

Timo Erhoma

FCC-yksikön reaktorin ja regeneraattorin lämpöpölväviöt

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kemiantekniikka

Insinöörityö

5.2.2017

Tiivistelmä

Tekijä Otsikko	Timo Erhomaa FCC-yksikön reaktorin ja regeneraattorin lämpöhäviöt
Sivumäärä Aika	41 sivua 5.2.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kemiantekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja(t)	DI Esa Tamminen DI Venla Kuuluvainen Lehtori Timo Seuranen
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Neste Oyj:n Toiminnan kehittäminen -osastolle. Työn tarkoituksena oli laskea FCC-yksikön reaktorin, riserin ja regeneraattorin lämpöhäviöt. Lämpöhäviöistä saatua tietoa käytetään yksikön tasemonitorointimallissa.</p> <p>Teoriaosassa käytiin lämmönsiirron teoriaa ja sitä, kuinka lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla: johtamalla, konvektiolla ja säteilemällä sekä tarkasteltiin erityyppisiä seinämärakenteita.</p> <p>Soveltavassa osassa esiteltiin prosessilaitteistoa ja siihen liittyviä erityyppisiä seinämärakenteita. Laskennan avulla tehtiin johtopäätöksiä siitä minkä tyyppisiä asioita tulisi laskennassa ottaa huomioon.</p> <p>Työn tuloksena saatiin laskettua tarkasteltavan laitteiston pinta-ala ja lämpöhäviöt neljässä erityyppisessä prosessiolosuhteessa.</p>	
Avainsanat	lämpöhäviö, lämmönsiirto, johtuminen, konvektio, säteily

Abstract

Author Title	Timo Erhomaa FCC-unit's reactor, riser and regenerator heat loss
Number of Pages Date	41 pages 5 February 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Specialisation option	
Instructor(s)	Esa Tamminen, MSc Venla Kuuluvainen, MSc Timo Seuranen, Senior Lecturer
<p>This thesis was made for Neste Oyj's Competence Center. The purpose of the thesis was to calculate heat loss for the FCC-unit's reactor, riser and regenerator. The calculated heat loss is used in the monitoring model of the FCC unit.</p> <p>The theoretical part presents the basics of the heat transfer theory and describes how the heat can be transferred using three different mechanisms: conduction, convection and radiation. The theoretical part also examines different types of wall structures.</p> <p>The practical part describes the process equipment studied and the different types wall structures used with the equipment. The results of the calculations are used to make conclusions about what types of things should be taken into consideration in the calculation.</p> <p>As a result of this thesis, the total surface area of the studied process section was calculated. Heat losses were calculated for four different types of process conditions.</p>	
Keywords	heat loss, heat transfer, conduction, convection, radiation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Yritys- ja yksikköesittely	1
2.1	Neste Oyj	1
2.1.1	Yhtiön historiaa	1
2.1.2	Neste tänään	2
2.1.3	Porvoon jalostamotoiminnot	2
2.2	FCC-yksikkö	3
3	Lämmönsiirron teoria	5
3.1	Lämpövirta	5
3.2	Lämmön konvektio	6
3.3	Lämmön johtuminen	9
3.4	Lämpösäteily	13
3.5	Lämmön siirtyminen monikerroksisen seinämän läpi	16
4	Lämpöhäviöiden määrittäminen	21
4.1	Tasealue	21
4.2	Lämmönsiirto pinta-alojen määrittäminen	22
4.3	Seinämärakenteiden lämmönjohtavuus	24
4.4	Säteilylämpöhäviön laskenta	36
4.5	Kokonaislämpöhäviön määrittäminen	37
5	Johtopäätökset	39
	Lähteet	40

Lyhenteet

FCC	Fluid Catalytic Cracking. Leijukatalyyttinen krakkaus.
KTO3	Kaasujen talteenotto
LP	Linear Programming. Lineaarinen optimointi.
NEXBTL	Next Generation Biomass to Liquid. Uusiutuva biodiesel.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön aihe on tullut Neste Oyj:n Toiminnan kehittäminen -osastolta. FCC-yksikkö sijaitsee Nesteen Porvoon jalostamotoimintojen tuotantolinjalla kaksi.

FCC- ja KTO3-yksiköitä on monitoroitu simulointimalleilla vuoden 2014 lopulta lähtien. FCC:n reaktori, riseri ja regeneraattori toimivat syöttöaineesta muodostuvan kocsin poltosta saatavalla lämmöllä. Pieni osa tästä lämmöstä kuluu kyseisten laitteiden lämpöpöväioihin.

Monitorointimallilla tuotetaan yhtiön LP-malliin kuvaus FCC-yksikön toiminnasta. Mitä tarkempi FCC-yksikön toimintaa kuvaava malli on, sitä tarkemmin yhtiö pystyy optimoimaan tuotannollisen toimintansa (raaka-ainevalinnat, yksiköiden kapasiteetit ja taseet, valmistettavat tuotteet).

Työn tavoitteena on laskea FCC:n reaktorin, riserin ja regeneraattorin lämpöpöväiot sekä selvittää lämpöpöväiöiden ero kesä- ja talvitilanteessa ja muutamassa operointitilanteessa. Näiden tulosten pohjalta laaditaan korrelaatio käytettäväksi tasemonitorointimallissa.

2 Yritys- ja yksikköesittely

2.1 Neste Oyj

2.1.1 Yhtiön historiaa

Neste Oy perustettiin 1948 huolehtimaan Suomen öljyhuollosta ja samana vuonna Neste hankki ensimmäisen säiliölaivan. Naantalin jalostamo käynnistyi 1957 ja samalla saapui ensimmäinen raakaöljylasti Naantaliin. Naantalin kapasiteettia kasvatettiin kaksinkertaiseksi 1960-luvun alkupuolella. Porvoon jalostamo käynnistyi vuonna 1965, ja jalostamo on laajennettu useaan otteeseen eri vuosikymmeninä. (1, s. 12; 2.)

1970–90-luvuilla yhtiön liiketoiminta-alue laajeni ja öljynjalostuksen sekä varustamoliiketoiminnan rinnalle tulivat mm. akut, aurinkopaneelit, maakaasu, öljyn ja kaasun etsintä ja tuotanto sekä kemianteollisuus. Neste alkoi näkyä myös kuluttajille omalla huoltoasemaverkostollaan. (1, s. 12; 2.)

2000-luvulta alkaen yhtiö on laajentanut liiketoiminta-alueitaan uusiutuvilla polttoaineilla rakentamalla NEXBTL-laitoksia Porvooseen, Singaporeen ja Rotterdamiin (2).

2.1.2 Neste tänään

Yhtiö on luopunut useista liiketoiminnoistaan, ja nykyään se on öljynjalostuksen ja uusiutuvien ratkaisujen toimija kolmella liiketoiminta-alueella: öljytuotteet, uusiutuvat tuotteet ja öljyn vähittäismyynti. Neste Oil Oyj listautui Helsingin pörssiin 1.4.2005. Vuoden 2015 keväällä Neste Oilin yhtiökokous päätti nimenmuutoksesta Neste Oyj:ksi 1.6.2015 alkaen. (2; 3.)

Lokakuussa 2014 julkaistun suunnitelman mukaan jatkossa Nesteellä on Suomessa yksi jalostamokokonaisuus, joka koostuu viidestä tuotantolinjasta. Tuotantolinjoista neljä on Porvoossa ja viides Naantalissa. Muutos yhdeksi kokonaisuudeksi tapahtuu vähitellen yhdistämällä toimintoja ja toimintatapoja sekä muuttamalla tuotantorakennetta. (4.)

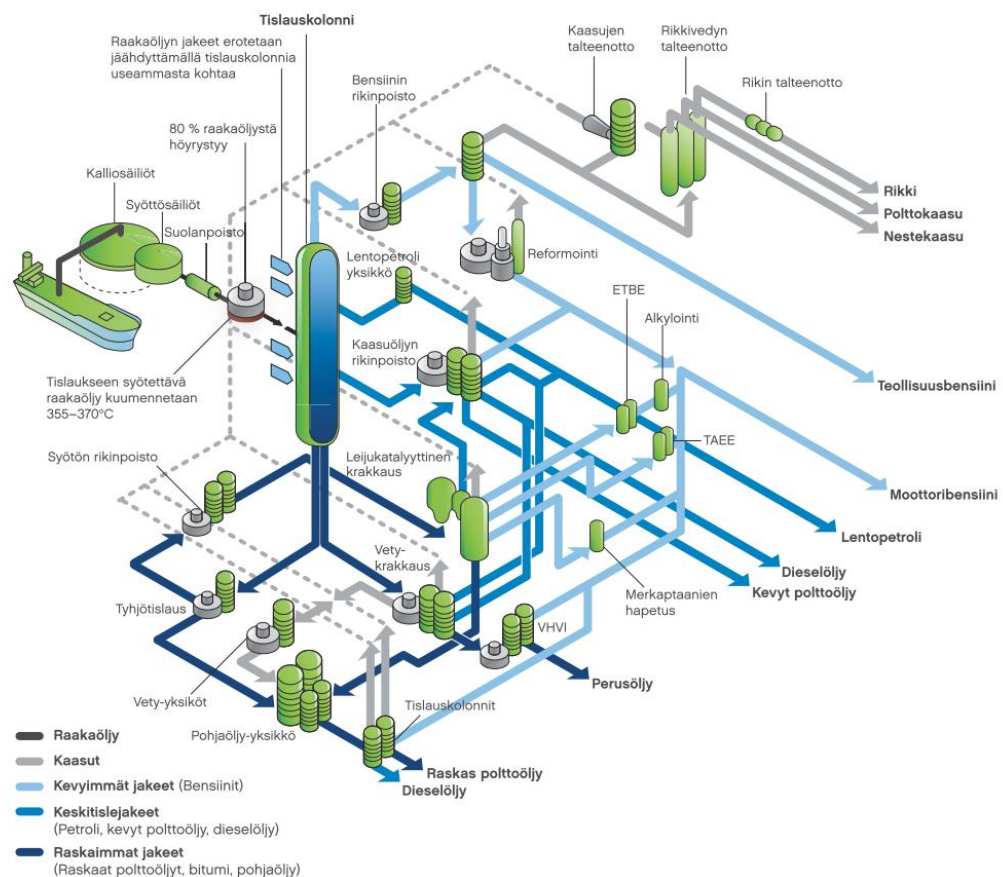
2.1.3 Porvoon jalostamotoiminnot

Kilpilahden teollisuusalueella sijaitsee Euroopan kehittyneimpiin laitoksiin lukeutuvat Nesteen Porvoon toiminnot. Porvoossa raakaöljyn jalostuskapasiteetti on noin 10,5 miljoonaa tonnia vuodessa eli 206 000 barrelia päivässä. Raakaöljyn lisäksi Porvooseen tuodaan myös muita syöttöaineita ja siksi tuotantokapasiteetti on yhteensä noin 13,5 miljoonaa tonnia vuodessa. (5.)

Porvoon maanpäällisissä ja maanalaisissa säiliöissä on varastotilaa raaka-aineille ja tuotteille yhteensä liki 8 miljoonaa kuutiometriä. Lisäksi Nesteellä on Porvoossa öljysatama ja se on tonnimäärältään Suomen satamista suurin. Laivoja siellä käy vuosittain noin 1 100–1 400. (5.)

Porvoon tuotanto keskittyy korkealaatuisiin ja puhtaampiin liikenteen polttoaineisiin. Porvoossa on yli 40 prosessiyksikköä ja valmistuksessa yli 150 eri tuotetta ja tuotekomponenttia. Kaikki jalostetut liikennepolttoaineet ovat rikittämiä, ja oma keskuslaboratorio vastaa valmiiden tuotteiden laadunvalvonnasta. Alueen jakeluterminaalissa lastataan päivittäin noin 300 säiliöautoa. Tuotannosta menee kotimaahan yli 60 % ja loput menevät vientiin, lähinnä Pohjoismaihin, Keski-Eurooppaan ja Pohjois-Amerikkaan. (6.)

Alueella toimii myös tutkimus- ja kehitystoiminnot sekä insinööritoimisto Neste Jacobs Oy. Porvoossa työskentelee noin 1 900 nesteläistä. Porvoon jalostamotoimintojen materiaalivirrat on esitetty kuvassa 1. (6.)

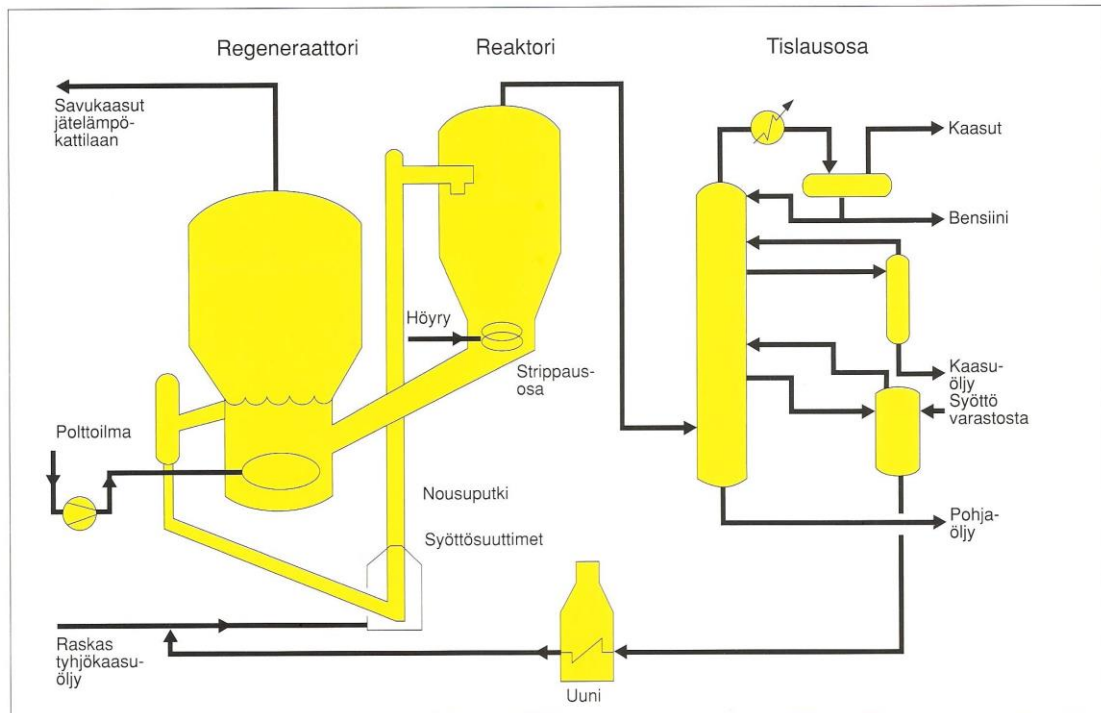


Kuva 1. Porvoon jalostamotoimintojen periaatekuva (6).

