



Matti Niemelä

PROSESSILÄMMÖN TALTEENOTTO JA HYÖDYNTÄMINEN TU- LOILMAN LÄMMITYKSESSÄ

PROSESSILÄMMÖN TALTEENOTTO JA HYÖDYNTÄMINEN TU- LOILMAN LÄMMITYKSESSÄ

Matti Niemelä
Opinnäytetyö
Kevät 2013
Talotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutusohjelma, LVI- projektin hoito

Tekijä(t):Matti Niemelä

Opinnäytetyön nimi: Prosessilämmön talteenotto ja hyödyntäminen tuloilman lämmityksessä

Työn ohjaaja: Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: 4/2013

Sivumäärä: 27 + 5 liitettä

Työ käsittelee prosessissa syntyvän lämmön talteenottoa lämmönsiirtimillä. Lämpö siirretään nestevirralla kuudensadan metrin päähän kaivoksen kuilun tuloilman lämmityspattereille. Tässä tarkastellaan prosessin painehäviöitä, tehoa sekä automatiikan toimintaa. Tavoitteena on suunnitelmien mukaisen toiminnan varmistaminen sekä etsiä parannuksia automatiikan toimintaan.

Putkiston painehäviöt on laskettu kirjallisuudesta löytyvillä laskentakaavoilla. Saatuja tuloksia on verrattu painemittareiden näyttämään lukemaan. Tehon mitauksessa käytettiin pintalämpötila-antureita ja dataloggeria. Saaduista tuloksista laskettiin tehoa sekä lämmönsiirtimien lämpötilahyötysuhde.

Työtä tehdessä löydettiin prosessin kriittisimmät tekijät. Kriittisin tekijä on happitehtaalta saatavan nesteen lämpötila, etenkin kovemmilla pakkasilla. Tähän tekijään vaikuttamalla voidaan prosessin tehoa nostaa huomattavasti. Painehäviölaskelmien ja mitatun painehäviön ero oli suuri. Tästä voidaan päätellä, että painehäviölaskennan kertavastusluvuissa on varmuuskerrointa.

Asiasanat: Lämmöntalteenotto, painehäviölaskenta, putkiston painehäviö, nestevirta, lämmönsiirrin

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	5
2 PROSESSILÄMMÖN TALTEENOTON TOIMINTA JA OHJAUS	6
2.1 Sulku- ja ohituspeltien ohjaus	8
2.2 Talteenoton pumppujen ohjaus	8
2.2.1 Ensiöpumppu	8
2.2.2 Toisiopumppu	10
3 KYTKENNÄT HAPPILAITOKSELLE	11
4 SULJETUN PUTKIVERKOSTON MITOITUS	13
4.1 Mitoitukseen vaikuttavia asioita	13
4.2 Kitkapainehäviö	14
4.3 Kertavastukset	18
5 TEHON LASKENTA	20
5.1 Mittaaminen	22
5.2 Lämmönsiirtimen lämpötilahyötysuhde	25
6 YHTEENVETO	26
LÄHTEET	
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Tämä työ käsittelee Kittilän kaivoksella sijaitsevaa Air Liquide Finland Oy:n happitehtaan prosessilämmön talteenottoa ja lämmön hyödyntämistä maanalaisen kaivoksen tuuletusnousun tuloilman lämmityksessä. Agnico-Eagle Finland Oy:n kaivosalueella sijaitseva happitehdas on osa kaivoksen rikastamon rikastusprosesseja. Kaivosyhtiö on työ- ja elinkeinoministeriön elinkeinoelämän energiatehokkuussopimuksen mukaisessa ohjelmassa. Energiatehokkuussopimuksen tarkoituksena on hyödyntää ylimääräistä hukkaenergiaa kaivoksen toiminnassa.

Talteenoton on rakentanut kohteeseen jälkikäteen kesällä 2012 YIT Kiinteistötekniikka Oy. Urakan putkimitoitukset ja painehäviölaskelmat olivat osa tätä opinnäytetyötä. Työssä tarkastellaan talteenoton toimivuutta tehon ja lämmönsiirtimen lämpöhyötysuhteen kautta sekä verrataan suunnitteluvaiheen laskelmia käyttöönoton jälkeiseen todelliseen tilanteeseen. Oleellisena osana ovat myös putkiston painehäviölaskelmat verrattuna toteutuneeseen tilanteeseen. Tarkoituksena on myös täsmentää automatiikan toimintaa ja löytää mahdollisia parannustoimenpiteitä. Hukkaenergian hyödyntämisellä pyritään taloudellisiin säästöihin.

Työssä esitetyt mitoituservot sekä laskelmat ovat salaisia, joten ne on esitetty liitteissä, joita ei julkaista työn mukana. Liitteet ovat ainoastaan kaivosyhtiön ja urakoitsijan käyttöön.

2 PROSESSILÄMMÖN TALTEENOTON TOIMINTA JA OHJAUS

Happitehtaan prosessissa syntyy suuri määrä lämpöä. Prosessilämpö on tähän saakka lauhdutettu ilmaan kuudella Fincoilin lauhduttimella. Kussakin lauhduttimessa on kuusi puhallinta. Puhaltimista on ollut käynnissä samanaikaisesti sellainen määrä, että tehtaalle palaavan nesteen lämpötila on saatu lauhdutettua haluttuun lämpötilaan. (Kuva 1.)

