

Petri Moisio

VALIO HAAPAVEDEN TEHTAAN  
HERA LTO -VERKON TOIMINNAN  
TARKASTELU PINCH-ANALYYSIN  
AVULLA

Opinnäytetyö  
Ympäristötekniikan koulutusohjelma


Marraskuu 2012




**MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU**

Mikkeli University of Applied Sciences

## KUVAILULEHTI

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>	<p><b>Opinnäytetyön päivämäärä</b></p> <p>15.11.2012</p>
<p><b>Tekijä(t)</b></p> <p>Petri Moisio</p>	<p><b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b></p> <p>Ympäristötekniikan koulutusohjelma YAMK, kestävä energiatalous</p>
<p><b>Nimeke</b></p> <p>Valio Haapaveden tehtaan hera LTO -verkon toiminnan tarkastelu pinch-analyysin avulla</p>	
<p><b>Tiivistelmä</b></p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli arvioida pinch-analyysiä käyttäen, kuinka hyvin nykyinen hera LTO-verkosto toimii. Samalla oli tavoitteena selvittää kuinka hyvin pinch-analyysi soveltuu meijeriprosessien energiankäytön analysointiin. Työn toimeksiantajana oli Valio Oy. Aikaisempaa käytännön kokemusta pinch-analyysistä ei ollut. Se olikin yksi merkittävä syy, miksi tämä tutkimus tehtiin.</p> <p>Pinch-analyysia sovellettiin nykyiseen hera LTO -verkostoon. Aluksi kerättiin hera LTO-järjestelmän virtauksien lähtötiedot, joiden perusteella pinch-analyysi toteutettiin. Työssä laskenta on esitetty vaihe vaiheelta hyvinkin yksityiskohtaisesti, mutta käytännössä laskenta suoritettiin Pinch Analysis Spreadsheet taulukkolaskentapohjalla, joka toimii Microsoft Excel-ohjelmistossa.</p> <p>Vuoden 2011 mittaustietojen perusteella hera LTO - järjestelmän avulla säästetty energiamäärä oli noin 8 400 MWh/a. Pinch-analyysi toteutettiin lämpötilaerolla 10 °C sekä lähtötietojen perusteella lasketuilla TAM- (aikakeskiarvoistetulla) tehoilla ja - virtauksilla. Nämä tekijät antavat optimistisemmat lopputulokset. Pinch-analyysin perusteella hera LTO-järjestelmän teho oli 1576 kW, joka vastaa 8000h käyttöajalla noin 12 600 MWh energian tarvetta vuodessa. Prosessien vaatima kokonaisteho oli yhteensä 2 093 kW, joka vastaa 8000h käyttöajalla noin 16 700 MWh energian tarvetta vuodessa. Mittaustietojen pohjalta voidaan todeta, että hera LTO-järjestelmä tuottaa noin 50 % kokonaisenergiatarpeesta. Teoreettisesti tarkasteltuna se voisi tuottaa noin 90 % kokonaisenergiatarpeesta. Joten potentiaalia järjestelmässä vielä on.</p> <p>Työssä iteroitiin myös raja-tapaus, eli pienin lämpötila-ero, jonka alapuolella ei sisäinen lämmöntalteenotto enää tehostu. Lämpötilaeroksi löytyi 5,79 °C.</p> <p>Tälle työlle asetetut tavoitteet saavutettiin hyvin. Pinch-analyysi on työkalu myös meijeriprosessien energiankäytön analysointiin. Sillä voidaan myös helposti tarkastella sisäistä lämmöntalteenottoa sekä kuvata ulkopuolisten hyödykkeiden tarpeita ja niiden lämpötilatasoja.</p>	
<p><b>Asiasanat (avainsanat)</b></p> <p>Pinch-analyysi, Valio Oy, Lämmöntalteenotto, Energiatehokkuus</p>	
<p><b>Sivumäärä</b></p> <p>44</p>	<p><b>Kieli</b></p> <p>Suomi</p>
<p><b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b></p>	
<p><b>Ohjaavan opettajan nimi</b></p> <p>Aki Valkeapää</p>	<p><b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b></p> <p>Valio Oy</p>

## DESCRIPTION

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		<b>Date of the master's thesis</b>  15.11.2012	
<b>Author(s)</b>  Petri Moisio		<b>Degree programme and option</b>  Bachelor of environmental engineering, sustainable energy economics	
<b>Name of the master's thesis</b>  The use of pinch analysis to study operation of the whey heat recovery network at Valio Haapavesi factory			
<b>Abstract</b> The aim of this study was to evaluate the pinch analysis of how well the current whey heat recovery network works. At the same time the goal was to find out how well the pinch analysis is suitable for dairy processes, energy use for analyzing. The work was commissioned by the Valio Ltd.  Pinch-analysis was applied to the current whey heat recovery network. The calculation is presented step by step in great detail. In practise, the calculation was performed Pinch Analysis Spreadsheet spreadsheet template, which works with Microsoft Excel software.  In 2011, the measurement data of whey heat recovery system showed that the amount of energy was about 8 400 MWh save. The pinch analysis was carried out with temperature difference of 10 degrees. The initial data was calculated on the basis of Time Average Model outputs and flows. Pinch-analysis of whey heat recovery system of power was 1576 kW, corresponding to 8000 hours operating time of approximately 12 600 MWh of energy need for per year. The energy required by the process is about 16 700 MWh per year. Based on these results it can be concluded that the whey heat recovery system produces approximately 50 percent of the total energy requirements. Theoretically it could produce about 90 % of the total energy demand.  At the same time the limit value was retained for the case, that is, the minimum temperature below which internal heat recovery does not take place. Temperature Difference was found 5,79 degrees.  This work objectives were achieved. Pinch analysis is well suited for for analyzing the energy use of dairies. It can be used to view internal heat recovery, as well as to describe need for external energy and temperature levels.			
<b>Subject headings, (keywords)</b>  Pinch analysis, Valio Ltd, heat recovery, Energy Efficiency			
<b>Pages</b> 44		<b>Language</b> Finnish	
<b>Remarks, notes on appendices</b>			
<b>Tutor</b>  Aki Valkeapää		<b>Master's thesis assigned by</b>  Valio Ltd	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	VALIO OY HAAPAVEDEN TEHDAS JA SEN VALMISTUSPROSESSIT .....	2
2.1	Haapaveden tehdas .....	2
2.2	Vastaanotto ja yhteiskäsittely .....	2
2.2.1	Maidon käsittely yhteiskäsittelyssä.....	3
2.2.2	Heran käsittely yhteiskäsittelyssä .....	3
2.3	Juuston valmistus.....	4
2.4	Jauheen valmistus .....	5
2.5	Energian käyttö .....	6
3	PINCH-ANALYYSI.....	7
3.1	Pinch-analyysin perusta .....	8
3.2	Pinch-analyysin historiallinen tausta .....	8
3.3	Pinch-analyysin perusta .....	9
3.4	Lämpötila-lämpötehotaso .....	10
3.5	Kylmä- ja kuumavirtakäyrät .....	10
3.6	Pinch- piste .....	16
3.7	Pinch-säännöt.....	17
3.8	Yhdistelmäkäyrä .....	18
3.9	Kehittynyt pinch-analyysi (Advanced pinch analysis).....	19
4	HERA LTO -VERKON PINCH-ANALYYSIN TOTEUTUS.....	22
4.1	Hera LTO -verkosto Haapaveden tehtaalla .....	22
4.2	Hera LTO -verkon pinch-analyysin lähtötiedot .....	24
4.3	Lämpötilatasojen määrittäminen.....	25
4.4	Kaskadilaskenta 1. vaihe .....	26
4.5	Pienin lämpötilaero $\Delta T_{\min}$ .....	28
4.6	Kuuma- ja kylmävirtauskäyrät (CC, Composite Curves).....	28
4.7	Yhteismitalliset lämpötilat.....	29
4.8	Kaskadilaskenta 2. vaihe .....	31
4.9	Yhdistelmäkäyrä .....	34
4.10	Hera LTO -verkon rajalämpötila.....	36
5	TULOKSET .....	39

6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	40
	LÄHTEET.....	44

## 1 JOHDANTO

Isoissa prosessiteollisuuden laitoksissa energian kulutus on yleensä huomattavan suuri. Tästä johtuen myös energiakustannukset ovat korkeita ja niiden osuus myös kokonaiskustannuksista on merkittävä. Energian kulutuksella tarkoitetaan tässä kohtaa lämpö- ja sähköenergian kulutusta yhteensä. Valio Haapaveden tehtaalla vuosittaiset energiakustannukset ovat noin 3–4 % kokonaiskustannuksista. Tämän vuoksi on jo pidemmän aikaa kiinnitetty huomiota energian säästöön. Valiolla on jo useiden vuosien ajan ollut käytössä ympäristöjärjestelmä ISO 14001, jonka myötä on myös laadittu kolmen vuoden mittaisia ympäristön hallintaohjelmia myös energiankulutuksen vähentämiseksi. Valion kotimaan tuotannon toimipaikat ovat liittyneet vuonna 2008 energiatehokkuussopimuksen toimialaliiton kautta (ETL-TOPO), minkä pääedellytyksenä on energiatehokkuuden parantaminen. Valio Haapaveden tehtaalla on tehty energia-analyysi vuonna 2000 ja seurantakatselmus vuonna 2011.

Katselmusten yhteydessä laaditaan yleensä toimenpidelistaa niistä asioista, joilla energiaa voidaan säästää ja energiatehokkuutta lisätä. Ne voivat olla pieniä toimenpiteitä tai sitten ne voivat olla todella isoja kokonaisuuksia, jotka vaativat isoja investointeja. Tällaisissa isoissa investoinneissa on monesti kyse lämmöntalteenottojärjestelmistä. Ne toki voivat olla kompakteja järjestelmiä mutta myös monitahoisia eri prosessien välisiä lämmöntalteenottoprosesseja. Tällaisia eri prosessien välisiä lämpövirtoja on tähän asti tarkasteltu hyvin yksinkertaisesti. On edetty vain kohde kerrallaan, mistä saadaan lämpöä talteen ja mihin sitä voidaan hyödyntää. Vain hyvin korkealla tasolla on voitu tarkastella näiden prosessien aikatauluja. Tällä tavalla on toki saatu ihan hyviäkin lopputuloksia, mutta kuitenkin kokonaisuus on jäänyt aina hieman arvailujen varaan ja varmasti ei ole pystytty osoittamaan, toimiiko lämmöntalteenottojärjestelmä parhaalla mahdollisella hyötysuhteella vai ei. Tämän vuoksi tuli ajatus kokeilla jotain uutta menetelmää, Pinch-analyysiä.

Tämän työn tavoitteena on tutkia pinch-analyysillä, kuinka hyvin ja optimaalisesti nykyinen hera LTO -verkosto toimii. Tavoitteena on analysoida, kuinka hyvin pinch-analyysi soveltuu meijeriprosessien energiankäytön analysointiin. Pyrkimys on myös ymmärtää pinch-analyysiä ja sen soveltamista. Pinch-analyysiprosessi käydään vaihe vaiheelta läpi nykyisen hera lämmöntalteenottoverkoston avulla.

## 2 VALIO OY HAAPAVEDEN TEHDAS JA SEN VALMISTUSPROSESSIT

### 2.1 Haapaveden tehdas

Valio Oy Haapaveden tehdas on aloittanut toimintansa 1965 Osuuskunta Pohjolan Maitona. Tällöin tuotanto alkoi maitojauheiden valmistuksesta. Vuonna 1974 alkoi juuston tuotanto. Tällä hetkellä Haapaveden tehtaalla valmistetaan kaikki Valio OI-termanni<sup>®</sup>-juustot. Tuotanto vuonna 2011 oli 25,4 miljoonaa kiloa. Tällä hetkellä jauheina valmistetaan DEMI jauheita sekä Startti vasikanjuomajauheita. Yhtenä merkittävänä tuotteena on myös DEMI heratiiviste. Vuonna 2011 jauheiden valmistus (+ tiivisteet jauheeksi) oli 17,2 miljoonaa kiloa. Tehdas työllistää tällä hetkellä keskimäärin 190 henkilöä.

### 2.2 Vastaanotto ja yhteiskäsittely

Tehtaalla raaka-aine otetaan vastaan maidon vastaanotossa. Maidon vastaanottotoiminnot sekä varastointi kuuluvat yhteiskäsittelytoimintoihin (Aho & Hildén 2007). Haapaveden tehtaalla näistä toiminnoista käytetään lyhennettä VoYk. Osastot ovat fyysisesti sekä toiminnallisesti erillään toisistaan. Vastaanottoon tulee kaikki tehtaalle tuleva maitoraaka-aine (raakamaito), heratiivisteet sekä kirnumaito. Tiloilta saapuva raakamaito pumpataan raakamaitosiiloihin. Varastosiihot ovat pääosin 100 m<sup>3</sup>- kokoisia. Haapaveden tehtaan vastaanotossa on yhteensä 3 purkukaistaa, jolle autot voivat ajaa. Yhdessä autossa on keskimäärin 36 000 – 38 000 litraa maitoa. Vuoden 2011 vastaanotettu raakamaitomäärä oli 249 miljoonaa litraa eli vuodessa yli 6700 maitoautoa kävi purkamassa kuormansa Haapaveden tehtaalla. Raaka-aineen vastaanottotapahtuman yhteydessä varmistetaan raaka-aineen laatu erilaisilla analyyseilla ja mittauksilla. Yhteiskäsittelyssä nimensä mukaan käsitellään prosessissa käytettäviä raaka-aineita sekä juustonvalmistuksesta vapautuva hera.

Eri prosessien sivu- ja lopputuotteina syntyy muita erilaisia nestemäisiä tuotteita, jotka lähetetään Valion muille tuotantolaitoksille jatkojalostettaviksi. Nämä tuotteet kulkevat myös vastaanoton kautta. Taulukkoon 1 on koottu kaikki nestemäiset tuotteen määrineen vuosilta 2007-2011, jotka ovat kulkeneet vastaanoton kautta.

**TAULUKKO 1. Raaka-aineen vastaanottomäärät 2007-2011 litroina**

Tuote	2007	2008	2009	2010	2011
Raakamaito	192 796 999	208 891 198	206 827 419	240 879 118	249 734 053
Heratiiviste	21 961 928	16 926 583	18 233 790	22 290 455	19 583 048
Kirnumaito	-	9 172 745	19 003 243	17 436 046	18 068 438
Nanotiiviste	2 005 505	2 561 478	1 071 563	85 826	-
Yhteensä	216 764 432	237 552 004	245 136 015	280 691 445	287 385 539

### 2.2.1 Maidon käsittely yhteiskäsittelyssä

Yhteiskäsittelyssä raakamaito pastöroidaan ja maidon rasvapitoisuus vakioidaan kahdella vakiointilinjalla haluttuun koostumukseen. Vakioitu maito pumpataan käsittelyjen jälkeen juustolan varastosiiloihin. Vakioinnin seurauksena syntyy ylijäämäärasvaa ja kermaa, joka pastöroidaan ja siirretään taas varastosiiloihin, joista se edelleen kuljetetaan Seinäjoen tehtaalle.

Vakioitu kattilamaito ajetaan baktokuugin läpi. Baktokuugilla saadaan maidosta poistettua sellaiset maidossa olevat bakteeri-itiöt, jotka eivät pastöroinnissa häviä. Baktokuugoinnin jälkeen maito pastöroidaan ja sen jälkeen jäähdytetään. Jäähdytettynä maito ohjataan juustolan maitosiiloihin, juuston raaka-aineeksi.

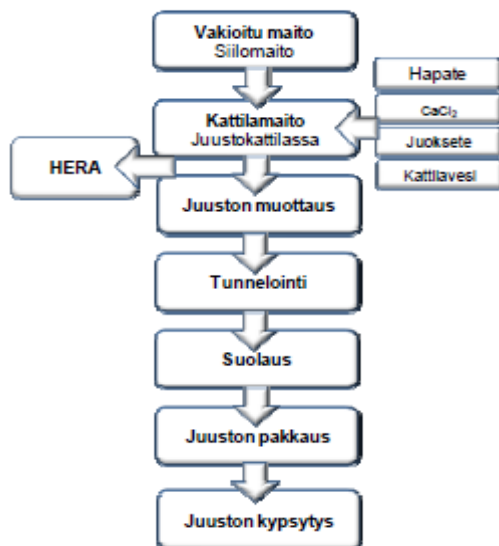
### 2.2.2 Heran käsittely yhteiskäsittelyssä

Juustonvalmistuksen sivutuotteena erottuu heraa, joka palautuu yhteiskäsittelyyn. Tämä hera sisältää jonkun verran rasvaa sekä juustopölyä. Juustopöly poistetaan herasta seulontalaitteen avulla, jonka jälkeen se johdetaan lingolle. Lingolla herasta irrotetaan keskipakovoiman avulla pienimmätkin pölyhiukkaset. Tämän jälkeen heraa lämmitetään ja samalla herassa oleva rasva separoidaan herakermaksi. Herakerma edelleen pastöroidaan ja jäähdytetään. Tämän jälkeen se on valmis toimitettavaksi Seinäjoen tehtaalle jatkojalostusta varten. Kuorittu hera pastöroidaan sekä jäähdytetään ja siirretään edelleen jauheprosessiin jatkojalostukseen.



