

DIPLOMITYÖ

LTY:n kirjasto



1630000903

PÄIVI HIRI

Hyväksytty energiatekniikan laitoksen
laitosneuvoston kokouksessa

6/3 19 85 arvosanalla "erittäin hyvä" 4 (30sp).

Va Dipt.

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Energiatekniikan laitos



LAPPEENRANNAN
TEKNILLISEN KORKEAKOULUN
KIRJASTO

DIPLOMITÖS

Louhostilosta saatavan maalämmön hyväksikäyttö lämpöpumpun avulla Oulunkummun kaupungin lämmöntuotantovaihtoehtona.

Diplomityö on annettu Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun Energiatekniikan laitoksen laitosneuvostossa 6.2.1985.

Työn tarkastajana on toiminut professori Pertti Sarkomaa ja ohjaajana OULOKUMPU OY:ssä DI Harri Harjunpää.

Lappeenrannassa 31.1.1985

Päivi Hiiri

Päivi Hiiri

Uranuksentatu 1a C 30
11130 RIIHMÄKI 13

TIIVISTELMÄ

Hiiri, Päivi: Louhostiloista saatavan maalämmön hyväksikäyttö lämpöpumpun avulla Outokummun kaupungin lämmöntuotantovaihtoehtona.

Diplomityö. LTKK. Energiatekniikan laitos. Lappeenranta 1985. 68 sivua, 9 kuvaa, 9 taulukkoa, 23 liitettä. .

Tarkastaja professori Pertti Sarkomaa.

UDK 620.92:621.577:697.34:556.3:550.36

Hakusanat: lämpöpumppu, kaukolämmitys, pohjavesi, kaivokset

Keywords: heat pump, district heating, ground water, mines

Tutkimus on luonteeltaan perusselvitys, jonka tavoitteena on tutkia lämpöpumpun tekninen ja taloudellinen soveltuvuus Outokummun kaupungin energiahuoltoon. Tarkastelun kohteena on Outokummun olosuhteisiin tarjottu lämpöteholtaan 7 MW sähkömoottorikäyttöinen lämpöpumppukoneisto. Lämmönlähteenä on Outokummun kaupungin välittömässä läheisyydessä sijaitsevan Keretin kaivoksen louhostiloista saatava maalämpö, jota hvödynnetään pohjaveden välityksellä. Tutkimuksessa selvitetään tarjotusta laitteistosta saatujen tietojen perusteella lämpöpumpun toimintaparametrit vuorokausittain ja niiden vuosikeskiarvot. Lisäksi tutkitaan lauhtumislämpötilan ja teho-osuuden vaikutusta lämpöpumpulla tuotettuun vuosienenergiaosuuteen ja vuotuisen tehokertotukseen. Kannattavuustarkastelussa selvitetään lämpöpumpun ja vertailukohteina käytettävien turve- ja raskasöljylaitosten lämmöntuotantokustannukset ja edelleen tuotetun lämmön ominaishinta. Kannattavuustarkastelun perusteella arvioidaan eri vaihtoehtojen taloudellinen toteuttamiskelpoisuus.

Selvityksessä lämpöpumppu osoittautui teknisesti toteuttamiskelpoiseksi ja taloudellisesti kilpailukykyiseksi lämmöntuotantovaihtoehtoksi Outokummussa. Kannattavuustarkastelussa saatujen tulosten perusteella eri vaihtoehtojen edullisuusjärjestys on seuraava: lämpöpumppu, turvelaitos, raskasöljylaitos.

Kannattavuusvertailussa käytettävillä laskenta-arvoilla voidaan kuitenkin huomattavasti vaikuttaa lämmöntuotantokustannuksiin. Herkkyysanalyyseissä laskentakoron, lämpöpumpun tehokertoimen sekä sähkön, turpeen ja raskaan polttoöljyn energiahintojen muutokset aiheuttivat suhteellisesti suurimmat muutokset tuotetun lämmön ominaishintaan.

Vaikka lämpöpumppu tutkimuksessa osoittautuikin taloudellisesti kilpailukykyiseksi lämmöntuotantoratkaisuksi, riippuu sen todellinen kannattavuus ennen kaikkea sovellutuskohteeseen liittyvistä lähtötiedoista ja niiden todenmukaisuudesta.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty OUTOKUMPU OY:n Kaivosteknisessä ryhmässä.

Kiitän professori Pertti Sarkomaata työni tarkastamisesta.

Työn ohjaajana toiminutta DI Harri Harjunpäättä haluan erityisesti kiittää mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta sekä saamistani lukuisista neuvoista ja asiantuntevasta opastuksesta.

Haluan esittää myös lämpimät kiitokset kaikille niille Outokumpu Oy:n Kaivosteknisessä ryhmässä työskenteleville, joilta olen saanut neuvoja ja apua työni edistyessä.

Lisäksi kiitän Outokummun Lämpö Oy:n toimitusjohtaja Martti Tukiaista saamastani avusta ja tiedoista.

Lappeenrannassa 31.1.1985

Päivi Hiiri

SISÄLLYSLUETTELO

Sivu

TIIVISTELMÄ

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

LIITELUETTELO

SUUREET JA YKSIKÖT SEKÄ ALAVIITTEET

1. JOHDANTO	1
2. LÄMPÖPUMPUN TEORIA	3
2.1 Lämpöpumppuprosessit	4
2.2 Ideaalinen lämpöpumppuprosessi	5
2.2.1 Kiertoprosessi	5
2.2.2 Carnot-lämpökerroin	6
2.3 Häviötön lämpöpumppuprosessi	6
2.3.1 Kiertoprosessi ja $lg\ h_p$ -piirros	6
2.3.2 Lämpökerroin	8
2.4 Todellinen lämpöpumppuprosessi	8
2.4.1 Kiertoprosessi	8
2.4.2 Lämpökerroin	10
2.5 Kiertoaineet	10
2.6 Koneistovaihtoehdot	11
2.6.1 Kompressorit	11
2.6.2 Käyttömoottorit	13
2.6.3 Lämmönvaihtimet	14
2.7 Muita lämpöpumpun toimintaan vaikuttavia tekijöitä	15
2.8 Lämpöpumpun säädöt	16
3. LÄMMÖNLÄHTEET	18
3.1 Edullisen lämmönlähteen ominaisuudet	18
3.2 Vesistöt	18
3.3 Maaperä	19
3.4 Maalämpö ja pohjavedet	20
3.5 Muut lämmönlähteet	20
4. LÄMPÖPUMPPU LÄMMITYSKÄYTÖSSÄ	22
4.1 Pientalolämmitys	22
4.2 Kauko- ja aluelämmitys	23
4.2.1 Lämpöpumpun käyttömahdollisuudet alue- ja kaukolämmitysjärjestelmissä	24
4.2.2 Kokemuksia toteutuneista lämpöpumppu- laitoksista	25

5. KAUKOLÄMMITYS OUTOKUMMUSSA	27
5.1 Keskitetyn energiahuollon nykytilanne	27
5.2 Kaukolämmön kasvuennuste	29
6. LÄMPÖPUMPPUSOVELLUTUS OUTOKUMMUN LÄMMITYS- VAIHTOEHTONA	30
6.1 Outokumpu Oy	30
6.2 Lämpöpumpun lämmönlähde Outokummussa	30
6.2.1 Veden kierto louhostiloissa	31
6.2.2 Veden ominaisuudet	33
6.3 Lämmöntarve	34
6.4 Lämpöpumppukoneiston sijoitus	35
6.4.1 Lämpöpumppulaitteiston sijoitus Outokummussa	36
6.5 Lämpöpumpun periaatekytkennät	37
6.6 Outokummun kaukolämmöntuotantoon tarjotut laitteistot	39
6.6.1 Tarjotun laitteiston tekniset tiedot	40
6.6.2 Laitteiston hintatiedot	41
6.6.3 Muut kustannukset	41
6.7 Kallioperän hyödyntäminen energiahuollossa	42
7. LÄMPÖPUMPUN SIMULOINTIMALLI	44
7.1 Matemaattinen malli	44
7.2 Lämpöpumpun toiminnan simulointi	45
7.3 Simulointitulokset	46
8. KANNATTAVUUSVERTAILU	48
8.1 Kannattavuusvertailun lähtötiedot	48
8.1.1 Investointikustannukset ja vuotuiset kiinteät käyt- tökustannukset	48
8.1.2 Muuttuvat käyttökustannukset	50
8.1.3 Muut lähtötiedot	51
8.2 Laskentamenetelmät	52
8.3 Kannattavuusvertailun tulokset	53
8.3.1 Perustapaus	53
8.3.2 Investointikustannusten muutos	54
8.3.3 Laskentakoron muutos	55
8.3.4 Pitoajan muutos	56
8.3.5 Huipunkäyttöajan muutos	56
8.3.6 Tehokertoimen muutos	58
8.3.7 Sähkön hinnan muutos	58
8.3.8 Turpeen hinnan muutos	59
8.3.9 Raskaan polttoöljyn hinnan muutos	60

8.4 Takaisinmaksuaika	62
8.5 Sisäinen korkokanta	62
8.6 Johtopäätökset kannattavuusvertailusta	63
8.7 Mahdolliset jatkotoimenpiteet	64
9. YHTEENVETO	65
LÄHDELUETTELO	67
LIITTEET	

LIITELUETTELO

1. Lämpökeskukset ja verkoston runkojohdot
2. Kaukolämpötehon pysyvyyskäyrä
3. Kaukolämpöverkoston meno- ja paluuveden lämpötilat
4. Kaukolämpötehon ja -energian kasvuennusteet
5. Lämpöpumpun kytkentäkaavio
6. Simulointiohjelman vuokaavio
7. Kaukolämpöverkoston lämpökuorman malli
8. Lämpöpumpun energiaosuus ja keskimääräinen vuotuinen tehokerroin eri teho-osuuksilla
9. Lämpöpumpun huipunkäyttöaika eri teho-osuuksilla
10. Lauhtumislämpötilan vaikutus vuosienergiaosuuteen ja tehokertoimeen lämpöpumpun lämpötehon ollessa 7 MW
11. Lauhtumislämpötilan vaikutus vuosienergiaosuuteen ja tehokertoimeen lämpöpumpun lämpötehon ollessa 6 MW
12. Lauhtumislämpötilan vaikutus vuosienergiaosuuteen ja tehokertoimeen lämpöpumpun lämpötehon ollessa 5 MW
13. Lauhtumislämpötilan vaikutus vuosienergiaosuuteen ja tehokertoimeen lämpöpumpun lämpötehon ollessa 4 MW
14. Lämpöpumppulaitoksen herkkyyssanalyysit
15. Turvelaitoksen herkkyyssanalyysit
16. Raskasöljylaitoksen herkkyyssanalyysit
17. Sähkön hinnan vaikutus lämmöntuotantokustannuksiin
18. Turpeen hinnan vaikutus lämmöntuotantokustannuksiin

19. Raskaan polttoöljyn hinnan vaikutus lämmöntuotantokustannuksiin
20. Lämpöpumppu- ja turvelaitoksen takaisinmaksuaika
21. Lämpöpumppu- ja turvelaitoksen sisäinen korkokanta
22. Lämmön myyntihinnan vaikutus takaisinmaksu-aikaan
23. Lämmön myyntihinnan vaikutus sisäiseen korkoon

SUUREET JA YKSIKÖT

W	Työ	(kJ)
h	Ominaisentalpia	(kJ/kg)
p	Paine	(Pa)
Q	Lämpömäärä	(kJ)
T	Lämpötila	(K)
ΔT	Lämpötilaero	(K)
t	Aika	(h)
ϕ	Lämpövirta	(W)
μ	Lämpökerroin, tehokerroin	
η	Hyötysuhde	

ALAVIITTEET

C	Ideaalinen (Carnot-kone)
Cd	Termodynaaminen
d	Häviötön
H	Höyrystys
i	Indikoitu
IN	Sisäinen, lämpöpumppuprosessissa kylmäainepuolen
kl,1	Meno (kaukolämpöverkosto)
kl,2	Paluu (kaukolämpöverkosto)
L	Lauhdutus
max	Maksimi
mk	Mekaaninen
mm	Kokonais (moottori)
t	Todellinen
tot	Kokonais
u	Ulko
1	Höyrystin, sisään
2	Lauhdutin, ulos

1. JOHDANTO

Kauko- ja aluelämmityksellä on Suomessa pitkät perinteet ja siihen liittyvä teknologia on korkeatasoista. Ensimmäiset kaukolämpöjärjestelmät rakennettiin suurimpiin kaupunkeihin. Nykyään keskitetty lämmitystapa on näillä paikkakunnilla jo vakiintunut ja kattaa ainakin tiheimmin rakennetut alueet. Monin paikoin kaukolämmitystoiminta on laajentunut myös harvempaan rakennetuille pientaloalueille.

Keskitetyt lämmitysjärjestelmät ovat mahdollistaneet energiataloudellisesti edullisten ratkaisujen soveltamisen yhdyskuntien lämmöntuotannossa. Esimerkkinä mainittakoon sähkön ja lämmön yhteistuotanto, jolla on saavutettu polttoaineen korkea hyödyntämisaste. Lämmitysvoimaloiden taloudellinen käyttö rajoittuu kuitenkin vain suurimpiin kaukolämmitysjärjestelmiin. Myös aluelämmitys- ja pieniin kaukolämpöjärjestelmiin soveltuvia, energian entistä järkevämpää käyttöä edistäviä menetelmiä tulisi kehittää. Eräänä käyttökelpoisena ratkaisuna voivat olla suuret, aluelämpöjärjestelmien peruskuormalämpöä tuottavat lämpöpumput.

Suuret lämpöpumput nojautuvat perustekniikaltaan tunnettuihin ratkaisuihin, joten edellytykset niiden käytölle alue- ja kaukolämpöjärjestelmissä ovat olemassa. Lämmönlähteenä suurteholämpöpumput voisivat käyttää vesistöjä ja teollisuuden sekä yhdyskuntien jätelämpöä.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää lämpöpumpun periaatteellinen soveltuvuus Outokummun kaupungin lämmöntuotantovaihtoehtoksi. Lämmönlähteenä olisi Outokumpu Oy:n Keretin kaivoksen louhostiloista louhinnan vuonna 1992 päätyttyä saatava maalämpö, jota hyödynnettäisiin kaivoksen täytyttyä pohjaveden välityksellä.

Tutkimuksen alkuosassa käsitellään lämpöpumpun teoriaa, erilaisia koneistovaihtoehtoja sekä lämmönlähteitä. Lisäksi selvitetään lämpöpumpun käyttömahdollisuuksia erilaisissa lämmityskohteissa.

Tutkimuksen toisessa osassa selvitetään Outokummun kaukolämmöntuotantoon tarjetun lämpöpumppulaitteiston toimintaparametrit, lähinnä lämpöpumpun vuosienenergiaosuus ja keskimääräinen vuo-

tuinen tehokerroin simulointiohjelman avulla. Simulointitulosten perusteella lasketaan lämpöpumppulaitoksessa tuotetun lämmön ominaishinta. Lisäksi tutkitaan eri tekijöiden, mm. investointikustannusten, sähkön hinnan, tehokertoimen ja huipunkäyttöajan, vaikutusta järjestelmän kokonaiskustannuksiin ja edelleen lämmön hintaan.

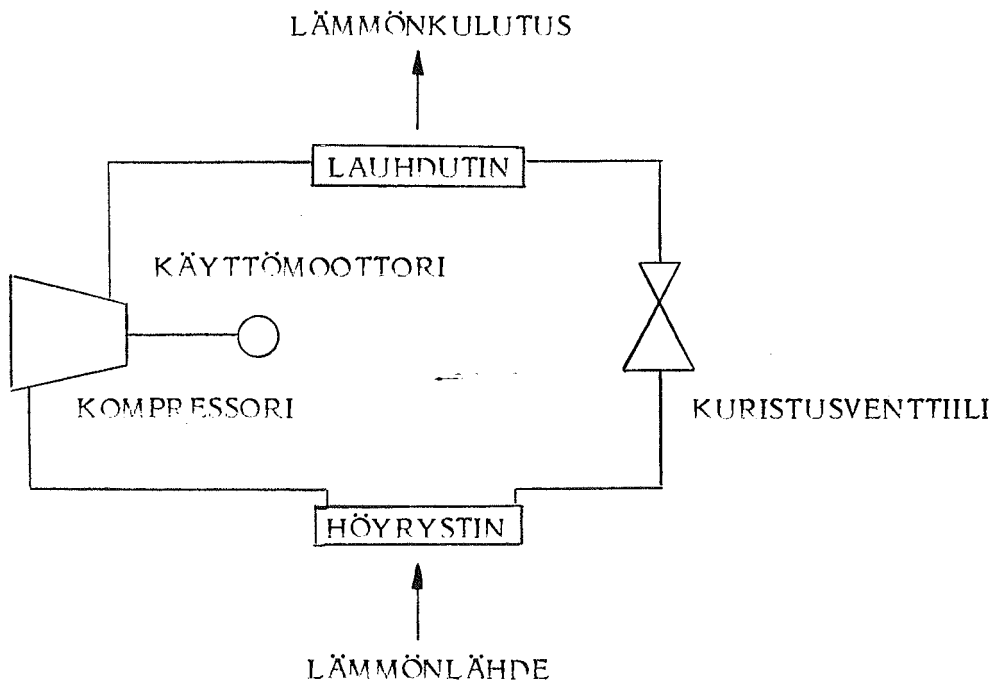
Lämpöpumppujärjestelmän kannattavuutta arvioitaessa käytetään vertailukohteina vastaavia lämpökeskuksia, joissa lämpö tuotettaisiin joko turpeella tai raskaalla polttoöljyllä.

2. LÄMPÖPUMPUN TEORIA

Lämpöpumpulla tarkoitetaan laitteistoa, joka prosessiin tehtävän työn avulla nostaa lämpöä matalammalta lämpötilatasolta korkeammalle lämpötilatasolle.

Lämpöpumppu ja kylmäkoneisto ovat periaatteessa täysin samantlaisia järjestelmiä ja ne eroavat vain käyttötapansa puolesta: lämpöpumppusovellutuksessa käytetään hyväksi koneiston luovuttamaa lämpöä, kun taas kylmäkonesovellutuksissa koneiston jäähdytyskohteesta ottamalla lämmöllä on merkitystä.

Lämpöpumppuprosessin periaatekaavio on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Lämpöpumppuprosessi

Lämpöpumppukoneistossa voidaan erottaa seuraavat komponentit

- höyrystin
- lauhdutin
- kompressori ja sen käyttömoottori
- kuristusventtiili
- kylmäaineputkisto.

2.1 Lämpöpumppuprosessit

Lämpöpumppuprosessit voidaan jaotella seuraavasti:

- mekaaniset prosessit
- termiset prosessit
- sähköiset prosessit
- kemialliset prosessit.

Termisillä prosesseilla tarkoitetaan suoraan lämpöenergialla käyviä prosesseja. Lämpöä ei siten muuteta ensin mekaaniseksi energiaksi tai sähköksi, vaan se hyödynnetään välittömästi prosessissa. Tavallisimmat termiset prosessit ovat ejektorin- ja absorptioprosessit. Ejektoriprosessi on tavanomainen höyrystysprosessi, jossa puristus tapahtuu ejektorin avulla. Absorptioprosessissa kylmäaineen höyrystyminen ja lämmön siirto väliaineeseen tapahtuu puolestaan absorptiolaitteistossa. Näiden sovellutusten tehokerroin on kuitenkin niin alhainen, ettei niitä voida pitää kannattavina vaihtoehtoina valittaessa sopivaa lämpöpumppuprosessia tutkimuksen tehoalueella.

Sähköisistä prosesseista tärkein on Peltier-efektiin perustuva prosessi. P- ja N-tyyppisten puolijohteiden liitoskohtien läpi johdettu sähkövirta saa aikaan toisen liitoksen lämpiämisen ja toisen jäähtymisen, joten elementti voi toimia jäähdytyskoneena tai lämpöpumppuna. Peltier-elementti on puhtaasti sähköinen, eikä siinä ole liikkuvia osia lainkaan. Peltier-elementtiä voidaan soveltaa vain kohteissa, missä lämpötilaero on pieni. Korkeista kustannuksista johtuen nykyiset elementit sopivat ainoastaan pienitehoisiin sovellutuksiin.

Kemialliset lämpöpumppuprosessit perustuvat joko faasimuutoksiin tai kemiallisiin reaktioihin. Useimmat ratkaisut toimivat jaksottaisesti. Kehitystyö on liittynyt lähinnä aurinkolämmityksen kehittämiseen. Kemiallisia prosesseja ei ole kuitenkaan toteutettu näin suurissa kokoluokissa, joten lähempi tarkastelu on tarpeellonta.

Nykyisellä tekniikalla tutkimuksen teho- ja toimintalämpötila-alueella voidaan soveltaa ainoastaan mekaaniseen kompressioon perustuvaa prosessia, nk. käänteistä Clausius-Rankine -prosessia. Ko. prosessia on käytetty kylmäkoneistoissa jo pitkään, joten tekniikka on hyvin tunnettua.

2.2 Ideaalinen lämpöpumppuprosessi

2.2.1 Kiertoprosessi

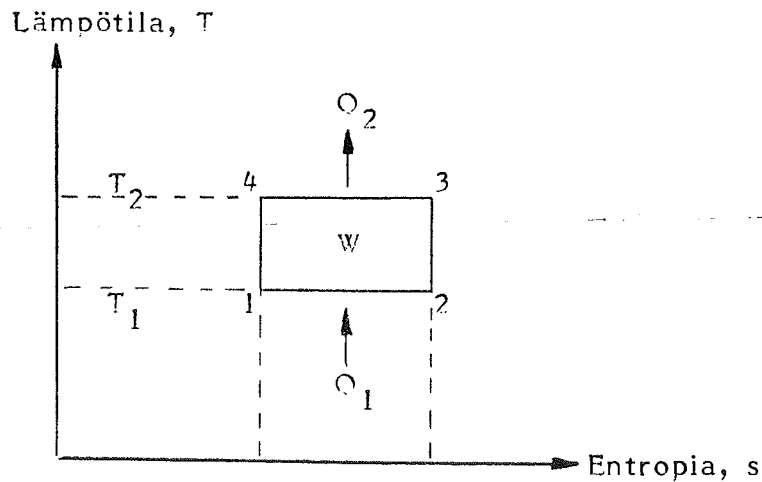
Carnot-prosessi eli ideaalinen lämpöpumppuprosessi on esitetty kuvassa 2 T,s -tasolla (lämpötila, entropia) ja siinä voidaan erottaa seuraavat vaiheet:

Vaihe 1-2: Isoterminen paisunta, jolloin lämpöaine ottaa lämpöä lämmönlähteestä (höyrystin).

Vaihe 2-3: Adiabaattinen puristus, jolloin lämpöaineeseen tehdään työtä (kompressori).

Vaihe 3-4: Isoterminen puristus, jolloin lämpöaine luovuttaa lämpöä ympäristöön (lauhdutin).

Vaihe 4-1: Adiabaattinen paisunta, jolloin lämpöaine tekee työtä.



Kuva 2. Carnot-prosessi T,s -tasolla

Energian häviämättömyyden lain mukaan

$$Q_2 = Q_1 + W \quad , \quad (1)$$

missä Q_1 = prosessiin tuotava lämpömäärä

Q_2 = prosessista poistuva lämpömäärä

W = kiertoprosessin ylläpitämiseen tarvittava työ

2.2.2 Carnot-lämpökerroin

Carnot-lämpökerroin ilmaisee Carnot-prosessin mukaan toimivan lämpöpumppukoneiston luovuttaman lämpömäärän ja prosessiin tehdyn työn suhteen.

Carnot-lämpökerroin määritellään

$$\mu_C = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}, \quad (2)$$

missä T_1 = höyrystymislämpötila

T_2 = lauhtumislämpötila

Yhtälöstä (2) havaitaan, että Carnot-lämpökerroin on aina suurempi kuin yksi, joten prosessista saatava lämpömäärä on suurempi kuin tarvittava työ. Samoin voidaan havaita myös Carnot-lämpökertoimen voimakas riippuvuus lämpötilatasoista ja lämpötilaerosta: mitä korkeammalla lämpötilatasolla ja pienemmällä lämpötilaerolla toimitaan sitä suurempi lämpökerroin saavutetaan.

Carnot-prosessi on ideaalinen lämpöpumppuprosessi eikä sitä voida koskaan käytännössä toteuttaa, mutta sen avulla voidaan arvioida todellisen prosessin hyvyttä.

2.3 Häviötön lämpöpumppuprosessi

2.3.1 Kiertoprosessi ja lg p,h -piirros

Häviöttömän kiertoprosessin eri vaiheet ovat:

Vaihe 1-2: Höyrystimessä kiertoaine höyrystyy vakiolämpötilassa ja -paineessa.

Vaihe 2-3: Kompressori imee kiertoainehöyryn höyrystimestä ja puristaa sen lauhtuttimen paineesta p_L höyrystimen paineeseen p_H isentrooppisesti. Puristusvaiheen aikana kiertoaineen lämpötila kohoaa huomattavasti, samoin entalpia.

Vaihe 3-4: Tulistunut kiertoainehöyry virtaa lauhtuttimeen, jossa se vakioaineessa luovuttaa aluksi tulistuslämpönsä muuttuen kylläiseksi höyryksi. Höyryn lämpötila las-

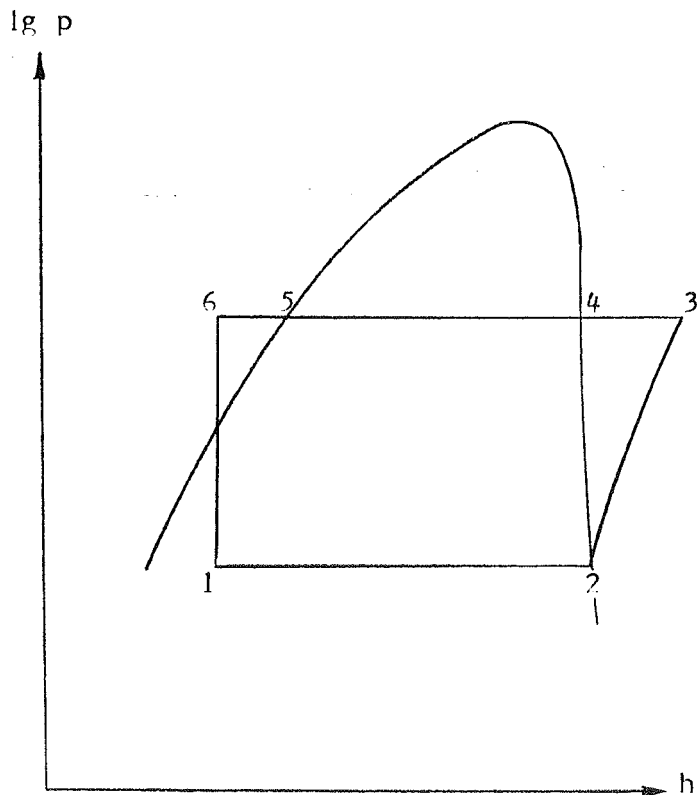
kee lauhduttimen painetta vastaavan lauhtumislämpötilan tasolle.

Vaihe 4-5: Kylläinen höyry lauhtuu kylläiseksi nesteeksi paineen p_L ja lämpötilan T_L pysyessä muuttumattomana. Höyry luovuttaa lauhtuessaan lauhtumislämpönsä.

Vaihe 5-6: Kiertoaine alijäähtyy vakioaineessa, jolloin sen lämpötila laskee.

Vaihe 6-1: Nestemäinen kiertoaine virtaa paisuntaventtiilin kautta takaisin höyrystimeen, jolloin sen paine pienenee höyrystimen painetta p_H vastaavalle tasolle, samoin lämpötila laskee höyrystymispainetta vastaavaan lämpötilaan T_H . Osa nesteestä höyrystyy.

Häviöttömän kompressorilämpöpumpun kiertoprosessi voidaan esittää $\lg h, p$ -tasolla seuraavasti:



Kuva 3. Häviöttömän lämpöpumpun prosessi

2.3.2 Lämpökerroin

Häviöttömän lämpöpumpppuolosessin lämpökerroin on määritelmän mukaan

$$\mu_d = \frac{h_3 - h_6}{h_3 - h_2} , \quad (3)$$

joka on pienempi kuin Carnot-lämpökerroin.

Häviöttömän prosessin Carnot-lämpökerroin on kaavan 2 mukaan

$$\mu_C = \frac{T_L}{T_L - T_H} , \quad (4)$$

Yhtälöissä (3) ja (4) määriteltyjen lämpökertoimien μ_d ja μ_C suhdetta nimitetään termodynaamiseksi hyötysuhteeksi eli Carnot-hyötysuhteeksi

$$\eta_{Cd} = \mu_d / \mu_C \quad (5)$$

Carnot-hyötysuhde riippuu lämpöaineesta sekä höyrystymis-, lauhdumis- ja alijäähtymislämpötiloista.

2.4 Todellinen lämpöpumpppuolosessi

2.4.1 Kiertoprosessi

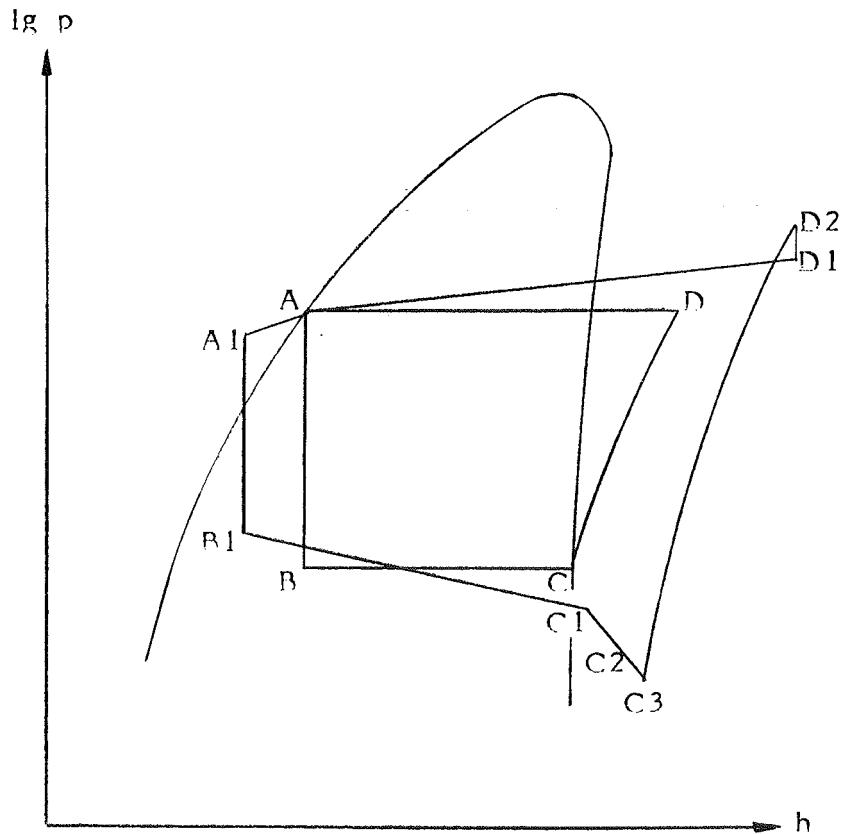
Käytännössä ei voida toteuttaa häviötöntä lämpöpumpppuolosessia, vaan on otettava huomioon seuraavat prosessissa tapahtuvat häviöt:

- virtauksista aiheutuvat painehäviöt
- puristus ei ole adiabaattinen
- lämpöpumpppukoneistossa ja käyttömoottorissa tapahtuvat lämpö- ja mekaaniset häviöt.

