

Antti Salmela

Haukivuoren lämpölaitoksen ja lämpöverkoston nykytila sekä energiataloudellisuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

2.12.2016

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Antti Salmela Haukivuoren lämpölaitoksen ja lämpöverkoston nykytila sekä energiataloudellisuus 60 sivua + 2 liitettä 2.12.2016
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	toimitusjohtaja Arto Nieminen yliopettaja Jukka Yrjölä
<p>Tässä opinnäytetyössä tutustuttiin Haukivuorella sijaitsevaan lämpölaitokseen ja sen toimintaan. Työ on osa dokumentaatiota lämpölaitoksen nykytilanteesta yhdessä muiden säilyneiden dokumenttien kanssa. Työssä selvitettiin lämpölaitokseen liittyvien laitteiden toiminta ja kunto. Kerättiin yhteen viimevuosien kulutusluvut ja laskettiin näiden perusteella hakekattilan energiataloudellisuus.</p> <p>Tutkimuksien valossa hakekattilan hyötysuhde on varsin hyvällä tasolla. Jotta tilanne säilyy nykyisenlaisena, on tärkeää seurata edelleen toimitetun hakkeen laatua ja optimoida kattilan toimintaa entistä paremmin vastaamaan hetkellistä lämmitystehontarvetta.</p> <p>Työn toisena osa-alueen tutkittiin lämpöverkoston lämpöhäviöitä, jotka tiedettiin korkeaksi. Kerätyistä vuotuisista kokonaisenergiakulutuksista sekä työn yhteydessä seuratuista lyhyen aikavälin mittaustuloksista todettiin häviöiden olevan selkeästi korkeammalla tasolla kuin normaaliarvot. Häviöt vaikuttavat suoraan yhtiön tulokseen, joten lämpöhäviöiden pienentämiseen on syytä panostaa. Verkostossa havaittiin useita ongelmakohtia, joista lämpöhäviöt voivat johtua. Laskelmien perusteella näistä merkittävin on verkoston kauttaaltaan liian väljä mitoitus. Väljän verkoston ongelmien ratkaisu ei ole lainkaan helppoa, vaan vaatii kokeilu- luontoista parannusehdotuksien toteuttamista, sekä pitkäaikaista ja systemaattista laitoksen seurantaa. Tässä työssä todetaan ongelmien lähtökohdat, laatu ja eteneminen ja se, miten tilannetta voisi lähteä jatkoselvittämään.</p>	
Avainsanat	hakelämmitys, kaukolämpö, verkostohäviöt

Author Title Number of Pages Date	Antti Salmela Current state and energy efficiency of the district heat plant Haukivuori and heating network 60 pages + 2 appendices 2 December 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Design Orientation
Instructors	Arto Nieminen, CEO Jukka Yrjölä, Principal Lecturer
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to gather all available information and investigate the current state of a solid fuel heating boiler plant and district heating network located at Haukivuori. This work is part of the documentation gathered for future plans regarding the boiler and the network.</p> <p>First, the solid fuel boiler and its operation principles were studied. The annual heating efficiency of the boiler was calculated to be about 90%, above the average in Finland. No major problems were encountered.</p> <p>When the district heating network and the total energy consumption readings of the recent years were investigated, it was noticed that the amount of lost heating energy was very high. It is highly recommended that the losses should be reduced as much as possible since they have an impact on the company's financial result. The final year project established the sizing, balancing and design of the district heating network to be the main problems.</p> <p>It was established that the heating plant functions as designed, but some problems within the district heating network should be examined further.</p>	
Keywords	district heating, solid fuel boiler, energy efficiency

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tausta	2
2.1	Haukivuoren Lämpö Oy	2
2.2	Bioenergia Suomessa	3
2.3	Hake polttoaineena	4
3	Arinakattilan polttotekniikka ja palaminen	6
3.1	Palaminen	6
3.2	Arinakattilan säätö, hyötysuhde ja savukaasupäästöt	9
3.2.1	Hyötysuhde	9
3.2.2	Automaatio ja etävalvonta	10
3.2.3	Kattilan tehonsäätö	11
4	Haukivuoren hakekattilalaitoksen nykytila ja toimintaperiaate	12
4.1	Stoker- ja arinakattila	12
4.2	Tulitorvi-tuliputkikattila	15
4.3	Polttoaineensyöttö	15
4.3.1	Tankopurkaimen toimintaperiaate	16
4.3.2	Sivukuljettimen toimintaperiaate	17
4.3.3	Syöttösuppilon toimintaperiaate	17
4.3.4	Syöttöruuvi	18
4.3.5	Palamisen säätö	18
4.4	Jälkipalotila	19
4.5	Konvektio-osa	19
4.6	Savukaasujen hallinta	20
4.7	Tuhkaus	21
4.8	Paloturvallisuus	23
4.9	Etävalvonta	23
4.10	Polttoaineen vastaanotto ja varastointi	24
5	Haukivuoren KPA-kattilan tunnusluvut	26
5.1.1	Polttoaineen lämpöarvo	26
5.1.2	Hakekattilan hyötysuhde	28

6	Kaukolämpöverkosto Suomessa	32
6.1	Aluelämpöverkosto	32
6.2	Asiakaslaitteet	35
6.3	Verkostohäviöt	35
7	Haukivuoren aluelämpöverkoston tarkastelu	37
7.1	Haukivuoren aluelämpöverkosto	38
7.1.1	Lähtökohdat	38
7.1.2	Verkstorakenne ja asiakkaat	38
7.2	Tehdyt parannukset ja lämpöhäviöiden tutkinta	41
7.2.1	Varalämpölaitoksien kytkentä	41
7.2.2	Mittausvirheet	42
7.2.3	Kertahäviöt	46
7.2.4	Verkoston käyttöaste	47
7.2.5	Asiakaskulutukset	53
7.2.6	Muita laitoksen ja verkoston parannustoimenpiteitä ja meneillään olevia hankkeita	55
7.2.7	Biohauki Oy	56
8	Yhteenveto	56
	Lähteet	58
	Liitteet	
	Liite 1. Haukivuoren hakekattilalaitos, polttoaineen toimintakaavio	
	Liite 2. Haukivuoren Lämpö Oy, verkostokartta	

1 Johdanto

Haukivuoren Lämpö Oy on vuonna 1995 perustettu yhtiö, toimialueenaan sähkön- ja lämmöntuotanto. Yhtiö on sittemmin keskittynyt lämpöenergian tuottoon ja aluelämmön jakeluun. Lämpöverkkoa on laajennettu lähes vuosittain. Lämmöntuotanto toteutetaan hakekattilalaitoksella, jota on myös vuosien varrella muuteltu ja paranneltu useisiin otteisiin. Laitoksen lämpökattilat ovat kuitenkin vielä alkuperäiset ja toimintakuntoiset. Etelä-Savon Energia Oy osti Haukivuoren Lämpö Oy:n osake-enemmistön marraskuussa 2011 ja Haukivuoren Lämpö Oy toimii nyt uuden organisaation alla, kuitenkin itsenäisenä tytäryhtiönä. Vuosien varrella tehdyistä muutoksista on niukanlaisesti dokumentaatiota.

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on kerätä tiedot ja pääkohdat hakekattilan toiminnasta sekä aluelämpöverkosta. Lisäksi tarkastellaan kokonaisuuden energiataloudellisuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Lämpölaitos ja lämmönmyynti halutaan saattaa mahdollisimman tuottavaksi liiketoiminnaksi varmistaen tekniikan toimivuus ja nykyaikaisuus. Erityisesti kiinnitetään huomiota käyttövarmuuden parantamiseen, käytön mukavuuteen ja ongelmatilanteiden toimenpiteisiin. Insinöörityö tehtiin Haukivuoren Lämpö Oy:n käyttöön ja sen toiminnan edistämiseksi tulevaisuuden näkymiä silmällä pitäen. Työ aloitettiin vuonna 2012 yhdessä Haukivuoren Lämpö Oy:n silloisen toimitusjohtajan Markku Meklinin kanssa ja viimeisteltiin vuonna 2016 yhdessä nykyisen toimitusjohtajan Arto Niemisen kanssa. Hakekattilan käyttö- ja huoltotoiminta käytiin läpi laitosmies Roni Koskelinin kanssa.

Tässä työssä paneudutaan alkuun hieman yleisesti hakkeella tuotettuun kaukolämpöön sekä samalla aluelämpöverkoston toimintaperiaatteeseen niin Haukivuorella kuin myös muualla Suomessa. Tässä yhteydessä tutustutaan yleisesti hakekattilan toimintaan sekä käsitellään oleelliset seikat, jotka vaikuttavat hakekattilan kokonaishyötysuhteeseen. Lisäksi käydään läpi, miten lämpöenergia saatetaan asiakkaille hyödynnettäväksi.

Seuraavaksi käsitellään tiedossa olevia sekä insinöörityön edistyessä esille tulleita ongelmakohtia. Tässä osiossa esitellään myös Haukivuorella toimivan hakekattilan energiataloudellisuus ja lämmönjakoverkosto kokonaisuutena sekä koko järjestelmän energiataloudellinen tilanne edellisvuosien ajalta.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on saada energiayhtiön käyttöön ajantasainen dokumentaatio hakelaitoksen ja lämpöverkoston nykytilanteesta sekä perusteet tulevaisuuden huoltonäkymien ja investointitarpeiden ennakoimiseksi.

2 Tausta

2.1 Haukivuoren Lämpö Oy

Haukivuoren Lämpö Oy on vuonna 1995 Haukivuoren Osuuspankin (40 %), Haukivuoren metsänhoitoyhdistyksen (27 %), Haukivuoren kunnan (16 %) sekä useiden pienosakkaiden perustama lämpöenergian tuottoon ja aluelämmön jakeluun keskittyvä energiayhtiö. Yhtiö rakensi alkuun kaukolämpöverkon Haukivuoren taajamaan sekä 2 MW:n tehoisen hakelämpölaitoksen ja 1 MW:n tehoisen öljykattilan varalämpökeskukseksi. Kyseessä on vuonna 2002 valmistunut puuhakkeen polttoon tarkoitettu alasyöttöinen arinakattila. Myöhemmin verkkoon liitettiin myös Kankaalan ja Kotikartanon öljykattilat lämpöverkkoineen ja asiakkaineen. Etelä-Savon Energia Oy:n (ESE) tullessa osakkaaksi Haukivuoren Lämpö Oy:öön rakennettiin lisäksi vielä kaukokäytettävä 1 MW:n tehoinen öljykattila. Tullessaan enemmistö osakkeenomistajaksi vuonna 2011 (71 %) ESE on vastannut lämpökeskusten ja kaukolämpöverkon käytöstä ja kunnossapidosta. ESE omistaa tätä nykyään Haukivuoren Lämpö Oy:stä yli 90 %, ja tavoitteena on saavuttaa 100 %:n omistajuus. (4.)



Kuva 1. Haukivuoren lämpölaitos.

Kuvassa 1 on Haukivuoren lämpölaite. Etualalla on toimistorakennus sekä 1 MW:n varalämpökeskus ja taustalla hakesiilo ja näiden väliin sijoittuva 2 MW:n hakekattilayksikkö.

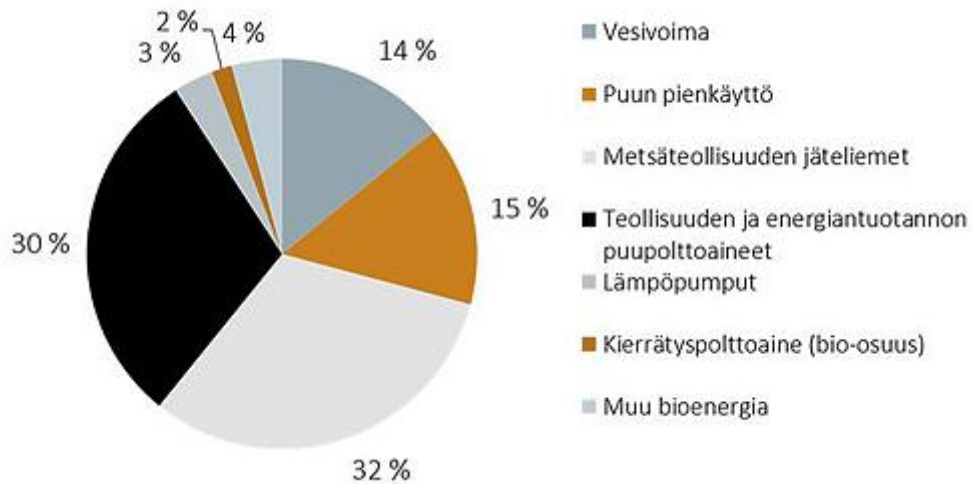
2.2 Bioenergia Suomessa

Bioenergia-ala on laaja kokonaisuus ja Suomessa merkittävä teollisuuden haara, johon oleellisesti liittyy myös uusiutuvan energian hyödyntäminen. Yleisesti bioenergialla tarkoitetaan uusiutuvasta biomassasta eli eloperäisestä aineksesta saatavaa energiaa. Karkeasti teollisuusala jakaantuu bioenergian raaka-aineiden tuottajiin, kerääjiin tai käsitteijöihin sekä bioenergian jalostajiin ja yksinkertaisuudessaan bioenergian käyttäjiin omassa tuotantoprosessissaan. Ala työllistää Suomessa noin 20 000 ihmistä (2014) (1) muun muassa energiantuotannossa, kuljetuksessa, logistiikassa, tuotekehityksessä ja energian raaka-aineen tuotannossa. Merkittävin bioenergian lähteistä on puu ja sen johdannaiset.

Suomessa on yleisesti ajateltu puun polttoa hiilidioksidineutraalina energian muotona ja täten sen on katsottu hillitsevän ilmastomuutosta. Toisin sanoen puuaineksen poltossa vapautuva hiilidioksidin määrä ei kasva verrattuna luonnollisesti hajoavan puun määrään, ja toisaalta vapautuva hiili sitoutuu takaisin kasvavaan puustoon. Oletus on, että biopolttoaineita käytettäessä uusiutumisenopeuden ehdoilla, kasvava puusto sitouttaa puun poltosta vapautuvan määrän hiiltä kasvaessaan. Tästä käsityksestä on kuitenkin monia eriäviä mielipiteitä. Helsingin yliopiston kansantaloudellisen metsäekonomian professori Olli Tahvonen toteaa ”Jos ajatellaan kasvavan puun käyttöä energian tuotannossa, sen ilmastovaikutukset ovat 50–100 vuoden aikana samaa luokkaa kuin fossiilisten polttoaineiden ilmastovaikutukset”. (2.)

Jotta päästäisiin Euroopan unionin ilmastomuutos- ja kestävän energiapolitiikan vuoden 2020 tavoitteeseen ”20 prosenttia energiasta tulee olla peräisin uusiutuvista energianlähteistä” (32), on Suomessa lisätty puun käyttöä energian lähteenä jo vuosien ajan. Tänä vuonna Euroopan komissio on kuitenkin laatimassa puun polton rajoittavaa metsädirektiiviä. Aiheesta käydään tällä hetkellä erittäin vilkasta keskustelua sekä mediassa että eri tiedefoorumeilla ja poliittisilla alustoilla. Jos Euroopan unionissa päätetään, että puun polttaminen on edelleen nollapäästöistä, se tulee ohjaamaan Suomen energian tuotantoa yhä vain enemmän puun polton kannalle. Toisaalta jos tunnustetaan, ettei

puun poltto ole päästötöntä tai hiilineutraalia, se tulee vaikuttamaan aivan oleellisesti Suomessa harjoitettavaan energiapolitiikkaan. Vuonna 2014 puun osuus Suomen energian kokonaistuotannosta oli 25 % ja uusiutuvien energian muotojen tuotannosta 76 %. (3). Kuvasta 2 nähdään lisäksi eri uusiutuvien energiamuotojen osuudet Suomen uusiutuvien energioiden kokonaiskäytöstä vuonna 2012.



Kuva 2. Uusiutuvan energian muotojen osuudet Suomen uusiutuvan energian kokonaiskäytöstä vuonna 2012 (3).

Suurin puuenergian käyttäjä on metsäteollisuus, joka hyödyntää energiantuotannossaan metsähaketta sekä omissa prosesseissaan syntyviä puupohjaisia sivutuotteita ja jäteliemiä (3).

2.3 Hake polttoaineena

Puuhake on normaalisti energiapuusta hakettamalla valmistettua polttoainetta. Haketta voidaan tehdä karsimattomasta kokopuusta, karsitusta rangasta, metsätähteestä tai muusta puumateriaalia. Haukivuorella on ollut käytössä sekä karsimattomasta kokopuusta että karsitusta rangasta valmistettua haketta (4). Käytön myötä on huomattu, että karsimattomasta puusta valmistettu hake heikentää laitoksen hyötysuhdetta ja tukkeuttaa hakesiilon tyhjennys- sekä polttoaineen syöttölaitteita. Nykyään Haukivuorella käytetään vain karsitusta rangasta valmistettua haketta (5). Hakkeen palakoko ei ole yhtenäinen, normaali tavoitepituus on 30–40 mm. Kokopuusta ja metsätähteestä tehdyssä hakkeessa on enemmän hienoainesta kuin karsitusta rangasta tehdyssä hakkeessa.

Hakkeen laatuominaisuuksista tärkein on kosteuspitoisuus. Puun kuivuuden merkitystä ei voida liiaksi korostaa, kun puhutaan puulämmityksestä. Puun energia-arvo riippuu lähes täysin puun kosteudesta hetkellä, jolloin se laitetaan kattilaan palamaan. Tästä syystä tulevan hakkeen alkukosteus on erittäin tärkeä määrittää, jotta energialaitos tietää maksavansa asianmukaisen hinnan käyväksi kelpaavasta kuivasta polttoaineesta. Lähes yhtä tärkeää on polttoaineen varastointi ennen kuin se käytetään KPA-kattilassa polttoaineena. Liian kostea hake on myös haitallista polttoaineen syöttölaitteille sekä vaikeuttaa polttoaineen sekoittumista. Talvella liian kostea hake voi holvaantua tai paakkuuntua siilossa ja kuljettimissa jumittaen näiden toimintaa. Märkä hake on myös altis homehtumaan, mikäli hakkeen kierto siilossa ei ole riittävän nopea. Myös liian kuivasta hakeesta voi aiheitua ongelmia kuten merkittävästi lisääntynyt palovaara ja kuiva-ainehävikki. Laadukas hake on tasalaatuista, palakoko 30–40 mm, kosteus 20–30 % eikä sisällä liiaksi hienoainesta tai epäpuhtauksia. (6.)

Energiapuun varastointiin kannattaa kiinnittää huomiota ja kuivaus kannattaa tehdä mahdollisimman pitkälle täytenä pyöreänä tavarana sadekatoksen alla, sillä vain tukkikasassa ilmanvaihto saadaan toimimaan. Hakeaumassa kuivumista ei juuri enää tapahdu, vaan auma alkaa toimia kompostin tavoin. Pahimmassa tapauksessa auma palaa tai vaihtoehtoisesti homehtuu paikoilleen. Vaikka oikeaoppinen hakeauma ehkäisee tehokkaasti hakkeen kastumista, esimerkiksi talvella ei pystytä välttymään siltä, ettei hakkeen siirron yhteydessä hakeauman päälle satanut lumi päätyisi mukaan palamiskiertoon.

Hakkeen kosteus voidaan mitata joko käyttämällä kosteusmittaria tai kuivaamalla testierän hakeesta ja punnitsemalla niin sanotut märkä- ja kuivapainot. Energialaitoksilla jälkimmäinen on yleisesti käytössä, sillä se antaa tarkemman ja lähempänä todellisuutta vastaavan arvon. Hake punnitaan useasti kuivauksen aikana, kun painon muutos pysähtyy, todetaan hakkeen olevan kuivaa. Hakkeen testierään tulisi ottaa huolellisesti näytteitä hakekuorman joka suunnalta, pääsääntöisesti mitä useammasta kohtaa on mahdollisuus näyte ottaa, sen tarkemman tuloksen saa. Hakekuorma on usein pinnaltaan kuivempaa kuin syvemmältä, joten pinnalta otetun hakkeen testierän kosteusmittauksen tulos johtaa usein kuorman kokonaiskosteuspitoisuuden aliarviointiin ja taloudellisiin tappioihin.

Kosteuden lisäksi hakkeessa vaihtelee sen tiiviys, joka riippuu haketuksen teknisistä ratkaisuksista. Tästä syystä hakeesta harvoin mitataan sen tilavuutta, vaan tärkeämpää on

hakekuorman paino. Energialaitos käy hakkeesta megawattikauppaa eli maksaa polttoaineesta saadun energian mukaan. Tämä määrittää kokonaispainon, suhteellisen kosteuden sekä kirjallisuudesta saadun hakkeen tehollisen kuiva-aine lämpöarvon perusteella. Puukaupan alalla olisi syytä huomioida suuret taloudelliset hyödyt laadukkaan tavaran toimittamisesta.

3 Arinakattilan polttotekniikka ja palaminen

Arinapoltto oli käytössä jo ensimmäisissä puuta polttavissa laitoksissa (10). Arinapolton etuna on se, että sillä pystytään polttamaan hyvin erilaisia materiaaleja, erikokoisina partikkeleina. Arinakattiloiden huonoja puolia on hidas säädettävyys, liikkuvien arinarautojen huollon tarve ja epäpuhtaampi palaminen verrattuna esimerkiksi leijupolttokattiloihin.

Arinapoltto on ollut pienten ja keskisuurten yksiköiden yleisin kiinteiden polttoaineiden polttomenetelmä teollistumiskauden alusta lähtien. Ensimmäiset puuta polttavat laitokset käyttivät arinapolttua. Kattiloissa käytettiin kiinteitä arinoita. Pienimmissä kattiloissa mekaaniset arinat syrjäyttivät kiinteät arinat, mikä mahdollisti turpeen arinapolton. (10.)