2.2 FCC-yksikkö

FCC-yksikön tarkoituksena on katalyyttisesti krakata rikitöntä tyhjtislattua raskasta kaasuöljyä kevyemmiksi komponenteiksi, lähinnä bensiinikomponenteiksi ja nestekaasuiksi.

Ratkaisuiltaan erityyppisiä FCC-yksiköitä on kehitetty useita. Porvoon FCC-yksikön on lisensoinut Texaco Development Corporation. Yksikön syöttöaineena on rikitön tyhjtislattu raskas kaasuöljy. FCC-yksikössä krakkaus tapahtuvat reaktorissa noin 510–550 °C:n lämpötilassa ja 1,5 barin ylipaineessa katalyytin vaikutuksen alaisena. Yksikössä on rinnakkain reaktori ja regeneraattori, joita yhdistävät nousuputki (riseri) ja käytetyn katalyytin palautusputki. Hienojakoinen alumiinisilikaattizeoliittikatalyytti kiertää prosessissa höyrystyneen syöttö-öljyn kuljettamana regeneraattorista reaktoriin nousuputken kautta. (1, s. 74–75; 7.)



Leijukatalyyttinen krakkaus (FCC).

Kuva 2. FCC-yksikön periaatekuva (1, s. 75)

Pääosa krakkautumisreaktioista tapahtuu nousuputkessa. Katalyytti erotetaan höyrystyneistä hiilivedyistä reaktorissa syklonien avulla ja palautetaan höyrystrippauksen jälkeen takaisin regeneraattoriin. Yksikkö tuottaa nestemäisten ja kaasumaisten tuotteiden lisäksi koksia, joka jää katalyytin pinnalle. Koksi poltetaan pois ilman avulla regeneraattorissa leijutetussa tilassa ja samalla katalyyttihiukkaset kuumentuvat noin 720 °C:een. (1, s. 74–75; 7, s. 16.)

Palamisessa syntynyt lämpö käytetään hyväksi itse prosessissa kahdella eri tavalla. Osa palamisessa syntyneestä lämmöstä sitoutuu katalyyttiin, joka luovuttaa lämpöä syöttö-öljylle riserissa sekä syntyneistä kuumista savukaasuista, joiden lämmöstä tehdään höyryä käytettäväksi prosessin eri vaiheisiin. Regeneraattoreissa syntyneistä savukaasuista erotetaan katalyyttipöly sykloneissa. (1, s. 74–75; 7, s. 16.)

Regeneroitunut katalyytti putoaa pystysuoraa putkea pitkin takaisin nousuputken alosaan syöttö-öljyn sekaan, joka höyrystyy kuumen katalyytin luovuttaman lämmön vaikutuksesta. Syöttö-öljy krakkautuu katalyytin vaikutuksesta sekä kuljettaa katalyyttiä nousuputkea pitkin reaktoriin. Katalyyttiä on kierrossa noin 150 tonnia. Katalyyttikierolla säädetään nousuputken yläosan lämpötiloja kulloinkin haluttujen prosessin ajomallien mukaan. (1, s. 74–75; 7, s. 16.)

Krakkautuneet hiilivetykaasut johdetaan reaktorista tislaukolonniin ja tislataan tuotekomponenteiksi, joita ovat kevytkaasu, kaasujakeen nestekaasut, korkeaktaaninen bensiini, keskitisleet ja pohjaöljy, joka sekoitetaan selkeytyksen jälkeen raskaaseen polttoöljyyn (7, s. 16). FCC-yksikön toimintaperiaate on esitetty Kuvassa 2.

3 Lämmönsiirron teoria

3.1 Lämpövirta

Tarkastellaan kahta yhtä pitkää sekä paksua kupari- ja muovitankoa. Pidettäessä niitä kuumassa vedessä päistään upotettuna yhtä pitkän ajan huomataan, että kuparitanko on lämmennyt ilmassa olevasta päästään huomattavasti enemmän kuin muovitanko. Tankojen päiden lämpötilaerojen johdosta on niihin muodostunut lämpövirta.

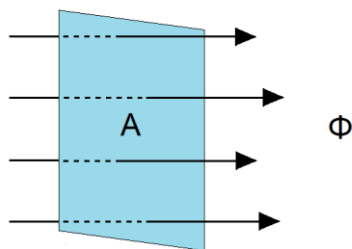
Lämpötilaerot tankojen päissä pyrkivät spontaanisesti tasoittumaan, kunnes termien tasapaino on saavutettu. Lämpöenergia siirtyy aina kuumasta kylmään. Huomataan myös eri materiaalien erot lämpöenergian siirtonopeuksissa. Materiaalit jaotellaan aineominaisuuksiensa puolesta lämmönjohteisiin ja lämmöneristeisiin. (8, s. 406–411.)

Tarkastellaan kuvan 3 mukaista tasaista pintaa, jonka ala on A . Pinnan läpi siirtyy Q verran energiaa ajassa Δt . Pinnan läpäisevä lämpövirta on Φ (9, s. 449).

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad (1)$$

Φ on lämpövirta, W
 Q on energia, J
 Δt on aikaero, s.

Lämpövirtaa voi kutsua myös lämpötehoksi, sillä se ilmaisee lämmönsiirtonopeuden.



Kuva 3. Lämpövirta

Lämpövirran tiheydellä tarkoitetaan lämpövirtaa pinta-alayksikköä kohti.

$$q = \frac{\Phi}{A} \quad (2)$$

q on lämpövirran tiheys, W/m^2
 Φ on lämpövirta, W
 A on pinta-ala, m^2 .

3.2 Lämmön konvektio

Konvektiolla tarkoitetaan lämmönsiirtoa nesteillä ja kaasuilla virtauksen mukana. Konvektio voi olla vapaata tai pakotettua. Vapaa konvektio syntyy kylmenneen tai lämmentyneen aineen tiheyden muuttuessa. Tällöin esimerkiksi lämmentyneen aineen tiheys laskee ja se alkaa virrata ylöspäin. Lämpimän säiliön seinämän vieressä oleva ilma lämmentyy ja sen tiheys laskee suhteessa viereiseen kylmempään ilmaan. Tällöin kevyempi ilma nousee ylöspäin ja sen tilalle virtaa uutta kylmempää ilmaa. (8.)

Pakotettu konvektio muodostetaan yleensä koneellisesti esimerkiksi pumpun avulla. Kaukolämpöverkossa olevaa vettä lämmitetään ja lämmentynyt vesi pumpataan asunton lämmönvaihtimien kautta ja kylmentynyt vesi palaa takaisin kaukolämpövoimalaan. (8.)

Konvektiolla tarkoitetaan usein myös lämmönsiirtoa kiinteästä pinnasta ohivirtaavaan aineeseen. Aineiden viskositeetin vuoksi paikallaan olevan pinnan läheisyydessä luonnollinen konvektio pienenee. Syntynyt eristävä kerros voi vastata yli 1 cm paksua vateria. Pakotettu konvektio ohentaa kerroksen paksuutta (8, s. 408).

Tarkastellaan kuvan 4 lämpöpatteria, jonka läpi siirtyy ajassa Δt vesimäärä Δm . Vesi jäähtyy ja luovuttaa lämpöenergiaa Q (9, s. 453).

$$|Q| = c\Delta m|t_2 - t_1| = c\Delta m(t_1 - t_2) = c\Delta m\theta_{12} \quad (3)$$

Q on lämpöenergia, J

c on veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/(kg °C)

Δm on patterin läpi kulkeutuneen veden massa, kg

$\theta_{12} = t_1 - t_2$ on lämpötilan lasku patterissa, °C.

Veden patterille luovuttama lämpövirta saadaan sijoittamalla kaava (3) kaavaan (1).

$$\Phi = \frac{|Q|}{\Delta t} = c \frac{\Delta m}{\Delta t} \theta_{12} \quad (4)$$

Φ on lämpövirta, W

Q on lämpöenergia, J

$\Delta t = \theta_{12}$ on $t_1 - t_2$ lämpötilan lasku patterissa, °C

c on veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/(kg °C)

Δm on patterin läpi kulkeutuneen veden massa, kg.

Tässä $\Delta m/\Delta t$ on massavirta q_m , joten

$$\Phi = cq_m\theta_{12} \quad (5)$$

c on veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/(kg °C)

q_m on massavirta, kg/s

θ_{12} on lämpötila ero, °C.

Konvektio kiinteästä pinnasta sen ohi virtaavaan nesteeseen tai kaasuun tarkastellaan Newtonin jäähtymislain avulla (10, s. 26).

$$\Phi = hA_p(T_p - T_f) \quad (6)$$

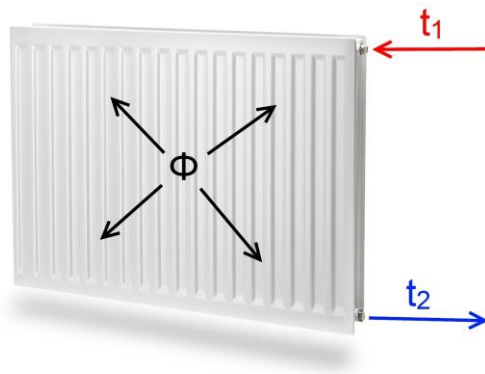
Φ on lämpövirta, W

h on lämmönsiirtokerroin, W/(m² K)

A_p on pinnan pinta-ala, m²

T_p on pinnan lämpötila, K

T_f on nesteen tai kaasun lämpötila, K.



Kuva 4. Lämpöpatteri (11)

Vapaan ja pakotetun konvektion laskennassa tarvittavia dimensiottomia lukuja.

Nusseltin luku, Nu (10, s. 380).

$$Nu = h \frac{d}{\lambda} \quad (7)$$

h on lämmönsiirtokerroin, W/(m² K)

d on karakteristinen mitta, m

λ on lämmönjohtavuus, W/(m K).

Prandtin luku, Pr (10, s. 388).

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (8)$$

η on dynaaminen viskositeetti, kg/(ms)

c_p on ominaislämpökapasiteetti, J/(kg K)

λ on lämmönjohtavuus, W/(m K).

Grashofin luku, Gr (10, s. 537–358).

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \quad (9)$$

g on maan vetovoiman kiihtyvyys, m/s²
 β on tilavuuden lämpötilakerroin, 1/K
 ΔT on lämpötila ero, K
 L on karakteristinen mitta, m
 ν on kinemaattinen viskositeetti, m²/s.

Rayleighin luku, Ra (10, s. 539).

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \cdot \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (10)$$

g on maan vetovoiman kiihtyvyys, m/s²
 β on tilavuuden lämpötilakerroin, 1/K
 ΔT on lämpötila ero, K
 L on karakteristinen mitta, m
 ν on kinemaattinen viskositeetti, m²/s
 η on dynaaminen viskositeetti, kg/(ms)
 c_p on ominaislämpökapasiteetti, J/(kg K)
 λ on lämmönjohtavuus, W/(m K).

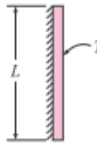
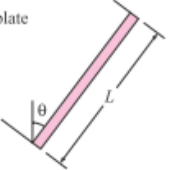


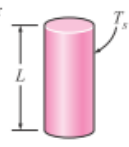
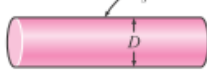
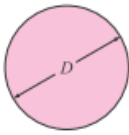
Reynoldsin luku, Re (10, s. 389).

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (11)$$

V on väliaineen nopeus, m/s
 d on karakteristinen mitta, m
 ν on kinemaattinen viskositeetti, m²/s.

Vapaa konvektio lasketaan ratkaisemalla ensiksi Rayleighin luku (Grashofin luvun ja Prandtin luvun tulo). Rayleighin luvulla etsitään taulukosta 1 Nusseltin luku (oikea pinnan muoto sekä Rayleighin luvun osuminen oikeaan arvo alueeseen). Nusseltin luvusta saadaan ratkaistua lämmönjohtavuus, joka sijoitetaan konvektion kaavaan 6 ja näin saadaan pinnan vapaan konvektion lämpövirta. (10, s. 531–545.)

Taulukko 1. Vapaan konvektion Nusseltin luvun korrelaatiot (10, s. 540).