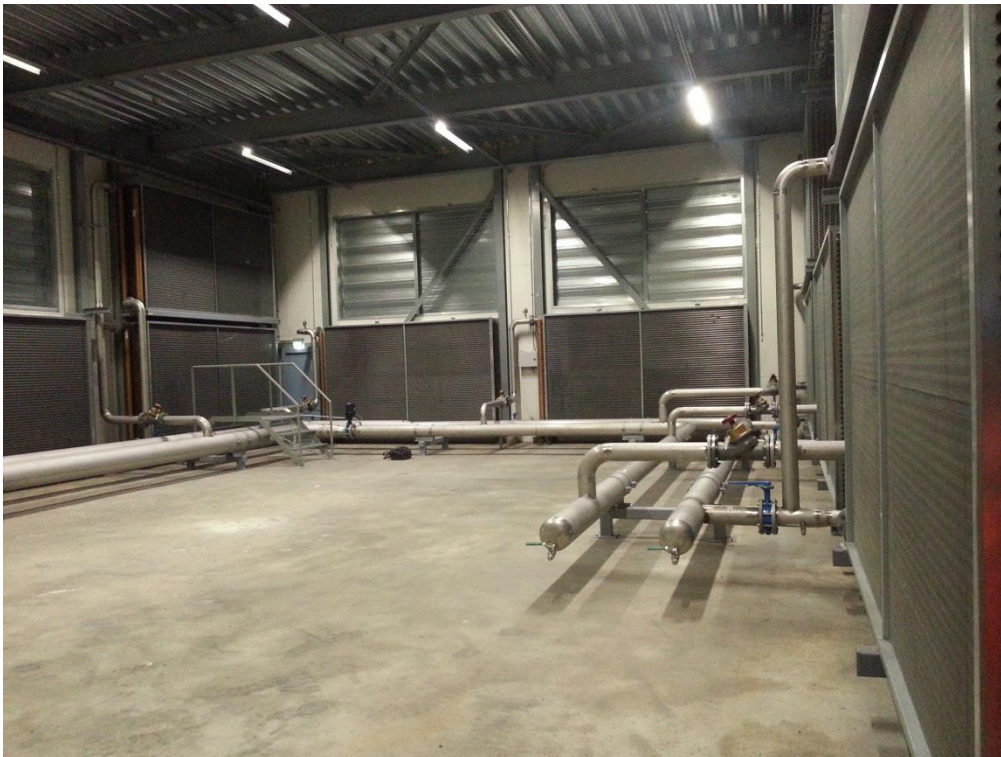


KUVA 1. Happitehtaan prosessilämmön lauhduttimet

Nyt rakennetussa lämmöntalteenottojärjestelmässä hukkalämpöä siirretään levylämmönsiirtimien kautta maanalaiseen kaivokseen puhallettavan ilman lämmittämiseen. Maan alle puhallettava ilma ei saa olla liian kylmää, ettei kaivoksen kuiluun ala muodostua jäätä.

Talteenottoa varten on rakennettu erillinen lämmönsiirrinrakennus sekä patterihuone. Näiden rakennusten etäisyys toisistaan on noin 550 metriä. Lämpö siirretään lämmönsiirtimiltä pattereille vesi-etyleeniglykoliliuoksella maanalaista, eristetyistä muoviputkielementistä rakennettua putkistoa pitkin. Muoviputkielementin eristekerroksessa kulkee kolme vuodonilmaisulankaa. Mikäli elementissä sattuisi vuoto, tulee automatiikkaan vuotohälytys. Vuotokohta on paikannettavissa maan päältä tähän tarkoitukseen tehdyllä skannerilla.

Patterihuoneessa on 12 patteria, joissa jokaisessa on omat sulkupellit, sekä kuusi pattereiden ohituspeltiä (kuva 2). Ohituspeltien koko on mitoitettu niin, että ilmavirran painehäviö on sama, tapahtuipa virtaus ohituspeltien tai pattereiden kautta. Normaalitilanteessa ohituspellit ovat kiinni ja pattereiden sulkupellit ovat auki. Kaikki kuiluun tarvitsema ilma imetään pattereiden läpi.



KUVA 2. Patterihuone sisältä

2.1 Sulku- ja ohituspeltien ohjaus

Mikäli patterilta palaavan veden lämpötila laskee alle asetusarvon, alkavat ohituspellit avautua asteittain. Tämä vähentää pattereiden läpi imettävän ilman määrää, jolloin myös kylmän ilman nestettä jäähdyttävä vaikutus vähenee. Mikäli ulkolämpötila on niin kylmää tai patterille tulevan veden lämpötila niin matala, ettei ohituspeltien aukaisu riitä pitämään paluunesteen lämpötilaa asetusarvossa, alkavat pattereiden sulkupellit sulkeutua yksi kerrallaan. Loppujen lopuksi tarvittaessa kaikki kuiluun imettävä ilma imetään ohituspeltien kautta. Patterit eivät enää luovuta lämpöä ilmaan ja neste ei näin ollen jäähdy pattereilla.