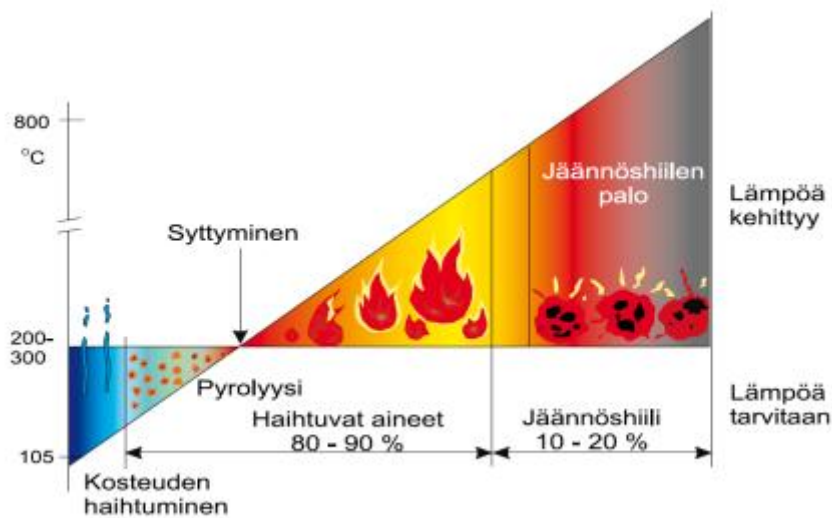
3.1 Palaminen

Yleinen käsitys on, että kiinteän polttoaineen palaminen arinalla noudattaa vaiheittain samoja päävaiheita kuin muillakin polttotekniikoilla. Todellisuudessa on kuitenkin huomattu, että polttoainepatja syttyy jo hyvin aikaisessa vaiheessa altopäin, mikä luultavamin johtuu arinarautojen lämmönjohtavuudesta. (15.) Arinapoltoissa esiintyvät yleiset palamisvaiheet, jotka ovat

- alkulämpeneminen
- kosteuden haihtuminen
- pyrolyysi ja kaasuuntuminen
- jäännöshiilen palaminen.

Aluksi polttoaine lämpenee kattilassa vallitsevissa olosuhteissa, säteilylämmön tai altopäin siirtyvän lämmön vaikutuksesta lämpötilaan, jossa kosteus alkaa haihtua. Kosteuden haihtuminen eli polttoaineen kuivuminen tarkoittaa polttoaineeseen varautuneen veden höyrystymistä. Kosteuden poistumiseen tarvittavan ajan tulisi olla mahdollisimman

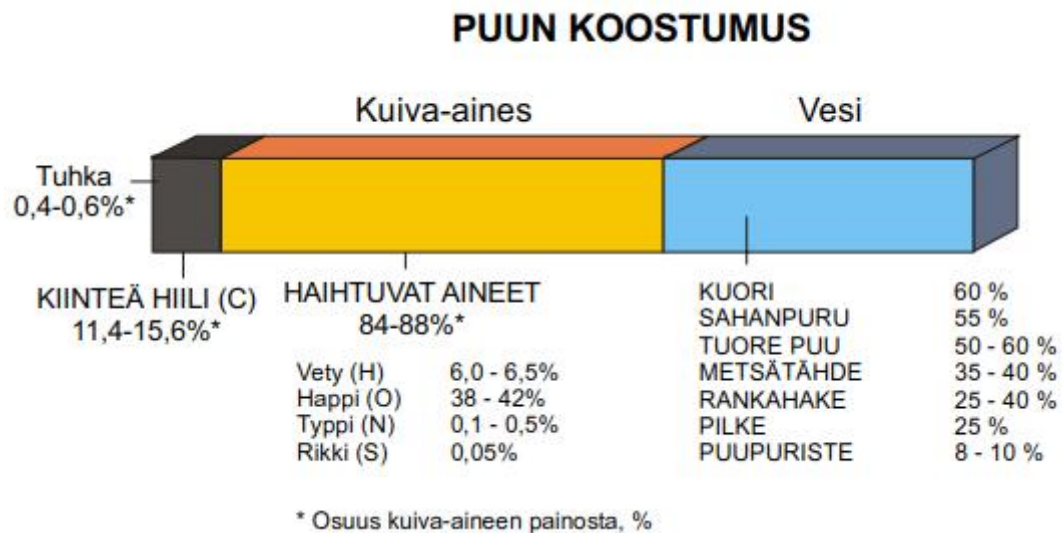
lyhyt, sillä kuivuminen vaikuttaa oleellisesti tulipesän keskimääräiseen lämpötilaan sekä hyötysuhteeseen. (14.) Arinakattiloissa kosteuden haihtumista tehostetaan aiheuttamalla oikeanlaiset olosuhteet alueelle jossa kuivuminen tapahtuu, muun muassa lämpötilan ja primääri-ilman avustuksella. Kiinteässä polttoaineessa polttoaineen kosteus on hyvin haitallista palamisprosessissa, sillä vesi ei reagoi polttoprosessissa. Sen sijaan veden höyrystyminen vaatii runsaan määrän lämpöenergiaa. (7.) Kuvassa 3 on esitetty yksinkertaisesti puun palamisen ja lämmönkehityksen vaiheet ja yhteys.



Kuva 3. Puun palaminen ja lämmönkehitys (8, s. 42).

Pyrolyysissä ja kaasuuntumisessa kiinteästä polttoaineesta erottuvat siihen sitoutuneena olevat haihtuvat aineet lämmön vaikutuksesta (Volatile Matter). Näitä kaasuja voidaan kutsua myös pyrolyysikaasuiksi, jotka syttyvät palamaan, kun niiden pitoisuus ja lämpötila kasvavat riittävästi. Kuten kuvasta 4 nähdään, puuhakkeessa haihtuvien aineiden osuus on suuri, noin 83–88 % kuiva-aineen painosta (8) ja täten pyrolyysi on lämpöenergian tuoton kannalta tärkein yksittäinen palamisvaihe biopolttoainetta käyttävissä kattiloissa. Näkyvä liekki on seurausta juuri näiden haihtuvien aineiden palamisesta. Kaasuuntumisen yhteydessä happi tunkeutuu polttoaineeseen ja reagoi jäännöshiilen kanssa. Tätä reaktiota kutsutaan jäännöshiilen palamiseksi. Jäännöshiili palaa ilman näkyvää liekkiä, ja tämä vaihe on ajallisesti merkittävin osuus, noin 50–70 % kokonaispaloajasta. Tästä syystä myös kotiolosuhteissa on tärkeää pitää savupellit ja raitisilmapellit auki riittävän pitkään vielä varsinaisen näkyvän liekin palamisen jälkeen. Myös arinakattilan hyötysuhteelle on merkitystä oikein mitoitetulla jäännöshiilen palamisvaiheella. Tuh-

kan ja savukaasujen mukana tulisi kulkeutua mahdollisimman vähän palavaksi kelpavaa materiaalia. VTT:n antamassa suosituksessa palamiskelpoisen aineen massaosuus niin savukaasuhiukkasissa kuin myös pohjatuhkassa tulisi olla alle 50 %. (11.)



Kuva 4. Puun koostumus (9, s. 35).

Arinapoltossa polttoaine kaasuntuu primääri-ilmassa. Primääri-ilma puhalletaan yleensä arinan alta polttoainekerroksen läpi ja sen määrää säädellään yleensä taajuusmuuttaja ohjatulla puhaltimella kattilalla ajettavan tehon mukaisesti. Käytännössä siis kattilaan syötettävän polttoaineen määrän mukaisesti. Lisäksi primääri-ilmaa käytetään mm polttoaineen kuivausvaiheessa. (11.)

Pyrolyysikaasujen palamiseen, jäännöshiilen palamisen loppuun viemiseen sekä savukaasujen ja siinä esiintyvien hiukkasten jälkipaloon käytetään sekundääri-ilmaa. Sekundääri-ilma on usein esilämmitettyä esimerkiksi kattilasta aiheutuvilla lämpöhäviöillä. Riittävällä hapen saannilla varmistetaan polttoaineen puhdas palaminen sekä päästöjen vähäisyys. Palamisen puhtaudesta kertoo ensisijaisesti savukaasujen häkäpitoisuus. Pääsääntöisesti savukaasujen häkä- ja happipitoisuuden perusteella siis säädetään sekundääri-ilman määrää, joka samalla määrittää suoraan käytettävän ilmakertoimen. Ilmakerroin tarkoittaa sitä suhdetta, miten paljon enemmän palamisprosessissa on ilmaa käytettävissä verrattuna teoreettisesti laskettuun palamisilman tarpeeseen. Liian suuri ilmakerroin heikentää arinakattilan hyötysuhdetta. Toisaalta liian pieni ilmakerroin aiheuttaa polttoaineen epäpuhtaan palamisen, jolloin palavaksi kelpavaa materiaalia menee huk-

kaan niin tuhkan kuin myös savukaasujen mukana. Käytännössä jokaisessa palamisprosessissa täydellinen palaminen vaatii teoreettista määrää enemmän palamisilmaa. Arinakattiloissa ilmakerron on tyypillisesti 1,3–1,4. (14; 12.)

Kiinteän polttoaineen palaessa on yleistä, että eri palamisen vaiheita tapahtuu yhtäaikaista. Esimerkiksi koivuklapi voi olla sisältä vielä kostea, pinnalta hiiltynyt ja silti haihtuvat aineet palavat jo näkyvällä liekillä. Tähän voidaan vaikuttaa muun muassa polttoaineen partikkelien koolla, primääri- ja sekundääri-ilman säätelyllä sekä kattilan lämpötilan säätelyllä.

3.2 Arinakattilan säätö, hyötysuhde ja savukaasupäästöt

3.2.1 Hyötysuhde

Hyötysuhteen laskennassa on käytössä kahta erilaista tapaa. Suorassa menetelmässä hakekattilalaitoksen hyötysuhde määritellään kattilasta hyödyksi saadun lämpöenergian suhteena kattilaan tuotuun laskennalliseen energiavirtaan. Energiavirta lasketaan käytetyn polttoaineen lämpöarvon ja määrän perusteella. Epäsuoralla menetelmällä hyötysuhde määritellään vertaamalla kattilahäviöitä hyödyksi saatuun energian määrään. Kattilahäviöitä ovat palamattomien materiaalien häviöt, tuhkan terminen lämpöhäviö, savukaasujen terminen lämpöhäviö, säteily- ja johtumishäviöt sekä kattilan epäjatkuvasta käytöstä aiheutuvat häviöt kuten käynnistyshäviö, pysäytyshäviö ja läpivirtaushäviö. (14.)

Palamisprosessissa polttoainehyötysuhteeseen sekä savukaasupäästöihin vaikuttava oleellisin yksittäinen tekijä on polttoaineen puhdas palaminen. Paras palamisen puhtauden indikaattori on savukaasujen häkäpitoisuus. Häkäpitoisuutta alentamalla vähennetään samalla lähes kaikkien muiden haitallisten päästöjen määrää. Häkäpäästöjen vähentäminen tapahtuu usein pienemmissä lämpölaitoksissa ilmakerrointa nostamalla. Tämä puolestaan aiheuttaa tehohäviöitä ja heikentää lämpökattilan hyötysuhdetta enemmän kuin häkäpäästöön liittyvä pieni häviövähennys. Hyötysuhteen ja savukaasupäästöjen optimitalanteet ovat kaukana toisistaan.

Tuotantotoiminnassa lämpölaitoksen kokonaishyötysuhteeseen merkittävin vaikuttava tekijä on polttoaineen kosteus ja laatu, etenkin polttoainekuormien tasalaatuisuus ja kyseistä polttoainetta varten oikein säädetty ja mitoitettu kattila sekä palamisprosessi. Itse hakekattilan hyötysuhteeseen vaikuttavat eniten ilmakerroin ja savukaasujen lämpötila. Täten hyviä indikaattoreita kattilan hyötysuhteen parantamiseen saadaankin savukaasuanalyysistä, jossa savukaasun lämpötila ja happipitoisuus mitataan normaalisti nimelistehon lisäksi useammalla eri osateholla. Savukaasujen lämpötilan tulisi olla korkeampi kuin veden ja happojen kastepiste, varsinkin rikkihapon kondensoituminen on erittäin haitallista. Toisaalta mitä alemmassa lämpötilassa savukaasut poistuvat ilmakehään sitä paremmin lämpöenergia on saatu talteen asiakkaille myytäväksi. Kohonnut savukaasujen lämpötila kertoo monista asioista, muun muassa palamisprosessin laadusta, polttoaineen laadun heittelystä sekä nuohoustarpeesta. Myös palamiskelpoisen materiaalin hukkaantuminen savukaasujen tai tuhkan mukana vaikuttaa hyötysuhteeseen, mutta sen osuus on verrattain pieni nykyaikaisissa kattiloissa.

Optimaalisesti toimiva nykyaikainen mekaanisilla arinoilla varustettu hakekattila voi saavuttaa hetkellisesti yli 90 %:n hyötysuhteen. Käytännössä pitemmän aikajakson hyötysuhde on kuitenkin 80–90 % hyvälläkin kattilalla ja laadukkaalla polttoaineella. Optimaalisen tasapainotilanteen saavuttamiseen sekä laitoksen toimintavarmuuden ja taloudellisen toimivuuden varmistamiseen laitoksen säätöautomaatiikka on oleellisessa roolissa.

3.2.2 Automaatio ja etävalvonta

Pienetkin kattilat tehoiltaan 0,5–5 MW tulisi jo varustaa myös riittävän laajalla säätö- ja etävalvonta-automaatiikalla. Tämän tulisi pitää sisällään vähintään

- kiinteistön ja piha-alueiden kameravalvonnan
- kattilarakennuksen ja polttoaineen käsittelylaitteisiin liittyvät varo- ja palovalvontalaitteistot
- polttoaineen syöttöjärjestelmien säätö ja valvontalaitteistot
- tulipesän olosuhteiden, kuten lämpötilan ja alipaineen mittaukset
- ajettavan tehon portaattoman säädön
- meno- ja paluuveden lämpötila- ja virtausmittaukset sekä säätölogiikan.

Hakekattiloita ei normaalisti mitoiteta verkoston huipputehoa varten, sillä puun poltto on puhtainta ja tehokkainta kattiloiden toimiessa lähellä nimellistehoaan. Peruskuormakattilan mitoitusteho on tavallisesti 4–60 % verkoston maksimitehon tarpeesta, jolloin sillä tuotetun energian osuus on 80–90 % verkoston kokonaislämmöntarpeesta. Nykytekniikan ansiosta hakekattiloita voidaan kuitenkin ajaa osatehoilla melko hyvällä hyötysuhteella. Tyypillisesti Haukivuoren kaltaisia mekaanisia arinakattiloita voidaan ajaa 20–100 % kattilan mitoitustehosta. Portaaton tehon säätö on kattilalaitoksen kokonaisyötysuhteen kannalta aivan oleellista. Tämä tapahtuu pääasiassa taajuusmuuttajaohjatulla syöttöruuvilla sekä palamisprosessia säätelevillä taajuusmuuttajaohjatuilla primääri- ja sekundääri-ilmapuhaltimilla. Myös savukaasupuhallin on normaalisti portaattomasti säätävä. (11.)

3.2.3 Kattilan tehonsäätö

Kattilalla ajettavan tehon tulisi olla suhteutettuna verkoston lämmitystehon tarpeeseen. Tähän tarvitaan mittaustietoja kaukolämpöveden meno- ja paluulämpötiloista sekä kokonaisvirtaamasta kaavan 1 mukaisesti

$$\phi = q_v \rho c_p \Delta t \quad (1)$$

ϕ	on lämmitystehontarve, kW
q_v	on vesivirta, dm ³ /s
ρ	on veden tiheys, kg/dm ³
c_p	on veden ominaislämpökapasiteetti, kJ / (kg*K)
Δt	on meno- ja paluueden lämpötilojen ero, K.

Palamisprosessista saatava teho määräytyy pääsääntöisesti käytetystä polttoaineen määrästä. Palamiseen tarvitaan sitä enemmän happea, mitä enemmän on polttoainetta käytössä, joten primääri-ilmavirtaa kasvatetaan samassa suhteessa kuin polttoainetta syötetään kattilaan. Sekundääri-ilman puhallinta tulisi ohjata savukaasuista mitatun häikäpitoisuuden perusteella. Kuten aikaisemmin todettiin, on savukaasujen häikäpitoisuus tärkein mittari indikoimaan puhdasta palamista. Tämän mittausvelvoite koskee tehoiltaan 5 MW ja sitä tehokkaampia hakekattiloita. Pienissä kattiloissa sekundääri-ilman määrää säädetään normaalisti jäännöshappipitoisuuden perusteella. Savukaasupuhaltimen tar-

koituksena on pitää kattilan tulipesä aina alipaineisena, ja tätä ohjataan paine-eromittauksen perusteella. Tulipesän lämpötila määräytyy käytettävän polttoaineen mukaan. Perussäätö tapahtuu tavallisesti savukaasujen takaisinkierätyksellä ja ilmanjaolla, jossa käytetään hyväksi esimerkiksi sekundääri-ilman suuttimia.

4 Haukivuoren hakekattilalaitoksen nykytila ja toimintaperiaate

Haukivuorella pääasiallisen energiantuotantolaitoksena toimii Livite Oy:n rakentama stoker-hakekattila. Haukivuoren kattilalaitoksesta tekee erikoisen se, että tämä kyseinen kattilalaitos on yhdistelmä perinteistä mekaanisilla arinoilla varustettua stoker-kattilaa sekä niin sanottua tulitorvi-tuliputkikattilaa. Niitä kattilalaitoksia rakennettiin aikanaan vain kaksi kappaletta koekäytettäväksi, joista toinen on jo sittemmin poistettu käytöstä. Tässä luvussa käydään pääpiirteittäin läpi kattilan tärkeimmät laitteet ja osat sekä toimintaperiaate oleellisimpine häilytyksineen. Pohjana on käytetty paikan päällä kerättyä tietoa, laitoksen hoitohenkilökunnan kautta kerättyä perimätietoa sekä Livite Oy:n tekemää luovutuskansiota, joka tässä tapauksessa oli monin tavoin vajaa. (16; 13.)

4.1 Stoker- ja arinakattila

Perinteinen stoker-kattila on vanha keksintö ja koostuu hyvin yksinkertaisista osista, kuten palopäästä, puhaltimesta, säiliöstä, syöttöruuvista ja sekoituslautasesta. Polttoainetta syötetään syöttöruovin avulla palopäähän, jossa polttoaine myös palaa lämmittäen lämmityskattilan. Stokerin antamaa tehoa säädetään polttoaineen syöttönopeudella yhdistettynä primääri-ilmavirtaan, jota puolestaan säädellään puhaltimien avulla. Perinteisessä stoker-kattilassa palopäässä pidetään aina tulta yllä, mistä syystä usein puhutaankin erikseen työtehosta ja ylläpitotehosta. Työteholla palamista tehostetaan ja nopeutetaan puhaltimen avulla lisäämällä primääri-ilman määrää samalla kun syöttöruuvi tiheentää polttoaineen syöttöväliä. Ylläpitoteholla polttoaineen syöttönopeus on asetetussa minimiarvossaan ja palopäässä pidetään tulta yllä vain esimerkiksi savupiipun vedon aiheuttaman ilmavirran avulla. Useimmiten suuremmissa teholuokissa, kuten Haukivuoren 2 MW:n arinakattilassa, stokerilla tarkoitetaan alakautta ruuvisyöttöistä arinapoltinta. (18.)

Haukivuorella käytössä on keskisyöttöinen, mekaanisesti liikkuvilla arinoilla toimiva kattila. Hakekattila on pääperiaatteiltaan samanlainen kuin kuvassa 5 esitetty KPA Uniconin tuote. Tulitila on kartion muotoinen, jossa arinaraudat ovat ympyrän muotoisella kehällä. Haukivuorella arina ei varsinaisesti ole pyörivä, vaan arinaraudat ovat ympyräsuuntaisessa edestakaisessa liikkeessä keskiakseliinsa kiinnitettyinä.



Kuva 5. Keskisyöttöinen arinakattila, KPA Unicon Biograte (29).

Kuvasta poiketen Haukivuorella arinoiden alla ei ole vesitilaa, vaan tuhka tippuu suoraan pudotuskuiluun ja sitä kautta tuhkakolalle. Tunkijaruuvi työntää uutta polttoainetta alapuolelta keskelle kekoa, jolloin keon kasvaessa, painovoima vierittää polttoainetta tasaisesti ylimmille arinoille. Hakkeen levittyminen arinoille on tavallaan automaattista eikä erillistä koneistoa tarvita. Polttoaineen jakautuminen tasaisesti koko arinan leveydeltä on ensiarvoisen tärkeää, sillä polttoaineen sekoittuvuus arinalla varsinkin leveysuunnassa on huonoa. Epätasainen hakkeen kerros arinoiden pinnoilla aiheuttaa primääri-ilman hallitsematonta karkaamista sieltä, missä arinan ja polttoainekerroksen vastus on pieni. On-

gelmaa on yritetty vähentää sillä, että polttoainepatjan ilmanvastus on vähäinen verrattuna arinarautojen aiheuttamaan ilmanvastukseen. Tähän tietenkin voidaan vaikuttaa arinarautojen mitoituksella ja muotojen suunnittelulla. (13; 16.)

