötilasta riippumatta asiakkaan lämmönjakokeskuksen toiminta sekä erityisesti sekundääripuolen säädöt ja toiminta. Asiakkaiden vaikutus kaukolämmön paluulämpötilaan riippuu pitkälti asiakaslaitteiden toisiopuolen säädöistä, toisiopuolen lämmönluovutuksen suunnittelusta ja toiminnasta sekä lämpimän käyttöveden käytöstä. Yksittäisen asiakkaan kohdalla kaukolämmön paluulämpötila vaihtelee huomattavasti asiakkaiden tehontarpeesta ja käyttöveden kulutuksesta riippuen. Menolämpötilan vaikutusta asiakaslaitteistojen paluulämpötiloihin voidaan selvittää kokeellisesti muuttamalla menolämpötilan säätökäyrää ja seuraamalla pidemmän aikajänteen muutoksia esimerkiksi etäluennalla.

Paluulämpötilat kohoavat tyypillisesti kesä- ja talviaikaan. Kesällä lämpimän käyttöveden kierto lämmittää paluuvettä. Talvella paluulämpötilan määrittää asiakkaan lämmitysjärjestelmän toteutus ja toiminta. Kiinteistöjen lämmityskierron menolämpötilan säätö perustuu yleensä ulkolämpötilaan ja toisiopuolen lämmönluovutus on usein suunniteltu niin, että lämmönsiirron tehostamiseksi myös toisiopuolen paluulämpötila lämmitysverkossa nousee, mikä johtaa myös kaukolämmön paluulämpötilan ulkolämpötila riippuvuuteen.

4.3 Menolämpötilan vaikutus pumppaukseen

Menolämpötilan optimoinnissa muuttuvien pumppauskustannusten arvioinnissa on huomioitava pumppauksen häviöiden sekä verkon painehäviöiden

muuttuminen kaukolämmöksi. Pumpun sähkökäytöstä vain sähkömoottorin häviöt ja pumpun ulkoiset kuten laakereiden ja akselin mekaaniset häviöt tai pumppauksen meluhäviö ei lämmitä pumpattavaa nestettä. Vastaavasti muut pumppauksen häviöt kuten vuotohäviöt, hydrauliset häviöt ja kitkahäviöt lämmittävät pumpattavaa nestettä.

Menolämpötilaa laskiessa pumppauksen kasvattaminen johtaa kasvaviin virtausnopeuksiin ja kasvaviin painehäviöihin kaukolämpöverkossa. Kitkasta johtuvat painehäviöt lämmittävät virtaavaa nestettä myös virtausputkissa. Pumppauksen sähkökäytön lisäys menolämpötilaa laskiessa tulee tulkita laskelmissa sähköllä tuotetuksi lämmöksi. Pumppauksen sähkökäytön lisäyksen kustannus otetaan huomioon pumppauksen sähköhinnan ja lämmöntuotannon omakustannushinnan erotuksena.

Pumppauskustannukset muuttuvat huomattavasti enemmän, kun keskimääräinen menolämpötila laskee. Laskemalla menolämpötilaa keskimäärin nousevat vuotuiset pumppaussähkön määrät tuotettua lämpöenergiaa kohden. Vastaavalla menolämpötilan nostolla saavutetaan vuositasolla vähennystä pumppaussähkön käytössä. Suurimmat vaikutukset menolämpötilan muutoksella pumppauksen sähkökäyttöön ovat talviaikana, jolloin verkon siirtokyky on lähellä maksimia.

Olettaen paluulämpötilan pysyvän vakiona, menolämpötilan laskun johdosta virtausta tulee kasvattaa niin, että vastaava lämpö saadaan siirrettyä. Tilavuusvirran nosto kasvattaa kaukolämpöputkissa virtaavan veden virtausnopeutta; virtausnopeuden kasvu johtaa suurempiin kitkasta aiheutuviin painehäviöihin, jolloin pumpulta vaadittava nostokorkeus kasvaa putkistokäyrän mukaisesti. Putkistokäyrä on jokaiselle kaukolämpöverkolle ominainen ja se riippuu virtausputkien karheudesta, dimensioista ja kertavastuksista. Kaukolämpöverkon putkistokäyrä voidaan määrittää historiadataan perustuen kaukolämpöpumpun virtaus- ja nostokorkeusmittauksiin.

4.4 Menolämpötilan vaikutus verkoston lämpöhäviöihin

Kaukolämpöverkon lämpöhäviöihin vaikuttavat useat eri tekijät: verkon dimensiot, käyttölämpötilat, käytetyt kanavatyyppit ja verkon ikä. Pienessä keskimääräisen putkikoon DN 50 verkoissa kaukolämpöhäviöt ovat tyypillisesti 10–20 % lämmöntuotannosta. Suuremmissa verkoissa putkikoon ollessa keskimäärin DN 150 verkostohäviöt ovat tyypillisesti pienemmät noin 4–10 % tuotannosta. Keskimääräiseltä halkaisijaltaan pienemmissä verkoissa vaippapinta-ala on verkon siirtokykyyn ja toimitettuun energiaan suhteessa suurempi, mikä johtaa suurempiin suhteellisiin lämpöhäviöihin.

Menolämpötilaa optimoidessa on tärkeä selvittää menolämpötilan muutoksen vaikutuksen lämpöhäviöihin. Kustannusvaikutuksia arvioitaessa on hyvä määrittää lämpöhäviöiden tuotantokustannukset. Lämmönjohtuminen on suoraan verrannollinen virtaavan nesteen ja ympäristön lämpötilaeroon. Kaukolämpöjohdon ympärillä olevan maaperän lämpötila pysyy lähes vakiona

ympäri vuoden. Tämä tarkoittaa, että verkostohäviöt ovat käytännössä suoraan verrannolliset kaukolämpöverkon käyttölämpötiloihin, vaikka lämpöhäviöteho ei ole täysin lineaarinen eri vuodenaikojen välillä johtuen erityisesti paluulämpötilan muutoksesta.