### 2.3 Juuston valmistus

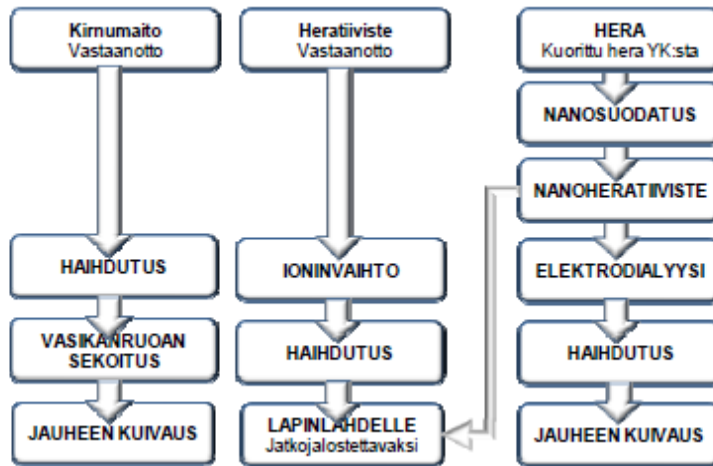
Käsitelty maito siirretään juustolan varastosiiloista juustokattiloihin. Haapavedellä on yhteensä 10 kpl juustokattiloita. Yhden kattilan tilavuus on noin 15 000 litraa. Juustolassa on kaksi eri juustonvalmistuslinjaa. Juustokattilassa maitoon sekoitetaan juoksete, hapate sekä mahdolliset lisäaineet. Juoksetumisen jälkeen muodostunutta juustomassaa leikataan ja keitetään eli lämmitetään tarkan ohjelman mukaisesti. Tämän vaiheen aikana osa herasta poistetaan ja keiton lopuksi juustomassa ja loppu herasta erotellaan toisistaan. Juustomassa siirretään muottaukseseen, jossa juusto saa lopullisen muotonsa. Muottauksen jälkeen juusto siirtyy tunnelointivaiheeseen, jossa alkaa tapahtua jo juuston kypsyminen sekä puristuminen. Tämän vaiheen jälkeen juusto siirretään suolaukseen suola-altaaseen. Suolauksen jälkeen juusto siirtyy pakkaamoon, jossa se pääosin pakataan jo suoraan kuluttajapakkauksiin. Osa tuotteista siirtyy Valio Vantaan tehtaalle viipaloitavaksi ja uudelleen pakattavaksi. Juustot kypsytetään vielä varastoissa muutaman viikon ajan ennekuin ne siirtyvät kaappoihin ja kuluttajille. Yksinkertaistettuna valmistusprosessi on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Oltermannijuuston valmistus (Ilmonen 2011)

## 2.4 Jauheen valmistus

Jauheen valmistus ja valmistusprosessi koostuvat useista laite- ja prosessikokonaisuuksista. Lopputuotteina Haapavedellä valmistetaan Valio DEMI<sup>®</sup>-jauheita (vähäsuolaisia herajauheita) sekä Valio Startti vasikanjuomajauheita. Jauheiden valmistusprosessi on kuvattu kuvassa 2.



**KUVA 2. Jauheen valmistuksen pääprosessit (Ilmonen 2011)**

Nanosuodatus perustuu kalvosuodatukseseen, jossa kalvo päästää lävitseen nestemäisen permeaatin ja sen mukana kulkeutuvat natriumin, kaliumin sekä kloridit. Viime kädessä permeaatti kulkeutuu jäteveeteen. Tämän prosessin tuloksena syntyy nanoheratiivisettä, joka osin siirretään jatkojalostettavaksi eteenpäin ja osin jatkojalostetaan itse. Käytännössä nanosuodatus on ensimmäinen vaihe heran suolanpoistossa.

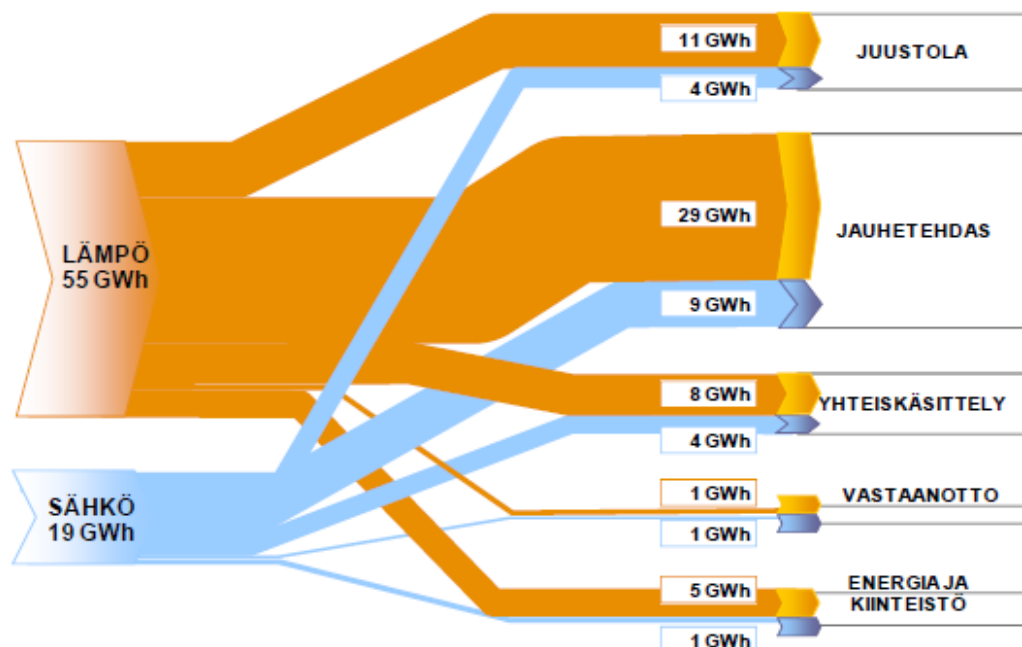
Elektrodialyysi on elektrolyysiin perustuva erotusmenetelmä, jossa suolaa (ionit) erotetaan tasasähkövirran avulla. Elektrodialyysin avulla voidaan poistaa heran kuiva-aineesta noin 70 % suoloista. Ioninvaihdon avulla voidaan periaatteessa päästä jopa lähes 100 % suolanpoistoasteeseen. Haapaveden tehtaalla tämä poistoaste on tällä hetkellä maksimissaan 90 %. Ioninvaihtoprosessi koostuu kationi- ja anioni vaihtimisesta.

Jauheen kuiva-aineen nostamiseksi käytetään haihdutinlaitteistoa. Haapavedellä on käytössä kaksi haihdutinlaitteistoa. Useiden peräkkäisten vaiheiden jälkeen syntynyt

konsentraatti valuu alipaineessa haihdutustuubeja pitkin uuteen vaiheeseen. Haihtunutta vettä kutsutaan maitolauhteeksi, jota on mahdollisuus uusiokäyttää. Jauheen kuivauksen yhteydessä konsentraatti sumutetaan joko suuttimilla tai kiekkosumutuksella hyvin pieninä pisaroina kuivaustorniin. Sumutetut nestepisarot kuivuvat kammissa kuuman ilman (180 °C) avulla jauhepartikkeleiksi. Haihtunut vesi menee poistuvan ilman mukana taivaalle ja jauhe otetaan talteen ja pakataan joko 1000 kg:n suursäkkeihin tai 25 kg:n piensäkkeihin.

## 2.5 Energian käyttö

Haapaveden tehtaan energiankäyttö koostuu höyry- ja sähköenergiasta. Noin puolet tehtaan energiasta käytetään jauheprosessissa ja etenkin haihdutuksessa ja kuivauksessa. Kylmäenergian valmistus vaatii paljon sähköenergiaa. Suurin osa kylmäenergiasta käytetään heran jäähdytyksessä yhteiskäsittelyssä, mutta myös juustovarastojen jäähdytys sekä yleensä tilojen jäähdytys etenkin kesäaikana vaatii paljon kylmäenergiaa. Paineilman tuottaminen on myös yksi suurimmista sähköenergian käyttökohteista. Kuvassa 3 on esitetty energian käyttö vuonna 2009 Haapaveden tehtaalla sankey-kaavion avulla.



KUVA 3. Tehtaan energian käyttö vuonna 2009 (Peltonen 2011)

Taulukon 2 lukuja tarkasteltaessa on huomattavaa, että vuonna 2006 raaka-aineen vastaanotto oli noin 178 miljoonaa litraa kun se vuonna 2011 oli lähes 260 miljoonaa litraa, joten kokonaisraaka-aineen vastaanottomäärä ja sitä myöten sen käsittelymäärä on noussut yli 46 %. Kokonaisenergian kulutus kasvoi samassa ajassa noin 15 %.

**TAULUKKO 2. Haapaveden tehtaan energian käyttö 2006-2011**

Vuosi	Sähkö / MWh	Höyry / MWh
2006	16 385	50 942
2007	17 203	53 830
2008	17 640	52 492
2009	18 709	54 555
2010	19 492	58 936
2011	20 930	57 799

Pääosa höyryenergiasta tuotetaan läheisellä Vapon voimalaitoksella ja pieniosa tehtaan tontilla sijaitsevalla Advenin voimalaitoksella, joka toimii myös varavoimalaitoksena. Vapon voimalaitos käyttää polttoaineena pääasiassa turvetta ja muita puupohjaisia polttoaineita sekä kuivattua jätevesilietettä. Advenin voimalaitos käyttää polttoaineena raskasta polttoöljyä.

Tehtaan sähkönsyöttö tapahtuu LNI:n 20 kilovoltin verkon kautta. Tehtaalla on yhteensä 5 muuntajaa kolmessa eri muuntamossa. Tehtaan sähkön tilausteho on tällä hetkellä (2012) 3200 kW. Suurimmat yksitälliset sähkönkuluttajat ovat jauheosastolla olevat haihduttimet, yhteiskäsittelyssä olevat separaattorit sekä kylmä- ja paineilma-keskuksen kompressorit. Etenkin kesäaikaan sähkönkulutus kasvaa jäähdytystehontarpeen kasvaessa.

### 3 PINCH-ANALYYSI

Pinch-analyysi on laajojen prosessiteollisuuden laitosten yksityiskohtainen menetelmä höyry- ja lämpöenergian hyödyntämiseksi tehokkaasti teollisuuden eri prosesseissa. Pinch-analyysiä voidaan hyödyntää paljon energiaa käyttävän teollisuuden energiatehokkuuden parantamisessa (Motiva 2012).

### 3.1 Pinch-analyysin perusta

Pinch-menetelmä perustuu termodynamiikan 1. ja 2. pääsääntöön, mutta sisältää myös taloudellisen tarkastelun, verkoston vuorovaikutukset ja laitevalinnan ehdot. Menetelmän avulla voidaan määrittää prosessille taloudellisesti optimaalinen lämmönsiirtoverkosto siten, että lasketaan termodynamiikkaan ja taloudellisiin reunaehdoin perustuva ulkoisen energian kulutustavoite (Tampereen teknillinen yliopisto).

Pinch-analyysin avulla on tarkoitus löytää tavoitteellinen taso prosessien tarvitsemalle ulkopuoliselle energian käytölle, lähinnä jäädytys- ja lämmitysenergian määrälle. Tämä tavoite-energiamäärä määrittelee prosessien vaatimat lämmönvaihtimet ja lämmönvaihdinverkoston. Tämä kokonaisuus vaatii laajaa tarkastelua ja ymmärrystä niin prosesseista, energian kulutuksesta kuin myös energian kustannuksista.

Pinch-analyysiä varten on ensin kerättävä prosesseista kaikki tiedot liittyen kylmä (lämmitettävät virrat)- ja lämpövirtoihin (jäädytettävät virrat). Analyysissä tarvitaan virtojen lähtölämpötilat ( $^{\circ}\text{C}$ ) ja tavoitelämpötilat ( $^{\circ}\text{C}$ ) sekä tarvittavat tehot ( $\Delta H$ ) tai lämpökapasiteettivirrat ( $FC_p$ ). Näiden tietojen avulla muodostetaan kaksi summakäyrää. Summakäyrät havainnollistavat kaskadilaskennan tuloksia. Kaskadilaskenta ilmoittaa lämpötehon eri lämpötilatasoilla. Pinch-analyysin antamista käyristä saadaan luettua prosessin tarvitsema ulkopuolinen jäädytysteho, prosessin tarvitsema ulkopuolinen lämmitysteho, suurin mahdollinen sisäinen lämmöntalteenotto ja pinch-lämpötila. (Kemp 2007.)

### 3.2 Pinch-analyysin historiallinen tausta

Pinch-analyysi kehitettiin alun perin 1970-luvulla ETH Zürichin ja Leedsin yliopistossa (Kemp 2007). Myöhempiä tutkimuksia on tehty professori Linnhoffin toimesta Manchesterissa (Gunnarsson A. et al. 2011). Pinch – tekniikka esiteltiin uutena termodynamiikan lainalaisuuksiin perustuvana tapana, jolla voitiin taata minimienergiatasot lämmönsiirtoverkkoa suunniteltaessa (Cheresources).

Prosessiteollisuusyritys ICI laajensi omaa teollisuuttaan 1980-luvulla ja näin ollen sen energiankäyttö myös kasvoi. Tämän johdosta näytti siltä, että ainoa mahdollisuus ratkaista tämä ongelma oli rakentaa uusi voimalaitos. Tähän ei kuitenkaan ollut mahdol-

lisuutta, koska teollisuusalue oli jo rakennettu niin täyteen ja ainoa mahdollisuus sen rakentamiseen olisi valtatie toisella puolella oleva alue. Tähän ratkaisuun olisi kuitenkin liittynyt turvallisuusriskejä sekä logistisia ongelmia. ICI palkkasi asiantuntijaryhmän tutkimaan tätä uutta analyysimallia, voisiko sillä ratkaista tätä ongelmaa. Hyvin lyhyessä ajassa tämä ryhmä oli tehnyt laskelmia siitä, että ulkoista energiaa voitaisiin käyttää nykyistä paljon vähemmän. Lopputuloksena säästettiin yli miljoona puntaa vuodessa energiakustannuksissa ja oli välttytty uuden energialaitoksen rakentamiselta. Tämän jälkeen ICI laajensi Pinch-analyysin käytön kaikkiin yhtiöihinsä (Kemp 2007). Käyttökohteina olivat hyvinkin erilaiset prosessiteollisuuden alat, joissa energiasäästöt olivat keskimäärin 30% (Linnhoff & Turner 1981). Tämän jälkeen yhä tiiviimpi yhteistyö kehitys- ja toteutusryhmien välillä mahdollisti tämän tekniikan edelleen kehittämisen. Muutamien vuosien päästä julkaistiin useita tekniikoita tästä analyysimallista. Merkittävämmät jatkotutkimukset on suoritettu UMIST:ssa, joka nykyisin toimii osana Manchesterin yliopistoa. (Kemp 2007.)

Englannin hallituksen rahoittamissa tutkimuksissa on todettu, että tämä pinch-analyysimalli sopii hyvin monille prosessiteollisuuden aloille, kuten öljynjalostusteollisuuteen, kemianteollisuuteen, paperiteollisuuteen, kaivosteollisuuteen, elintarviketeollisuuteen sekä lämpövoimalaitoksiin (Brown 1989). Menetelmä sopii erityisesti aloille, joissa on panosprosesseja. Nykyisin pinch-analyysiä käytetään jo yli 30:ssä maassa ja pinch-analyysin on todettukin olevan jo täysin toimiva analyysitekniikka (Kemp 2007).

### **3.3 Pinch-analyysin perusta**

Pinch-analyysi perustuu termodynamiikan ensimmäiseen ja toiseen pääsääntöön. Ensimmäisen pääsäännön mukaan lämpö on eräs energian muoto, jota ei voi luoda tai hävittää, vain muuttaa muodosta toiseen. Toisen pääsäännön mukaan systeemi pyrkii prosessin kautta kohti tasapainotilaa eli kohti suurempaa epäjärjestyä. Tämä periaate määrittää luonnossa tapahtuvien prosessien suunnan. Toisen pääsäännön mukaan lämpö ei siirry koskaan itsestään kylmemmästä lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan päin.

### 3.4 Lämpötila-lämpötehotaso

Pinch-analyysissä tarkastellaan kylmiä ja kuumia virtauksia. Kuumia virtauksia jäähdytetään ja kylmiä virtauksia lämmitetään. Kuumissa virtauksissa lämpötila laskee ja entalpia pienenee niiden luovuttaessa lämpöä. Kylmissä virtauksissa taas lämpötila ja entalpia kasvavat, kun ne vastaanottavat lämpöä. Pinch-analyysissä kylmät ja kuumat virtaukset esitetään yleensä lämpötila-lämpötehotasossa (Tampereen Teknillinen Yliopisto). Lämpöteho riippuu virtauksesta, massavirrasta ja lämpötilan muutoksesta. Tämä voidaan esittää yhtälön 1 avulla. (Kemp 2007.)

$$\Delta H = \int_{T_a}^{T_l} q_m C_p dt = q_m C_p \Delta T = F C_p \Delta T \quad (1)$$

missä

$\Delta H$	on teho, kW
$T_a$	on alkulämpötila, °C
$T_l$	on loppulämpötila, °C
$q_m$	on massavirta, kg/s
$C_p$	on ominaislämpökapasiteetti, kJ/kgK
$\Delta T$	on lämpötilaero, °C
$F C_p$	on lämpökapasiteettivirta, kW/K.

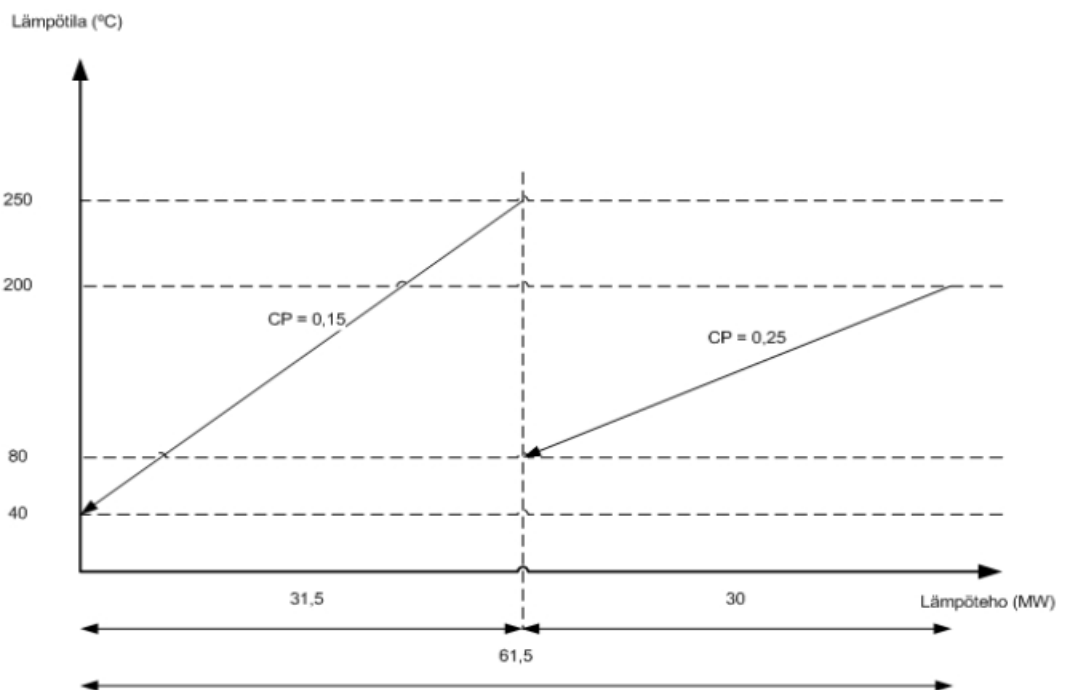
### 3.5 Kylmä- ja kuumavirtakäyrät

Seuraavassa on yksikertaisella esimerkillä kuvattu, miten kuuma- ja kylmävirtakäyrät muodostetaan kylmistä ja kuumista virtauksista, kun virtauksien lämpökapasiteettivirrat ( $F C_p$ ) ja alku- ja loppulämpötilat tunnetaan. Näitä kuuma- ja kylmävirtakäyriä kutsutaan summakäyriksi (CC, Composite Curves). Esimerkissä on kaikkiaan neljä virtausta, kaksi kuumaa ja kaksi kylmää. Esimerkin virtausten lähtötiedot on esitetty taulukossa 3.