Kuvassa 4 on esitetty todellinen lämpöpumpppuolosessi, jossa on huomioitu alijäähtytys, tulistus ja painehäviöt /3/.

Kiertoprosessin eri vaiheet ovat seuraavat:

- Vaihe B1-C1: Kiertoaine höyrystyy höyrystimessä, jossa syntyy painehäviö.
- Vaihe C1-C2: Kiertoaine kulkeutuu höyrystimestä kompressorin pitkin imuputkea, jossa syntyy painehäviö.
- Vaihe C2-C3: Höyry kulkee kompressorin imuventtiilien ja kanavien läpi, syntyy painehäviö.
- Vaihe C3-D2: Kiertoaine puristuu kompressorissa.
- Vaihe D2-D1: Höyry kulkee kompressorin poistovenktiilien ja -kanavien läpi, syntyy painehäviö.
- Vaihe D1-A : Kiertoaine lauhtuu lauhduttimessa, jossa syntyy painehäviö.
- Vaihe A -A1: Neste virtaa nesteputken ja säiliön läpi alijäähtyen, syntyy painehäviö.
- Vaihe A1-B1: Neste kulkeutuu paisuntaventtiiliin kautta takaisin höyrystimeen.



Kuva 4. Todellinen lämpöpumppuprosessi

2.4.2 Lämpökerroin

Todellisen lämpöpumppuprosessin lämpökerroin, jossa huomioidaan prosessissa tapahtuvat häviöt, on

$$\mu_t = \eta_{mm} \eta_{mk} \eta_i \eta_{Cd} \mu_c, \quad (6)$$

missä η_{mm} = kävttömoottorin kokonaishyötysuhde
 η_{mk} = kompressorin mekaaninen hyötysuhde
 η_i = indikoitu hyötysuhde, joka ottaa huomioon putkistojen painehäviöt sekä puristuksen poikkeavuuden ideaalisesta puristuksesta

2.5 Kiertoaineet

Yleisesti ottaen lämpöpumppuprosessissa voi kiertoaineena olla mikä tahansa aine, joka sitoo itseensä lämpöä höyrystimessä ja luovuttaa sen lauhduttimessa. Kuitenkin, jotta aine olisi sopiva kiertoaineeksi, sillä täytyy olla tiettyjä kemiallisia, fysikaalisia ja fysiologisia ominaisuuksia.

On selvää, että ei ole olemassakaan ideaalista kiertoainetta, joka täyttäisi kaikki sille asetetut vaatimukset. Ei ole olemassa myöskään kiertoainetta, joka soveltuisi jokaiseen käyttökohteeseen johtuen erilaista olosuhteista ja prosesseille asetettavista erilaisista vaatimuksista. Kuitenkin yleensä aina on käytettävissä kiertoaine, joka tarvittavassa laajuudessa täyttää käyttötarkoituksen sille asettamat vaatimukset.

Kiertoaineelta vaaditaan mm. seuraavia ominaisuuksia /4/:

1. Fysikaaliset

- lauhtumispaine ei saa olla liian korkea
- höyrystymispaine ei saa olla liian alhainen
- pieni nesteen ja suuri höyryn ominaislämpö
- suuri höyrystymislämpö
- kiehumispisteen tulee olla alhainen
- lämmönjohtavuuden tulee olla hyvä sekä nesteenä että höyrynä.

2. Kemiaalliset

- kiertoaineen koostumus ei saa muuttua eikä se saa hajota prosessin toimintaolosuhteissa
- kiertoaine ei saa syövyttää niitä materiaaleja, joita laitteistossa on käytetty, ei metalleja eikä tiivisteitä
- kiertoaine ei saa reagoida voiteluöljyn, ilman hapen tai vesihöyryn kanssa
- kiertoaine ei saa olla palavaa eikä räjähtävää.

3. Fysiologiset

- kiertoaine ei saa olla myrkyllistä
- kiertoaineella pitäisi olla ominainen haju, jotta vuoto-
paukset havaittaisiin mahdollisimman nopeasti

Lämpöpumppuprosesseissa kiertoaineena käytetään tavallisimmin halogenoituja hiilivetyjä. Ne on kuitenkin kehitetty jäähdytysteknisiin sovellutuksiin ja vasta viime vuosina on kiinnostuttu erityisesti lämpöpumppuprosessin kiertoaineelle asettamista vaatimuksista.

Prosessiin parhaiten soveltuvaa kiertoainetta valittaessa kiinnitetään huomiota pääasiassa höyrystymis- ja lauhtumislämpötiloihin, laitoksen kokoon sekä kompressorityyppiin. Alue- ja kaukolämmitysjärjestelmiin parhaiten soveltuvat kiertoaineet ovat hiilivety-yhdisteet R11, R12, R12B1, R21, R22 ja R114 /2/.

2.6 Koneistovaihtoehdot

Seuraavassa käsitellään lyhyesti niitä koneistovaihtoehtoja, joilla mekaaniseen kompressioon perustuvat lämpöpumppuprosessit voidaan toteuttaa.

2.6.1 Kompressorit

Kompressorit voidaan ryhmitellä seuraavasti:

- mäntäkompressorit
- ruuvikompressorit
- rotaatiokompressorit
- turbokompressorit.

Mäntäkompressorit

Mäntäkompressoreita on käytetty kylmäkoneistoissa jo 1870-luvulta alkaen. Nykyäänkin se on yleisin kompressorityyppi pienehköissä laitoksissa, joiden lämpöteho on alle 500 kW. Suuremmilla tehoilla ovat ruuvi- ja turbokompressorit syrjäyttäneet mäntäkompressorit. Ruuvi- ja turbokompressorien etuna on yksinkertaisempi rakenne ja kokonaisuudessaan pienempi koneisto.

Ruuvikompressorit

Ruuvikompressoreiden käyttö on viime vuosina yleistynyt ja ne soveltuvat laitoksiin, joiden tehoalue on 300...2500 kW. Ruuvi-kompressorien hyötysuhde on edullinen johtuen mäntäkompressoria pienemmistä mekaanisista häviöistä. Niillä saavutetaan myös hyvä volymetrinen hyötysuhde muita kompressoreita laajemmalla painealueella. Jossain määrin ruuvikompressorien käytön yleistymistä on kuitenkin haitannut niiden korkea melutaso.

Rotaatiokompressorit

Rotaatiokompressorien tehoalue 50...500 kW kattaa sekä mäntä- että ruuvikompressorien tehoalueet. Rotaatiokompressorit eivät ole kuitenkaan laajemmin käytettyjä, sillä yleensä ko. tehoalueella voidaan saavuttaa parempi kokonaishyötysuhde käytettäessä mäntäkompressoreita pienemmillä ja ruuvikompressoreita suuremmilla tehoalueilla.

Turbokompressorit

Turbokompressoreja käytetään vain suurimmilla tehoalueilla, yleisimmin yli 1 MW koneistoissa. Turbokompressorien etuna ovat yksinkertainen rakenne, mahdollisuudet korkeisiin kierroslukuihin ja tehoonsa nähden pieni koko.

2.6.2 Käyttömoottorit

Luotettavan ja edullisen käyttömoottorin löytäminen lämpöpump-pukoneistoon on luultavasti vaikeimmin täytettävissä oleva vaatimus. Mekaaninen työ on korkean asteen energiamuoto ja siten aina kallista. Kompressorin käyttömoottorina voivat käytännössä toimia seuraavat voimakoneet /7/:

- sähkömoottori
- dieselmoottori
- ottomoottori
- höyryturpiini
- kaasuturpiini.

Näistä yleisimpiä toteutetuissa järjestelmissä ovat sähkö-, diesel- ja ottomoottori.

Sähkömoottorit

Sähkömoottori on yleisin kompressorin käyttömoottorisovellutus. Sähkömoottorilla on saavutettavissa erittäin korkea hyötysuhde, joka on lisäksi varsin vähän riippuvainen kuormituksesta. Esimerkiksi 250 kW -tehoisella sähkömoottorilla saavutetaan mitoitusasteessa 95 % hyötysuhde ja se säilyy lähes vakiona 50 % osateholla asti /7/.

Sähkömoottorin etuina verrattuna muihin käyttömoottoreihin mainittakoon melko alhaiset pääoma- ja ylläpitokustannukset, korkea luotettavuus ja siten pieni huollontarve. Myös automatisointi ja säätö ovat helposti toteutettavissa.

Sähkömoottorin haittana on käytetyn energian korkea jalostusaste. Alue- ja kaukolämmityskäytössä lämpöpumpulla tuotetaan kaukolämpöverkoston perusenergiaa, jolloin käyttömoottoriakin ajetaan lähes vakioteholla. Pientalokäytössä lämpöpumpun on sen sijaan seurattava ulkolämpötilan mukaan vaihtelevaa huipputehontarvetta, mikä saattaa vaikuttaa sähköverkon mitoitukseen.

Polttomoottorit

Dieselmoottori on sähkömoottorin ohella varteenotettava vaihtoehto valittaessa aluelämpöpumpun käyttömoottoria. Kaikista lämpövoimakoneista dieselmoottorilla on tarkasteltavassa kokoluokassa parhain optimipisteen kokonaishyötysuhde, jopa yli 40 %, ja li-

säksi hyötysuhdekäyrä on varsin vähän riippuvainen kuormitukselta: parhailla koneilla voidaan saavuttaa 90 % optimipisteen hyötysuhteesta vielä 50 % osakuormalla /7/.

Ottomoottorilla optimipisteen hyötysuhde on alhaisempi kuin dieselmoottorilla, noin 30 %, ja hyötysuhde huononee voimakkaammin kuormituksen pienentyessä.

Sähkämoottoreihin verrattuna polttomoottoreiden haittana ovat korkea hinta ja huomattavasti suuremmat huoltokustannukset. Lisäksi polttomoottorit ovat riippuvaisia korkean jalostusasteen omaavasta tuontipolttoaineesta. Dieselmoottorin käytöstä aiheutuu myös paikallisia savukaasuhaittoja, joilta välttyään sähkömoottorikäyttöisissä laitoksissa.

Muut käyttömoottorit

Tutkimuksen kohteena olevan suuruusluokan lämpöpumpuissa eivät yleensä muut käyttömoottorit tule kysymykseen.

Tulevaisuudessa kiinnostus vähentää riippuvuutta tuontipolttoaineista tuonee kuitenkin esille uusia käyttömoottoriratkaisuja, kuten tuulivoiman tai suoran vesienenergian käyttö. Nämä pienimuotoiset sovellutukset ovat kuitenkin vielä tutkimusasteella.

2.6.3 Lämmönvaihtimet

Lämmönvaihtimet, höyrystin ja lauhdutin, ovat periaatteeltaan tavanomaisia putki-, levy- tai kennolämmönvaihtimia riippuen sovellutuskohteesta. Kylmäaine voi kiertää joko putki- tai vaipapuolessa. Lisäksi lämmönsiirtoa voidaan parantaa lämpöpintojen rivoituksen avulla.

Kiertoaineen kemialliset ominaisuudet, lujuusvaatimukset sekä joissain sovellutuskohteissa myös likaantumismahdollisuudet määräävät lämmönvaihtimien valmistusmateriaalin. Yleisimmin käytettyjä ovat kupari, alumiini ja teräs hyvien lämmönsiirto-ominaisuuksiensa vuoksi. Korroosiolle alttiissa olosuhteissa käytetään ruostumatonta terästä ja seostettuja metalleja.

Lämmönvaihtimet muodostavat oleellisen osan lämpöpumppukoneiston kustannuksista ja siksi niiden optimaaliseen mitoittamiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Tärkeimpiä mitoittamiseen vaikuttavia tekijöitä ovat lämmönsiirtoaineiden väliset lämpötilaerot, lämmönvaihtintyyppi ja lämpöpintojen rivoitus sekä virtausnopeudet sisä- ja ulkopuolisissa virtauksissa.

2.7 Muita lämpöpumpun toimintaan vaikuttavia tekijöitä

Kiertoaineen, kompressorin ja lämmönsiirtimien lisäksi lämpöpumpun toimintaan voidaan vaikuttaa mm. sisäisellä lämmönvaihdolla, alijäähdetyksellä ja monivaiheisella puristuksella.

Sisäinen lämmönvaihto

Sisäisellä lämmönvaihdolla tarkoitetaan höyrystimestä tulevalle höyrylle tapahtuvaa lauhtuneen nesteen alijäädyttämistä. Tällöin kiertoainehöyry tulistuu, mikä on hyödyllistä siksi, että siten estetään nestemäisen kiertoaineen pääsy kompressorin. Tulistuksesta johtuen puristus kompressorissa tapahtuu korkeammassa lämpötilassa, joten kompressorin tehontarve kasvaa. Näin ollen sisäisellä lämmönvaihdolla ei voida parantaa lämpökerrointa, vaikkakin lauhtutinteho kasvaa.

Nesteen alijäähdytys

Nesteen alijäähdytys voidaan toteuttaa joko sisäisellä tai ulkoisella lämmönvaihdolla. Ulkoista lämmönvaihtoa käytettäessä höyrystimen lämmönlähteestä ottama teho kasvaa kompressorin tehonkulutuksen pysyessä muuttumattomana. Koska myös lauhtuttimen teho kasvaa, voidaan ulkoisella lämmönsiirrolla parantaa lämpökerrointa. Alijäähdytys toteutetaan lauhtuttimen yhteyteen rakennetussa tai erillisessä lämmönvaihtimessa, jossa jäädytävänä aineena voidaan käyttää ilmaa tai lämmönlähteestä pumpattavaa vettä.

Moniportainen puristus

Moniportaista puristusta ja välijäädytystä kannattaa käyttää, kun lauhtumis- ja höyrystymislämpötilojen suhde kasvaa suureksi pyrittäessä korkeisiin lauhtumislämpötiloihin.

Yksivaiheisessa puristuksessa kompressorin volymetrinen hyötysuhde huononee painesuhteen kasvaessa. Lisäksi korkeasta lämpötilasta johtuen voiteluöljy alkaa mahdollisesti hajota, mikä lyhentää kompressorin käyttöikää.

Yksivaiheiseen puristukseen verrattuna monivaiheisessa puristuksessa kompressorin tehontarve pienenee ja höyrystimen lämmönlähteestä ottama teho kasvaa, samoin lauhduttimen lämpöteho kasvaa, joten myös lämpökerroin paranee.

2.8 Lämpöpumpun säädöt

Lämpöpumppujärjestelmän säätö jatkuvana toimenpiteenä ei kannata, koska sitä ei voida toteuttaa ilman lämpökertoimen merkittävää huononemista. Siksi kaukolämpöverkkoon liitettävä lämpöpumppu mitoitetaan kattamaan vain osa, noin 30-40 %, verkoston huipputehosta, jolloin pystytään tuottamaan noin 70 % vuotuisesta energiantarpeesta, kuva 5 /9/. Pienestä mitoitustehosta johtuen lämpöpumppua voidaan käyttää alhaisenkin tehontarpeen aikana ilman, että lämpökerroin huononee ratkaisevasti.

Lämpöpumpun säätö voidaan suorittaa kiertoainevirtaa ja lämpötehoa säätämällä ja ottamalla huomioon aitteiston toimintarajoitukset.

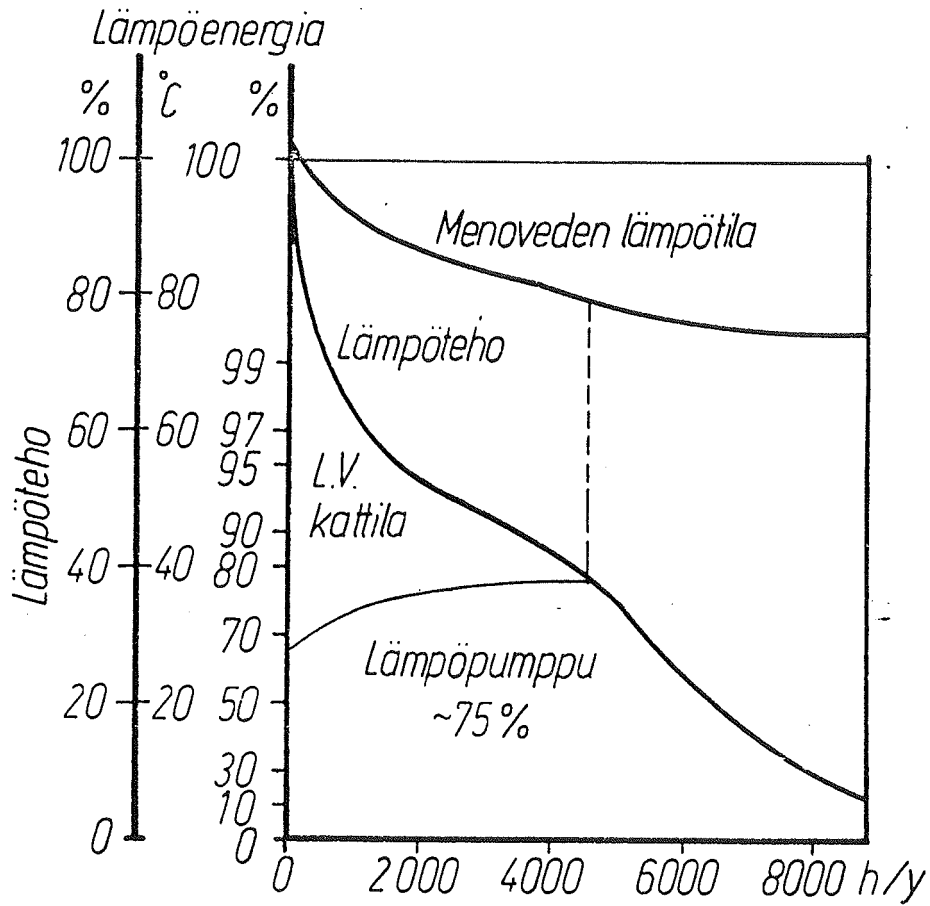
Kiertoainevirran säädön tarkoituksena on ylläpitää tasapainotilaa höyrystimeen menevän ja kompressorin sieltä imemän kiertoaineen välillä siten, että kiertoaine ehtii höyrystyä kokonaisuudessaan. Kiertoainevirran säätöön voidaan käyttää kapillaariputkea, termostaattista- tai paineohjattua painaventtiiliä sekä matala- tai korkeapaineuimuriventtiiliä.

Lämpöpumpun lämpötehon säätäminen suoritetaan säätämällä lauhduttimeen virtaavaa kiertoainevirtaa siten, että lauhduttimesta lähtevän kiertoainevirran lämpötila pysyy halutussa arvossa.

Kun lämmitysteho on pieni - 20-30 % nimellistehosta - voidaan käyttää ns. by pass -kytkentää, jolla taataan kompressorin toiminnalle välttämätön tilavuusvirta. Tällöin kompressorin painepuolelta palautetaan paineenalennusventtiilin kautta kiertoainehöyryä imupuolelle, jolloin kompressorin lähti virtaa vakio-tilavuus-

virta, mutta lauhduttimen ja höyrystimen kautta virtaa vain haluttu kylmäainevirta.

Erilaisin varo- ja lisälaittein taataan lämpöpumpun häiriötön toiminta ja estetään vakavien vaurioiden syntyminen vikatilanteissa.



Kuva 5. Lämpöpumpun teho- ja energiaosuudet

3. LÄMMÖNLÄHTEET

Lämmönlähteellä ja sen ominaisuuksilla on ratkaiseva merkitys arvioitaessa mahdollisuuksia käyttää lämpöpumppuprosessia lämmöntuotantoon ja etenkin sen kannattavuutta, sillä lämpökerroin riippuu olennaisesti höyrystymis- ja lauhtumislämpötiloista.

Periaatteessa lämmönlähteenä voidaan käyttää mitä tahansa riittävän lämpömäärän omaavaa kohdetta. Lähinnä kysymykseen tulevat kuitenkin vesistöt, pohjavesi, maaperä, ulkoilma, aurinkoenergia sekä jätelämpö eri muodoissaan.

3.1 Edullisen lämmönlähteen ominaisuudet

Edulliselta lämmönlähteeltä vaaditaan mm. seuraavia ominaisuuksia /5/:

- lämmönlähteen lämpötilan pitäisi olla koko lämmityskauden ajan riittävän korkea, jotta saavutettaisiin hyvä lämpökerroin
- lämmönlähteen tulisi olla lähellä käyttöpaikkaa, jotta ylimääräisiltä kuljetuskustannuksilta välttyttäisiin. Järjestelmän tehollista lämpökerrointa määritettäessä on huomioitava pumppaukseen ja puhallukseen kuluva energia.
- lämmönlähteen lämmön talteenotto ei saisi aiheuttaa suuria lisäkustannuksia erilaisten rakennelmien ja lisälaitteiden vuoksi
- lämmönlähteellä ei saisi olla haitallisia, esim. likaavia tai syövyttäviä, vaikutuksia.

3.2 Vesistöt

Pintavesiä, jokia ja järviä, pidetään usein edullisina lämmönlähteinä. Näiden käytössä esiintyy kuitenkin hankaluuksia. Suomessa vesistöjen lämpötila vaihtelee vuodenajan mukaan ollen talvikautena, jolloin lämmitystehon tarve on suurin, vain muutaman asteen jäätymispisteen yläpuolella. Lisäksi lämpötilajakauma saattaa vaihdella vuosittain huomattavastikin riippuen sääolosuhteista edellisenä syksynä.

Vettä voidaan jäähdyttää vain muutaman asteen ja jäätymisvaara on siltikin lähellä. Täten veden pumppaamista höyrystimen läpi ei voida pitää riittävän varmatoimisena ratkaisuna. Lisäksi pieni lämpötilaero johtaa suuriin vesimääriin ja pumppaustehon tarve voi olla huomattava, koska vesi joudutaan myös palauttamaan riittävän kauaksi ottokohdasta.

Toinen mahdollisuus vesistöjen lämmön hyväksikäytössä on asentaa höyrystinputket suoraan veteen. Tällöin vältetään jäätymisvaaralta, joskin lämpökerroin huononee hiukan. Putken pintaan mahdollisesti kertyvä jää aiheuttaa nosteen, joten putki on ankuroitava painoilla.

3.3 Maaperä

Maaperällä lämmönlähteenä tarkoitetaan tässä pintakerroksia, joiden lämpö on peräisin auringosta. Maaperän lämpöä voidaan hyödyntää joko vaakasuoraan tai pystysuoraan maahan sijoitetuilla putkilla.

Vaakasuoran putkiston sijoitusyvyydelle voidaan löytää edullisin arvo perustuen siihen, että mitä syvemmälle putkisto sijoitetaan sitä enemmän on lämpöä käytettävissä, mutta sitä kauemmin kestää myös maan lämpeneminen uudelleen. Mittauksissa ja laskelmissa on todettu, että alueella 0,7...1,5 m sijoitusyvyydellä ei ole kuitenkaan kovin suurta merkitystä, mikäli pituusteho on pieni.

Putkien keskinäinen etäisyys tulisi olla vähintään 1,5 m. Tällöin ei vielä ole vaaraa maaperän vähittäisestä jäätymisestä, vaikkakin roudan syvyys putkiston kohdalla lisääntyy hieman.

Maasta otetun keskitehon suuruus ja siten putkipituus riippuu maalajista, sen kosteudesta ja sijaintipaikasta. Yläraja otettavalle keskiteholle on 8...10 W/m /6/. Pysyviä ekologisia haittoja ei ole havaittavissa, jos keskiteho pidetään kohtuullisena. Mikäli putkisto mitoitetaan käyttäen liian suurta keskitehoa, on seurauksena jäätyneen maakerroksen kasvaminen niin suureksi, ettei se ehdi sulaa ennen seuraavaa lämmityskautta.

Pystyputkien käytön etuna verrattuna vaakaputkistoon on pienempi tilantarve ja periaatteessa pienemmät vaatimukset lämmönlähteenä käytettävän maaperän suhteen. Pystyputkisovellutuksissa maahan porataan 10...15 m syviä reikiä, joihin asennetaan kaksi sisäkkäistä putkea: sisemmässä putkessa liuos virtaa maahan ja poistuu ulommassa putkessa.

Pystyputkien käyttöä tutkittaessa on todettu, että saatava teho on pienempi kuin vaakaputkistoa käytettäessä. Siten pystyputkisto vaatii irtomaalajeissa liian pitkiä putkistoja ollakseen kilpailukykyinen. Kallion lämmönjohtavuus on suuri ja lisäksi siihen on helppo porata reikiä, joten sitä voidaan pitää irtomaalajeja edullisempänä pystyputkien sijoituskohteena.

3.4 Maalämpö ja pohjavedet

Maaperän lämpöä voidaan välillisesti hyödyntää käyttämällä lämmönlähteenä pohjavettä. Riittävän syvältä otettavan veden lämpötila on lähes vakio ympäri vuoden vaihdellen yleensä 5...8 °C välillä. Vesi voidaan jäähdyttää noin 2 °C:een ilman jäätymisvaaraa. Siten käytettävissä oleva lämpötilaero on melko vaatimaton.

Pohjavettä lämmönlähteenä käytettäessä tarvitaan varsinaisen pohjavesikaivon lisäksi erillinen laskukaivo, jonka kautta vesi johdetaan takaisin maaperään. Kaivon kustannukset saattavat olla huomattavat, mikäli maapohja on huonosti läpäisevää. Siten pohjaveden käyttömahdollisuudet ja kannattavuus riippuvat paikallisista olosuhteista.

3.5 Muut lämmönlähteet

Muita mahdollisia lämmönlähteitä ovat ulkoilma, suora aurinkoenergia ja jätelämpö.

Ulkoilma

Ulkoilman etuina mainittakoon sijainti lähellä käyttöpaikkaa sekä käytön vähäiset vaikutukset ympäristöön. Suurin haitta on lämpötilojen voimakas vaihtelu ja alhaisimmat lämpötilat lämmitys-

tarpeen huipun aikana. Siksi lämpöpumppua ei kannatakaan mitoittaa huippulämpöteholle, vaan alhaisimpien ulkolämpötilojen aikana käytetään lisälämmitystä. Näin saavutetaan parempi keskimääräinen lämpökerroin.

Aurinkoenergia

Kaikkien edellä esitettyjen lämmönlähteiden lo. maalämpöä lämpösisältö on peräisin kokonaisuudessaan auringosta. Paras hyötysuhde saavutetaan kuitenkin hyödyntämällä auringon säteilyenergiaa suoraan säteilyn kerääjässä nostamaan jonkin väliaineen lämpötilaa. Haittana on samoin kuin vesistöjä, maaperää ja ulkoilmaa käytettäessä alhaisin energiataso silloin, kun lämmöntarve on huipussaan. Ongelma voidaan osittain ratkaista käyttämällä energian varastointia ilmaan, maaperään tai veteen.

Jätelämpö

Jätelämmöllä tarkoitetaan hukkalämpöä, joka poistuu käyttökohteesta niin alhaisessa lämpötilassa, ettei sitä voida yleensä hyödyntää suoraan lämmönvaihtimissa ilman lämpöpumppua. Jätelämmön lähteitä on lukuisia, mm. poistoilma, jätevedet ja savukaasut.

Verrattaessa lämpöpumpun poistoilmasta antamaa lämpöä suoraan lämmöntalteenottoon ja ottamalla huomioon sähkön ja lämmön hintasuhte havaitaan, että lämpökertoimen pitäisi olla hyvin korkea, jotta lämpöpumppuratkaisu olisi edullisempi kuin suora lämmöntalteenotto. Mikäli sähkön ja lämmön hintasuhte on yli kahden, eivät vaadittavat lämpökertoimet ole enää saavutettavissa /6/.

Savukaasujen sisältämän lämmön hyväksikäyttöä rajoittavat mm. paloturvallisuusseikat sekä korroosiovaikeudet. Lisäksi lämmönlähde on usein liian etäällä käyttökohteesta.

Jätevesiä on hyvinkin erilaisia, kun tarkastellaan niiden lämpötilaa, virtaamia sekä epäpuhtauksia. Ihanteellisena lämmönlähteenä voidaan pitää jätevettä, jonka lämpötila on 20...30 °C koko lämmityskauden ajan ja jonka likaamis- ja korroosio-ominaisuudet eivät vaikeuta sen käyttöä. Lisäksi virtaaman tulisi olla suhteellisen tasainen. Asuntojen jätevedet eivät useinkaan täytä edellä esitettyjä vaatimuksia edes tyydyttävästi, mutta teollisuuden pii-

ristä löytynee kuitenkin taloudellisestikin kiinnostavia sovellutuskohteita.

4. LÄMPÖPUMPPU LÄMMITYSKÄYTÖSSÄ

Ensimmäiset käytännön lämpöpumppujärjestelmät on toteutettu 1900-luvun alkupuolella. Tämän jälkeen tekniset ratkaisut ovat kehittyneet ja monipuolistuneet. Erityisesti Yhdysvalloissa lämpöpumppusovellutukset olivat suhteellisen yleisiä jo 1950-luvulla. Halvan öljyn myötä laitteiden käyttö kuitenkin väheni.

Koko maailmaa 1970-luvun alkupuolella kohdanneen energiakriisin seurauksena alettiin voimakkaasti tutkia erilaisia vaihtoehtoisia energian käyttömuotoja, joilla voitaisiin korvata korkean jalostusasteen omaavia fossiilisia polttoaineita. Eri vaihtoehtoista lämpöpumppu on ollut yksi lupaavimmista.

Lämpöpumppuprosessi poikkeaa huomattavasti perinteisistä lämmitystavoista ja se on rakenteeltaankin vielä melko monimutkainen. Useissa eri maissa suoritetaan tutkimuksia luotettavien tietojen saamiseksi lämpöpumpun toiminnasta todellisissa käyttöolosuhteissa.

Uuden lämmitystavan käyttökelpoisuuden kriteerinä ovat toimintavarmuus sekä taloudellisuus. Lämpöpumppusovellutuksella onkin lukuisia kilpailijoita sekä pientalo- että alue- ja kaukolämmityksen piirissä.

4.1 Pientalolämmitys

Pientalolämmitys on yleisin lämpöpumppusovellutus Suomessa. Asennettuja laitoksia lienee useita tuhansia, joista osa on tehdasvalmisteisia standardilaitteistoja ja osa koottuja yksilöratkaisuja.