TABLE 9-1 Empirical correlations for the average Nusselt number for natural convection over surfaces			
Geometry	Characteristic length L_c	Range of Ra	Nu
Vertical plate 	L	10^4-10^9 10^9-10^{13} Entire range	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{1/4}} \right\}^2$ (9-21) (complex but more accurate)
Inclined plate 	L		Use vertical plate equations for the upper surface of a cold plate and the lower surface of a hot plate Replace g by $g \cos \theta$ for $Ra < 10^9$
Horizontal plate (Surface area A and perimeter p) (a) Upper surface of a hot plate (or lower surface of a cold plate)  (b) Lower surface of a hot plate (or upper surface of a cold plate) 	A_s/p	10^4-10^7 10^7-10^{11} 10^5-10^{11}	$Nu = 0.54Ra_L^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0.15Ra_L^{1/3}$ (9-23) $Nu = 0.27Ra_L^{1/4}$ (9-24)
Vertical cylinder 	L		A vertical cylinder can be treated as a vertical plate when $D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}}$
Horizontal cylinder 	D	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{1/4}} \right\}^2$ (9-25)
Sphere 	D	$Ra_D \leq 10^{11}$ $(Pr \geq 0.7)$	$Nu = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469/Pr)^{9/16}]^{4/9}}$ (9-26)

3.3 Lämmön johtuminen

Lämmön johtuminen kiinteissä aineissa perustuu vierekkäisten atomien värähtelyihin. Nopeammin värähtelevä atomi siirtää osan kineettisestä energiasta hitaammin värähtelevälle atomille. Parhaimpia lämmönjohteita ovat metallit, ja osittain näiden hyvä lämmönsiirtokyky perustuu siihen, että niillä on vapaita elektroneja uloimmilla kuorillaan. Elektronit pystyvät liikkumaan vapaasti ja näin kuljettamaan energiaa pitkälle. (8, s. 409–411.)

Nesteet johtavat lämpöä melko huonosti, koska niiden molekyylien väliset etäisyydet ovat pidempiä kuin kiinteillä aineilla ja molekyylit pääsevät liikkumaan toistensa suhteen. Nesteiden lämmönsiirron mekanismit perustuvat molekyylien välisiin törmäyksiin, joissa osa kineettinen energia siirtyy hitaampiin molekyyliin. (8, s. 409–411.)

Hyviä lämmön eristeitä ovat kaasut. Kaasujen molekyylien väliset etäisyydet ovat pidempiä kuin nesteillä. Kaasujen heikko lämmönsiirron perustuu melko vapaasti liikkuvien kaasumolekyylien satunnaisiin törmäyksiin. Hyvien eristemateriaalien lämmönjohtavuuskertoimet ovat luokkaa 0,02–0,1 W/(m K). Eistemateriaalit ovat yleensä ilmavia ja niiden massa-tilavuussuhde on pieni. Tällaisten eristemateriaalien eristävyys perustuu kaasujen huonoon lämmönjohtavuuteen. Eistemateriaalien molekyyli rakenne vaikuttaa myös lämmönjohtavuuteen esimerkiksi erilaisten oksidien hilarakenne. Saman alkuaineen eri kiderakenteilla voi olla merkittäviä eroja lämmönjohtavuudessa esimerkiksi hiili 1,59 W/(m K) ja timantti 2300 W/(m K). (8, s. 409–411.) Eri materiaalien lämmönjohtavuuksia on esitetty kuvassa 6.

Tarkastellaan kuvan 5 mukaista tasoseinämää, jonka eri puolilla on lämpötilat t_1 ja t_2 . Seinämän paksuus on d . Seinämän läpäisee lämpövirta Φ . Lämpövirta Φ on suoraan verrannollinen pintojen väliseen lämpötilaeroon $\Theta_{12} = t_1 - t_2$ ja seinämän pinta-alaan A , sekä kääntäen verrannollinen seinämän paksuuteen. (9, s. 455.)

$$\Phi = \lambda A \frac{\Theta_{12}}{d} \quad (12)$$

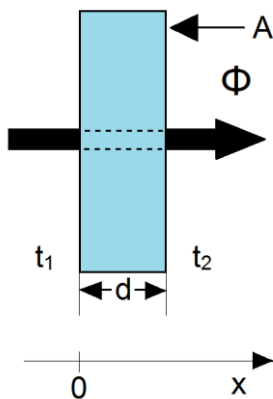
Φ on lämpövirta, W

λ on seinämän materiaalin lämmönjohtavuus W/(m K)

A on pinta-ala, m²

Θ_{12} on lämpötilaero, K

d on seinämän paksuus, m.



Kuva 5. Tasoseinä

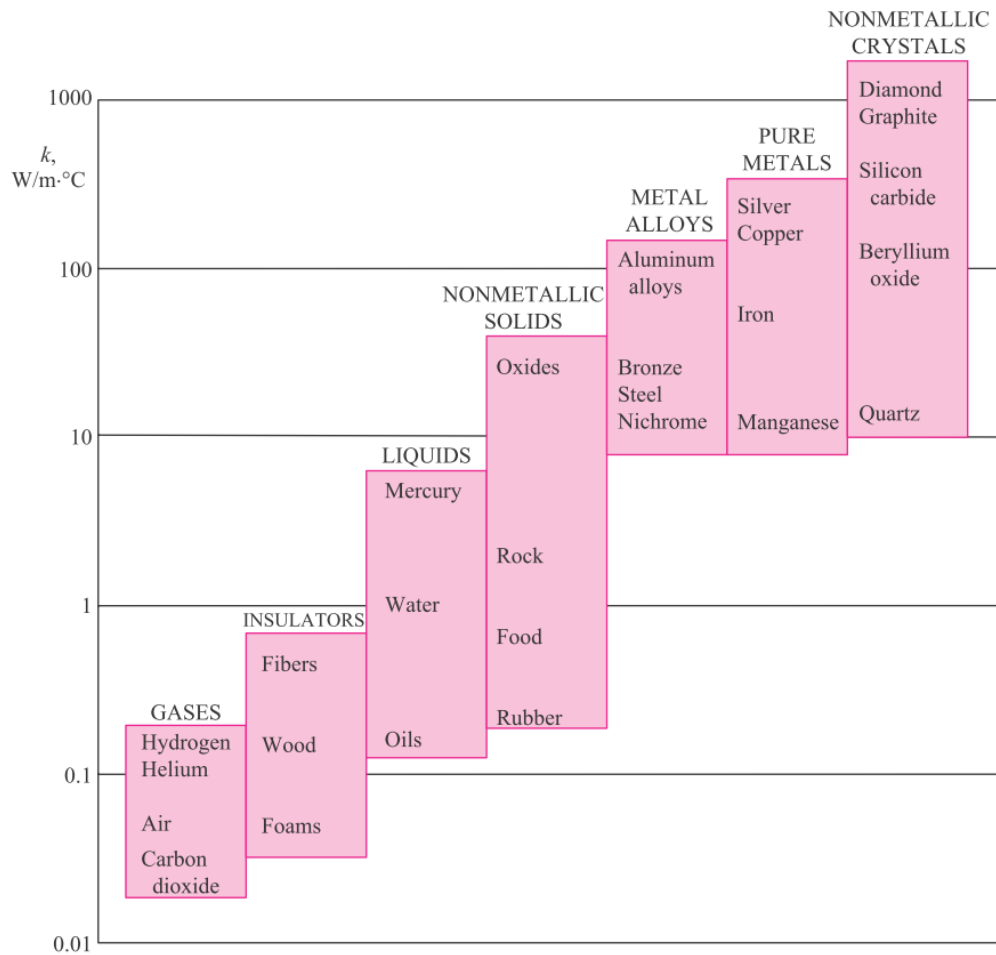
Ilmaistaan kaava 12 muodossa.

$$\Phi = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (13)$$

Tutkittaessa ylläsaatua kaavaa ja sen erotusosamäärää $\Delta x \rightarrow 0$, niin päästään Fourierin lakiin (10, s.18).

$$\phi = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

dT/dx on lämpötilagradientti, joka ilmaisee, kuinka nopeasti lämpötila muuttuu (10, s. 18).



Kuva 6. Eri materiaalien lämmönjohtavuuksia (10, s. 21)

Materiaalikerroksen lämmönsiirtymiskerroin h_{12} ilmaisee tietyntyyppisen seinämän materiaalin lämmönsiirtokykyä (9, s. 457).

$$h_{12} = \frac{\lambda}{d} \quad (15)$$

Materiaalikerroksen lämmönsiirtovastus R_{12} ilmaisee seinämän lämmöneristyskykyä (9, s. 457).

$$R_{12} = \frac{1}{h_{12}} = \frac{d}{\lambda} \quad (16)$$

Lämpövirta voidaan ilmaista lämmönsiirtymiskertoimen ja lämmönsiirtovastuksen avulla (9, s. 457).

$$\Phi = h_{12}A\theta_{12} = \frac{A\theta_{12}}{R_{12}} \quad (17)$$

Lämpövirran tiheys saadaan kaavalla (9, s. 457).

$$q = \lambda \frac{\theta_{12}}{d} = h_{12}\theta_{12} = \frac{\theta_{12}}{R_{12}} \quad (18)$$

Lämpövirta onton sylinterin läpi saadaan kaavalla (8, s. 417–418)

$$\Phi = 2\pi L\lambda \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (19)$$

L on sylinterin pituus, m

λ on seinämän materiaalin lämmönjohtavuus, W/(m K)

T_1 on sylinterin sisälämpötila, K

T_2 on sylinterin ulkolämpötila, K

r_1 on sylinterin sisähalkaisija, m

r_2 on sylinteri ulkohalkaisija, m.

Lämpövirta onton pallon läpi saadaan kaavalla (12, s. 20)

$$\Phi = \lambda \frac{4\pi(T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} \quad (20)$$

λ on seinämän materiaalin lämmönjohtavuus, W/(m K)

T_1 on pallon sisälämpötila, K

T_2 on pallon ulkolämpötila, K

r_1 on pallon sisähalkaisija, m

r_2 on pallon ulkohalkaisija, m.

3.4 Lämpösäteily

Tarkastellaan yöllistä maantietä. Ulkolämpötila on pari astetta plussan puolella. Tuuli on lähes tyyni ja taivas pilvetön. Tällöin on havaittavissa, että ajotielle muodostuu mustaa jätää. Suoraan taivaalle olevat vaakasuorat pinnat emittoivat lämpösäteilyä avaruuteen. Taivaalta tuleva, tienpintaan absorboituva säteily on huomattavasti vähäisempää kuin emittoitu säteily. Näin tienpinnasta tulee ympäristöään kylmempi ja tienpinnassa oleva kosteus jäätyy tai kuivalle tielle muodostuu kuuraa, koska tienpinnan lämpötila on alle ilmakehän kosteuden kastepisteen.

Kaikki kappaleet lähettävät absoluuttisen nollapisteen yläpuolella eli emittoivat jatkuvasti energiaa sähkömagneettisena säteilynä. Tällaista lämmöstä johtuvaa säteilyä kutsutaan lämpösäteilyksi. Energia on peräisin atomien ja molekyylien lämpöliikkeestä. Sähkömagneettinen säteily ei tarvitse väliainetta edetäkseen, ja niinpä se pystyy eteneeseen tyhjiössä. Lämpösäteily on kvantittunut, ja se etenee valonnopeudella. Lämpösäteilyn kvanttia kutsutaan fotoniksi. Pinnasta puoliavaruuteen emittoitu kokonais-säteilyteho P jaettuna pinnan alalla A on säteilyvoimakkuus M . (8, s. 418–419; 10, s. 27.)

$$M = \frac{P}{A} \quad (21)$$

M on säteilyvoimakkuus, W/m^2

P on teho, W

A on pinta-ala, m^2 .

Säteilyvoimakkuus on suoraan verrannollinen termodynaamisen lämpötilan T neljännenteen potenssiin. Kaavaa 22 kutsutaan sen kokeellisesti osoittaneen Josef Stefanin ja myöhemmin teoreettisesti johtaneen Ludvig Boltzmannin mukaan Stefan-Boltzmannin laiksi. (8, s. 419.)

$$M = \sigma T^4 \quad (22)$$

M on säteilyvoimakkuus, W/m^2

σ on Stefan-Boltzmannin vakio, $5,67051 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$

T on absoluuttinen lämpötila, K .

Säteilyteho on riippuvainen säteilevän pinnan ominaisuuksista. Emissiivisyys ϵ ilmaisee, kuinka hyvä säteilijä tai vastaanottaja pinta on. Emissiivisyys on suhdeluku, joka voi saada arvoja väliltä $0 < \epsilon < 1$. Mustalle pinnalle emissiivisyys on 1, ja se absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn. Ideaaliselle peilille emissiivisyys on 0, ja se heijastaa kaiken siihen tulevan säteilyn. Musta pinta ja ideaalinen peili ovat ideaalisia rajatapauksia, joiden emissiivisyys arvojen väliin sijoittuvat todelliset pinnat. (9, s. 419; 8, 462.)

Kappale voi heijastaa, absorboida ja läpäistä säteilyä, mutta vain absorboitunut säteily lämmittää kappaletta. Energian säilymislain perusteella. (10, s. 735.)

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (23)$$

α on absorboitunut osuus

ρ on heijastunut osuus

τ on läpi mennyt osuus.

Kirchhoffin laki osoittaa että, emissiivisyys ε ja absorptiosuhde α ovat yhtä suuret (10, s. 737).

$$\varepsilon = \alpha \quad (24)$$

Säteilyvoimakkuus kasvaa jyrkästi lämpötilan noustessa johtuen T^4 -termistä. Kappaleen pinnan emissiivisyys riippuu sen lämpötilasta. Todellisen kappaleen emittoiva säteilyteho riippuu sen emissiivisyyskertoimesta ε .

$$P = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (25)$$

P on säteilyteho, W

ε on emissiivisyys kerroin

σ on Stefan-Bolzmännin vakio, $5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$

A on pinta-ala, m^2

T on absoluuttinen lämpötila, K.