**TAULUKKO 3. Lähtöarvot**

Virra	Kuuma/ Kylmä	T <sub>alku</sub> (°C)	T <sub>loppu</sub> (°C)	FC <sub>p</sub> (MW/K)	ΔH (MW)
1	Kylmä	20	180	0.2	32
2	Kuuma	250	40	0.15	-31.5
3	Kylmä	140	230	0.3	27
4	Kuuma	200	80	0.25	-30

Kuumat virtaukset on esitetty kuvassa 4 ja kylmät virtaukset kuvassa 6 lämpötila-lämpötehotasolla. Kuvissa 4, 5, 6 ja 7 lämpökapasiteettivirtaa FC<sub>p</sub> vastaa merkintä CP.



**KUVA 4. Erilliset kuumat virrat (Ruohonen 2008)**

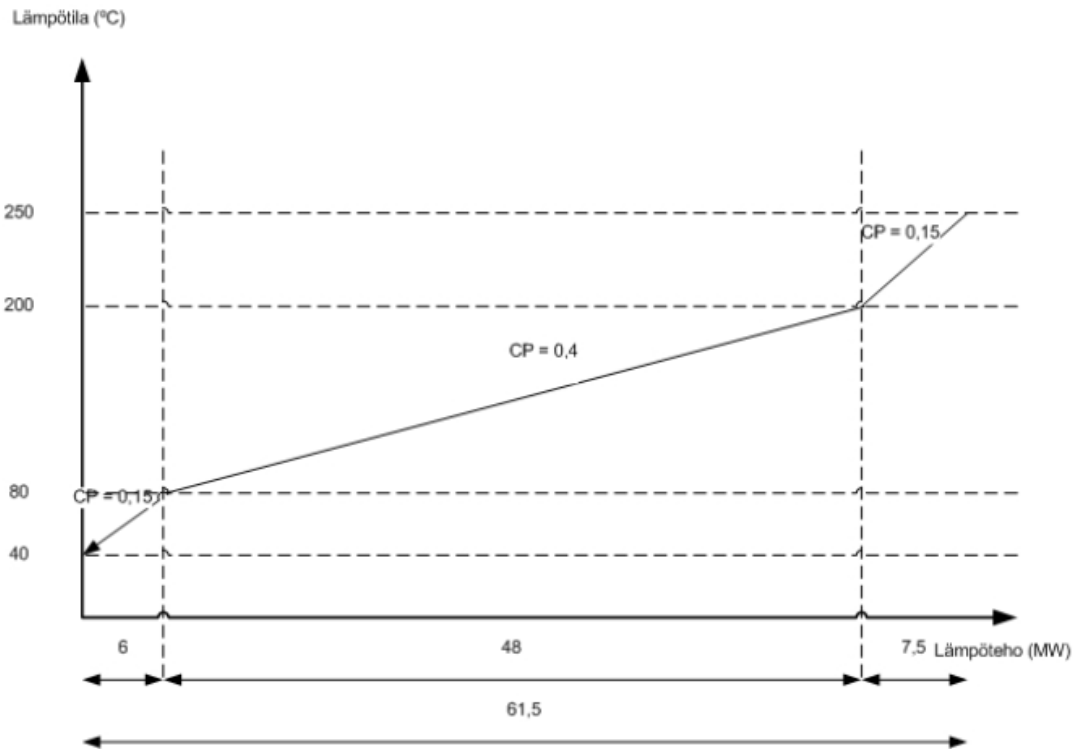
Yhdistetty kuumavirtakäyrä, joka on esitetty kuvassa 5, saadaan piirrettyä, kun ensin lasketaan tehot  $\Delta H$  jokaisella lämpötilavälillä erikseen ( $250\text{ °C} \leq T_1 \leq 200\text{ °C}$ ), ( $200\text{ °C} \leq T_2 \leq 80\text{ °C}$ ) ja ( $80\text{ °C} \leq T_3 \leq 40\text{ °C}$ ). Lämpötilavälejä vastaavat tehot ovat:

$$\Delta H_1 = 0,15\text{ MW/K} * (250-200)\text{K} = 7,5\text{ MW}$$

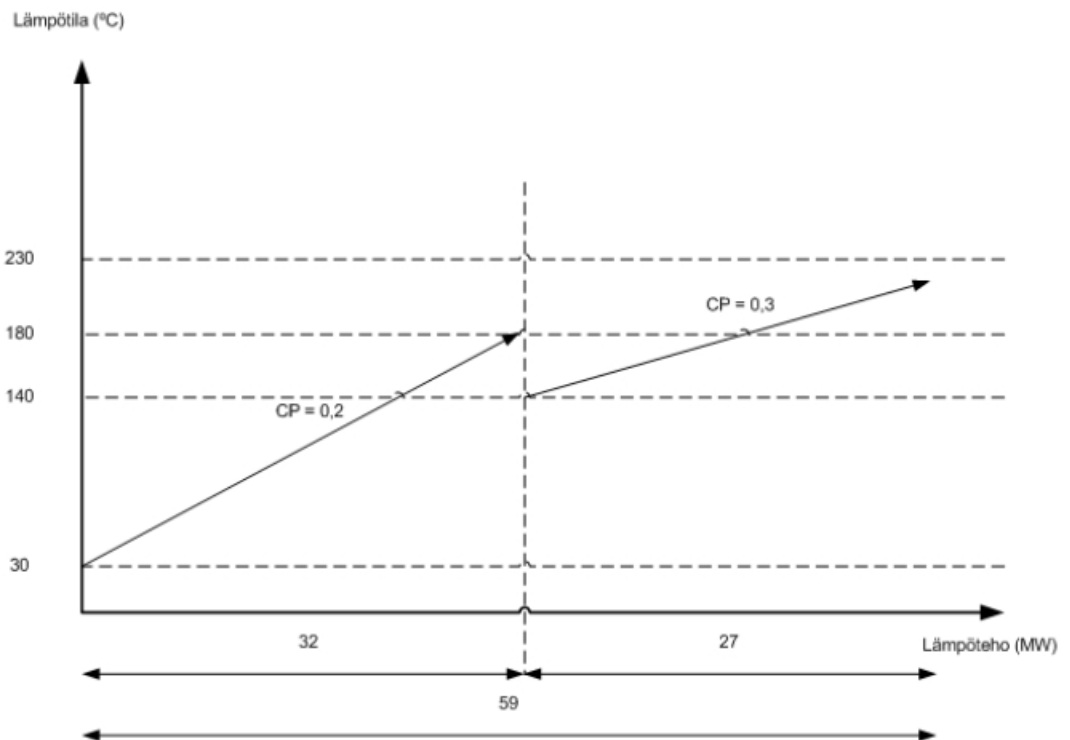
$$\Delta H_2 = (0,15 + 0,25)\text{ MW/K} * (200-80)\text{K} = 48\text{ MW}$$

$$\Delta H_3 = 0,15\text{ MW/K} * (80-40)\text{K} = 6\text{ MW}$$





**KUVA 5. Yhdistetty kuumavirtakäyrä (Ruohonen 2008)**



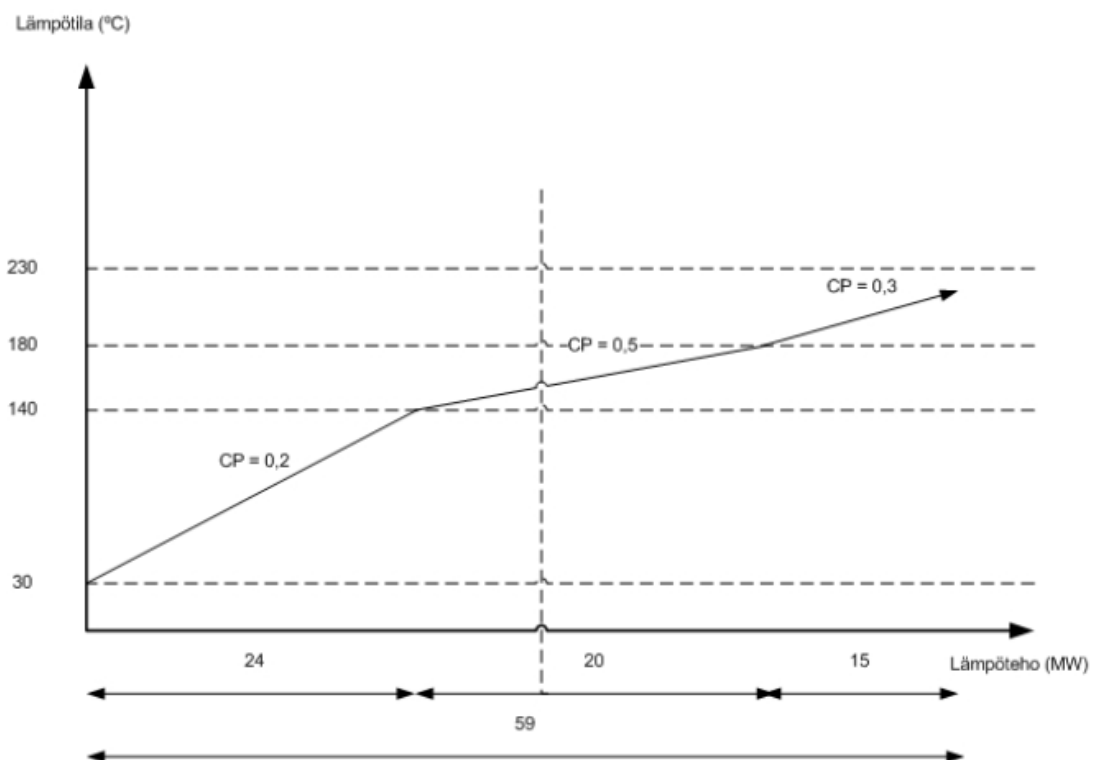
**KUVA 6. Erilliset kylmät virrat (Ruohonen 2008)**

Yhdistetty kylmävirtakäyrä, joka on esitetty kuvassa 7, saadaan piirrettyä, kun ensin lasketaan tehot  $\Delta H$  jokaisella lämpötilavälillä erikseen ( $230\text{ °C} \leq T_1 \leq 180\text{ °C}$ ), ( $180\text{ °C} \leq T_2 \leq 140\text{ °C}$ ) ja ( $140\text{ °C} \leq T_3 \leq 20\text{ °C}$ ). Lämpötilavälejä vastaavat tehot ovat:

$$\Delta H_1 = 0,3\text{ MW/K} * (230-180)\text{K} = 15\text{ MW}$$

$$\Delta H_2 = (0,2 + 0,3)\text{ MW/K} * (180-140)\text{K} = 20\text{ MW}$$

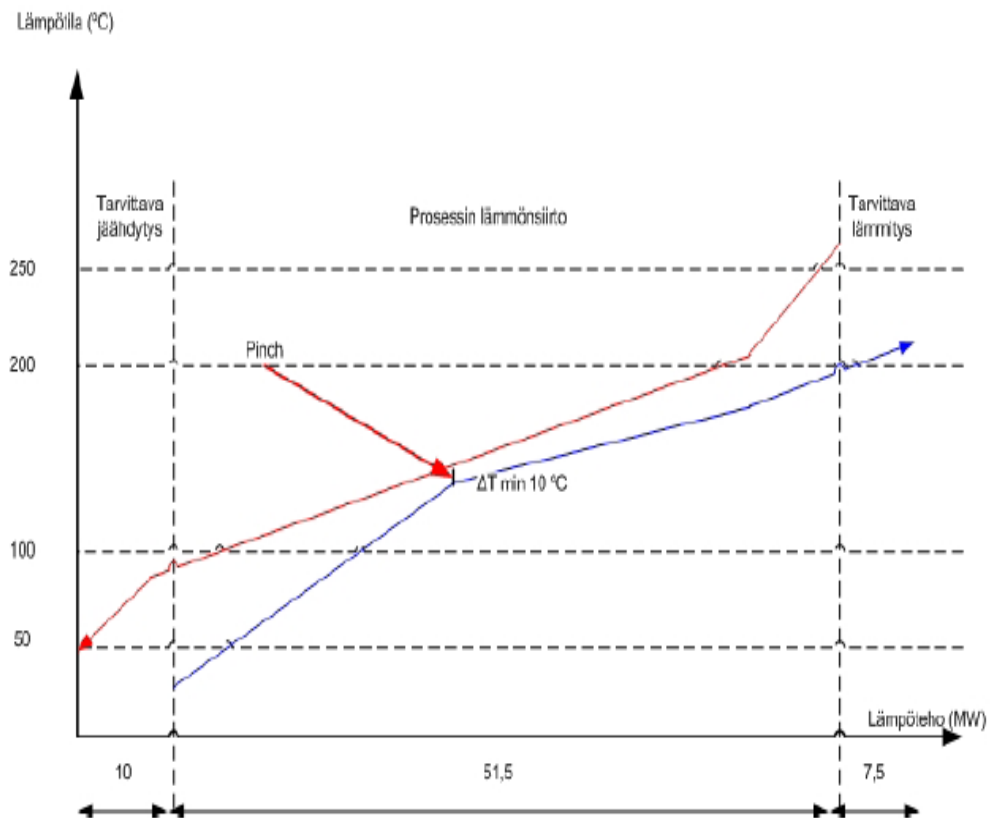
$$\Delta H_3 = 0,2\text{ MW/K} * (140-20)\text{K} = 24\text{ MW}$$



**KUVA 7. Yhdistetty kylmävirtakäyrä (Ruohonen 2008)**

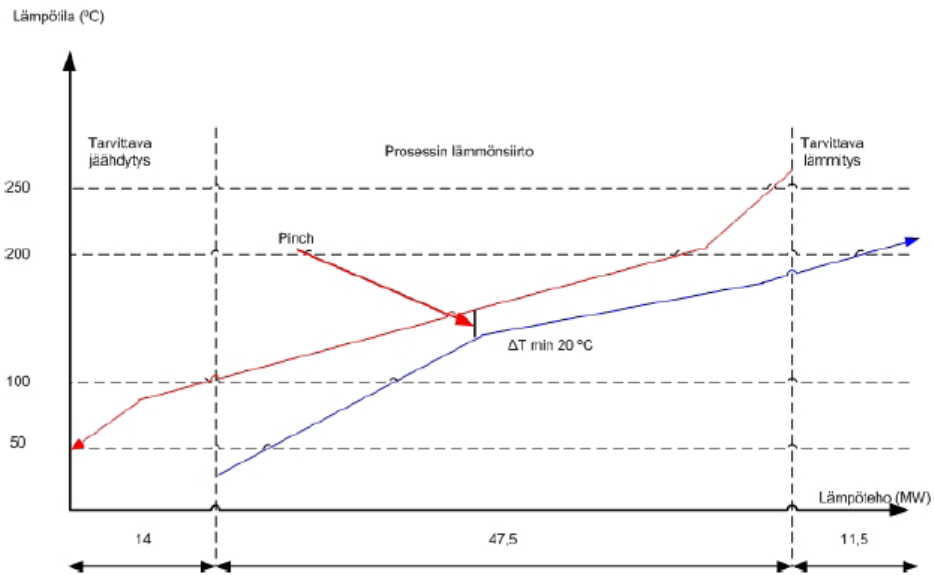
Yhdistetyt kuuma- ja kylmävirtakäyrät voidaan siirtää samaan kuvaan ja näin muodostuu summakäyrä (CC, Composite Curves), joka on esitetty kuvassa 8. Kuvasta voidaan lukea ulkopuolinen jäähdytys- sekä lämmitysenergian tarve tietyllä lämpötilaerolla ( $\Delta T_{\min}$ ). Tehontarpeet on käyrästä luettavissa käyrien päästä, jossa ne eivät ole päällekkäin. Ulkopuolinen lämmitystarve luetaan siltä osalta kylmävirtakäyrää millä se ulottuu kuumavirtakäyrän oikealle puolelle. Tällä kohdalla on siis olemassa lämmitystarve ja yläpuolella ei ole mitään jäähdytystä vaativaa virtaa. Ulkopuolinen jäähdytystarve luetaan taas päinvastoin toiselta puolelta käyrää vastaavasti. Käyrien väliin

jäävä alue kuvaa lämpö määrää, joka voidaan ottaa talteen kuumasta virtauksesta ja siirtää kylmään virtaukseen (Tampereen Teknillinen Yliopisto). Lämpötilaero ( $\Delta T_{\min}$ ) voidaan etukäteen valita ja tällä valinnalla määritellään samalla prosessin sisäinen lämmöntalteenoton tehokkuus. Pääsääntöisesti voidaan todeta, että mitä pienempi lämpötilaero valitaan, sen paremmin prosessin sisäinen lämmöntalteenotto toimii ja sen pienempi on tarvittava ulkopuolisen lämmityksen ja jäähdytyksen tarve. Tätä on havainnollistettu kuvissa 8 ja 9. Raja-arvotapauksissa lämpötilaeron pienentäminen ei kuitenkaan paranna sisäistä LTO:a, jonka myöhemmin huomaamme.