Lämmönlähteinä pientalolämpöpumpuissa käytetään yleisimmin maaperää, vesistöjä tai ulkoilmaa. Lämpöpumppuratkaisu eroaa perinteisistä lämmitysjärjestelmistä, koska siitä saatava lämpöteho riippuu ympäristön lämpötilasta. Maalämpöpumpulla olosuhteet ovat

syksyllä edulliset, mutta höyrystimen lämpötila laskee kevättä kohti. Ulkoilmaa lämmönlähteenä käyttävän lämpöpumpun lämpöteho pienenee ulkolämpötilan laskiessa; samalla tarvittava lämpöteho kuitenkin kasvaa. Lämpöpumppua ei kannata mitoitaa pak-kashuippujen mukaan, vaan käytetään esim. yhdistettyä lämpöpumppua ja sähkölämmitystä. Tällöin lämpöpumppu voidaan mitoitaa esim. siten, että ulkolämpötilan ollessa -5°C se vielä kattaa lämmitystehontarpeen, mutta kovemmilla pakkasilla käytetään lisälämmitystä. Ulkoilmaa lämmönlähteinä käyttävissä lämpöpumpuissa teho pienenee ja lämpökerroin huononee nopeasti lämpötilan laskiessa, joten kaikkein alhaisimpien ulkolämpötilojen aikana kannattaa käyttää ainoastaan lisälämmitystä.

Lämpöpumppulämmitys joutuu kilpailemaan pientaloissa useiden muiden lämmitysvaihtoehtojen kanssa, joita ovat mm. perinteiset öljy- ja sähkölämmitys sekä viime aikoina yleistyneet kotimaisia polttoaineita käyttävät lämmitysjärjestelmät. Imatran Voima Oy:n ja 55 jakelusähkölaitoksen vuosina 1978-83 suorittaman pientalojen lämmitystapatutkimuksen mukaan maalämpöpumpun hyödyntäminen uudisomakotitalon lämmitykseen on osoittautunut taloudellisesti vaikeasti perusteltavaksi. Käyttökohde on kokonaistalouden kannalta liian pieni energiankuluttaja, jotta laitteiston vaatima lisäinvestointi saataisiin kohtuullisessa ajassa kuoletetuksi, vaikkakin maalämpöpumppujärjestelmä on käyttökustannuksiltaan edullisin lämmitysvaihtoehto. Asunnon poistoilman hyödyntäminen lämpöpumpun lämmönlähteenä on kannattavampi vaihtoehto, koska hankintakustannukset ovat maalämpöpumppujärjestelmään verrattuna huomattavasti pienemmät. /10/

4.2 Kauko- ja aluelämmitys

Suomi on edelläkävijämaita kauko- ja aluelämmityksen alalla. Rakennuskannastamme jo noin neljännes on liitetty alue- tai kaukolämpöverkkoihin. Tämä keskitetty lämmitysmuoto yleistyneet tulevaisuudessakin.

Viime vuosien energian hintojen kehityksen myötä myös lämpöpumppu on tullut taloudellisesti kilpailukykyiseksi kauko- ja aluelämmöntuotannossa. Tähän on vaikuttanut etenkin se, että sähkön hinnan nousu on tapahtunut huomattavasti hitaammin kuin tavanomaisten keskitettyyn lämmöntuotantoon käytettyjen polttoaineiden.

4.2.1 Lämpöpumpun käyttömahdollisuudet alue- ja kaukolämmitysjärjestelmissä

Suurteholämpöpumput nojautuvat perustekniikaltaan tunnettuihin ratkaisuihin, joten periaatteelliset edellytykset niiden kaukolämmityskäytölle ovat olemassa. Lämmönlähteinä kauko- ja aluelämmitysjärjestelmien lämpöpumput voisivat käyttää vesistöjä ja teollisuuden sekä yhdyskuntien jätelämpöä. Sen sijaan kiinteistökohteisissa ratkaisuissa yleisimmät lämmönlähteet maaperä ja ulkoilma eivät tule kyseeseen näin suuren teholuokan lämpöpumpuissa.

Lämpöpumppuihin liittyy läheisesti lämmön varastointitekniikka, jonka avulla voidaan tasoittaa epätasaista jätelämpövirtaa tai kerätä talteen lämmityskauden ulkopuolella saatavaa lämpöä. Suurimittainen varastointi on toistaiseksi ollut kannattavaa vain erityistapauksissa. Tulevaisuudessa saattaa aurinkolämmön hyväksikäyttö olla mahdollista myös aluelämmitysjärjestelmissä, mikäli lämmön varastointiongelmien pystytään ratkaisemaan taloudellisesti kannattavalla tavalla.

Koska lämmönlähde ei aina sijaitse käyttökohteen välittömässä läheisyydessä, voi tarvittavalla lämmönsiirtolinjalla olla ratkaiseva merkitys arvioitaessa järjestelmän kannattavuutta. Lämpöpumppu voidaan sijoittaa lämmönlähteen yhteyteen, jolloin lämmönsiirto tapahtuu korkealämpötilaisena perinteistä kaukolämmityksen kaksiputkijärjestelmää käyttäen. Tällöin myös siirtolinjan varrella on mahdollisuus käyttää kaukolämpöä. Toinen lämpöpumpun sijoitusvaihtoehto on kulutuspuolelta läheisyys, jolloin lämmönlähteenä oleva vesi siirretään matalalämpötilaisena. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa lämpöhäviöt ovat alhaisemman lämpötilatason vuoksi pienemmät, mutta siirrettävät vesimäärät ovat suurempia kuin korkealämpötilasiirrossa.

Kaukolämpöjärjestelmät on suuressa osassa Suomea mitoitettu 120/70 °C lämpötilojen mukaan. Kehitteillä on kuitenkin myös nk. matalalämpötilaisia jakeluverkkoja (esim. 80/50 °C). Tällaiset järjestelmät olisivat lämpöpumpun toimintaedellytykset huomioon ottaen huomattavasti edullisempia.

Aluelämpöjärjestelmän lämpöpumppua ei ole tarkoituksenmukaista mitoittaa huipputehontarpeelle lämpöpumppukoneistojen ominaisuuksien ja säätörajoitusten vuoksi. Edullisempaa on käyttää läm-

pöpumppua vain perusenergian tuotantoon. Tällöin huipputehon aikaisesta lisälämmöntarpeesta ja tehonsäädöstä huolehditaan esim. lämpöpumpun yhteyteen rakennetun kuumavesikattilan avulla. Lisälämmöntuotantoon ja tehonsäätöön voidaan käyttää myös verkostoon aiemmin liitettyjä lämpökeskuksia. Optimaalisesti mitoitettulla lämpöpumpulla kaukolämpövesi kannattaa lämmittää esim. 80 °C:een, jolloin lämpöpumpun kapasiteetti on 30-40 % huippulämmitystarpeesta ja se kattaa 70-80 % vuotuisesta lämmitysenergiasta.

4.2.2 Kokemuksia toteutuneista lämpöpumppulaitoksista

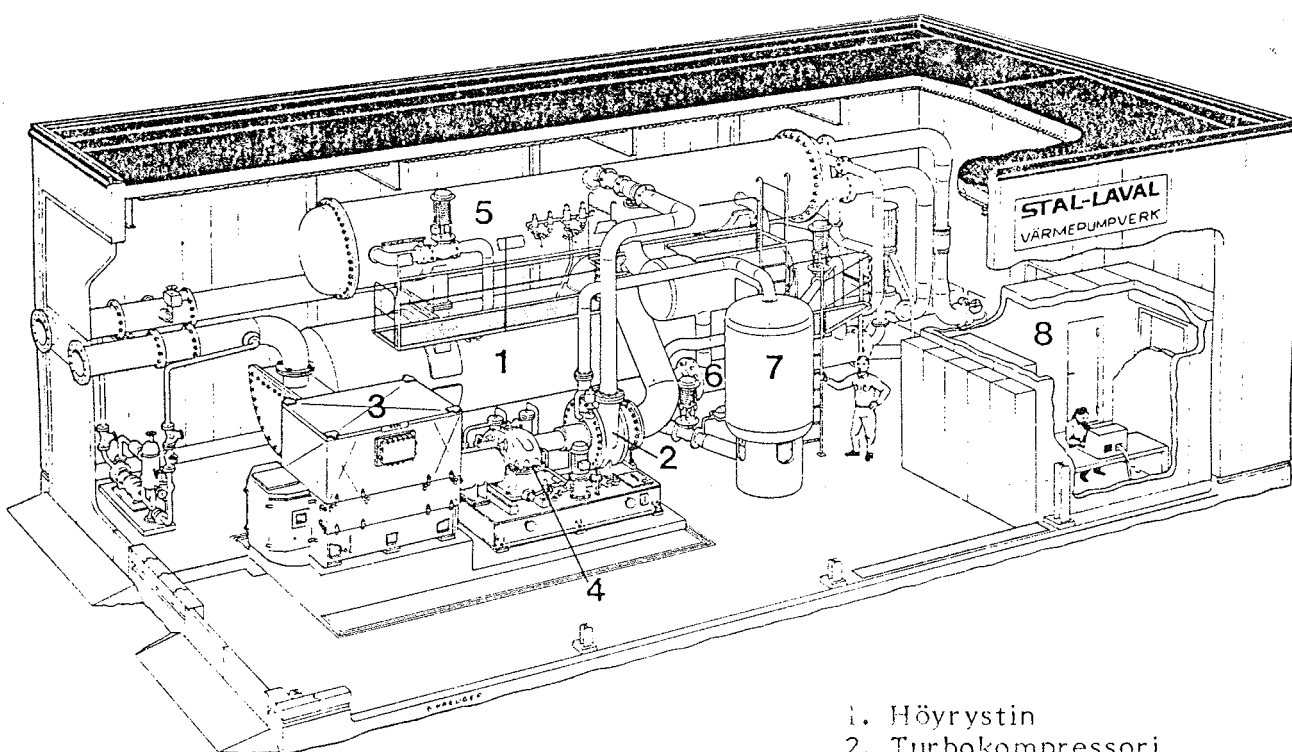
Suomessa ei juurikaan ole käyttökokemuksia alue- tai kaukolämmityskäytössä olevista lämpöpumpuista. Ensimmäinen järjestelmä on asennettu Maarianhaminaan vuoden 1982 lopulla. Lämpöpumppu käyttää lämmönlähteenä merivettä ja tuottaa 1,5-2 MW hyötylämpöä kaukolämpöverkkoon, jonka huipputehontarve on 10 MW.

Imatran Voima Oy on tilannut Uuteenkaupunkiin lämpöpumppulaitoksen, jonka lämpöteho on 7 MW. Laitteisto otetaan kaupalliseen käyttöön huhtikuussa 1985. Lämmönlähteenä käytetään meri- ja jätevettä. Lämpöpumpulla huolehditaan yhdessä 10 MW sähkökattilan kanssa Uudenkaupungin kaukolämmöntuotannosta. /11/

Imatran Voima Oy rakentaa Forssaan pohjaveden lämpöä käyttävän lämpöpumppulaitoksen. Hanke on lajissaan ensimmäinen Suomessa ja sen vuoksi ensisijaisesti tutkimus- ja kehitysprojekti. Lämpöpumppu ei tule korvaamaan aluetta tällä hetkellä lämmitävää 1,5 MW tehoista raskasöljylaitosta kokonaan, vaan molemmat järjestelmät vastaavat yhdessä lämmöntuotannosta. Lämpöpumppu mitoitetaan nk. kolmasosasäännön mukaan: pumpun lämpöteho on yksi kolmasosa huipputehosta ja sillä tuotetaan kaksi kolmasosaa vuosittaisesta energiasta. Hankkeen kannattavuutta rajoittaa pohjaveden alhainen lämpötila. Projektista saatavien käyttökokemusten ja ilmenevien kehittämisenäkökohtien perusteella arvioidaan lämmöntuotantotavan tulevat mahdollisuudet. /12/

Lisäksi on tehty tutkimuksia lämpöpumpun käyttömahdollisuuksista mm. Jämsän ja Hämeenlinnan kaukolämmön tuotannossa, mutta nykyisillä energiahinnoilla järjestelmät eivät ole osoittautuneet kannattaviksi. /7/, /17/

Naapurimaassamme Ruotsissa on kaukolämmityskäytössä lukuisia suuria lämpöpumppulaitoksia, joista ensimmäiset on otettu käyttöön vuonna 1982. Lisäksi useita yksiköitä on toimitettavana. Laitokset ovat kooltaan 5...40 MW. Lämmönlähteenä käytetään järvi- ja merivettä sekä teollisuuden ja yhdyskuntien puhdistettuja jätevesiä. Laitokset ovat yleensä standardimallisia, tehdasvalmisteisia yksiköitä, jotka toimitetaan avaimet käteen -periaatteella, kuva 6. Laitokset ovat automaattikkansa vuoksi miehitämättömiä ja niitä kauko-ohjataan energialaitoksen keskusvalvomosta. Tähänastiset käyttökokemukset ovat olleet hyvät ja laskennalliset tehokertoimet ja lämmitystekot on saavutettu.



1. Höyrystin
2. Turbokompressor
3. Sähkömoottori
4. Vaihte
5. Lauhdutin
6. Lauhteenjäähdytin
7. Paineentasausastia
8. Valvontahuone

Kuva 6. ASEA STAL'n standardilämpöpumpputjärjestelmä

5. KAUKOLÄMMITYS OUTOKUMMUSSA

Outokummun kaupungille on laadittu vuonna 1980 keskitetyn lämpöhuollon yleissuunnitelma, jonka tavoitteena on

- saada Outokummun kaupungin keskusta-alue keskitetyn lämpöhuollon piiriin
- yhdistää eri kaupunginosissa jo nykyisin toimivat alue-lämpöyhtiöt saman kaukolämpöverkon piiriin
- saada hankituksi lämpöä ko. kaukolämpöverkkoon mahdollisimman edullisesti.

5.1 Keskitetyn energiahuollon nykytilanne

Kaupungin alueella toimii nykyisin neljä aluelämpöyhtiötä: Outokummun Lämpö Oy, Kaasilan Lämpö Oy, Outokumpu Oy ja Outokummun Seudun Teollisuuskylä Oy.

Aluelämpöyhtiöt toimittavat lämpöä eri alueille seuraavasti:

- Outokummun Lämpö Oy toimittaa lämmön kaupungin keskustan alueelle
- Kaasilan Lämpö Oy toimittaa lämmön Kaasilan ja Pohjois-ahon alueille
- Outokumpu Oy toimittaa lämmön Kyykerin alueen teollisuusrakennuksiinsa ja eräisiin alueen asuinkiinteistöihin
- Outokummun Seudun Teollisuuskylä Oy toimittaa lämmön Turulan teollisuuskylän alueelle.

Kaukolämmön jakeluverkoston runkojohtojen yhteispituus tällä hetkellä on noin 7,8 km, liite I. Tulevaisuudessa verkosto laajenee lähinnä keskustan ja teollisuuskylän alueilla. Kaukolämmön piiriin ei kustannusnäkökohtien vuoksi liitetä kauempana keskustasta sijaitsevia uusia kuluttajia, vaan pyrkimyksenä on ensi sijaisesti eri kaupunginosissa toimivien aluelämpöyhtiöiden saaminen saman runkoverkon piiriin.

Nykyisen verkoston lämmöntuotanto hoidetaan raskasöljykäyttöisillä lämpökeskuksilla, joiden kattilatehot ovat 1,1...3,8 MW. Lämpökeskuksia on kaikkiaan 6 kpl. Lämpökeskusten sijainti on esitetty liitteessä I, josta ilmenee myös kaukolämpöverkoston runkojohdot.

Vuoden 1983 lopussa Outokummussa oli eri aluelämpöyhtiöiden piirissä yhteensä 181 kaukolämmön kuluttajaa ja lämmitettävää tilavuutta noin 800 000 m³. Kuluttajamäärät ja lämmitettävät tilavuudet on esitetty yhtiökohtaisesti taulukossa 1.

ALUELÄMPÖYHTIÖ	KULUTTAJAT	TILAVUUS
KAASILAN LÄMPÖ OY		
Kaasila	28	84738
Pohjois-aho	15	66000
	43	150738
OUTOKUMPU OY		
Asuinrakennukset	12	25220
Teollisuusrakennukset	6	33350
	18	58570
OUTOKUMMUN LÄMPÖ OY	100	375000
OUTOKUMMUN SEUDUN TEOLLISUUSKYLÄ OY	20	200000
Yhteensä	181	784308

Taulukko 1. Kuluttajat ja lämmitettävät tilavuudet aluelämpöyhtiöittäin

Vuonna 1983 aluelämpölaitosten huipputeho oli yhteensä 20 MW huipunkäyttöajan ollessa 2000 h/a. Kaukolämpöteho noudattaa liitteen II mukaista pysyvyyskäyrää.

Outokummun kaukolämpöverkosto on pääosiltaan mitoitettu lämpötilatasoilla 120/70 °C poikkeuksena uusimmat alajakokeskukset, joiden mitoitustilapötilat ovat 115/55 °C. Liitteessä III on esitetty järjestelmän suosituksen mukaiset meno- ja paluuvien lämpötilat ulkolämpötilan funktiona. Verkostoa mitoitettaessa huipputehona on käytetty 30 MW, jota ei luultavasti kuitenkaan kos-

kaan saavuteta. Kasvuennusteen mukaan kaukolämmöntarve vakiintuu vuoteen 1990 mennessä, jolloin tarvittava huipputeho on noin 23 MW. Ylimitoituksesta johtuen voidaan verkostoon ajaa suurempia massavirtoja matalammalla lämpötilatasolla lämpöhäviöiden pienentämiseksi. Siten alhaisimpienkaan ulkolämpötilojen aikana menoveden lämpötila ei ylitä 110 °C.

5.2 Kaukolämmön kasvuennuste

Liitteessä IV esitetty aluelämpöyhtiöiden kaukolämpötehon ja -energian kasvuennusteet, jotka on pyritty laatimaan mahdollisimman optimaalisesti ylimitoitusta välttäten. Vuoden 1983 arvot ovat toteutuneet.

Kasvuennuste alueittain on seuraavanlainen:

- Kaasilan asuntoalue on kokonaan rakennettu, joten siellä tarvittava teho on vakiintunut.
- Turulan teollisuuskylässä vuotuiseksi kasvuksi on arvioitu 100 kW, mikä vastaa pienehkön teollisuushallin kulutusta.
- Keskustan alueella vuosittaiseksi kasvuksi on arvioitu 200...500 kW, mikä perustuu osittain jo tehtyihin tehovarauksiin. Kasvu koostuu pääosin liiketaloista ja julkisista rakennuksista, sillä asuinkiinteistöjen osalta tilanne on lähes vakiintunut.
- Kyvkerin alueella tilanne on tällä hetkellä muuttumaton. Lämmitettävästä tilavuudesta hieman yli puolet on teollisuustilaa, joka tulevaisuudessa luultavasti ainakin osittain jää käyttämättömäksi.

Kasvuennusteen mukainen tasapainotila saavutetaan todennäköisesti vuoteen 1990 mennessä, jolloin huipputeho on 23 MW ja vuosittainen energian myynti 46 GWh. Kasvun pysähtyminen johtuu Outokummun elinkeinorakenteesta. Kaupunki on paljolti riippuvainen Outokumpu Oy:n toiminnasta paikkakunnalla. Kaivostöiminnan loppuessa Keretin kaivoksessa teollisuustoiminta ja -työpaikat vähenevät, koska korvaavaa suurteollisuutta tuskin saadaan paikkakunnalle. Tämän vuoksi kaukolämmön tarpeen kasvu on ennalta rajoitettua ja 1990-luvulla tilanne voidaan olettaa vakiintuneeksi.

6. LÄMPÖPUMPPUSOVELLUTUS OUTOKUMMUN LÄMMITYSVAIHTOEHTONA

6.1 Outokumpu Oy

Suomen suurimman vuoriteollisuusyrityksen Outokumpu Oy:n lähtökohtana on vuonna 1908 Pohjois-Karjalasta Rääkkylän Kivisalmesta ruoppaustöiden yhteydessä löydetty malmilohkare. Lohkareen pohjalta aloitetut geologiset tutkimukset johtivat kaksi vuotta myöhemmin Outokummun kuparimalmiesiintymän löytymiseen. Myöhemmin esiintymä osoittautui erääksi Euroopan rikkaimmista ja aina 1940-luvulle asti Outokumpu Oy:n toiminta rakentui tämän esiintymän varaan.

Outokumpu Oy:llä on ollut vuosina 1913-82 toiminnassa 21 kaivosta, joista on louhittu yli 100 miljoonaa tonnia malmia. Outokummun kaivos oli 1940-luvulle saakka yhtiön ainut kaivos.

Useat nykyisistä kaivoksista on louhittu loppuun 1990-luvulle tultaessa. Toiminnassa olevien kaivosten jäljellä olevat malmivarat olivat vuonna 1982 noin 160 miljoonaa tonnia. Malminetsintää on kuitenkin viime vuosina tehostettu ja maamme malminetsintäorganisaatiolla on tutkittavana useita kiinnostavia esiintymiä. Vaikka uusia hyödyntämiskelpoisia malmioita löydettäisiinkin, tulee kaivostoiminta supistumaan ainakin tilapäisesti tämän vuosikymmenen lopulla.

6.2 Lämpöpumpun lämmönlähde Outokummussa

Outokummun kaupunki on syntynyt ja kasvanut Outokumpu Oy:n omistaman Keretin kaivoksen ympärille. Kaivos tuottaa ensisijaisesti kupari-, koboltti- ja sinkkirikasteita. Tämän hetkisten arvioiden mukaan kaivoksen louhinta päättyy vuonna 1992 malmivarojen ehtymisen vuoksi.

Louhinnan päätyttyä kaivos täyttyy vedellä. Täyttyminen kestää arviolta 5...10 vuotta. Kaivoksen ollessa toiminnassa sinne joudutaan pumppaamaan mm. poraus- ja jäähdytysvesiä. Lisäksi kaivokseen kerääntyy pohjavettä, jonka osuus koko vesimäärästä on noin kolmannes. Luonnonmukaista täyttymistä voidaan jouduttaa, mikäli kaivokseen louhinnan loputtuakin pumpataan kiintiöi-

den mukainen vesimäärä. Todellisen täyttymisajan määrittäminen on kuitenkin mahdotonta, koska se riippuu mm. pohjavesitilanteesta ja esimerkiksi kaivoksen vuotoja ympäröivään maaperään ei voida tarkasti arvioida ennalta. Kaivoksen täytyttyä voidaan louhostiloista saatavaa maalämpöä hyödyntää pohjaveden välityksellä lämpöpumppprosessissa.

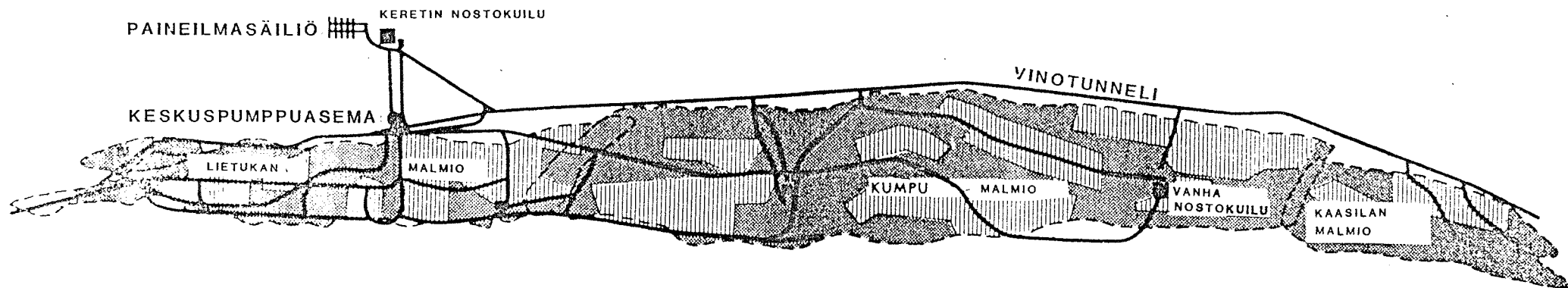
Kaivoksessa vedellä täyttyvä tila on arviolta kokonaistilavuudeltaan noin 3 Mm^3 , mistä putkimaista tunneli- ja peräverkostoa on noin 1 Mm^3 . Maan pinnalta johtaa päähoitotasolle +320 m keskimäärin 8° kaltevuuskulmassa vinotunneli, joka on poikkipinta-alaltaan noin 22 m^2 . Vinotunnelista haaroittuvaa peräverkostoa on louhostiloissa useita kymmeniä kilometrejä. Perien keskimääräinen poikkipinta-ala on $15...16 \text{ m}^2$.

Louhostiloissa lämmönsiirtopintaa on siis käytettävissä lähes rajattomasti. Joitakin tiloja joudutaan kuitenkin eristämään, jotta vesi kiertäisi kaivoksessa mahdollisimman laajalla alueella ja näin tehollinen lämmönsiirtopinta saadaan mahdollisimman suureksi. Lisäksi voidaan joitakin louhostiloja joutua sulkemaan kaivosteknillisistä syistä lähinnä sortumavaaran ja täytemateriaalien liejuuntumisvaaran vuoksi.

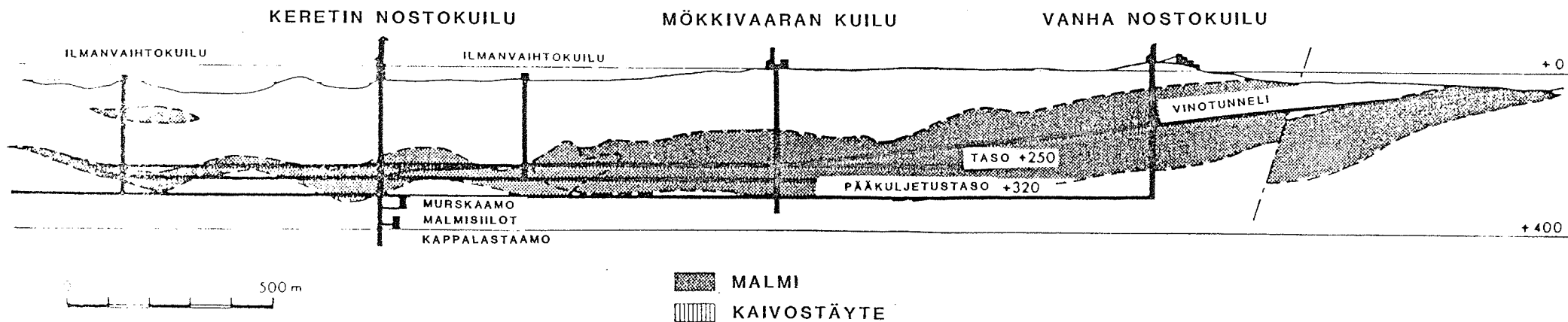
6.2.1 Veden kierto louhostiloissa

Kuvassa 7 on esitetty yksinkertaistetut projektiot kaivoksesta. Pohjaveden pinta tulee kaivoksen täytyttyä asettumaan luultavasti tasolle +30...40 m vaihdellen hieman vuosittain vesitilanteesta riippuen. Vesi pumpataan vanhasta kaivoskuilusta lyhyttä vinotunnelia, 'Koiranrataa' pitkin maan pinnalle ja johdetaan lämpökeskukseen sijoitettuun lämpöpumppulaitokseen. Kaivosvesipumppu kannattaa sijoittaa kuiluun siten, että imukorkeus on mahdollisimman pieni, jolloin kyseeseen tulee lähinnä kelluva, lautan päälle rakennettu ratkaisu. Veden lämpösisällöstä osa hyödynnetään lämpöpumppukoneiston höyrystimessä. Tämän jälkeen jäähtynyt vesi palautetaan vinotunnelia pitkin takaisin kaivokseen, jossa se uudelleen lämpenee.

VAAKATASOPROJEKTIO



PYSTYPROJEKTIO



KUVA 7. OUTOKUMPU OY KERETIN KAIVOS

Veden tiheys pienenee lämpötilan kohotessa, joten lämpimämpi vesi nousee tiheyseron vaikutuksesta ylöspäin. Veden tiheys on suurimmillaan $+3,98^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Tämän anomaalisen ominaisuutensa vuoksi vettä ei voida jäähdyttää höyrystimessä alle $+4^{\circ}\text{C}$. Täten on tarkoitus taata veden mahdollisimman häiriötön virtaus louhostiloissa.

6.2.2 Veden ominaisuudet

Lämpötila

Riittävän syvältä otettavan pohjaveden lämpötila on lähes vakio ympäri vuoden vaihdellen yleensä $5...8^{\circ}\text{C}$ välillä. Lämpöpumpun prosessia simuloitaessa kaivoksesta pumpattavan veden alkulämpötilana on käytetty 8°C .

Luotettavien tietojen saamiseksi veden lämpötilasta olisi mahdollista mittaamalla selvittää lämpötilajakauma jo täyttyneissä, vertailukelpoisissa kaivoksissa, esimerkiksi Ylöjärvellä, Aijalassa, Korsnäsissa tai Metsämontussa. Mikäli lämpöpumppu osoittautuu tutkimuksessa realistiseksi lämmöntuotantovaihtoehdoksi, on ennen lopullista päätöksentekoa syytä selvittää Keretin kaivosveden todellinen lämpötila, koska sillä on ratkaiseva merkitys prosessin tehokerrointa ja siten myös kannattavuutta arvioitaessa.

Kemialliset ominaisuudet

Keretin kaivoksen kallioperän kemialliset ja mineralogiset koostumukset poikkeavat merkittävästi maamme kallioperän keskiarvokoostumuksista. Louhitun malmin rikkipitoisuus on noin 25 %. Geologisen tutkimuskeskuksen ottamien vesinäytteiden perusteella rautapitoisuus kaivosvedessä on 220 mg/l ja sulfaattipitoisuus 4400 mg/l. Veden pH-luku on 3,0...4,0 /20/. Näillä ominaisuuksilla on huomattava merkitys laitteiston materiaalikysymyksiä ratkaistaessa.

6.3 Lämmöntarve

Kaukolämpöjärjestelmissä tuotettu lämpö kuluu rakennusten lämmittämiseen, lämpimän käyttöveden valmistukseen ja verkoston lämpöhäviöihin. Yksittäisen kuluttajan lämpötehon tarve ja vuosiergia riippuvat kuluttajatyypistä. Kuluttajat voidaan ryhmitellä esimerkiksi seuraavasti /15/:

- pientalot
- rivitalot
- kerrostalot
- teollisuusrakennukset
- liikerakennukset
- toimistot, virastot
- koulut.

Kunkin kuluttajatyypin kohdalla kulutustasoon vaikuttaa millä tavalla ja kuinka pitkiä aikoja vuorokaudessa ja viikossa rakennus on käytössä. Lisäksi kulutustasoa arvioitaessa on otettava huomioon ilmastolliset tekijät, rakennuksen tekninen toteutustapa, kunto ja ikä sekä asuinkiinteistöjen osalta myös asukkaiden kulutustotumukset.