Polttoaineen alkulämpeneminen alkaa tapahtumaan jo polttoaineen syöttölinjalla, mutta lopullisesti se tavoittaa kosteuden höyrystymiseen edellyttävän, noin 100 °C:n lämpötilan arinakattilan yläosassa. Höyrystyminen tapahtuu pääsääntöisesti säteilylämmön ja alaspäin arinarautoja pitkin johtuvan lämmön vaikutuksesta. Kosteuden höyrystyminen tapahtuu kattilan yläosassa, polttoaineen ollessa kekomuodostelmassa. Kekoon puhalletaan primääri-ilmaa tehostamaan hakkeen kuivumista sekä aloittamaan pyrolyysi- ja kaasuuntumisvaiheet. Seuraavaan palamisvaiheeseen valmiit, kuivuneet polttoainepartikkelit vierivät keon yläosista varsinaisille polttoarinoille. (13; 16.)

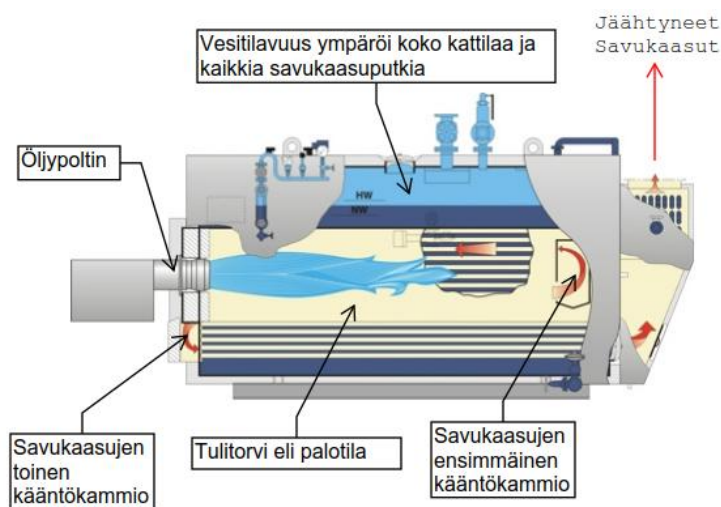
Arinoita liikuttelee oma hydraulikkakoneikkonsa, joka palvelee arinan kohennusta sekä tuhkausta. Kohennusväli toimii tehon mukaan automatiikan ohjaamana noin 4–10 kertaa tunnissa. Kohennusliike on noin 280 mm pitkä edestakainen liike. Arinaa kohennetaan siten, että ensiksi kohennetaan ylintä arinaa ja siitä alaspäin vuorotellen jokaista rivistöä erikseen. Liikkeellä saadaan aikaiseksi polttoaineen sekoittumista sekä hallittua siirtymistä palamisvaiheesta toiselle ja arinalta toiselle. Pääsääntöisesti eri palamisvaiheessa olevat partikkelit ovat eritasoisilla arinoilla. (13; 16.) Kuvassa 6 on vuonna 2012 käytöstä poistettuja arinarautoja.



Kuva 6. Haukivuorella käytöstä poistettuja arinarautoja.

4.2 Tulitorvi-tuliputkikattila

Tulitorvi-tuliputkikattilat ovat yleensä lieriön muotoisia suurvesikattiloita, joita käytetään keskiuurissa, alle 12 MW:n tehoisissa tuotantolaitoksissa. Polttoaineena kattiloissa käytetään tavallisesti öljyä tai kaasua, mutta myös arinallisia tulitorvi-tuliputkikattiloita on tehty. Suurvesikattiloille ominaista on se, että vesitilavuus suhteessa polttotehoon on hyvin suuri, minkä takia kattila itsessään toimii myös varaajana. Kattiloita valmistetaan sekä vaaka- että pystymallisina. Tulitorvi-tuliputkikattilat koostuvat niin sanotusta tulitorvesta eli sylinterin muotoisesta polttilasta, joka on pystymallisen kattilan keskustassa tai vaakamallisen kattilan alaosassa sekä tulitorvista eli savukaasuputkista, jotka kulkevat edestakaisin kattilan sisällä. Koko putkisto polttotiloineen on sisäänrakennettu yhteen suureen vesisäiliöön. Vesi siis ympäröi sekä tulipesää että savukaasuputkistoja. Suurvesikattiloiden yleisin malli on kolmivetoinen, mikä tarkoittaa sitä, että palotilan lisäksi savukaasut virtaavat tuliputkissa kahdesti vesitilan läpi. Tulitorvi mukaan laskien siis kolme vetoa. Kattilan molemmissa päissä on kääntökammio, jossa savukaasut vaihtavat virtaussuuntaa. (17.) Kuvassa 7 on yksinkertainen leikkaus tulitorvi-tuliputkikattilasta. Kyseessä on Bosch Industriekesselin valmistama korkeapainehöyrykattila.



Kuva 7. Esimerkki tulitorvi-tuliputkikattilan rakenteesta (33).

4.3 Polttoaineensyöttö

Kuten perinteiset stoker-hakekattilalaitokset, pääpiirteittäin Haukivuoren hakekattilalaitoksen polttoaineensyöttö ja hakekattila koostuu

- polttoaineen varastointisiilosta
- tankopurkaimista
- sivukolasta
- syöttösuppilosta
- tunkija-/syöttöruuvista
- arinakattilasta.

Polttoaine toimitetaan varastosiiloon joko kippaamalla tai kauhakuormaajalla. Käytännössä Haukivuoren siilon muodosta johtuen käytetään kauhakuormaajaa. Tämä johtaa hakkeen välivarastointitarpeeseen pihalla, jolloin se on alttiina kosteudelle ja muille luonnonolosuhteille. (13.)

Pääperiaatteeltaan hakesiiloa tyhjennetään tankopurkaimien avulla sivukolalle. Sivukola kuljettaa polttoaineen syöttösuppilon, joka sitten annostelee polttoaineen syöttöruuvin avustuksella lämmityskattilalle. Tuhka poistetaan arinan alta arinakolan ja ketjukolan avulla tuhkakonttiin. Liitteessä 1 on esitetty Haukivuoren hakekattilalaitoksen polttoaineen toimintakaavio.

4.3.1 Tankopurkaimen toimintaperiaate

Haukivuorella hakesiilossa tankopurkaimia on 4 kappaletta. Järjestelmä koostuu hydraulikkakoneistosta, joka sisältää pumpun varusteineen, suuntaventtiilit, painekeytkimen ja ylivirtausventtiilin. Jokaista tankopurkainta ajetaan automaatiologiikan antaman, tehosta riippuvan viestin mukaisesti ja ohjaus tapahtuu rajakatkaisijoiden avulla. Tankopurkaimien käynnistymistä ohjataan syöttösuppilon asetetun raja-arvon mukaan. Polttoaineensyöttöjärjestelmä pyrkii pitämään syöttösuppilon hakkeen pinnan asetetussa arvossaan. Purkaimet liikkuvat edestakaisessa liikkeessä, kun ääriraja saavutetaan, liikesuunta käännetään suuntaventtiilin asentoa muuttamalla. Mikäli joku purkutangoista ei saavuta äärirajaansa, havaitsee painekeytkin hydraulikkajärjestelmässä tapahtuvan paineen nousun, josta seuraa liikesuunnan kääntäminen. Suunnanvaihdon tapahtuessa paineen takia ennalta asetellun lukumäärän verran (asetusarvo 3 kpl), seuraa hälytys purkaimen ylipaineesta ja purkaimen moottori pysähtyy, pysäyttäen täten polttoaineen syötön.

Tankopurkaimien toimiessa samalla pyörii myös polttoaineen tasaustela, jonka tehtävänä on tasata polttoaineen määrä sivukolalle sekä rikkoa mahdolliset jäätyneet polttoaine kerrokset ja kokkareet. Tankopurkaimien toimintaan on vuonna 2014 asennettu lukitus, joka estää niiden käynnistymisen, mikäli sivukuljetin ei pyöri. Lukitus auttoi siihen, ettei sivukuljettimelle tule enää ruuhkia hakesiilon päätyyn. (13; 16.)

4.3.2 Sivukuljettimen toimintaperiaate

Sivukuljetin on perinteinen kolakuljetin, jonka tehtävänä on siirtää polttoaine syöttösoppiin. Kolakuljettimella polttoainetta voidaan siirtää pitkiä matkoja verrattuna esim. ruuvikuljettimeen. Etuna voidaan pitää myös suuria nousukulmia, tunteettomuutta suurille tai keskenään erisuuruksille kappaleille ja epäpuhtauksille, helppoa kuormausta sekä paloturvallisuutta. Sivukuljetin käynnistyy yhtäaikaaisesti tankopurkaimien kanssa ja pysähtyy vastaavasti. Sivukuljetin on varustettu pyörimisvahdilla, joka hälyttää laitteen ollessa pysähtyneenä, vaikka toimintakäsky on päällä.

Kuljettimien perusviritys on aseteltu siten, että tankopurkaimen syöttäessä 1 m³ polttoainetta sivukolalle sivukola kuljettaa 2 m³ polttoainetta syöttösoppiin. Tällä estetään hakkeen ruuhkautuminen kuljettimille. (13; 16.)

4.3.3 Syöttösuppilon toimintaperiaate

Syöttösuppilo tasaa polttoaineensyöttöä kattilaan kuljettavaan syöttöruuviin. Suppilon on asetettu hakkeen keskiraja (LS3), jolla ohjataan polttoaineen syöttölinjaston käynnistymistä. Lisäksi suppilon on asetettu ylä- ja alarajat (LS1 ja LS2). Ylärajan tehtävänä on pysäyttää hakkeen syöttö ja hälyttää ruuhkasta linjastolla. Alaraja toimii keskirajan varmistuksena tilanteissa, joissa keskirajananturi ei toimi oikein. Toimiessaan alaraja ohittaa keskirajan prioriteetissa ja pyytää kolakuljettimelta lisää polttoainetta suppilon. (13; 16.)

4.3.4 Syöttöruuvi

Syöttöruuvi eli tunkijaruuvi kuljettaa hakkeen kattilan palotilaan käytettäväksi polttoaineksi. Haukivuoren hakekattilassa tunkijaruuvi työntää hakkeen arinoiden keskeltä arinoiden yläosaan eräänlaiseksi keoksi (kuva 5). Arinoiden liike ja porrasmaisuus aiheuttavan palavan hakkeen etenemisen alemmas aina seuraaville tasoille.

Syöttöruuvia ja kattilan tehontuottoa ohjataan kattilasta lähtevän menoveden lämpötilan poikkeaman mukaan, ulkolämpötilaan sidotun säätökäyrän mukaisesti. Syöttöruuvia käytetään 5,5 kW:n tehoisella taajuusohjatulla moottorilla. Käyttömoottoriin on asetettu maksimi momenttiraja. Saavuttaessaan raja-arvon, automatiikka pyöryttää ruuvia hie-man taaksepäin, jonka jälkeen syöttö aloitetaan uudelleen. Edellisen toistuessa useamman kerran lyhyen ajan sisällä (asetusarvo 3 kertaa, 10 min:n sisällä) automatiikka pysäyttää ruuvin ja tapahtuu hälytys ruuvin tukkeutumisesta. Jos lämmöntarvetta ei esiinny, syöttöruuvi on pysähdyksissä. Mikäli kattilan lämpötila laskee ruuvin ollessa asetetulla maksimitehollaan eikä lämpötila saavuta aseteltua arvoa, seuraa hälytys viiveajan kuluttua (asetusarvo 15 min). Tunkijaruuvi sekä syöttösuppilo on suunniteltu siten, ettei hallitsematonta sekundääri-ilmaa pääse virtaamaan tulipesään. (13; 16.)

4.3.5 Palamisen säätö

Haukivuorella palamiseen tarvittava primääri-ilma puhalletaan arinoiden ja polttoainepatjan lävitse tulipesään. Primääri-ilmalla on päätehtävänä kuivattaa polttoaine sekä tuoda tarvittava happi ensimmäisiä palamisen vaiheita varten. Lisäksi primääri-ilmalla jäähdytetään arinarautoja, jotta ne kestäisivät kattilan palamistilan kovat lämpötilat ja rasitukset. Parhaan palamisprosessin aikaan saamiseksi polttoaineen tasalaatuisuus ja etenkin tasainen kosteuspitoisuus näyttelevät merkittävää osaa. Kun polttoaineen eteneminen eri palamisvaiheiden läpi on hyvin ennustettavissa, se edistää kattilalaitoksen säädettävyyttä. Palamisen säätö tapahtuu kattilasta lähtevän veden lämpötilan perusteella säätämällä tunkijaruuvien nopeutta sekä primääri- ja sekundääri-ilman puhaltimien pyörimisnopeutta. Lisäksi savukaasuissa sijaitsevan happianturin mukaisesti korjataan sekundääri-ilman määrää. Tällä pyritään varmistamaan puhdas palaminen, mutta myös ehkäisemään tarpeettomat savukaasuhäviöt. Toisioilman säädöllä pyritään myös välttämään tilanteita, joissa palotilan lämpötila nousisi liian korkeaksi. (13; 16.)

4.4 Jälkipalotila

Arinakattilan jälkeen savukaasujen virtaussuunnassa sijaitsee jälkipalotila. Se on sisähalkaisijaltaan 600 mm, n. 3 metriä pitkä savuhormi, joka yhdistää arinakattilan palotilan varsinaiseen konvektio-osaan. Jälkipalotilassa savukaasuista palavat vielä viimeiset orgaaniset yhdisteet eli palamiseen kelpaavat kaasuyhdisteet ja muut hiukkaset. Jälkipalotilan on kestävä suuria lämpötiloja, ja tästä syystä se on vuorattu palotiilillä ja palomassalla, joiden lämpötilakesto on 1 700 °C. Alkuperäinen vuoraus on ollut palokestoltaan 1 200 °C, mutta käyttökokemusten mukaan ja lähes vuotuisten korjaustarpeiden johdosta vuoraus on päätetty parantaa kestävämmäksi. Tämä samalla mahdollisti laitoksen käyttämisen noin 2,4 MW:n teholla eli yli nimellistehonsa 2 MW. (13; 16.)

4.5 Konvektio-osa

Konvektio-osassa palamisprosessissa saatu lämpöenergia siirretään savukaasuista veteen. Haukivuorella konvektio-osana käytössä on pystysuuntainen, kolmivetoinen tulitorvi-tuliputki kattila. Kattilassa itsessään on 1 MW:n tehoinen öljypoltin, jolla voidaan ajaa pieniä lämpökuormia tai paikata huipputehon tarvetta. Tulitorvi-tuliputki kattila toimii siis sekä arinakattilan konvektio-osana, lämpöakkuna että varalämpökattilana. Taulukossa 1 on esitetty konvektio-osan oleelliset tekniset tiedot. Kattilassa on oma tuhkaluukku, jonka tyhjennys ei kuitenkaan tapahdu automaattisesti, vaan se tehdään tarpeen mukaan tai muun nuohouksen yhteydessä. (13; 16.)

Taulukko 1. Konvektio-osan tekniset tiedot.

Vesitilavuus	6,9 m ³
Teho	2 MW
Suurin sallittu käyttöpaine	10 bar
Suurin sallittu käyttölämpötila	120 °C

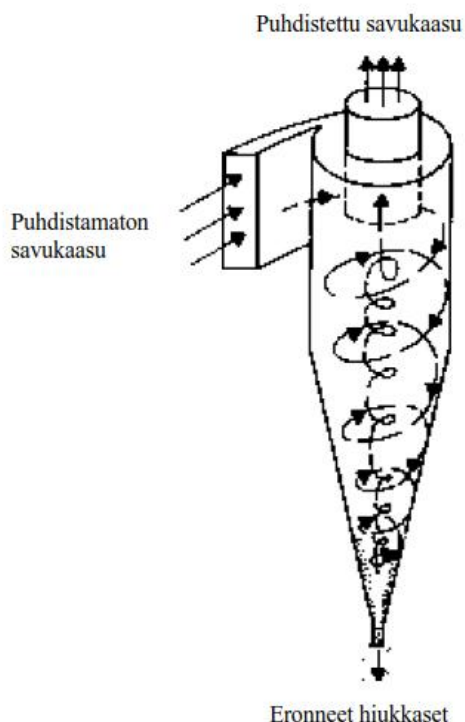
Konvektio-osasta savukaasut jatkavat matkaa jäähtyneinä savukaasujen puhdistuksen kautta savupiippuun.

4.6 Savukaasujen hallinta

Palotilan on aina oltava alipaineinen verrattuna kattilalaitoksen sisätiloihin. Tällä varmistetaan se, ettei sisätiloihin pääse muodostumaan häkäkaasua missään tilanteissa.

Alipaine aiheutetaan taajuusohjatun savukaasupuhaltimen avulla. Puhallinnopeutta säädetään portaattomasti etupesään sijoitetun paine-eromittauksen ja painelähettimen antaman tiedon mukaisesti. Sopiva alipaineen asetusarvo valitaan polttoaineen, käyttötaroituksen ja vallitsevien olosuhteiden mukaisesti. Haukivuorella asetusarvo on 30 Pa alipainetta. Mikäli tulipesän paine-ero laskee alle asetetun raja-arvon, tapahtuu tulipesän alipainehälytys ja asetetun viiveajan jälkeen automatiikka ajaa ensiö- ja toisioilmapuhaltimet kiinni. Savukaasupuhallin käy aina kattilalaitoksen ollessa toiminnassa. Edes ensimmäiset viitteet takapalon leviämisestä, kuten tunkijaruovin kohonnut lämpötila, eivät pysäytä puhallinta. Lukituksista vain syöttösuppilon lämpötila tai tulipalo pysäyttää puhaltimen. (13; 16.)

Puhallin toiminnallaan poistaa samalla myös kaikki mahdolliset piipun vetoon ja kattilan käynnistämiseen liittyvät vaikeudet sekä voittaa savukaasujen puhdistamisesta aiheutuvat painehäviöt ja ilmavirtavastukset. Puhdistus tapahtuu viimeisenä ennen piippua olevassa syklonissa. Sykloni soveltuu hyvin käytettäväksi Haukivuoren kaltaisessa, suhteellisen pienitehoisessa arinakattilassa, jossa poltetaan melko tasalaatuista ja matalan kosteuspitoisuuden omaavaa kiinteää polttoainetta. Syklonierottimen toiminta perustuu massavaikutukseen eli keskipakovoimaan. Haukivuoren tapauksessa kyseessä on vastavirtasykloni aksiaalisella sisään tulolla. Tässä savukaasu sisään mennessään saateen pyörivään liikkeeseen johdesiipien avulla. Kaasuvirtauksesta muodostetaan spiraalimuotoinen liikerata kohti syklonin pohjaa. Savukaasuissa olevat tuhka- ja nokihiukkas sinkoutuvat keskipakovoiman johdosta syklonin seinärakenteisiin, sekä niitä varten sijoitettuihin ripalevyihin. Syklonin pohjalla puhdistuneet savukaasut muodostavat uuden pyörteen ja nousevat ylös kohti poistoputkea. Puhdistuksessa erilleen saatu kiintoaines valuu syklonin pohjaa kohti, josta se tyhjennetään suoraan tuhkakolalle. Syklonissa on myös 0,18 kW:n täräytin eli niin sanottu vibra, joka ajoittain täräyttää syklonin laitoja ja ripalevyjä irrottaen suurimman osan niihin kiinnittyneistä hiukkasista. (13; 16.) Kuvassa 8 on esitetty yksinkertaistettu versio syklonierottimen toiminnasta.



Kuva 8. Tangentiaalisella sisääntulovirtauksella toimiva syklonierotin (19, s. 38).

Puhdistuksen jälkeen savukaasut virtaavat savukaasupuhaltimen läpi savupiippuun. Savukaasujen happiylijäämä- ja lämpötilamittaukset sijaitsevat väliputkessa ennen syklonierotinta. (19.)

4.7 Tuhkaus

Tuhkanpoisto hoidetaan alimmalta arinakehältä tuhkakolien avulla. Kolat liikkuvat edestakaisin ja tiputtavat tuhkan pudotuskuiluun. Tuhkakolaa liikutetaan hydraulisynterillä, jonka ohjaus tapahtuu magneettiventtiilin avulla. Edestakaisten liikkeiden määrä laskeaan kattilalla ajettavasta tehosta. Tuhkaus on osa arina-hydrauliikkakoneikon tekemää työtä. Tuhkan pudotuskuilussa on karamoottorilla varustettu avautuva pelti, joka ohjautuu auki tuhkakolan toimiessa kattilassa ja sulkeutuu vastaavasti tuhkauksen päättyessä. Karamoottorin liikerata on varustettu kahdella rajakohta-anturilla. Mikäli karamoottori ei saavuta rajaansa säädetyn ajan kuluessa, seuraa tuhkanpoistopellin häiriöhälytys. Tuhkanpudotusputkesta tuhka siirretään tuhkakonttiin ketjukolan avulla. Tuhkakontti sijaitsee kattilarakennuksen ulkopuolella eikä kontissa ole sähköisiä toimilaitteita. Tuhkan tyhjennys tapahtuu manuaalisesti tarkkailemalla kontissa olevan tuhkan määrää.

Tällä hetkellä automaattisen tuhkauksen kanssa on hieman ongelmia, kun tuhkakaset pyrkivät kasautumaan alimmalle arinalle. Kuvassa 9 näkyy arinan kekomuodostelma taustalla sekä ongelmaksi muodostuneet tuhkakeot etualalla. Tuhkakeot on lakaistava käsin aina hakekattilan viikoittaisien huoltotoimenpiteiden yhteydessä pudotuskuiluun. Tämän työn yhteydessä ei tuhkauksen toimivuutta tarkasteltu tämän tarkemmin, sillä se olisi vaatinut laitoksen alasajoa. (13; 16.)



Kuva 9. Haukivuoren palotila, taka-alalla palava hakekeko sekä etualalla kerääntynyt tuhkakeko.