2.2 Talteenoton pumppujen ohjaus

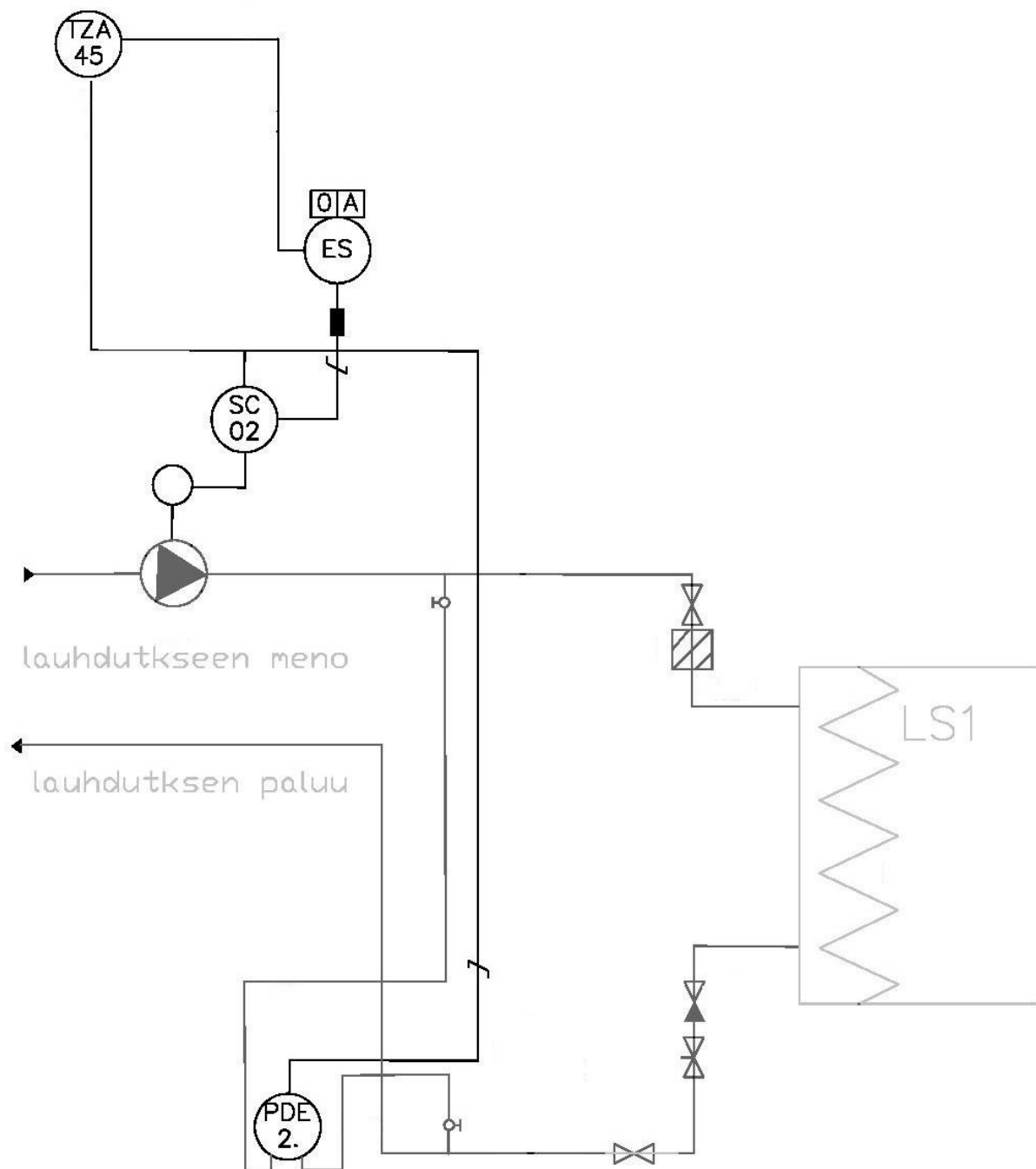
Prosessin lämpötiloja säädetään pumppujen kierroslukua säätämällä. Säätoihin vaikuttavat meno- ja paluunesteiden sekä ulkoilman lämpötilat.

2.2.1 Ensiöpumppu

Ensiöpuolen pumppu on taajuusmuuttajaohjattu pumppu, joka pumppaa nestettä happitehtaalta lämmönsiirtimelle. Happitehtaan lauhdutuspiirillä on oma pumppu, joka muuttaa lauhdutin-nestevirtaa tehtaan prosessin mukaan. Osa nestevirrasta pumpataan lämmönsiirtimien kautta lämmöntalteenottoon ensiöpumpulla. Koska happitehtaan pumpun pyörimisnopeuden vaihtelu vaikuttaa paineeseen ja virtaamaan putkien haaroituskohdassa, ei talteenoton ensiöpuolen pumppu voi pyöriä vakionopeudella.

Ensiöpuolen pumppua ohjaa paine-eromittaus lämmönsiirtimien yli. Kun paine-ero on vakio lämmönsiirtimelle menevän ja palaavan nesteen välillä, on virtaamakin vakio. (Kuva 3.)

Paine-eroon ja virtaamaan vaikuttaa nesteen lämpötilan kautta viskositeetti. Tässä prosessissa lämpötilavaihtelut ovat niin pieniä, ettei viskositeetin muutoksen vaikutusta oteta huomioon.



KUVA 3. Kaavio ensiöpuolen paine-eromittauksesta

2.2.2 Toisiopumppu

Toisiopuolen pumppu on taajuusmuuttajaohjattu pumppu, joka pumppaa toisiopiirin nestettä lämmönsiirtimiltä patterihuoneen pattereille. Pumpun kierrosnopeutta säädetään pattereilta palaavan nesteen lämpötilan mukaan. Paluunesteen lämpötilaa pyritään pitämään asetusarvossa. Mikäli paluuveden lämpötila on korkeampi kuin asetusarvo, pyörii pumppu asetetulla minimivirtaamalla, mikä on 80 % mitoitusvirtaamasta. Kun paluuvesi jäähtyy alle asetusarvon, alkaa toisiopuolen pumppu nostaa kierroksia ja pyrkien siten nostamaan paluuveden lämpötilan takaisin asetusarvoon.

Lisäksi kun vain toinen kaivoksen tuloilmapuhaltimista käy tai ulkoilman lämpötila on korkeampi kuin $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$, on toisiopuolen maksiminopeus 80 % mitoitusvirtaamasta.