4.5 Menolämpötilan vaikutus savukaasupesurin tuotantoon

Menolämpötila ei käytännössä vaikuta hyötysuhteeseen polttoaineen polttoon perustuvassa lämmöntuotannossa lämpökeskuksissa. Mikäli lämpökeskuksessa tai CHP-laitoksessa on lämmönteidenotolla varustettu savukaasupesuri, menolämpötila välillisesti vaikuttaa pesurin lämmön talteenoton hyötysuhteeseen. Kaukolämmön paluulämpötila vaikuttaa savukaasupesurin LTO:hon, sillä savukaasupesurin LTO:n osuus kattilatehosta on voimakkaasti riippuvainen kaukolämmön paluulämpötilasta. Korkeasta menolämpötilasta johtuva pienentynyt kaukolämmön vesivirta voi rajoittaa savukaasupesurista saatavaa tehoa.

Menolämpötilaa optimoidessa on syytä tarkastella savukaasupesurin toimintaa, ettei tahattomasti rajoiteta LTO tuotantoa nykyisellä tai osaoptimoidulla menolämpötilaohjauksella.

4.6 Menolämpötilan vaikutus vastapainesähköntuotantoon (CHP)

Yhdistetyssä sähkön ja lämmöntuotannossa korkeampi menolämpötila pienentää laitoksen rakennusastetta eli heikentää sähköntuotannon määrää. Korkeampi menolämpötila johtaa korkeampaan turbiinin vastapaineeseen, mikä vähentää turbiinissa tapahtuvaa paisumista. Turbiinista saatava sähköteho on suoraan riippuvainen turbiinissa tapahtuvasta höyryn paisumisesta, eli höyryn paine-erosta turbiinin sisä- ja ulostulossa. Sähköntuotanto vähenee menolämpötilan funktiona noin 0,2–0,3 %, asteen lämpötilan nousua kohden.

Menolämpötilaa laskiessa on otettava huomioon meno- ja paluuvien lämpötilan vaikutus vastapaineturbiiniin – mm. eroosiokorroosioon ja vesipisaraeroosioon, joita liian matala menolämpötila voi aiheuttaa. Tarvittaessa voi harkita esimerkiksi laitoksella erillisen sekoituspiirin järjestämistä, mikäli paluuvesi on liian jäähtynyttä, samoin kaukolämpöverkon menolämpötilaa voidaan säätää sekoituspiirillä. Turbiinille ja paisuntaan liittyvälle kokonaisuudelle on tärkeä taata suunnitteluolosuhteet ja poiketa niistä vain hyvin suunnitellusti.

5 Asiakkaan huomioiminen menolämpötilaa optimoidessa

Optimoinnissa on erittäin tärkeää huomioida jo alkuun, että vaikka optimointia ja muutoksia käsitellään järjestelmätasolla, tulee käytännön optimointi tehdä niin, ettei yhdenkään asiakkaan lämmöntoimitus kohtaa pysyviä tai toistuvia ongelmia.

Sama järjestelmätason ongelma pätee moniin järjestelmätason mittauksiin ja laadunvarmistukseen. Esimerkiksi verkkotason mittaukset tai tuntikeskiarvot asiakkaan energian mittauksessa, eivät yksinään riitä varmistamaan, että jokaiselle asiakkaalle lämmöntoimitus tapahtuisi joka hetki häiriöttömästi.

Asiakaslaitteiden säätöventtiilit ja lämmönsiirtimet toimivat hyvin myös hieman korkeammilla kuin tavanomaisilla säätökäyrän mukaisilla lämpötiloilla, jolloin kaukolämmön virtausmäärät hieman pienenevät. Menolämpötilan lasku taas nostaa virtausmääriä asiakaslaitteissa. Pienet muutokset perinteisen mitoituskäyrän mukaisiin arvoihin eivät pääsääntöisesti kuitenkaan vaikuta toimintaan – suuremmilla poikkeamilla toiminta on huolellisesti arvioitava.

Menolämpötilaa alle mitoituskäyrän laskiessa asiakaslaitteet ottavat verkosta yhä tarvitsemansa tehon ja paluulämpötilaa rajaa asiakkaan toisiopuolen laitteistomitoitukset (lämmönluovutuksen suunnittelu), tällöin kaukolämpöverkon virtausmäärät kasvavat mitoituslaitteeseen nähden.

Suuremmillakin poikkeamilla laitteet toimivat, mutta riski kasvaa siitä, että jotkin esimerkiksi hyvin tiukasti tai riittämättömästi mitoitettut tai lämmönsiirtopinnoiltaan likaantuneet laitteet eivät toimikaan riittävän hyvin.

On varmistettava, että virtausmäärä ei kasva niin paljon, että asiakaslaitteiden säätöventtiilit tai putkistot alkaisivat kuristaa virtausta. Asiakaslaitteiden virtausmäärien kasvu voisi näin johtaa paikalliseen tehon puutteeseen. Käytännössä tämä vaatii paljon mitoituksesta poikkeavat olosuhteet, jotka voivat aiheuttaa muitakin häiriötilanteita asiakaslaitteisiin, ja niitä tulisi välttää, ellei toimintaa ole huolellisesti arvioitu ja varmistettu. Menolämpötilan merkittävä alentaminen mitoitusarvoista aiheuttaa suuremmat virtausnopeudet mikä lisää myös jonkin verran virtausääniä.