4.8 Paloturvallisuus

Paloturvallisuudesta huolehtiminen on yksi tärkeimmistä toimintavarmuuteen ja turvallisuuteen huomioitavista seikoista. Tässäkin laitoksessa on monia tulipalon estäviä varmuustoimenpiteitä tai teknisiä ratkaisuja, joista tässä niistä merkittävimmät (13; 16):

- Tunkijaruuvi on varustettu palosulakkeella, joka aktivoituessaan (asetus arvo 65 °C) laukaisee tunkijaruuvin kanavassa sijaitsevan itsesäätyvän venttiilin. Venttiili päästää lämmitysveden putkiin, joiden päät sijaitsevan tunkijaruuvin putkessa. Palosulakkeen anturi sijaitsee tunkijaruuvin putken pinnassa arinan alapuolella.
- Vaikka lämmöntarvetta ei olisi, tunkijaruuvia silti pyöräytetään 1/3-kierros noin 10 min:n välein mahdollisen takatulen ehkäisemiseksi.
- Polttoaineen syöttö linja on myös suunniteltu siten, että takapalon estävä turvavyöhyke toteutuu. Toisin sanoen hake kuljetetaan kolakuljettimella yläviistoon, jolloin kolakuljettimen pää, syöttösuppilo sekä tunkijaruuvi muodostava polttoaineen välipudotuksen. Syöttösuppilo on varustettu sulkusyöttimellä.
- Syöttösuppilon lämpötilaa seurataan jatkuvasti.
- Syöttösuppilo ja ruuvi on myös varustettu käsikäyttöisillä sammutusvesiputkilla mahdollisia hätätilanteita varten.
- Kattilan palotilan lämpötilaa sekä alipaineisuutta seurataan jatkuvasti ja rajat alittava tai ylittävä mittaustulos aiheuttaa hälytyksen.
- Itse laitoksessa sekä viereisessä toimistorakennuksessa on palovaroittimet ja käsikäyttöisiä jauhesammuttimia tulipalojen varalta.

4.9 Etävalvonta

Etävalvontaa on aivan hiljattain parannettu lisäämällä paikanpäälle erillinen Fidelixin valvonta-alakeskus (VAK). Varsinaisesti mitään säätöjä tai ohjausta ei VAK:sta voi tehdä, mutta se mahdollistaa KPA-kattilalaitoksen oman logiikan tietojen sekä paikan päälle li-sättyjen muiden mittauksien etäseurannan. Tämä mahdollistaa samalla myös historia-tietojen keräämisen sekä trendiseurannan jokaisesta mittauspisteestä. Aikaisemmin kat-tilan toimintaa pystyttiin seuraamaan vain videolähetyksen kautta, joka tallensi paikan päällä sijaitsevaa KPA-kattilan oman logiikan säätömonitoria, jossa sitten pidettiin esillä palamisen kannalta keskeisimmät arvot. Tämän lisäksi videokameralla seurataan jatku-vasti myös tulipesää, piha-aluetta sekä siilon tilannetta. (16.)

4.10 Polttoaineen vastaanotto ja varastointi

Haukivuorella käytetään tällä hetkellä vain karsitusta rangasta haketettua puuhaketta. Hakkeen lämpölaitokselle toimittaa Haukivuoren Metsänhoitoyhdistys. Hakkeen laadun ylläpitämistä helpottavat vakiintunut toimitusketju ja pitkä toimitussopimus. Hakekuorman kosteuden määrittämiseen on laadittu tarkat laatuohjeet, joita noudatetaan jokaisen hakekuorman osalta. Energialaitoksen palkkaama henkilö ottaa hakekuormasta eripuolilta noin 5 näytettä, kokonaisuudessaan 10 litraa. Hake-erä punnitaan, kuivatetaan ja punnitaan uudestaan. Tulokset merkitään muistiin ja siirretään myöhemmin sähköiseen tietokantaan. (13; 16.)



Kuva 10. Haukivuorella käytössä oleva hakkeen kuivausuuni.



Kuva 11. Hakkeen punnitsemiseen tarkoitettu vaaka ja muistiinpanot.

Kuvissa 10 ja 11 näkyy Haukivuorella käytössä oleva kuivausuuni sekä punnitsemistyökalut. Myös kosteusmittari on käytettävissä, mutta käytännössä hake-erien kosteuden määrittäminen tehdään aina kuivaamalla. Jokaisesta haketoimituksesta siis otetaan 10 l näyte-erä, jonka perusteella koko kuorman tiheys ja kosteusprosentti lasketaan. Kertakuorman on sovittu olevan täysi rekanlavallinen, eli Haukivuoren tapauksessa noin 155 m³. Huomattavasti tarkemman tiedon toimitetusta hakkeen määrästä saisi punnitsemalla rekan sekä täyden lastin kanssa että tyhjänä. Haukivuorella tätä mahdollisuutta ei ole. Taulukossa 2 on kuvan 10 ottamishetkellä mitatut hakenäytteen märkä- ja kuivapainot.

Taulukko 2. Esimerkki toimitetuista hake-eristä v. 2012.

Näyte-erän tilavuus, l	Märkäpaino grammoina	Kuivapaino grammoina	Kosteusprosentti
10	2354	1720	26,93 %
10	3095	1723	44,33 %
10	3688	1965	46,72 %
10	2513	1537	38,84 %
10	3161	1754	44,51 %
10	3539	1752	50,49 %

Haukivuoren siilon muodosta johtuen haketta ei voida suoraan purkaa sisälle, vaan se on välivarastoitava pihalle, josta hake siirretään kauhakuormaajalla sisälle siilon. Tämä ei tietenkään ole optimitilanne, sillä pihalla hake on altis kastumiselle ja muille luonnon

voimille. Tämän lisäksi haketta ajetaan pihalle tyypillisesti kerralla aina enemmän ja käytetään sitten tarpeen mukaan niin kauan kuin aumaa riittää. Tilannetta helpottaisi esimerkiksi katos, johon hake välivarastoidaan. Tästä syystä Haukivuorella onkin ryhdytty seuraamaan hakkeen tulokosteuden ohella myös kattilaan menevän hakkeen kosteutta (5.). Näitä vertaamalla toisiinsa saadaan käsitys siitä, miten varastointi vaikuttaa polttoaineena käytettävän hakkeen kosteuteen ja samalla saadaan pohjaa katosinvestoinnin kannattavuuslaskentaan.

5 Haukivuoren KPA-kattilan tunnusluvut

5.1.1 Polttoaineen lämpöarvo

Hakekattilan höytysuhteen laskemiseen tarvitsee ensiksi tietää, miten saapumistilaisen polttoaineen tehollinen lämpöarvo määräytyy ja miten sen avulla voidaan laskea polttoaineesta saatava teoreettinen maksimi lämpöenergia. Tehollinen lämpöarvo (Q) tarkoittaa polttoaineen täydellisessä palamisessa kehittyvän lämmön määrää massaa kohden (MJ/kg). Joissakin tapauksissa lämpöarvo ilmoitetaan myös tilavuutta kohden, jolloin kyseessä on itseasiassa energiatiheys, E (MJ/m³). Kirjallisuudessa teholliset lämpöarvot ilmoitetaan yleensä kuiva-ainetta kohti. Saapumistilassa olevan hakkeen lämpöarvo lasketaan kaavojen 2 ja 3 avulla. (20.)

Hake-erän kokonaiskosteusprosentin määrittäminen näytteenotto kokein tapahtuu kaavan 2 avulla.

$$M_{sa} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100 \quad (2)$$

M_{sa} on märkäpainoa kohti laskettu kosteusprosentti saapumistilassa, %

m_1 on märän näytteen massa, g

m_2 on kuivatun näytteen massa, g

Saapumistilassa olevan hakkeen lämpöarvo lasketaan kaavalla 3

$$Q_{sa} = Q_k * \frac{100 - M_{sa}}{100} - \frac{Q_h * M_{sa}}{100} \quad (3)$$

Q_{sa}	on saapumistilaisen hakkeen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg
Q_k	on hakkeen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg
M_{sa}	on hake-erän kokonaiskosteus prosentti saapumistilassaan, %
Q_h	on veden höyrystymislämpö (2,443 MJ/kg, +25 °C, vakiopaineessa)

Toimitettu energiamäärä lasketaan kaavan 4 mukaisesti.

$$W_{hake} = \frac{Q_{sa}}{3,6} * m \quad (4)$$

W_{hake}	on toimitettu energiamäärä, MWh
$\frac{Q_{sa}}{3,6}$	on saapumistilaisen tehollisen lämpöarvo, muuntokertoimen kautta, MWh/t
m	on toimitetun polttoaineen massa, tonnia

KPA-kattilan hyötysuhde lasketaan kaavalla 5

$$\eta = \frac{W_{tuotettu}}{W_{hake}} * 100\% \quad (5)$$

$W_{tuotettu}$	on tuotettu lämpöenergia kaukolämpöverkkoon, mitattu arvo, MWh
----------------	--

Haukivuoren Lämpö Oy:llä on käytössä excel-taulukko 3 perustuen kaavoihin 1–6, jolla seurataan saapuvan hakkeen laatua. Taulukon mukaisesti määritellään myös sopimushinta hakkeen toimittajalle. Taulukossa 3 on esitetty saapumiseriä huhtikuulta 2016 ja toukokuulta 2012. Koska energiayhtiöt maksavat hakkeen toimittajalle hakekuorman energiansisältöön sidottua hintaa €/MWh, saapumiserän tehollinen lämpöarvo määrittelee myös polttoaineesta maksettavan korvauksen. Haukivuorella ei hakerekkujen kuormapainoja ole mahdollista punnita, mutta kuorman tilavuus tiedetään. Tällöin hakekuorman hinnan määrittämiseksi lasketaan energiatihedysten perusteella.

$$E_{sa} = \frac{1}{3600} * Q_{sa} * D_{sa} \quad (6)$$

E_{sa}	on hakkeen energiatiheys saapumistilassa, MWh/i-m ³
Q_{sa}	on tehollinen lämpöarvo saapumistilassa, MJ/kg
D_{sa}	on irtotiheys saapumistilanteessa, kg/i-m ³

$$\frac{1}{3600}$$

on muuntokerroin energiayksiköille MJ:sta MWh:iin.

Taulukko 3. Hakkeen olosuhde saapumistilassaan.

		Kosteus, lämpösisältö, laskutus									
		Hakepuun kuiva-aineen lämpöarvo		19,15		MJ/kg		Hakkeen perushinta		€/MWh	
Nro	Pv	Metsänomistaja	eräkkoko i-m3	Märkä- paino g 10L	Kuiva- paino g 10L	Puuaines %	Kosteus %	Tilavuus- paino kg/i-m3	Hakepuun kuiva-aineen lämpöarvo MJ/kg	Energia- sisältö MWh/i-m3	
Käytössä vai karsitusta rangasta tehty hake											
1.		Esimerkki erä v. 2016	155	2279	1592	69,9	30,1	227,9	19,15	0,800	
2.		Esimerkki erä v. 2016	155	2396	1704	71,1	28,9	239,6	19,15	0,859	
3.		Esimerkki erä v. 2016	155	2333	1738	74,5	25,5	233,3	19,15	0,884	
4.		Esimerkki erä v. 2016	155	2315	1549	66,9	33,1	231,5	19,15	0,772	
5.		Esimerkki erä v. 2016	155	2364	1722	72,8	27,2	236,4	19,15	0,872	
6.		Esimerkki erä v. 2016	155	2157	1582	73,3	26,7	215,7	19,15	0,803	
7.		Esimerkki erä v. 2016	155	2199	1589	72,3	27,7	219,9	19,15	0,804	
8.		Esimerkki erä v. 2016	155	2305	1565	67,9	32,1	230,5	19,15	0,782	
Käytössä karsimaton koko puu hake											
9.		Esimerkki erä v. 2012	155	2354	1720	73,1	26,9	235,4	19,15	0,872	
10.		Esimerkki erä v. 2012	155	3095	1723	55,7	44,3	309,5	19,15	0,823	
11.		Esimerkki erä v. 2012	155	3688	1965	53,3	46,7	368,8	19,15	0,928	
12.		Esimerkki erä v. 2012	155	2513	1537	61,2	38,8	251,3	19,15	0,751	
13.		Esimerkki erä v. 2012	155	3161	1754	55,5	44,5	316,1	19,15	0,838	
14.		Esimerkki erä v. 2012	155	3539	1752	49,5	50,5	353,9	19,15	0,811	

Lisäksi hintaa korjataan ennalta määrätyllä korjauskertoimella, joka riippuu hakkeen kosteusprosentista. Mikäli kosteus hakkeessa on liian suuri, tämä alentaa hakkeen perushintaa ja myyjän saamaa palkkiota toimitetusta hakkeesta. Hakepuun kuiva-aineen lämpöarvo on sovittu laskennassa olevan 19,15 MJ/kg. (5.)

Hakkeesta maksettava hinta on siis yhtä kuin: Toimitettu erä x Energiasisältö x Hakkeen perushinta x Korjauskerroin.

5.1.2 Hakekattilan hyötysuhde

Ennakkotietojen perusteella Haukivuoren hakekattilan hyötysuhde arvioitiin olevan melko hyvällä tasolla. Koska käytössä ei ole mitään keinoa laskea polttoaineen hetkelistä kulutusta tai seurata sitä hieman pidemmälläkään aikavälillä, päädyttiin tarkastelemaan vuotuista hyötysuhdetta, josta meillä on kulutustiedot tiedossa. Viimeisimpien vuosien aikana hakkeen saapumiserien kosteuden ja tiheyden on todettu olevan melko lähellä toisiaan riippumatta toimitusajasta, joten laskennassa on käytetty hyväksi keskiarvoja hakkeen kosteudelle, tiheydelle sekä energiasisällölle.

Suoralla menetelmällä lasketun hyötysuhteen kaava on 7. (24.)

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{hyöty}}{\dot{Q}_{tuotu}} = \frac{\dot{m}_v * c_{p(vesi)} * \Delta t}{\dot{m}_{pa} * c_{p(pa)}} \quad (7)$$

$\dot{Q}_{hyöty}$	on kattilasta hyödyksi saatu lämpövirta, kW
\dot{Q}_{tuotu}	on kattilaan tuotu energiavirta, kW
\dot{m}_{pa}	on polttoaineen massavirta, kg/s
$c_{p(pa)}$	on polttoaineen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa, MJ/kg
\dot{m}_v	on kaukolämpöveden massavirta, kg/s
$c_{p(vesi)}$	on veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/kgK
Δt	on meno- ja paluuveden lämpötilojen ero, K.

KPA-kattilalaitoksen kokonaisenergiantuotto ja hakkeen kulutuksen kautta lasketun tuodun energiavirran välinen suhde on laskettu taulukkoon 4, josta nähdään vuotuisen hyötysuhteen olevan noin 90 %.

Taulukko 4. Hakkeen vuosikulutus, tuotettu energia ja hyötysuhteet.

Vuosikulutus taulukot					
vuosi	Hakkeen kulutus i- m3	Toimitettu hakkeen energiasältö, MWh	Hakkeella tuotettu energia, MWh	KPA-kattilan hyötysuhde, %	KPA-kattilan hyötysuhde, %
2010	11752	9668	8947	93 %	89 %
2011	10788	8875	8259	93 %	89 %
2012	12615	10377	8718	84 %	81 %
2013	10790	8876	7960	90 %	86 %
2014	10622	8738	7936	91 %	87 %
2015	10154	8353	7574	91 %	87 %
				laskettuna 2016 näytteiden keskivaro pitoisuuksilla	laskettuna 2012 näytteiden keskivaro pitoisuuksilla
Käytetyt keskiverto-arvot		Suhteellinen kosteus	31,10 %	42,00 %	
		Tilavuus-paino saapumistilassa	244,4 kg/i-m3	305,8 kg/i-m3	
		Hakkeen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo	19,15 MJ/kg	19,15 MJ/kg	
		Toimitetun hakkeen energiasältö per kuutio	0,844 MWh/i-m3	0,837 MWh/i-m3	

Taulukkoon 4 on laskettu hyötysuhde käyttäen kahta eri tiedossa olevaa hakkeen toimintuserä kokonaisuutta, jotka poikkeavat toisistaan ominaisuuksiltaan. Tästä nähdään myös konkreettisesti, miten hakkeen laatu vaikuttaa KPA-kattilan hyötysuhteeseen. En-

nen kuin Haukivuoren Lämpö Oy siirtyi käyttämään vain karsitusta rangasta tehtyä hakea, voidaan olettaa, että todellinen vuotuinen hyötysuhde on lähellä vuoden 2012 hake-erien perusteella laskettua vuosihyötysuhdetta. Toisaalta vain karsitusta rangasta valmistettu hake, joka soveltuu Haukivuoren arinakattilan käyttöön paremmin, on nostanut hakekattilan hyötysuhdetta muutaman prosenttiyksikön verran.

Hakkeen kulutus on laskettu vuoden mittaan toimitetuista eristä sekä lisäämällä vuoden alussa oleva varasto saldo ja vähentämällä vuoden lopussa jäljellä oleva varaston osuus. Hakkeella tuotettu energia on mittariarvo, josta on vähennetty hakekattilan huoltotoimien sekä huipputehotilanteiden aikainen öljykattilan tuottama energia.

Kaiken kaikkiaan voidaan todeta hakekattilan hyötysuhteen olevan erittäin hyvällä tasolla. Tässä kokoluokassa Suomen keskiarvo hyötysuhteelle on 85 % (30), mikä herättää epäilyksen, onko saatu hyötysuhdearvo liian korkea. Suurin laskennallinen virhe tapahtuu todennäköisesti tiheyden määrittämisessä. 10 litran näyte on vain 0,006 % koko toimitetusta hake-erästä. Toinen merkittävä virheen mahdollisuus on toimitetun hake-erän kokonaistilavuudessa. Tätä arvoa on käytännössä katsoen mahdoton mitata, vaan se perustuu luottamukseen ja silmämääräiseen arvioon

Virhettä laskentaan muodostuu myös keskiarvolaskennasta ja välivarastoinnista pihalla. Pihalla hake on altis kastumaan, eikä arinoille syötetty polttoaine suinkaan ole aivan samanlaatuista kuin saapumishetkellään. Lisäksi on mahdotonta sanoa, milloin hake poltetaan kattilassa verrattuna siihen hetkeen, milloin hake on toimitettu tontille. Vuotuisessa seurannassa edellä mainittujen aiheuttama virhemarginaali laskennassa on kuitenkin verrattain pieni.

Hakekattilan huoltotoiminnalla on oleellinen merkitys kokonaishyötysuhteeseen. Hyötysuhteen ylläpitämiseen vaikuttavia tekijöitä on konvektio-osan ja kattilan nuohous riittävän usein. 1 mm:n paksuinen nokikerros lämmönsiirtopinnassa heikentää lämmönsiirtokykyä 5 %, ja epäpuhtaan palamisen vuoksi mainittu 1 mm nokea voi syntyä jo tunneissa (21). On kuitenkin lähes mahdotonta nähdä noen kertymisnopeutta. Paljon käyttökelpoisempi indikaattori lämmönsiirtymisen heikkenemisestä on savukaasujen lämpötila, jota on myös hyvin helppo mitata. Haukivuorella savukaasujen pitemmän ajan keskiarvolämpötila noustessa yli 150 °C:seen, kattila on nuohottava. Nuohous tiputtaa lämpötilan 120 °C:seen. Mittaus tapahtuu konvektio-osan jälkeen ennen savukaasujen puhdistusta. Hetkellisiä 200 °C:n ylittäviä lämpötiloja esiintyy varsin usein, kun kattilaa ajetaan pienillä

tehoilla eikä verkostossa ole lämmöntarvetta. Haukivuorella nuohousväli on ollut noin 3 viikkoa.



Kuva 12. Savukaasujen lämpötilamittaus.

Kuvan 12 ottamishetkellä 27.10.2016 nuohous oli suoritettu kuittauksen perusteella vain 3 vuorokautta aikaisemmin 24.10.2016. Lämpömittarin lukema ehti hieman laskea käynnin yhteydessä tehdyistä huoltotoista johtuen. Savukaasujen lämpötilaa on seurattu viikoittain laitoksen huoltokäyntien yhteydessä. Nyt tilannetta voidaan seurata myös etänä uudistetun valvonta-automaation avulla.

6 Kaukolämpöverkosto Suomessa

6.1 Aluelämpöverkosto

Aluelämpöverkostoksi tai kaukolämpöverkostoksi kutsutaan sitä putkistoa, joka toimittaa lämpöenergian lämmöntuotantolaitokselta asiakkaille. Yleisimmin lämmönsiirtoon käytetään kahta keskenään samankokoista meno- ja paluuputkea. Suomessa asiakkaat ovat kiinni kaukolämmössä epäsuoralla kytkennällä. Epäsuorassa kytkennässä kiinteistökohtainen lämmönsiirrin jakaa lämpötehon asiakkaan tarvitsemille kohteille (käyttövesiverkosto, patterilämmitysverkosto, ilmanvaihdon lämmitysverkosto yms.). KL-vesi ei suoraan koskaan kulje läpi asiakkaiden omien lämmityslaitteiden. (10.)

Aluelämpöverkosto on suljetun kierron järjestelmä, toisin sanoen samaa vettä kierrätetään yhä uudelleen asiakkaiden ja lämmityslaitoksien välillä. Lämpöverkkoon kuuluvat kaikki lämmönsiirtämiseen tarvittavat putket ja laitteistot. Nykyään yleisimmin kaukolämpöputket tehdään kiinnivaahdotetuista jäykistä putkielementeistä MPUK, 2MPUK tai taipuisasta kieppiputkesta, kuten Casaflex. Lämpöhäviöiden minimoimiseksi suositellaan niin sanottua kaksiputkirakennetta (MPUK), jossa meno- ja paluuputki sijaitsevat saman eristekerroksen sisällä. Tässä ratkaisussa tehollinen vaipan pinta-ala on suhteessa pienempi kuin millään muulla putkistorakenteella. Lisäksi MPUK-rakenteessa osa menoputken lämpöhäviöistä välittyy paluuputken kautta uudelleen käyttöön otettavaksi. Muilla johdotyypeillä lämpöhäviökustannukset voivat nousta korkeiksi pitkällä aikavälillä ja etenkin pitkillä etäisyyksillä, jos verkonkäyttöaste on huono. Taipuisien putkien käyttöä ei suositella suurille putkidimensioille, näiden eristepaksuus on suhteessa pienempi ja lämpöhäviöt suurempia kuin kiinnivaahdotettujen elementtien. (10.)