Kappaleen säteillä ympäristöön kaavan 22 säteilytehon niin samalla se absorboi ympäristöstä säteilyä. Kappaleen ollessa ympäristöään lämpimämpi on kappaleen ympäristöön säteilemä nettoteho. (8, s. 420.)

$$P = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_0^4) \quad (26)$$

P on säteilyteho, W

ε on emissiivisyys kerroin

σ on Stefan-Bolzmännin vakio, $5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$

A on pinta-ala, m^2

T on säteilijän absoluuttinen lämpötila, K

T_0 on ympäristön absoluuttinen lämpötila, K

Kahden säteilevän pinnan väliseen nettolämmön siirron laskentaan lisätään kaavan 26 oikealle puolelle näkyvyyskerroin F . Näkyvyyskertoimessa on otettu huomioon esimerkiksi kulmat joissa kappaleet ovat toisiinsa nähden sekä pintojen emissio- ja absorptio-ominaisuudet. (10, s. 765–813.)

$$P = F \sigma A (T^4 - T_0^4) \quad (27)$$

P on säteilyteho, W

F on näkyvyyskerroin

σ on Stefan-Bolzmännin vakio, $5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$

A on pinta-ala, m²
 T on säteilijän absoluuttinen lämpötila, K
 T₀ on ympäristön absoluuttinen lämpötila, K

Max Planck tutki mustan pinnan säteilyä ja havaitsi, että sen energia voi saada vain tiettyjä arvoja eli se oli kvantittunut. Säteilyenergia syntyy ja häviää määrätyn kokoisina annoksina. (8, s. 420–421.)

$$E = hf \quad (28)$$

E on energia, J
 f on säteilyn taajuus
 h on Planckin vakio 6,626076·10⁻³⁴ Js.

Planckin säteilylaki kertoo mustan kappaleen säteilyvoimakkuuden M (10, s. 718).

$$M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (29)$$

M on säteilyvoimakkuus, W/m²
 h on Planckin vakio, 6,626076·10⁻³⁴ Js
 c on valonnopeus tyhjiössä, 299 792 458 m/s
 λ on säteilyn aallonpituus, m
 k on Boltzmannin vakio, 1,38065·10⁻²³ J/K
 e on Neperin luku, 2,718281828.

Mustan kappaleen säteilylle spektrin maksimikohdan aallonpituus λ_{max} Wienin siirtymälain perusteella. Lämpötilan kasvaessa säteilyn aallonpituus pienenee. (8, s. 422.)

$$\lambda_{max} = \frac{2898K \cdot \mu m}{T} \quad (30)$$

Auringon säteilyteho ilmakehän ulkopuolella on 1373 W/m² kohtisuoralle pinnalle. Maan päälle osuva säteilyteho riippuu useista tekijöistä kuten ilmansaasteiden määrästä, savusumusta, ilmankosteudesta, pilvisyydestä ja maanpinnan asennosta suhteessa aurinkoon. (10, s. 740–753.) Taulukossa 2 on esitetty vaakasuoralle pinnalle kuukausitasolla tulevan auringon energian arvoja kolmelle paikkakunnalle.

Säteilylämmönsiirtokerroin saadaan laskettua (10, s. 29).

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_p^2 + T_y^2) (T_p + T_y) \quad (31)$$

ε on emissiivisyyskerroin
 σ on Stefan-Boltzmannin vakio, 5,67051·10⁻⁸ W/(m² K⁴)
 T_p on säteilevän pinnan lämpötila, K
 T_y on ympäristön lämpötila, K.

Pinnan ja sen ympäristön välinen säteilylämmönsiirto esiintyy rinnan pinnan ja sitä ympäröivän kaasun välisen konvektiivisen lämmönsiirron kanssa. Tällaisen yhdistelmän kokonaislämmönsiirtokerroin on näiden lämmönsiirtokertoimien summa. (10, s.29.)

$$h_{\text{yhdistelmä}} = h_{\text{rad}} + h_{\text{kon}} \quad (32)$$

Taulukko 2. Auringon säteilyenergiat paikkakunnittain (13)

Kuukausi	Säteilyenergiat vaakasuoralle pinnalle (kallistuskulma 0°) paikkakunnittain, (kWh/m ² ,kk)		
	Helsinki	Jyväskylä	Sodankylä
Tammikuu	6	5	1
Helmikuu	22	20	14
Maaliskuu	64	52	48
Huhtikuu	120	103	121
Toukokuu	166	171	128
Kesäkuu	169	159	154
Heinäkuu	181	158	146
Elokuu	127	114	95
Syyskuu	82	71	64
Lokakuu	26	25	17
Marraskuu	8	7	3
Joulukuu	4	3	0
Vuosi	975	890	791

3.5 Lämmön siirtyminen monikerroksisen seinämän läpi

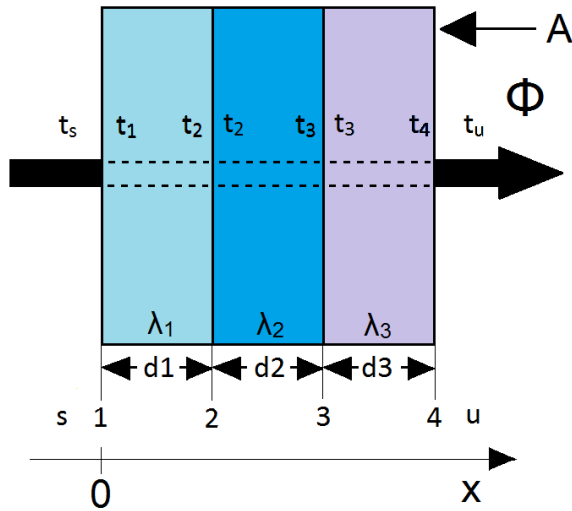
Tarkastellaan lämmön siirtymistä kuvan 7 mukaisen monikerroksisen seinämän läpi. Materiaalien lämmönjohtavuudet ovat λ_1 , λ_2 ja λ_3 . Seinämien paksuudet ovat d_1 , d_2 ja d_3 . Sisälämpötila on t_s ja ulkolämpötila t_u . Seinämän läpäisemä lämpövirta Φ on

$$\Phi = \frac{\theta_{su}}{R_{su}} \quad (33)$$

Φ on lämpövirta, W

θ_{su} on sisä- ja ulkolämpötilan ero $t_s - t_u$, K

R_{su} on seinämän lämmönsiirtovastus, K/W. (10, s.144.)



Kuva 7. Monikerroksinen seinä

Pinnan lämmönsiirtovastus on vastaavan lämmönsiirtymiskertoimen käänteisarvo (10, s. 144).

$$R_{s1} = \frac{1}{h_{s1}A} \quad (34)$$

R on lämmönsiirtovastus, K/W

h on materiaalikerroksen lämmönsiirtymiskerroin, W/(m² K).

Kuvassa 7 on esitetty monikerroksisen seinämän rakenne ja taulukossa 3 seinämään liittyvät lämmönsiirtymistavat ja lämmönvastuksien laskentakaavat.

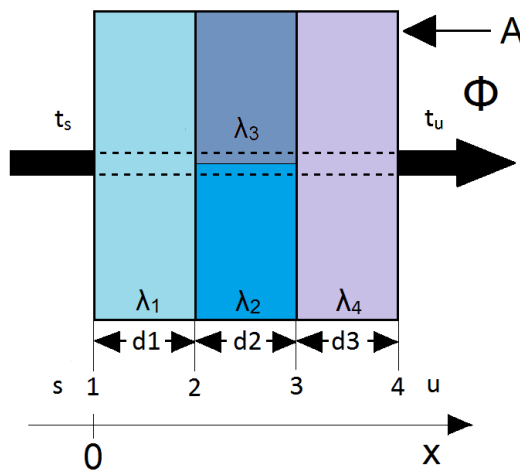
Taulukko 3. Kuvan 7 monikerroksisen seinän lämmönsiirtymistavat ja vastukset (10, s. 148)

Väli	Lämpötilaero	Lämmönsiirtymistavat	Lämmönsiirtovastus
s → 1	$\Theta_{s1} = t_s - t_1$	Konvektio, johtuminen ja säteily	$R_{s1} = \frac{1}{h_1 A_1}$
1 → 2	$\Theta_{12} = t_1 - t_2$	Johtuminen	$R_{12} = \frac{d_1}{\lambda_1 A}$
2 → 3	$\Theta_{23} = t_2 - t_3$	Johtuminen	$R_{23} = \frac{d_2}{\lambda_2 A}$
3 → 4	$\Theta_{34} = t_3 - t_4$	Johtuminen	$R_{34} = \frac{d_3}{\lambda_3 A}$
4 → u	$\Theta_{4u} = t_4 - t_u$	Konvektio, johtuminen ja säteily	$R_{4u} = \frac{1}{h_2 A}$

Seinämän lämmönsiirtovastus on yhtä suuri kuin pintojen ja kerrosten lämmönsiirtovastusten summa (10, s. 148).

$$R_{su} = R_{s1} + R_{12} + R_{23} + R_{34} + R_{4u} \quad (35)$$

Tarkastellaan lämmön siirtymistä kuvan 8 mukaisen monikerroksisen seinämän läpi, jossa toisessa materiaalikerroksessa on kahta eri lämmönjohtavuuskerrointa omaavaa materiaalia. Tässä osaa seinämäkerrosta, jossa on eri lämmönsiirtokerroimen omaavia materiaaleja, käytetään seinämäkerroksen lämmönvastuksen laskennassa elektronista tuttua vastusten resistanssien laskenta periaatetta. (10, s.158–160.)



Kuva 8. Monikerroksinen seinämä, jossa materiaaleja sarjassa ja rinnan

Kuvan 8 seinämän osalta, jossa materiaalit ovat rinnan, lämmönsiirtovastuksen laskennassa käytetään kaavaa 37 (10, s. 158).

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_{\lambda_2}} + \frac{1}{R_{\lambda_3}} \quad (36)$$

Kahden materiaalin rinnankytketylle seinämälle saadaan R_{d2} ratkaistua (10, s. 157).

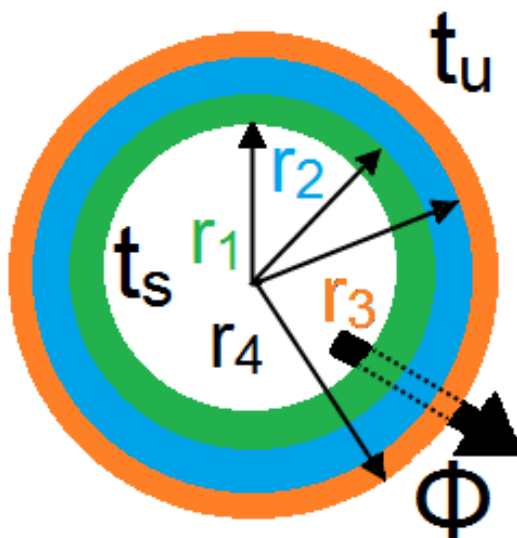
$$R_{23} = \frac{R_{\lambda_2} R_{\lambda_3}}{R_{\lambda_2} + R_{\lambda_3}} \quad (37)$$

Kokoseinämän lämmönsiirtovastuksen laskentaan käytetään kaavaa 35.

Kuvassa 9 on esitetty monikerroksisen sylinterin rakenne ja taulukossa 4 sylinteriin liittyvät lämmönsiirtymistavat ja lämmönvastuksien laskentakaavat. Monikerroksisen sylinterin lämmönsiirtovastus on yhtä suuri kuin pintojen ja kerrosten lämmönsiirtovastusten summa. Laskennassa käytetään kaavaa 35. (10, s. 163–164.)

Taulukko 4. Monikerroksisen sylinterin lämmönsiirtymistavat ja lämmönsiirtovastukset

Väli	Lämpötilaero	Lämmönsiirtymistavat	Lämmönsiirtovastus
s → 1	$\Theta_{s1} = t_s - t_1$	Konvektio, johtuminen ja säteily	$R_{s1} = \frac{1}{h_1(2\pi r_1 L)}$
1 → 2	$\Theta_{12} = t_1 - t_2$	Johtuminen	$R_{12} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi L \lambda_1}$
2 → 3	$\Theta_{23} = t_2 - t_3$	Johtuminen	$R_{23} = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi L \lambda_2}$
3 → 4	$\Theta_{34} = t_3 - t_4$	Johtuminen	$R_{34} = \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{2\pi L \lambda_3}$
4 → u	$\Theta_{4u} = t_4 - t_u$	Konvektio, johtuminen ja säteily	$R_{4u} = \frac{1}{h_2(2\pi r_4 L)}$



Kuva 9. Monikerroksisen sylinterin ja pallon materiaalikerrokset

Kuvassa 9 on esitetty monikerroksisen pallon rakenne ja taulukossa 5 palloon liittyvät lämmönsiirtymistavat ja lämmönvastuksien laskentakaavat. Monikerroksisen pallon lämmönsiirtovastus on yhtä suuri kuin pintojen ja kerrosten lämmönsiirtovastusten summa. Laskennassa käytetään kaavaa 35. (10, s. 163–164.)