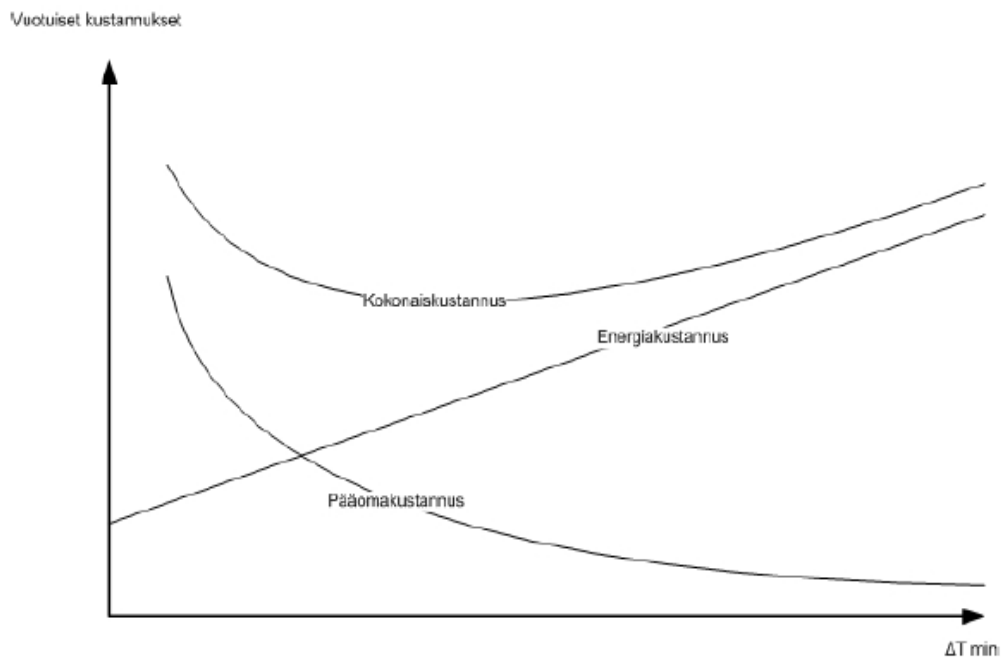
**KUVA 8. Kylmä- ja kuumavirtakäyrät, kun  $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (Ruohonen 2008)**

Kuvassa 8 tarvittava lämmitysteho on 7,5 MW ja jäähdytysteho 10 MW sisäisen lämmönsiirron ollessa 51,5 MW. Lämpötilaeron  $\Delta T_{\min}$  kasvaessa sisäinen lämmönsiirto heikkenee ja ulkopuolisten energioiden tehontarpeet kasvavat kuten kuvasta 9 ilmenee.



**KUVA 9. Kylmä- ja kuumavirtakäyrät, kun  $\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (Ruohonen 2008)**

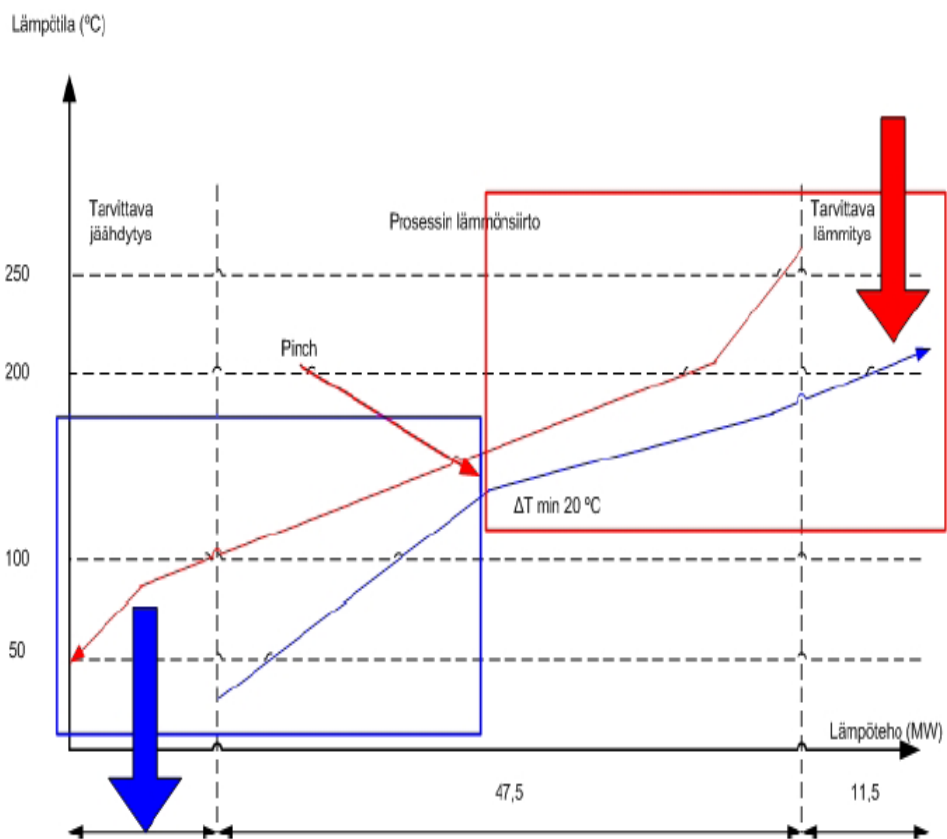
Kuvassa 9  $\Delta T_{\min}$  on  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $\Delta T_{\min}$  kasvattamisen seurauksena sisäinen lämmönsiirto pieneni noin 8%:a ollen nyt 47,5 MW ja ulkopuolinen jäähdytysteho kasvoi 40%:a ollen 14 MW. Ulkopuolinen lämmitysteho kasvoi noin 35%:a ollen 11,5 MW. Kokonaisenergian tarve kasvoi siis 8 MW. Huomoitavaa on se, että sisäisen lämmöntalteenoton pienentyessä 4 MW, ulkopuolinen lämmitys- ja jäähdytystehontarve kasvoi yhteensä 8 MW. Tämä tarkoittaa, että lämmönsiirtoverkkoon kohdistuvat investointikustannukset ovat pienemmät, mutta käyttökustannukset kasvavat.  $\Delta T_{\min}$  valinnan vaikutusta käyttö- ja investointikustannuksiin on havainnollistettu kuvassa 10.



**KUVA 10.  $\Delta T$ :n valinnan vaikutus kustannuksiin (Ruohonen 2011)**

### 3.6 Pinch- piste

Sitä kohtaa, jossa käyrät ovat lähinnä toisiaan ( $\Delta T_{\min}$  on pienin), nimitetään Pinch-pisteeksi (Marechal). Pinch-pisteessä lämpötilaero  $\Delta T_{\min}$  jakaa prosessin kahteen eri osaan joille voidaan erikseen suunnitella lämmönsiirtoverkko. Tämä on esitetty kuvassa 11. Pinch-pisteen ympäristössä lämmönsiirto on kaikkein vaikeinta. Jos lämmönsiirto tapahtuu pinch-pisteen yli, lisääntyy myös prosessin tarvitsema ulkopuolinen lämmitys- ja jäähdytystehon tarve (Tampereen Teknillinen Yliopisto). Se, miksi lämmönsiirto on vaikeinta toteuttaa pinch-pisteen lähellä, johtuu pienestä lämpötilaerosta kylmien ja kuumien virtauksien välillä. Mitä pienempi lämpötilaero virtauksien välillä on, sitä suuremmat lämmönsiirtopinnat tarvitaan, että lämmönsiirtoa tapahtuisi. Tämä taas kasvattaa investointikustannuksia.



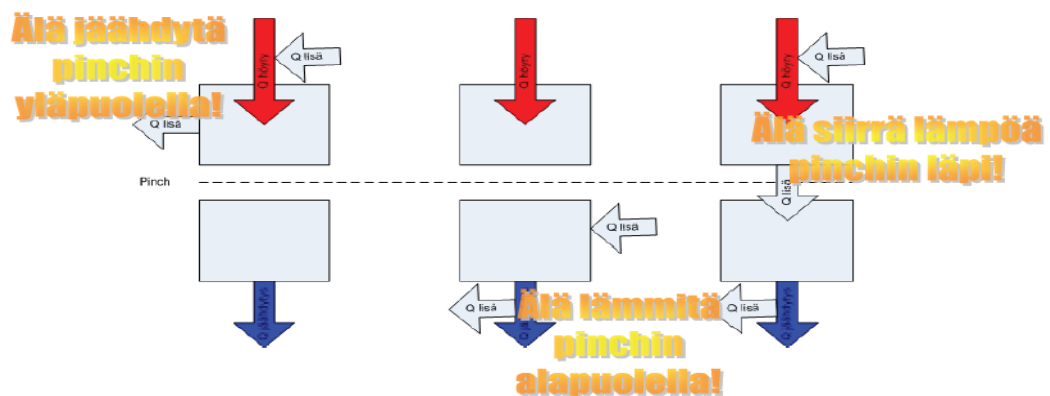
**KUVA 11. Pinch-piste jakaa prosessin kahteen eri osaan (Ruohonen 2008)**

### 3.7 Pinch-säännöt

Pinch-analyysiin liittyy kolme sääntöä joiden rikkomista täytyy pyrkiä välttämään. Nämä säännöt toimivat lämmönsiirtoverkoston suunnittelun ohjeena, ja ne ovat seuraavat:

1. *Pinch-lämpötilan alapuolella ei saa lämmittää.* Pinchin alapuolella on jo muutenkin liikaa lämpöä, ja jos tämän pisteen alapuolella lämmitetään, kuluu lämmittämiseen energiaa ja näin myös jäähdytystarve kasvaa. Jos Pinch-pisteen alapuolella lämmitetään esimerkiksi 5 kW teholla, jäähdytystarve kasvaa vastaavasti 5 kW.
2. *Pinch-lämpötilan yläpuolella ei saa jäähdyttää.* Kuten lämmittämisen osalta, myös jäähdyttäminen pinch-lämpötilan alapuolella kasvattaa jäähdytysenergian käyttöä, ja näin myös lämmitysenergian käyttö lisääntyy samalla määrällä kuin jäähdytystä tapahtuu.
3. *Lämpöä ei saa siirtää Pinch-lämpötilan yläpuolelta alapuolelle.* Tässä tapauksessa lämmitystarve kasvaa pinchin yläpuolella siirretyllä määrällä, myös jäähdytystarve pinchin alapuolella kasvaa yhtä paljon. Tämä kolmas sääntö on käytännössä kahden edellisen rikkeen yhdistelmä. Kun lämpöä siirretään pinch-lämpötilan yläpuolelta sen alapuolelle, pinch-lämpötilan yläpuolella ikään kuin jäähdytetään ja alapuolella lämmitetään (Kemp 2007).

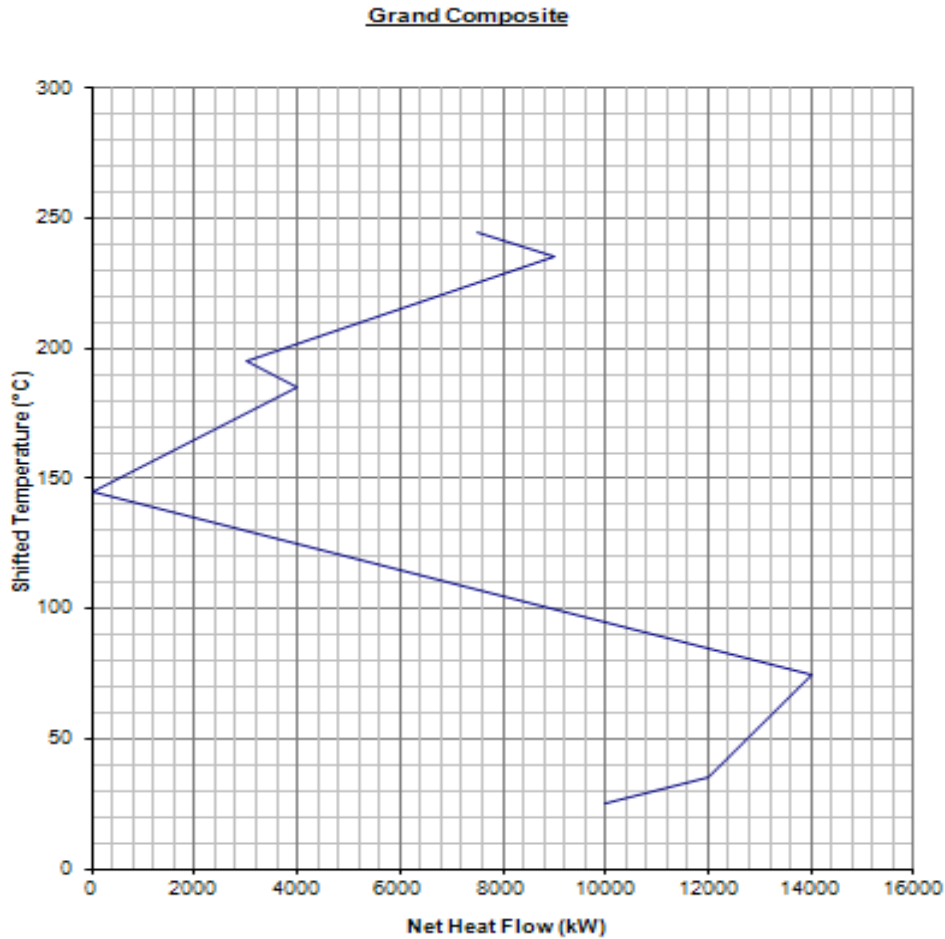
Näiden sääntöjen rikkominen johtaa aina ulkopuolisen energian käytön lisääntymiseen. Yksinkertaistettuna säännöt voidaan esittää kuvan 12 mukaisella tavalla.



KUVA 12. Pinchrikkheet (Ruohonen 2011)

### 3.8 Yhdistelmäkäyrä

Yhdistelmäkäyrä, Grand Composite Curves (GCC), muodostetaan yhdistämällä kuuma- ja kylmävirtakäyrät. Tästä esimerkki kuvassa 13. Tähän liittyvät kylmä- ja kuuma- virtakäyrät on esitetty jo aiemmin kuvassa 8.



**KUVA 13. Yhdistelmäkäyrä**

Kuuma- ja kylmävirtakäyrät tehdään yhteismitalliseksi lämpötila-asteikon suhteen. Tämä tapahtuu niin, että kylmien virtojen lämpötilaan lisätään puolikas pienimmistä sallittavasta lämpötilaerosta ( $\Delta T_{min}$ ) ja vähennetään toinen puolikas kuumien virtojen lämpötilasta. Tämä voidaan esittää yhtälöinä 2 ja 3 (Ruohonen 2011).

$$T_{Interval} = T_{Hot} - \frac{\Delta T_{min}}{2} \quad (2)$$

$$T_{Interval} = T_{Cold} + \frac{\Delta T_{min}}{2} \quad (3)$$

missä

$T_{\text{Interval}}$	on yhteismitallinen lämpötila, °C
$T_{\text{Hot}}$	on kuumavirran lämpötila, °C
$T_{\text{Cold}}$	on kylmävirran lämpötila, °C
$\Delta T_{\text{min}}$	on pienin sallittu lämpötilaero, °C.

Näin yhdistelmäkäyrällä samassa lämpötilassa olevat kuumat ja kylmät virrat ovat todellisuudessa minimilämpötilaeron päässä toisistaan ja lämmönsiirto on mahdollista (Motiva 2012).

Yhdistelmäkäyrä osoittaa muutetun (engl. Shifted) prosessin lämpötilat (Linnhoff 1998). Yhdistelmäkäyrän kohdalla, jossa lämmöntarve on 0 ja käyrä koskettaa y-akselia, sijaitsee pinch-piste. Kuvassa 13 kohdassa, jossa käyrä nousee vasemmalta oikealle, on kylmiä virtoja enemmän kuin kuumia virtoja. Tällöin on olemassa lämmöntarve näillä lämpötilatasoilla. Vastaavasti taas, kun käyrä laskee vasemmalta oikealle, on kuumia virtauksia enemmän kuin kylmiä virtauksia ja tällöin on olemassa jäähdystarve. Ulkopuoliset tehontarpeet ovat myös luettavissa yhdistelmäkäyrältä. Siellä missä käyrä nousee eikä sen yläpuolella ole jäähdystarvetta (eli laskevaa käyrää) voidaan lukea ulkopuolisen lämmitystehontarve. Vastaavasti siellä missä käyrä laskee ja alapuolella ei ole lämmitystarvetta (eli nousevaa käyrää) voidaan lukea ulkopuolisen jäähdytyksen tarve. Samalla voidaan lukea käyrältä myös ulkopuolisten lämmitysten ja jäähdytysten lämpötilatasot. Tässä esimerkissä ulkopuolisen lämmityksen tarve on 7,5 MW ja ulkopuolisen jäähdytyksen tarve 10 MW, kuten myös kuvasta 8 voitiin lukea.

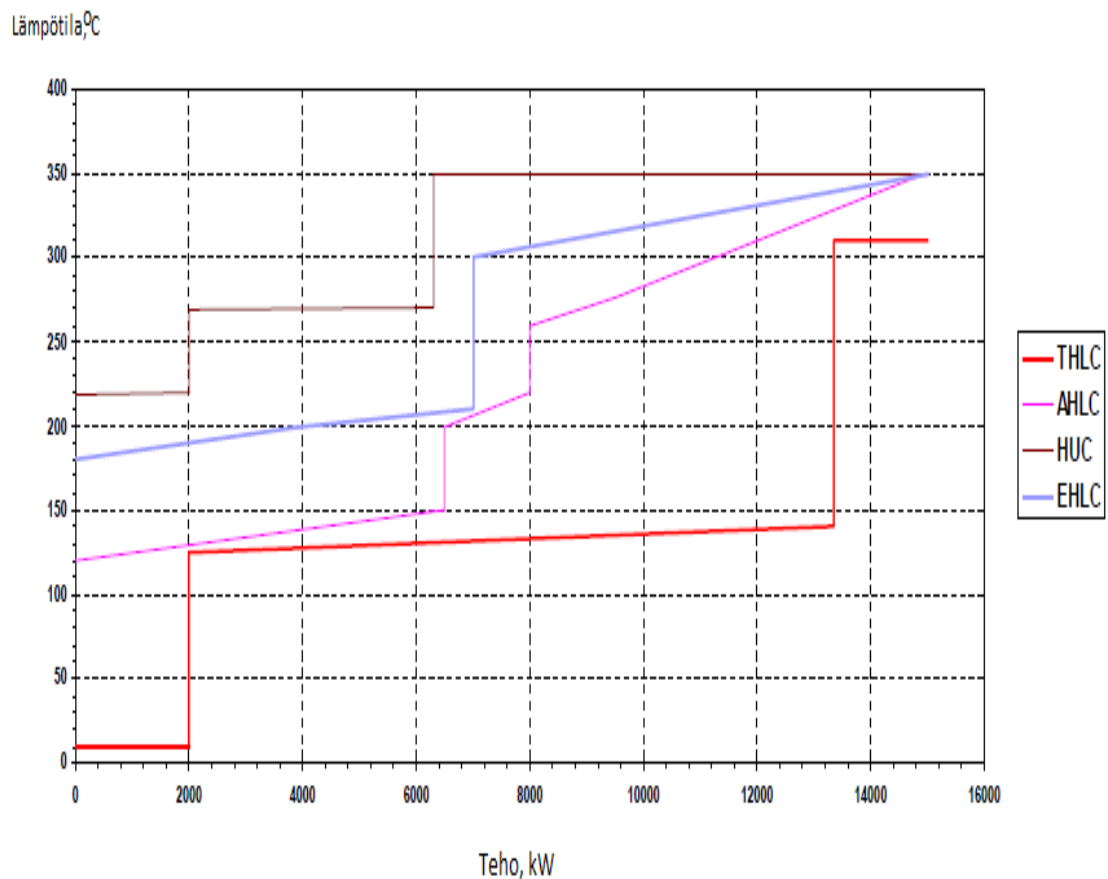
Yhdistelmäkäyrän avulla voidaan myös havainnollistaa Pinch-sääntöjä. Jos Pinch-pisteen yli on lämmönsiirtoa, niin tällöin yhdistelmäkäyrä ei kosketa lämpötila-akselia. Tällöin käyrää joudutaan siirtämään oikealle, jolloin siis ulkopuolisen lämmityksen ja jäähdytyksen tarpeet kasvavat (Tampereen Teknillinen Yliopisto).