PUTKET ERISTELUOKKA 3, SUOSITUS L1/2010



DN	d · s (mm)	D (mm)	H (mm)	L (mm)	Paino (kg/m)	Vesitilavuus (l/m.)	U-arvo (W/m ² C)
20 + 20	26,9 · 2,6	160	19	12	6,0	0,8	0,130
25 + 25	33,7 · 2,6	180	19	12	7,5	1,3	0,141
32 + 32	42,4 · 2,6	200	19	12	9,3	2,2	0,157
40 + 40	48,3 · 2,6	200	19	12	10,0	2,9	0,180
50 + 50	60,3 · 2,9	250	20	12	14,3	4,7	0,177
65 + 65	76,1 · 2,9	280	20	12	17,9	7,8	0,203
80 + 80	88,9 · 3,2	315	25	12	22,6	10,7	0,216
100 + 100	114,3 · 3,6	400	25	12, 16	33,8	18,0	0,215
125 + 125	139,7 · 3,6	500	30	12, 16	46,6	27,6	0,210
150 + 150	168,3 · 4,0	560	40	12, 16	60,1	40,4	0,239
200 + 200	219,1 · 4,5	710	45	12, 16	91,7	69,3	0,247
250 + 250	273,0 · 5,0	900	45	12, 16	137,4	108,7	0,235



DN	d · s (mm)	D (mm)	L (m)	Paino (kg/m)	Vesitilavuus (l/m.)	U-arvo (W/m ² C)
20	26,9 · 2,6	125	12	3,6	0,4	0,105
25	33,7 · 2,6	125	12	4,0	0,6	0,124
32	42,4 · 2,6	140	12	4,9	1,1	0,136
40	48,3 · 2,6	140	12	5,2	1,5	0,154
50	60,3 · 2,9	160	12	6,9	2,3	0,167
65	76,1 · 2,9	180	12	8,5	3,9	0,189
80	88,9 · 3,2	200	12	10,6	5,3	0,201
100	114,3 · 3,6	250	12, 16	15,6	9,0	0,208
125	139,7 · 3,6	280	12, 16	19,0	13,8	0,235
150	168,3 · 4,0	315	12, 16	24,4	20,2	0,261
200	219,1 · 4,5	400	12, 16	36,5	34,7	0,271
250	273,0 · 5,0	500	12, 16	53,1	54,3	0,270
300	323,9 · 5,6	560	12, 16	68,5	76,8	0,300
350	355,6 · 5,6	630	12, 16	79,8	93,2	0,287
400	406,4 · 6,3	710	12, 16	101,6	121,8	0,294
500	508,0 · 6,3	800	12, 16	125,0	192,8	0,365
600	610,0 · 7,1	900	12, 16	162,0	278,8	0,430

Kuva 13. Uponor Wehotherm -kaukolämpöputkien mitat, massat, vesitilavuudet ja U-arvo. Ylhäällä MPUK-elementit ja alhaalla 2MPUK-elementit. (22.)

Lämpöhäviö q [W/m] asennettaessa kaksi yksiputkista rinnakkain												
CASAFLEX putkityyppi	DN	K-arvo [W/mK]	keskimääräinen käyttölämpötila TB [°C]									
			40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°
22/91 PLUS	20	0.113	3.40	4.50	5.70	6.80	7.90	9.00	10.20	11.30	12.40	13.50
30/91	25	0.143	4.30	5.70	7.10	8.60	10.00	11.40	12.60	14.30	15.70	17.20
30/111 PLUS	25	0.123	3.70	4.93	6.17	7.40	8.63	9.86	11.10	12.33	13.56	14.80
39/111	32	0.153	4.60	6.10	7.60	9.20	10.70	12.20	13.80	15.30	16.80	18.40
39/126 PLUS	32	0.137	4.12	5.49	6.87	8.24	9.61	10.98	12.36	13.73	15.10	16.48
48/111	40	0.197	5.90	7.90	9.80	11.80	13.80	15.80	17.70	19.70	21.70	23.60
48/126 PLUS	40	0.169	5.07	6.76	8.46	10.15	11.84	13.53	15.22	16.91	18.60	20.29
60/126	50	0.217	6.50	8.70	10.80	13.00	15.20	17.40	19.50	21.70	23.90	26.00
60/142 PLUS	50	0.189	5.66	7.54	9.43	11.32	13.20	15.09	16.97	18.86	20.75	22.63
75/142	65	0.266	8.00	10.60	13.30	15.90	18.60	21.30	23.90	26.60	29.20	31.90
75/162 PLUS	65	0.212	6.37	8.49	10.61	12.73	14.85	16.98	19.10	21.22	23.34	25.46
98/162	80	0.335	10.10	13.40	16.80	20.10	23.50	26.80	30.20	33.50	36.90	40.20
127/182	100	0.591	17.70	23.60	29.50	35.40	41.30	47.20	53.20	59.10	65.00	70.90

Asennustapa: Kaksi yksiputkista rinnakkain
 Putkien etäisyys: a = 0,10 m
 Peittösyyvyys: H = 0,60 m
 Maan lämpötila: TE = 10 °C
 Maan lämmönjohtavuus: λ E = 1.2 W/mK
 Eristeen lämmönjohtavuus: λ_{er} = 0.025 W/mK, λ_{er} = 0.0255 W/mK
 PE-vaipan lämmönjohtavuus: λ PE = 0.43 W/mK

Kuva 14. Brugg-Pema Casaflex -kaukolämpöpöputket, lämpöhäviö-taulukko (23).

Kuvan 13 ja kuvan 14 taulukoista nähdään, että varsinkin suurien dimensioiden putkissa pituusyksikköä kohti ilmaistun lämmönläpäisykertoimen välillä on merkittäviä eroja. Taipuisalla putkella on kuitenkin etunsa, kuten putkien kyky kompensoida lämpöliikkeitä, asennuksen helppous ja nopeus, sekä yleensä pienemmät kokonaiskustannukset.

Eristettyjen putkielementtien lisäksi verkosto koostuu monista eri kaivoista, venttiileistä, paineen korotus- ja tasausasemista, ilmausyhteistä, tyhjennyksistä sekä lämpölaajenemisen huomioon ottavista putkisto-osista. Pääkiertovesipumput sijaitsevat yleensä kattilalaitoksien yhteydessä. Lämmön vastaanottoon ja jakeluun kiinteistöissä on jokaiselle asiakkaalle omat, varta vasten mitoitettut laitteistot, joita kutsutaan yleisesti lämmönjakokeskuksiksi.

Aluelämpöverkoston hyötysuhde määräytyy verkostoon tuotetusta energian määrästä ja asiakkaille myydyistä energian määrästä. Suurin hyötysuhdetta alentava tekijä on matkalla tapahtuvat verkoston lämpövuodot, joita yritetäänkin minimoida kaikin keinoin.

6.2 Asiakslaitteet

Suomessa kaukolämmön asiakaskanta on erittäin merkittävä, 75–85 prosenttia kerrostaloyhtiöistä ja lähes puolet rivitaloyhtiöistä lämpiää kaukolämmöllä (25). Lämpö siirretään asiakkaiden käyttöön tähän käyttöön tarkoin suunnitellussa kaukolämmön lämmönjakokeskuksessa, joka perinteisesti koostuu muun muassa lämmönsiirtimistä, säätölaitteista, kiertovesipumpuista sekä paisunta- ja varolaitteista. Lisäksi jokaista asiakasta varten KL-verkosta löytyy energialaitoksen mittauskeskus sekä liittymäjohto ja putkistot kiinteistön sisällä, joilla lämmönjakokeskus on kytketty kaukolämpöverkoston. Lämmönjakokeskuksen omistaa ja huoltaa asiakas, kun taas mittauskeskuksen omistaa lämmönmyyjä, vaikka se sijaitseekin yleensä asiakkaan lämmönjakohuoneessa. (10.)

Asiakslaitteiden tekninen käyttöikä on noin 20 vuotta (26), mikä on syytä muistaa jokaisen kiinteistön pitkän tähtäimen kunnossapitosuunnitelmassa. Laitteiden vioittuminen pahimpien pakkasten aikaan voi aikaan saada merkittäviä vaurioita. Lämmönjakokeskuksen oikea mitoitus on myös hyvin tärkeä koko verkoston toiminnan kannalta. Tämä näkyy niin ikään kiinteistön energian kulutuksessa ja asumisviihtyvyytenä kuin myös kaukolämpöverkon toiminnassa. Tässä työssä ei kuitenkaan paneuduta tämän tarkemmin lämmönjakokeskusten mitoitukseen. Kartoitusta Haukivuoren asiakaslaitteista ei suoritettu tässä yhteydessä.

6.3 Verkostohäviöt

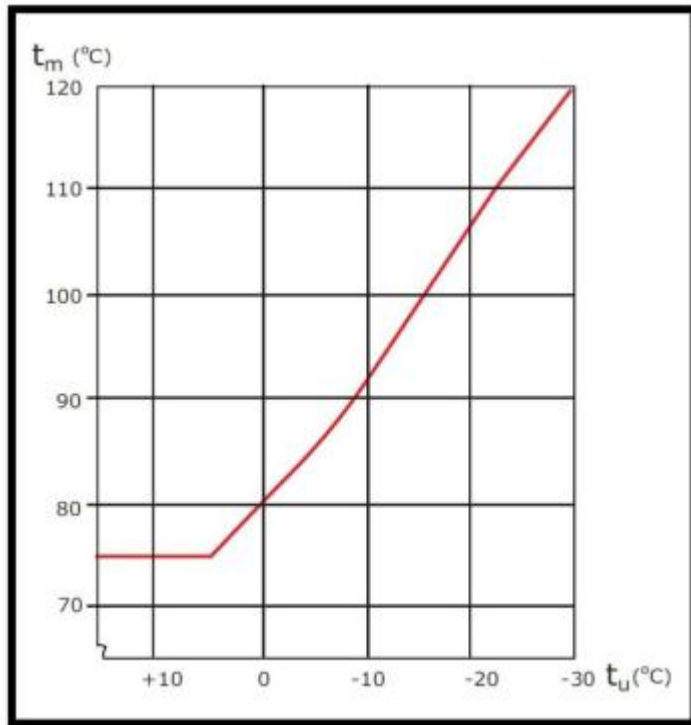
Verkostohäviöt ovat suurin hyötysuhdetta alentava tekijä KL-järjestelmässä. Verkoston lämpöhäviöihin vaikuttaa monet tekijät. Merkittävimmät näistä ovat

- verkon liian korkea käyttölämpötila
- putkiston liian ohut lämpöeristys
- putkiston eristeen suuri lämmönjohtavuus eristeaineen vanhentumisen vuoksi
- kaivojen huono lämmöneristys
- vuotovedet ulkopuolisena jäähdyttäjänä
- suurin maaperän lämmönjohtavuus

- putkiston matala peitesyvyys
- eristystyön heikko laatu
- verkon huono käyttöaste (putkikokojen ylimitoitus)
- lämmön mittausepätaarkkuudet (tulkitaan häviöksi, koska näistä ei voida laskuttaa).

Kokonaisuudessaan lämpöhäviöt ovat suuruusluokaltaan 10–20 % pienissä verkostoissa, kun putkikoot ovat keskimäärin DN50, ja suurissa verkoissa 4–10 %, kun putkikoot ovat keskimäärin DN150 (10). Verkoston lämpöhäviöt maastoon ovat suoraan verrannollisia kaukolämpöputken keskilämpötilan ja maanperän lämpötilan lämpötilaeroon, sekä lämmönluovutuspinna-alaan. Pienten verkkojen suhteellisesti suuremmat häviöt johtuvat suuremmasta vaippapinta-alasta suhteessa siirtokykyyn. Samasta syystä on myös hyvin suositeltavaa käyttää kahden putken järjestelmää (MPUK), silloin kun muut asennustekniset sekä mitoitusmekaniset seikat sen sallivat. Pienten kaukolämpöputkien lämpöhäviö voi olla jopa 30–40 % pienempi käytettäessä kaksiputkielementtejä. (27.)

KL-verkoston menoveden lämpötilaa säädetään usein ulkolämpötilan mukaisesti, toisin sanoen rinnan asiakkaiden kiinteistöjen lämmöntarpeen mukaan. Tätä ulkolämpötilasta riippuvaa säätöarvoa kutsutaan yleisesti säätökäyräksi. Suosituskäyrä normaali kaukolämpöverkossa on kuvan 15 mukainen, kun kesäisin verkkoon syötetään ulkolämpötilasta riippumattomasti 75 °C:n lämpöistä kaukolämpövettä, josta asiakkaat saavat riittävän tehon käyttöveden lämmittämiseen. Säätökäyrän valinnassa tulee kiinnittää huomiota siihen, että etäisimmilläkin asiakkailla on ensiöpuolella riittävä lämpötilataso. Mitoitusarvo asiakkaan käyttöveden siirtimeen menevälle kaukolämpöveden lämpötilalle on 70 °C. Lämpöhäviöiden pienentämiseksi on suositeltavaa saada menovesi ja sen myötä koko verkoston keskilämpötila mahdollisimman matalaksi. Käytännössä kuitenkin lämpötilatasot ovat aina optimitasoa korkeammat siitä syystä, että verkostossa on oltava reserviä yllättäviä lämmöntarpeita varten. (27.)



Kuva 15. Menolämpötilan ohjekäyrä ulkolämpötilan mukaan (10, s. 336).

Suurin osa lämpöhäviöiden aiheuttajista on poistettavissa oikean suunnittelun, mitoitus- ja teknisten ratkaisujen valinnalla sekä nykyisissä verkostoissa erilaisin huolto- ja korjaustoimenpitein. Verkostoon kuitenkin jää aina jonkin verran lämpöhäviöitä jo pelkästään siitä syystä, ettei eristepaksuuden kohtuuton lisääminen ole kannattavaa. (10.)

7 Haukivuoren aluelämpöverkoston tarkastelu

Luvussa 6 käsitellyn hakekatilan toimintaperiaatteen sekä nykytilanteen lisäksi toinen oleellinen seikka, johon tämän työn yhteydessä kiinnitettiin huomiota, on koko verkon taloudellisuus. Lämmönmyynnin kannattavuuden kannalta on tärkeä tietää, millä hyötysuhteella lämpöä tuotetaan valitusta polttoaineesta sekä millä hyötysuhteella lämpö siirretään asiakkaiden käyttöön. Alkuun olikin tiedossa, että verkostohäviöt ovat poikkeuksellisen suuria. Toisin sanoen lämpöä hukattiin häviöiden muodossa. Toisaalta hakekatilan toiminta ja hyötysuhde oletettiin varsin hyväksi.

Järjestelmän energiataloudellisiin lukuihin lähdettiin paneutumaan viimeisimpien vuosien kulutuslukujen perusteella.

7.1 Haukivuoren aluelämpöverkosto

7.1.1 Lähtökohdat

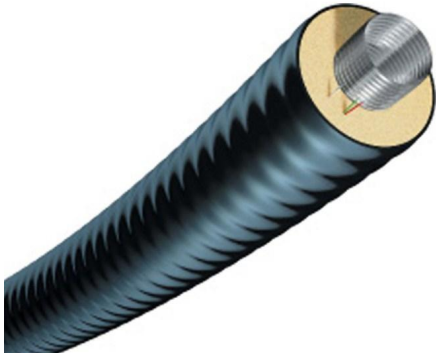
Opinnäytetyön valmisteluvaiheessa oli jo selvää, että verkostohäviöt ovat normaalia suuremmat. Monen vuoden seurannan perusteella häviöt ovat olleet noin 25 %:n luokkaa, kun Suomessa alle 5 MW:n järjestelmissä keskiarvona viimeisen viiden vuoden ajalta on 12,6 %. (30.)

7.1.2 Verkstorakenne ja asiakkaat

Haukivuoren kaukolämmön runkoverkko ja valtaosa asiakasliittymistä on rakennettu vuosina 2000–2004 lämpöyhtiön alkuaikoina ja koostuu pääosin 2MPUK-rakenteellisesta runkoputkesta (kuva 16) sekä taipuisasta kaukolämpöputkista (kuva 17) tehdyistä talohaaroista ja pienemmistä runkojohdon päistä. Merkille pantavaa on, että verkostossa on käytetty vain vähäisesti kaksiputkielementtiä. Käytännössä vain 2010 jälkeen liittyneet asiakkaat on yhdistetty verkostoon MPUK-järjestelmällä. KPA-laitokselta lähtevä runko on kokoa DN150 kiinnivaahdotettu 1-putkielementti.



Kuva 16. 2MpuK: Kiinnivaahdotettu jäykkä kaukolämpöputkielementti (35).



Kuva 17. Casaflex: kiinnivaahdotettu taipuisa kaukolämpöputki (34).

Tämänhetkinen asiakkaiden kokonaistilausteho on 4,155 MW. Tilausteho on laskettu kiinteistöjen lämmöntehotarpeesta mitoitusilanteessa -29 °C sekä huomioimalla 25 % kiinteistöjen käyttöveden tuottoon tarvitsemasta lämmitystehosta. Tilausvesivirta on muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta suoraan verrannollinen tilaustehoon mitoitusjäähdytymän ollessa $\Delta T = 50\text{ °C}$. Haukivuoren taajama-alueella ei kovin paljon potentiaalista laajenemismahdollisuutta ole. Suurin osa keskustan liikerakennuksista ja isommista asiakkaista kuuluu jo kaukolämpöön. Energiayhtiön näkökannalta täysin uuden runkojohdon rakentaminen pelkästään omakotitaloasiakkaita varten ei ole kovin kannattavaa, sillä laskennallinen tuotto on liian pieni ja takaisinmaksuaika liian pitkä. Taulukossa 5 on esitetty nykyiset energialaitoksen asiakkaat tilaustehoineen.

Taulukko 5. Haukivuoren Lämpö Oy:n asiakkaat.

HAUKIVUOREN LÄMPÖ OY		
Asiakkaat	tilausteho	vesivirta
	kW	m ³ /h
Haukivuoritalo	160	2,8
Kotikartano	320	5,5
Kirjasto	30	0,5
Nuorisotalo	50	0,9
Hauki-Halli	200	3,4
Ala-aste	195	3,4
Yläaste ja lukio	426	7,3
Paloasema	35	0,6
Vastaanottohalli	320	5,5
Terveysasema	90	1,5
Haukivuoren Osuuspankki	145	2,5
Kiinteistö Oy Työnkulma	170	2,9
Haukivuoren Vanhustentalosäätiö	150	2,6
Keskustie 64	80	1,4
Välimuodon asumisyksikkö	89	1,5
Kospirt Oy	250	4,3
Mikkelin seurakuntayhtymä	135	2,3
Haukivuoren Mhy	25	0,4
Perhekoti Kunto	25	0,4
S-Market	80	1,4
Kiinteistö Oy Rinteenpalsta	105	1,8
Kiinteistö Oy Hauki-Koivikko (1.10.09)	114	2,0
Kankaalan Talonhoito Oy (1.11.09)	145	2,5
Kiinteistö Oy Haukihaka (21.10.09)	132	2,3
Vihannesyhtymä 3T Oy (13.10.09)	90	1,5
As Oy Haukivuoren Itähovi (6.10.09)	75	1,3
Pääskylän palvelukoti (2.11.09)	117	2,0
Mikalo Oy Mustikkatie (13.10.2010)	88	2,4
S ja M Alic (2.12.2010)	12	0,2
As Oy Osuusrinne /Forisan (1.10.2011)	75	1,8
Nykäsen Kone ja Urheilu (1.10.2011)	75	1,3
Reijo Meriluoto (1.10.2011)	12	0,2
E ja R Vahvaselkä (1.10.2011)	12	0,2
As Oy Haukivuoren Pirttitie 11 (1.9.2011)	50	1,4
As Oy Haukivuoren Pirttitie 7 (1.9.2011)	50	1,4
Matti Tarkiainen Keskustie 63	28	0,4

4155

Viime vuosien kokonaismyynti on ollut noin 6 000 MWh:n luokkaa. Lukuun ottamatta vuotta 2012, myös öljyn käyttö on ollut hyvin vähäistä, noin 3 % kokonaisenergiantuotannosta. Vuotuinen verkostohäviö on vaihdellut 25 %:n molemmin puolin, mikä kuten aikaisemmin todettiin, on selkeästi yli vastaavan verkon normiarvojen. Taulukossa 6 on kerätty tuotetut ja myydyt kokonaisenergiamäärät sekä laskettu niiden perusteella vuosittaiset verkostohäviöt.