Taulukko 5. monikerroksisen pallon lämmönsiirtymistavat ja lämmönsiirtovastukset

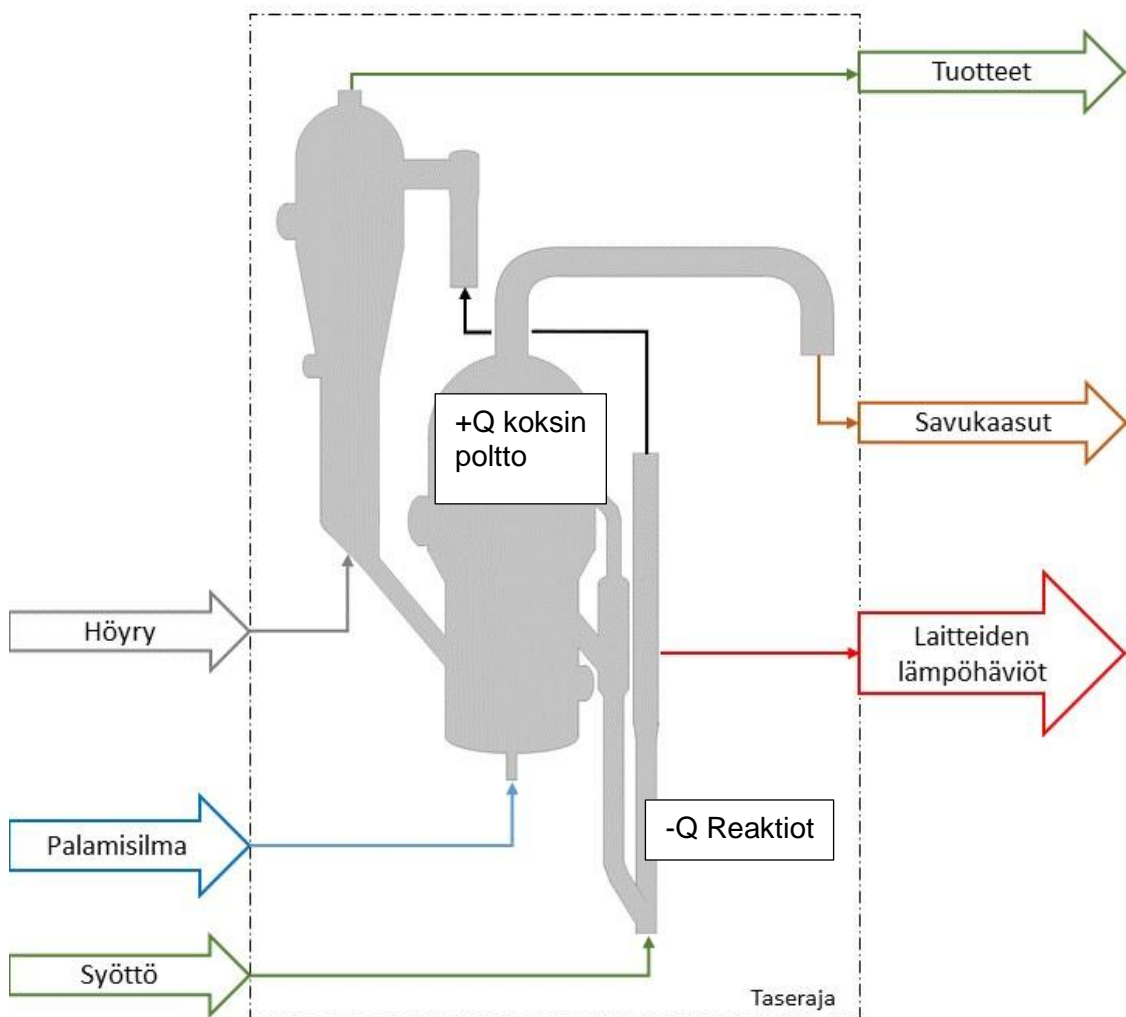
Väli	Lämpötilaero	Lämmönsiirtymistavat	Lämmönsiirtovastus
$s \rightarrow 1$	$\Theta_{s1} = t_s - t_1$	Konvektio, johtuminen ja säteily	$R_{s1} = \frac{1}{h_1(4\pi r_1^2)}$
$1 \rightarrow 2$	$\Theta_{12} = t_1 - t_2$	Johtuminen	$R_{12} = \frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 \lambda_1}$
$2 \rightarrow 3$	$\Theta_{23} = t_2 - t_3$	Johtuminen	$R_{23} = \frac{r_3 - r_2}{4\pi r_2 r_3 \lambda_2}$
$3 \rightarrow 4$	$\Theta_{34} = t_3 - t_4$	Johtuminen	$R_{34} = \frac{r_4 - r_3}{4\pi r_3 r_4 \lambda_3}$
$4 \rightarrow u$	$\Theta_{4u} = t_4 - t_u$	Konvektio, johtuminen ja säteily	$R_{4u} = \frac{1}{h_2(4\pi r_4^2)}$

4 Lämpöhäviöiden määrittäminen

4.1 Tasealue

Kuvassa 10 esitetään lämpöhäviöitä laskettavalta prosessinosalta massa- ja energia-tasealue. Tasealueen sisään tulevat virrat on ryhmitelty vasemmalle ja poistuvat virrat oikealle. Tasealueen sisällä koksipoltosta vapautuu energiaa sekä krakkausreaktiot sitovat energiaa. Tasealueen energiatase voidaan kirjoittaa muotoon

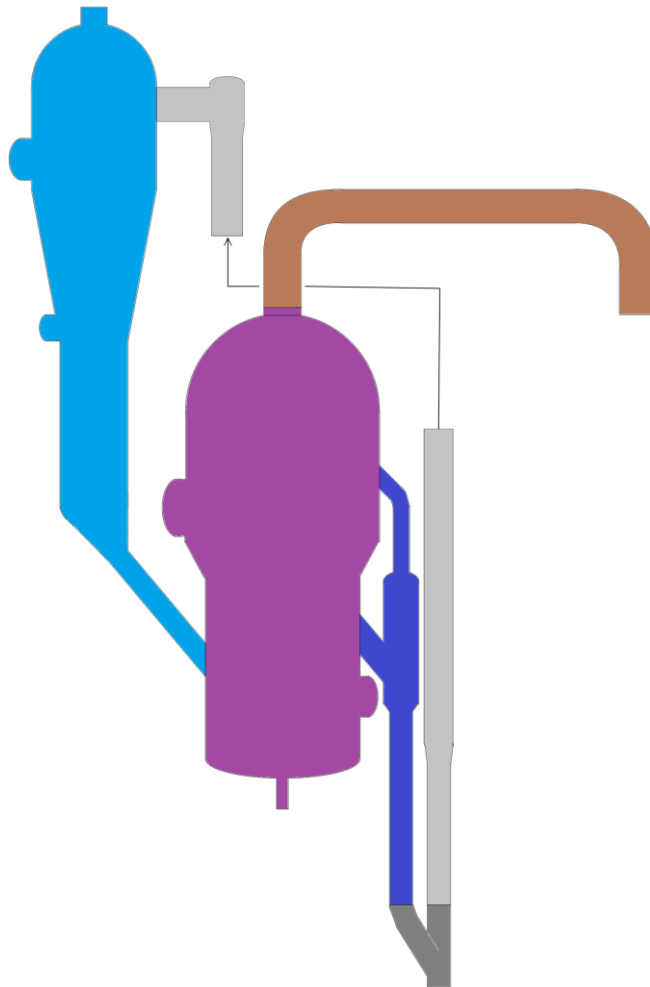
$$Q_{\text{Syöttö}} + Q_{\text{Palamisilma}} + Q_{\text{Höyry}} + Q_{\text{Koksin poltto}} = Q_{\text{Tuotteet}} + Q_{\text{Savukaasut}} + Q_{\text{Reaktiot}} + Q_{\text{Lämpöhäviöt}} \quad (38)$$




Kuva 10. Energia- ja massatasealue prosessinosalta josta lämpöhäviöt lasketaan.

4.2 Lämmönsiirto pinta-alojen määrittäminen

Lämmönsiirtopinta-alat laskettiin tasealueen sisällä olevien prosessilaitteiden rakennepiirustuksista saatujen mittojen perusteella. Pinta-aloja on esitelty taulukossa 6 sekä kuvassa 11 on eritelty taulukon laitteita.



	Reaktori		Hopperi
	Riseri		Y-kappale
	Regeneraattori		Savukanava

Kuva 11. Laskentakokonaisuuden laitteita nimettynä

Taulukko 6. Lämmönsiirtopinta-alojen laskenta taulukko

Nro:	Osan tarkenne	Lämmön siirron tyyppi	Poistettavan alan tyyppi	Rakenne paksuus teräs m	Rakenne paksuus vuoraus m	Säde m	Korkeus m	Leveys m	Pinta-ala m ²
Laite:	Reaktori								
1	Tuote yläputki	Sylinteri		0,016	0,102	0,642	0,853		3,44
2	Tuoteputki reikä		Ympyrä			0,642			-1,29
3	Yläpääty	Puolipallo		0,022	0,076	3,019			57,27
4	2A Kaulus	Sylinteri		0,022	0,076	0,359	0,270		0,61
5	Yläsylinteri	Sylinteri				3,019	4,881		92,59
6	Riserin yläyhde		Suorakaide				1,575	1,412	-2,22
7	1A Miesluukku	Korbbogen		0,022	0,076			1,976	4,22
8	Miesluukun reikä		Ympyrä			0,988			-3,07
9	Miesluukun kaulus	Sylinteri		0,022	0,076	0,988	0,500		3,10
10	Keskikartio	Kartio		0,022	0,102	3,019	7,738		114,38
11	3 Miesluukku	Korbbogen		0,022	0,102			1,200	1,56
12	Miesluukun reikä		Ympyrä			0,600			-1,13
13	Miesluukun kaulus	Sylinteri		0,022	0,102	0,600	0,500		1,88
14	Alasylinteri	Sylinteri		0,022	0,102	1,610	7,499		75,86
15	2C Miesluukku	Korbbogen		0,016	0,102			0,950	0,97
16	Miesluulun reikä		Ympyrä	0,022		0,475			-0,71
17	Miesluukun kaulus	Sylinteri		0,022	0,102	0,475	0,440		1,31
18	2B Kaulus	Sylinteri		0,022	0,102	0,334	0,270		0,57
19	Pyöreä alamutka	Pallosektori		0,022	0,102				4,61
20	Ala kartio	Kartio		0,022	0,102	1,610	2,322		15,52
21	Alaputki	Sylinteri		0,022	0,102	0,518	0,673		2,19
22	Palje	Sylinteri		0,010	0,050	0,518	1,450		4,71
23	POV-2403	Sylinteri		0,060	0,100	0,610	1,550		5,94
							Kok. Ala;		371,65
Laite:	Regeneraattori								
24	Savukaasu yläputki	Sylinteri		0,030	0,100	0,880	0,638		3,53
25	1A Kaulus	Sylinteri		0,030	0,100	0,381	0,200		0,48
26	1B Kaulus	Sylinteri		0,030	0,100	0,381	0,200		0,48
27	Savukaasuputki reikä		Ympyrä			0,880			-2,43
28	Yläpääty	Puolipallo		0,030	0,100	4,700			138,80
29	Yläsylinteri	Sylinteri		0,030	0,100	4,700	6,350		187,52
30	2 Miesluukku	Korbbogen		0,040	0,100			2,650	7,58
31	Miesluulun reikä		Ympyrä			1,325			-5,52
32	Miesluukun kaulus	Sylinteri		0,030	0,100	1,325	0,610		5,08
33	5A-F Kaulus	Sylinteri		0,030	0,100	0,305	0,150		1,72
34	Keskikartio	Kartio		0,030	0,100	4,700	1,700		45,56
35	Alasylinteri	Sylinteri		0,030	0,100	3,830	8,380		201,66
36	Alapohja	Korbbogen		0,035	0,100			7,660	63,37
37	Katalyytti reaktorista	Sylinteri		0,020	0,100	0,508	1,700		5,43
38	Katalyytti reaktorista		Ympyrä			0,508			-0,81
39	Katalyytti ulos	Sylinteri		0,030	0,100	0,665	0,860		3,59
40	Katalyytti ulos		Ympyrä			0,665			-1,39
41	Hönkä Hopperista	Sylinteri		0,025	0,100	0,386	0,600		1,46
42	Hönkä Hopperista		Ympyrä			0,386			-0,47
43	Miesluukku	Korbbogen		0,020	0,100			2,000	4,32
44	Miesluulun reikä		Ympyrä			1,000			-3,14
45	Miesluukun kaulus	Sylinteri		0,020		1,000	0,610		3,83
46	Ilmaharavan reikä		Ympyrä			0,305			-0,29
47	Ilmaharava	Sylinteri		0,020	0,100	0,305	1,200		2,30
							Kok. Ala;		662,65