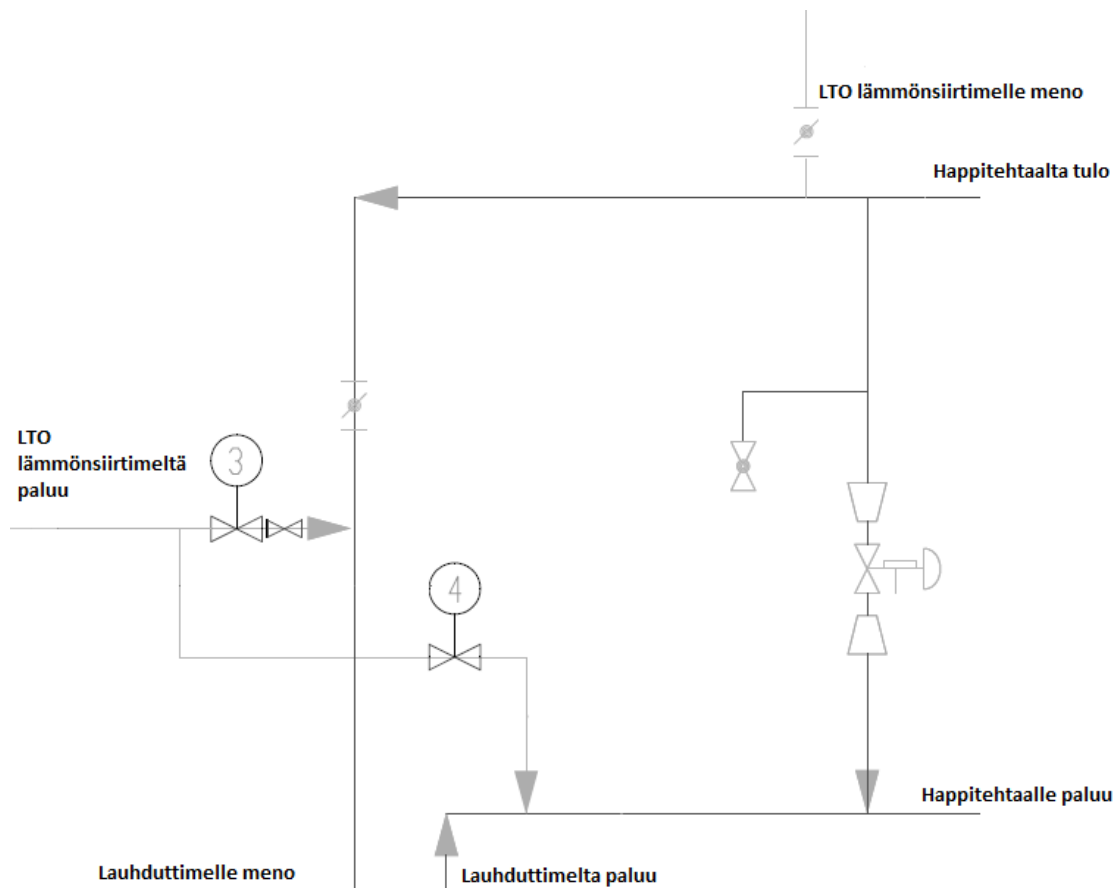
Jotta toisiopuolen pumppu käynnistyisi, tulee seuraavien ehtojen toteutua:

- Kaivoksen tuloilmapuhaltimista ainakin toinen käy.
- Ulkolämpötila on alle asetusarvon.
- Happitehtaan lauhdutinpumppu käy.

3 KYTKENNÄT HAPPILAITOKSELLE

Lämmöntalteenottoa varten on otettu putkihaarat happitehtaalta lauhduttimen meno- ja paluunesteputkista. Haarojen kautta pumpataan vakio nestevirta lämmönsiirtimille, jotka siirtävät lämmön kuiluun puhallettavan ilman lämmityspatteripiiriin. Happitehtaan lauhdutinnestevirtaama on niin suuri, ettei sitä kaikkea tarvitse kierrättää lämmönsiirtimien kautta. Tehoa pyritään saamaan mahdollisimman suurella meno- ja paluunesteen lämpötilaerolla.

Mikäli neste ei jäähdy riittävästi lämmönsiirtimissä, se palautetaan happitehtaan lauhduttimen menoputkeen. Näin neste kiertää vielä lauhduttimen kautta, ennen kuin palautuu happitehtaan prosessille. Mikäli neste jäähtyy riittävästi lämmönsiirtimillä, voidaan se palauttaa suoraan prosessiin lauhduttimien ohi. (Kuva 4.)



KUVA 4. Talteenoton putkiliitännät happitehtaalla

Moottoriventtiilit 3 ja 4 sulkeutuvat sekä avautuvat ristiin, eli vain jompikumpi venttiileistä on samanaikaisesti täysin auki. Venttiileiden asennolla määrätään, kiertääkö lämmönsiirtimeltä palaava neste lauhduttimien kautta vai ohittaako virtaama lauhduttimet ja palaa suoraan happitehtaan prosessiin. Kun neste on jäähtynyt lämmönsiirtimillä riittävästi, venttiili 3 sulkeutuu ja venttiili 4 avautuu, jolloin nestevirta ohittaa lauhduttimet. Mikäli neste lämmönsiirtimiltä palatessaan tarvitsee lisää jäähtymistä, kiertää neste lauhduttimien kautta.

4 SULJETUN PUTKIVERKOSTON MITOITUS

Suljetulla putkiverkostolla tarkoitetaan sellaista kiertopiiriä, jossa menoputkea pitkin pumpattava aine palaa paluuputkea pitkin takaisin pumpulle. Verkoston tilavuus ja nesteen määrä verkostossa on vakio. Vain lämpölaajeneminen vaikuttaa tilavuuksiin hieman. Suljetussa verkostossa ei huomioida staattista nostokorkeutta, vaan pumpun mitoitukseen vaikuttavat vain verkoston virtausvastukset.

4.1 Mitoitukseen vaikuttavia asioita

Putkimitoituksiin on alan kirjallisuudessa paljon mitoituskriteereitä. Ohjeet ja kriteerit vaihtelevat eri lähteissä. Mitoitusperusteet tuleekin valita kohteen ja käyttötarkoituksen mukaan. Mitoituksiin vaikuttavia seikkoja on monia, joista kaikki eivät ole merkittäviä jokaisessa kohteessa. Asuinrakentamisen ja teollisuuden mitoitusperusteet eroavat toisistaan huomattavasti. Pääasiallisesti mitoituksiin vaikuttavat äänitekniset asiat, säädettävyyys, pumppauskustannukset, investoinnit sekä käyttöikä.

Materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa äänitekniisiin asioihin, investointiin ja kestävyteen sekä jonkin verran pumppauskustannuksiin, kun taas putkikoko vaikuttaa kaikkiin edellä mainittuihin tekijöihin. Liian pieni putki aiheuttaa kovan virtausnopeuden, joka taas aiheuttaa suuria pumppauskustannuksia, ääntä ja putkiston nopeaa kulumista etenkin mutka- ja haarakohdissa. Liian suuri putkikoko aiheuttaa suuria investointeja ja monesti huonoa säädettävyyttä. Putkikoon valinnassa tulee löytää mahdollisimman kokonaistaloudellinen ratkaisu.

4.2 Kitkapainehäviö

Kitkavastukset syntyvät virtaavan aineen sisäisestä kitkasta eli viskositeetista sekä virtaavan aineen ja putken seinämän välisestä kitkasta. Suoran putken kitkavastus turbulenttisessa virtauksessa on suoraan verrannollinen dynaamiseen paineeseen sekä putkipituuteen. Laminaarisessa virtauksessa kitkapaine on suoraan verrannollinen virtausnopeuteen ja kääntäen verrannollinen putken sisähalkaisijaan. (1, s. 9.)