### 3.9 Kehittynyt pinch-analyysi (Advanced pinch analysis)

Alkuperäisestä pinch-analyysistä kehitetty versio ottaa huomioon olemassa olevan lämmönvaihdinverkon ja siinä käytettävät lämpötilatasot. Tämä analyysimalli on kehi-



tetty Chalmersin yliopistossa Göteborgissa, Ruotsissa. Analyysimallissa on useampia käyriä Pinchin ylä- ja alapuolelta. Käyrät pinchin yläpuolella ovat *Actual Heat Load Curve* (AHLC), *Hot Utility Curve* (HUC), *Extreme Heat Load Curve* (EHLC) sekä *Theoretical Heat Load Curve* (THLC) (Ruohonen 2008). Pinchin alapuolella olevat käyrät ovat *Cold Utility Curve* (CUC), *Theoretical Cooling Load Curve* (TCLC), *Actual Cooling Load Curve* (ACLCL) sekä *Extreme Cooling Load Curve* (ECLC) (Ruohonen 2008). Näiden käyrien avulla voidaan näyttää teoreettinen minimi ja maksimi sille, missä lämpötilassa lämpö on mahdollista tuoda systeemiin ja poistaa systeemistä. Hot Utility Curve ja Actual Heat Load Curve on havainnollistettu kuvissa 15 ja 16 ja niistä selviää se ero, mikä niiden välillä on.

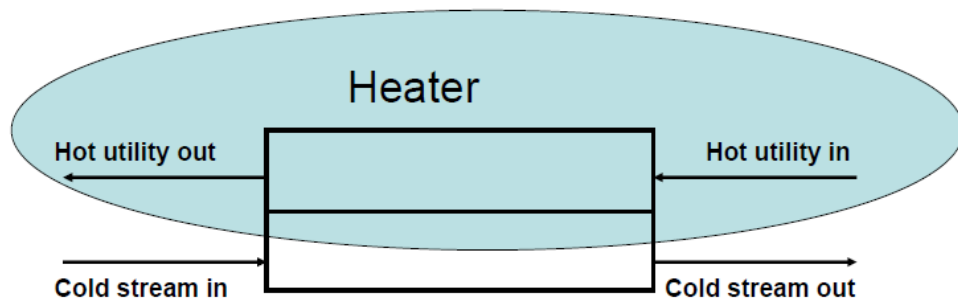


**KUVA 14. Esimerkkejä käyristä pinchin yläpuolelta (Ruohonen 2008)**

AHLC pitäisi sijaita EHLC ja THLC välissä, kuten kuvassa 14 voidaan nähdä. Jos AHLC on lähellä käyrää EHLC niin lämmönsiirtoverkosto on monimutkainen toiminnaltaan. (Gunnarsson et.al 2011.)

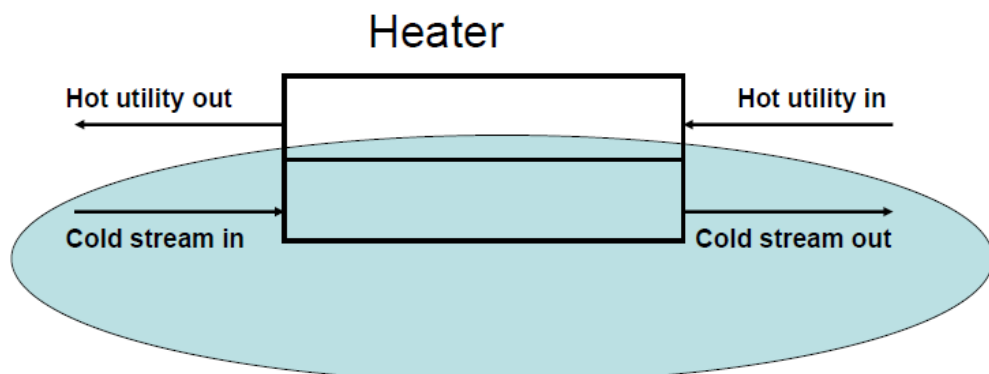
Erona perinteiseen pinchin mukaiseen tarkasteluun, jossa käytetään yhdistelmäkäyriä (GCC) on se, että tällä menetelmällä voidaan näyttää lämmön tarpeet ja ylijäämä prosessin todellisilla lämpötilatasoilla, ei muokatuilla. Niiden avulla voidaan saada paremmin tietoa olemassa olevasta lämmönvaihdinverkostosta, jolloin on mahdollisuus arvioida kustannuksia verkon uusinnasta. Menetelmällä voidaan antaa myös ylä- ja alarajat lämpötilatasoille, joilla tarvittava lämpö voidaan tuoda prosessiin ja ylijämpö poistaa sieltä. (Ruohonen 2008.)

## HUC



**KUVA 15. Hot Utility Curve, periaate (Ruohonen 2008)**

## AHLC



**KUVA 16. Actual Heat Load Curve, periaate (Ruohonen 2008)**

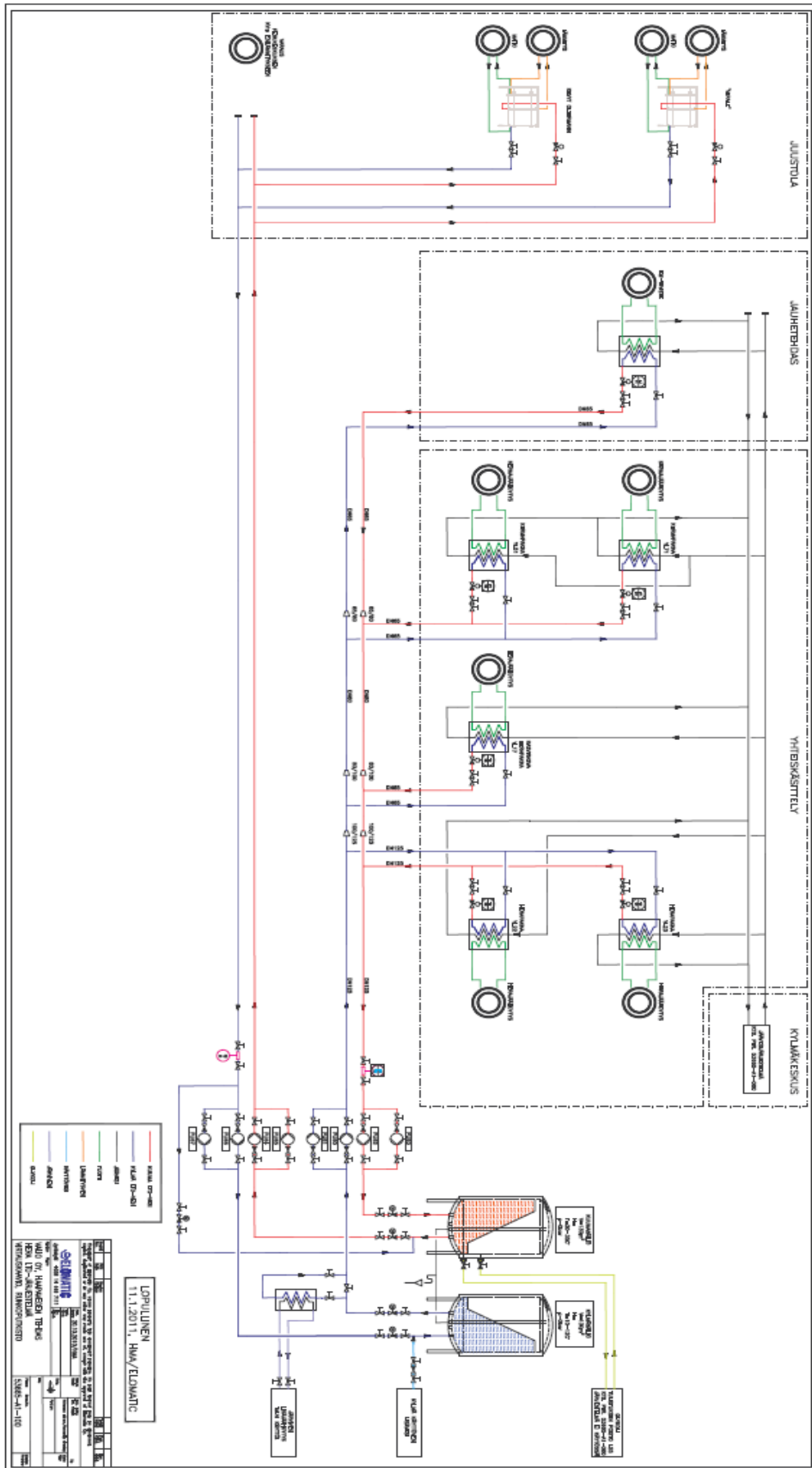
## 4 HERA LTO -VERKON PINCH-ANALYYSIN TOTEUTUS

Tässä käydään vaihe vaiheelta läpi kuinka Pinch-analyysia on sovellettu olemassa olevaan hera LTO -verkostoon ja mitä tuloksia se antaa tämän lämmöntalteenottoverkon toiminnasta. Tässä esitetyt taulukot, käyrät yms. laskettu Pinch Analysis Spreadsheet taulukkolaskentapohjalla, joka toimii Microsoft Excel -ohjelmistossa. Sen vuoksi useimmat käyrät ja taulukot ovat englanninkielisiä.

### 4.1 Hera LTO -verkosto Haapaveden tehtaalla

Vuonna 2007 Haapaveden tehtaalle rakennettiin uusi kylmäkeskus. Kylmäenergiaa tuotetaan sähköllä. Jotta kylmäkeskuksen mitoitustehoa voitiin alentaa, oli rakennettava prosessien välille lämmöntalteenottojärjestelmä, hera LTO -järjestelmä. Hera LTO-verkosto koostuu yhteensä kuudesta virtauksesta. Viisi näistä virtauksista on kuumia (jäähdytettäviä) virtauksia ja yksi virtaus on kylmä (lämmitettävä) virtaus. Järjestelmä on avoin vesikiertoinen järjestelmä, jossa on kaksi 130m<sup>3</sup> vesivaraajaa. Lämpöä otetaan talteen heran jäähdytyksestä ja sitä hyödynnetään juustolan kattilamaidon esilämmitykseen. Putkistoa on kaiken kaikkiaan noin puoli kilometriä, pääosin tehtaan katolle rakennettuna.

Hera LTO -järjestelmällä voitiin kylmäkeskuksen mitoitustehoa pienentää n. 20–30 % ja näin investointikustannukset olivat pienemmät. Lämmöntalteenottojärjestelmälle saatiin julkista energiatukea yhteensä 120 000€. Lämpö- kylmäenergiaa tällä järjestelmällä on mittausten mukaan säästetty yhteensä noin 6000-8000 MWh / vuosi. Kuvassa 17 on esitetty kaavio-kuva hera LTO-verkostosta ja sen kytkentäperiaate kulu- tuskohhteineen.



KUVA 17. Hera LTO-verkosto (Peltonen 2011)

## 4.2 Hera LTO -verkoston pinch-analyysin lähtötiedot

Pinch-analyysin lähtötiedot on kerätty energia-analyysin seurantakatselmuksen yhteydessä 2010 – 2011. Pinch-analyysin lähtötietoina käytettävät virtaukset on esitetty taulukossa 4.

Eri virtauksien osalta on ensin kerätty sekä alku- että prosessien edellyttämät loppulämpötilat (°C) jäädytettävälle tai lämmitettävälle virtaukselle. Virtaukset ovat tuotevirtauksia. Samalla on selvitetty virtauksien massavirrat (kg/s) sekä ominaislämpökapasiteetti ( $C_p$ ). Ominaislämpökapasiteetin selvittäminen ei ollut kaikille nesteille aivan helppoa, vaan ne jouduttiin arvioimaan, hyödyntämällä alan kirjallisuutta. Yksi koko tarkastelun pääkriteereistä on kylmä- ja kuumavirtausten pysyvyys (h/a). Aiempien kokemusten perusteella pysyvyyden on hyvä olla vähintään 4000 – 5000 tuntia vuodessa. Näin lämpövirrat saadaan paremmin yhdistettyä toisiinsa ja niistä saatava hyöty kasvaa. Vaikka kyseessä olisikin suuri hetkellinen teho, mutta jos sen pysyvyys on alhainen, virtauksen hyödynnettävyys sisäisessä lämmöntalteenotossa olisi lähes merkityksetön. Pysyvyystietojen perusteella lasketaan TAM-teho (Time Average Model), joka on käytännössä aikakeskiarvoistettu (aikapainoitettu) teho, yhtälön 4 mukaisella tavalla.

$$TAM_{teho} = \frac{Pysyvyys}{8760h} q_m C_p \Delta T \quad (4)$$

missä

$TAM_{teho}$	on aikakeskiarvoistettu teho, kW
pysyvyys	on virtauksen pysyvyys, h
$q_m$	on massavirta, kg /s
$C_p$	on ominaislämpökapasiteetti, kJ/kgK
$\Delta T$	on lämpötilaero, K.

Laskennassa on hyödynnetty pysyvyyden tunteja vuodessa sekä oletettu, että kyseinen virtaama on lähellä sitä virtaamaa, joka on koko pysyvyyden ajan olemassa. Lähtötietoja voitaisiin myös tarkastella jollakin tietyllä aikavälillä, jolloin voidaan laskea tietyn ennalta määritellyn ajanjakson teho. Tässä on kuitenkin kokonaisuutta tarkasteltu keskiarvoisesti ja teho on laskettu keskiarvona painottamalla hetkellinen virtaus pysy-

vyydellä. Mikäli virtauksia koskevat tiedot olivat valmiiksi keskiarvoja, painotusta ei tarvittaisi. On myös mahdollista laskea keskimääräinen lämpökapasiteettivirta  $FC_p$ , eli lähtötietoja voidaan tarkastella joko tehon ( $\Delta H$ ) tai lämpökapasiteettivirran ( $FC_p$ ) kautta. Laskentaohjelmassa laskenta voidaan suorittaa jommankumman suureen kautta.

**TAULUKKO 4. Hera LTO-verkon lähtötiedot**

Positio	Selite	TAM Teho (kW)	Pysyvyys (h/a)	$T_{\text{alku}}$ (°C)	$T_{\text{loppu}}$ (°C)	Virtaus (kg/s)	$C_p$ (kJ/(kg·K))	$FC_p$ (kW/K)
L7.4	YL22 Heran jäähdytys	653,67	5892,0	36,0	6,0	7,94	4,08	21,79
L7.5	YL23 Heran jäähdytys	310,52	4282,0	36,0	6,0	5,19	4,08	10,35
L7.1	YL51 Kerman jäähdytys	63,07	4600,0	55,0	4,0	0,64	3,68	1,24
L7.2	YL71 Kerman jäähdytys	63,07	4600,0	55,0	4,0	0,64	3,68	1,24
L16	IEW-tiiviste	63,68	2100,0	55,0	4,0	2,08	2,50	1,25
K15	Juustolan kattilamaidon lämmitys	938,89	2800,0	6,0	32,0	9,26	3,90	36,11

### 4.3 Lämpötilatasojen määrittäminen

Kuvassa 18 on esitetty virtauksien todelliset lämpötilatasot.

#### Actual Streams

Stream	L 7.4	L 7.5	L 7.1	L 7.2	L 16	K15	
Heat Flow (kW)	21,7891	10,3507	1,2367	1,2367	1,2486	36,1111	
Interval	HOT						COLD
Actual Temp (°C)	HOT						COLD
55			•	•	•		
1			•	•	•		
36	•	•					
2	•	•					
32	•	•				▲	
3	•	•				•	
6	▼	▼					
4			▼	▼	▼		
4			▼	▼	▼		

**KUVA 18. Hera LTO-verkoston virtausten todelliset lämpötilatasot (Actual Temp)**

Kuvasta 18 nähdään, että esimerkiksi kylmän (cold) virtauksen K15 lämpötilataso on suurempi tai yhtä suuri kuin 6 °C ja samalla pienempi tai yhtä suuri kuin 32 °C. Tämä voidaan esittää lyhyesti:

$$32 \text{ °C} \leq T \leq 6 \text{ °C}$$

Vastaavasti kuumien (hot) virtauksien todelliset lämpötilojen lämpötilatasot ovat:

$$55 \text{ °C} \leq T \leq 36 \text{ °C}$$

$$36 \text{ °C} \leq T \leq 6 \text{ °C}$$

$$6 \text{ °C} \leq T \leq 4 \text{ °C}$$

Lämpötilavälien rajat kulkevat siis siellä, missä jokin virta alkaa tai loppuu (Ruohonen 2011). Raja syntyy myös, mikäli tuotevirtauksien ominaislämpökapasiteetti muuttuu huomattavasti. Näin käy esimerkiksi, kun tuote höyrystyy tai lauhtuu (Kemp 2007). Näitä lämpötilatasoja tarvitaan, kun lasketaan tehoja ja lämpökapasiteettivirtoja eri virtauksille tietyllä lämpötilavälillä. Määrittäminen tehdään kaskadilaskennan avulla.

#### 4.4 Kaskadilaskenta 1. vaihe

Lämpöylijäämä tai lämpövaje kullekin edellä määritellylle lämpötilavälille lasketaan kaskadilaskennan avulla. Tämä tarkoittaa käytännössä, että lämmitys- ja jäädytystarve lasketaan jokaiselle lämpötilatasolle. Kaskadilaskenta suoritetaan erikseen kylmille ja kuumille virtauksille.

Laskenta kuumille virtauksille voidaan esittää yhtälön 5 ja kylmille virtauksille yhtälön 6 avulla.

$$\Delta H_{hot} = (\sum (FC_p)_{hot}) \Delta T_{interval} \quad (5)$$

$$\Delta H_{cold} = (\sum (FC_p)_{cold}) \Delta T_{interval} \quad (6)$$

missä

$\Delta H_{\text{hot}}$  on lämpöyli jäämä, kW

$\Delta H_{\text{cold}}$  on lämpövaje, kW

$\sum(\text{FC}_P)_{\text{hot}}$  on kuumien virtojen lämpökapasiteettivirtausten summa, kW/K

$\sum(\text{FC}_P)_{\text{cold}}$  on kylmien virtojen lämpökapasiteettivirtausten summa, kW/K

$\Delta T_{\text{interval}}$  on lämpötilaero, K.