Lämmöntarve vaihtelee vuoden- ja vuorokaudenaikojen mukaan. Kesällä lämpöä kuluu lähinnä vain lämpimän käyttöveden valmistukseen ja verkostohäviöihin, talvella rakennusten lämmittäminen muodostaa suurimman osan lämmöntarpeesta. Yöllä lämmöntarve on pienempi kuin päivisin, koska lämpimän käyttöveden tarve on silloin huomattavasti pienempi.

Lämpökeskusten käytön tehokkuutta kuvaava keskimääräinen huipunkäyttöaika vaihtelee Suomessa välillä 2700...3200 h/a riippuen lähinnä verkoston kuluttajarakenteesta ja järjestelmän laajuudesta.

Outokummussa eri aluelämpöyhtiöiden huipunkäyttöajat vaihtelevat välillä 1750...3200 h/a. Suurimmat arvot ovat asuntoalueilla ja alhaisimmat teollisuuskylässä. Aluelämpöyhtiöiden tuottaman kokonaisenergian ja niiden yhteisen huipputehon avulla laskettu, koko Outokummun alueen kaukolämpötehon huipunkäyttöaika on vain noin 2000 h/a. Lämmöntarpeen pysyvyyskäyrä noudattaa liitteen II mukaista käyrää.

Outokummussa kaukolämmitystoiminta on vielä varsin hajanaista. Neljässä eri aluelämpöyhtiössä kaukolämpöä tuotetaan useissa lämpökeskuksissa. Lähinnä kustannussyistä lämpökeskuksiin ei ole asennettu tarvittavia mittauslaitteita kaukolämpötehon tuntikeskiarvojen määrittämiseksi. Lämpökeskuksissa kirjataan päivittäin ainoastaan kaukolämpöverkoston meno- ja paluuveden lämpötilat, verkoston vedenkulutus vuotojen havaitsemiseksi sekä lämpökeskusten sähkönkulutus. Polttoaineen kulutus kirjataan kerran viikossa.

Simuloinnissa lämpökuorman päivittäisen vaihtelun vaikutuksen arvioimiseksi lämpöpumppulaitoksen toimintaan on käytetty suomalaisittain normaalin kaukolämpöverkoston keskitehon tuntivaihtelutiedostoa, joka on huipputeholtaan ja huipunkäyttöajaltaan sovitettu Outokummun olosuhteita vastaavaksi. Lisäksi on otettu huomioon maantieteellisestä sijainnista aiheutuvat lämmitysenergian kulutuksen erot astepäiväluvun avulla.

Astepäivälukukorjausta ei ole kuitenkaan tehty sataprosenttisesti. Oulu-Joensuu-linjalla lämmönkulutus on tutkimusten mukaan vain noin 10 % suurempi kuin Etelä-Suomessa. Pääkaupunkiseudun kulutukset ovat jopa jonkin verran suurempia kuin esim. Tampereen kulutukset, vaikka astepäiväluvun mukainen korjaus edellyttäisi 4 % pienempiä kulutusarvoja. /15/

6.4 Lämpöpumppukoneiston sijoitus

Kaukolämpöverkostot on Suomessa yleisimmin mitoitettu lämpötilatasojen 120/70 °C mukaan. Nykyisellä lämpöpumpputekniikalla ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista eikä taloudellisesti kannattavaa tuottaa verkoston maksimilämpötilan mukaista kaukolämpövettä. Lämpöpumpun korkein tuottolämpötila on käytännössä yleensä noin 80 °C. Lämpöpumppu onkin kytkettävä kaukolämpöverkkoon siten, että veden lämpötilaa pystytään tarvittaessa nostamaan verkostoon liitettyjen muiden lämpökeskusten avulla. Nämä yksiköt toimivat myös tehoa säättävinä laitoksina.

Lämpöpumpun alueellista sijoituspaikkaa ratkaistaessa on lisäksi otettava huomioon mm. seuraavat seikat:

- sähkömoottorikäyttöiselle lämpöpumppulaitokselle pitää olla mahdollista saada keskijännitteinen siirtolinja
- suuriännitepuolen sähkölaitteille on varattava omat tilansa.

Lämpöpumppulaitos on pyrittävä sijoittamaan myös siten, että lämmönlähteenä olevan veden käyttökohteeseen siirtämisestä aiheutuvat kustannukset minimoituvat. Samoin höyrystimestä tulevan veden palauttaminen tulisi tapahtua mahdollisimman edullisesti.

Sähkömoottorikäyttöisissä lämpöpumppulaitoksissa ei esiinny ympäristöhaittoja, joten ne voidaan sijoittaa lämmitettävän yhdyskunnan välittömään läheisyyteen.

ä

—

6.4.1 Lämpöpumppulaitteiston sijoitus Outokummussa

Lämpöpumppulaitteiston edullisin sijoituspaikka Outokummun kaupungissa on Keretin kaivosalueen läheisyydessä sijaitseva vanha lämpökeskus, liitteeseen I merkitty Kyykerin lämpökeskus.

Mikäli laitteisto sijoitetaan Kyykerin lämpökeskukseen, on kaivosveden siirtomatka vanhasta kaivoskuilusta 'Koiranrataa' pitkin noin 500 metriä. Veden siirtoreittinä on valmiiksi avattu tunneli, joten ainoastaan tarvittavat putket ja muut laitteet pitää asentaa paikoilleen.

Myös veden palautus kaivokseen jäähdytyksen jälkeen voidaan järjestää mahdollisimman edullisesti. Tarvittava palautusreikä avataan lämpökeskuksen välittömästä läheisyydestä, koska siitä on suora yhteys vinotunneliin, jota pitkin vesi laskeutuu takaisin louhostiloihin lämmitäkseen uudelleen.

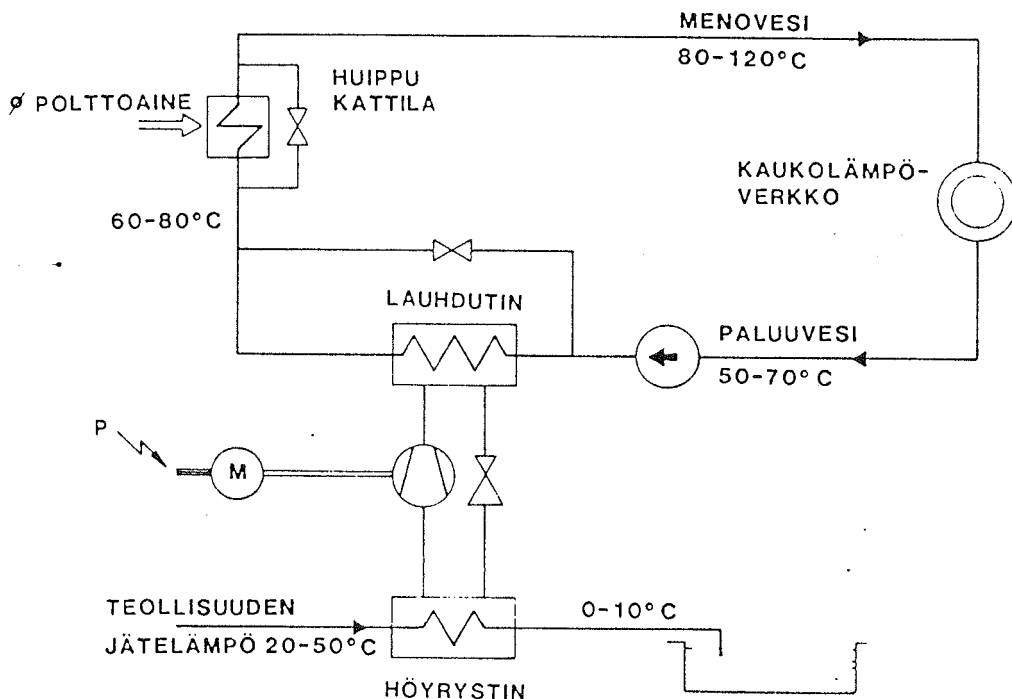
Lämpökeskuksesta on myös riittävän suuritehoinen putkilinja kaukolämpöverkoston muille lämpökeskuksille, joita voidaan käyttää huipputehontarpeen aikana tarvittavan lisälämmön tuotantoon sekä tehonsäätöön.

Mikäli toiminnassa olevia lämpökeskuksia joudutaan uusimaan ennen lämpöpumppujärjestelmän asentamista, tulee uusien laitosten valintaan ja sijoituspaikkaan kiinnittää erityistä huomiota, jotta niitä voitaisiin käyttää mahdollisimman tehokkaasti myös lämpöpumpun yhteydessä.

6.5 Lämpöpumpun periaatekytkennät

Lämpöpumppulaitos voidaan kytkeä kaukolämpöverkkoon kahdella vaihtoehtoisella tavalla: joko sarjaan huippukattilan kanssa tai omaksi yksiköksi kaukolämpöverkoston paluuputkeen erilleen muista lämpökeskuksista.

Kuvassa 8 on esitetty lämpöpumpun ja huippukattilan sarjakytkennän periaatekaavio [7].



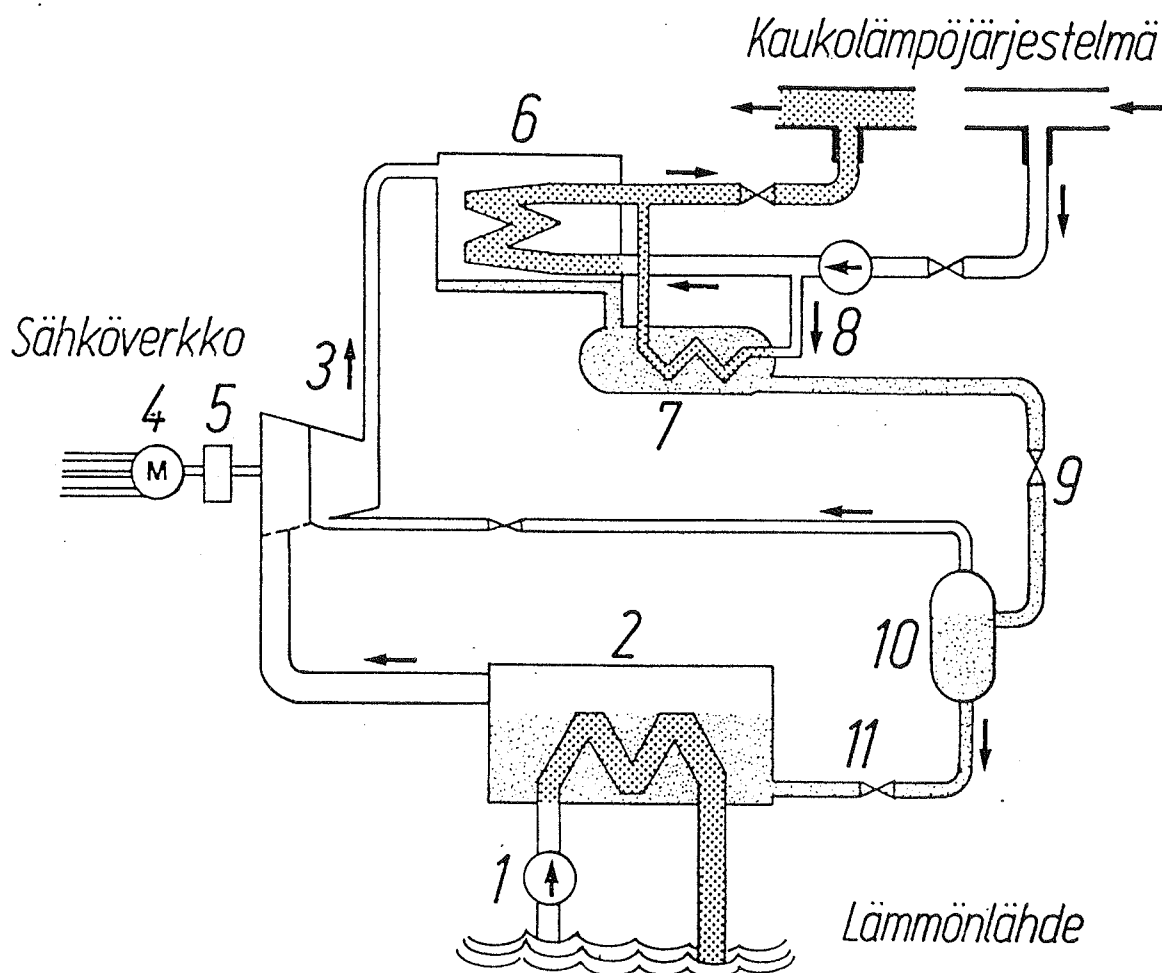
Kuva 8. Lämpöpumpun ja huippukattilan sarjakytkentä

Kytettäessä lämpöpumppu sarjaan huippukattilan kanssa määräytyy tarvittava kattilateho lämpöpumpun toiminta-arvojen mukaan. Mikäli lämpöpumppu mitoitetaan toimimaan ympärivuotises-

ti, kattilan lämpötehon on oltava riittävän suuri, jotta sillä pystytään tuottamaan lämpöpumpun alhaisimman tuottolämpötilan ja huippukuormaa vastaavan lämpötilan erotuksen mukainen lämpömäärä.

Jos lämpöpumpua ei käytetä ympärivuotiseen lämmöntuotantoon esimerkiksi lämmönlähteen lämpötilarajoitusten vuoksi, on verkoston muiden lämpökeskusten kyettävä tuottamaan huippukuormaa vastaava lämpömäärä.

Kuvassa 9 on esitetty lämpöpumpun kytkentä omaksi yksiköksi kaukolämpöverkon paluuputkeen /9/.



Kuva 9. Lämpöpumpun kytkentä paluuputkeen

Lämpöpumppu kohottaa lauhduttimen läpi johdettavan kaukolämpöverkoston paluuveden lämpötilaa lämmitystehonsa mukaisesti. Verkostoon liitettyjen muiden lämpökeskusten avulla kohotetaan kaukolämpöveden lämpötila haluttuun arvoonsa ja huolehditaan tehonsäädöstä.

Kytettäessä lämpöpumppu kaukolämpöverkoston paluujohtoon pitää laitteiston sijoituspaikan olla sellainen, että sieltä voidaan johtaa verkoston muille lämpökeskuksille palaava riittävän suuritehoinen putkilinja.

Paluujohtokytkeä on sovellettu laajasti Ruotsissa toiminnassa olevissa laitoksissa.

6.6 Outokummun kaukolämmöntuotantoon tarjotut laitteistot

Mahdollisimman yksityiskohtaisten teknisten tietojen saamiseksi lämpöpumpusta ja etenkin sen toiminnasta aluelämmitysjärjestelmän lämmöntuotannossa, lähetettiin kolmelle lämpöpumppuvalmistajalle/maahantuojalle pro forma-tarjouspyyntö.

Valmistajilta pyydettiin tekniset tiedot Outokummun kaupungin kaukolämmitysjärjestelmän peruslämmöntuotantoon soveltuvasta lämpötehoaltaan 5 MW lämpöpumppulaitteistosta täydellisine sähkö-, mittaus- ja säätölaitteineen. Valmistajia pyydettiin ottamaan huomioon erityisesti kaivosveden kemialliset ominaisuudet ja lämpötila höyrystinkonstruktiota valittaessa. Lisäksi pyydettiin arviot laitteistojen käytettävyydestä, vikatiheydestä ja huollontarpeesta sekä lämpöpumppulaitteistojen viimeaikaisesta hintakehityksestä.

Kannattavuusvertailua varten valmistajilta pyydettiin hintatiedot 'avaimet käteen'-periaatteella toimitettavasta täydellisestä lämpöpumppulaitteistosta.

Tiukan tutkimusaikataulun vuoksi päätettiin ottaa yhteyttä sellaisiin laitetoimittajiin, joilta tarvittavat tiedot saataisiin kotimaasta joko suoraan laitteiston valmistajalta tai maahantuojan välityksellä.

Valituista kolmesta laitetoimittajasta ainoastaan yhdeltä saatiin tarjouspyyntöön myönteinen vastaus.

Yhdellä laitevalmistajista on kehitteillä täysin uudentyyppinen höyrystin, joka soveltuu hyvin likaiselle ja syövyttävälle vedelle. Kehitystyönsä tässä vaiheessa laitevalmistaja ei pitänyt tarjouksenmukaisena tarjota laitosta aiemmin käyttämällään konventionaalisella ripaputkiratkaisulla, vaan toivoi tarjouspyynnön uudistamista uuden höyrystinkonstruktion valmistuttua.

Toinen laitetoimittaja ei myöskään katsonut tuotevalikoimansa sisältävän riittävän kehittyneitä laitteita, jotka soveltuisivat käytettäväksi Outokummun kaukolämmöntuotannossa.

Koska ainoastaan yhdeltä laitevalmistajalta saatiin pyydetty tiedot, ei laitteistojen keskinäistä vertailua voitu suorittaa. Tarjotun laitteiston avulla oli mahdollista kuitenkin tutkia lämpöpumpun periaatteellista soveltuvuutta Outokummun erityisolosuhteisiin.

6.6.1 Tarjotun laitteiston tekniset tiedot

Outokumpuun tarjotun laitteiston nimellislämpöteho on 5 MW, mutta sillä saavutettava maksimilämpöteho on 7 MW. Laitevalmistajan ilmoittamassa toimintapisteessä lämpöteho on 6,9 MW ja lämpökerroin 3,1. Laitteiston lämpötehoa voidaan säätää alueella 30...100 % maksimitehosta.

Laitteistossa on 2-vaiheinen turbokompressor. Kompressor on varustettu by pass-kytkentälaitteilla, mikä mahdollistaa lämpöpumpun toiminnan myös pienillä osakuormilla.

Kompressorin käyttömoottorina on oikosulkumoottori, jonka nimellisteho on 2300 kW, käyttöjännite 6 kV, nimellisvirta 240 A ja käynnistysvirta noin 1200 A.

Höyrystin on putki/lämmönvaihdin, jossa kylmäaine virtaa vaipapuolella ja vesi putkissa.

Lauhdutin on myös putki/vaippalämmönvaihdin, jossa kylmäaine virtaa vaippapuolella ja kaukolämpövesi putkissa. Sekä höyrystin- että lauhdutinkonstruktioissa on pyritty käyttämään suhteellisen suuria lämmönsiirtopinta-aloja, jotta kompressorin tehontarve pienenisi.

Prosessin kylmäaine on R12-pohjainen.

Prosessia ohjataan optimaalisesti mikrotietokoneella. Laitteisto kirjoittaa raportit halutuin väliajoin ja lisäksi kaikki prosessissa tapahtuvat muutokset rekisteröidään. Näin laitoksen toiminnan tarkka seuraaminen on mahdollista, vaikka laitos ei olekaan miehitetty.

Laitteisto toimii siten, että prosessista saadaan maksimaalinen teho, kunnes jokin seuraavista rajoitteista ylittyy:

- lämmönlähteenä olevan veden jäähdytyslämpötila tulee liian alhaiseksi
- kaukolämpöveden menolämpötila on liian korkea
- moottorivirta ylittyy
- pumpun rajoitteet ylittyvät.

Jos jokin edellä mainituista rajoitteista ylitetään, prosessia säädetään kompressorikapasiteettia vähentämällä johtosiipisäädön avulla.

Mikäli haluttu lämpökerroin saavutetaan, voidaan myös lauhdutinteholle asettaa tavoitearvo.

6.6.2 Laitteiston hintatiedot

Laitteiston hinta sisältää asennuspaikalle toimitetun täydellisen, käyttövalmiin laitteiston rakennuksineen ja tarvittavine apujärjestelmineen, joita ovat mm. pienjännitekojeisto ja prosessin ohjauksessa tarvittava tietokonelaitteisto.

Valmistajan ilmoittama hinta laitteistolle on 4,034 Mmk, mikäli tilaus olisi tapahtunut viimeistään lokakuussa 1984. Hinta on muutettu Suomen markkoiksi 15.10.1984 voimassa olleen vaihtokurssin mukaan.

Kiinteiden käyttökustannusten määrittämiseksi laitevalmistajalta pyydettiin arvio vuotuisesta huollontarpeesta sekä huolto- ja korjauskustannuksista. Valmistajan ilmoituksen mukaan huoltokustannukset ovat vuosittain noin 2 % investointikustannuksista.

Koska laitos on täysautomaattinen ja kauko-ohjattu, varsinaista käyttöhenkilökuntaa ei tarvita. Häiriöttömän toiminnan varmistamiseksi suoritetaan laitoksessa ainoastaan tarkastuskäynti kerran päivässä. Vain vuosihuollon aikana tarvitaan huolto- ja korjaushenkilökuntaa.

6.6.3 Muut kustannukset

Kaivosveden pumppaamisesta aiheutuvia kustannuksia arvioitaessa on otettu huomioon seuraavat kustannuserät:

- kaivosvesipumppu
- tarvittava siirtoputkisto (NP16, NS350, siirtomatkan pituus noin 500 m)
- asennuskustannukset, jotka muodostuvat pumpun ja putkiston asennuksesta, pumpun huollossa käytettävistä nostolaitteista sekä lautasta, jonka päälle pumppu sijoitetaan.

Kaivosveden pumppaamisesta aiheutuvat investointikustannukset ovat kokonaisuudessaan arviolta noin 500000 mk.

Jotta kaivoksesta pumpattu vesi voitaisiin myös palauttaa takaisin jäähdytyksen jälkeen, porataan lämpökeskuksen läheisyydestä reikä vinotunneliin. Palautusreiän investointikustannukset ovat arviolta 500000 mk.

Kaivoksessa joudutaan mm. täytemateriaalien liejuuntumisvaaran vuoksi eristämään louhostiloja betonipadoin veden virtausreistä. Myös tehollisen lämmönsiirtopinta-alan maksimoimiseksi jouduttaneen eristämään joitakin tiloja. Lisäksi joissakin louhostiloissa saatetaan tarvita putkituksia. Näiden kaivosteknillisten töiden kokonaiskustannuksiksi on ennalta arvioitu 1000000 mk.

Koska sähkön hankinta tapahtuu 20 kV suurjännitetariffilla, tarvitaan lisäksi sähkölaitteita, mm. suurjännitepuolen kytkinlaitteet ja muuntaja. Sähkölaitteiden investointikustannukset ovat yhteensä noin 300000 mk.

6.7 Kallioperän hyödyntäminen energiahuollossa

Nykyisen käsityksen mukaan noin 80 % maankuoren lämmöstä muodostuu kallioperässä olevan uraanin, toriumin ja kaliumin radioaktiivisten isotooppien hajoamisen tuloksena. Tämän vuoksi maankuoressa lämpötila kohoaa syvyyden kasvaessa ja lämpöä johtuu jatkuvasti pintakerrokseen päin. Kallion pintakerrokseen lämpöä varastoituu lisäksi auringon säteilylämmöstä. Lämmön johtuminen kallioon tapahtuu hitaasti, vuorokautiset lämpötilavaihtelut vaikuttavat vain noin metrin syvyydelle ja vuodenaikojen lämpötilavaihtelut voidaan havaita korkeintaan 20 metrin syvyydellä ja sielläkin vasta pitkän ajan, jopa kuukausien kuluttua. /13/

Suomessa lämpötila kallion pintakerroksissa on jokseenkin tasainen vaihdellen välillä $+4...+7^{\circ}\text{C}$ ja keskimääräinen lämpötilagradientti on $12,6^{\circ}\text{C/km}$. Lämpötilagradientista johtuva keskimääräinen lämpövirta on $0,06 \text{ W/m}^2$ /13/.

Kallioperän lämpöä ja kallion lämpötekniisiä ominaisuuksia voidaan hyödyntää lämmitysjärjestelmissä joko ottamalla lämpöä kalliosta tai varastoimalla sitä kallioon. Menetelmiä, jotka hyödyntävät maahan, kallioon tai veteen luonnollisella tavalla varastoitunutta lämpöä, kutsutaan passiivisiksi menetelmiksi tai maalämpömenetelmiksi. Vastaavasti menetelmiä, jotka varastoivat lämpöä korkeissa lämpötiloissa rajoitettuun tilaan tietyllä syvyydelle maanpinnan alle, kutsutaan aktiivisiksi menetelmiksi tai lämmön varastointimenetelmiksi.

Outokummussa maaperän lämmön hyödyntämisellä tarkoitetaan mahdollisuutta käyttää kalliossa olevia kaivoksen louhostiloja lämpöpumpun lämmönlähteenä veden välityksellä. Lämpö siirtyy kalliosta louhostiloihin johtumalla sekä kallion raoissa ja ruhjeissa tapahtuvan pohjavesivirtauksen välityksellä tietyllä lämpötilaerolla louhostilojen ja kallion välillä. Louhostiloista lämpö siirretään vesikiertojärjestelmän avulla lämpöpumpun höyrystimeen.

Ennen kuin tasapainotila saavutetaan, lämpö tulee louhostilojen läheisyydestä. Kallion lämpötilan laskiessa louhostilojen ympärillä lämpö johtuu yhä kauempana sijaitsevista kalliopartikkeleista. Kun tasapainotila on saavutettu, on louhostiloja ympäröivän kallion lämpötila hieman alhaisempi kuin ennen lämpöpumpun prosessin käyttöönottoa.

7. LÄMPÖPUMPUN SIMULOINTIMALLI

Laitevalmistajat ilmoittavat yleensä tarjouksissaan lämpöpumpputeiden lämpötehon ja tehokertoimen vain yhdessä toimintapisteessä, nk. nimellistilassa. Koko toiminta-alueen arvot ovat vaikeasti saatavissa.

Käytännössä aluelämpöjärjestelmän lämpöpumppu toimii kuitenkin vain harvoin nimellistilassa, sillä yleensä sekä lämmönlähteen että lämpökuorman lämpötilat vaihtelevat vuoden- ja vuorokaudenaikojen mukaan: kaukolämmön tehontarpeen tuntivaihtelut saattavat olla huomattavan suuria. Lisäksi Suomessa kaukolämpöjärjestelmät ovat virtaussäädettyjä.

Todenmukaisen kuvan saamiseksi lämpöpumpun toiminnasta Outokummun kaukolämpöjärjestelmässä suunniteltiin liitteen V mukaisen kykennän simulointimalli. Simuloinnin avulla selvitettiin Outokumpuun tarjotun laitteiston toiminta vuorokausittain ja erityisesti vuosienenergiaosuus sekä keskimääräinen vuotuinen tehokerroin kannattavuusvertailua varten. Lisäksi tutkittiin erilaisten tehoosuuksien ja lauhtumislämpötilojen vaikutuksia tehokertoimeen ja energiaosuuteen.

7.1 Matemaattinen malli

Lämpöpumpun simulointimallin avulla haluttiin selvittää lähinnä teho- ja energiajako lämpöpumpun ja muiden verkostoon liitettyjen lämpökeskusten välillä.

Lämpöpumppukoneiston toimintaa ja vuorovaikutusta muun kaukolämpöjärjestelmän kanssa kuvattiin mallissa teoreettisilla, matemaattisilla yhtälöillä komponenttitasoiseen käsittelyyn puuttumatta. Perusyhtälöt on esitetty luvussa 2.

Lämpöpumpun todellista lämpökerrointa laskettaessa käytettiin ideaalisuuskertoimena lähteessä 7 esitetyn yhtälön avulla saatavaa kerrointa. Erään laitevalmistajan lämpötehoaan 5 MW lämpöpumppulaitteiston suoritusarvoista on laskettu hyötysuhdearvot, joiden pohjalta on sovitettu käyrä. Ko. käyrä on antanut korrelaatiokertoimen arvoksi jopa 97 % eräälle, Outokumpuun tarjotua laitteistoa vastaavalle lämpöpumpulle koko sallitulla toiminta-alueella.

Ideaalisuuskerrointa kuvaavan logaritmikäyrän yhtälö on lähteen 7 mukaan:

$$\eta_{\text{tot}}(\%) = 39,96 + 7,49 \cdot \ln(\Delta T_{\text{IN}} - 40) \quad , \quad (7)$$

missä ΔT_{IN} = lämpöpumpun sisäinen lämpötilaero
 $= T_{\text{lauhdutus}} - T_{\text{höyrystys}}$

Carnot-tehokerroin saatiin kaavan 4 avulla määrittämällä ensin kylmäainepuolen lämpötilat toimintaolosuhteissa. Prosessin todellinen tehokerroin on ideaalisuuskertoimen ja Carnot-tehokertoimen tulo:

$$\mu_D = \eta_{\text{tot}} \mu_C \quad (8)$$

Myös kaukolämpöjärjestelmän muut osat (kattilalaitos, lämpökuorma) kuvattiin simuloinnissa niiden toimintaa kuvaavilla matemaattisilla yhtälöillä.

Lämpökuorman mallina käytettiin simuloinnissa meno- ja paluuveden suosituksen mukaisia lämpötiloja kuvaavien suorien yhtälöitä (liite VII) sekä tiedostoja, joihin oli tallennettu ulkoilman lämpötilan ja lämmöntarpeen vuorokausikeskitehon vaihtelut vuoden ajalta.

Lämmönlähteen lämpötila on suunnilleen vakio ympäri vuoden eikä se riipu esimerkiksi ulkolämpötilasta. Mallissa kaivoksesta pumpattavan veden alkulämpötilana oli 8 °C.

Liitteessä VI on esitetty simuloinnissa käytetyn tietokoneohjelman yksinkertaistettu periaatekaavio.

7.2 Lämpöpumpun toiminnan simulointi

Lämpöpumpun toiminnan simuloinnin avulla pyrittiin selvittämään sen tuottama vuosienenergia sekä keskimääräinen vuotuinen tehokerroin tietyillä alkuarvoilla.

Simuloinnissa laskelmat suoritettiin Outokumpuun tarjotulla laitteistolla, jonka maksimilämpöteho oli 7 MW vastaten noin 30 % kasvuennusteen mukaisesta huipputehosta. Lisäksi laskelmia suo-

ritettiin vertailun vuoksi vastaavilla koneistoilla, joiden lämpötehot olisivat 4, 5 ja 6 MW vastaten 17, 22 ja 26 % verkoston huipputehosta.

Lämpöpumpun höyrystyslämpötila oli laskelmissa vakio, koska lämmönlähteenä olevan kaivosveden lämpötila oletettiin vakioksi. Jäähdytys ja höyrystimen asteisuus huomioiden höyrystyslämpötilana käytettiin $1,9^{\circ}\text{C}$.

Lauhtumislämpötilan vaikutusta tehokertoimeen ja vuosienenergiaosuuteen seurattiin suorittamalla laskelmat 7 MW koneistolle lauh- tumislämpötilan vaihdellessa välillä $79\ldots 90^{\circ}\text{C}$. Myös lämpötehol- taan pienemmille koneistoille suoritettiin laskelmat lauh- tumislämpötilan ollessa 80, 85 ja 90°C .

7.3 Simulointitulokset

Lämpöteholtaan 4, 5, 6 ja 7 MW lämpöpumppujen tuottamat vuosienenergiaosuudet ja vuotuiset keskimääräiset tehokertoimet sekä laitteiston huipunkäyttöajat on esitetty liitteissä VIII ja IX. Simulointiohjelmassa peruslaskelmissa lauh- tumislämpötila iteroitiin välillä $75\ldots 82^{\circ}\text{C}$ siten, että tehonjako lämpöpumpun ja muiden lämpökeskusten välillä oli optimaalinen.