Kitkapainehäviö saadaan laskettua kaavasta 1 (2).

$$\Delta P_k = \lambda * \frac{L}{d_s} * \frac{1}{2} * \rho * v^2 = \lambda * \frac{L}{d_s} * \frac{1}{2} * P_d$$

KAAVA 1

ΔP_k = Kitkapainehäviö, kPa

λ = Kitkavastus kerroin

L = putkipituus, m

d_s = Putken sisähalkaisija, m

ρ = Nesteen tiheys, kg/m³

v = virtaus nopeus, m/s

P_d = Dynaaminen paine putkessa, Pa

Kitkavastuskerroin riippuu aineominaisuuksista, virtauksen luonteesta sekä putken sisäpinnan karheudesta. Putken karheutta kuvataan suhteellisella karheudella k/d_s , joka kuvaa putken sisäpinnan epätasaisuuksien keskimääräisen karheuden suhteessa putken sisähalkaisijaan. (2.)

Virtauksen luonnetta kuvataan Reynoldsin luvulla R_e . (kaava 2). Mikäli Reynoldsin luku on alle 2320, on virtaus laminaarinen, ja jos yli, virtaus on turbulenttinen. Reynoldsin luku on virtausnopeuden ja putken sisähalkaisijan tulon suhde virtaavan aineen kinemaattiseen viskositeettiin. (2.)

$$R_e = \frac{v \cdot d_s}{\vartheta}$$

KAAVA 2

R_e = Reynoldsin luku

v = Virtausnopeus, m/s

ϑ = Kinemaattinen viskositeetti, m^2/s

d_s = Putken sisähalkaisija, m

Tässä työssä esiintyvät virtaukset ovat kaikki turbulenttisia, joten keskitytään turbulenttisen virtauksen laskentakaavoihin.

Turbulenttisen virtauksen kitkavastuskertoimelle on olemassa useita kokemusperäisiä laskentakaavoja. Putken hydraulinen sileys vaikuttaa siihen mitä kaavaa tulisi käyttää. Hydraulinen sileys s määritellään kaavalla 3. (2.)

$$s = R_e * \frac{k}{d}$$

KAAVA 3

s = Putken hydraulinen sileys

k = Absoluuttinen karheus, m

d = Putken sisähalkaisija, m

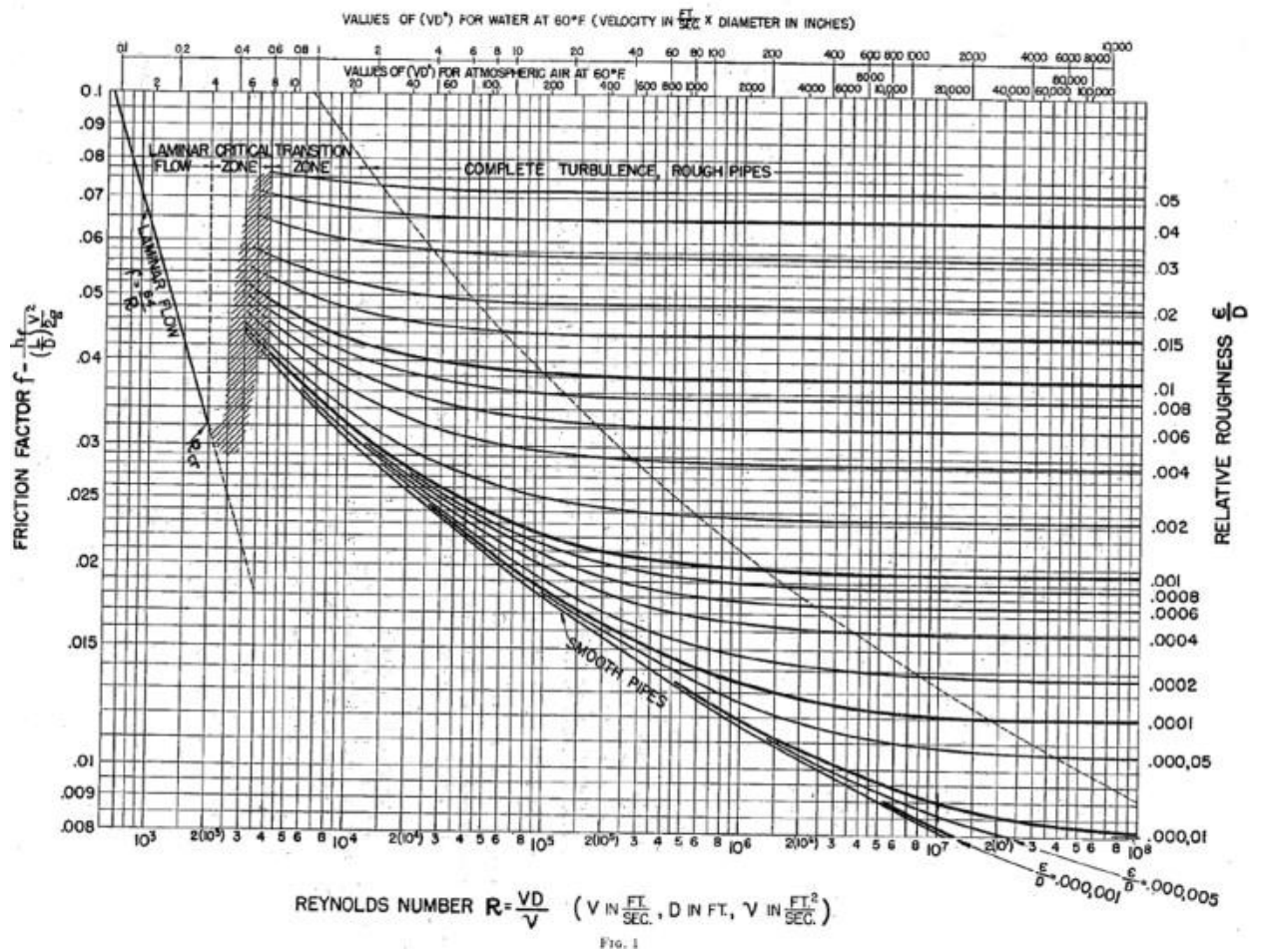
Jokaiselle alueelle on olemassa yhtälöitä erilaisiin tilanteisiin. Usein näiden kaavojen käyttö vaatii kuitenkin iterontia. Yleensä voidaan laskemisen sijaan käyttää Moodyn käyrästä (kuva 5). Moodyn yhtälö on esitetty kaavassa 4. (2.)