Kaskadilaskennan lähtötiedot saadaan taulukosta 4 ja lämpötilaerot kappaleesta 4.3.

### **Kylmävirtaus K15 ( $32\text{ °C} \leq T \leq 6\text{ °C}$ )**

$\text{FC}_{\text{cold}} = -36,11\text{ kW/K}$  (luku on miinusmerkkinen, koska virtaus on kylmä)

$$\Delta H = \Delta T * \text{FC}_{\text{cold}} = (32-6)\text{K} * (-36,11)\text{ kW/K} = \mathbf{-938,86\text{ kW}}$$

### **Laskenta kuumille virtauksille:**

#### **Kuumavirtaukset L7.1, L7.2 ja L16 ( $55\text{ °C} \leq T \leq 36\text{ °C}$ )**

$$\Rightarrow \text{FC}_{\text{hot}} = (1,24 + 1,24 + 1,25)\text{ kW/K} = 3,73\text{ kW/K}$$

$$\Delta H = \Delta T * \text{FC}_{\text{hot}} = (55-36)\text{K} * (3,73)\text{ kW/K} = \mathbf{70,87\text{ kW}}$$

#### **Kuumavirtaukset L7.1, L7.2, L7.4, L7.5 ja L16 ( $36\text{ °C} \leq T \leq 6\text{ °C}$ )**

$$\Rightarrow \text{FC}_{\text{hot}} = (21,79 + 10,35 + 1,24 + 1,24 + 1,25)\text{ kW/K} = 35,87\text{ kW/K}$$

$$\Delta H = \Delta T * \text{FC}_{\text{hot}} = (36-6)\text{K} * (35,87)\text{ kW/K} = \mathbf{1076,1\text{ kW}}$$

#### **Kuumavirtaukset L7.1, L7.2 ja L16 ( $6\text{ °C} \leq T \leq 4\text{ °C}$ )**

$$\Rightarrow \text{FC}_{\text{hot}} = (1,24 + 1,24 + 1,25)\text{ kW/K} = 3,73\text{ kW/K}$$



$$\Delta H = \Delta T * FC_{p_{hot}} = (6-4)K * (3,73) kW/K = 7,46 kW$$

Vaikka kylmien virtauksien lämpökapasiteettivirta on negatiivinen, niin luku syötetään laskentaohjelmaan positiivisena. Kaskadilaskennalla lasketut lämmitys- ja jäähdystarpeet kullekin lämpötila-alueelle on esitetty yhteenvetona taulukossa 5.

**TAULUKKO 5. Kaskadilaskennalla määritetyt lämpötila-alueiden tehotarpeet**

Virtaus	$\Delta T_{interval}$ (°C)	$\Delta H$ (kW)
Kuuma	6 - 4	7,46
Kuuma	36 - 6	1076,1
Kuuma	55 - 36	70,87
Kylmä	32 - 6	-938,86

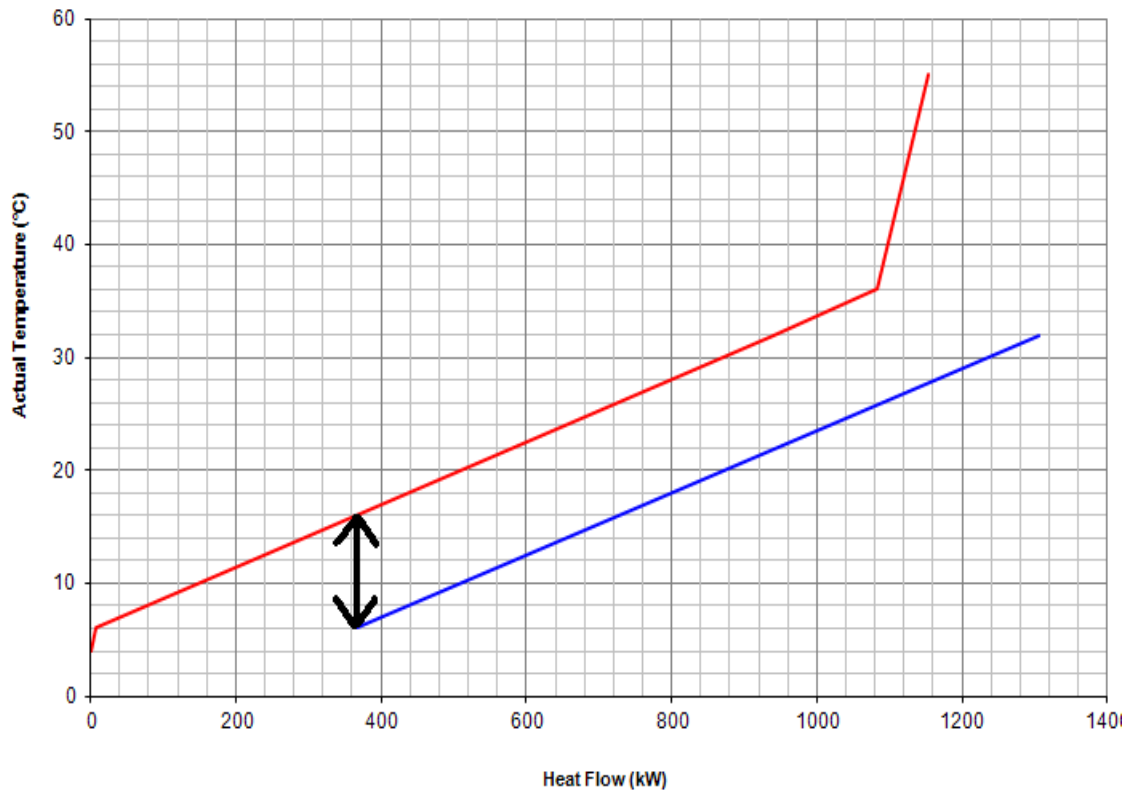
Taulukosta 5 voidaan todeta, että jäähdystarve kaiken kaikkiaan on noin 1154 kW ja lämmitystarve noin 939 kW.

#### 4.5 Pienin lämpötilaero $\Delta T_{min}$

$\Delta T$  lukitsee kylmä- ja kuumavirtakäyrät suhteessa toisiinsa. Lämpötilaeron  $\Delta T_{min}$  valinta vaikuttaa oleellisesti koko verkoston taloudelliseen mitoitukseen. Valitulla lämpötilaerolla  $\Delta T_{min}$  määrätään lämmönvaihtimien asteisuus. Tarkemmin  $\Delta T$  vaikutuksista on aiemmin kerrottu kappaleessa 3.5. Tässä kohtaa lämpötila-eroksi  $\Delta T_{min}$  on valittu 10 °C. Uutta verkostoa mitoittaessa ja haettaessa kustannustehokkainta ratkaisuvaihtoehtoa on  $\Delta T_{min}$  iteroitava. Jatkossa, kun lämpötiloja muutetaan yhteismittaisiksi, vaaditaan myös siihen  $\Delta T_{min}$ .

#### 4.6 Kuuma- ja kylmävirtauskäyrät (CC, Composite Curves)

Lähtötietojen perusteella ja kaskadilaskennan jälkeen pystytään piirtämään Hera LTO-verkostosta kylmä- ja kuumavirtauskäyrät, (kuva 19).



**KUVA 19. Hera LTO-verkoston kylmä- ja kuumavirtakäyrät**

Kuvasta 19 nähdään, että  $\Delta T_{\min}$  toteutuu kylmän käyrän alkupäässä, jossa kylmänvirran lämpötila on 6 °C ja kuumavirran on 16 °C.

#### 4.7 Yhteismitalliset lämpötilat

Yhdistelmäkäyrää luodessa kuuma- ja kylmävirtakäyrät tehdään yhteismitalliseksi lämpötila-asteikon suhteen. Käytännössä se tapahtuu siten, että kylmänvirran lämpötilaan lisätään puolikas valitusta  $\Delta T_{\min}$ :stä (10 °C / 2 eli 5 °C) ja kuumavirtojen lämpötiloista vähennetään 5 °C. Lähtötietoina käytetään alkuperäisiä lämpötiloja. Yhteismitallistetut lämpötilatasot on esitetty kuvassa 20.

### Shifted Streams

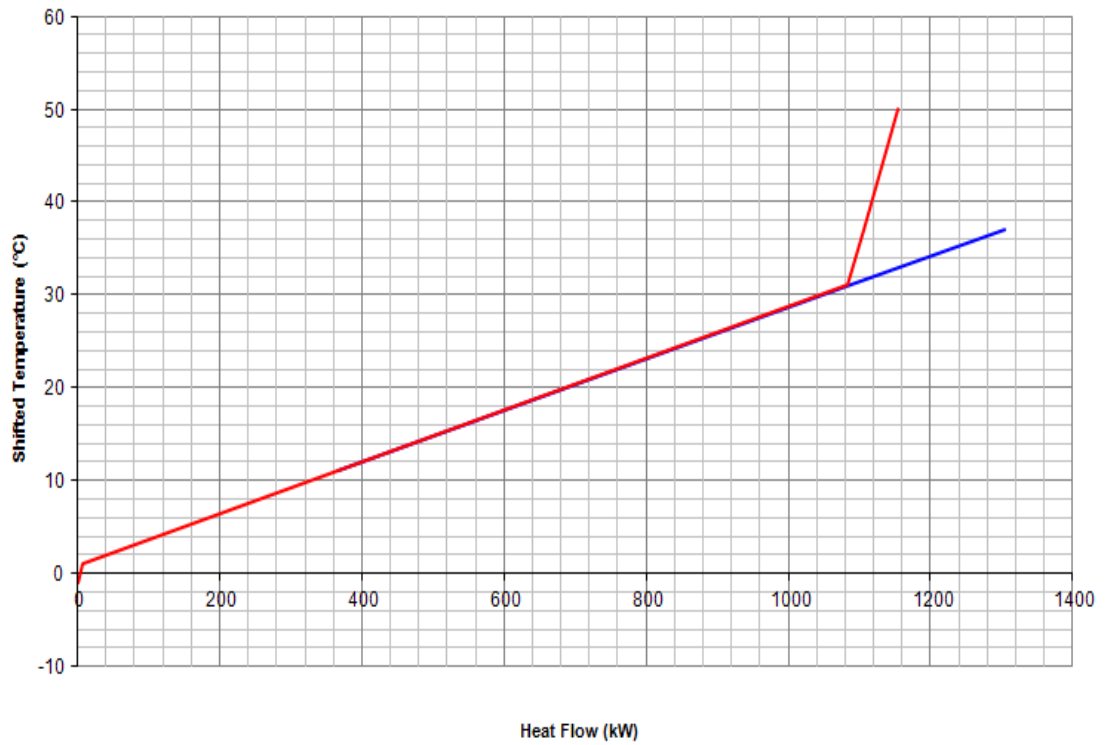
Stream		L 7.4	L 7.5	L 7.1	L 7.2	L 16	K15
mCp (kW/K)		21,7891	10,3507	1,2367	1,2367	1,2486	36,1111
Heat Flow (kW)		653,673	310,5213	63,0742	63,0742	63,6772	938,8889
Interval	Shifted Temp (°C)	HOT	HOT	HOT	HOT	HOT	COLD
	50			•	•	•	
1	37						▲
2	31	•	•				
3	11						•
4	1	▼	▼				
5	-1			▼	▼	▼	

### KUVA 20. Hera LTO-verkoston yhteismitallistetut lämpötilat

Yhteismitallistamisen jälkeen kylmä- ja kuumavirtojen lämpötilatasot ovat seuraavat:

$50\text{ °C} \leq T \leq 37\text{ °C}$	(Virrat L7.1, L7.2 ja L16)
$37\text{ °C} \leq T \leq 31\text{ °C}$	(Virrat L7.1, L7.2, L16 ja K15)
$31\text{ °C} \leq T \leq 11\text{ °C}$	(Virrat L7.1, L7.2, L7.4, L7.5, L16 ja K15)
$11\text{ °C} \leq T \leq 1\text{ °C}$	(Virrat L7.1, L7.2, L7.4, L7.5 ja L16)
$1\text{ °C} \leq T \leq -1\text{ °C}$	(Virrat L7.1, L7.2 ja L16)

Yhteismitallistettujen lämpötilatasojen mukainen kuuma- ja kylmävirtakäyrä on esitetty kuvassa 21.



**KUVA 21. Hera LTO-verkoston yhteismitallistetut kuuma- ja kylmävirtakäyrät (SCC, Shifted Composite Curves)**

#### 4.8 Kaskadilaskenta 2. vaihe

Yhteismitallistamisen jälkeen kaskadilaskenta suoritetaan yhdessä kylmille ja kuumille virtauksille. Tällöin laskenta suoritetaan kaavan 7 (Ruuhonen 2011) mukaan. Lämpötilatasoina käytetään yhteismitallistettuja lämpötiloja. Lämpökapasiteettivirtoina käytetään edelleen alkuperäisiä lämpökapasiteettivirtoja, kuten laskennan 1. vaiheessa kohdassa 4.4. Laskennassa huomioidaan kullakin yhteismitallisella lämpötilatasolla vallitsevat virtaukset.

$$\Delta H_{Excess} = (\sum (FC_p)_{hot}) - \sum (FC_p)_{cold} \Delta T_{interval} \quad (7)$$

missä

$\Delta H_{Excess}$  on kokonaislämpöylijäämä / -vaje, kW.

**Virtaukset L7.1, L7.2 ja L16 lämpötila-alueelle  $50\text{ °C} \leq T \leq 37\text{ °C}$** 

$$FC_p = (1,24 + 1,24 + 1,25) = 3,73 \text{ kW/K}$$

$$\Delta H = \Delta T * FC_p = (50-37) \text{ °C} * (3,73) \text{ kW/K} = \mathbf{48,49 \text{ kW}}$$

**Virtaukset L7.1, L7.2, L16 ja K15 lämpötila-alueelle  $37\text{ °C} \leq T \leq 31\text{ °C}$** 

$$FC_p = (1,24 + 1,24 + 1,25 - 36,11) = -32,38 \text{ kW/K}$$

$$\Delta H = \Delta T * FC_p = (37-31) \text{ °C} * (-32,38) \text{ kW/K} = \mathbf{-194,28 \text{ kW}}$$

**Virtaukset L7.1, L7.2, L7.4, L7.5, L16 ja K15 lämpötila-alueelle  $31\text{ °C} \leq T \leq 11\text{ °C}$** 

$$FC_p = (21,79 + 10,35 + 1,24 + 1,24 + 1,25 - 36,11) = -0,24 \text{ kW/K}$$

$$\Delta H = \Delta T * FC_p = (31-11) \text{ °C} * (-0,24) \text{ kW/K} = \mathbf{-4,8 \text{ kW}}$$

**Virtaukset L7.1, L7.2, L7.4, L7.5 ja L16 lämpötila-alueelle  $11\text{ °C} \leq T \leq 1\text{ °C}$** 

$$FC_p = (21,79 + 10,35 + 1,24 + 1,24 + 1,25) = 35,87 \text{ kW/K}$$

$$\Delta H = \Delta T * FC_p = (11-1) \text{ °C} * 35,87 \text{ kW/K} = \mathbf{358,7 \text{ kW}}$$

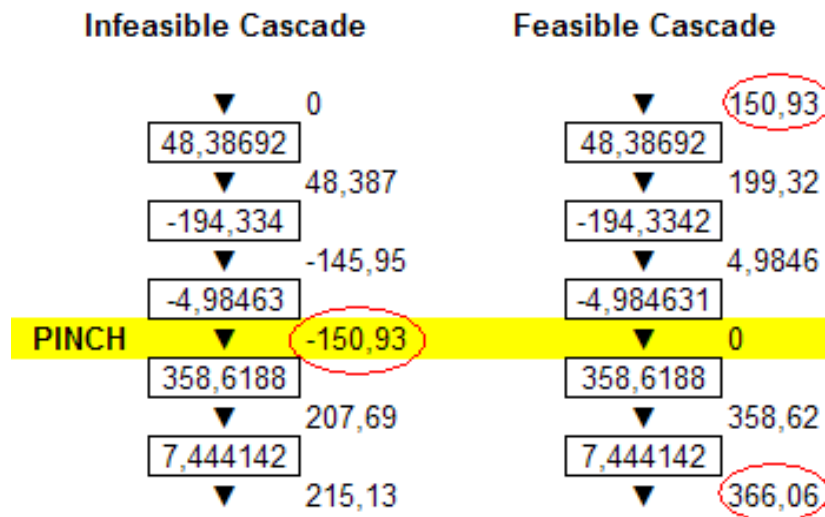
**Virtaukset L7.1, L7.2 ja L16 lämpötila-alueelle  $1\text{ °C} \leq T \leq -1\text{ °C}$** 

$$FC_p = (1,24 + 1,24 + 1,25) = 3,73 \text{ kW/K}$$

$$\Delta H = \Delta T * FC_p = (1+1) \text{ °C} * 3,73 \text{ kW/K} = \mathbf{7,46 \text{ kW}}$$

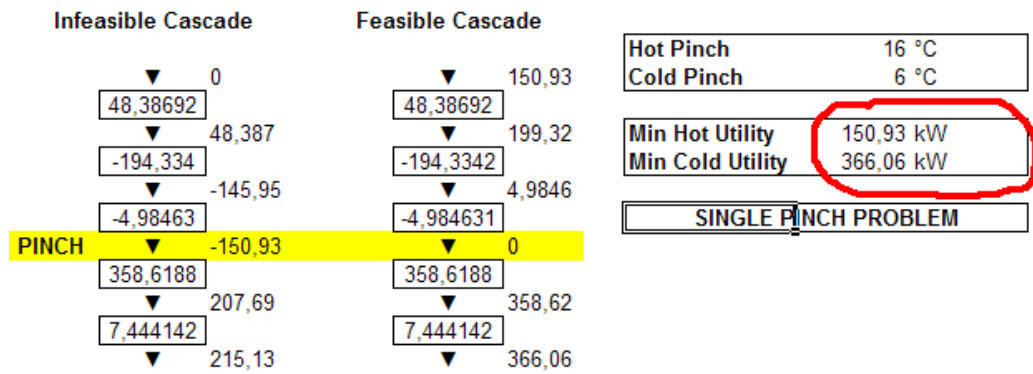
Kuvassa 22 on esitetty yhteismitallistettujen lämpötila-alueiden kaskadilaskenta. Laskentaohjelma esittää arvot tarkemmin kuin tässä on laskettu, ja sen vuoksi tässä laskettujen arvojen tarkkuus poikkeaa kuvan 22 arvoista. Laskenta tapahtuu niin, että laskenta aloitetaan nolasta ja sen jälkeen seuraavaan vaiheeseen syötetään se teho

( $\Delta H$ ), mikä kullekin lämpötilavälillä on laskettu. Suunta on korkeammasta lämpötilasta matalampaan päin. Sarakkeen oikeassa reunassa olevat arvot kuvaavat lämpövirtoja. Arvon ollessa positiivinen on olemassa lämpöylijäämä (tarve jäähdyttää), kun taas arvon ollessa negatiivinen on olemassa lämpöalijäämä (tarve lämmitellä).