Taulukko 6. Haukivuoren kokonaisenergiankulutus viimeisen 6:n vuoden ajalta.

vuosi	Hakkeella tuotettu energia, MWh	Öljyn kulutus, l	Öljyllä tuotettu energia, MWh	Kokonaisenergian tuotanto, MWh	Kokonaismyynti, MWh	Verkostohäviöt, %
2010	8947	22970	280	9227	6818	26
2011	8259	51473	420	8679	6238	28
2012	8718	101402	809	9527	7211	24
2013	7960	28179	240	8200	6168	25
2014	7936	27709	236	8172	6149	25
2015	7574	25009	213	7787	5773	26

Käänteisesti käytetään myös verkon hyötysuhdetta kuvaavaa lukua, lämmön myynti / lämmön hankinta, joka Haukivuorella on siis noin 75 %. Yksinkertaisuudessaan luku kuvaa verkon kuntoa, eristystasoa ja käytön tehokkuutta. Tähän lukuun kuuluvat myös energian mittaushäviöt ja mittausvirheet. Haukivuorella lämpöhäviöihin lasketaan myös siilopohjan lämmitys, joka on otettu välisiirtimen kautta suoraan kaukolämmöstä. Tätä varten on vasta hiljattain asennettu erillinen energiamittaus ja jatkossa saadaan tietoa siitä, minkä suuruinen osuus vuotuisista häviöistä käytetään siilon ylläpitolämpönä.

7.2 Tehdyt parannukset ja lämpöhäviöiden tutkinta

Verkoston suurehko häviöprosentti on tiedostettu myös aikaisemmin ja asian korjaamiseksi onkin tehty monenlaisia toimenpiteitä. Vuonna 2011 verkoston asiakaslaitteet, mitoitukset sekä kytkennät tarkastettiin kaikki. Tarkastuskierroksella ei havaittu mitään erityisen suuria puutteita. Ensiöpuolen kytkennät olivat asianmukaiset ja kiinteistöissä käytetty energia meni kaikissa tapauksissa energiamittauksen kautta. Muutamia eristyskiä korjattiin tarkastuskierroksen havaintojen perusteella sekä kiertoa rajattiin tai tilaustehoa kasvatettiin niissä kohteissa, joissa se havaittiin tarpeelliseksi. Suuruusluokaltaan kuitenkin ei merkittäviä muutoksia tehty.

7.2.1 Varalämpölaitoksien kytkentä

Varalämpölaitoksista aiheutuvat lämpöhäviöt voivat pahimmillaan olla hyvinkin merkittäviä. Kattiloita on aina pidettävä tietyn lämpöisinä, jotta ilmassa oleva kosteus ei pääse

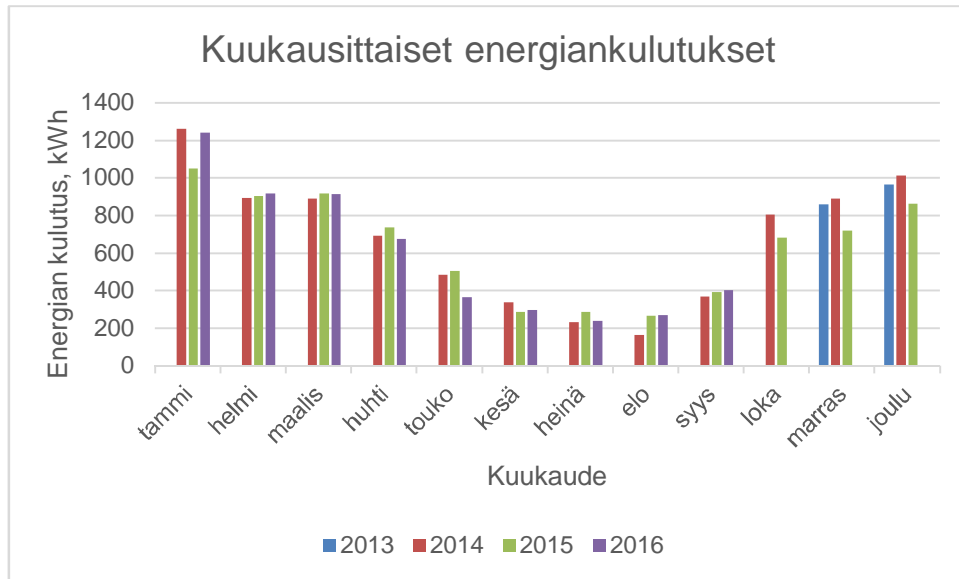
kondensoitumaan piippujen ja kattilan metallisille pinnoille. Vesi muodostaa savukaasujen sekä noen kanssa syövyttäviä rikki- ja typpihappoja, jotka pilaavat lämpölaitokset hyvin nopeasti käyttökelvottomiksi. Normaalisti tämä tehdään kierrättämällä kaukolämpöettä kattilan vesitilassa ja pitämällä pientä vetoa piipun läpi. Rajoittamattomana lämpöhäviöt ovat hyvin merkittäviä, sillä painovoimaisen kierron johdosta piipussa virtaavan ilman nopeus voi olla jopa 1 m/s. Haukivuorella vara- ja huippulämpökeskuksia on verkostossa 4 kpl, jotka ovat

- KPA-kattilan vieressä 1 MW:n öljykattila
- Kankaala Talohoito Oy:n tiloissa olevat vanha kiinteistön 170 kW:n öljykattila sekä lisänä sinne tuotu 350 kW:n öljykattila
- Kotikartanon tiloissa olevat 2 kpl 350 kW:n öljykattilaa
- SLK6 eli siirrettävä lämpökeskus teholtaan 1 MW.

Varalämpökeskusten kattilakierrrot on kuitenkin rajattu joko kokonaan pois siten, että kytkentä on toteutettu välisiirtimellä, kuten Kankaalan ja Kotikartanon öljykattiloissa tai siten rajattu hyvin pieneksi, kuten SLK6 ja KPA-kattilan vieressä olevassa kattilassa, tekemällä vain pienen putkihalkaisijan ohitusjohto sulkeutuvan säätöventtiilin ohi. Kankaalan öljykattila on juuri hiljattain poistettu käytöstä ja vuokrasopimus on irtisanottu, joten jatkossa se jää pois käytöstä kokonaan. Kotikartanon varalämpölaitokset pysyvät lämpimänä kiinteistön teknisen tilan huonelämmön johdosta. Kaikki varalämpölaitokset kartoitettiin tämän työn yhteydessä ja kattiloiden lämpöhäviöiden todettiin olevan hyvin pieniä.

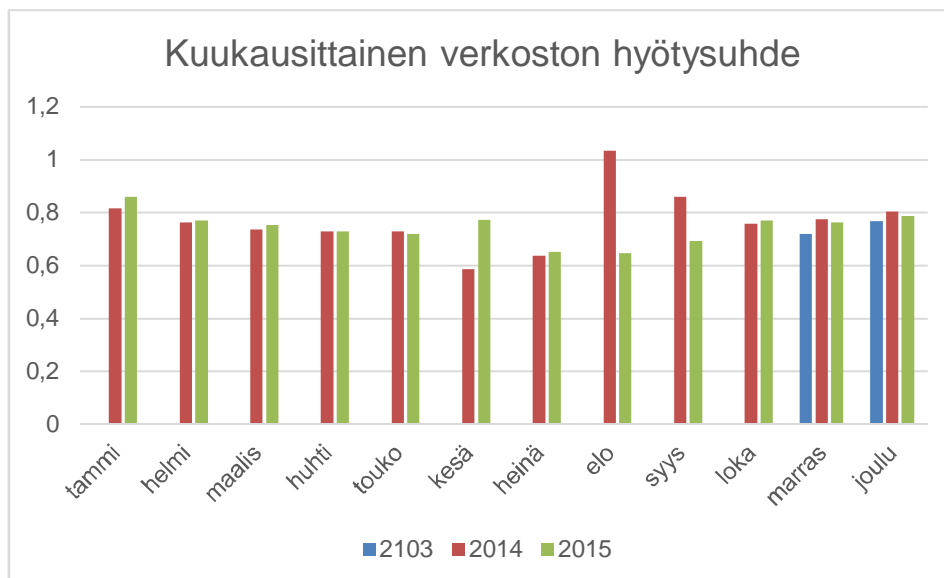
7.2.2 Mittausvirheet

Mittarien lukemavirheitä on pyritty karsimaan muun muassa sillä, että suurin osa asiakasmittareista uusittiin vuonna 2011. KPA-kattilan päämittari on uusittu lokakuussa 2013, jolloin on käytettävissä kahden verrokkivuoden lukemat uuden mittarin ollessa käytössä. Ja kuten aikaisemmin todettiin, verkostohäviöt ovat edelleen pysyneet aikaisemmalla tasollaan. Hyötyäkin mittarin vaihdosta on tullut, etäluettavuus on helpottanut kokonaiskulutuksen seuraamista. Ja toisin kuin aikaisemmin, nyt pystytään mittarista saamaan ulos kuukausittaiset energiankulutusluvut. Kuvassa 18 on esitetty käyttöönotostaan lähtien kuukausittaiset kokonaisenergiankulutukset.



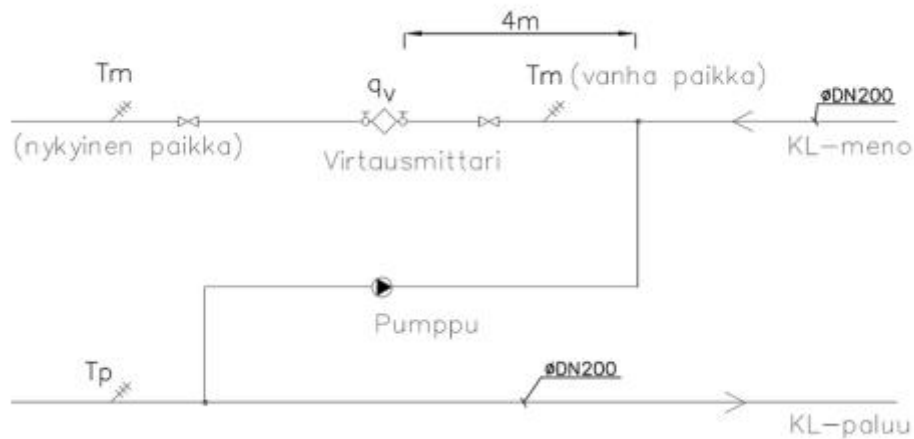
Kuva 18. Kuukausittainen kokonaisenergiankulutus.

Kuvassa 19 on verrattu KPA-mittarin lukemaa kuukausittaisiin myyntienergian määriin. Kaavio on vain suuntaa antava, sillä varsinkin kesäisin huoltokatkojen aikaan sekä talvella huippupakkasilla verkkoon syötetään energiaa myös varalämpölaitoksista. Näiden energiantuotto ei näy päämittarin lukemassa. Kaaviosta on kuitenkin pääteltävissä se, että verkoston hyötysuhde laskee kesäkuukausiksi, kuten sen kuuluisikin tehdä. Toisin sanoen lämpöhäviöt ovat suhteessa myytyyn energiaan kesäisin suuremmat kuin talvella, kun verkoston käyttöaste on pienimmillään.



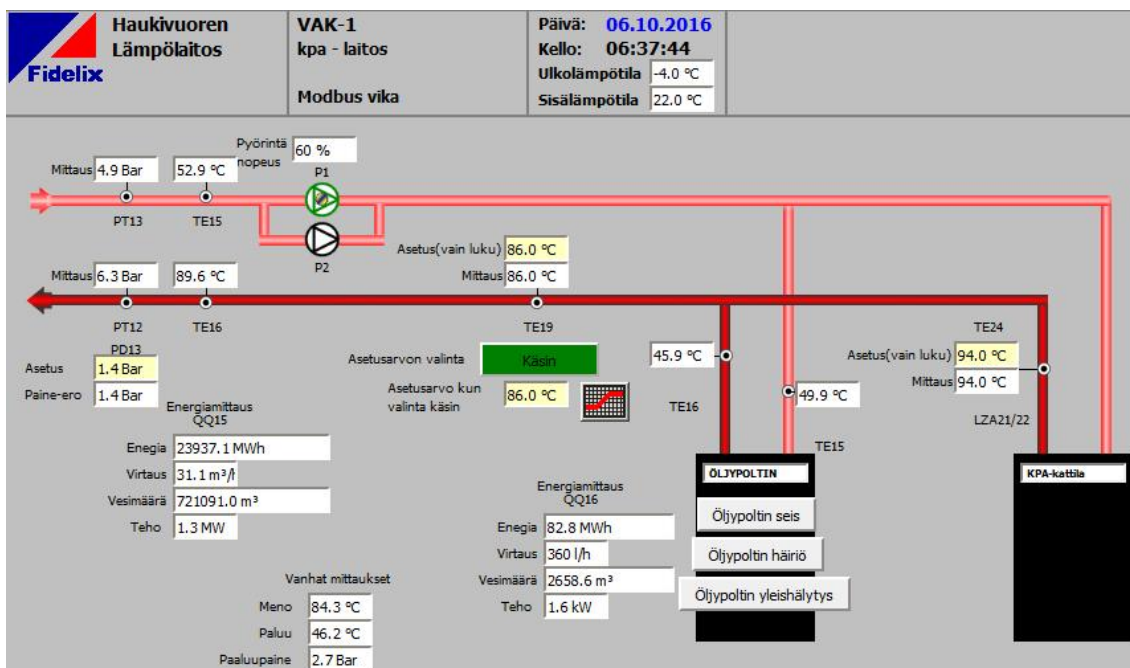
Kuva 19. Verkostohäviöiden kehittyminen kuukausittain.

Tämän työn yhteydessä asiakaslaitteita ei kartoitettu erikseen, mutta se tiedetään, että pelkkä mittareiden vaihto tai kalibrointikaan ei välttämättä poista mittausvirhettä. Kuvassa 20 on esimerkki lämpötilamittausanturin paikan vaihdosta, joka vanhassa paikassa aiheutti merkittäviä mittausvirheitä Luonetjärven varuskunnan alueen. Syyksi epäiltiin, ettei kaukolämpövesi ollut vielä kunnolla sekoittunut sekoitusryhmän jälkeen. (28.)



Kuva 20. Lämpötilamittaus anturin sijainnin muutos Tuukka Ojaseen tekemässä opinnäytetyössä Lämpöhäviöiden määrittäminen kaukolämpöverkostossa (28, s. 36).

Haukivuoren uusitun etävalvonta-automaatiikan kautta saadaan verkostoon menevälle kaukolämpövedelle kaksi mittausarvoa kuvassa 21 lämpötila-anturit TE16 ja TE19 sekä kattilasta lähtevälle vedelle TE24. Heti huomataan, että verkoston menoveden anturit antavat eri mittaustuloksen.



Kuva 21. Lämpökeskuksen putkikaavio ja mittaukset.

Etävalvonta-automaatiikan työt ovat kohteessa vielä hieman kesken. Tästä syystä ei saatu esille trendikäyriä, jotta olisi nähty, onko kyseessä vain hetkellinen vaihtelu vai onko mittausero pysyvä. Automaatiikkatöiden ollessa vielä käynnissä kuvan kytkennästä puuttuu myös siellä todellisuudessa oleva sekoitusventtiili, joka sijaitsee virtaussuunnassa hieman ennen anturi TE19. Tästä syystä on syytä epäillä, että kuten Tuukka Ojaisen opinnäytetyössä, myös tässä KL-vesivirrat eivät vielä ole kunnolla sekoittuneet anturin TE19 kohdalla. Sekoitusventtiili on ollut käsikäytöllä koko syksyn ajan. Lisävarmuutta asiaan saatiin, kun verrattiin menoveden lämpötilaa noin 400 m päässä olevan SLK6:n kohdalla. Taulukossa 7 on vertailtu lämpötila-antureiden antamaa tietoa kolmena satunnaisen hetkenä.

Taulukko 7. Mittausantureiden lukemia yhtäaikaaisesti kolmena satunnaisen hetkenä.

	virtaama m ³ /h	Menovesi KPA-kattila	Menovesi KPA-kattila	Paluuvesi KPA-kattila	Kattilavesi meno	Ulkolämpötila	Menovesi SLK kohdalla
	QQ15	kpa_TE16	kpa_TE19	kpa_TE15	kpa_TE24	TE_ulko	SLK_TE2
6.10.2016	31,1	89,6	86	52,9	94	-4	86
8.10.2016	25,3	85	81	51,7	90	8,7	82,3
9.10.2016	27,2	89,4	85	53,6	97	5,3	85,4

Tästä voidaan päätellä, että menovesi SLK6:n kohdalla ei voi mitenkään olla enempää kuin lähtöpäässä, kun varalämpölaitokset eivät olleet päällä. On tietenkin mahdollista, että kyseessä on ollut niin sanottu luonnollinen KPA-kattilan tehon heilahtelu ja kuumempi vesipulssi ei vain vielä ole saavuttanut SLK-keskuksen lämpötila mittausta. SLK:n mitta-anturi on myös hitaampi reagoimaan, sillä kyseessä on maakerroksien ja eristeiden alla putkea vasten sijaitseva pinta-anturi. Vastaavanlaista tulosta on kuitenkin havaittavissa muinakin mittaushetkinä, joten tilannetta on vähintäänkin syytä pitää silmällä. Automaattikotoiden valmistuttua seuranta helpottuu oleellisesti, koska etävalvonnan kautta voidaan seurata lämpötilojen käyttäytymistä mittauspisteissä pitemmällä aikavälillä sekä piirtää tilanteesta kuvaajia.

Jatkotoimenpiteenä Haukivuorella olisi syytä tarkastaa mittareiden ja antureiden varoetäisyyksien täytyminen, suorittaa mittareiden kalibrointi sekä seurata edellä huomattua lämpötilaeron käyttäytymistä. Suositeltu kalibrointiväli on 5 vuotta, ja kalibrointi tulisi tehdä laitevalmistajan ohjeiden ja energiateollisuuden laatimien ohjeiden mukaisesti.

7.2.3 Kertahäviöt

Verkostossa olevia niin sanottuja yksittäisiä heikkoja kohtia kartoitettiin henkilökunnan kanssa menneiden vuosien kokemusten perusteella. Ihan selkeitä, esimerkiksi talvella sulia alueita tai höyryäviä kaivoja, ei ole havaittu. Lämpövuotojen selville saamiseksi on tehty myös verkoston maanpäällinen lämpökamerakuvaus helikopterista käsin. Mitään merkittävää ei kuitenkaan kuvauksen kautta löytynyt, mutta käyttöhenkilökunnan mukaan on syytä suhtautua kuvauksen tulokseen kriittisesti, sillä jopa tiedossa olleita lämpövuotoja ei kuvauksessa näkynyt.

Sen sijaan edellisessä luvussa käsitelty lämpötilaero KPA-laitoksen ja SLK6:n välillä herättää kysymyksiä. Jos oletetaan TE16-anturin mittaustuloksen pitävän paikkansa, päätelmästä seuraa, että lyhyellä matkalla KL-veden menolämpötilasta häviää jo useita asteita. Taulukossa 8 on laskettu, mitä se tarkoittaa hetkellisenä tehohäviönä ja toisaalta mitä se tarkoittaa verkoston kokonaistehoon verrattuna häviöosuutena.

Taulukko 8. Hetkellinen virtaama ja lämpötila ero KPA-kattilalaitoksen ja SKL6:n välillä sekä näistä arvoista laskettu hetkellinen häviöteho.

virtaama l/s	lämpötilaero ΔT	häviöteho kW	kokonaisteho kW	häviöprosentti %
8,64	3,60	130,00	1325,257	9,81 %
7,03	2,70	79,32	978,2245	8,11 %
7,56	4,00	126,33	1130,644	11,17 %

Verkoston reittiä tutkittaessa havaittiin tällä välillä lämpöhäviöiden kannalta harmillinen asennus. DN150-kaukolämpörunkojohdot nimittäin alittavat paikallisen junaradan ja autotien betonisessa putkikanaalissa (liite 2). Perimätiedon mukaan samaista kanaalia käytetään myös osana hulevesijärjestelmää. Tämä voi pahimmillaan aiheuttaa jatkuvan kylmän veden virtaamisen KL-putkielementtiä vasten ja lisäävän merkittävästi lämpöhäviöitä kyseisellä osuudella. Riskinä on myös eristeen vettyminen ja teräsputkien korroosion aiheuttaminen. Putkikanaalia ei tämän työn yhteydessä kuntotarkastettu, mutta sijainti on hyvä pitää mielessä mahdollisia jatkotoimenpiteitä varten.

7.2.4 Verkoston käyttöaste

Verkoston mitoitus ei ollut alun perin lainkaan tutkittavien asioiden listalla, kun mietimme, mistä mahdolliset lämpöhäviöt voisivat johtua. Kuitenkin verkostokarttaa tarkastettaessa ilmeni, että kaksiputkielementtiä on käytetty hyvin vähän. Toinen huomio verkostosta oli, että verkosto on lähtökohtaisesti mitoitettu erittäin väljäksi, selkeästi alle 0,5 bar/putki-km. Lisäksi mitoituksessa ei ole huomioitu yhtäaikaaisuuskerrointa, mikä olisikin perusteltua, jos asiakastehot olisi laskettu vain lämmitystehon tarpeelle. Nyt asiakastehoihin mukaan laskettu käyttöveden tehontarve on mukana myös putkistomitoituksessa. Toisin sanoen putkisto on mitoitettu huomattavan paljon suuremmille tehonsiirtomitoituksille kuin mitä todellinen tarve on. Taulukoissa 9 ja 10 on tarkasteltu verkoston asiakkaiden talohaarojen mitoitusta sekä jokaisen runkojohdon mitoitusta.