$$\lambda = 0,0055 + 0,15 * \sqrt[3]{\frac{k}{d}} \quad \text{KAAVA 4}$$

λ = Kitkavastus kerroin

k = Absoluuttinen karheus, m

d = Putken sisähalkaisija, m



KUVA 5. Moodyn diagrammi (3)

Kitkavastuskertoimen laskentaan on olemassa niin sanottu Ivi-alalla yleisesti käytetty kaava, joka soveltuu tavanomaisiin taloteknisiin laskentatapauksiin (kaava 5) (2).

$$\lambda = 0,25 * \left[\log \left(\frac{k}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,8}} \right) \right]$$

KAAVA 5

λ = Kitkavastuskerroin

k = absoluuttinen karheus, m

d = putken sisähalkaisija, m

Re = Reynoldsin luku

4.3 Kertavastukset

Putkien osat aiheuttavat pyörteilyä virtauksessa. Tämä kuluttaa energiaa. Kuluneen energian määrää kuvataan kertavastuksella ξ . Kertavastuskerroin on suuri niissä osissa ja varusteissa, joissa virtaussuunta ja nopeus muuttuvat runsaasti (4, s.139.)

Jokainen epäjatkuvuuskohta aiheuttaa putkivirtauksessa kertavastuksen. Näitä ovat muun muassa mutkat, haarat, venttiilit, suodattimet, supistukset. Haaroille, mutkille ja supistuksille löytyy kertavastuskertoimia useista eri lähteistä. Venttiilien, suodattimien ja muiden laitteiden kertavastusluvut saadaan valmistajalta.

Kun kertavastuskerroin tunnetaan, putkiosan aiheuttama painehäviö saadaan kaavasta 6. (2).

$$\Delta p_{\xi} = \xi * \frac{1}{2} * \rho * v^2$$

KAAVA 6

Δp_{ξ} = Kertavastuksen aiheuttama painehäviö, Pa

ξ = Kertavastuskerroin

ρ = Virtaavan nesteen tiheys, kg/m³

v = Virtausnopeus, m/s

Putkiston painehäviölaskelmat ja venttiileiden esisäädöt esitetään liitteessä 1.

5 TEHON LASKENTA

Pattereilla nesteestä ilmaan siirretyn tehon määrään vaikuttavat

- virtaavan nesteen määrä
- nesteen lämpötilamuutos pattereilla
- virtaavan nesteen tiheys
- nesteen ominaislämpökapasiteetti.

Ominaislämpökapasiteetti kuvaa nesteen itseensä sitovaa energian määrää eli sitä kuinka paljon energiaa sidotaan tai luovutetaan, kun yksi kilo nestettä muuttaa lämpötilaansa yhden asteen celsiusta.

Nesteen tiheyteen vaikuttaa sen lämpötila. Eri aineille löytyy taulukoita tiheyksistä eri lämpötiloissa. Tiheys katsotaan prosessin keskilämpötilan mukaan. Laskennassa on käytetty arvoja taulukosta 1.

TAULUKKO 1. Etyleeniklygolin aineominaisuuksia

Etyleeniglykoli - vesi, $C_2H_4(OH)_2 + H_2O$

Pitoisuus [p-%]	14,0	23,6	30,5	36,2	41,1	45,4	49,3	52,8	56,1
Jäätympiste [°C]	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45

Tiheys, [kg/m³]

[°C]	14,0p-%	23,6p-%	30,5p-%	36,2p-%	41,1p-%	45,4p-%	49,3p-%	52,8p-%	56,1p-%
40	1010	1021	1030	1036	1043	1049	1053	1057	1060
30	1013	1026	1035	1042	1048	1054	1059	1063	1066
20	1017	1030	1039	1047	1054	1060	1065	1069	1073
10	1019	1033	1043	1051	1058	1065	1070	1074	1078
0	1020	1035	1046	1055	1062	1070	1074	1079	1083
-5	1021	1036	1047	1057	1064	1072	1076	1081	1085
-10		1037	1048	1058	1066	1074	1078	1083	1087
-15			1049	1059	1068	1076	1080	1085	1089
-20				1060	1069	1077	1082	1087	1091
-25					1070	1078	1084	1089	1093
-30						1079	1085	1090	1094
-35							1086	1091	1095
-40								1092	1096
-45									1097

Ominaislämpökapasiteetti, [kJ/kgK]

[°C]	14,0p-%	23,6p-%	30,5p-%	36,2p-%	41,1p-%	45,4p-%	49,3p-%	52,8p-%	56,1p-%
40	4,040	3,910	3,795	3,675	3,570	3,480	3,425	3,355	3,295
30	4,03	3,890	3,760	3,640	3,530	3,430	3,370	3,295	3,235
20	4,02	3,865	3,730	3,605	3,490	3,385	3,320	3,240	3,170
10	4,01	3,840	3,700	3,565	3,445	3,340	3,285	3,180	3,110
0	4,000	3,820	3,665	3,525	3,405	3,295	3,215	3,125	3,050
-5	4,000	3,808	3,650	3,508	3,383	3,273	3,188	3,095	3,020
-10		3,795	3,635	3,490	3,360	3,250	3,160	3,065	2,990
-15			3,620	3,470	3,340	3,228	3,135	3,038	2,960
-20				3,450	3,320	3,205	3,110	3,010	2,930
-25					3,300	3,183	3,083	2,980	2,900
-30						3,160	3,055	2,950	2,870
-35							3,030	2,925	2,840
-40								2,900	2,810
-45									2,780

Kun tiedetään virtaama, ominaislämpökapasiteetti, nesteen tiheys sekä meno- ja paluunesteen lämpötilat, voidaan pattereilla nesteestä ilmaan siirretty teho laskea kaavalla 7.

$$\phi = q_v * \rho * C_p * (T_m - T_p)$$

KAAVA 7.