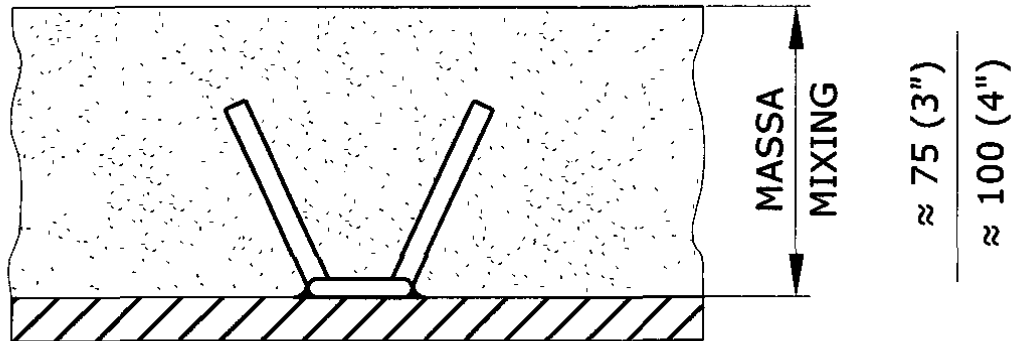
Nro:	Osan tarkenne	Lämmön siirron tyyppi	Poistettavan alan tyyppi	Rakenne paksuus teräs	Rakenne paksuus vuoraus	Säde	Korkeus	Leveys	Pinta-ala
				m	m	m	m	m	m ²
Laite:	Riser								
48	Ylä kanava	Taso		0,040	0,102	2,474	1,575	1,412	5,50
49	Ylä kanavan reikä		Neliö				1,575	1,412	-2,22
50	Yläkanavan tulo	Sylinteri		0,022		0,806	1,875		9,50
51	Yläkupu	Korbbogen		0,016	0,102			1,612	2,81
52	Ylälaippa	Taso		0,035	0,102	0,425			0,57
53	Yläkaulus	Sylinteri		0,022	0,076	0,359	0,353		0,80
54	Yläkaulus reikä		Ympyrä			0,359			-0,40
55	Yläkartio	Kartio		0,016	0,102	0,806	0,609		2,88
56	Yläsylinteri	Sylinteri		0,016	0,102	0,702	0,350		1,54
57	Ylempi putki	Sylinteri		0,016	0,102	0,702	17,300		76,25
58	Alempi putki	Sylinteri		0,016	0,102	0,702	11,443		50,44
59	Putken laajennus	Kartio		0,016	0,102	0,702	1,038		4,16
60	Alin putki	Sylinteri		0,016	0,102	0,575	4,733		17,10
61	Suutin pääputki	Sylinteri		0,016	0,102	0,575	1,886		6,81
62	Suutinputket 8 kpl	Sylinteri		0,013	0,013	0,219	0,700		7,71
63	Suutinputkien reijät		Ympyrä			0,219			-1,21
								Kok. Ala;	182,23
Laite:	Hopper								
63	Yläkäyrä	Sylinteri		0,020	0,102	0,381	1,150		2,75
64	Yläputki	Sylinteri		0,020	0,102	0,381	2,000		4,79
65	Yläputki alempi	Sylinteri		0,020	0,102	0,381	0,882		2,11
66	Hopperi yläkupu	Korbbogen		0,020	0,102			1,710	3,16
67	Yläputki reikä		Ympyrä			0,381			-0,46
68	Hopperin keskiosa	Sylinteri		0,020	0,102	0,855	6,066		32,59
69	Katalyytti reaktorista	Sylinteri		0,020	0,102	0,665	0,860		3,59
70	Kat. reaktorista reikä		Ympyrä			0,665			-1,39
71	Hopperi alakupu	Korbbogen		0,020	0,102			1,710	3,16
72	Alaputki reikä		Ympyrä			0,575			-1,04
73	Alaputki	Sylinteri		0,020	0,102	0,575	0,337		1,22
74	Stand pipe osa 2	Sylinteri		0,016	0,102	0,575	3,792		13,70
75	Stand pipe osa 1	Sylinteri		0,016	0,102	0,575	2,915		10,53
76	POV-2401	Sylinteri		0,060	0,100	0,610	1,530		5,86
77	Alaputki	Sylinteri		0,016	0,102	0,575	0,370		1,34
78	Y-kappale osa 1	Sylinteri		0,030	0,100	0,589	3,400		12,58
79	Y-kappale osa 2	Sylinteri		0,030	0,100	0,589	2,055		7,61
80	Pohja laippa	Taso		0,130	0,100	0,670			1,41
								Kok. Ala;	103,51
Laite:	Savukanava								
81	Savukanava	Sylinteri		0,020	0,100	0,880	21,423		118,45
								Kaikki laitteet Kok. Ala:	1438,5

4.3 Seinämärakenteiden lämmönjohtavuus

Prosessilaitteet on sisäpuolelta lämpöeristetty vuorausmateriaalilla. Lämpöeristykseen tarkoituksena on pitää ulkopuolisen teräsvaipan lämpötila alle sen korkeimman käyttölämpötilan sekä pitää lämpöhäviöt ulkopuolelle pieninä.

Prosessilaitteiden uloin vaippakerros on terästä ja sen paksuus vaihtelee välillä 16–40 mm. Teräsvaipan sisäpuolelle on hitsattu V-ankkureita. V-ankkurien tehtävänä on pitää

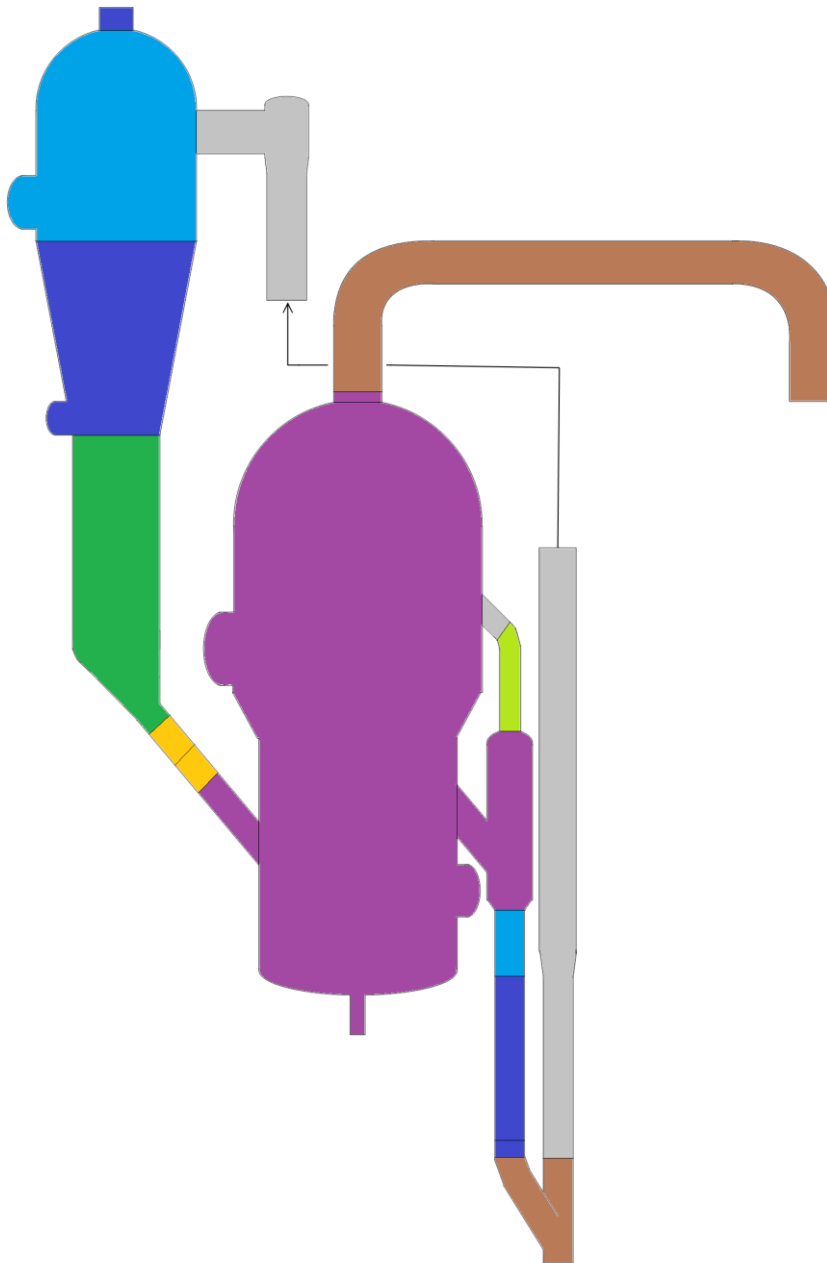
prosessilaitteiden sisäpuolinen vuoraus paikoillaan. Vuorauksen paksuus vaihtelee välillä 76–102 mm. Kuvassa 12 on esitetty V-ankkureiden ja vuorauksen sijoittuminen teräsvaipan sisäpinnalle (14). Sisäpuolinen vuoraus valmistetaan jauheesta, joka on koostumukseltaan alumiinioksidin, piioksidin ja kalsiumoksidin sekoitus. (15; 16.)



Kuva 12. Teräsvaippaan hitsattu V-ankkuri (14)

Jauhe sekoitetaan veden kanssa sopivassa suhteessa laastiksi, joka sitten voidaan valaa tai ruiskuttaa seinämälle sopivan paksuiseksi kerrokseksi. Vuoraukselle tehdään lopuksi materiaalitoimittajan ohjeiden mukainen jälkikäsittely, ilmakeittäminen ja lämpökäsittely. Näillä toimenpiteillä varmistetaan vuorauksen kuivuminen ilman halkeiluja ja vuorauksen sisällä olevan veden poisto hallitusti. (15; 16; 17.)

Laitteiden vuorausmateriaalit ovat kahdelta eri valmistajalta. Laitteiston eri osiin on valittu sopiva vuorausmateriaali aina kyseisen paikan prosessiolosuhteet huomioiden. Kuvassa 15 on värein eroteltu eri vuorausmateriaalit laitteistossa ja taulukossa 7 on tarkennettu vuorausmateriaali ja sen valmistaja.



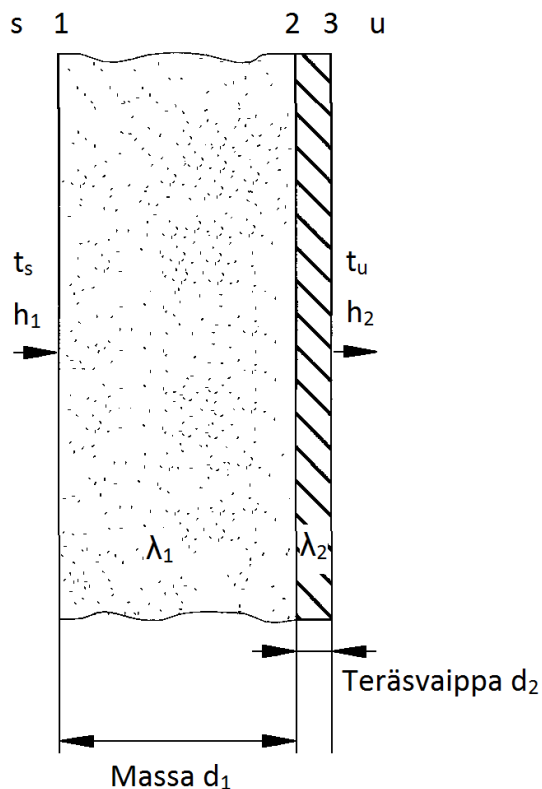
	1.		5.
	2.		6.
	3.		7.
	4.		8.

Kuva 13. Eri vuorausmateriaalien käyttöpaikat väreillä eroteltuna

Taulukko 7. Vuorausmateriaalit ja niiden lämmönjohtavuudet (15; 16)

	Valmistaja	Vuoraus materiaalin tuote nimi	Lämmönjohtavuus W/m°C eri lämpötiloissa						
			260 °C	500 °C	540 °C	800 °C	815 °C	1000 °C	1095 °C
1	Resco	RS-9	0,55		0,48		0,52		
2	Calderys	CaldeGun MW 138		0,44		0,46		0,49	
3	Resco	RS-17 EMG			0,71		0,8		0,87
4	Resco	AA-22S	2,08		2,03		2,06		
5	Calderys	Pligun Strong Lite H		0,44		0,46		0,49	
6	Resco	RS-17 EMC			0,72		0,81		0,88
7	Resco	Superflow 17 ELL	1,48		1,42		1,45		
8	Resco	Rescicast 100 C	0,91		0,87		0,9		

V-ankkureiden lämmönjohtavuus $16,6 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ poikkeaa vuorausmateriaalien lämmönjohtavuuksista huomattavasti ja tästä syystä haluttiin laskea ankkurien vaikutus vuorauskerroksen lämmönjohtavuuteen (10, s. 909). Jos V-ankkurillisen rakenteen lämmönjohtavuus poikkeaa merkittävästi ankkurittomasta rakenteesta, niin lasketaan ankkurilliselle rakenteelle ankkurikorjauskerroin.



Kuva 14. Seinämärakenne ilman V-ankkureita (14)

Aluksi laskettiin ankkurittoman ja ankkurillisen seinämän lämpövirta ja lämpötilaprofiili. Laskuissa tehdään oletus, että lämmönsiirtokertoimet λ_1 ja λ_2 ovat vakioita. Seinämän lämmönjohtavuuden laskenta ilman V-ankkureita.

Sisälämpö $t_s = 550 \text{ °C}$

Ulkolämpö $t_u = 20 \text{ °C}$

λ_1 vuoraus = $0,48 \text{ W/(m °C)}$

λ_2 teräsvaippa = $43,1 \text{ W/(m °C)}$

d_1 vuoraus = $0,076 \text{ m}$

d_2 teräsvaippa = $0,022 \text{ m}$

$h_1 = 100 \text{ W/(m}^2 \text{ °C)}$ (10)

$h_2 = 25 \text{ W/(m}^2 \text{ °C)}$ (18)

$R_{s1} = 1/h_2A = 1/100 \text{ (m}^2 \text{ °C)/W} * 1 \text{ m}^2 = 0,01 \text{ °C/W}$

$R_{12} = d_1/\lambda_1A = 0,076\text{m} / 0,48 \text{ W/(m °C)} * 1\text{m}^2 = 0,1583 \text{ °C/W}$

$R_{23} = d_2/\lambda_2A = 0,0005104 \text{ °C/W}$

$R_{3u} = 0,04 \text{ °C/W}$

$\Theta_{su} = t_s - t_u = 550 \text{ °C} - 20 \text{ °C} = 530 \text{ °C}$

$R_{su} = (0,01+0,1583+0,0005104+0,04) \text{ (m}^2 \text{ °C)/W} = 0,2088 \text{ °C/W}$

$\Phi = \Theta_{su}/R_{su} = 530 \text{ °C} / 0,2088 \text{ °C/W} = 2538 \text{ W}$

Rajapintojen lämpötilaerot:

$\Theta_{s1} = R_{s1}/R_{su} * \Theta_{su} = 0,01 \text{ °C/W} / 0,2088 \text{ °C/W} * 530 \text{ °C} = 25,4 \text{ °C}$

$\Theta_{12} = R_{12}/R_{su} * \Theta_{su} = 401,8 \text{ °C}$

$\Theta_{23} = R_{23}/R_{su} * \Theta_{su} = 1,3 \text{ °C}$

$\Theta_{3u} = R_{3u}/R_{su} * \Theta_{su} = 101,5 \text{ °C}$

Kerrostien pintalämpötilat:

$t_s = 550 \text{ °C}$

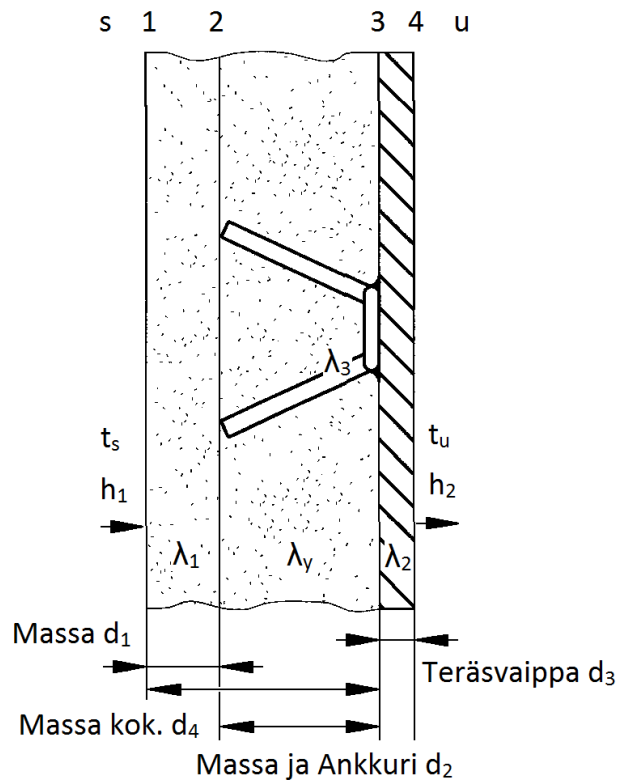
$t_1 = t_s - \Theta_{s1} = 550 \text{ °C} - 25,4 \text{ °C} = 524,6 \text{ °C}$

$t_2 = t_1 - \Theta_{12} = 122,8 \text{ °C}$

$t_3 = t_2 - \Theta_{23} = 121,5 \text{ °C}$

$t_u = t_3 - \Theta_{3u} = 20,00 \text{ °C}$

Lasketaan V-ankkureiden vaikutus lämmönsiirtokertoimeen ja lämpötilaprofiiliin.