Kesäaikana rajoitteen meno ja paluulämpötiloille asettaa asiakkaan käyttöveden lämmönsiirtimet, jotka on mitoitettu 70°C kaukolämmön menolämpötiloille, Käyttöveden toisiopuolelle käyttövesi ja käyttöveden kierto 58°C – erityisesti vähäisen kulutuksen aikaan (kesäisin) paluueden lämpötila nousee lähelle toisiopuolen lämpötiloja.

Vähäisen kulutuksen aikana menovesi jäähtyy verkostossa. Vähäisen kulutuksen aikana menoveden viipymä voi olla suunniteltua pidempi ja erityisesti rengasverkoissa menoveden kulkusuunnat voivat vaihdella ja jättää jonkin alueen virtauksen pieneksi, jolloin jäähtymistä voi tapahtua odotettua enemmän.

Menolämpötilan laskeminen voi aiheuttaa sen, että jollain alueella käytettävissä oleva paine-ero saattaa laskea, sillä mitoitusta matalampien lämpötilojen paikkaamiseen tarvitaan kaikilla asiakkailla suurempi tilavuusvirta – tällöin suurempi virtaus aiheuttaa suuremmat painehäviöt ja alueen paine-ero saattaa lähteä laskuun. Verkon mitoituksesta ja alueen sijainnista riippuu, alkaako kasvanut virtausmäärä (~teho) rajoittua paine-eron liiallisen laskun takia. Erityisesti tällainen saattaa korostua aamun teho- ja virtaushuipussa, näissäkin tilanteissa on varmistettava paine-eron riittävyys.

Paine-eron lasku myös kasvaa kiihtyvästi virtausnopeuksien kasvaessa. On varottava, ettei paine-eron osalta toiminnan rajoilla oleva toimituskyky heikommalla siirtoyhteydellä varustetulla alueella romahda suuren kulutuksen alkaessa (esimerkiksi aamun kulutushuipussa). Asiakaslaitteet reagoivat tehovajeeseen avaamalla säätöventtiileitä lisää, mikä edelleen kiihdyttää paine-eron laskua.

Menolämpötilan optimointi ja asiakkaan laskutusperusteet

Asiakaslaitteet toimivat lämmöntoimituksen osalta moitteettomasti hieman mitoituslämpötiloista poikkeavalla toiminta-alueella. Menolämpötilan laskeminen asiakaslaitteiden mitoituslämpötilatasoista lisää kuitenkin vesivirtaa. Mikäli yhtiöllä on sellaisia hinnoittelu- tai perusmaksuperusteita, että menolämpötilan optimointi vaikuttaa laskutusperusteisiin, yhtiön tulee ottaa tämä huomioon ja päättää toimintatavasta etukäteen. Kun lämpötilaoptimointia tehdään kaukolämpöyhtiön tarpeista, tulee asiakkaan reilu kohtelu varmistaa.

Tarvittaessa muuttunutta tilannetta voidaan tarkastella mm. vertaamalla optimoinnissa muuttunutta tilannetta normaalitilanteeseen ja asiakaslaitteiden mitoitusperusteisiin sekä näiden perusteella odotettuihin tulolämpötiloihin ja laitteistojen toimintaan nähden. Arvioissa voidaan käyttää apuna olemassa olevia tietoja, esimerkiksi tietoja etäluennasta ja asiakaslaitteiden sekä toisipuolen toiminnasta annetun mitoitusmenolämpötilakäyrän mukaan, ja arvioida mikä vesivirta ja jäähtymä olisi normaalitilanteessa, johon asiakaslaitteetkin on alun perin vaadittu mitoitettavaksi.

Tärkeintä on läpinäkyvä ja selkeä toimintatapa – hieman kasvanut määrällinen vesivirta ei ole ongelma, kun asiakas saa kaikissa tilanteissa riittävän lämmön, laitteistot toimivat oikein ja muuttunut tilanne käsitellään tarvittaessa laskutuksessa oikein ja ymmärrettävästi.

6 Verkon haastekohtien ja kriittisten asiakkaiden tunnistaminen

Optimoinnin tueksi, säätöstrategian valintaan ja optimointi projektin etenemissuunnitelmaa varten tarvitaan taustatietoja. Taustatietoja voi osin hankkia olemassa olevia tietoja ja automaatiota sekä etäluentaa käyttäen. Samalla on olennaista tunnistaa myös optimoitavan verkon ominaispiirteet. Ominaispiirteiden hahmottamisessa auttavat verkoston suunnitteluperiaatteet ja mahdolliset verkostomallit.

Tunnistetut olennaiset verkon ominaispiirteet ja ratkaisut:

- Etäluennan kautta saadaan tietoja asiakkaalle päätyvästä menovedestä.
 - tieto verkon tavallisesti viileämpien alueiden sijainnista.
 - arvio menoveden jäähtymälle matkalla tuotannosta asiakkaalle -> joka muodostaa myös reunaehdon menolämpötilalle
 - Jakelun pullonkaulat voidaan tunnistaa yhdessä verkostomallin kanssa - etäluennasta saadaan avuksi aluekohtaisia tilavuusvirtamääriä ja tehotietoja.
- Virtausmäärän kasvaessa painehäviöt lisääntyvät, riittävä paine-ero tulee varmistaa kaikille asiakkaille
 - Huomioidaan virtauksen kasvaminen menoveden jäähtyessä, esim. verkon pullonkauloissa, jakelun kannalta haastavilla alueilla ja rajallisen siirtoyhteyden päässä pääjakeluverkosta / runkoverkosta sijaitsevilla alueilla
 - Optimoinnin aikainen ja jatkuva paine-eromittausten seuraaminen
 - Mittausten lisääminen tarvittaessa.
 - Verkkoa voidaan ajaa seuraten paine-eroa, erityisesti asiakaspäässä
 - Vältetään ylipumppaukselta ja -lämmöiltä
- Matalammilla menolämpötiloilla on varmistettava oikea lämpötila haastavimmillekin asiakkaille ja alueille. Huomioitava, että
 - asiakaslaitteita on erilaisilla mitoituksilla (erityisesti toisiopuolen lämmönluovutuslämpötilat ja käyttöveden lämmönvaihtimet)
 - Teollisuus- ja erityisasiakkailla voi olla poikkeavia lämpötilavaatimuksia esimerkiksi sopimuksin
 - Tarvittaessa selvitetään, voidaanko poikkeusvaatimuksia toteuttaa paikallisesti yksittäisratkaisuin tai prosessimuutoksin, jos se muuten olisi koko verkon menolämpötilojen määrittävänä tekijänä
- Prosessilämmöt ja erityisasiakkaat tai -sopimukset
 - Erityisen korkeat menolämpötilatarpeet (esim. asiakkaat, jotka tarvitsevat aina tietyn lämpötilatason: prosessit, kuivaukset - tällaisista on yleensä erikseen sopimus tai tieto)
 - Lämmön käyttö prosessilämpönä voi aiheuttaa myös korkean paluulämpötilan (erityisesti, jos erityiskohteen käyttö on suuri suhteessa verkon kokoon)
 - Ratkaisut: paikallinen lämpötilan korotus; kattila, paikallinen lämpöpumppu (lämpöä paluusta -> menoon), paikalliset kierrot, pumppausjärjestelyt

7 Menolämpötilan säätötavat

Ulkolämpötilaan perustuva menolämpötilan säätö johtaa nykyään tyypillisesti tarpeettoman korkeisiin menolämpötiloihin. Ulkolämpötilan sijasta menolämpötilaa tulisi säätää vastaamaan paremmin verkon todellista tilaa pumppauksen, lämpöhäviöiden ja tuotannon osalta.

Tässä esitetään muutamia tapoja menolämpötilan tehokkaan säädön toteuttamiseksi. Säätötavat on määritetty niin, että ne olisivat mahdollisimman yksinkertaisesti toteutettavissa niin pienillä kuin isoilla kaukolämpöverkoilla ilman merkittäviä investointeja. Lisäksi menolämpötilan optimoinnin yhteydessä voidaan arvioida kaukolämpöverkon automaattisen varaamisen yhdistämistä menolämpötilan säätökäyrään luomalla kaukolämmöntuotannolle yksinkertainen ennustemalli.

7.1 Menolämpötila kaukolämpökuorman funktiona

Menolämpötilan säätö voi ulkolämpötilan sijasta perustua hetkelliseen kaukolämpökuormaan tai kaukolämpökuorman ennusteeseen. Säätö voidaan toteuttaa käytännössä samalla tavalla kuin ulkolämpötilaan perustuen, mutta nyt menolämpötila määräytyy ulkolämpötilamittauksen sijasta kaukolämmön tehomittauksiin tai tuotantoennusteeseen perustuen. Säädön pohjaksi voidaan muodostaa optimoinnilla määritetty staattinen käyrä vastaamaan tehoennustetta. Ennustetta voidaan hienosäätää ottamalla käyttöön useita käyriä, riippuen vuodenajasta, ajojärjestyksestä, viikonpäivästä ja vastaavista muuttuvista seikoista.

Optimaalinen menoveden lämpötila riippuu asiakaslaitteiden reunaehtojen lisäksi kaukolämpöverkon hetkellisestä pumppauksesta ja siirtokyvystä. Säätämällä menolämpötilaa kaukolämmön kokonaistuotannon mukaisesti voidaan välttää tilanteet, missä menolämpötila nousee tarpeettoman suureksi. Pelkkään ulkolämpötilaan perustuva menolämpötilan säätö ei ota huomioon sosiaalisista tekijöistä johtuvaa lämmönkysynnän vaihtelua tuntien ja viikonpäivien välillä.

Optimikäyrä voidaan helpoiten määrittää verkostomallinnuksen avulla laskemalla tuotanto- ja jakelukustannusten minimi eri tuotantopisteissä. Mallinnuksen pohjana on tärkeää käyttää todellisiin mittaustietoihin perustuvaa dataa esimerkiksi lämpöhäviöiden ja paluulämpötilojen osalta.

Optimointi voidaan määrittää myös ilman verkostomallia. Tällöin käyrän muodostaminen voidaan toteuttaa dataan tai testiajoon perustuen. Mikäli menolämpötilan optimiksi saadaan alhaisin menolämpötila, voidaan optimikäyrä määrittää muodostamalla menolämpötilasta kaukolämpötuotannon funktiona pisteparvi. Pisteparven alalaita kuvaa alhaisinta menolämpötilaa, jolla kyseinen kaukolämpöteho on saatu siirrettyä. Kyseistä käyrää voidaan käyttää pohjana menolämpötilan säädölle.

Ennakoivan säätötavan käyttö

Johtuen kaukolämpöverkolle ominaisesta hitaudesta menolämpötilan säädön vaikutukset kuluttajilla näkyvät vasta muutaman tunnin kuluttua riippuen verkon mitoista ja kulutuksesta. Tämän vuoksi menolämpötilan säätö voidaan toteuttaa kaukolämmön tuotannon ennusteen perusteella. Tällöin menolämpötila pyrkii vastaamaan todellista asiakkaiden lämmönkysyntää ennakoivasti. Ennakoiva säätötapa poistaa tarpeen kaukolämpöverkon varaamiselle, sillä kaukolämpöverkkoa varataan ja puretaan tällöin automaattisesti.