ϕ = Teho, kW

q_v = Virtaama, m³/s

ρ = Virtaavan nesteen tiheys, kg/m³

C_p = Ominaislämpö kapasiteetti, kJ/kg°C

T_m = Patterille menevän nesteen lämpötila, °C

T_p = Patterilta palaavan nesteen lämpötila, °C

5.1 Mittaaminen

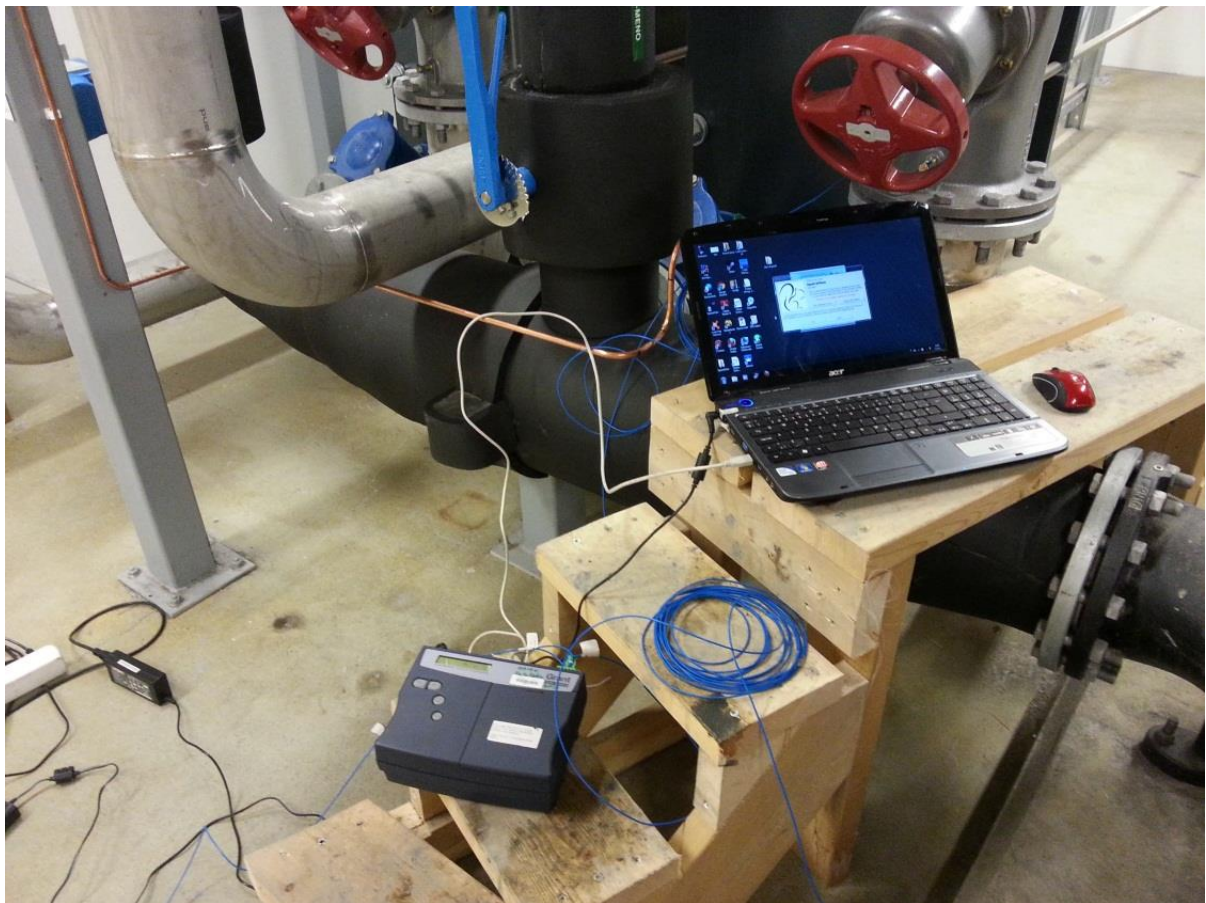
Työtä tehtäessä prosessin toimintaa on mitattu dataloggerilla vuorokauden ajan (kuva 6). Loggerilla talletettiin toisiopuolen meno- ja paluuveden lämpötilat sekä ulkolämpötila kahden sekunnin välein. Mittauksen alussa otettiin ylös myös lämmönsiirtimen ensiöpuolen tulo- ja paluunesteen lämpötilat lämmönsiirtokertoimen laskentaa varten. Prosessissa mitattavat lämpötilaerot ovat suhteellisen pieniä, joten mittauksen mittavirheen merkitys kasvaa. Käytettävissä olevilla mittalaitteilla ei voi saada täysin absoluuttista mittaustulosta. Menetelmävirheitä johtuvat mittavirheet pyrittiin minimoimaan käyttämällä uusia mitta-antureita, anturin ja ympäristön välisellä lämpöeristyksellä sekä putken ja anturin välisellä puhtaalla kontaktipinnalla.

Lämmönsiirtimen lämmönsiirtohyötysuhdetta mitattaessa käytettiin samoja antureita sekä ensiö- että toisiopuolen mittauksessa. Anturipari kytkettiin siten että sama anturi oli molemmissa mittauksissa aina lämpimämmässä putkessa ja päinvastoin. Tällä varmistetaan, että mahdollinen anturista johtuva mittavirhe on

kummallakin puolen lämmönsiirrintä sama, eli virhe on systemaattinen eikä näiltä osin vaikuta laskelman lopputulokseen.

Ulkolämpötila-anturi laitettiin ulos ilmanvaihdon korvausilmapellin välistä. Ulkolämpötilassa oli paljon nopeita muutoksia. Tämä johtuu siitä, että mittaus tapahtuu isolla tehdasalueella, jossa on paljon lämmönlähteitä ja tuuli liikuttaa ilmaa. Tietystä suunnasta tuullessa voi anturille tulla normaalia ulkolämpötilaa lämpimämpää ilmaa. Ulkolämpötilan mittavirheet eivät vaikuta laskettuihin tehoihin.