Kuva 15. V-ankkurillinen seinämärakenne (14)

V-ankkureita = 49 kpl/m²

V-ankkurin halkaisija = 0,006 m

V-ankkurin korkeus $d_2 = 0,05$ m

V-ankkureissa kaksi tankoa, joten tankoja $2 \cdot 49 = 98$ tankoa/m²

Tankojen päiden pinta-ala $A_t = 98 \cdot \pi \cdot (0,006/2)^2 = 0,002771$ m²

Vuorauksen pinta-ala $A_v = (1 - 0,002771) \text{m}^2 = 0,9972$ m²

Tankojen päällä vuorausta = $d_1 = d_4 - d_2 = 0,076$ m – 0,05 m = 0,026 m

λ_1 vuoraus = 0,48 W/(m °C)

λ_2 teräsvaippa = 43,1 W/(m °C)

λ_3 ankkuriteräs = 16.6 W/(m °C)

Kerroksen, jossa on eri materiaaleja, käytetään sen lämmönvastuksen R_{23} laskennassa kaavaa 37.

$$R_{23} \text{ Vuoraus} = d_2 / \lambda_1 \cdot A_v = 0,1045 \text{ °C/W}$$

$$R_{23} \text{ Ankkurit} = d_2 / \lambda_3 \cdot A_t = 1,087 \text{ °C/W}$$

$$R_{23} \text{ Koko Ala} = 0,1045 \text{ °C/W} \cdot 1,087 \text{ °C/W} / (0,1045 \text{ °C/W} + 1,087 \text{ °C/W}) = 0,09530 \text{ °C/W}$$

Ankkureiden päällä olevan 0,026 metrin vuorauksen lämmönvastukseksi saatiin R_{12} 0,05417 °C/W.

Koko 0,076 metrin lämmönvastus on $R_{12} + R_{23 \text{ Koko Ala}} = 0,1495 \text{ °C/W}$

Lasketaan yhdistelmäkerrosten yhteinen lämmönjohtavuus

$$R_{23} = \frac{d}{\lambda_y A} \rightarrow \lambda_y = \frac{d}{R_{23} A} = 0,076 \text{ m} / 0,1495 \text{ °C/W} * 1 \text{ m}^2 = 0,508 \text{ W/(m °C)}$$

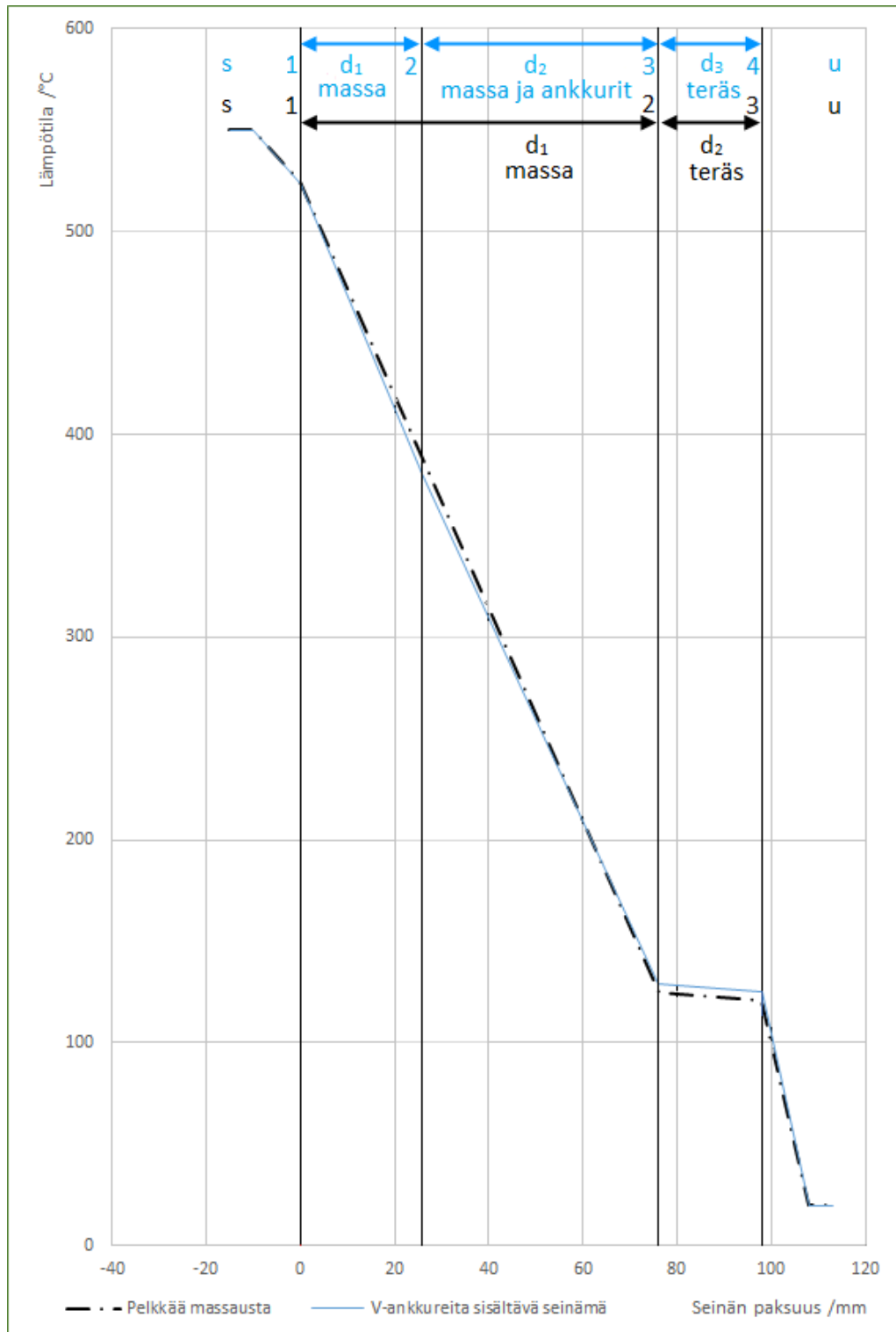
Todellinen seinämärakenne on yhdistelmä edellä mainituista seinämärakenteista. Laskuissa on oletuksena, että seinämärakenteen pituussuuntainen lämmönsiirto on mitätön verrattuna sisäpinnalta ulkopinnalle suuntautuvaan lämmönsiirtymiseen.

Lasketaan, paljonko 0,076 metrin paksun ankkureista ja vuorauksesta koostuvan seinämän lämmönjohtavuus kasvaa verrattuna ankkurittomaan rakenteeseen. Kuvassa 16 on esitetty ankkurittoman ja ankkurillisen seinämän lämpötilaprofiili.

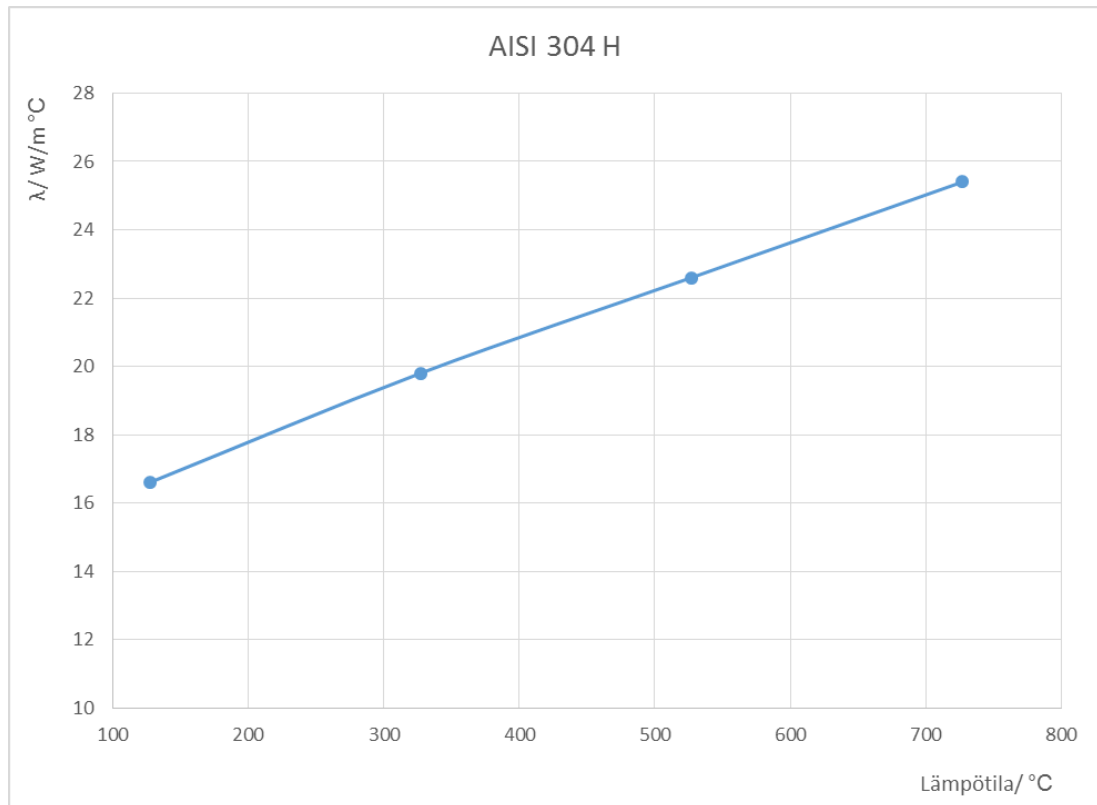
$$(0,508 - 0,48) \text{ W/(m °C)} / 0,48 \text{ W/(m °C)} * 100 \% = 5,93 \%$$

Lämmönjohtavuuden kasvu laskettuna 0,102 m vuoraukselle on 6,68 %.

Lasketuista lämmönjohtavuuden kasvu prosenteista havaitaan, että V-ankkureilla on merkittävä vaikutus lämmönsiirtokertoimiin ja tästä syystä V-ankkurit tulee huomioida kokonaislämpöhäviön laskennassa.



Kuva 16. 0,076 m paksun V-ankkureita ja pelkkää massausta sisältävien seinämien lämpötilaprofiilit

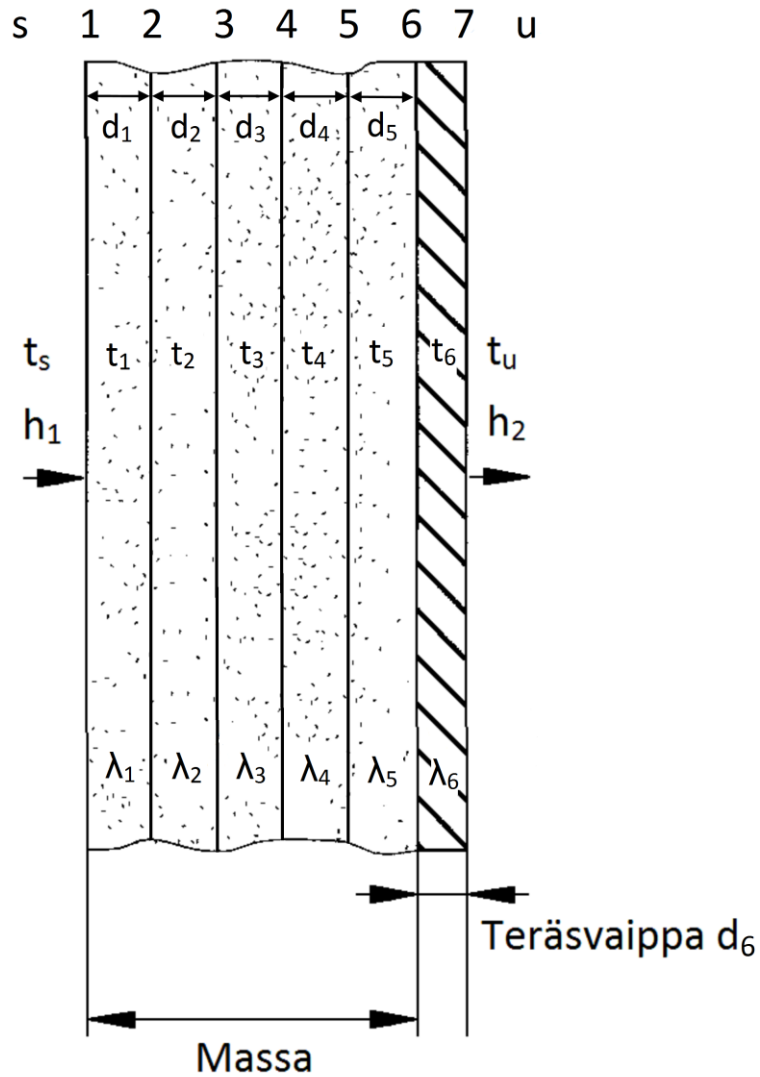


Kuva 17. V-ankkuriteräksen lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona (10)

Seinämän lämpötilaprofiili kuvasta voidaan lukea V-ankkureita ja massaa olevan kerroksen keskilämpötila. Tämän kerroksen keskilämpötilaa vastaava V-ankkuriteräksen lämmönjohtavuus voidaan lukea kuvasta 17. Koska reaktoripuolella vallitsee matalampi lämpötila kuin regeneraattorin puolella, niin myös ankkuriteräksen lämmönjohtavuus vaihtelee laitteiden välillä ja tämän vuoksi ankkurikorjauskerroin laskettiin kohdekohtaisesti.