Tuloksista havaitaan, että 7 ja 6 MW lämpöpumpuilla vuosienenergiaosuus on lähes samansuuruinen, yli 70 %. Jo 5 MW lämpöpum- pulla, joka teho-osuudeltaan vastaa vain noin 22 %, pystyttäisiin tuottamaan yli 68 % vuotuisesta energiantarpeesta. Lämpötehol- taan 4 MW lämpöpumpulla energiaosuus on jo selvästi pienempi, alle 60 %.

Vaikka 7 MW lämpöpumppu on mitoitettu vain 30 % teho-osuu- delle, on se kuitenkin lämpöteholtaan liian suuri Outokumpuun. Koska korkein lauh- tumislämpötila on vain 82°C ja kaukolämpö- verkoston kiertoveden massavirrat verraten pieniä, ei lauhdutti- men lämmönsiirtokapasiteetti ole tehokkaassa käytössä. Lämpö- pumppu toimii siis useimmiten vajaalla teholla, mikä näkyy lait- teiston alhaisena huipunkäyttöaikana.

Vuotuisissa keskimääräisissä tehokertoimissa ei lämpöpumppujen välillä ole suurta eroa: lämpöteholtaan pienimmän laitteiston tehokerroin on 3,05 ja suurimman 2,97. Tehokerroin huononee teho-osuuden kasvaessa, koska suuremmilla laitteistoilla saavutetaan korkeampi lauhtumislämpötila. Carnot-tehokerroin huononee lämpöpumpun sisäisen lämpötilaeron kasvaessa, mikä vaikuttaa edelleen huonontavasti todellisen tehokertoimeen. Huipunkäyttäjät sen sijaan vaihtelevat voimakkaasti teho-osuuden muuttuessa: lämpöteholtaan 7 MW laitteistolla huipunkäyttöaika on vain 4850 h/a, kun 4 MW laitteistolla saavutettaisiin huomattavasti pitempi huipunkäyttöaika 6900 h/a.

Koska lämpöpumpun hankintahinta on korkea, pitäisi vuotuisen käyttöajan olla pitkä. Myös lämpöpumpun käytön tehokkuutta kuvaavan huipunkäyttöajan tulisi olla mahdollisimman pitkä.

Simulointitulosten perusteella Outokummun olosuhteisiin parhaiten soveltuisi lämpöteholtaan noin 5 MW laitteisto, jolloin saavutettaisiin lämmönlähteen suhteellisen alhainen lämpötila huomioonottaen hyvä tehokerroin, riittävän suuri vuosienenergiaosuus sekä pitkä huipunkäyttöaika. Sen sijaan laitevalmistajan tarjoama lämpöteholtaan 7 MW laitteisto ei lämpöteknisenä sovellutuksena ole paras mahdollinen.

Liitteissä X, XI, XII ja XIII on esitetty korkeimman mahdollisen lauhtumislämpötilan vaikutus lämpöpumppujen vuosienenergiaosuuksiin ja tehokertoimiin.

4 ja 5 MW laitteistoilla lauhtumislämpötilan muutoksen vaikutus on vähäinen: lauhtumislämpötilan suurentuessa tehokerroin huononee hieman ja energiaosuus kasvaa korkeintaan muutaman prosentin. 7 MW laitteistolla tehokerroin huononee noin 4 %, mutta vuosienenergiaosuus suurenee huomattavasti lauhtumislämpötilan suurentuessa 79 °C:sta 90 °C:een.

8. KANNATTAVUUSVERTAILU

Lämpöpumppujärjestelmän kannattavuutta on arvioitu käyttäen vertailukohteina lämpökeskuksia, joissa lämpö tuotettaisiin joko turpeella tai raskaalla polttoöljyllä.

Kannattavuusvertailussa on selvitetty lämpöpumpun osalta ainoastaan lämpötehoaan 7 MW laitteiston kilpailukyky, koska vain siitä oli käytettävissä valmistajan ilmoittamat hintatiedot.

8.1 Kannattavuusvertailun lähtötiedot

8.1.1 Investointikustannukset ja vuotuiset kiinteät käyttö-kustannukset

Lämpöpumppujärjestelmä

Lämpöpumppulaitoksen investointikustannukset sisältävät käyttövalmiin laitteiston rakennuksineen sekä tarvittavine sähkö-, säätö-, mittaus- ja apujärjestelmineen. Valmistajan tarjouksessaan ilmoittamat investointikustannukset ovat 4,034 Mmk.

Lämpöpumppujärjestelmän käyttöönotosta aiheutuvina muina investointikustannuksina on otettu huomioon

- kaivosveden pumppaamisesta aiheutuvat investointikustannukset,
- kaivosveden kaivokseen palauttamisesta aiheutuvat investointikustannukset ja
- tarvittavien sähkölaitteiden investointikustannukset.

Näiden kustannusten määrät on eritelty luvussa 6.6.3. Kokonaisuudessaan ne ovat 2,3 Mmk.

Kiinteät vuotuiset käyttökustannukset muodostuvat seuraavasti:

- huolto- ja korjauskustannukset ovat valmistajan ilmoituksen mukaan noin 2 % laitteiston hankintahinnasta
- palkka- ja sosiaalikustannukset ovat 30000 mk vastaten yhtä miestävuotta
- vakuutuskustannukset ovat noin 1 % laitteiston hankintahinnasta.

Turvelämpökeskus

Kannattavuuslaskelmissa vertailukohteena käytettävän turvelämpökeskuksen investointikustannukset on arvioitu lähteessä 19 esitettyjen laskelmien perusteella käyttäen apuna hintaindeksejä.

Lämpöteholtaan 6 MW turvelämpökeskuksen investointikustannukset ovat 10,4 Mmk vastaten noin 1700 mk/kW.

Turvelaitoksen vuotuiset kiinteät käyttökustannukset muodostuvat seuraavasti:

- huolto- ja korjauskustannukset ovat 1,4 % laitoksen hankintahinnasta
- palkka- ja sosiaalikulut ovat 640000 mk vastaten kahdeksaa miestyövuotta
- vakuutuskustannukset ovat noin 1,1 % laitoksen hankintahinnasta.

Raskasöljylämpökeskus

Lämpöpumppujärjestelmää vastaavan raskasöljylämpökeskuksen investointikustannukset on myös saatu lähteessä 19 esitetyistä kustannuslaskelmista hintaindeksejä käyttäen.

Lämpöteholtaan 6 MW kattilalaitoksen investointikustannukset ovat 1,8 Mmk vastaten noin 310 mk/kW.

Raskasöljylaitoksen vuotuiset käyttökustannukset ovat yhteensä 700000 mk.

Kannattavuuslaskelmissa ei ole otettu huomioon lämpökeskuksen kaukolämpöverkostoon liittämistä mahdollisesti aiheutuvia kustannuksia. Myös kaukolämmön pumppaamisesta aiheutuvat investointikustannukset ja kiinteät sekä muuttuvat käyttökustannukset on oletettu jokaisen vaihtoehdon osalta yhtä suuriksi, joten niitä ei ole laskelmissa huomioitu.

Kannattavuuslaskelmissa ei ole myöskään otettu huomioon turve- ja lämpöpumppulaitoksille mahdollisesti myönnettäviä investointiavustuksia kotimaisten polttoaineiden käyttöä edistävinä laitoksina. Avustusten vaikutus lämmön ominaishintaan pääomasidonnaisissa investoinneissa on useita prosentteja.

8.1.2 Muuttuvat käyttökustannukset

Lämmöntuotantokustannuksia määritettäessä on lämpöpumppujärjestelmällä tuotettuna vuotuisena kaukolämpöenergiana käytetty simuloinnissa saatua 33900 MWh/a, missä on otettu huomioon kolme viikkoa kestävä laitteiston huoltojakso heinäkuussa.

Vertailukohteena olevilla lämpökeskuksilla tuotetaan lähes yhtä suuri energiamäärä vuodessa. Sekä turve- että raskasöljylämpökeskuksen lämpöteho on 5 MW ja huipunkäyttöajaksi on laskelmissa oletettu 5500 h/a, jolloin vuotuiseksi kaukolämpöenergiaksi saadaan 33000 MWh.

Koska kaikilla lämpökeskuksilla tuotettu energiamäärä on samansuuruinen, ei huipputehontarpeen aikaista lisälämmöntarvetta ole otettu huomioon, vaan sen on oletettu olevan sama eri vaihtoehtojen välillä. Verkostohäviöiksi on oletettu 6 %.

Lämpöpumppujärjestelmä

Tuotettaessa kaukolämpöä lämpöpumpulla muuttuvat kustannukset muodostuvat

- kompressorin käyttömoottorin tarvitsemasta sähköenergiasta ja
- kaivosveden pumppaukseen kuluvasta sähköenergiasta.

Simuloinnissa saadun vuosien energian ja keskimääräisen tehokertoimen avulla on laskettu kompressorin käyttömoottorin tarvitsema sähköenergia hyötysuhteen ollessa 0,95. Kaivosveden pumppaamiseen kuluva sähköenergia on laskettu pumppauksen kokonaispainepaineen ja kulloinkin tarvittavan vesimäärän mukaan. Pumppauksen kokonaishyötysuhteena on käytetty 0,65.

Outokummun sähkölaitoksen ilmoituksen mukaan lämpöpumppulaitokselle toimitetaan sähköä 20 kV suurjännitetariffilla seuraavin hinnoin:

- tehomaksu 200 mk/kW,a
- kulutusmaksu 0,227 mk/kWh 3500 käyttötuntiin asti ja ylittävältä osin 0,204 mk/kWh
- loistehomaksu 5,5 mk/kVar,kk.

Simuloinnissa on selvitetty kompressorin käyttömoottorin ja kai-
vosveden pumppauksessa tarvittava sähköenergiamäärä. Sen perus-
teella teho- ja kulutusmaksut huomioiden keskimääräiseksi sähkön
hinnaksi saatiin 255 mk/MWh.

Turvelämpökeskus

Turvelaitoksessa tapahtuvan kaukolämmöntuotannon muuttuvat käyt-
tökustannukset muodostuvat

- polttoainekustannuksista,
- syttyssöljynä käytettävän kevyen polttoöljyn hinnasta,
- omakäyttöön kuluvan sähkön hinnasta ja
- muista käyttökustannuksista.

Turpeen hintana on käytetty vuoden 1984 kesällä voimassa ol-
lutta energiahintaa 46 mk/MWh, mikä sisältää perusmaksun lisäksi
siirto- ja kuormauskustannukset suolla sekä 100 km autokulje-
tuksen. Turvelaitoksen vuosihvötysuhteena on käytetty 0,78.

Laskelmissa kevyen polttoöljyn kulutuksena on käytetty lähteessä
19 esitettyä 0,37 l/MWh ja hintana vuoden 1984 kesällä voimassa
ollutta hintaa 1,616 mk/l. Sähkön kulutus on vastaavasti 19 kWh/MWh
ja hinta 0,28 mk/kWh. Muut käyttökustannukset ovat 1,5 mk/MWh.

Raskasöljylaitos

Raskaan polttoöljyn energiahintana on laskelmissa käytetty ke-
sän 1984 hintatason mukaan 100 mk/MWh. Kattilalaitoksen vuosi-
hvötysuhteena on käytetty 0,80.

8.1.3 Muut lähtötiedot

Peruslaskelmissa kaikkien laitosten taloudellisena pitoaikana on
ollut 15 vuotta, vaikka niiden tekninen käyttöikä on yleisesti
ainakin 20 vuotta. Peruslaskentakorkona on käytetty 15 %.

Perustarkastelussa on oletettu sähkön, turpeen ja raskaan polt-
toöljyn energiahintojen pysyvän muuttumattomina.

Vaikka lämpöpumppulaitoksen mahdollinen toteutus ajoittuu vasta 1990-luvulle, on laskelmissa käytetty vuoden 1984 aikana voimassa olleita hintoja. Reaalihintojen muutosten ennustaminen luotettavasti on vaikeaa pitkäköllä tarkasteluajanjaksolla, joten kiinteän perusteen saamiseksi kannattavuusvertailuille on päädytty vuoden 1984 hintatason käyttöön.

8.2 Laskentamenetelmät

Kannattavuuslaskelmissa on perustapauksena tarkasteltu 7 MW lämpöpumppulaitoksen kilpailukykyä turve- ja raskasöljylaitokseen verrattuna.

Peruslaskelmissa on käytetty luvussa 8.1 kullekin lämpölaitokselle esitettyjä laskenta-arvoja, joiden avulla on selvitetty eri vaihtoehtojen lämmöntuotantokustannukset.

Lähtötietoina kannattavuusvertailussa ovat olleet laitoskohtaiset

- investointikustannukset,
- vuotuiset kiinteät käyttökustannukset ja
- vuotuiset muuttuvat käyttökustannukset.

Investointikustannukset on muutettu vastaaviksi vuosikustannuksiksi käyttäen laskentakorkona 15 % ja taloudellisenä pitoaikana 15 vuotta. Annuiteettikerroin on tällöin 0,17102.

Perustarkastelun lisäksi on suoritettu herkkyyssanalyysit seuraavien lämmön hintaan vaikuttavien tekijöiden muutosten analysoimiseksi:

- investointikustannusten muutos välillä -20...+20 % perusinvestoinnista
- laskentakoron muutos välillä 5...25 %
- taloudellisen pitoajan muutos välillä 10...20 vuotta
- tehokertoimen muutos välillä -20...+20 % peruslaskenta-arvosta
- sähkön hinnan muutos välillä 205...285 mk/MWh
- huipunkäyttöajan muutos välillä -20...+20 % peruslaskenta-arvosta.

Turvelaitokselle on lisäksi laskettu lämmön ominaishinnan muutokset turpeen energiahinnan muuttuessa välillä -20..+20 % perushinnasta. Raskasöljylaitokselle on suoritettu vastaavat laskelmat raskaan polttoöljyn hinnan muuttuessa välillä -20...+20 %.

Kannattavuuslaskelmien kolmannessa osassa on selvitetty lämpöpumppu- ja turvelaitoksen takaisinmaksuaika eri laskentakoroilla ja sisäinen korkokanta eri pitoajoilla. Laskelmissa lämmöntuotantokustannukset olivat perustarkastelun mukaiset. Lämmön myynnistä saatavia tuloja määritettäessä käytettiin lämmön myyntihintana 155 mk/MWh.

8.3 Kannattavuusvertailun tulokset

8.3.1 Perustapaus

Peruslaskenta-arvoilla lämpöpumppulaitoksessa ja vertailukohteina olevissa vastaavissa turve- ja raskasöljylaitoksissa tuotetun kaukolämmön ominaishinnat on esitetty taulukossa 2.

Vaihtoehto	Lämpöteho MW	Vuosienergia MWh/a	Vuosikustannukset mk/a	Lämmön om.hinta mk/MWh
Lämpöpumppu	7,0	33900	4880451	143,89
Turvelaitos	5,0	33000	4924253	149,22
POR-laitos	5,0	33000	5145780	155,93

Taulukko 2. Eri vaihtoehtojilla tuotetun lämmön hinta peruslaskenta-arvoilla

Perustapauksessa käytetyillä laskenta-arvoilla lämpöpumppujärjestelmä osoittautui lämmöntuotantokustannuksiltaan edullisimmaksi vaihtoehdoksi. Ero lämmön ominaishinnassa turvelaitokseen verrattuna on 3,7 %. Raskasöljylaitoksella tuotetun lämmön ominaishinta on jo huomattavasti korkeampi ja ero lämpöpumppulaitokseen verrattuna 8,4 %. Lämpöpumppu- ja turvelaitosten edullisuutta raskasöljylaitokseen nähden lisäisi vielä kotimaisia

polttoaineita käyttäville laitoksille myönnettävän investointiavustuksen huomioon ottaminen. Avustus vaikuttaisi kuitenkin myös lämpöpumppu- ja turvelaitosten keskinäiseen edullisuusjärjestykseen. Mikäli investointiavustus olisi vähintään 20 %, olisi turvelaitos lämpöpumppua edullisempi lämmöntuotantovaihtoehto.

Raskasöljylaitoksen huono kilpailukyky johtuu öljyn korkeasta energiahinnasta, millä on suurempi vaikutus lämmön ominaishintaan kuin lämpöpumppu- ja turvelaitosten suhteellisen korkeilla investointikustannuksilla.

8.3.2 Investointikustannusten muutos

Lämpöpumppu- ja turvelaitoksella investointikustannukset ovat huomattavasti suuremmat kuin raskasöljylaitoksella. Siten investointikustannuksissa tapahtuvien muutosten vaikutukset on selvemmin havaittavissa näiden laitosten lämmöntuotantokustannuksissa.

Taulukossa 3 on esitetty eri laitoksilla tuotetun lämmön ominaishinta investointikustannusten muuttuessa -20 % ja +20 % peruslaskentatilanteeseen verrattuna.

Vaihtoehto	Investointikustannus		Lämmön ominaishinta mk/MWh	
	-20 % Mmk	+20 % Mmk		
Lämpöpumppu	5,53	7,14	139,82	147,96
Turvelaitos	8,30	12,45	138,47	159,97
POR-laitos	1,50	2,25	153,99	157,88

Taulukko 3. Investointikustannusten muutoksen vaikutus lämmön ominaishintaan

Investointikustannusten pieneneminen huonontaa lämpöpumppulaitoksen kilpailukykyä turvelaitokseen verrattuna. Mikäli investointikustannukset olisivat 20 % pienemmät kuin perustarkastelussa, olisivat turvelaitoksen lämmöntuotantokustannukset noin 1 % pie-

nemmät kuin lämpöpumppulaitoksen. Sen sijaan investointikustannusten kohoaminen parantaisi lämpöpumpun kannattavuutta. Raskasöljylaitoksen investointikustannukset ovat lämpöpumppu- ja turvelaitosta pienemmät ja muutoksen vaikutus vähäisempi. Kuitenkin 20 % nousu investointikustannuksissa aiheuttaisi turvelaitoksen lämmöntuotantokustannusten kohoamisen suuremmiksi kuin raskasöljylaitoksessa.

Liitteissä XIV, XV ja XVI on esitetty investointikustannusten muutosten vaikutus lämmön ominaishintaan lämpöpumppu-, turve- ja raskasöljylaitoksille.

8.3.3 Laskentakoron muutos

Laskentakorkokannan muutoksen vaikutus lämmön ominaishintaan on suhteellisesti suurempi pääomasidonnaisissa lämpöpumppu- ja turvelaitosinvestoinneissa kuin raskasöljylämpökeskuksessa.

Taulukossa 4 on esitetty eri vaihtoehtoilla tuotetun lämmön hinta korkokannan ollessa 8 % ja 20 %.

Vaihtoehto	Korkokanta %		Lämmön ominaishinta mk/MWh	
Lämpöpumppu	8	20	133,77	151,90
Turvelaitos	8	20	132,19	162,69
POR-laitos	8	20	152,85	158,37

Taulukko 4. Korkokannan muutoksen vaikutus lämmön ominaishintaan

Laskentakoron pienentäminen huonontaa lämpöpumppulaitoksen kilpailukykyä turvelaitokseen verrattuna. 10 % laskentakorkoa käytettäessä lämmöntuotantokustannukset ovat molemmilla vaihtoehtoilla yhtä suuret ja sitä pienemmillä korkokannoilla turvelaitos on lämpöpumppua edullisempi. Laskentakoron suurentaminen huonontaa turvelaitoksen kilpailukykyä molempiin muihin vaihtoehtoihin verrattuna. 20 % korolla raskasöljylaitoskin on turvelaitosta

edullisempi, joskin lämpöpumpun lämmöntuotantokustannukset ovat selvästi alhaisimmat.

Liitteissä XIV, XV ja XVI on esitetty laskentakoron muutoksen vaikutus lämmön ominaishintaan lämpöpumppu-, turve- ja raskasöljylaitoksille.

8.3.4 Pitoajan muutos

Pitoajan muutos vaikuttaa samoin kuin laskentakorkokin annuiteettikertoimeen ja edelleen investointikustannusten osuuteen vuosikustannuksista. Siten muutoksen vaikutus on suhteellisesti suurempi pääomasidonnaisissa investoinneissa.

Taulukossa 5 on esitetty eri vaihtoehtojen lämmöntuotantokustannukset taloudellisen pitoajan ollessa 12 ja 20 vuotta.

Vaihtoehto	Pitoaika a	Lämmön ominaishinta mk/MWh	
Lämpöpumppu	10 20	149,16	141,79
Turvelaitos	10 20	158,10	145,78
POR-laitos	10 20	157,54	155,29

Taulukko 5. Pitoajan muutoksen vaikutus lämmön ominaishintaan

Taloudellisen pitoajan lyhentäminen parantaa edelleen lämpöpumppulaitoksen kannattavuutta turvelaitokseen verrattuna. 10 vuoden takaisinmaksuajalla lämpöpumpun lämmöntuotantokustannukset noin 6 % alhaisemmat kuin turve- ja raskasöljylaitoksen, joiden lämmöntuotantokustannukset ovat lähes yhtä suuret. 20 vuoden takaisinmaksuajalla lämpöpumppulaitos on myös edullisin vaihtoehto, joskin ero turvelaitokseen nähden on pienentynyt perustilanteeseen verrattuna.

Liitteissä XIV, XV ja XVI on esitetty taloudellisen pitoajan muutoksen vaikutus lämmöntuotantokustannuksiin lämpöpumppu-, turve- ja POR-laitoksilla.

8.3.5 Huipunkäyttöajan muutos

Huipunkäyttöajan muutokset vaikuttavat tuotettuun vuosienenergiämäärään sekä edelleen investointikustannusten ja kiinteiden vuosikustannusten osuuteen vuosikustannuksista. Huipunkäyttöajan lyheneminen nostaa lämmöntuotantokustannuksia suhteellisesti sitä enemmän mitä suuremmat järjestelmän kiinteät investointi- ja käyttökustannukset ovat.

Taulukossa 6 on esitetty eri laitoksissa tuotetun lämmön ominaishinta huipunkäyttöajan muutoksen ollessa -20 % ja +20 % peruslaskenta-arvosta.

Vaihtoehto	Huipunkäyttöaika		Lämmön ominaishinta mk/MWh	
	-20 % a	+20 % a		
Lämpöpumppu	3880	5810	157,26	134,98
Turvelaitos	4400	6600	171,78	134,18
POR-laitos	4400	6600	163,67	150,78

Taulukko 6. Huipunkäyttöajan muutoksen vaikutus lämmön ominaishintaan

Lämpölaitoksen käytön tehokkuutta kuvaavan huipunkäyttöajan lyheneminen huonontaa lämpöpumpun ja turvelaitoksen kilpailukykyä. Muutoksen ollessa -20 % peruslaskenta-arvosta lämpöpumpulla tuotetun lämmön ominaishinta on vain 4,0 % pienempi raskasöljylaitoksessa tuotettuun lämpöön verrattuna. Huipunkäyttöajan piteneminen pienentää investointikustannusten osuutta vuosikustannuksista, joten turvelaitoksen kannattavuus paranee muihin vaihtoehtoihin nähden. 20 % pitemmällä huipunkäyttöajalla turvelaitoksen lämmöntuotantokustannukset ovat jo 0,6 % pienemmät kuin lämpöpumppulaitoksen.

Liitteissä XIV, XV ja XVI on esitetty huipunkäyttöajan muutoksen vaikutus lämmöntuotantokustannuksiin eri toteutusvaihtoehdoilla.

8.3.6 Tehokertoimen muutos

Lämmönlähteen ja lämpökuorman lämpötilatasot vaikuttavat voimakkaasti lämpöpumppulaitteiston vuotuisen tehokertoimeen. Muutuvat käyttökustannukset, lähinnä käyttömoottorin sähkökustannukset, riippuvat puolestaan tehokertoimesta.

Liitteessä XIV on esitetty tehokertoimen muutoksen vaikutus lämpöpumpun lämmöntuotantokustannuksiin. Esimerkiksi 5 % paremmalla tehokertoimella lämpöpumpun lämmöntuotantokustannukset olisivat 139,60 mk/MWh. Tuloksista voidaan havaita, että tehokertoimen avulla voidaan vaikuttaa lämmön ominaishintaan voimakkaasti. Jo tehokertoimen muutaman prosentin paraneminen aiheuttaisi lämpöpumpun lämmöntuotantokustannusten putoamisen huomattavasti muita vaihtoehtoja alhaisemmiksi.

Outokummun olosuhteissa tehokerrointa tuskin pystytään kuitenkaan merkittävästi parantamaan, koska lämmönlähteen lämpötila on alhainen. Myöskään lämpöpumpulla tuotetun kaukolämpöveden lämpötilaa ja edelleen lauhtumislämpötilaa ei kannata alentaa, koska silloin lämpöpumppu toimisi lähes koko ajan vajaalla teholla.

8.3.7 Sähkön hinnan muutos

Lämpöpumpulla tuotetun lämmön hinta riippuu voimakkaasti sähköenergian hinnasta. Lämmöntuotantokustannuksista noin kaksi kolmasosaa muodostuu kompressorin käyttömoottorin ja kaivosvesipumpun kuluttaman käyttöenergian hankinnasta aiheutuvista kustannuksista.

Taulukossa 7 on esitetty lämmön ominaishinnan muutokset sähkön hinnan muuttuessa 205...285 mk/MWh.

Sähkön hinta mk/MWh	Muutos %	Lämmön hinta mk/MWh	Muutos %
205,00	-19,6	123,61	-14,1
215,00	-15,7	127,67	-11,3
225,00	-11,8	131,72	- 8,5
235,00	- 7,8	135,78	- 5,6
245,00	- 3,9	139,83	- 2,8
255,00	0,0	143,89	0,0
265,00	+ 3,9	147,95	+ 2,8
275,00	+ 7,8	152,00	+ 5,6
285,00	+11,8	156,06	+ 8,5

Taulukko 7. Sähkön hinnan vaikutus lämmöntuotantokustannuksiin

Tuloksista havaitaan, että jo muutaman prosentin lasku sähkön hinnassa pienentää lämpöpumpulla tuotetun lämmön ominaishintaa huomattavasti. Vastaavasti sähkön hinnan nousu heikentää lämpöpumpun kilpailukykyä ja nousun ollessa esimerkiksi noin 6 % turvelaitos olisi edullisin lämmöntuotantovaihtoehto.

Liitteessä XVII on esitetty sähkön hinnan muutokset vaikutukset lämpöpumpulla tuotetun energian ominaishintaan. Kuvaan on merkitty myös turve- ja raskasöljylaitoksissa tuotetun lämmön hinnat, jotka voidaan olettaa riippumattomiksi sähkön hinnan muutoksista.

8.3.8 Turpeen hinnan muutos

Koska viime vuosina sähkön hinnan nousu on tapahtunut huomattavasti hitaammin kuin tavanomaisten keskitettyyn lämmöntuotantoon käytettyjen polttoaineiden, on kannattavuuslaskelmissa tarkasteltu myös turpeen ja raskaan polttoöljyn hintojen muutoksien vaikutusta lämmöntuotantokustannuksiin.

Taulukossa 8 on esitetty turvelaitoksessa tuotetun lämmön ominaishinnan muutokset turpeen hinnan muuttuessa -20...+20 % peruslaskenta-arvosta.

Turpeen hinta mk/MWh	Muutos %	Lämmön hinta mk/MWh	Muutos %
36,80	-20,0	137,42	-7,90
39,10	-15,0	140,37	-5,93
41,40	-10,0	143,32	-3,95
43,70	- 5,0	146,27	-1,98
46,00	0,0	149,22	0,0
48,30	+ 5,0	152,17	+1,98
50,60	+10,0	155,12	+3,95
52,90	+15,0	158,07	+5,93
55,20	+20,0	161,01	+7,90

Taulukko 8. Turpeen hinnan vaikutus lämmöntuotantokustannuksiin

Herkkyysanalyysin tuloksista nähdään, että vasta 10 % lasku turpeen hinnassa sähkön hinnan pysyessä muuttumattomana saisi turvelaitoksen kilpailukykyiseksi lämpöpumpun kanssa.

Liitteessä XVIII on esitetty turpeen hinnan muutoksen vaikutukset lämmöntuotantokustannuksiin. Kuvaan on vertailun vuoksi merkitty myös lämpöpumppu- ja raskasöljylaitoksissa tuotetun lämmön ominaishinnat, joihin muutokset turpeen hinnassa eivät vaikuta.

8.3.9 Raskaan polttoöljyn hinnan muutos

Vaikka POR-laitos ei osoittautunutkaan laskelmissa kannattavaksi lämmöntuotantovaihtoehdoksi, tarkasteltiin myös öljyn hinnan muutoksen vaikutusta lämmöntuotantokustannuksiin.

Taulukossa 9 on esitetty raskasöljylaitoksessa tuotetun lämmön ominaishinnan muutokset öljyn hinnan muuttuessa -20...+20 % perustilanteesta.

Öljyn hinta mk/MWh	Muutos %	Lämmön hinta mk/MWh	Muutos %
80,00	-20,0	130,93	-16,0
85,00	-15,0	137,18	-12,0
90,00	-10,0	143,43	- 8,0
95,00	- 5,0	149,68	- 4,0
100,00	0,0	155,93	0,0
105,00	+ 5,0	162,18	+ 4,0
110,00	+10,0	168,43	+ 8,0
115,00	+15,0	174,68	+12,0
120,00	+20,0	180,93	+16,0

Taulukko 9. Raskaan polttoöljyn hinnan vaikutus lämmöntuotantokustannuksiin

Ainoastaan öljyn hinnan huomattava lasku saisi raskasöljylaitoksen kilpailukykyiseksi muiden vaihtoehtojen kanssa. Mikäli hinta putoaisi 5 %, olisivat lämmöntuotantokustannukset yhtä suuret kuin turvelaitoksella perustapauksessa. Lämpöpumppua edullisempi vaihtoehto raskasöljylaitos olisi öljyn hinnan pudottua vähintään 10 %.

Liitteessä XIXon esitetty öljyn hinnan muutoksen vaikutus tuotetun lämmön ominaishintaan. Kuvaan on merkitty myös lämpöpumppu- ja turvelaitoksen lämmöntuotantokustannukset, joihin öljyn hinnan muutos ei vaikuta.

8.4 Takaisinmaksuaika

Liitteessä XX on esitetty lämpöpumppu- ja turvelaitosinvestointien takaisinmaksuajat korkokannan muuttuessa ja muiden laskenta-arvojen ollessa samat kuin perustapauksessa. Raskasöljylaitokselle takaisinmaksuaikaa ei voitu määrittää, koska lämmön ominaishinta oli korkeampi kuin Outokummun Lämpö Oy:n ilmoittama myyntihinta.