Taulukko 9. Lämpöverkoston asiakkaiden talojohtojen virtausanalyysi

Asiakkaiden talojohto-osuudet lämpötilaerolla 45									
Putkiosuus (nro)	Putken pituus m	Putken koko	Reynoldsin luku Re	Kitkakerroin, λ	putken sisä D m	putken virtausala A, m ²	putken virtaama qv, l/s	virtaus nopeus v, m/s	Painehäviö R, bar/km
S26	64	DN40	40028,718	0,022	0,0431	0,00146	0,500	0,34	0,30
S25	108	DN40	28909,6296	0,024	0,0431	0,00146	0,361	0,25	0,17
S24	54	DN40	55595,4416	0,021	0,0431	0,00146	0,694	0,48	0,54
S23	86	DN40	40028,718	0,022	0,0431	0,00146	0,500	0,34	0,30
S38	40	DN25	6587,39116	0,035	0,0291	0,00067	0,056	0,08	0,04
S22	40	DN40	57819,2593	0,020	0,0431	0,00146	0,722	0,50	0,58
S21	20	DN50	51000,9119	0,021	0,0545	0,00233	0,806	0,35	0,23
S29	90	DN40	31133,4473	0,024	0,0431	0,00146	0,389	0,27	0,20
S18	140	DN40	31133,4473	0,024	0,0431	0,00146	0,389	0,27	0,20
S17	82	DN40	8895,27066	0,033	0,0431	0,00146	0,111	0,08	0,02
S16	70	DN40	44476,3533	0,022	0,0431	0,00146	0,556	0,38	0,37
S39	90	DN40	31133,4473	0,024	0,0431	0,00146	0,389	0,27	0,20
S37	54	DN40	31133,4473	0,024	0,0431	0,00146	0,389	0,27	0,20
S41	62	DN25	6587,39116	0,035	0,0291	0,00067	0,056	0,08	0,04
S40	40	DN25	6587,39116	0,035	0,0291	0,00067	0,056	0,08	0,04
S15	274	DN50	75622,0418	0,019	0,0545	0,00233	1,194	0,51	0,46
S34	94	DN40	28909,6296	0,024	0,0431	0,00146	0,361	0,25	0,17
S33	182	DN40	33357,265	0,023	0,0431	0,00146	0,417	0,29	0,22
S32	15	DN40	51147,8063	0,021	0,0431	0,00146	0,639	0,44	0,47
S14	14	DN80	23839,6488	0,025	0,0825	0,00535	0,570	0,11	0,02
S35	64	DN40	44476,3533	0,022	0,0431	0,00146	0,556	0,38	0,37
S13	92	DN50	128381,606	0,016	0,0545	0,00233	2,028	0,87	1,11
S12	200	DN50	96725,8674	0,018	0,0545	0,00233	1,528	0,65	0,71
S36	164	DN40	53371,6239	0,021	0,0431	0,00146	0,667	0,46	0,50
S11	10	DN50	20450,8979	0,026	0,0703	0,00388	0,417	0,11	0,02
S28	32	DN50	20450,8979	0,026	0,0703	0,00388	0,417	0,11	0,02
S10	24	DN40	75609,8006	0,019	0,0431	0,00146	0,944	0,65	0,93
S9	76	DN40	62266,8946	0,020	0,0431	0,00146	0,778	0,53	0,66
S8	84	DN40	42030,1539	0,022	0,0431	0,00146	0,525	0,36	0,33
S27	52	DN25	13174,7823	0,030	0,0291	0,00067	0,111	0,17	0,14
S7	72	DN25	29643,2602	0,024	0,0291	0,00067	0,250	0,38	0,59
S6	146	DN25	13174,7823	0,030	0,0291	0,00067	0,111	0,17	0,14
S5	20	DN25	16468,4779	0,028	0,0291	0,00067	0,139	0,21	0,21
S4	10	DN40	75609,8006	0,019	0,0431	0,00146	0,944	0,65	0,93
S3	0,6	DN25	16797,8474	0,028	0,0291	0,00067	0,142	0,21	0,22
S2	182	DN40	122309,972	0,017	0,0431	0,00146	1,528	1,05	2,12

Taulukko 10. Lämpöverkon runkojohtojen virtausanalyysi

Runkojohto-osuudet lämpötilaerolla 45									
Putkiosuus (nro)	Putken pituus m	Putken koko	Reynoldsin luku Re	Kittakerroin, λ	putken sisä D m	putken virtausala A, m ²	putken virtaama q _v , l/s	virtausnopeus v, m/s	Painehäviö R, bar/km
T26-T24	6	DN50	54518,2162	0,0207	0,0545	0,00233	0,861	0,37	0,26
T24-T23	160	DN65	76350,0187	0,0190	0,0703	0,00388	1,556	0,40	0,22
T23-T38	24	DN65	100891,096	0,0176	0,0703	0,00388	2,056	0,53	0,35
T38-T22	276	DN65	103617,883	0,0175	0,0703	0,00388	2,111	0,54	0,37
T22-T21	20	DN80	118501,178	0,0171	0,0825	0,00535	2,833	0,53	0,29
T21-T18,29	35	DN100	117235,265	0,0171	0,1071	0,00901	3,639	0,40	0,13
S18,29	306	DN40	62266,8946	0,0200	0,0431	0,00146	0,778	0,53	0,66
T18,29-T16/17	186	DN100	142293,185	0,0165	0,1071	0,00901	4,417	0,49	0,18
T16-Trunko	160	DN50	42207,6512	0,0221	0,0545	0,00233	0,667	0,29	0,17
T17/16-T14	366	DN100	163771,401	0,0160	0,1071	0,00901	5,083	0,56	0,24
S39	198	DN50	24621,1299	0,0253	0,0545	0,00233	0,389	0,17	0,06
T37-T41	62	DN50	49242,2598	0,0212	0,0545	0,00233	0,778	0,33	0,22
T41-T40	22	DN50	52759,564	0,0209	0,0545	0,00233	0,833	0,36	0,24
T40-T15	268	DN50	56276,8683	0,0205	0,0545	0,00233	0,889	0,38	0,27
T15-T34	128	DN65	102254,489	0,0176	0,0703	0,00388	2,083	0,54	0,36
T34-T14	26	DN65	119978,601	0,0170	0,0703	0,00388	2,444	0,63	0,48
T32-T14	218	DN50	66828,7811	0,0197	0,0545	0,00233	1,056	0,45	0,37
T14-runko	32	DN80	67987,1466	0,0196	0,0825	0,00535	1,626	0,30	0,11
T14-T35	234	DN80	170223,457	0,0159	0,0825	0,00535	4,070	0,76	0,56
T35-T-OK	144	DN80	193458,983	0,0169	0,0825	0,00535	4,626	0,87	0,77
T14,15-T13	234	DN125	252832,325	0,0148	0,1325	0,01379	9,709	0,70	0,28
T13-T10	50	DN125	305638,344	0,0157	0,1325	0,01379	11,737	0,85	0,43
T36-T11	952	DN50	53172,3344	0,0208	0,0703	0,00388	1,083	0,28	0,12
T11-T28	128	DN50	73623,2323	0,0192	0,0703	0,00388	1,500	0,39	0,20
T28-T12	30	DN50	148609,858	0,0163	0,0703	0,00388	3,028	0,78	0,71
T12-T10	70	DN65	194965,226	0,0167	0,0703	0,00388	3,972	1,02	1,24
T10-runko	214	DN65	241320,595	0,0157	0,0703	0,00388	4,917	1,27	1,79
T10-T9	58	DN150	358464,869	0,0157	0,1603	0,02018	16,653	0,83	0,33
T9-T8,27	34	DN150	375206,623	0,0167	0,1603	0,02018	17,431	0,86	0,39
S8/27	34	DN40	50925,4245	0,0211	0,0431	0,00146	0,636	0,44	0,46
T8,27-T7	194	DN150	388898,986	0,0169	0,1603	0,02018	18,067	0,90	0,42
T7-T4	58	DN150	394280,264	0,0160	0,1603	0,02018	18,317	0,91	0,41
T5/6-T4	118	DN25	29643,2602	0,0241	0,0291	0,00067	0,250	0,38	0,59
S4/5/6	60	DN50	75622,0418	0,0191	0,0545	0,00233	1,194	0,51	0,46
T4/5/6-T3	138	DN150	419990,814	0,0157	0,1603	0,02018	19,512	0,97	0,46
T3-T2	360	DN150	423040,205	0,0169	0,1603	0,02018	19,653	0,97	0,50
T2-KPA-keskus	414	DN150	455925,793	0,0160	0,1603	0,02018	21,181	1,05	0,55
S-kuivaamo	260	DN100		0,0000	0,1071	0,00901	poistettu käytöstä		

Mitoitusvirtaamana on käytetty asiakkaiden tilausvesivirtaa. Putkistoanalyysi on tehty verkostokarttaa pohjana pitäen mittaamalla AutoCAD-ohjelmalla jokaisen putkivälin pituus ja tarkastamalla käytetty putkidimensio (liite 2). Putkien pituuksiin on huomioitu meno- ja paluuputkimetrien summa. Virtausnopeus tulee kaavasta 8

$$v = \frac{q_v}{A} \quad (8)$$

v on veden virtausnopeus, m/s

q_v on veden virtaama, l/s
 A on putken sisäpinta-ala, m²

Painehäviö on laskettu kaavasta 9

$$R = \frac{\Delta p}{l} = \frac{\lambda}{d} * \frac{1}{2} * \rho * v^2 * 10 \quad (9)$$

R on painehäviö metriä kohti, bar/
 Δp on painehäviö, kPa
 λ on kitkakerroin turbulenttisisessä virtauksessa
 l on putken pituus, m
 d on putken sisähalkaisija, m
 ρ on veden tiheys, 1 kg/m³
 v on veden virtausnopeus, m/s
 10 on yksikkömuuntokerroin kPa/m -> bar/km

Painehäviön määrittämiseksi pitää tietää, onko kyseessä laminaarinen vai turbulenttinen virtaus. Tämä tehdään vertailemalla kaavan 10 mukaista Reynoldsin lukua (31.)

$$Re = \frac{v*d}{\nu} \quad (10)$$

Re on Reynoldsin luku
 v on veden virtausnopeus, m/s
 d on putken virtaushalkaisija, m
 ν on nesteen kinemaattinen viskositeetti, m²/s

Jos Re on suurempi kuin 4 000, kyseessä on turbulenttinen virtaus. Jos Re on pienempi kuin 3 200, kyseessä on laminaarinen virtaus. Jos virtaus on laminaarista, kitkavastuskerroin tulee kaavasta 11 (31.)

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (11)$$

Jos virtaus on turbulenttista, kitkavastuksen laskenta riippuu Reynoldsin luvusta sekä pinnankarheuden ja putken halkaisijan suhteesta.

Kun $Re * k/d < 65$, niin kyseessä ovat hydraulisesti sileät putket, jolloin käytetään kaavoja 12–14. (31.)

k on putken pinnankarheus, teräsputkille 0,03 mm

Mikäli $2300 < Re < 10^5$, käytetään Blasiusuksen yhtälöä 12

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (12)$$

Mikäli $10^5 < Re < 10^6$, käytetään Nikuradsenin yhtälöä 13

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 * Re^{-0,237} \quad (13)$$

Mikäli $Re > 10^6$, käytetään Prandtin ja Kàrmànin yhtälöä 14

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 * \lg(Re * \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (14)$$

Kun $Re * k/d > 1300$, niin kyseessä ovat hydraulisesti karheat putket, jolloin käytetään kaavaa 15 tai 16 (31.)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 * \lg \frac{d}{k} + 1,14 \quad (15)$$

$$\lambda = 0,0055 + 0,15 * \sqrt[3]{\frac{k}{d}} \quad (16)$$

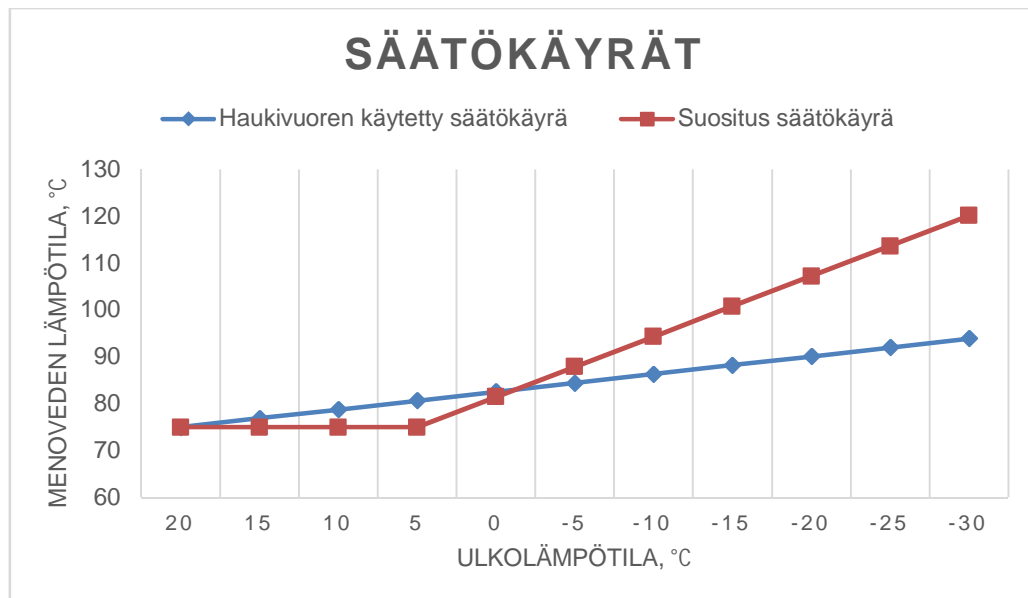
Lisäksi voidaan erottaa niin sanottu ylimenoalue, jolloin $65 < Re * k/d < 1300$. Tällöin käytetään Prandl-Colebrookin yhtälöä (31.)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \lg\left(\frac{2,51}{Re * \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{d} * 2,69\right) \quad (17)$$

Kitkavastuskerroin yhdessä Reynoldsin luvun kanssa on laskettu taulukoihin 9 ja 10, joiden perusteella bar/putki-km on laskettu. Energiateollisuuden laatimien ohjeiden mukaisesti, verkon putkiosuuksien mitoitus tehdään huippukulutustilanteen mukaisesti

1–4 bar/km johtoa. (10.) Tähän verraten Haukivuorella ei ole ohjeiden mukaista mitoitusaluetta kuin neljässä johto-osuudessa. 0,5 bar/km mitoitusosuusiakin on vain 25 % kaikista johdoista. Lisäksi kun tiedetään, että huipputehotilanteiden osuus vuotuisista lämmityspäivistä on hyvin pieni, voidaan todeta verkoston käyttöasteen olevan myös hälyttävän pieni.

Tarkemman ja laajemman analyysin tekeminen tulisi suorittaa simuloimalla verkosto ja sen käyttötarpeet. Säätokäyrällä voidaan tilannetta yrittää parantaa, mutta kaiken kaikkiaan liian väljän verkon ongelmien korjaus on hyvin haastavaa. Pääsääntöisesti tulisi pyrkiä mahdollisimman pieneen menoveden lämpötilaan virtausta nostamalla pumpauksien sähkönkulutuksen kustannuksella. Lisääntynyt sähkönkäyttö tulee rahallisesti useimmissa tapauksissa monin kerroin takaisin pienempinä lämpöhäviöinä.



Kuva 22. Säätokäyrät.

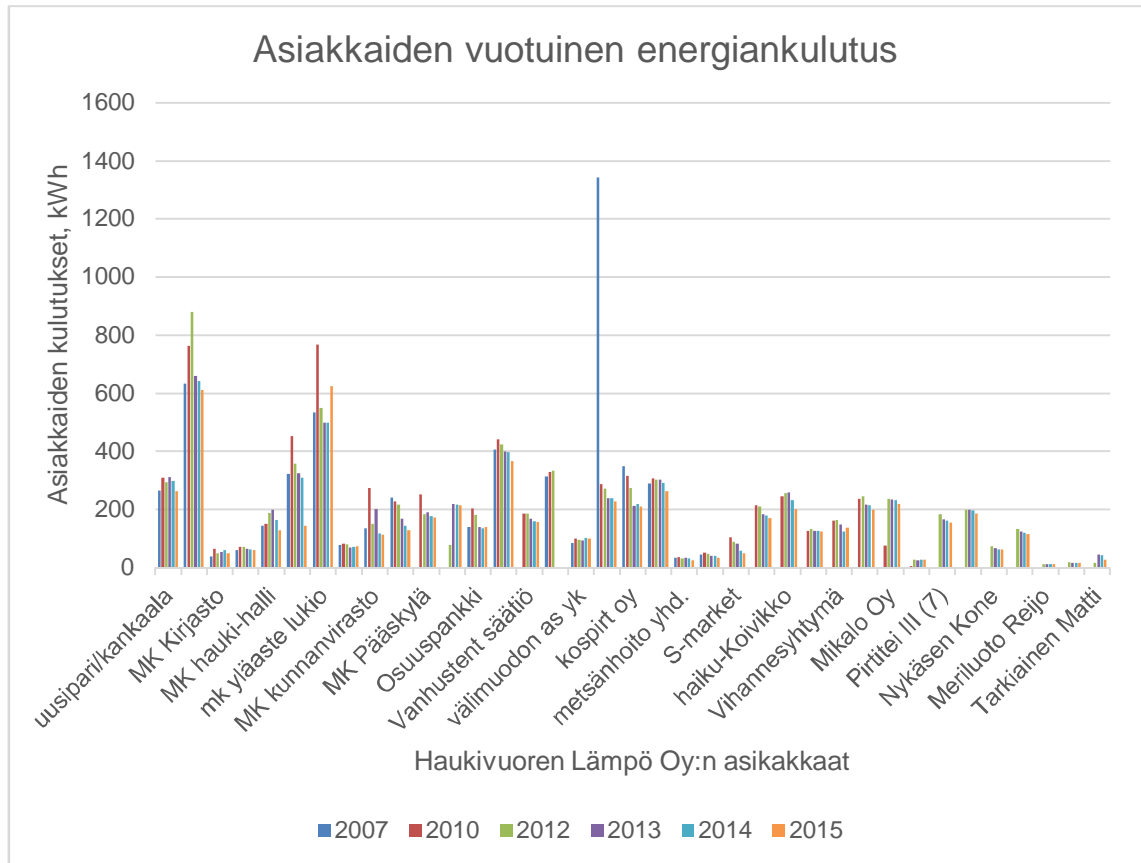
Kuvassa 22 on esitetty energiateollisuuden suosituskäyrä tavanomaisiin kaukolämpöverkkoihin ja Haukivuorella käytössä oleva käyrä. Pienestä verkosta johtuen Haukivuorella ei ole tarvetta nostaa menoveden lämpötilaa suosituskäyrän mukaiseen 120 °C:seen. Sen sijaan olisi kyllä kiinnitettävä huomiota 0–20 °C:n ulkolämpötiloja vastaaviin menoveden lämpötiloihin. Menoveden lämpötilaa ei tulisi tarpeettoman korkeaksi nostaa, sillä se nimenomaan nostaa häviöiden määrää. Toisaalta on varmistettava, että viimeisellekin asiakkaalle on käytettävissä riittävän korkea lämpötilataso. Haukivuoren

säätökäyrän valinnassa on sellainen haaste, että KPA-kattilan omaan logiikkaan saa lisättyä vain kaksi pistettä, ylimmän ja alimman lämpötilan ulkolämpötilan funktiona. Suurin osa lämmityskauden energiasta kuluu lämpötilavälillä $-5...+5$ °C. Jos huippupakkasilla riittää menoveden lämpötilaksi 95 °C, lämpötilatasojen valossa 75 °C voisi riittää ulkolämpötilalla 0 °C.

Käyttöhenkilökunnan kanssa jutellessani ongelmana on ollut kuitenkin laitoksen huojunta pienillä tehoilla, jota on kompensoitu muun muassa nostamalla menoveden lämpötilaa. Lisäksi sekoitusventtiiliä on yritetty pitää käsisäätämällä huojunnan tasaamiseksi. Yhtenä selityksenä tälle voisi olla se, että sekoitusventtiili, jonka tarkoituksena on tasata verkostossa tapahtuvat lämmöntarvemuutokset ennen kattilaa, ei toimi asianmukaisesti. Venttiili voi olla mitoitettu myös liian väljäksi. Toisin sanoen venttiilin auktoriteetti ei ole riittävä ja säätö on epätarkka. Vaihtoehtona voisi olla ohjata sekoitusventtiiliä täysin riippumatta KPA-laitoksen logiikasta oman säätökäyränsä mukaisesti hieman eri lämpötiloilla ja vasteajoilla. Vähintäänkin venttiilin mitoitus ja säätökäyräasetukset tulisi tarkastaa. Tämä vaatii kuitenkin tarkempaa suunnittelua eikä ole osa tätä opinnäytetyötä. Toiminnan vakauttamiseen sekoitusventtiilillä on kuitenkin tärkeä rooli, ja tätä se kautta vaikuttaa myös oleellisesti kokonaisenergiataloudellisuuteen. Myös säätökäyrän valintaa varten on suositeltavaa tehdä verkoston tarkempi virtaussimulointi.