Dynaamisen säätötavan käyttö (jatkuva optimointi ja laskenta)

Kaukolämmön tuotantoon perustuva säätö voidaan toteuttaa myös dynaamisesti, laskemalla menolämpötilan optimia jatkuvasti kaukolämmön tuotannon ja paluulämpötilan perusteella. Tällöin menolämpötilalle lasketaan optimi, määrittämällä verkoston lämpöhäviöiden ja pumppauksen sähkönkäytön kustannukset eri menolämpötiloilla. Verkoston lämpöhäviöiden kustannukset voidaan määrittää verkoston häviötehon ja eri menolämpötilojen välille muodostetun käyrän perusteella. Pumppauksen sähkön käyttö eri menolämpötiloilla saadaan verkolle rakennetusta putkistokäyrästä paluulämpötilan ja kaukolämmöntuotannon perusteella. Myös menolämpötilan vaikutukset vastapainesähköntuotantoon ja savukaasupesurin LTO-tehoon voidaan yhdistää optimointilaskentaan. Menolämpötilaa säädetään perustuen optimoinnista saatuun arvoon, ottaen huomioon menolämpötilalle asetetut rajoitteet.

Kuten staattisessa kaukolämpötehoon perustuvassa säädössä, optimointilaskenta voidaan toteuttaa kaukolämmöntuotantoennusteeseen perustuen. Tämän lisäksi optimointilaskelman toteuttamiseksi tarvitaan paluulämpötilaennuste, joka voidaan määrittää vastaavalla menetelmällä kuin kaukolämmön tuotantoennuste.

7.2 Lämmön varaaminen kaukolämpöverkkoon

Kaukolämpöverkkoa voidaan käyttää lämpövarastona lataamalla verkkoa normaalia ajotilannetta korkeammalla menolämpötilalla. Kaukolämpöverkkoon ladattu ylimääräinen lämpö purkautuu yllilämpöisen veden saavutettua asiakkaiden lämmönvaihtimet. Lämmön varastointia eli verkon varaamista voidaan hyödyntää lyhytaikaiseen kulutushuippujen tasaamiseen, nostamalla menolämpötilaa 5–15 °C. Varauksen ajoittaminen tulee tehdä noin 2–5 h ennen ennakoitua kulutushuippua niin, että lämpimän veden rintama saavuttaa asiakkaat kulutushuipun aikana.

Kaukolämpöverkkoon ladattu ylimääräinen lämpö puretaan kulutushuipun jälkeen laskemalla tuotantolaitoksen menolämpötila takaisin ohjekäyrälle tai hieman sen alle. Kulutushuipun aikana asiakkaat saavuttanut lämpimän veden rintama johtaa normaalia kulutushuippua pienempään virtaukseen asiakkaiden säätöventtiilien säätäessä paluulämpötilaa haluttuun arvoon.

Onnistuneella kaukolämpöverkon varauksella voidaan parhaimmillaan välttää huippukattiloiden käynnistys kulutushuipun aikana. Kaukolämpöverkon varausta voidaan hyödyntää myös vastapainesähköntuotannon lyhytaikaisessa lisäämisessä. Korkeiden sähkönhintojen aikana verkkoa ladataan, jolloin sähkön tuotantotehoa saadaan hetkellisesti kasvatettua.

Tyypillisesti kaukolämpöverkon varaus toteutetaan säätämällä menolämpötilaa tai sen ohjekäyrää manuaalisesti operaattorin toimesta. Kaukolämpöverkon varaukseen tarkoitettu menolämpötilakäyrä voidaan myös määrittää automaatiojärjestelmään, jolloin verkon varaus tapahtuu automaattisesti. Korkean menolämpötilan ajaminen vielä kulutushuipun aikana ei yleensä tällaisessa varaamisessa ole tarkoituksenmukaista vaan se nostaa verkon keskimääräistä menolämpötilaa johtaen suurempiin lämpöhäviöihin.

7.3 Tuotantoennusteen luominen usean muuttujan avulla

Kaukolämmön kulutuksen ennustetta hyödynnetään yleensä tuotannon suunnittelussa ja vastapainesähkön tuotantoennusteissa. Tuotantoennusteiden käyttö suomalaisissa energiayhtiöissä vaihtelee huomattavasti riippuen yrityksen koosta; suurimmilla energiayrityksillä ennustemallit ovat kehittyneitä, mutta suurimalla osalla yrityksistä kehittyneitä tuotannon ennusteita ei käytetä. Tämä johtuu tyypillisesti siitä, että tutkitut ennustemallit vaativat suuren määrän mittausdataa, joka on reaaliaikaisessa luennassa.