Tuloksista havaitaan, että lämpöpumppulaitoksen koroton takaisinmaksuaika on 5,6 vuotta ja turvelaitoksen 6,4 vuotta. Lämpöpumppulaitoksen takaisinmaksuaika on aina lyhyempi kuin turvelaitoksen käytetystä korkokannasta riippumatta. Mikäli takaisinmaksuaikaa käytetään perusteena edullisinta lämmöntuotantojärjestelmää valittaessa, on lämpöpumppulaitos kannattavin investointi.

Liitteessä XXII on esitetty lisäksi lämpöpumppulaitoksen takaisinmaksuaika korkokannan funktiona lämmön myyntihinnan ollessa parametrina.

8.5 Sisäinen korkokanta

Liitteessä XXI on esitetty lämpöpumppu- ja turvelaitosinvestointien sisäiset korot taloudellisen pitoajan muuttuessa. Muut laskenta-arvot ovat olleet samat kuin perustapauksessa.

Lämpöpumppulaitoksen sisäinen korko äärettömän pitkällä maksuajalla on 17,7 % ja turvelaitoksella vastaavasti 15,8 %. Raskasöljylaitoksella sisäinen korko on -2,1 %, koska lämmöntuotantokustannukset ovat korkeammat kuin myyntihinta. Koska lämpöpumppujärjestelmän sisäinen korko on korkein, on se kannattavin investointi korkokannan ollessa valintakriteerinä.

Liitteessä XXIII on esitetty lämpöpumpun sisäinen korko takaisinmaksuajan funktiona lämmön myyntihinnan ollessa parametrina.

8.4 Takaisinmaksuaika

Liitteessä XX on esitetty lämpöpumppu- ja turvelaitosinvestointien takaisinmaksuajat korkokannan muuttuessa ja muiden laskenta-arvojen ollessa samat kuin perustapauksessa. Raskasöljylaitokselle takaisinmaksuaikaa ei voitu määrittää, koska lämmön ominaishinta oli korkeampi kuin Outokummun Lämpö Oy:n ilmoittama myyntihinta.

Tuloksista havaitaan, että lämpöpumppulaitoksen koroton takaisinmaksuaika on 5,6 vuotta ja turvelaitoksen 6,4 vuotta. Lämpöpumppulaitoksen takaisinmaksuaika on aina lyhyempi kuin turvelaitoksen käytetystä korkokannasta riippumatta. Mikäli takaisinmaksuaikaa käytetään perusteena edullisinta lämmöntuotantojärjestelmää valittaessa, on lämpöpumppulaitos kannattavin investointi.

Liitteessä XXII on esitetty lisäksi lämpöpumppulaitoksen takaisinmaksuaika korkokannan funktiona lämmön myyntihinnan ollessa parametrina.

8.5 Sisäinen korkokanta

Liitteessä XXI on esitetty lämpöpumppu- ja turvelaitosinvestointien sisäiset korot taloudellisen pitoajan muuttuessa. Muut laskenta-arvot ovat olleet samat kuin perustapauksessa.

Lämpöpumppulaitoksen sisäinen korko äärettömän pitkällä maksuajalla on 17,7 % ja turvelaitoksella vastaavasti 15,8 %. Raskasöljylaitoksella sisäinen korko on -2,1 %, koska lämmöntuotantokustannukset ovat korkeammat kuin myyntihinta. Koska lämpöpumppujärjestelmän sisäinen korko on korkein, on se kannattavin investointi korkokannan ollessa valintakriteerinä.

Liitteessä XXIII on esitetty lämpöpumpun sisäinen korko takaisinmaksuajan funktiona lämmön myyntihinnan ollessa parametrina.

8.6 Johtopäätökset kannattavuusvertailusta

Perustarkastelussa Outokummun olosuhteisiin parhaiten soveltuvaksi lämmöntuotantoratkaisuksi osoittautui lämpöpumppujärjestelmä. Ero turvelaitoksen lämmöntuotantokustannuksiin on 3,7 %. Raskasöljylaitoksen lämmöntuotantokustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin molempien muiden vaihtoehtojen ja ero lämpöpumppulaitokseen verrattuna on 8,4 %.

Kannattavuuslaskelmissa perusarvoissa tapahtuvien muutosten vaikutus lämpöpumpulla tuotetun lämmön ominaishintaan on selvimmän havaittavissa seuraavien tekijöiden osalta:

- laskentakorko
- tehokerroin
- sähkön hinta.

Mikäli kannattavuusvertailussa käytetyissä perusarvoissa tapahtuisi jokin seuraavista muutoksista muiden pysyessä ennallaan, olisi turvelaitos lämpöpumppua edullisempi lämmöntuotantovaihtoehto Outokummussa:

- investointikustannusten pieneminen 20 %
- laskentakoron aleneminen 10 %:iin
- huipunkäyttöajan piteneminen 20 %
- tehokertoimen huononeminen 6 %
- sähkön hinnan nousu 6 %
- turpeen hinnan lasku 10 %.

Jotta raskasöljylaitos olisi kilpailukykyinen lämpöpumpun kanssa, pitäisi öljyn hinnan laskea vähintään 10 %.

Tuloksista havaitaan, että laskenta-arvoissa pitäisi tapahtua melko suuria muutoksia, jotta joko turve- tai raskasöljylaitos olisi taloudellisesti kilpailukykyinen lämpöpumpun kanssa.

Myös takaisinmaksuajan ja sisäisen korkokannan perusteella arvioitaessa lämpöpumppu edullisin lämmöntuotantojärjestelmä Outokumpuun.

8.7 Mahdolliset jatkotoimenpiteet

Tämä tutkimus on perusselvitys, jonka tarkoituksena on tutkia lämpöpumppuprosessin periaatteellista soveltuvuutta lämmöntuotantovaihtoehdoksi Outokummun kaupungissa. Koska tutkimuksen perusteella lämpöpumppu on teknisesti mahdollinen ja taloudellisesti kilpailukykyinen kaukolämmön tuotantoratkaisu, on ennen lopullista valintaa vaihtoehtojen välillä syytä selvittää lämpöpumpun osalta mm. seuraavat tekijät:

- lämpöpumppuratkaisun vuoksi kaivoksessa tarvittavat muutostyöt ja niiden kokonaiskustannukset
- kaivosveden todellinen lämpötila esimerkiksi muista vastaavista suljetuista kaivoksista saatavien mittaustulosten perusteella
- maaperän käyttäytyminen tarkkojen tilavuus-, pinta-ala- ja lämpötilatietojen perusteella
- koneistovaihtoehdot lämpöteknisesti sopivamman ja mahdollisesti kustannuksiltaan edullisemman ratkaisun löytämiseksi
- lämpöpumppulaitokselle toimitettavan sähkön hinta
- sähkö, turpeen ja raskaan polttoöljyn hintasuhteet kannattavuusvertailua varten
- kotimaista polttoainetta hyödyntäville laitoksille myönnettävän investointiavustuksen osuus ja vaikutukset lämmöntuotantokustannuksiin.

Valtion polttoainekeskukselta on pyydetty tarjous Outokumpuun toimitettavan jysinturpeen hinnasta, jonka perusteella Outokummun Lämpö Oy suorittaa omat laskelmansa kiinteällä polttoaineella toimivan turvekattilalaitoksen lämmöntuotantokustannuksista. Myös Neste Oy:ltä on pyydetty tarjous heidän Outokumpuun mahdollisesti toimittamansa kaukolämmön hinnasta. Molemmat tarjoukset avataan helmikuussa 1985 ja myös ne on syytä huomioida lämmöntuotantovaihtoehtoja arvioitaessa.

Kun kaikki edellä mainitut tekijät ja niiden vaikutukset lämmöntuotantokustannuksiin on selvitetty, voidaan vertailu eri lämmöntuotantovaihtoehtojen välillä tehdä luotettavasti ja valita Outokumpuun teknisesti soveltuva ja taloudellisesti kannattavin ratkaisu.

9. YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää lämpöpumpun soveltuvuus Outokummun kaupungin energiahuoltoon. Tarkastelun kohteena on lämpöteholtaan 7 MW sähkömoottorikäyttöinen lämpöpumppukoneisto. Lämmönlähteenä on Outokummun kaupungin välittömässä läheisyydessä sijaitsevan Keretin kaivoksen louhostiloista saatava maalämpö, jota hyödynnetään pohjaveden välityksellä. Lämmönlähteen lämpötila on niin alhainen, ettei sitä voida suoraan hyödyntää tavanomaisissa lämmönvaihtimissa. Tutkimuksessa selvitetään Outokumpuun tarjotun laitteiston perusteella lämpöpumpun toimintaparametrit vuorokausittain ja niiden vuosikeskiarvot. Lisäksi selvitetään lauhtumislämpötilan ja eri teho-osuuksien vaikutus lämpöpumpulla tuotettuun vuosienenergiaosuuteen ja vuotuisen tehokertoimeen. Kannattavuustarkastelussa selvitetään lämpöpumpun sekä vertailukohteina käytettävien turve- ja raskasöljylaitosten lämmöntuotantokustannukset ja edelleen tuotetun lämmön ominaishinta. Lisäksi tarkastellaan eri kustannustekijöiden muutosten vaikutuksia lämmön ominaishintaan. Kannattavuustarkastelun perusteella arvioidaan eri lämmöntuotantovaihtoehtojen taloudellinen toteuttamiskelpoisuus.

Selvityksen perusteella lämpöpumppu on teknisesti ja taloudellisesti kilpailukykyinen lämmöntuotantovaihtoehto Outokummussa. Lämpöpumpulla tuotetun lämmön ominaishinta on 3,7 % alhaisempi kuin turvelaitoksessa ja 8,4 % alhaisempi kuin raskasöljylaitoksessa tuotetun lämmön hinta.

Kannattavuusvertailussa käytettävillä laskenta-arvoilla voidaan kuitenkin huomattavasti vaikuttaa lämmöntuotantokustannuksiin. Lämpöpumpulla tuotetun lämmön ominaishintaan vaikuttavat selvimmän laskentakorko, tehokerroin ja sähköenergian hinta. Vertailukohteina olevilla turve- ja raskasöljylaitoksilla polttoaineen energiahinta on määräävin tekijä lämmöntuotantokustannuksia lasettaessa.

Vaikka lämpöpumppu osoittautuikin taloudellisesta kannattavaksi lämmöntuotantoratkaisuksi, riippuu sen todellinen kannattavuus viime kädessä sovellutuskohteeseen liittyvistä lähtötiedoista ja niiden oikeellisuudesta. Koska tutkimus on luonteeltaan perusselvitys, on lämpöpumpun osalta ennen lopullista valintaa syytä selvittää yksityiskohtaisemmin mm. lämpöpumppuratkaisusta aiheutu-

vat kaivosteknilliset työt, kaivosveden todellinen lämpötila, maaperän käyttäytyminen sekä sähkön, turpeen ja raskaan polttoöljyn hintasuhteet.

Suomessa on jo nyt lukuisia suljettuja kaivoksia ja lisäksi useat nykyisistä kaivoksista on louhittu loppuun 1990-luvulle tultaessa. Tämän tutkimuksen ja mahdollisten jatkotutkimusten pohjalta olisi ehkä taloudellisesti kannattavaa kartoittaa myös laajemmin louhostiloista saatavan maalämmön hyödyntämismahdollisuuksia lämpöpumpun avulla kaivosten läheisyyteen syntyneiden yhdyskuntien energiahuollossa.

LÄHDELUETTELO

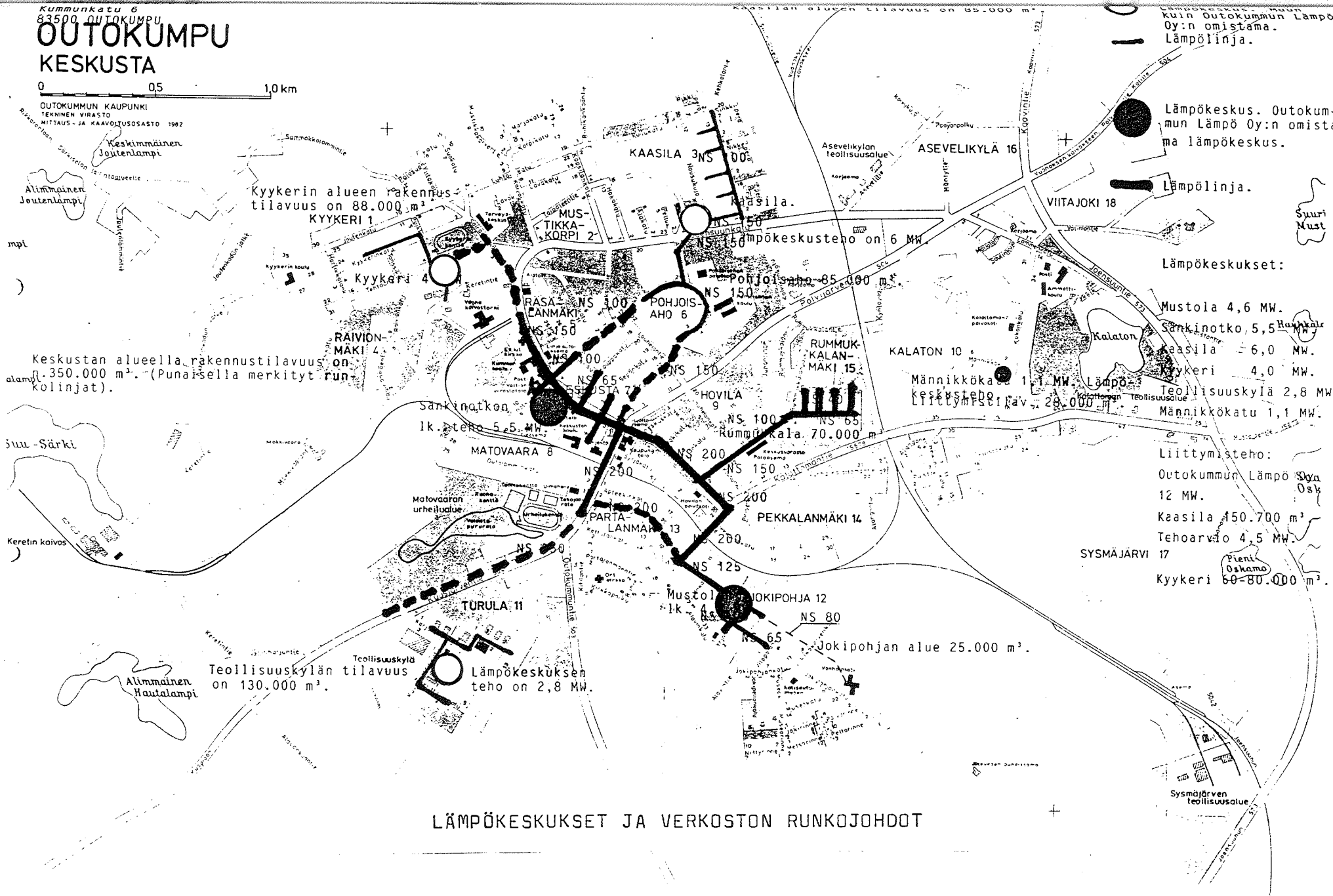
1. von CUBE, H.L. & STEIMLE, F., Heat Pump Technology. London 1981. 380 s.
2. REAY, D.A. & MACMICHAEL, D.B.A., Heat Pump, Design and Applications. London 1979. 302 s.
3. DOSSAT, R., Principles of Refrigeration. USA 1978. 602 s.
4. JAUREOLA, W., Kylmätekniikan oppikirja. Suomen Kylmäyhdistys r.y., Julkaisu No 1 C. Hämeenlinna 1974. 438 s.
5. Lämpöpumppu ja sen käyttö. INSKO 73-74. Helsinki 1974.
6. Lämpöpumput. Suomen LVI-yhdistys.
7. TUOMINEN, A., Matalalämpötilaista teollisuuden jätelämpöä hyväksikäyttävän lämpöpumppuratkaisun soveltuvuus yhdyskuntien energiahuollossa. Diplomityö. LTKK, Energiatekniikan laitos. Espoo 1982. 61 s.
8. KANKAANPÄÄ, E., Lämpöpumpun toimintaparametrien taloudellisesti optimaalisen valintamenetelmän soveltaminen uuteen lämpöpumppuratkaisuun. Diplomityö. LTKK, Energiatekniikan laitos. 1978. 106 s.
9. STAL LAVAL'n lämpöpumppu kaukolämpökäytössä. Tekninen informaatio 1/1981. 9 s.
10. HAAPAKOSKI, M., Pientalojen koealue- ja lämmitystapa-projektin loppuraportti valmistunut. Voimaviesti 6/1983. s. 15-17.
11. LANDTMAN, B., Lämpöpumppulaitos Uuteenkaupunkiin. Voimaviesti 6/1984. s. 14-16.
12. HEIKKILÄ, M., Pohjavedestä lämpöä Forssan Vieremään. Voimaviesti 4/1983. s. 14-16.
13. RITOLA, J., Kalliotilojen energiatalous ja lämmön varastointi kallioon. Espoo 1983. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 216. 97 s.

14. Lämpöpumput teollisuudessa ja lämmöntuotannossa. INSKO 70-84. Insinööritieto Oy 1984.
15. KANERVA, V. & LAPPALAINEN, M., Kaupunkien rakennuskannan energiatalous. Kaupunkiliiton julkaisu C 30. Helsinki 1980. 119 s.
16. HUOVILAINEN, R.T. & KOSKELAINEN, L., Kaukolämmitys. Lappeenranta 1982. 187 s.
17. SAUKKONEN, M., Lämpöpumpun soveltuvuus ja kannattavuus Vanajan voimalaitoksen ja Hämeenlinnan kaukolämpöjärjestelmän yhteydessä. Diplomityö. LTKK, Energiatekniikan laitos. Lappeenranta 1982. 116 s.
18. OUTOKUMMUN LÄMPÖ OY. Kaukolämmön yleissuunnitelma. 1980. Julkaisematon.
19. OUTOKUMPU OY. Outokummun kaupungin kaukolämpöselvitys. 1980. Julkaisematon.
20. HYYPPÄ, J., Geologisten erityisolojen vaikutus pohjaveden laatuun. Vesihallituksen ja Geologisen tutkimuslaitoksen pohjavesisymposiumi 15.-16.10.1981. Vesihallituksen monistesarja 1981:91. Helsinki 1981. s. 117-130.

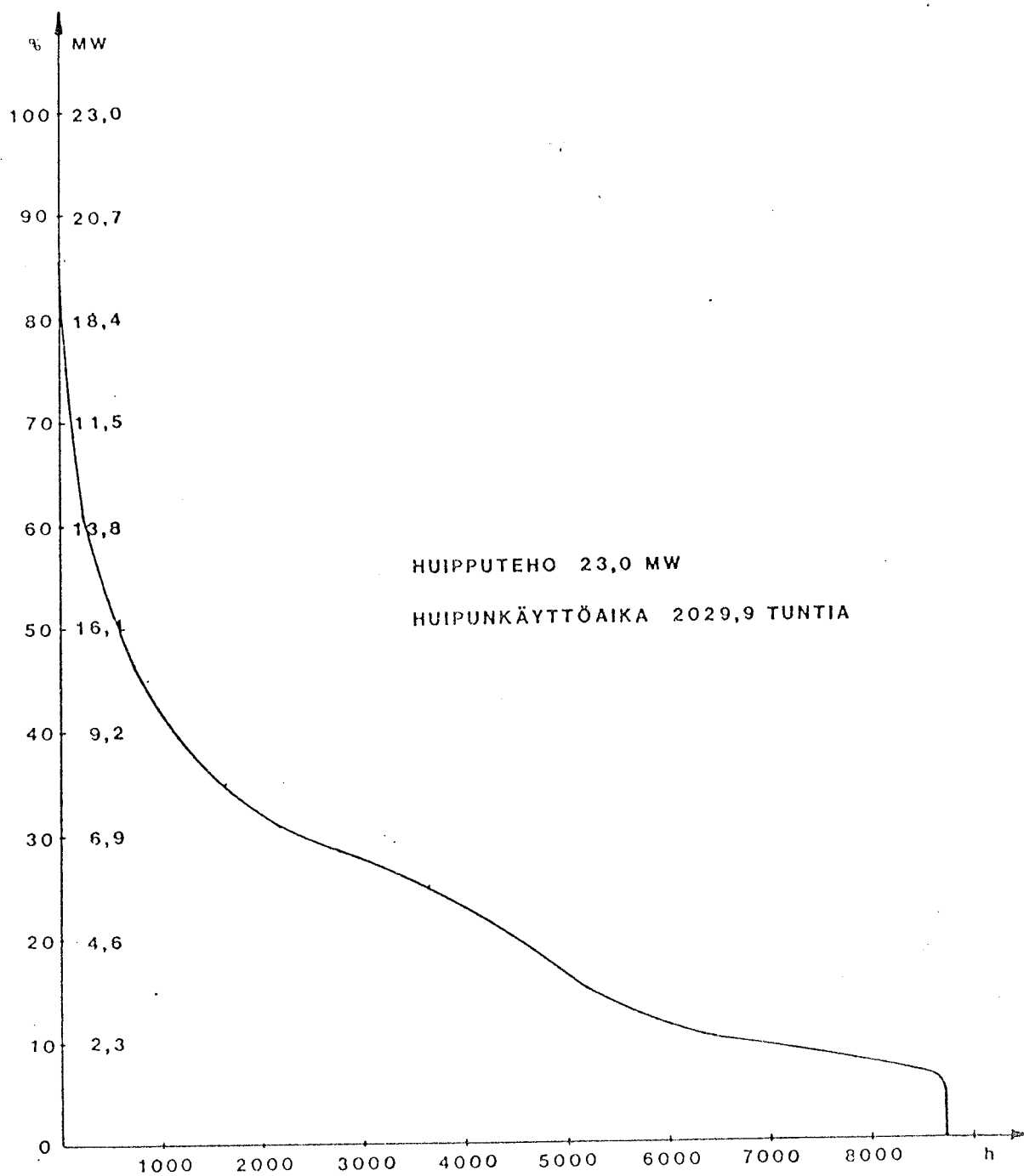
Kummunkatu 6 83500 OUTOKUMPU **OUTOKUMPU** **KESKUSTA**

0 0.5 1.0 km

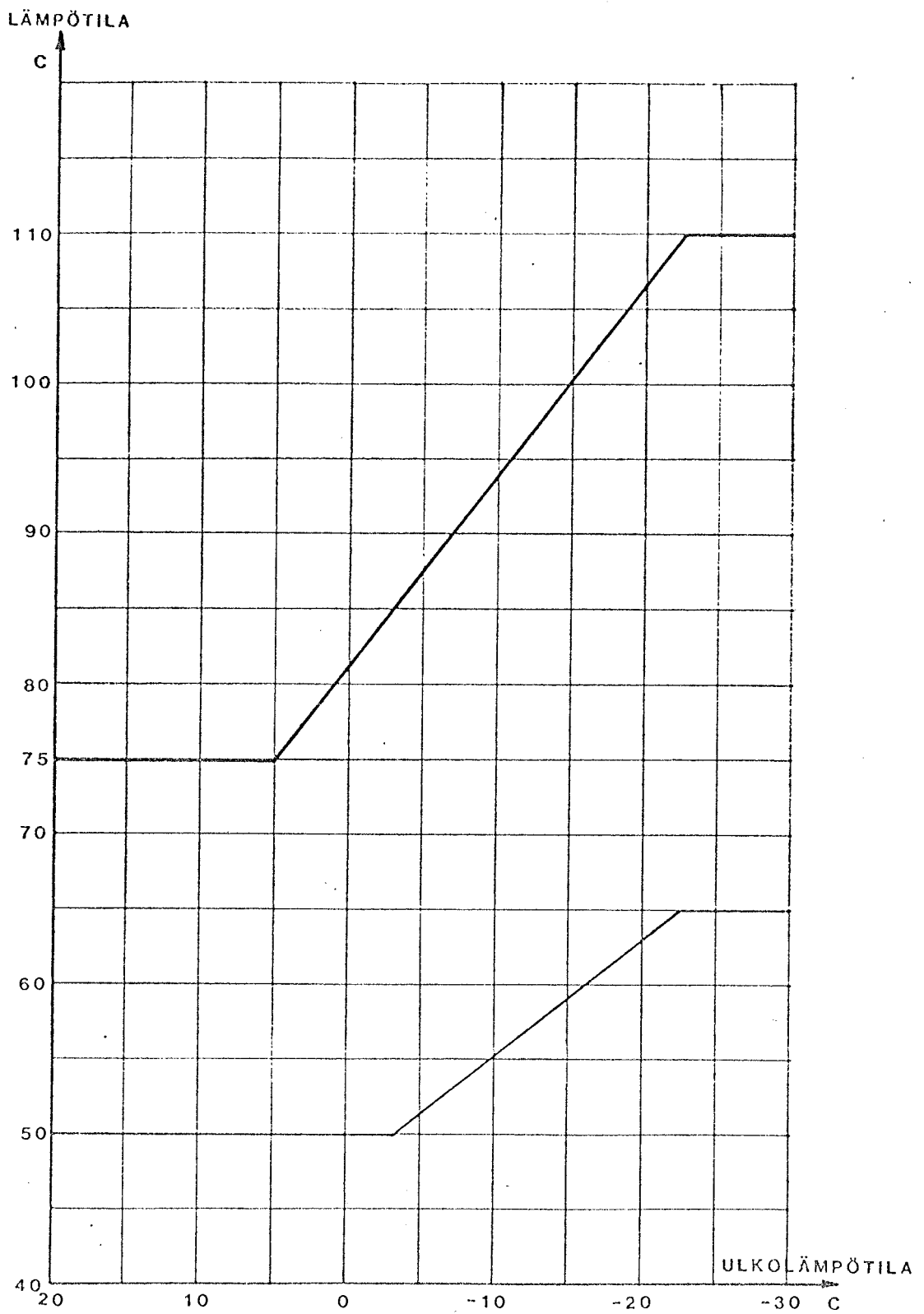
OUTOKUMMUN KAUPUNKI
TEKNINEN VIRASTO
MITTAUS- JA KAAVUTUSOSASTO 1982



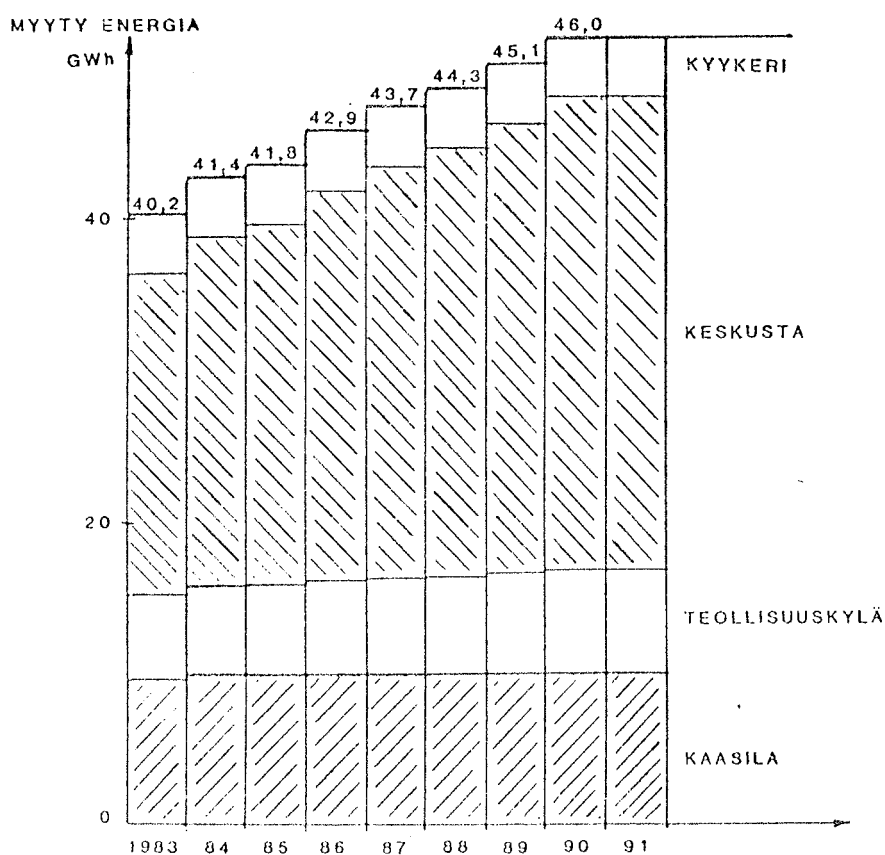
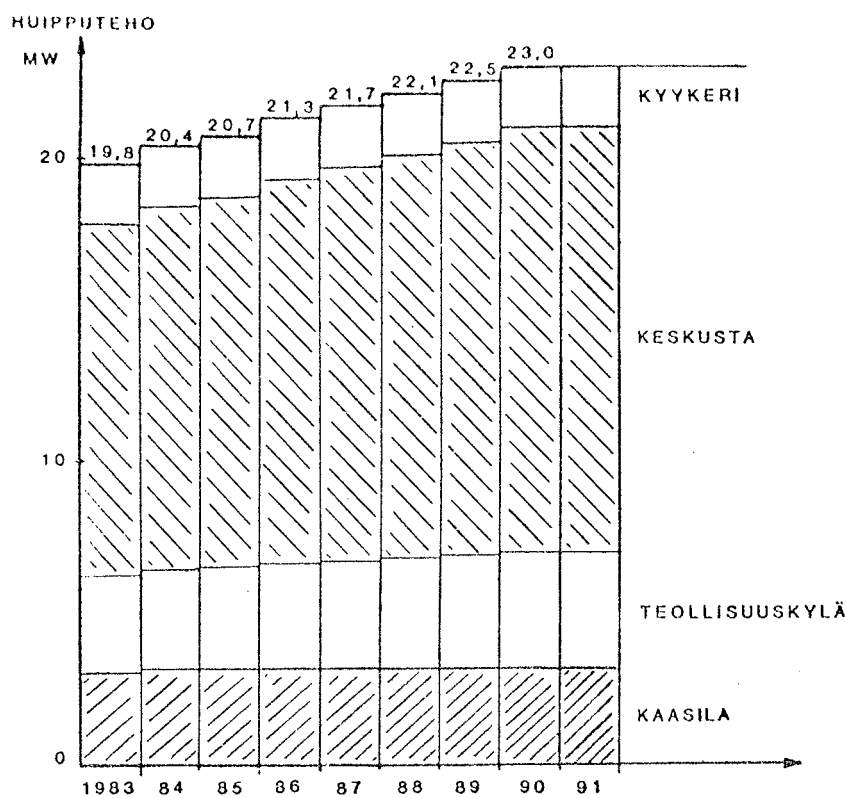
LÄMPÖKESKUKSET JA VERKOSTON RUNKOJOHDOT