**KUVA 22. Kaskadilaskenta Hera LTO-verkoston yhteismitallisille lämpötila-alueille**

Se kohta, jossa on pienin arvo (kuvassa 22. -150,93), on **PINCH-piste**. Käytännössä tässä pisteessä ei lämpöä enää siirry. Koska negatiivinen lämpövirta ei ole mahdollinen, on laskentaan syötettävä tehovajeen verran lisätehoa (150,93 kW). Negatiivinen lämpövirta vastaa tilannetta, jossa lämpöä siirtyy matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan ja tämä ei termodynamiikan sääntöjen mukaan ole mahdollista. Teholisäyksen jälkeen laskenta suoritetaan uudestaan (Feasible Cascade) ja näin negatiivinen lämpövirta on saatu pois. Kuvasta 22 voidaan määrittellä myös lämmityksen minimittehon tarve 150,93 kW ja jäähdytyksen minimittehon tarve 366,06 kW. Sama voidaan todeta laskentaohjelman taulukosta (kuva 23).

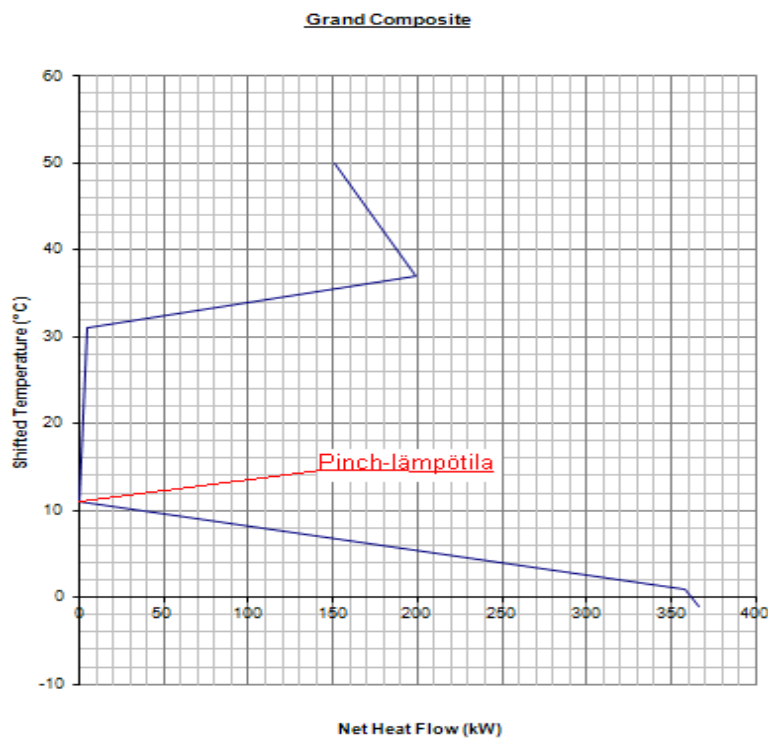


**KUVA 23. Kaskadilaskennan avulla määritetyt lämmityksen ja jäähdytyksen minimitetarpeet**

Kun  $\Delta T / 2$  vähennetään kuumasta pinch-lämpötilasta (Hot Pinch) ja sama arvo lisätään kylmään pinch-lämpötilaan (Cold Pinch) saadaan pinch-lämpötilaksi 11 °C (kuva 23).

#### 4.9 Yhdistelmäkäyrä

Kaskadilaskennan tulosten perusteella voidaan lopulta piirtää yhdistelmäkäyrä (GCC, Grand Composite Curve) hera LTO-verkostolle (kuva 24). Tästä nähdään, että Pinch-lämpötila on 11 °C, joka todettiin jo kuvasta 23.

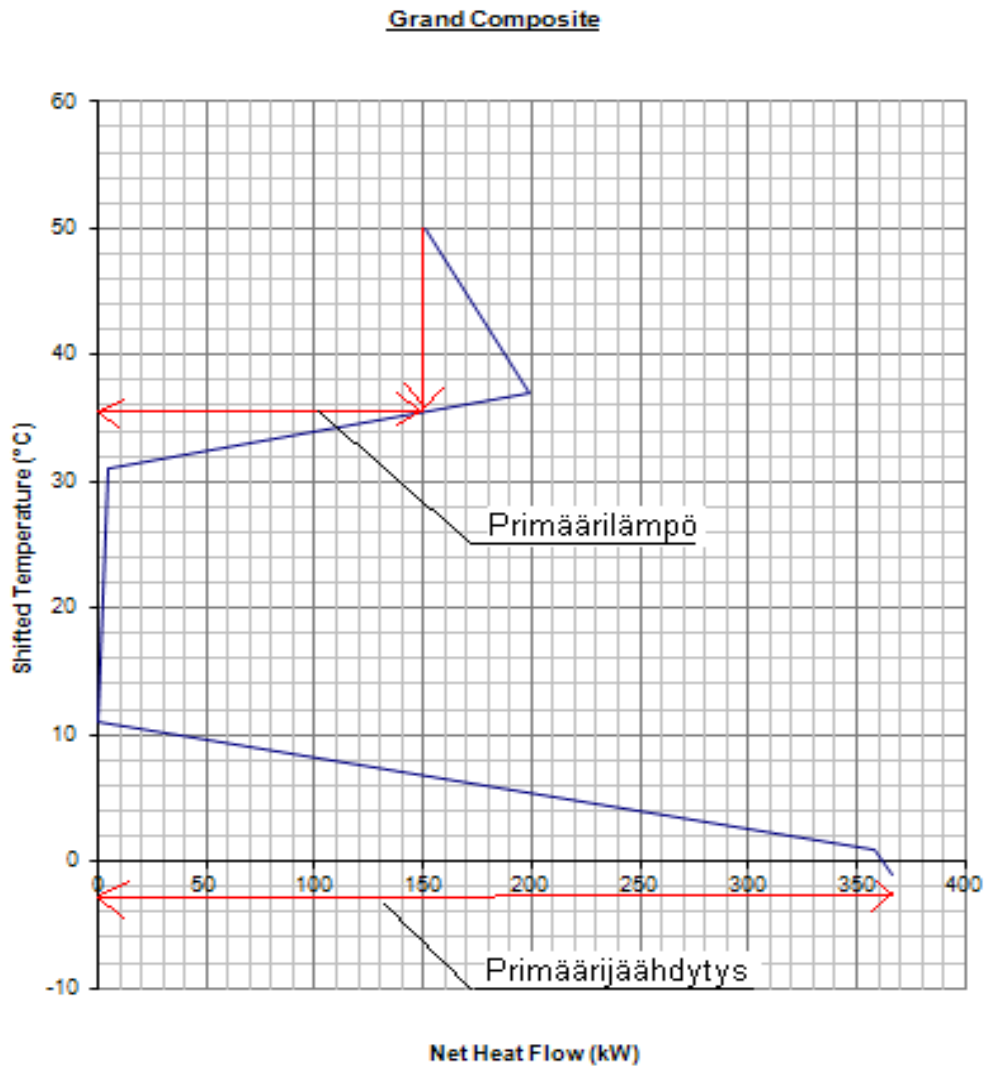


**KUVA 24. Hera LTO-verkon yhdistelmäkäyrä**

Kuvasta 25 voidaan todeta se, että kun alun perin laskettuna prosessin kokonaislämmityksen tarve (ilman lämmöntalteenottoa) oli noin 939 kW (kappale 4.4, taulukko 5), niin tässä kohtaa lämmitystä tarvitaan vain noin 151 kW (kun  $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Tarvitava lämmityksen tarve voidaan katsoa käyrästä siitä kohtaa, jossa on nouseva käyrä eikä sen yläpuolella ole laskevaa käyrää. Samalla periaatteella laskettu jäähdytyksen tarve oli noin 1154 kW (ilman lämmöntalteenottoa) ja tämän laskennan mukaan jäähdytystehoa tarvitaan 366 kW ( $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Tämä voidaan lukea käyrästä siitä kohtaa, jossa käyrä on laskeva ja sen alapuolella ei ole nousevaa käyrää. Näihin tavoitteisiin päästään vain tietysti siinä tapauksessa, että LTO-verkko rakennetaan optimaalisella tavalla pinch-sääntöjä noudattaen. Huomioitavaa on, että LTO jäähdyttää ja lämmittää aina saman verran ( $939 \text{ kW} - 151 \text{ kW} = 1154 \text{ kW} - 366 \text{ kW}$ ).

Yhdistelmäkäyrältä, (kuva 25), voidaan lukea, että lämmitystarpeen suurin yhteismitallinen lämpötila on noin  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tämä on todellisuudessa noin  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , koska aiemmin tehtiin lämpötilojen yhteismitallistaminen. Tässä pisteessä kylmävirtaus on  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kun  $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , tarvittavan lämpimän hyödykkeen on oltava vähintään  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , jotta lämmönsiirto voi tapahtua. Vastaavasti jäähdytystarpeen pienin yhteismitallinen lämpötila on  $-1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Todellisuudessa kuuma virtaus on tässä pisteessä lämpötilassa  $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kun  $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , tarvittavan kylmän hyödykkeen on oltava lämpötilaltaan korkeintaan  $-6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , joka ei tässä tapauksessa olisi jäätyksen takia mahdollista.





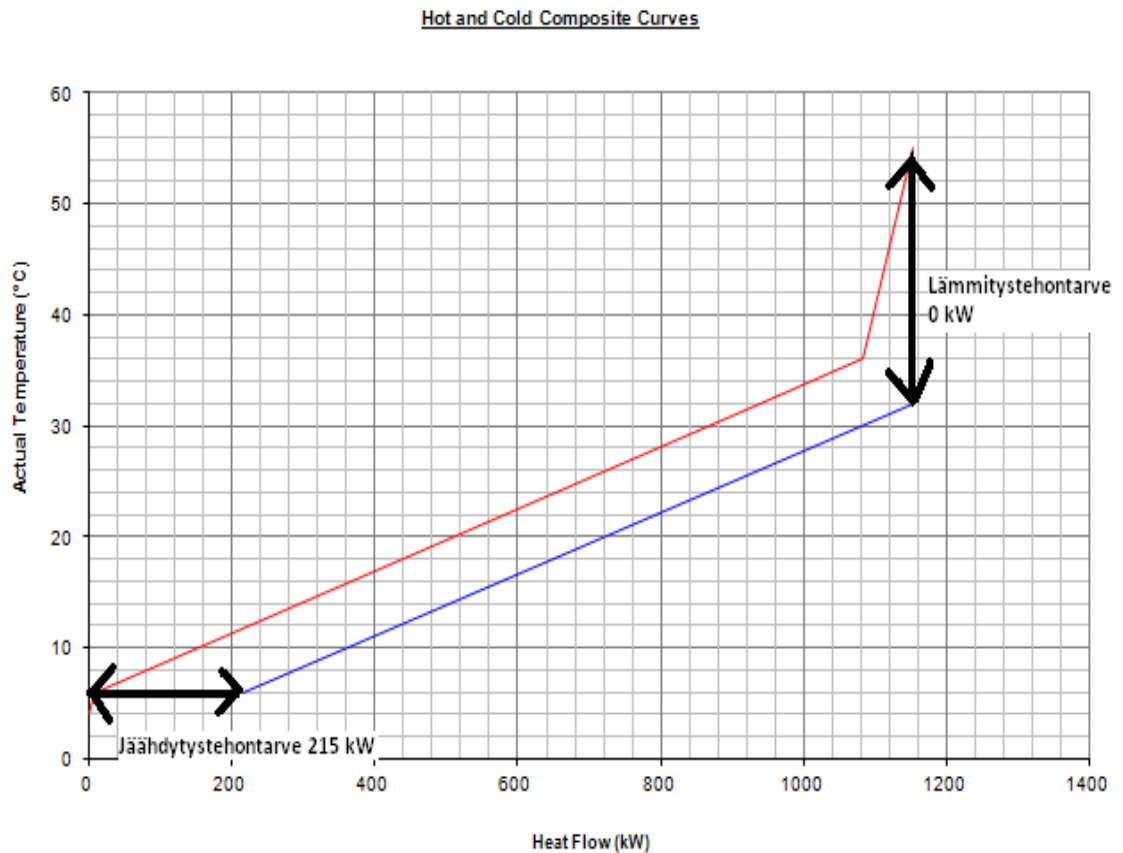
**KUVA 25. Primäärijäähdytys ja -lämmitystarpeet yhdistelmäkäyrältä**

#### 4.10 Hera LTO -verkoston rajalämpötila

Kappaleessa 3.5 totesimme, että raja-arvotapauksissa lämpötilaeron pienentäminen ei paranna sisäistä lämmöntalteenottoa. Seuraavassa on haettu Hera LTO -verkolle tällainen raja-arvotapaus eli  $\Delta T_{\min}$ , jonka alapuolella sisäinen lämmöntalteenotto ei enää parane. Tämä raja-arvotapaus on iteroitu käyttäen Pinch Analysis Spreadsheet taulukkolaskentapohjaa. Lähtötiedot ovat alkuperäiset. Vaiheet esitetään tuloksien kautta, laskennan periaatteet on esitetty jo aiemmin kappaleessa 4.

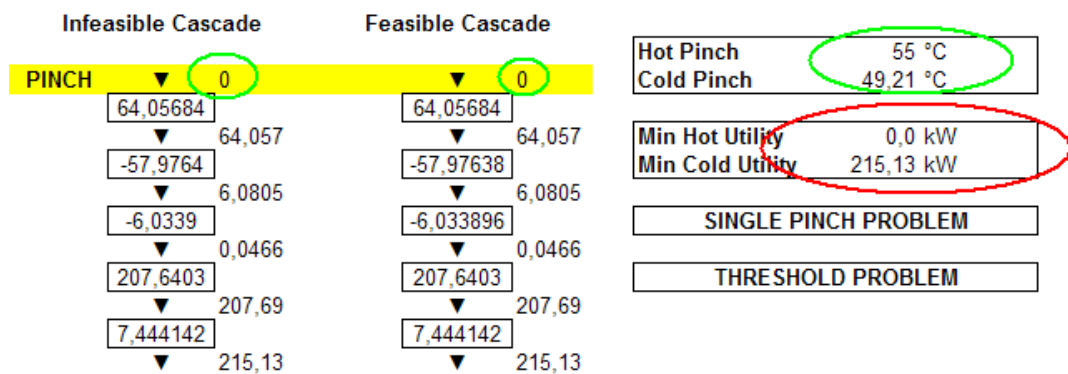
Iteroinnin perusteella  $\Delta T_{\min} = 5,79$  °C, tätä pienemmillä  $\Delta T_{\min}$  arvoilla sisäinen lämmöntalteenotto ei enää parane. Kuvasta 26 näemme, että tarvittava ulkopuolinen läm-

mitystehontarve on tällöin 0 kW ja kylmä- ja kuumavirtakäyrien oikeat käyrien päät ovat kohdakkain x-akselin suhteen.



**KUVA 26.** Kylmä- ja kuumavirtakäyrät,  $\Delta T_{\min}$  on  $5,79^{\circ}\text{C}$

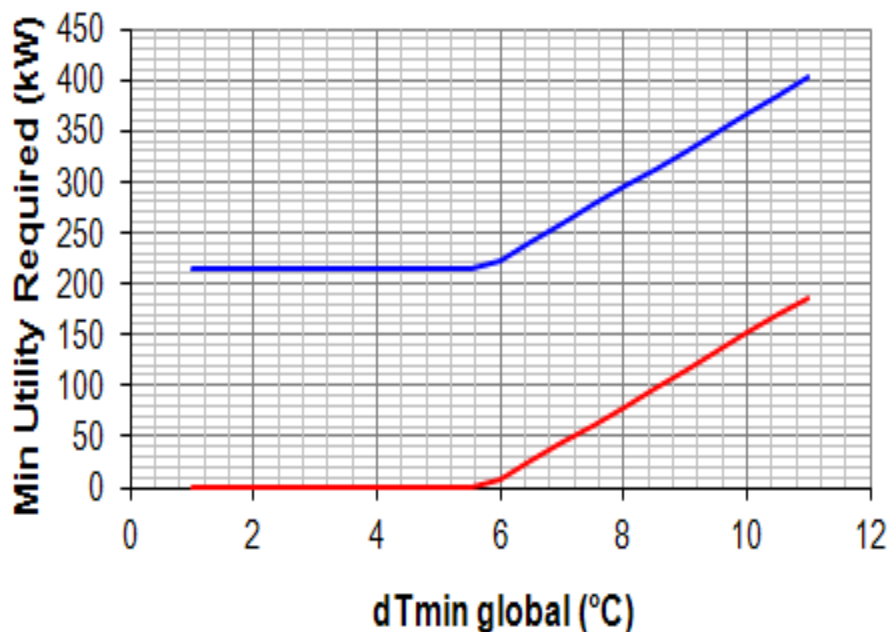
Kuvasta 26 näemme myös, että ulkopuolisen jäähdytyksen tarve on hieman yli 200 kW. Kuvasta 27 selviää, että tarkka jäähdytyksen tehontarve on 215 kW.



**Kuva 27.** Kaskadilaskennan avulla määritetyt lämmityksen ja jäähdytyksen minimitehontarpeet,  $\Delta T_{\min}$  on  $5,79^{\circ}\text{C}$

Kuvan 27 perusteella voidaan edelleen todeta, että lisälämmöntarvetta (Min Hot Utility) ei ole, koska laskennassa ei synny tehovajetta (vertaa kuva 22). Ulkopuolinen jäädytystarve (Min Cold Utility) on 215,13 kW.

Pinch Analysis Spreadsheet taulukkolaskentapohjalla voidaan myös erikseen laskea ulkopuoliset tehontarpeet jäädytys- ja lämmitysenergialle eri  $\Delta T_{\min}$  arvoilla. Kuvasta 28 voidaan lukea ulkopuoliset tehontarpeet hera LTO-verkolle, kun  $\Delta T_{\min}$  on välillä 1 - 11 °C. Kuvassa 28 sininen käyrä kuvaa jäädytystarvetta ja punainen lämmitystarvetta.