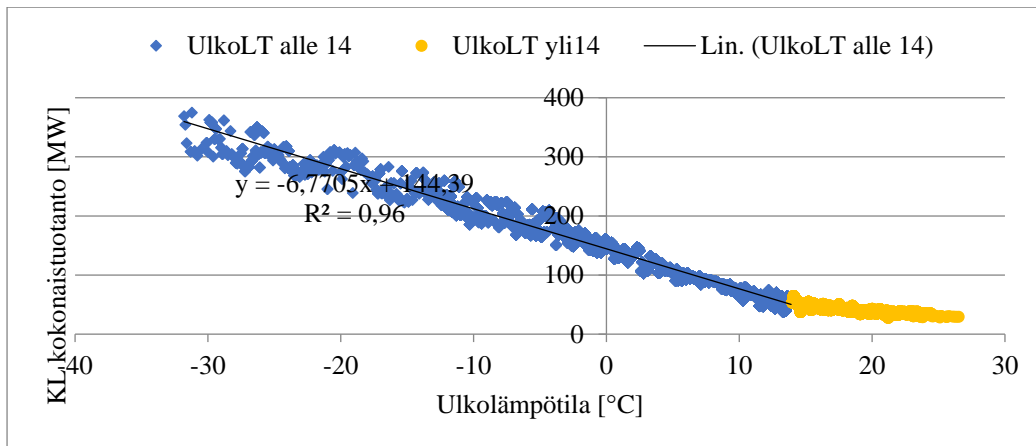
Kaukolämmön kulutusennuste perustuu tyypillisesti kahteen päätekijään; säätilaan ja vuorokausivaihtelun komponenttiin. Vuorokausivaihtelun komponentilla viitataan eri viikonpäivien ja kellonaikojen mukaan vaihtuvaan kaukolämmön kysynnän vaihteluun. Mallit luodaan perustuen valittujen suureiden toteutuneisiin arvoihin. Mallin luonnissa käytettyjä parametreja tarvitaan myös ennusteen tekemiseen, tämän vuoksi mallin luonnissa on huomioitava ennustemallin käytettävyyden käytännössä.

Kaukolämmön kysynnän ennustemalli voidaan luoda perustuen ulkolämpötilaan, tuulen nopeuteen sekä eri viikonpäivien tyypillisiin kulutusprofiileihin nämä huomioiden. Hyväksi malliksi on todettu usean muuttujan lineaarinen regressio, jossa nämä muuttujat on huomioitu.

Kaukolämmön tuotantoennuste voidaan luoda myös mallintamalla asiakkaiden kulutusta sekä verkoston lämpöhäviöitä. Tyypillisesti asiakkaiden lämmönkulutuksen ennustaminen on tarkempaa, kuin tuotannon ennustaminen, sillä lämmönkulutus riippuu suuresti ulkolämpötilasta ja kellonajasta ilman kaukolämpöverkolle ominaista hitautta. Kyseinen malli vaatii historiadataa etäluettavista asiakkaiden mittareista, joissa lämmönkulutusta mitataan tunneittain.

Ennustemalli voidaan luoda myös tuotantodatan perusteella (kuva 2), sillä kaikissa kaukolämpöjärjestelmissä asiakaslaitteistosta ei ole saatavissa tuntimittauksia. Mallissa tulee huomioida asiakkaiden lämmönkysynnän ja

tuotannon välinen viive sekä verkostossa tapahtuvat lämpöhäviöt. Kuvassa (Kuva 2) esitetty, alle 14 °C ulkolämpötilalla määritetty lineaarinen sovite vastaa pelkän ulkolämpötilan perusteella määritettyä yhden muuttujan lineaarista regressiomallia.



Kuva 2: Esimerkinä tuotannosta muodostettu regressiosuora ulkolämpötilan ja kaukolämmöntuotannon riippuvuudesta alle 14 °C ulkolämpötiloilla.

Yleisesti tarkin ennustemalli on jokaisen viikonpäivän tuotantoprofiilin huomioiva. Hyvin viritettyä mallia voidaan käyttää menolämpötilan ennakoivaan säätöön, sillä ulkolämpötilaan perustuva menolämpötilan säätö vastaa huomattavasti verkon todellista tilaa. Huomattavaa on myös, että taustatyössä huomattiin jo kahden edellisen tunnin kaukolämmöntuotantoa käyttävän mallin olevan pelkkään ulkolämpötilaan pohjautuvaa mallia tarkempi, eikä se välttämättä vaadi sääennustetietoa menolämpötilan säädön pohjaksi.

7.4 Kelluva menolämpötilan säätö

Menolämpötilan säätö voidaan toteuttaa myös kelluvaan säätötapaan perustuen. Kelluva menolämpötilan säätö perustuu kaukolämpöverkon pumppaukselle asetettuihin raja-arvoihin, joiden perusteella menolämpötilaa säädetään. Kelluvassa säädössä kaukolämpöveden virtaus pyritään maksimoimaan jokaisessa tilanteessa menolämpötilaa säätämällä.

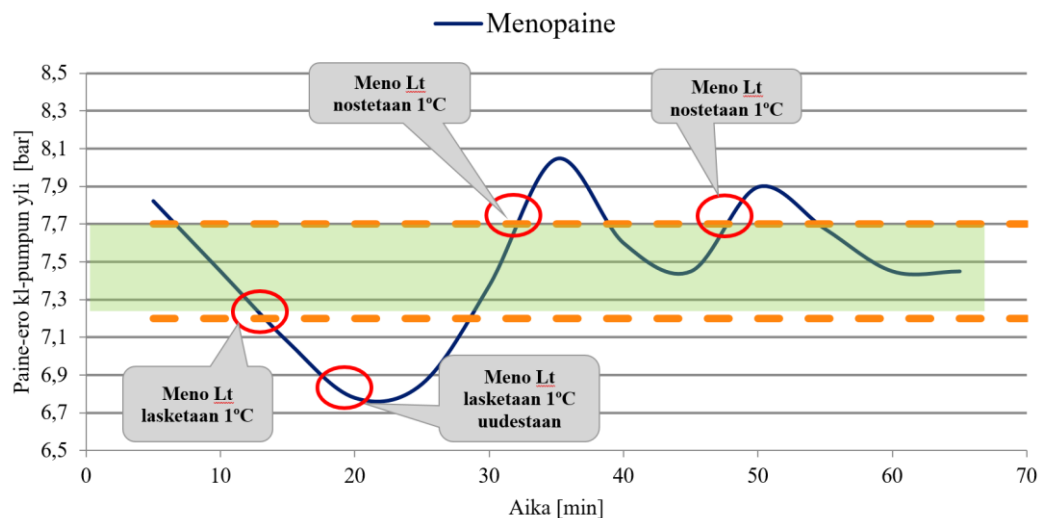
Pumppauksen rajojen määrittäminen sekä menolämpötilan säädön viive saadaan parhaiten selville verkkokohtaisilla koeajoilla. Rajojen määrittämisessä voidaan käyttää pohjana verkolle määritettyä putkistokäyrää, jonka avulla voidaan arvioida kaukolämpöpumpulta tarvittava nostokorkeus eri virtauksilla. Virtaukset voidaan arvioida perustuen lämmöntuotannon ja paluulämpötilojen mittausdataan. Menolämpötilan säädön viritys on kuitenkin tehtävä kokeellisesti.