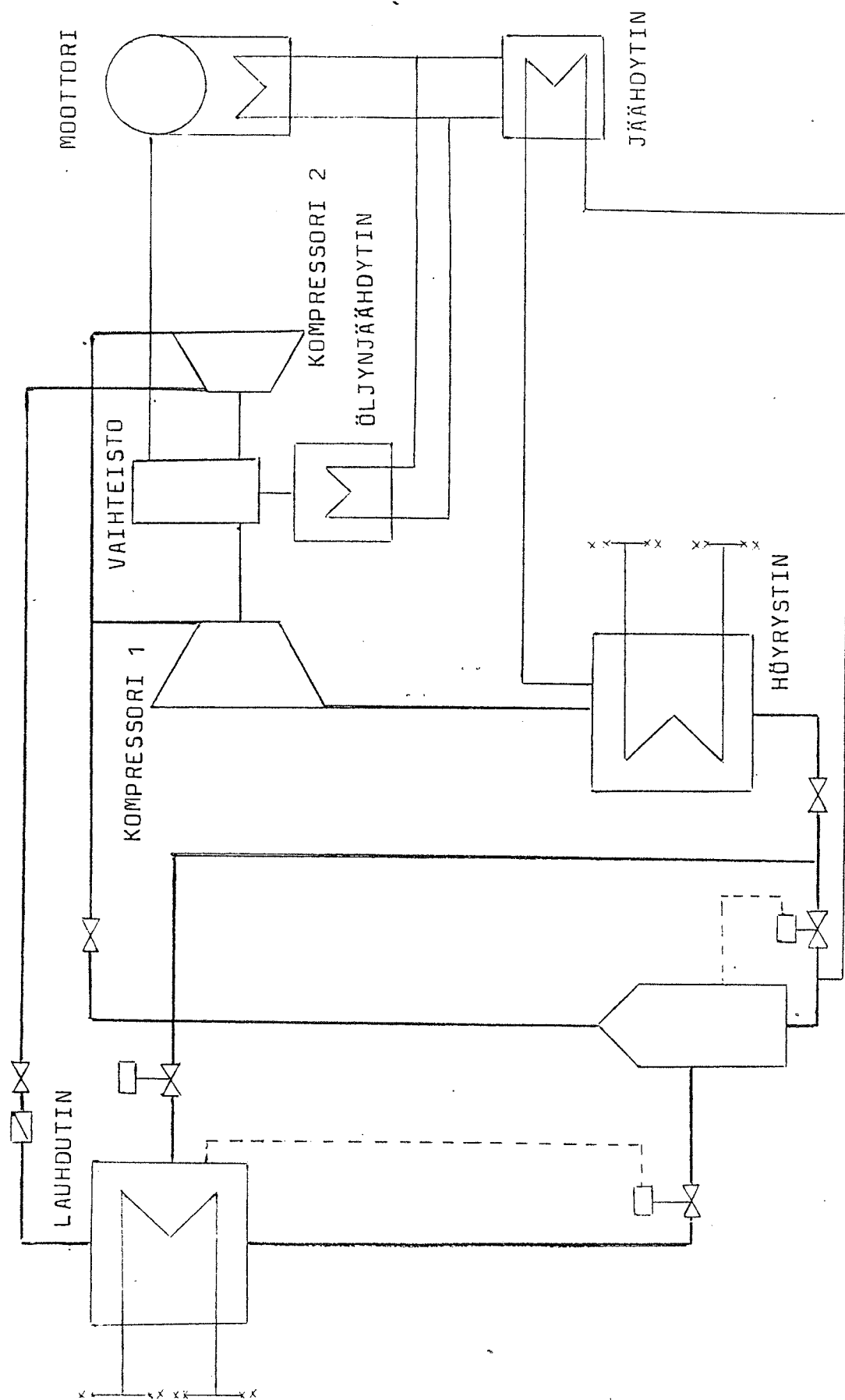
KAUKOLÄMPÖTEHON PYSYVYYSKÄYRÄ



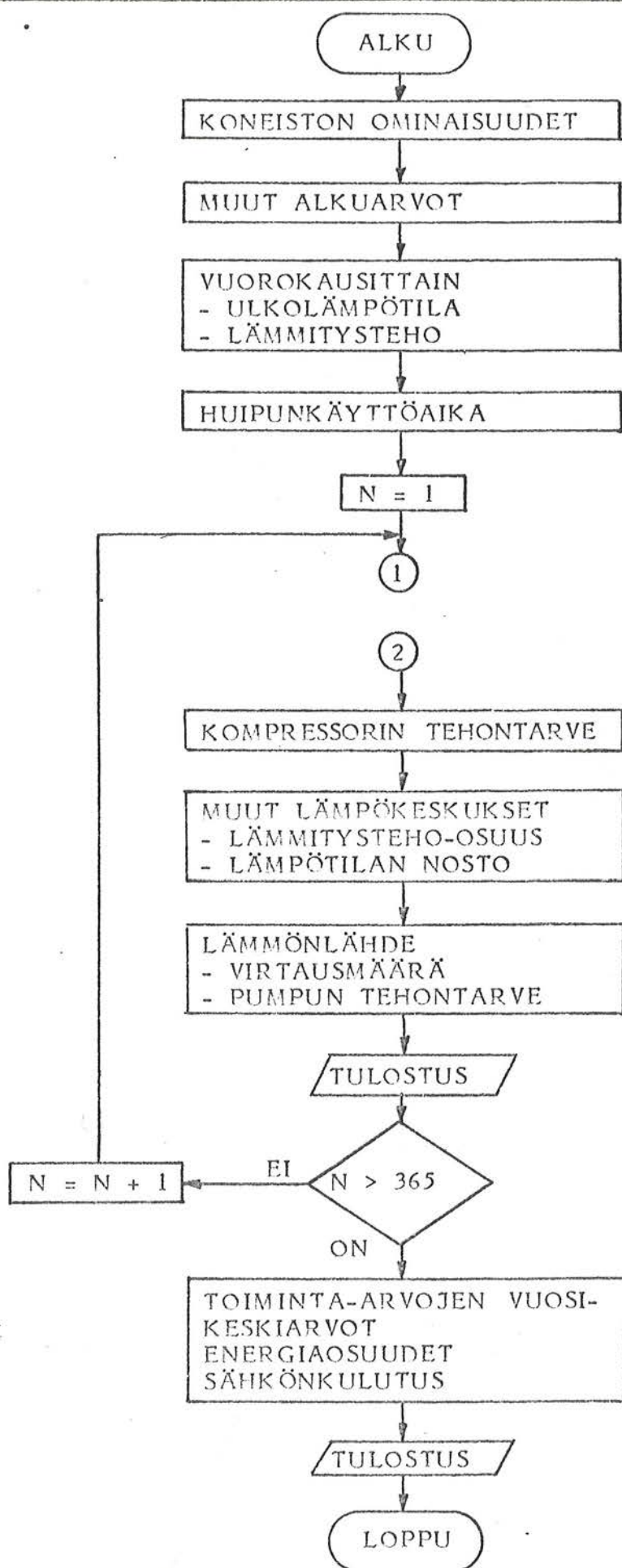
KAUKOLÄMPÖVERKOSTON MENO- JA PALUUVEDEN LÄMPÖTILAT



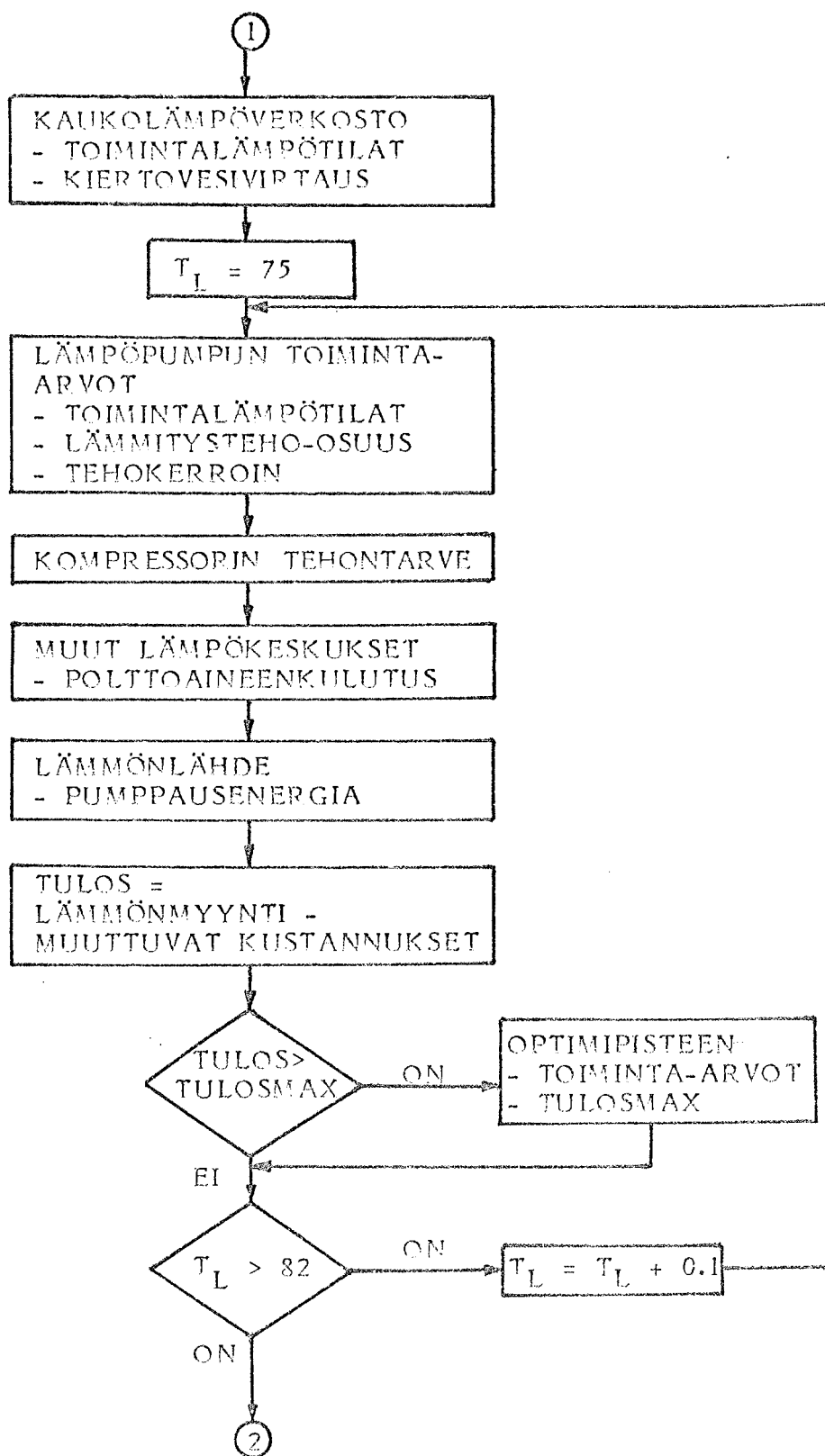
KAUKOLÄMPÖTEHON JA -ENERGIAN KASVUENNUSTEET



LÄMPÖPUMPUN KYTKENTÄKAAVIO



SIMULOINTIOHJELMAN VUOKAAVIO



SIMULOINTIOHJELMAN VUOKAAVIO

1. ULKOLÄMPÖTILA

$$T_u = f_1(t)$$

2. KAUKOLÄMPÖTARVE

$$k_l = f_2(T_u) = f_3(t)$$

3. KAUKOLÄMPÖVERKOSTON MENOVESI

$$T_{kl,1} = 75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad , \quad \text{kun } T_u > +5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{kl,1} = 75 + (45/55) \cdot (5 - T_u) \text{ } ^\circ\text{C} \quad , \quad \text{kun } -2 \text{ } ^\circ\text{C} < T_u < +5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{kl,1} = 81 + (65/47) \cdot (-2 - T_u) \text{ } ^\circ\text{C} \quad , \quad \text{kun } -23 \text{ } ^\circ\text{C} < T_u < -2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{kl,1} = 110 \text{ } ^\circ\text{C} \quad , \quad \text{kun } T_u < -23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{kl,max} = 110 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4. KAUKOLÄMPÖVERKOSTON PALUUVESI

$$T_{kl,2} = 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad , \quad \text{kun } T_u > -3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{kl,2} = 50 + 0,75 \cdot (-3 - T_u) \text{ } ^\circ\text{C} \quad , \quad \text{kun } -23 \text{ } ^\circ\text{C} < T_u < -3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{kl,2} = 65 \text{ } ^\circ\text{C} \quad , \quad \text{kun } T_u < -23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_u = \text{ulkolämpötila (} ^\circ\text{C)}$$

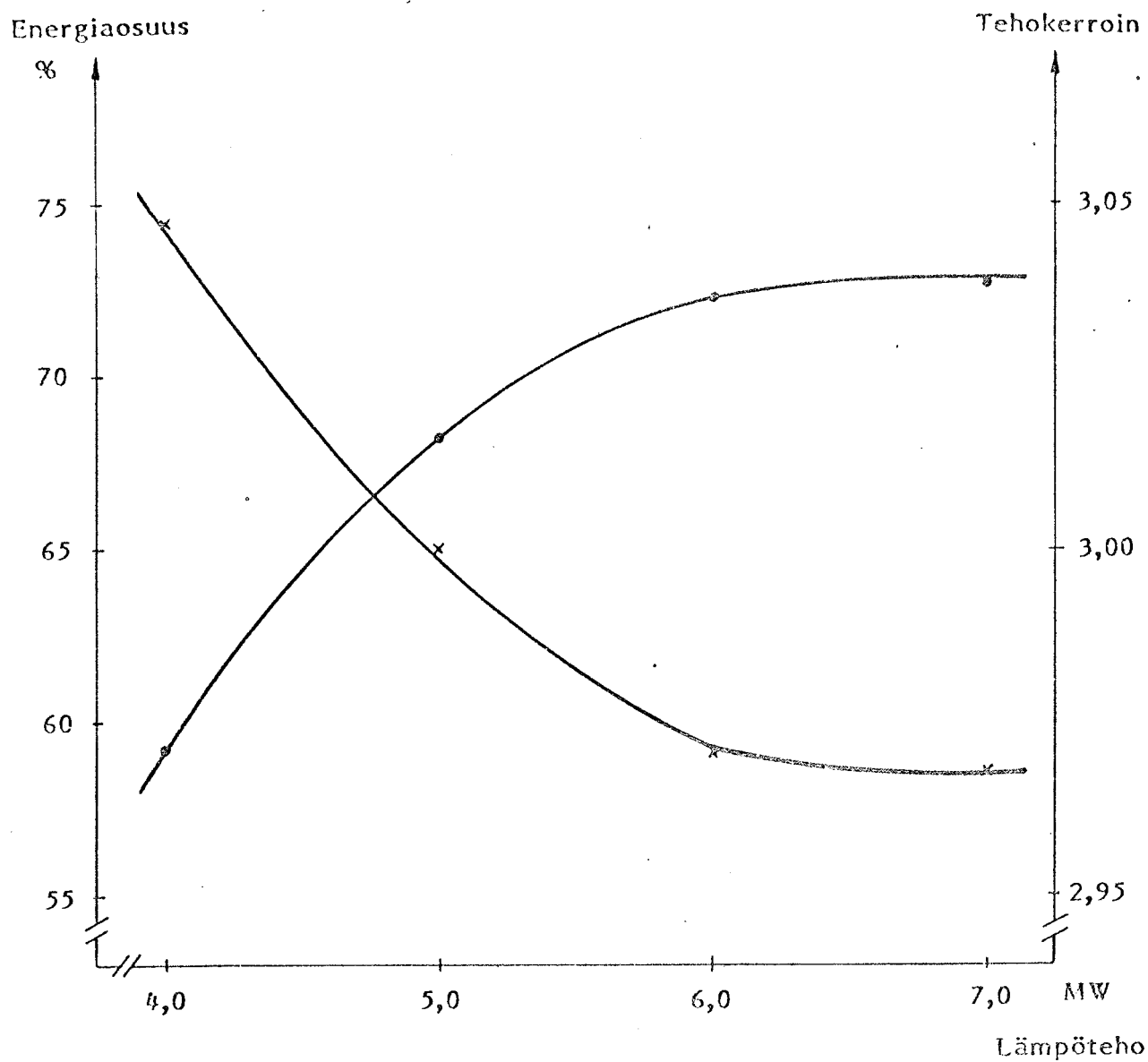
$$T_{kl,1} = \text{kaukolämpöverkoston menoveden lämpötila (} ^\circ\text{C)}$$

$$T_{kl,2} = \text{kaukolämpöverkoston paluuveden lämpötila (} ^\circ\text{C)}$$

$$t = \text{aika (h)}$$

$$k_l = \text{kaukolämpöteho (W)}$$

KAUKOLÄMPÖVERKOSTON LÄMPÖKUORMAN MALLI

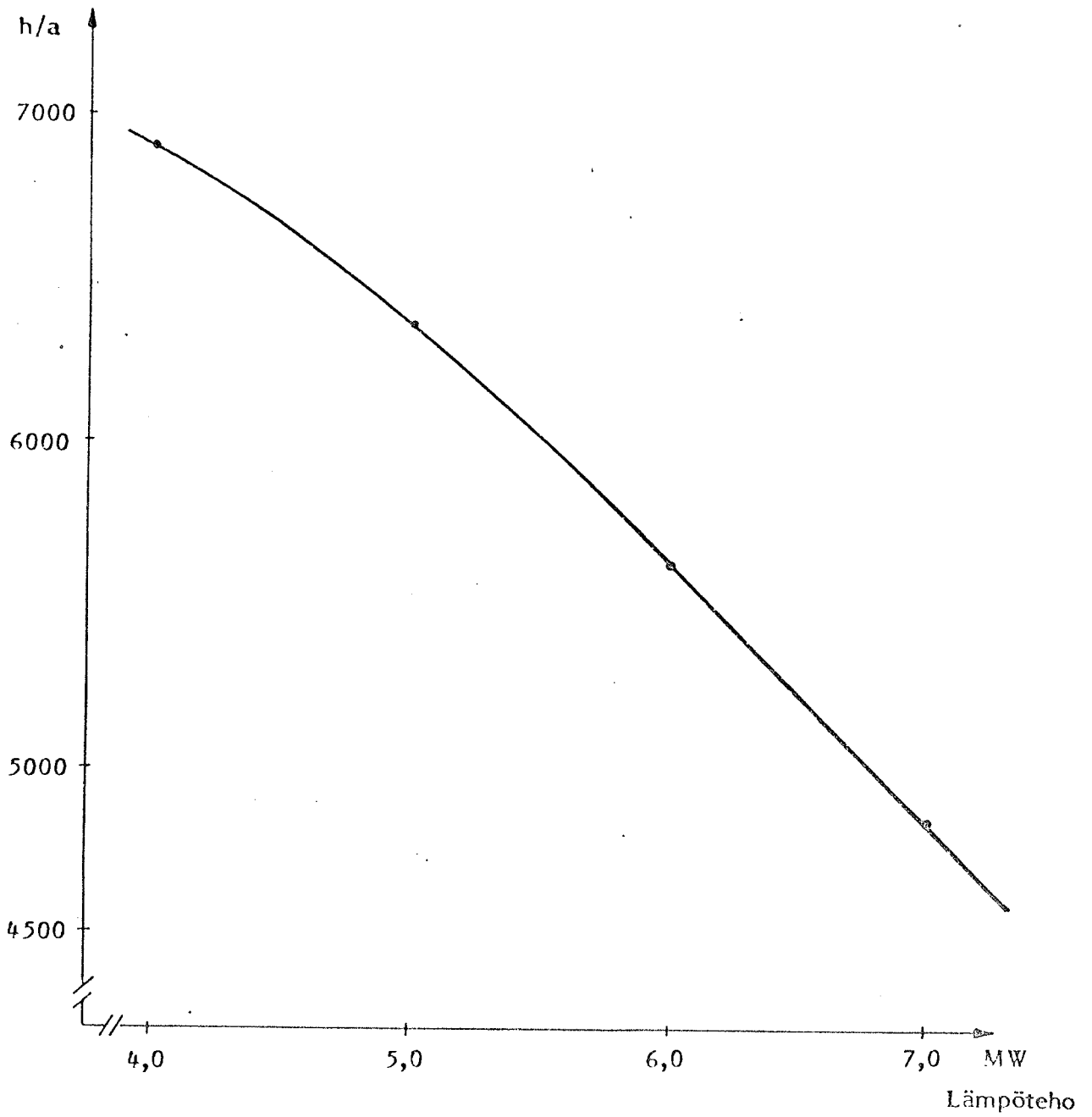


• Vuosienergiaosuus

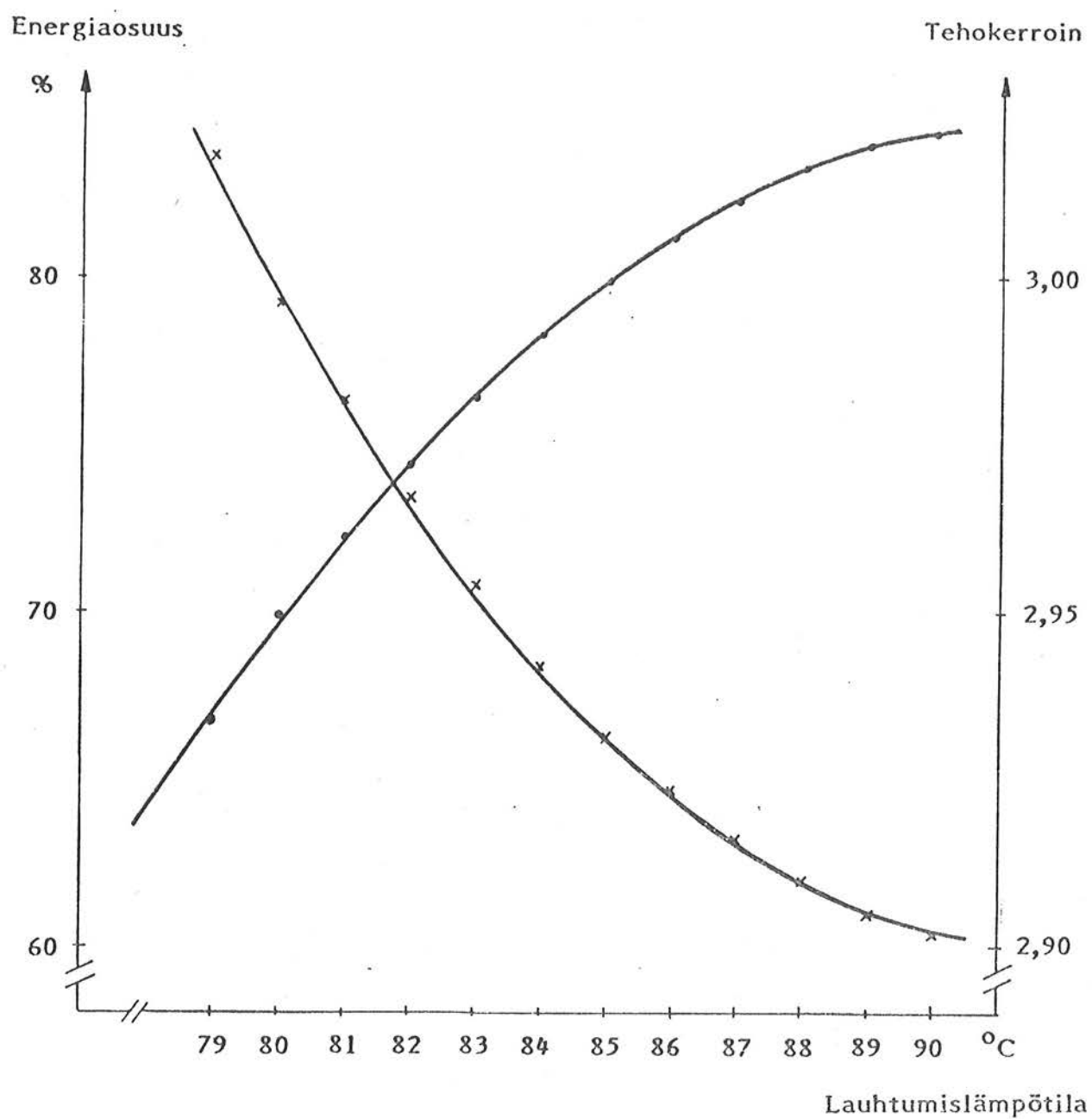
x Tehokerroin

LÄMPÖPUMPUN VUOSIENERGIAOSUUS JA KESKIMÄÄRÄINEN VUOTUINEN TEHOKERROIN ERI TEHO-OSUUKSILLA

Huipunkäyttöaika



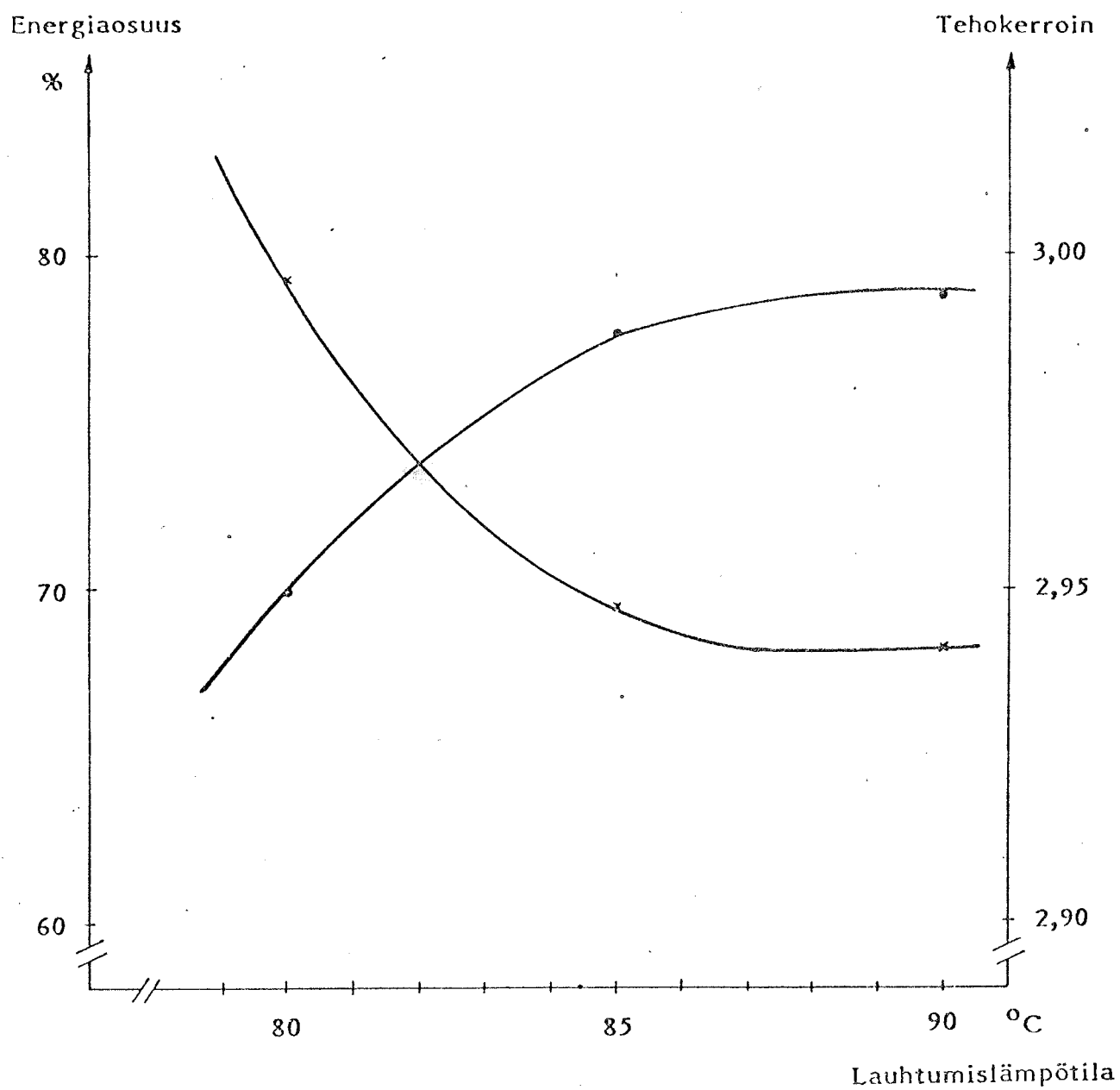
LÄMPÖPUMPUN HUIPUNKÄYTTÖAIKA ERI TEHO-OSUUKSILLA



• Vuosienergiaosuus

x Tehokerroin

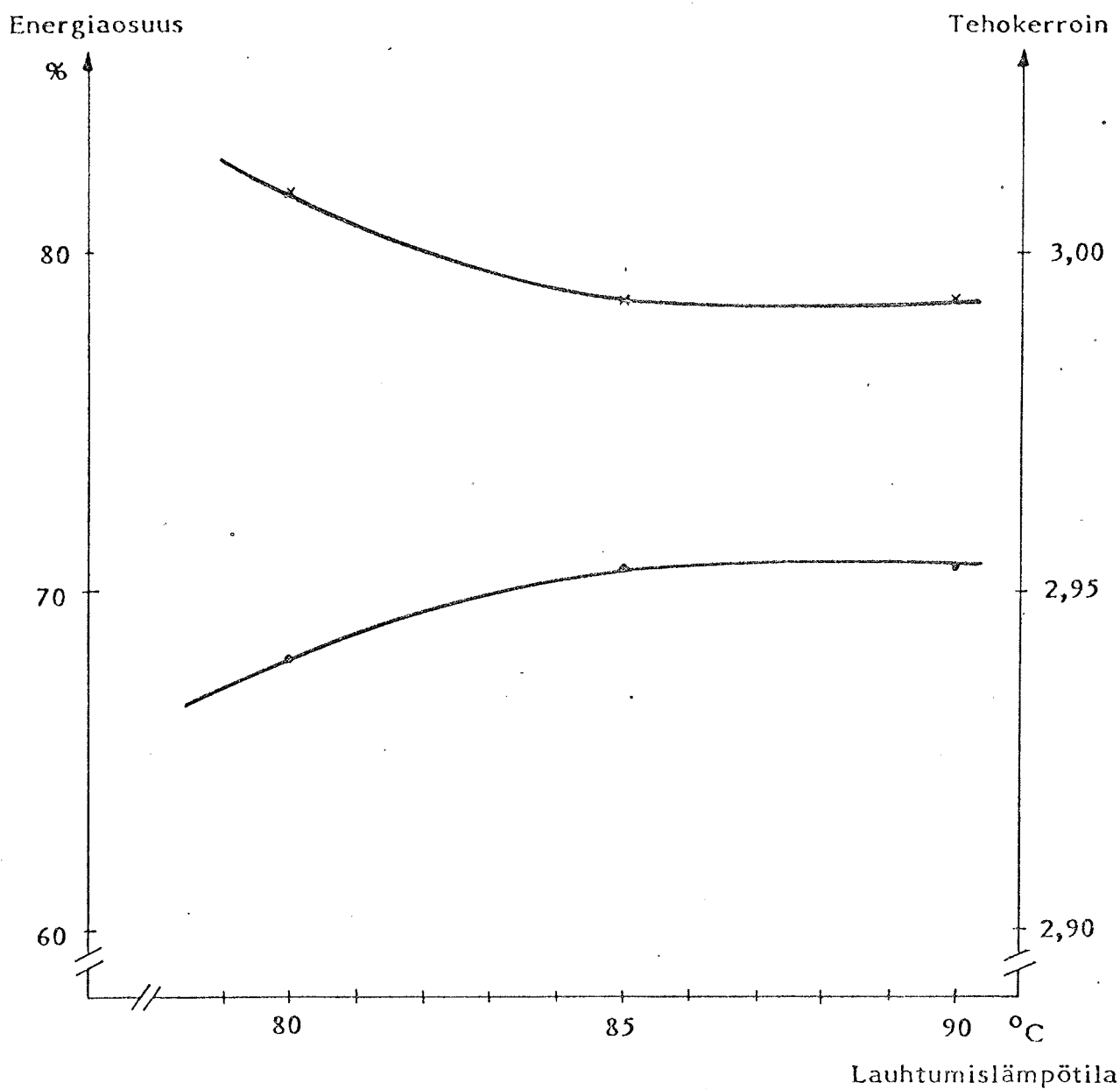
LAUHTUMISLÄMPÖTILAN VAIKUTUS LÄMPÖPUMPUN VUOSIENERGIAOSUUTEEN JA TEHOKERTOIMEEN LÄMPÖTEHON OLLESSA 7 MW