**KUVA 28.** Hera LTO-verkoston primäärijäädytys ja – lämmitystarpeet, kun  $1\text{ °C} \leq \Delta T_{\min} \leq 11\text{ °C}$

Kuvasta 28 selviää, että juuri raja-arvo lämpötilan (käyrästä luettuna noin 5,8 °C) alapuolella tehontarpeet eivät enää muutu. Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että jos tällaista verkostoa rakennettaisiin, ei lämmönvaihtimien asteisuuksia kannattaisi laskea alle 6 °C:een. Tämän raja-arvolämpötilan alapuolella sisäinen lämmöntalteenotto ei enää parane ja investointi suurempiin lämmönvaihtimiin ei olisi enää kannattava.

Taulukossa 6 on verrattu raja-arvo tapausta ( $\Delta T_{\min} = 5,79\text{ °C}$ ) aiemmin tehtyyn laskentaan, jossa  $\Delta T_{\min}$  oli 10 °C.

**TAULUKKO 6. Ulkopuoliset tehontarpeet, kun  $\Delta T_{\min} = 5,79 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$** 

$\Delta T_{\min}$ , $^{\circ}\text{C}$	Lämmitystehontarve, kW	Jäähdytystehontarve, kW
10	150,93	366,06
5,79	0	215,13

## 5 TULOKSET

Jo esitetyistä tuloksista on nähtävissä, että hera LTO -järjestelmä toimii ja sillä on myös potentiaalia. Taulukossa 7 esitetään prosessin todellinen tehontarve jäähdytykselle ja lämmitykselle, optimaalinen teho LTO -verkolle, kun  $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  tai raja-arvotapauksessa, kun  $\Delta T_{\min} = 5,79 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ja hera LTO -verkoston todellinen teho mittauksen perusteella.

Hera LTO -järjestelmän toimivuutta on mitattu lähes alusta saakka kuukausitasolla. Mittaustietojen luotettavuus ei kuitenkaan aina ole täysin aukoton, koska lukemia puuttuu joiltain kuukausilta ja näin ollen niitä ei ole esitetty pidemmältä ajalta. Vuoden 2011 mittaustietojen perusteella jäähdytysenergiaa on säästetty 3799 MWh ja lämmitysenergiaa 4615 MWh. Koska hera LTO -järjestelmä toimii vuodessa noin 8000 h, niin jäähdytysteho on 475 kW ja lämmitysteho 577 kW. Hera LTO:n teho eri  $\Delta T_{\min}$  arvoilla on laskettu vähentämällä todellisesta tehontarpeesta kyseisellä  $\Delta T_{\min}$  arvolla tarvittava ulkoinen jäähdytys- tai lämmitysenergian tarve, esimerkiksi hera LTO:n teho ( $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) on  $1154 \text{ kW} - 366 \text{ kW} = 788 \text{ kW}$ . Ulkopuolinen lämmitys- ja jäähdytystehontarve on esitetty aiemmin taulukossa 6. Taulukosta 7 voidaan lukea tehontarpeet eri tilanteissa.

**TAULUKKO 7. Tehontarpeet eri tilanteissa**

	Prosessin todellinen tehontarve, kW	Hera LTO teho ( $\Delta T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), kW	Hera LTO teho ( $\Delta T \leq 5,79 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), kW	Mitattu Hera LTO teho, kW
Jäähdytys	1154	788	939	475
Lämmitys	939	788	939	577

Taulukosta 7 nähdään, että ilman lämmöntalteenottoa tarvittava prosessin jäähdytysteho on 1154 kW ja lämmitysteho 939 kW. Aiemmin lasketun tapauksen, jossa  $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , hera LTO:n teho jäähdytyksessä ja lämmityksessä ovat käytännössä yhtä suuret, 788 kW. Tämä siis toteutuu kun verkosto on rakennettu optimaalisesti. Raja-arvo tapauksessa on kyseessä optimaalinen teoreettinen maksimiarvo hera LTO-järjestelmän lämmitys- ja jäähdytysteholle, 939 kW. Tällöin  $\Delta T_{\min} = 5,79 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ja kuten kuva 28 havainnollisesti esittää, ulkopuolisen energian tehontarve ei muutu vaikka lämpötilaeroa pienennetään. Tällöin siis sisäisen lämmöntalteenoton teho pysyy vakiona. Tässä tapauksessa ei siis tarvittaisi ollenkaan ulkopuolista lämmitysenergiaa.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tämän työn alkuperäinen tavoite (jota ei tähän työhön ole kirjattu) oli löytää Pinch-analyysin avulla optimaalinen tehdas LTO -verkko, ns. kehittyneempi versio nykyisestä hera LTO -verkostosta. Tämä tavoite kuitenkin hylättiin tämän opinnäytetyön kannalta, koska riittävän kannattavaa ratkaisumallia ei löytynyt tässä aikataulussa. Näin ollen tämän opinnäytetyön tavoitetta muutettiin, mutta alkuperäinen työ jatkuu edelleen.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli avata teoreettisella tasolla pinch-analyysiä ja analysoida pinch-analyysin avulla nykyisen hera LTO -verkon toimivuutta.

Tarkasteltaessa mitattua hera LTO:n tehoa taulukosta 7, huomataan jäähdytys- ja lämmitystehontarpeissa eroja. Erot johtuvat siitä, että eri prosessit tehtaassa eivät toteudu samassa aikataulussa toisiinsa nähden. Kyseessä on eripituisia panosprosesseja, joiden ajoitus voi muuttua toisiinsa nähden päivittäin. Tällöin käy niin, että suurimmat LTO:n lämpötilatasot jäävät saavuttamatta, koska eri jäähdytyskohteilta tuleva LTO-vesi sekoitetaan vesivaraajassa. Maksimissaan näiden jäähdytyskohteiden lämpötilat ovat  $36 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että samaan aikaan varajaan menee hyvin erilämpöisiä vesiä ja näin ollen lämpötilaero pienenee ja LTO:n potentiaali laskee. Tätä vaikutusta voitaisiin tehostaa joko hallitsemalla prosessin ajoituksia paremmin tai sitten ohjaamalla eri lämpöisiä vesiä eri varajiin. Tällöin vesivaraajia pitäisi olla nykyistä useampia.

Työssä tehontarpeita on laskettu TAM- virtausten ja -tehojen perusteella. On olemassa myös TSM (Time Slice Model) periaate, jolla voidaan analysoida panosprossin ajoituksia paremmin (Kemp 2007). TAM-tehoja tarkasteltiin aina tietylle lämpötilavälille ajalla keskiarvoistaen ajalla painottaen. Työssä arvot on keskiarvoistettu yhden vuoden ajanjaksolle pysyvyydellä painottaen. TSM-periaatteessa virtauksia tarkastellaan aikajanalla, eli jokainen virtaus laitetaan omalle aikajanelle tietyn kokonaisajan sisällä. Tämä periaate ottaa paremmin huomioon panosprosessin ajoitukset ja käytännössä määrittelee lämpötilatasot eri virtauksille paremmin. TSM-tarkastelussa lämpötilatasot määritellään erikseen kunkin tarkasteltavan aikaintervallin sisällä. TSM-periaatteen perusteella pystytään myös paremmin arvioimaan mahdollista energian varastointia suoran lämmönsiirron lisäksi.

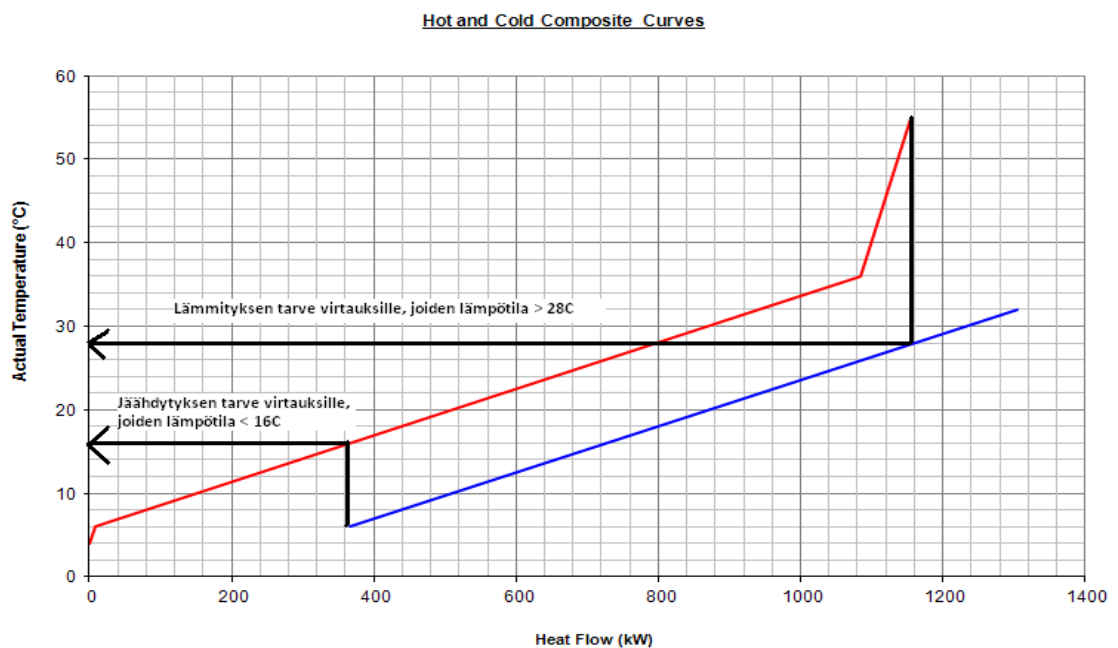
Optimaalisen hera LTO:n tehot on siis laskettu TAM-virtausten ja – tehojen perusteella. Tämä vaikuttaa siihen, että lasketut tulokset ovat optimistisempia kuin mitatut tulokset. Vuoden 2011 mittaustulosten perusteella hera LTO- järjestelmä tuottaa noin 41 % tarvittavasta jäähdytystehosta ja noin 62 % tarvittavasta lämmitystehosta. Eli käytännössä se tuottaa noin puolet tarvittavasta kokonaistehosta. Pinch-analyysin perusteella hera LTO – järjestelmä pystyisi maksimissaan sisäisellä lämmöntalteenotolla tuottamaan kaiken prosessin lämmitysenergian tarpeen ja noin 80%:a jäähdytysenergian tarpeesta (taulukko 7). Tämä tapahtuu raja-arvotapauksessa  $\Delta T_{\min} = 5,79 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Käytännön ongelmana optimaaliseen tilanteeseen nähden ovat panostyyppisten prosessien ajoitukset. Optimaalisen hera LTO:n laskelmat perustuvat TAM- tehoihin ja – virtauksiin. Virtaukset ovat hyvin pitkälle ajanjaksolle keskiarvoistettuja pysyvyydellä painotettuna. Vaikuttaakin siltä, että tämä johtaa liian optimistisiin arvoihin. Järjestelmää mitoitettaessa vuonna 2007, lähtötietoina olivat sen hetkiset tuotteiden massavirrat ja lämpötilatasot. Pysyvyyksiä ei millään tavalla huomioitu, mutta ajoituksia pyrittiin parhaalla mahdollisella tavalla huomioimaan. Prosessien muuttuessa nopeasti ja tuotannon laajentuessa, osa mitoitusperusteista ei enää päde. Lämpötilatasot, ajoitukset ja massavirtaukset muuttuivat eli käytännössä kaikki suunnitelman lähtötiedot ovat muutuneet hyvin pian toteutuksen jälkeen. Muutosten vaikutuksia on kuitenkin hyvin vaikea arvioida.

Alun perin oli olemassa jo tieto siitä, että tuotteiden tavoitelämpötiloihin pääsemiseksi oli käytettävä primäärienergiaa, käytännössä höyryllä tuotettua lämpöä ja jäävedellä

tuotettua jäähdytystä. Primäärienergian lämpötilatasoja ei kuitenkaan alunperin mitenkään analysoitu, ovatko ne energiatehokkuuden kannalta järkeviä.

Pinch-analyysin kautta päästään kuitenkin erittäin hyvin kiinni siihen mikä on primäärienergian tarve (jäähdytys tai lämmitys) sekä millä lämpötilatasoilla se kannattaa tehdä. Tätä voidaan havainnollistaa kuvan 29 avulla. Siitä voidaan lukea ne lämpötilatasonot, joissa on tarve ulkopuoliselle lämmitysenergialle tai ulkopuoliselle jäähdytysenergialle.



**KUVA 29. Lämpötilatasot niille virtauksille, joita täytyy joko lämmittää tai jäähdyttää ulkopuolisella energialla**

Kuvasta 29 voidaan lukea, että ne osat käyrästä jotka eivät ole päällekkäin on tarve joko jäähdyttää tai lämmittää ulkopuolisella energialla. Perinteisesti on laskettu se tehontarve, jossa ulkopuolista energiaa tarvitaan. Kuitenkin lämpötila-alue, jossa energiaa tarvitaan, on jäänyt epäselväksi. Kuvasta 29 voidaan lukea, että optimaalisen LTO:n tapauksessa jäähdytystä tarvitaan tuotteen lämpötilatasolla  $\leq 16$  °C, ja lämmitystä tuotteen lämpötilatasolla  $\geq 28$  °C. Tyypillisesti lämmitys tapahtuu aina vähintään 4 bar höyryllä, jonka lämpötila on reilusti yli 100 °C. Tämä ei ole kovinkaan järkevää, kun huomattavasti matalalämpöisempikin energia pystyy lämmittämään virtaukset. Jäähdytys taas hoidetaan jäävedellä, jonka lämpötilataso on noin +1 °C.

Voidaankin todeta, että kuvan 29 mukaisilla lämpötilatasoilla ulkopuolisen energian lämpötilatasot tällä hetkellä eivät ole kovinkaan kustannustehokkaita. Tietysti ensisijaisesti pitäisi sisäistä lämmöntalteenottoa tehostaa erilaisin toimenpitein. Mutta jos kaikesta huolimatta ulkopuolista energiaa tarvitaan tuotteiden tavoitelämpötilan saavuttamiseksi, olisi lämpöpumpun käyttö hyvin perusteltu vaihtoehto. Tässä tapauksessa lämpöpumpun avulla voitaisiin jäähdyttää sitä osaa, johon ulkopuolista jäähdytysenergiaa tarvitaan ja siitä syntyneen lämmön avulla taas lämmittää sitä osaa (käyrän yläpää), jossa tarvitaan ulkopuolista lämmitysenergiaa. Lämpöpumpun käyttö olisi perusteltua sen vuoksi, että lämpötilatasot ovat matalia ja aika lähellä toisiaan. Pinch-analyysin kuuma- ja kylmävirtakäyrältä (CC, Composite Curves) voidaankin jo hyvin tarkasti määrittellä lämpöpumpun käytön järjestyminen ja yleensäkin eri hyödykkeiden tarpeet ja millä tarvittava energiavaje kannattaa kattaa.

Tämän työn alkuosassa on todettu pinch-analyysin soveltuvan paljon energiaa käyttävän prosessiteollisuuden energiankäytön analysointiin. Tämän selvityksen perusteella voidaan edelleen todeta, että pinch-analyysi soveltuu myös meijeriteollisuuden energian käytön analysointiin. Haasteeksi meidän tapauksessa (Haapaveden tehdas) muodostuu erityyppiset panosprosessit ja niiden ajoitukset. TAM-tehojen ja –virtausten käyttö näyttäisi antavan liian optimaalisen kuvan energian käytöstä ja sisäisestä lämmönsiirrosta. Ainakin tutkitussa tapauksessa olisi ehkä parempi tehdä pinch-analyysi TSM-tehojen ja –virtausten kautta. Tämä onkin yksi seuraavista selvitettävistä asioista, käytännössä jatkotutkimuksen aihe.

Tätä työtä aloitettaessa ei tämän työn osapuolista kenelläkään ollut pinch-analyysistä kovinkaan paljon tietoa tai kokemusta. Nyt kuluneen vajaan vuoden aikana ymmärrys on lisääntynyt jokaisella ja myös ymmärrys siitä, että pinch-analyysi on työkalu, jota on ehdottomasti käytettävä Valion tuotantolaitosten energian käytön analysoinnissa sekä suunniteltaessa erilaisia energian tehostamistoimenpiteitä. Useissa aihe yhteyksissä tulee ehkä tunne siitä, että tieto lisää tuskaa. Mutta tässä tapauksessa tietoa avaa mahdollisuuksia.



## LÄHTEET

Aho, Johanna. & Hildén, Tiina. 2007. Maidon matkassa. Helsinki : Opetushallitus.

Brown. 1989. Process Integration Initiative. A review R&D programme.

Cheresources. Pinch Technology: Basis for the beginners. WWW-julkaisu. <http://www.cheresources.com/content/articles/heat-transfer/Pinch-Technology-basics-for-beginners>. Ei päivitystietoa. Luettu 19.08.2012.

Gunnarsson, Anna & Magnusson, Carin. 2011. Pinch-analysis of Nymas refinery. Göteborg, Sweden.

Ilmonen, Harri. 2011. Vesi- ja jätevesimäärän hallinta. Case Valio Haapavesi. Opin-  
näytetyö Keskipohjanmaan Ammattikorkeakoulu.

Linnhoff & Turner. 1981. Heat-recovery networks: new insights yield big savings. Chem Eng, 56-70. November 2.

Linnhoff, March. 1998. Introduction to Pinch Technology. England.

Kemp, Ian. 2007. Pinch analysis and process integration. England.

Marechal, François. Exergy, energy system analysis and optimization – Vol. I-Pinch Analysis. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Switzerland.

Motiva. 2012. Pinch-analyysi. WWW-julkaisu. <http://www.motiva.fi/files/1844/pinch-analyysi.pdf>. Ei päivitystietoa. Luettu 20.07.2012.

Peltonen, Arttu. 2011. Motiva energiakatselmusraportti Liite 18. Jyväskylä: Seuran-  
takatselmus Valio Oy. Haapaveden tehdas.

Ruohonen, Pekka. 2011. Pinch-analyysi ja laskentaesimerkkejä. Teollisuuden jäte-  
lämmön hyödyntäminen 24.5.2011.

Ruohonen, Pekka. 2008. Advanced pinch ja laskentaesimerkkejä teollisuudesta. Ener-  
giakatselmusten ajankohtaisseminaari 6.11.2008.

Tampereen Teknillinen Yliopisto, energia- ja prosessitekniikan laitos / ENER-8100  
Energialous. Luentomoniste.