Pattereilta palaavan nesteen pinalämpötila-anturi kiinnitettiin putken kylkeen ennen putken haaroittumista kahdelle eri lämmönsiirtimelle. Menoveden lämpötila-anturi kiinnitettiin lämmönsiirtimen menoputkien yhdistymiskohdan jälkeen.
(Kuva 7.)



KUVA 6. Siirrettävää mittakalustoa ja mittausta työmaaolosuhteissa

Dataloggeri kerää tietoa, joka tallennetaan kannettavalle tietokoneelle. Tämän tyyppinen mittalaiteyhdistelmä on hyvä siirrettävyyden ja monipuolisten käyttömahdollisuuksien vuoksi. Lyhytaikaisia mittauksia voidaan suorittaa myös olosuhteissa, joissa ei ole verkkovirtaa saatavana, koska tietokonetta ja dataloggeria voidaan käyttää myös akkuvirralla.



KUVA 7. Ppintalämpötila-anturi kiinnitettynä putkeen

Pintalämpötila-anturi on teipattu putkeen Armaflex-eristeteipillä. Eristävä teippi estää lämpötilan vääristymisen ympäristön lämpötilan vaikutuksesta. Mittaustilanteessa huoneilman lämpötila on noin 20 °C, kun taas paluunesteen lämpötila on huomattavasti tätä alempi.

Mitatut lämpötilat ja tehot esitetään liitteissä 2 ja 3.

5.2 Lämmönsiirtimeen lämpötilahyötysuhde

Lämmönsiirtimeet mitoitetaan tilaajan antamien lähtötietojen mukaan. Näitä tietoja ja prosessilla saavutettavia tavoitteita käyttäen määritetään mitoituslämpötilat.

Harvoin prosessi toimii kuitenkaan juuri mitoitetuilla lämpötiloilla, joten prosessin toimivuutta voidaan laskea erilaisilla laskentakaavoilla. Tässä prosessissa yksi merkittävimmistä asioista on lämmönsiirtimien siirtämä teho eli lämmönsiirtohyötysuhde (kaava 8). Se kuvastaa siirrettyä energiaa suhteessa siirrettävissä olevaan energiaan.

$$\varepsilon = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1}$$

KAAVA 8.

ε = Lämpötilahyötysuhde

T_1 = Vastaanottavan virtauksen lämpötila ennen lämmönsiirrintä, °C

T_2 = Vastaanottavan virtauksen lämpötila siirtimeen jälkeen, °C

T_3 = Luovuttavan virtauksen lämpötila ennen lämmönsiirrintä, °C

Lämmönsiirtohyötysuhteen laskelmat on esitetty liitteessä 4.

6 YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin teollisen lämmöntalteenottoprojektin mitoituksia sekä saatuja tuloksia. Tarkoituksena on todeta projektin laskentavaiheen ja todellisen käyttötilanteen mahdollisia eroavaisuuksia sekä yrittää löytää prosessiin parannusehdotuksia. Tämän kaltaisilla teollisuuden energian säästöön pyrkivillä parannustoimenpiteillä on jo suuri merkitys sekä taloudellisesta, että ympäristöä säästävästä näkökulmasta.

Talteen otettavan energian määrä on suuri, vaikka luvut eivät ole aivan lähtötietojen tasolla. Happitehtaan automatiikkaa muuttamalla päästäisiin prosessissa mitoitus-tehoihin. Pudottamalla kovilla pakkasilla happitehtaan lauhdutin-nestepumpun kierroksia, saataisiin lauhduttimien läpi virtaavan nesteen määrää pudotettua. Kokonaisvirtaaman pienentyessä ja lämmönsiirtimien läpi virtaavan nesteen määrän pysyessä vakiona suhteellisesti suurempi osa virtaamasta ja sen mukaan tehosta saataisiin siirrettyä lämmönsiirtimien kautta lämmityspattereille. Lauhdutettava teho pysyisi samana, mutta lämpötilaero kasvaisi. Työssä ei tutustuttu happitehtaan automatiikkaan, joten muutosmahdollisuudet vaativat lisätutkimusta.

Isossa projektissa painehäviölaskun mahdolliset mitoituskriteereiden virheet ja varmuudet korostuvat. Tämän projektin putkistopainehäviöt ovat laskennallisesti suuremmat kuin todellisuudessa. Tästä voidaan päätellä, että etenkin mutkissa, haaroissa, supistuksissa sekä laitteissa on kertavastuskertoimissa jonkin verran varmuuskerrointa. Putkiston painehäviötä laskiessa ei siis ole tarvetta lisätä itse varmuutta laskentaan. Toisaalta valmistajan ilmoittama painehäviö lämmönsiirtimelle oli pienempi kuin käyttötilanteessa paine-eromittauksella saatu. Tämä ero ei silti ole sen suurempi mitä putkiston painehäviölaskuissa oli varmuutta, joten ero ei vaikuttanut valitun pumpun nostokorkeuden riittämiseen.

Kaiken kaikkiaan prosessi toimii halutulla tavalla, vaikka kaikki prosessiarvot eivät ole aivan lähtötietojen mukaisia. Teolliset prosessit ovat muuttuvia, ja optimaalisen ohjauksen saavuttaminen kaikissa olosuhteissa on vaikeaa. Tämän

saavuttamiseksi vaaditaan prosessin pitempää käyttöä sekä toiminnan seuranta eri olosuhteissa.

LÄHTEET

1. Nuora, Harri 2008. Suljettujen putkiverkostojen mitoitusperusteiden tarkastelu. Pori: Satakunnan ammattikorkeakoulu, energiatekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
2. Mäkelä, Veli-Matti 2013. T630203 Virtaustekniikka 3op. Opintojakson oppimateriaali syksyllä 2012. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
3. Supplementary Figure 1. Moody's diagram (Refs. [6]) is used for working out the pressure drop down straight pipes. Science Direct. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512001792>. Hakupäivä 20.3.2013
4. Seppänen, Olli 2001. Rakennusten lämmitys. 2. päivitetty painos. Jyväskylä. Gummerus kirjapaino Oy. 444 s