• Vuosienergiaosuus

x Tehokerroin

LAUHTUMISLÄMPÖTILAN VAIKUTUS LÄMPÖPUMPUN VUOSIENERGIAOSUUTEEN JA TEHOKERTOIMEEN LÄMPÖTEHON OLLESSA 6 MW



- Vuosienergiaosuus
- × Tehokerroin

LAUHTUMISLÄMPÖTILAN -VAIKUTUS LÄMPÖPUMPUN VUOSIENERGIAO-SUUTEEN JA TEHOKERTOIMEEN LÄMPÖTEHON OLLESSA 5 MW

Energiaosuus

Tehokerroin

%

80

70

60

3,00

2,95

2,90

80

85

90

°C

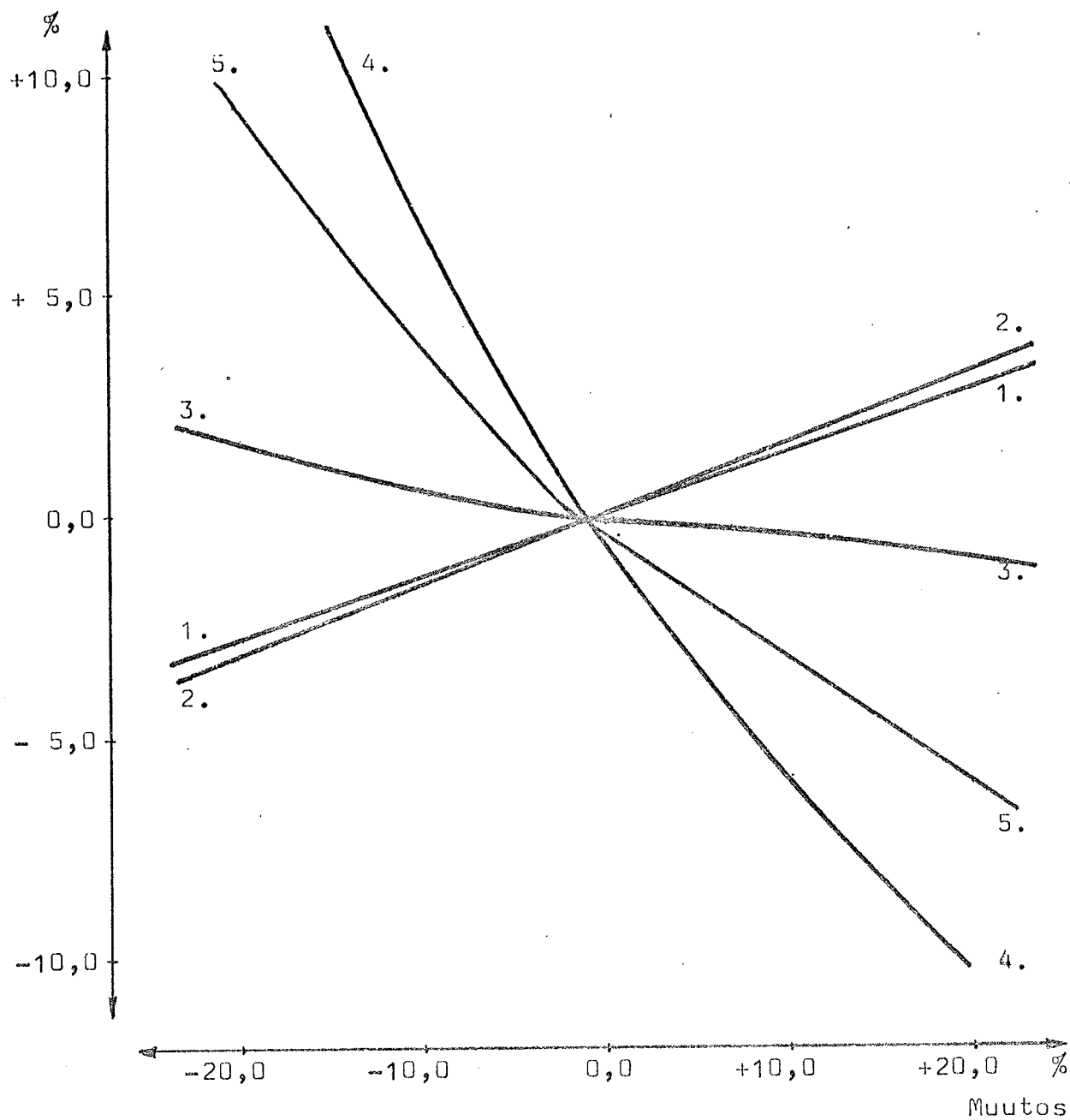
Lauhtumislämpötila

• Vuosienergiaosuus

× Tehokerroin

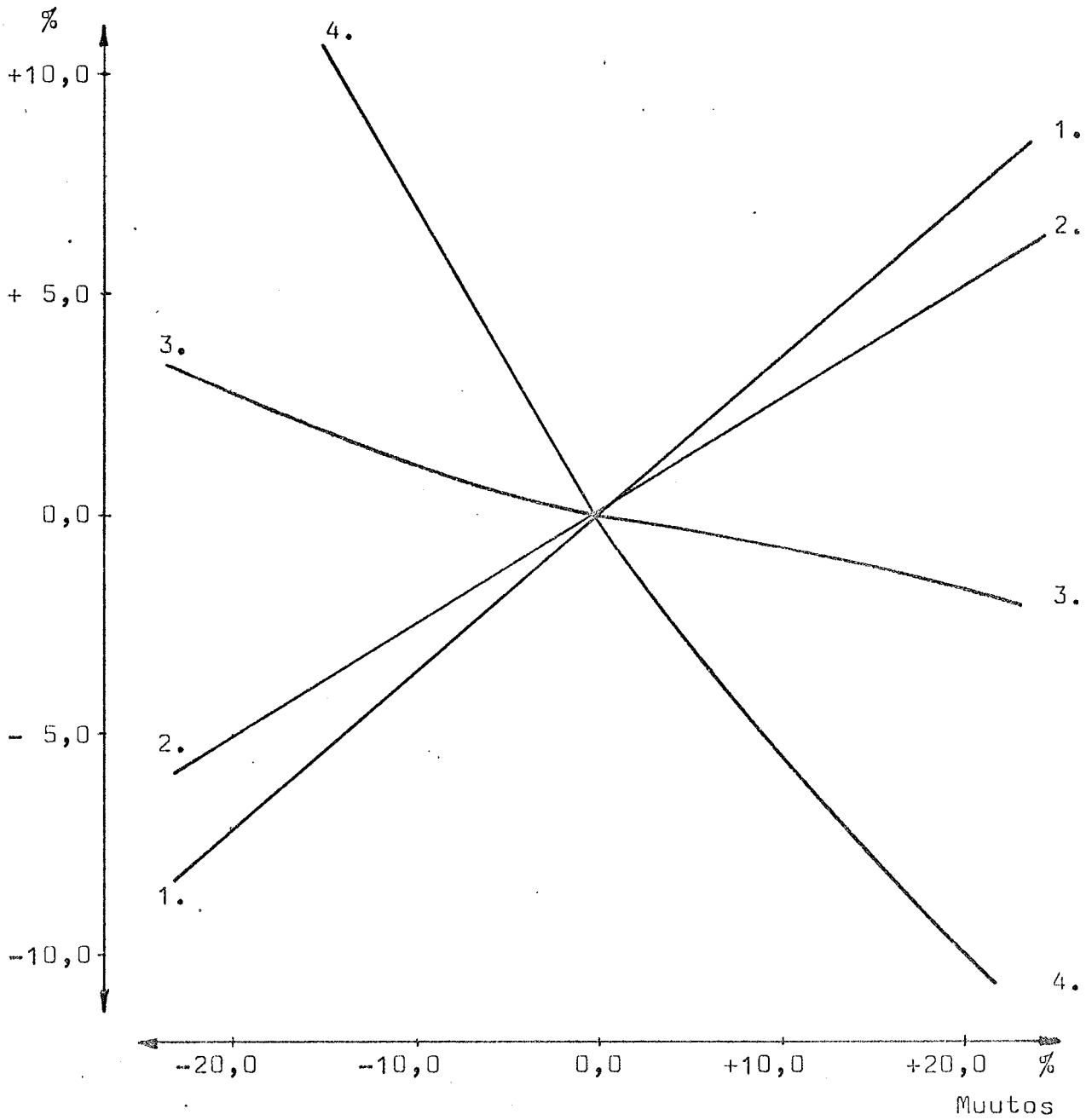
LAUHTUMISLÄMPÖTILAN VAIKUTUS LÄMPÖPUMPUN VUOSIENERGIAOSUUTEEN JA TEHOKERTOIMEEN LÄMPÖTEHON OLLESSA 4 MW

Lämmön ominaishinnan muutos

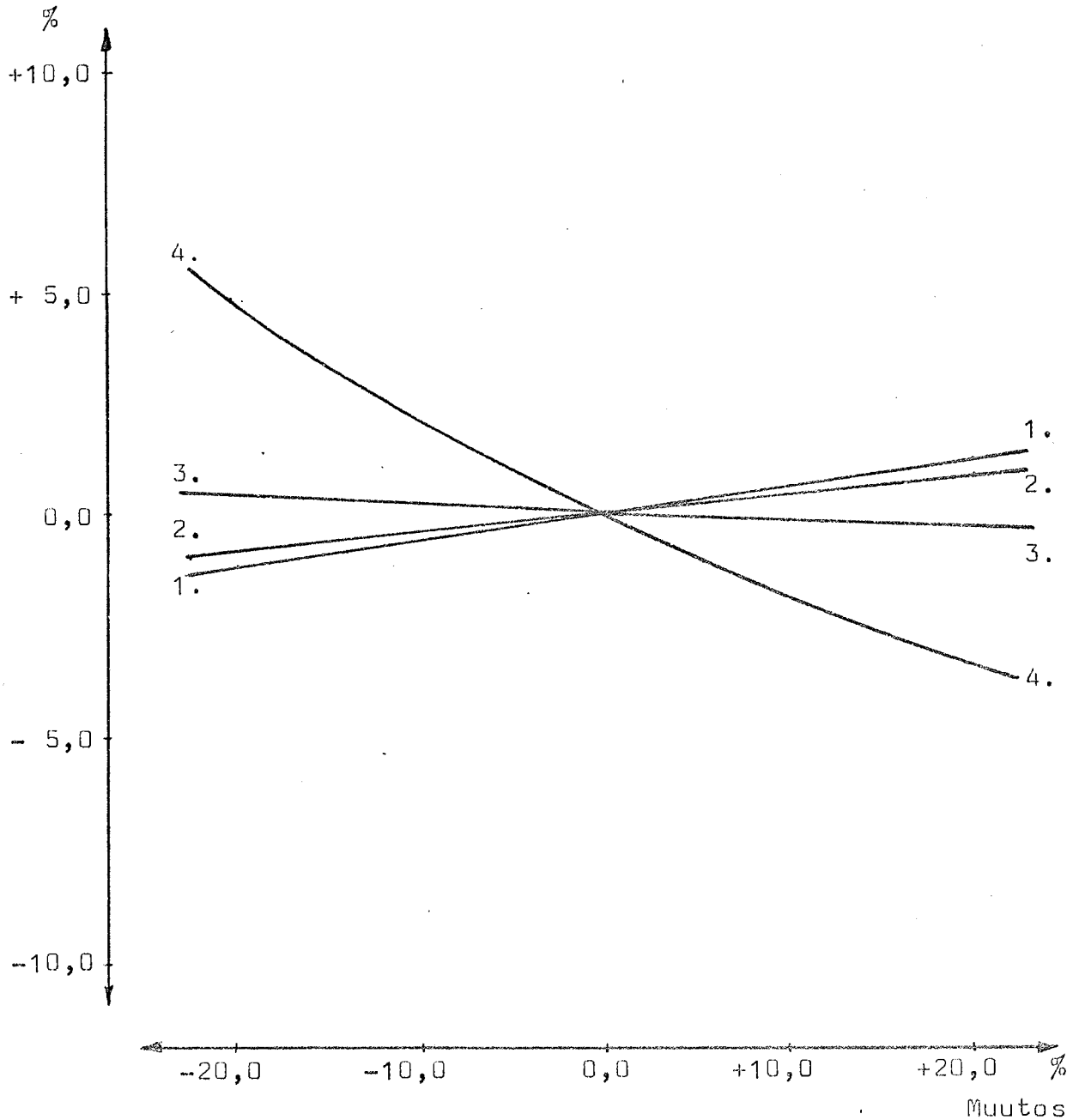


1. Investointikustannus
2. Laskentakorko
3. Takaisinmaksuaika
4. Tehokerroin
5. Huipunkäyttöaika

Lämmön ominaishinnan muutos



Lämmön ominaishinnan muutos



1. Investointikustannus
2. Laskentakorko
3. Takaisinmaksuaika
4. Huipunkäyttöaika

RASKASÖLJYLAITOKSEN HERKKYYSANALYYSIT

Lämmön ominaishinta

mk/MWh

160,0

Raskasöljylaitos

150,0

Turvelaitos

140,0

130,0

Lämpöpumppu

120,0



205 215 225 235 245 255 265 275 285 mk/MWh

Sähkön hinta

SÄHKÖN HINNAN VAIKUTUS LÄMMÖNTUOTANTOKUSTANNUKSIIN

Lämmön ominaishinta

mk/MWh

170,0

160,0

150,0

140,0

130,0

Raskasöljylaitos

Lämpöpumppu

Turvelaitos

36,8 39,1 41,4 43,7 46,0 48,3 50,6 52,9 55,2 mk/MWh

Turpeen hinta

TURPEEN HINNAN VAIKUTUS LÄMMÖNTUOTANTOKUSTANNUKSIIN

Lämmön ominaishinta

mk/MWh

180,0

170,0

160,0

150,0

140,0

130,0

Turvelaitos

Lämpöpumppu

Raskasöljylaitos

80,0

90,0

100,0

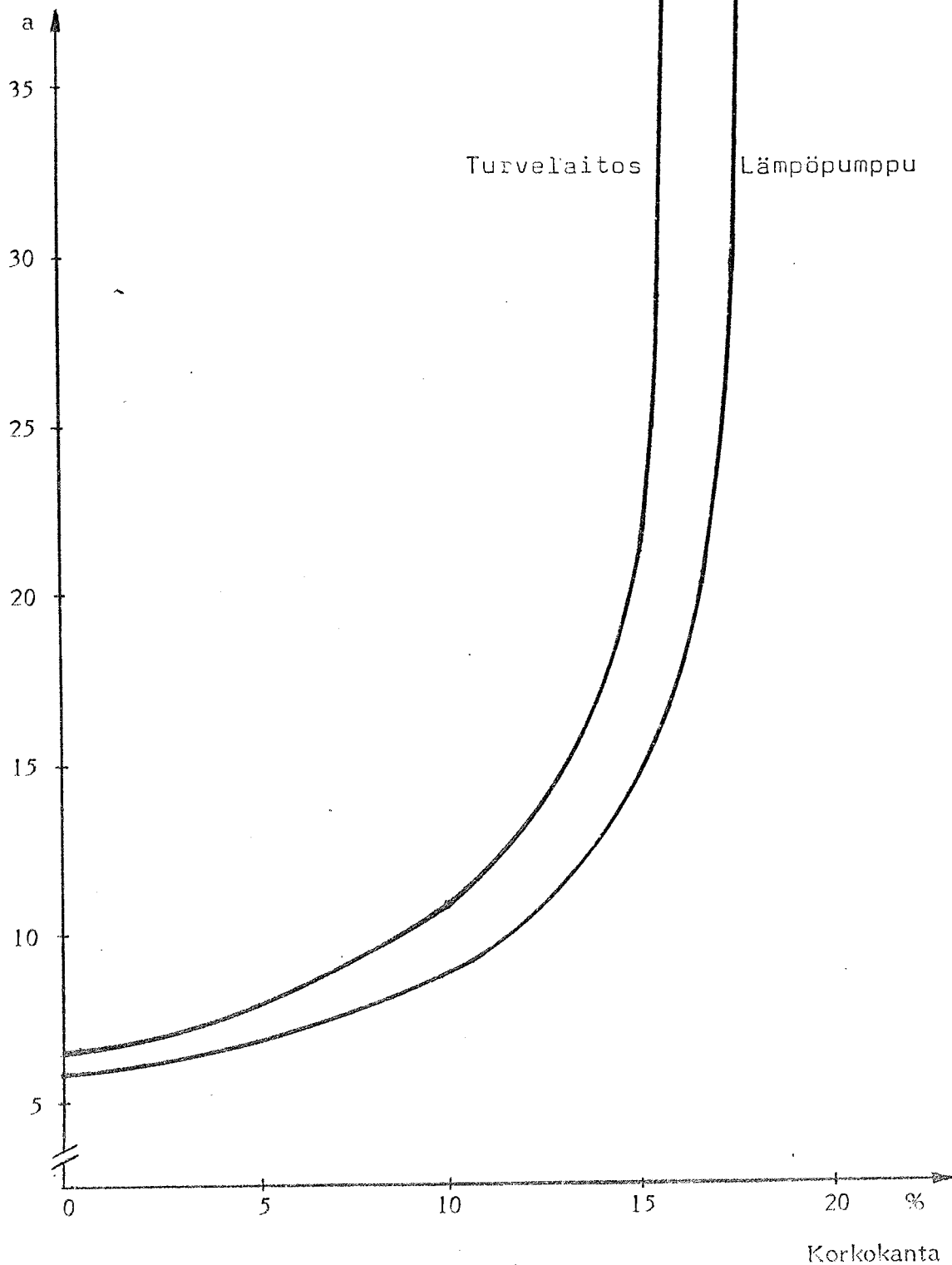
110,0

120,0 mk/MWh

Öljyn hinta

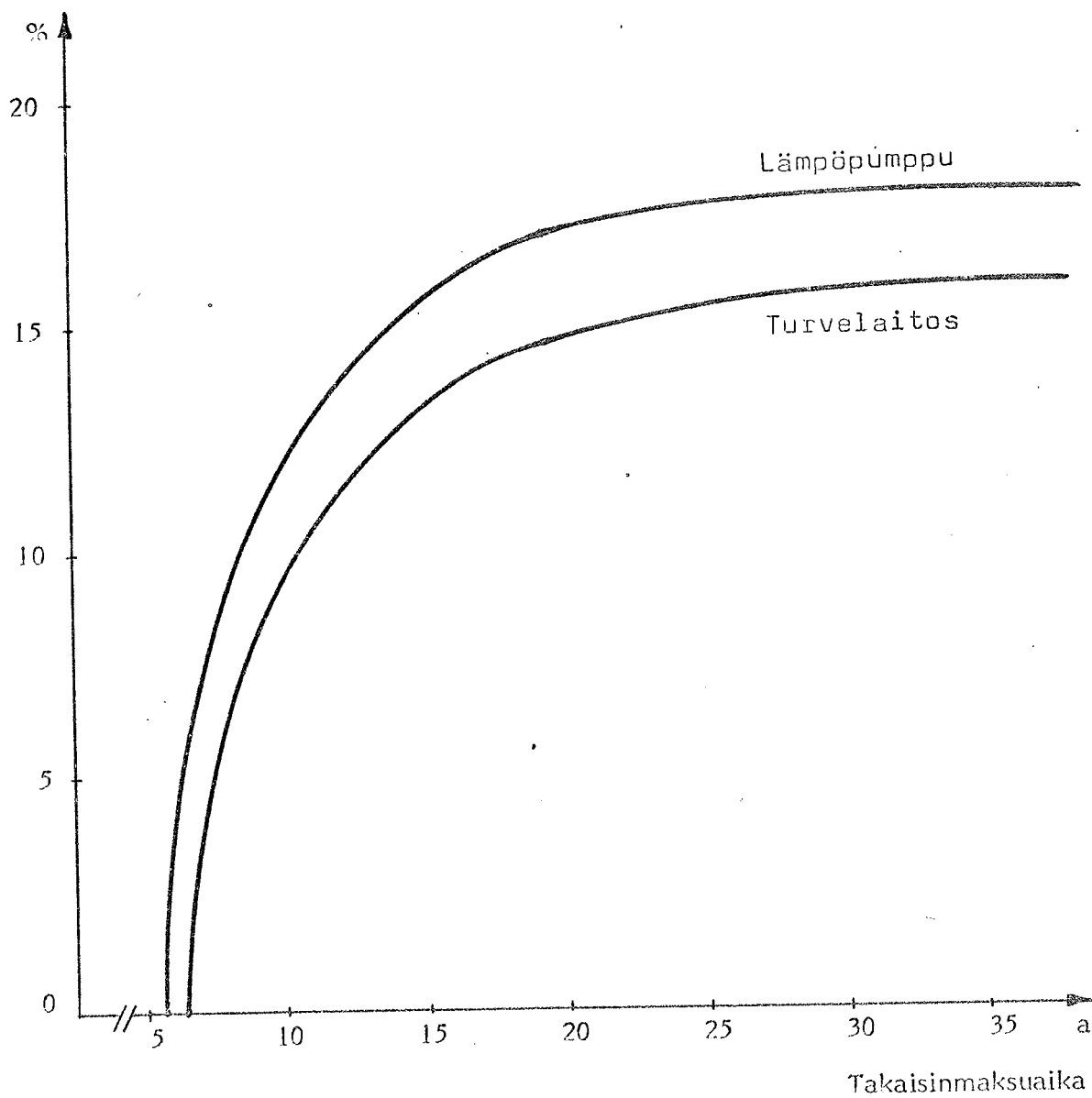
RASKAAN POLTTOÖLJYN HINNAN VAIKUTUS LÄMMÖNTUOTANTOKUSTANNUKSIIN

Takaisinmaksuaika



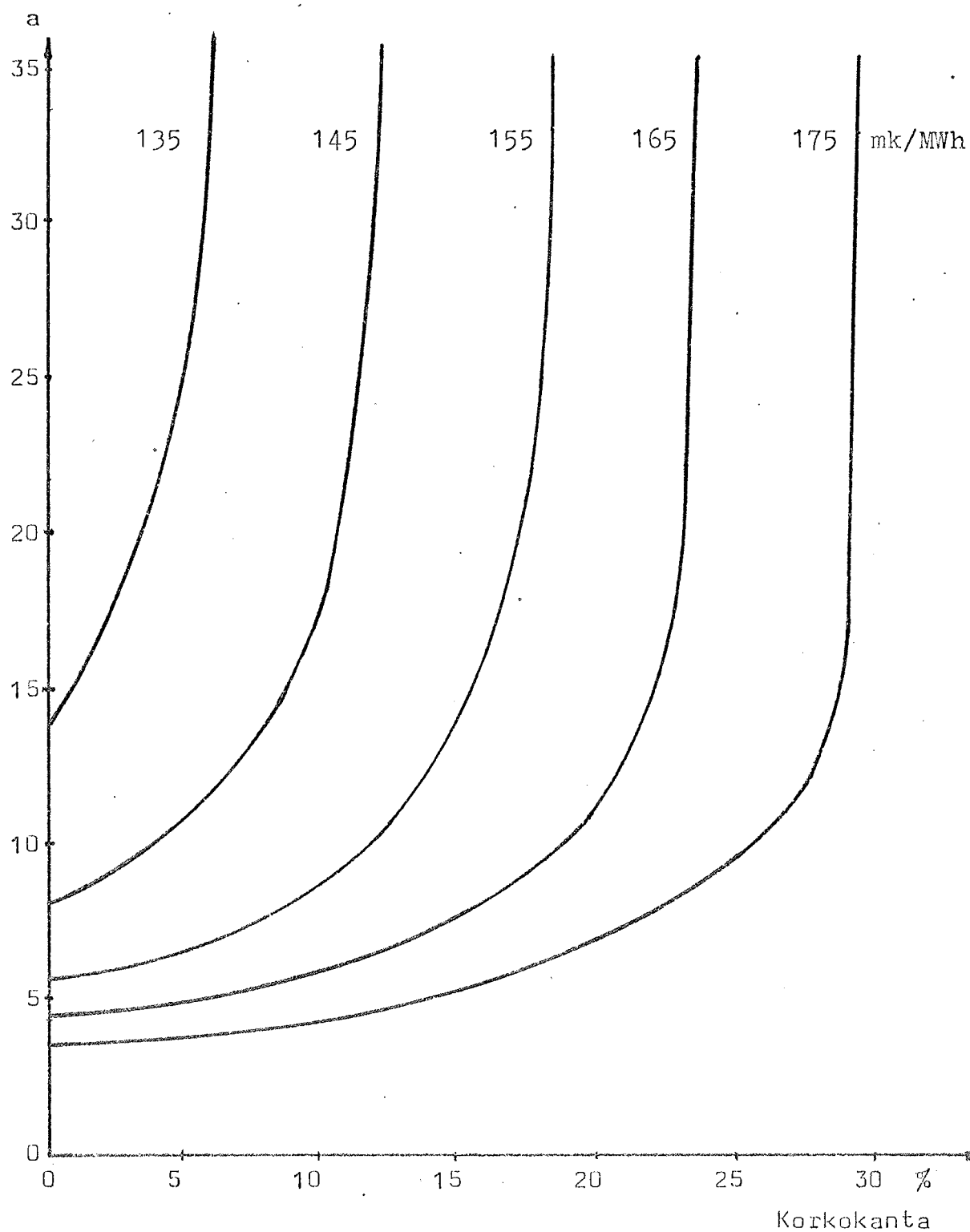
LÄMPÖPUMPUN JA TURVELAITOKSEN TAKAISINMAKSUAIKA

Sisäinen korko



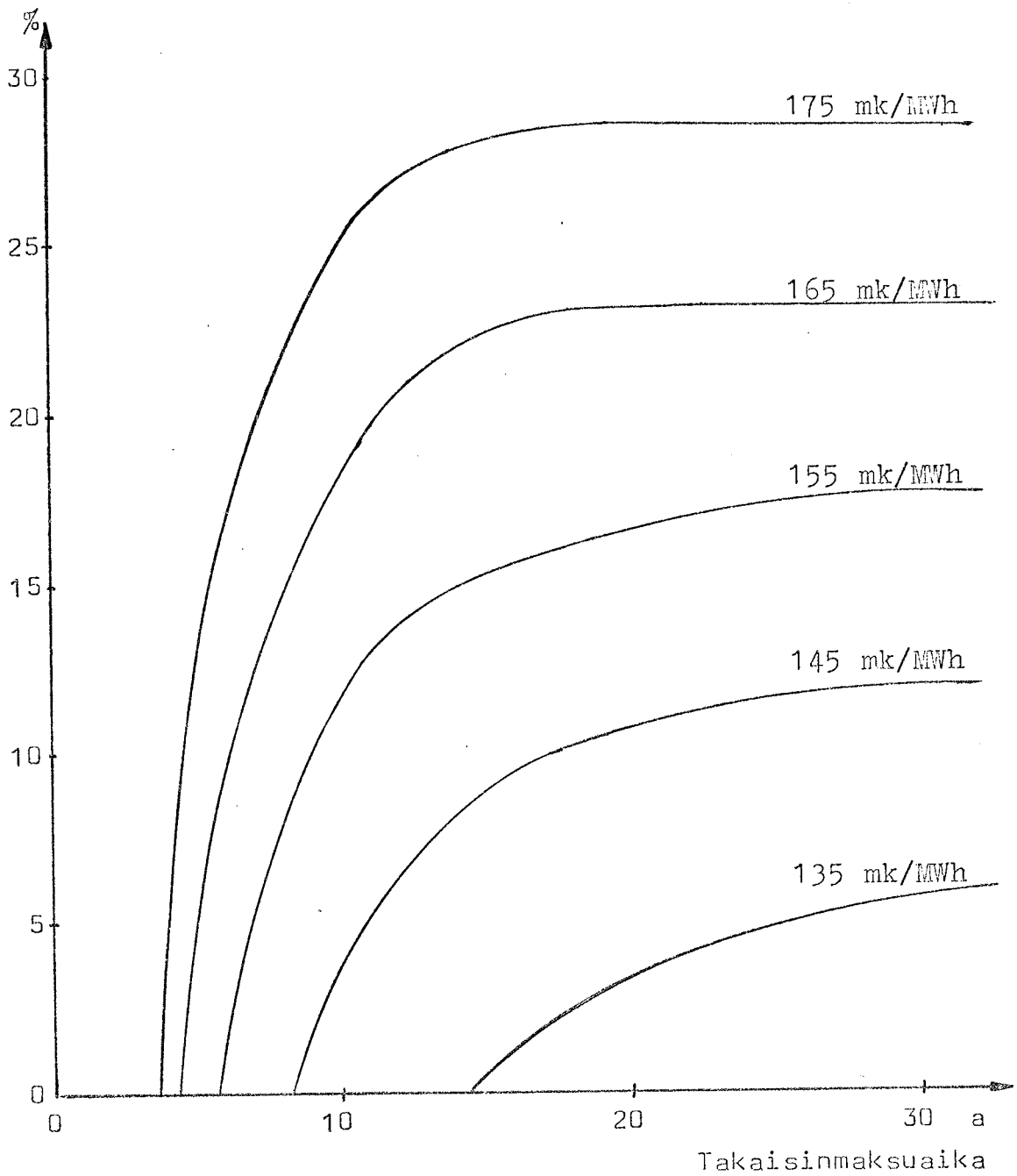
LÄMPÖPUMPUN JA TURVELAITOKSEN SISÄINEN KORKO

Takaisinmaksuaika



LÄMMÖN MYYNTIHINNAN VAIKUTUS TAKAISINMAKSUAIKAAN

Sisäinen korko



LÄMMÖN MYYNTIHINNAN VAIKUTUS SISÄISEEN KORKOON