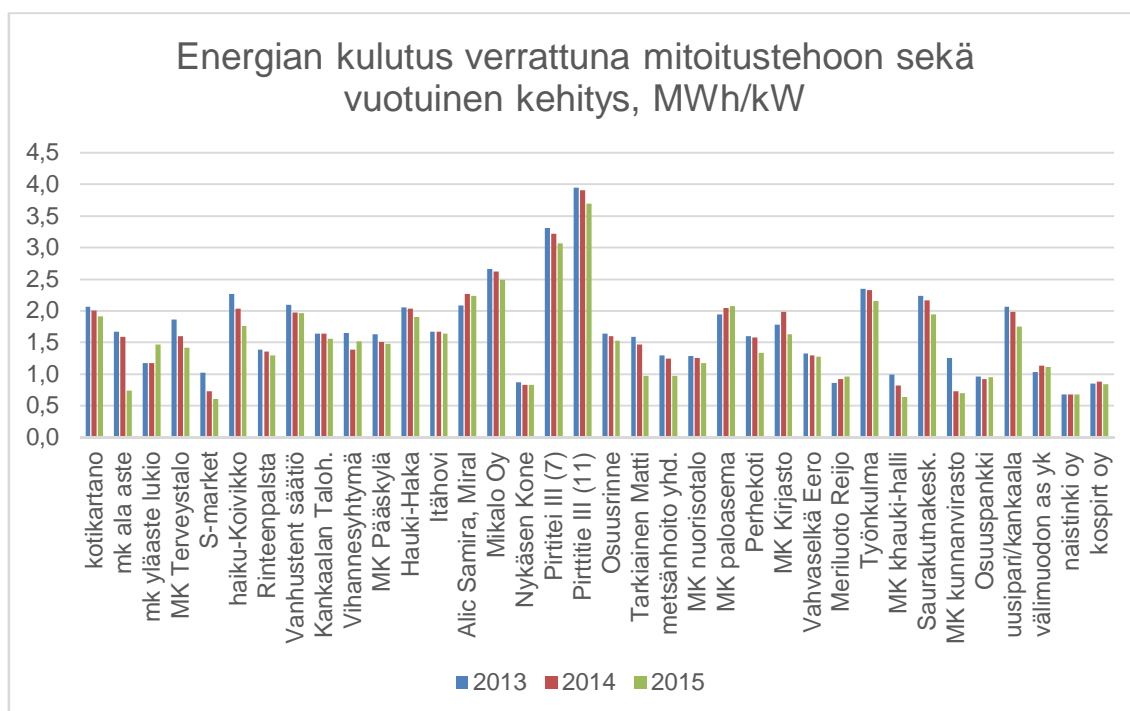
7.2.5 Asiakaskulutukset

Asiakaslaitteita ei tämän työn yhteydessä kartoitettu tai mitoitusta tarkastettu. Myöskään kiinteistöjen rakennustilavuus tietoja tai muita oleellisia tunnuslukuja ei ollut tiedossa. Tiedossa olleista energian kulutuksista kuitenkin tutkittiin, ponnahtaako sieltä mitään selkeätä epäkohtaa esille. Tämäkin on vain suuntaa antavaa, sillä tiedossa ei ole asiakkaiden rakennusten kunnossapitohistoriaa tai energiankäytön tottumuksia.



Kuva 23. Asiakkaiden vuotuinen energiankulutus.

Kuvassa 23 on kunkin asiakkaan vuotuinen energiankulutus. Pääsääntöisesti energiankulutukset ovat pysyneet vuosittain melko tasaisina. Kankaalan Talohoidon energiankulutuksen raju tiputus vuoden 2007 tasosta selittynee sillä, että kyseinen energiasopimus jaettiin neljään osaan, jolloin yhden mittauksen sijaan kyseinen energiamäärä mitattiin neljällä eri mittarilla neljän eri sopimuksen nimissä. Muutamia jo tiedossa olleita asioita on hyvä nostaa esille. Kotikartanon energian kulutuksen nousu vuosittain aina vuoteen 2012 asti johtui viallisesta lämpöjohdon siirtolinjasta kolmen eri kiinteistöjen välillä. Kanala uusittiin vuoden 2012 syksyllä, ja tämän jälkeen energian kulutus onkin ollut tasaisista. Kunnan kiinteistöjen, kuten kunnanviraston, yläaste-lukion ja ala-asteen rakennusten, energian heilahtelu johtunee eri vuosina toteutetuista saneerauksista. Juuri muita johtopäätöksiä tämän kuvion perusteella ei kuitenkaan voi tehdä. Voi vain todeta, että vuotuisien energiankulutuksien osalta ei suuria heittoja ole ollut. Hieman mielenkiintoisempi kuvaaja saadaan, kun verrataan asiakkaiden energiankulutusta heidän mitoitustehoonsa.



Kuva 24. Asiakkaiden energiankulutus suhteutettuna tilaustehoon.

Kuvassa 24 on pylväsdiagrammiesitys, jossa jokaisen asiakkaan vuotuinen energiankulutus suhteutettu heidän mitoitustehoonsa. Tässä esityksessä, mikäli pylväät ovat korkeat, kuluttaa asiakas enemmän energiaa suhteutettuna omaan tilaustehoonsa kuin muut asiakkaat samaa verrannollisuutta käyttäen. Toisaalta, jos pylväät ovat pienet, voi tilausteho olla ylimitoitettu asiakkaan käyttötarpeita varten. Myös tämä diagrammi on vain suuntaa antava, sillä energian suhteellisesti suurempi kulutus voi johtua myös pelkästään käyttöveden kulutuksesta tai ilmanvaihdon eri käyntiajoista. Kaukolämpölaitteisto mitoitetaan rakennuksen lämmitystehotarpeen ja käyttöveden mitoitusvirtaaman mukaisesti, mistä energialaitoksen mitoitusteho määräytyy. Energiateollisuuden keräämien tilastoarvojen perusteella vastaava luku on 1,7 (30). Tätä tietoa vasten olisi hyvä tarkastuttaa kaikkein korkeimpien pylväiden omaavien asiakkaiden liittymisteho. Kiinteistöjen käyttöveden kulutustietoja ei ollut käytettävissä.

7.2.6 Muita laitoksen ja verkoston parannustoimenpiteitä ja meneillään olevia hankkeita

Muita toiminnallisuuteen vaikuttavia parannuksia ovat olleet muun muassa

- hakkeen laadun parantuminen ja laadun seuranta

- etävalvonnan parantaminen
- meneillään oleva hakkeen olosuhteiden mittaus ennen polttoa
- varastointikatoksen investointilaskenta
- siilopohjan lämmitykseen kuluvan energian määrän mittaaminen
- huippu- ja varalämpölaitoksien energian mittaaminen.

Näistä varsinkin etävalvonnan kehittyminen ja sitä kautta historiatietojen kerääminen tulee auttamaan suuresti tulevaisuuden optimointityötä. Lisäksi todetaan, että jokavuotiset haasteet jatkuvat yhä, kuten onnistunut vuosihuolto ja energian myynnin kiristynyt kilpailu. Meneillään on myös erittäin mielenkiintoinen Biohauki-hanke KPA-laitoksen naapuritontille.

7.2.7 Biohauki Oy

Biohauki Oy on 2013 perustettu biokaasun tuotantolaitoshanke, jonka on tarkoitus alkaa tuottaa biokaasua liikennepolttoaineeksi. Hanke on peräisin vuosina 2009–2012 toteutetun Etelä-Savon ELY-keskuksen EU-osarahoittaman ”ESBIO – Energiaomavarainen maatila” -hankkeen pohjalta. Biohauki Oy:n suurin osakas on Etelä-Savon Energia Oy. Muut 14 osakasta ovat kaikki raaka-aineen toimittajia, joista suurin osa on luomutiloja. Käytännössä laitoksessa valmistetaan liikennepolttoainetta mädättämismenetelmällä ja pääsääntöisenä raaka-aineena käytetään karjanlantaa. Sivutuotteena syntyy mm luomulannoitetta sekä tuotettua kaasua ja kaasuntuotannon ylikapasiteettia voidaan käyttää suoraan lämpöenergian tuotantoon osaksi Haukivuoren Lämpö Oy:n verkostoa. Biokaasun käyttö toisi Haukivuorelle vaihtoehdon lämpöenergian tuottamisen pienillä tehontarpeilla, silloin kun hakekattila ei ole parhaalla toiminta-alueellaan. Lisäksi tuotettua biokaasua voidaan käyttää huipputehtilanteissa sekä huoltokatkojen aikana ja vähentää näin öljyn kulutusta. Rakentamistyöt ovat Haukivuorella juuri alkaneet. Tuotantolaitoksen on tarkoitus olla toiminnassa loppuvuonna 2017.

8 Yhteenveto

Suomessa on ajateltu puun polton olevan hiilineutraalia energiantuotantoa. Päästökseen Euroopan unionin ilmastomuutoksen vuoden 2020 tavoitteeseen on myös Etelä-Sa-

vossa ja Haukivuorella tietoisesti siirrytty hakepolttotekniikkaan lämpöenergian tuotannossa. Haukivuoren lämpölaitos ja sen liitännäiset on pääosin rakennettu 2000-luvun alkupuolella paikallisin voimin. Liiketoimintaa hallinnoi paikallinen energiayhtiö Haukivuoren Lämpö Oy. Etelä-Savon Energia Oy:n tullessa enemmistöosakkaaksi on lämpölaitoksen sekä alueverkon toimivuuteen kiinnitetty paljon huomiota. Tämän työn yhteydessä laitokseen liittyvää dokumentaatiota on kerätty yhteen paikkaan, analysoitu ja täydennetty tehtyjen tutkimuksien perusteella. Tavoitteena oli dokumentoida laitoksen nykytilanne ja koko järjestelmän energiataloudellisuus. Samalla oli tarkoitus kerätä kaikki mahdollinen löytyvä lähdeaineisto yhteen paikkaan Etelä-Savon Energia Oy:n pääkonttorille Mikkeliin.

Työn tutkimuksien yhteydessä saatiin kirjoitettua hakekattilalaitoksen toimintaselostus yksinkertaisuudessaan sekä laskettua hakkeen polton vuosihyötysuhde. Hyötysuhde laskettujen arvojen perusteella on 90 %. Tarkemman tuloksen aikaansaamiseksi tulisi keskiarvolaskennan sijaan tehdä taulukko kaikista toimitetuista hake-eristä, ottaa huomioon varastoinnin aiheuttama laadun muutos sekä varaston kierron nopeus. Yhteenvedona hakekattilan polttoprosessin toiminnasta on, että hakkeen laatua tulee edelleen tarkasti seurata ja palamisen säätöä tulisi tarkentaa vielä nykyistäkin paremmin vastaamaan tarvittavan kaukolämpötehon ajotarvetta.

Aluelämpöverkostosta oli käytettävissä DWG-kuva, jonka perusteella suurin osa verkostanalyysistä tehtiin. Lisäksi oli käytettävissä asiakkaiden tilaustehotiedot sekä vuotuiset energiankulutukset viimeisiltä vuosilta. Tuloksena saatiin, että aluelämmön verkoston lämpöhukkaprocentti on normaalia korkeampi, 25 %. Suurin syy tähän näyttäisi olevan verkoston heikko käyttöaste, joka johtuu liian väljästä putkistomitoituksesta. Väljän putkiston ongelmien ratkaisu ei ole mitenkään yksinkertaista. Parhaiten asiassa pääsisi eteenpäin mallintamalla ja simuloimalla koko verkosto sekä sen käyttötarpeet eri tilanteissa. Samalla päästäisiin simuloimaan verkostoon sopivaa säätökäyrää sekä virtauksen että lämpötilatasojen osalta. Parantunut etävalvonta ja mittauksien lisäys verkoston eri kohtiin tulevat jatkossa auttamaan optimointityötä tehtäessä. Riittävän mittausdatan analysoinnin perusteella saadaan myös pohjaa tulevia investointilaskelmia varten.

Laskelmien ja mittauksien valossa lämpöverkon sekä hakekattilalaitoksen kokonaisenergiataloudellisuuden optimoinnissa on vielä paljon varaa parantaa. Yhtiön tuleekin panostaa häviöiden pienentämiseen ja sitä kautta parantuvaan tulokseen.

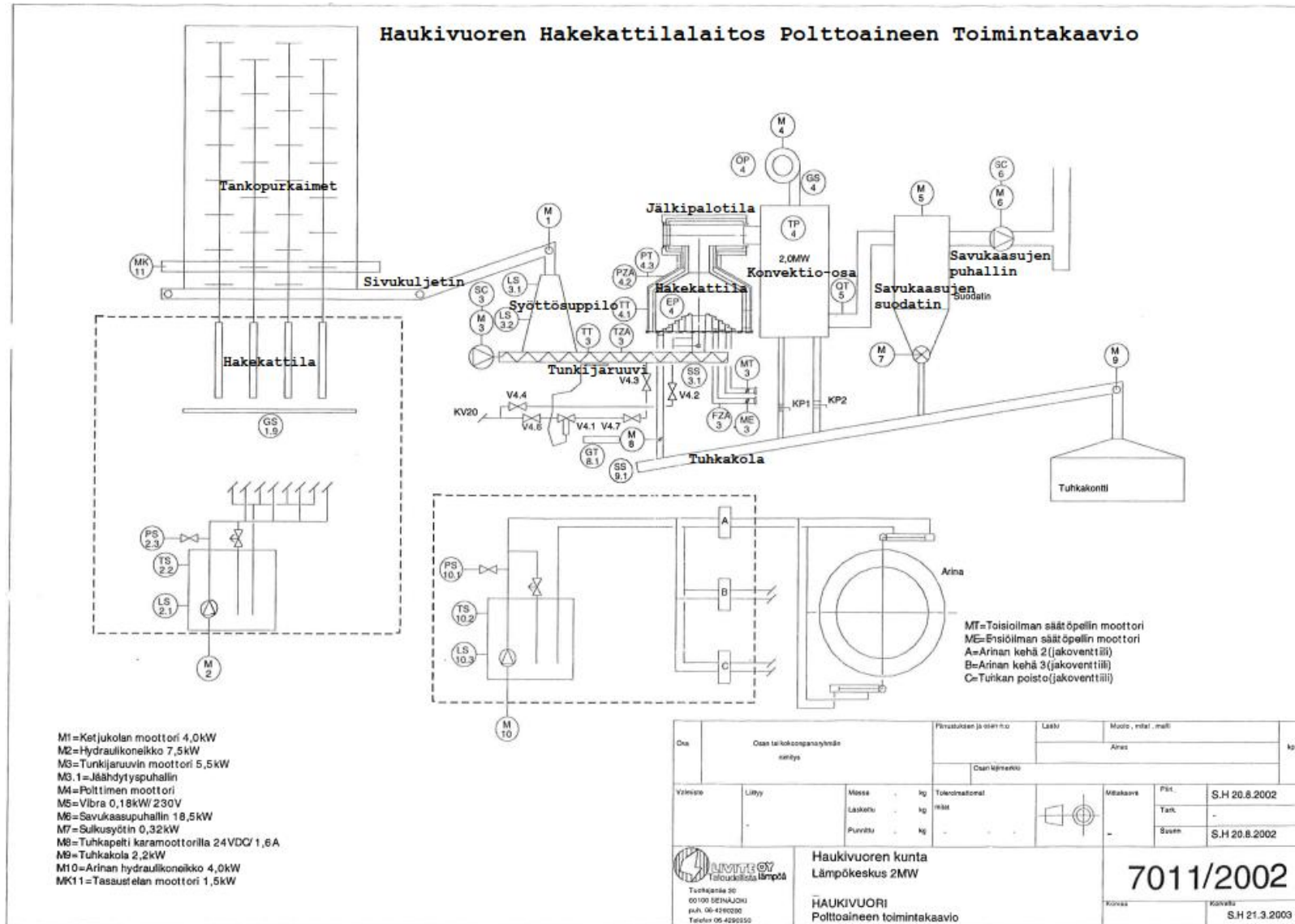
Lähteet

- 1 Ammatit > Biotekniikan Insinööri > Työmarkkinatiedot / Bioenergia-ala. 2016. Verkkodokumentti. Ammattinetti.fi. <<http://www.ammattinetti.fi/ammait/detail/08dfd1e80a653446015a706b3cb8ea8b#Tyomarkkinatiedot>>. Luettu 9.9.2016.
- 2 Hukkanen, Virpi. 2016. Talousprofessori: ”Puun polttaminen ilmastoystävällisenä on lähellä itsepetosta”. Yle uutiset, tiedeosasto. <<http://yle.fi/uutiset/3-8840718>>. Luettu 9.9.2016.
- 3 Bioenergian käyttö. 2016. Verkkodokumentti. Motiva. <http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_kaytto>. Luettu 9.9.2016
- 4 Meklin, Markku. 2013. Toimitusjohtaja, Haukivuoren Lämpö Oy. Keskustelut 1.4.2013.
- 5 Nieminen, Arto. 2013. Toimitusjohtaja, Haukivuoren Lämpö Oy. Keskustelut 26.9.2016
- 6 Ikonen, Tanja – Jahkonen, Miina – Pasanen, Karri – Tahvanainen, Timo. 2013. Laadunhallinta ja keskeiset laatutekijät metsäenergian toimitusketjuissa. Metsätutkimuslaitos. Metlan työraportteja 275.
- 7 Kiinteän biopolttoaineen palaminen. 2014. Verkkodokumentti. Motiva. <http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_tuotantotekniikka/polttotekniikka_kiinteille_polttotekniikka_kiinteiden_biopolttoaineen_palaminen>. Luettu 9.9.2016
- 8 Alakangas, Eija – Erkkilä, Ari – Oravainen, Heikki 2008. Tehokas ja ympäristöä säästävä tulisijalämmitys. Polttopuun tuotanto ja käyttö. VTT. Jyväskylä.
- 9 Alakangas, Eija 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT. Espoo.
- 10 Kaukolämmön käsikirja. 2006. Energiateollisuus Ry Kaukolämpö. Helsinki.
- 11 Flyktman, Martti – Impola, Risto – Linna, Veli. 2012. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. Jyväskylä. Energiateollisuus Ry. Ympäristöministeriö.
- 12 Blomberg, Pauli. 2005. Kattilalaitoksen polttotekniikat ja ilmajärjestelmät. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu
- 13 Luovutuskansio. 2002. Livite Oy. Haukivuoren Lämpö Oy. Haukivuori. Työ n:ro 509/20022. KPA-lämpökeskus 2,0 MW.

- 14 Laaksovirta, Pekka. 2013. Energiatehokas puulämmitys. Opinnäytetyö. Lahden Ammattikorkeakoulu.
- 15 Thunman, Henrik. 2001. Principles and Models of Solid Fuel Combustion. Paper VIII. Department of Energy Conversion. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.
- 16 Koskelin, Roni. 2016. Laitosmies, Haukivuoren Lämpö Oy. Keskustelut 27.9.2016.
- 17 Kakko, Markku. 2012. Lämminvesikattilan lämpötekniinen suunnittelu. Insinööri-työ. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.
- 18 Viljanen, Janne. 2012. Stokerin ohjauskeskus ja lämpötilasuntin automatisointi. Opinnäytetyö. Vaasan ammattikorkeakoulu.
- 19 Ohlström, Mikael. 1998. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa. Espoo. VTT.
- 20 Alakangas, Eija – Hurskainen, Markus – Laatikainen-Luntama, Jaana – Korhonen, Jaana. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo. VTT.
- 21 Tuomi, Seppo. 2013. Selvitys rakennusten biokattilalämmittäjien energiategokkuusneuvonnan toteuttamiseksi ja neuvonnan vaikutusten arvioimiseksi. Versio28062013. Motiva.
- 22 Tuoteluettelo. Wehotharm-kaukolämpöputkijärjestelmä. Uponor.
- 23 Tuoteluettelo. Casaflex – Kaukolämpöputket. Prugg-Pema.
- 24 Hilden, Esa. 2010. Kattilan hyötysuhteen määrittäminen. Opinnäytetyö. Kymenlaakson Ammattikorkeakoulu.
- 25 Lämmöntuotto, kaukolämpö. 2016. Verkkodokumentti. Motiva. <http://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiot/energiaeksperttitoiminta/lahtotilanteeseen_tutustuminen/lammontuotto_kaukolampo>. Luettu 6.10.2016.
- 26 LVI 01-10424: Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajaksot. 2008. Helsinki. Rakennustieto Oy. Rakennustietosäätiö.
- 27 Viander, Tero. 2014. Kaukolämpöverkon käytön optimointi. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Energiategniikan koulutusohjelma.

- 28 Ojanen, Tuukka. 2014. Lämpöhäviöiden määrittelyminen kaukolämpöverkossa. Puolustushallinnon rakennuslaitos. Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu.
- 29 Unicon Biograte kattilalaitos. 2016. Kuva. KPA Unicon. <[http://www.kpau-
nicon.fi/fi/unicon_biograte](http://www.kpau-
nicon.fi/fi/unicon_biograte)>. Luettu 5.11.2016.
- 30 Kaukolämmön käyttötaloudelliset tunnusluvut 2011–2015. 2016. Verkkodokumentti. Energiategollisuus Ry. <[http://energia.fi/tilastot/kayttotaloudelliset-tunnuslu-
vut](http://energia.fi/tilastot/kayttotaloudelliset-tunnuslu-
vut)>. Luettu 5.11.2016.
- 31 Paavilainen, Heikki. 2009. Luentomoniste: Hydraulikka 1. Metropolia ammattikorkeakoulu. <[http://docplayer.fi/8039034-Heikki-paavilainen-20-08-09-1-hyd-
rauliikka-1.html](http://docplayer.fi/8039034-Heikki-paavilainen-20-08-09-1-hyd-
rauliikka-1.html)>. Luettu 5.11.2016.
- 32 Eurooppa 2020 -tavoitteet. 2015. Verkkodokumentti. European Commission. <[http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/in-
dex_fi.htm](http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/in-
dex_fi.htm)>. Luettu 1.10.2016.
- 33 Hansa Power Oy Tuliputki-savuputkihöyrykattilat. 2015. Kuva. Universal UL-S. <<http://www.hansapower.fi/vesi-ja-hoyry-kattilat/uls-ulsx.html>>. Luettu 5.11.2016.
- 34 Casaflex. 2016. Kuva. Archiproducts, Brugg Pipe Systems. <[http://www.archi-
products.com/en/products/29688/pipes-for-heating-system-casaflex-brugg-pipe-
systems.html](http://www.archi-
products.com/en/products/29688/pipes-for-heating-system-casaflex-brugg-pipe-
systems.html)>. Luettu 5.11.2016.
- 35 EN 253 2Mpuk yksiputkielementti. 2016. KVL Pipe Oy Tuoteluettelo. Kuva. <<http://www.kvl-pipe.fi/tuoteluettelo>>. Luettu 5.11.2016.

Haukivuoren hakekattilalaitos, polttoaineen toimintakaavio



Haukivuoren Lämpö Oy, verkstokartta