Kelluvassa menolämpötilan säädössä kaukolämpöpumpun säätö perustuu normaaliin tapaan paine-ero säätöön, missä pumppauksen kierrosnopeutta (tai kuristusventtiilin asentoa) säädetään kriittisen asiakkaan paine-eron mukaan. Optimaalinen kriittisen asiakkaan paine-eron tavoitearvo on 0,6 bar, joka vastaa

asiakaslaitteiston paine-eron minimiä. Korkeampi paine-eron asetusarvo nostaa pumppauskustannuksia.

Kelluvassa säätötavassa menolämpötilan säätö tapahtuu kaukolämpöpumpun nostokorkeudelle asetettujen raja-arvojen perusteella.

- Nostokorkeuden ylittäessä sille asetetun maksimiarvon menolämpötilaa nostetaan.
- Kaukolämpöpumpun nostokorkeuden saavuttaessa sille asetetun alarajan menolämpötilaa lasketaan, kunnes nostokorkeus saadaan halutulle alueelle.
- Pumpun ohjaukselle on syytä asettaa tarpeenmukainen viive, jolla säätöä tehdään, jotta vältetään liian nopeilta ja hitailta muutoksilta pumppauksessa ja lämpötilansäädössä.
- Kelluvan menolämpötilan säädön etuna on se, että sen avulla voidaan välttää turhan korkeat menolämpötilat missä pumppaus ei rajoita menolämpötilan laskua. Toisaalta menolämpötilan säätö tapahtuu aina hieman myöhässä, johtuen verkolle ominaisesta hitaudesta.
- Pumpun nostokorkeuden maksimiraja tulee määrittää niin, että nostokorkeudelle jätetään reservi, jolla asiakkaiden paine-ero saadaan pidettyä tavoitearvossa, ennen menolämpötilan noston vaikutuksia.
- Pumpun nostokorkeuden alaraja tulee määrittää niin, että kaukolämpöveden virtaus pyritään pitämään mahdollisimman suurena, menolämpötilan alaraja kaukolämpöasiakkailta huomioiden.
- Menolämpötilan vaihtelun maksimi ja minimirajan määritetään menolämpötilan rajoitussäätimillä.



Kuva 3 Periaatekuva kelluvasta lämpötilan säädöstä

Menolämpötilan optimiin perustuva säätö voidaan

- luoda historiadataan perustuen käyttäen kaukolämmön tuotantoennustemallia. Kaukolämmön tuotantoennusteen käyttäminen ulkolämpötilan sijasta vastaa paremmin verkon todellista tilaa, johtaen tehokkaampaan säätöön. Tuotantoennusteen aikajänne riippuu siitä,

kuinka kauan kaukolämpöveden siirtyminen tuotantolaitokselta asiakkaille kestää. Tällöin verkon varaaminen voi tapahtua automaattisesti, muutama tunti ennen kulutushuippua.

- toteuttaa kelluvalla menolämpötilan säädöllä, jossa menolämpötilaa säädetään kaukolämpöpumpun nostokorkeudelle asetettujen raja-arvojen perusteella. Kyseinen säätötapa sopii erityisesti yksinkertaisiin kaukolämpöverkkoihin, missä kaukolämpöveden optimi menolämpötila on yleensä alhaisin käytettävissä oleva menolämpötila.
- arvioida jatkuvasti perustuen hetkelliseen tilanteeseen. Tällöin menolämpötilan säätö laskee kustannusoptimin putkistokäyrän ja lämpöhäviötehoille määritetyn käyrän perusteella. Dynaamiseen säätöön on helposti yhdistettävissä myös muiden parametrien kuten sähkön reaaliaikaisen hintatiedon yhdistäminen.

Kaukolämmön tuotannon mukaisen menolämpötilan säätö voidaan toteuttaa seuraavien ohjeiden perusteella:

1. Riittävä menolämpötila ja paine-ero on varmistettava kaikille asiakkaille
 - Käyttöveden lämpötila minimissään 55 °C (tämän varmistamiseksi käyttöveden kiertoon lähtevälle vedelle lämpötila 58 °C)
 - Ilmanvaihto- ja lämmityspattereiden mitoituslämpötilakäyrät
 - Kaukolämmön paine-ero asiakaslaitteiston yli minimissään 0,6 bar
 - Sopimuksissa (lämmöntoimitusehdot) luvattu toimittaa vähintään 65 °C kaukolämpöä
2. Verkoston maksimilämpötila ja paine-ero
 - Kaukolämpöverkon ja -laitteiden suunnittelulämpötila 120 °C (kaukolämpöveden korkein lämpötila)
 - Kaukolämpöverkon ja -laitteiden suunnittelupaine 16 bar (suurin käyttöpaine)
 - Paine-ero asiakkaan lämmönjakokeskuksen yli maksimissaan 5 bar
 - Verkon tarpeetonta rasittamista tulee välttää – ei tulisi pyrkiä hetkellisiin optimeihin vaan systeemin tarkoituksenmukaiseen ajamiseen. Ohjeellisesti:
 - menolämpötilan muutoksia yli 1 °C / 6min eli 10 °C / h tulisi välttää.
 - kahden samaa verkkoa syöttävän tuotantolaitoksen menolämpötilojen eron ei tulisi olla yli 10°C – Syöttöalueiden vaihtuvassa rajakodassa jatkuva lämpötilojen nopea muutos rasittaa johtorakenteita.
3. Menolämpötilaa säädetään kaukolämmön tuotantoon tai tuotantoennusteeseen perustuen joko muodostamalla määritetty optimikäyrä kaukolämmöntuotannon funktiona tai menolämpötila lasketaan dynaamisesti perustuen nykyiseen tai tulevaan kaukolämmöntuotantoon. Optimiin vaikuttaa mm.
 - Menolämpötilan ei tulisi rajoittaa lämmönsiirtoa halvimmalta tuotantoyksiköltä
 - Menolämpötilan kustannusvaikutus verkostohäviöihin
 - Menolämpötilan vaikutus pumppauskustannuksiin nykyisellä kaukolämmöntuotannolla ja paluulämpötilalla tai niiden ennusteilla (huom. pumppaushäviöt (painehäviöt) muuttuvat lämmöksi = osa lämmöntuotantoa)
 - Menolämpötilan vaikutus vastapainesähköntuotantoon ja savukaasupesurin lämmöntalteenottoon
2. Käytännön optimointi tehdään niin, ettei yhdenkään asiakkaan lämmöntoimitus kohtaa pysyviä tai toistuvia ongelmia.
 - Järjestelmätason muutoksia suunniteltaessa on varmistettava asiakkaan kokemaa lämmönjakelun laatu ja sen seuranta.

8 Yhteenveto

Menolämpötila vaikuttaa kaukolämpöjärjestelmän toimintaan sekä tehokkuuteen olennaisesti. Kaukolämmön menoveden lämpötilan säätäminen optimoinnin kautta tulisikin selvittää verkkokohtaisesti. Optimointi tulee tehdä hyvin suunnitellusti, varmistaen asiakaan lämmönsaanti ja huomioiden tuotantorakenne ja verkon toiminta sekä rajoitteet - välttäen samalla verkon tarpeettoman rasituksen lisäämistä.

Menolämpötilan vaikutuksia kaukolämpöjärjestelmässä tulee tarkastella vähintään laitosten ajojärjestyksen, verkoston lämpöhäviöiden, pumppauksen sähkönkäytön, vastapainesähköntuotannon sekä savukaasupesurin lämmöntalteenoton osalta. Menolämpötilaa tulisi optimoida niin, ettei se tarpeettomasti rajoita halvimman tuotantoyksikön tuotantoa.

Kaukolämpöverkon tuotanto tulisi mallintaa perustuen optimoituun ajojärjestykseen. Suuremmilla verkoilla säätökäyrä voidaan määrittää perustuen optimiajojärjestyksen mukaiseen tuotantoon. Optimiajojärjestyksen kustannusvaikutukset ovat lähes poikkeuksetta huomattavasti suuremmat kuin menolämpötilan muutoksen, jolloin menolämpötilan säädön pohjana on, ettei menolämpötila rajoita halvimman tuotantoyksikön tuotantoa. Menolämpötilan säätökäyrä tulisi tällaisessa tapauksessa tehdä päätuotantolaitoksen tuotannon funktiona.

Menolämpötilan muutosten vaikutuksia on syytä tutkia ainakin 3–8 eri kuormatilanteessa määrittämällä eri komponenttien kustannusvaikutukset eri menolämpötiloilla.

Talviaikana menolämpötilan lasku on tyypillisesti kannattavaa tilanteissa, joissa kaukolämmön virtaus rajoittaa savukaasupesurin LTO-tehoa. Savukaasupesurin LTO-tehon rajoituksen kustannusvaikutukset ovat tyypillisesti lämpöhäviöiden ja pumppaussähkön käytön kustannusvaikutuksia huomattavasti suuremmat.

Huomioimalla pumppauksen häviöiden lämmittävä vaikutus pumpattavaan nesteeseen ovat menolämpötilan laskun myötä kasvavat pumppauskustannukset tyypillisesti pienemmät kuin vähentyneistä lämpöhäviöistä saadut säästöt. Pumppauksen maksimointi eli menolämpötilan lasku on tällöin kannattavaa. Etenkin kaukolämpöverkoissa, joissa pumppaus tapahtuu suurelta osin CHP-laitoksen omakäyttösähköllä, on menolämpötilan optimi tyypillisesti matalin mahdollinen.

Menolämpötilan muutosten vaikutusten arviointia voidaan tehdä verkostomallinnuksen sekä tuntimittausdatan perusteella. Mikäli verkostomallia ei ole saatavilla voidaan laskennassa hyödyntää tuntimittauksiin perustuvaa putkistokäyrää sekä energiateollisuuden julkaisemaa kaukolämpöjohtojen eristepaksuuden optimoinnin laskentatyökalua. Menolämpötilan optimiin perustuva säätö on mahdollista toteuttaa optimoimalla menolämpötilaa jatkuvalla laskennalla kaukolämmöntuotantoon ja paluulämpötilaan perustuen tai muodostamalla menolämpötilan optimikäyrä kaukolämmön tuotannon funktiona.