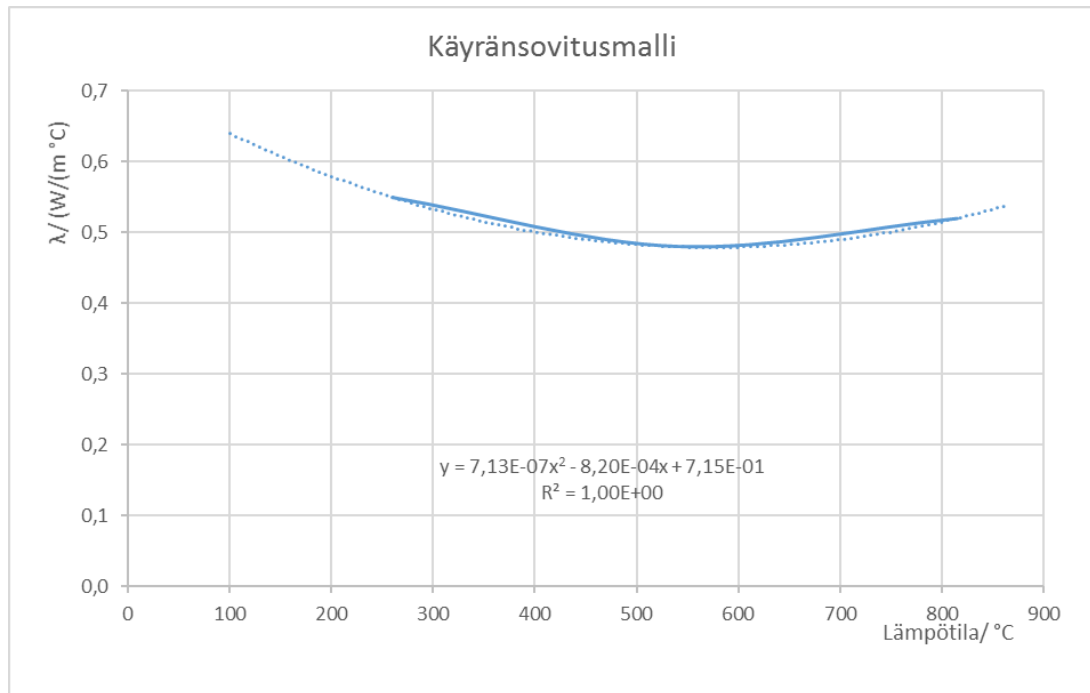
Edellisissä laskuissa tarkasteltiin tilannetta, jossa koko vuorauskerroksen lämmönjohtavuuden oletettiin olevan vakio. Lämpötilan muuttuessa sisältä ulospäin mentäessä muuttuu myös vuorausmateriaalin lämmönjohtavuus. Seuraavaksi tarkastellaan tilannetta, jossa lämpötilan muutos vuorausmateriaalikerroksissa ja niiden lämmönsiirtokerrotoimessa otetaan huomioon.

Lämmönsiirron tarkastelu seinämässä, jonka vuoraus paksuus on 0,100 metriä ja vuorausta tarkastellaan viidessä yhtä paksussa kerroksessa. Kerroksien lämmönsiirtokerrotoimeksi valitaan kyseisen kerroksen ulkopinnan ja sisäpinnan välistä keskilämpötilaa vastaava lämmönsiirtokerroin. Paloittain tarkasteltavan seinämän rakenne on esitetty kuvassa 18.



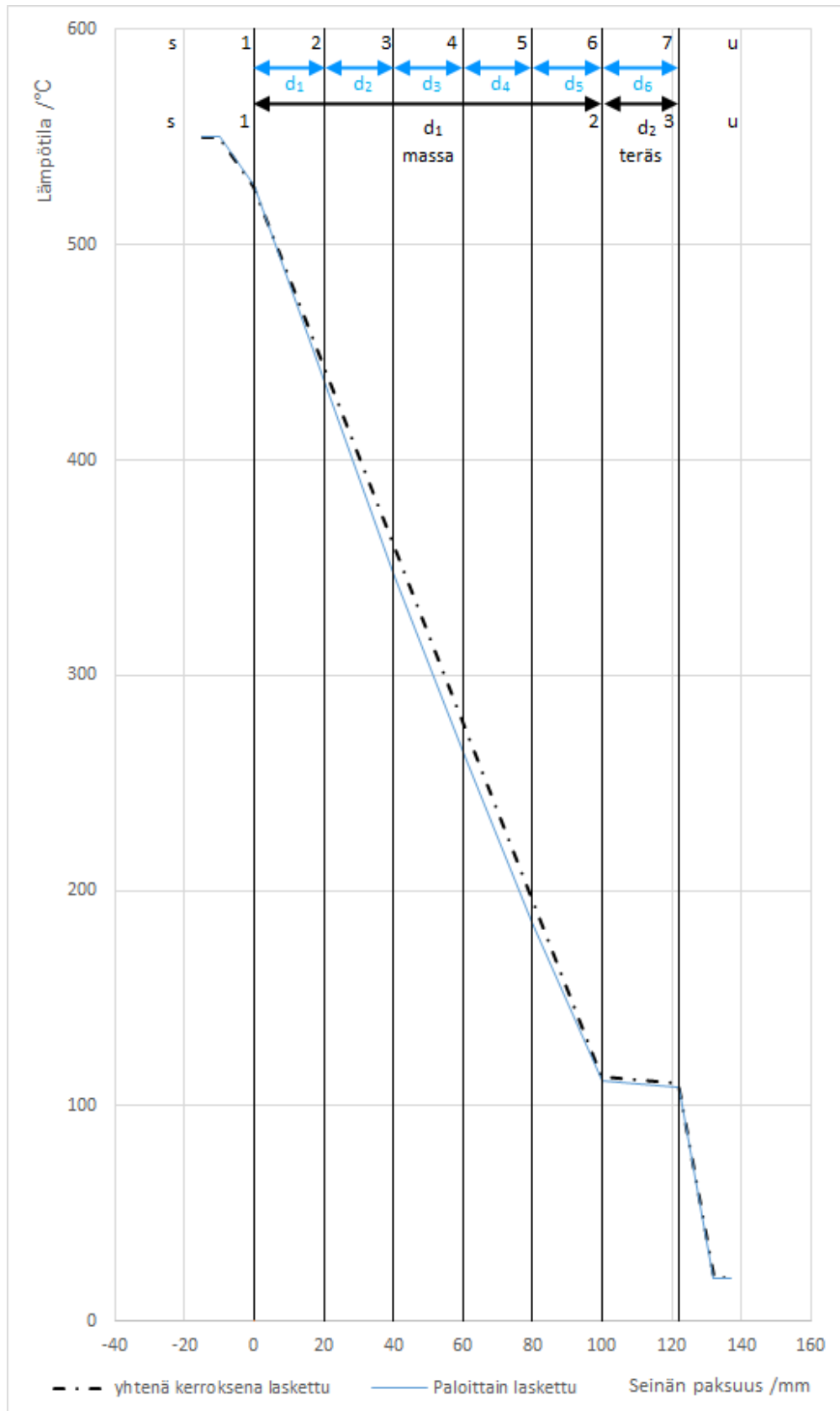
Kuva 18. Paloittain tarkasteltavan seinämän rakenne

Lämmönsiirtokerroin eri lämpötiloille saadaan valmistajien ilmoittamien ainearvojen avulla tehdyn käyräsovitustavalla. Kuvassa 19 on esitetty sovitustavalla esimerkki Resco RS-9 -vuorausmateriaalille.



Kuva 19. Käyrän sovitus vuorausmateriaalille Resco RS-9, jossa lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona

Kerrosten keskilämpötilat saadaan Excel-taulukon rakennetun mallin avulla. Malli laskee koko seinämärakenteen lämmönjohtavuuden ja pintalämpötilat paloissa. Kunkin kerrosten pintalämpötiloista lasketaan keskiarvo. Kerroksen keskilämpötilaa vastaava lämmönjohtavuusarvo poimitaan käyränsovitusmallista, jolloin malli laskee uuden tarkennetun arvon kerrokselle. Tällaisia tarkennuskierroksia täytyy tehdä joka kerrokselle noin kolmesta neljään, tällöin päästään riittävän tarkkaan arvioon koko seinämän lämmönjohtavuudesta.



Kuva 20. 0,100 metriä vuorausta sisältävän seinämän paloittain lasketun sekä yhtenä kerroksena lasketun lämpötilaprofiilien vertailu

Paloittain lasketun seinämän kokonaislämpöhäviöksi saatiin 2233 W ja yhtenä osana lasketun seinämän lämpöhäviöksi saatiin 2281 W.

Laskutapojen prosentuaalinen ero verrattuna yhtenä osana laskettuun seinämään

$$(2281 - 2233) \text{ W} / 2281 \text{ W} \cdot 100 \% = 2,1 \%$$

Käytettäessä lämmönjohtavuuden arvona lukua, joka vastaa vuorausmateriaalin keskimääräistä lämmönjohtavuutta käyttölämpötilassa, niin laskentatapojen välinen ero on pieni. Laskentaesimerkissä käytetty valmistajan antama lämmönjohtavuuden arvo 260 °C:ssa oli melko lähellä vuorauskerroksen keskimääräistä lämmönjohtavuutta. Lämpöhäviöiden laskenta suoritetaan yhtenä osana käyttäen lämmönjohtavuutena käyttöolosuhteita vastaavaa keskimääräistä lämmönjohtavuutta.

4.4 Säteilylämpöhäviön laskenta

Säteilylämpöhäviön osuus laskettiin mukaan laitteissa havaittujen korkeahkojen pintalämpötilojen vuoksi. Säteilylämpöhäviön osuus kokonaislämpöhäviöstä kasvaa merkittävästi pintalämpötilojen noustessa johtuen lämpöhäviön laskentakaavassa olevasta T^4 -termistä.

Laitekokonaisuus on maalattu Teknos Horna 650 -silikonialumiinimaalilla. Maalin emissiivisyys on kokeellisesti määritelty laitteiston lämpökamerakuvauksissa (20). Tarkastellaan yhden neliön pinta-alaa, jonka pintalämpötila 120 °C ja ympäristön lämpötila on 20 °C.

Muutetaan celsiuslämpötilat kelvineiksi

$$\begin{aligned} T_0 &= 20 \text{ °C} + 273 \text{ K/°C} = 293 \text{ K} \\ T &= 120 \text{ °C} + 273 \text{ K/°C} = 393 \text{ K} \\ \sigma &= 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4) \\ \varepsilon &= 0,67 \\ A &= 1 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Sijoitetaan lukuarvot kaavaan 26

$$P = 0,67 \cdot 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4) \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot ((393 \text{ K})^4 - (293 \text{ K})^4) = 626 \text{ W}$$

Pintalämpötilan noustessa arvoon 220 °C on säteilylämpöhäviö 1964 W.

Lasketaan myös säteilylämmönsiirtokerroin h_{rad} , jota tarvitaan ulkopinnan yhdistelmä-
lämmönsiirtokerroimen laskentaan. Yhdistelmä-
lämmönsiirtokerrointa tarvitaan ulkopinnan lämmönsiirtovastuksen laskentaan. Säteilylämmönsiirtokerroimen laskennassa käytetään kaavaa 31 ja yhdistelmä-
lämmönsiirtokerroimen laskennassa kaavaa 32.

$$T_p = 20 \text{ °C} + 273 \text{ K/°C} = 293 \text{ K}$$

$$T_y = 120 \text{ °C} + 273 \text{ K/°C} = 393 \text{ K}$$

$$\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$$

$$\varepsilon = 0,67 \text{ (20)}$$

$$h_2 = 25 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \text{ (18)}$$

$$h_{\text{rad}} = 0,67 \cdot 5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4) \cdot ((393 \text{ K})^2 + (293 \text{ K})^2) \cdot (393 \text{ K} + 293 \text{ K}) = 6,26 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

$$h_{\text{yhd}} = h_2 + h_{\text{rad}} = 25 \text{ W/(m}^2 \text{ K)} + 6,26 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} = 31,26 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

4.5 Kokonaislämpöhäviön määrittäminen

Aluksi laitteisto jaettiin laskennan kannalta pienempiin samankaltaisiin osakokonaisuuksiin. Jako suoritettiin taulukon 6 mukaisesti. Näin pystyttiin laskemaan erityyppisten pintojen lämpöhäviöt soveltamalla teoriaosassa esitettyjä kaavoja. Prosessin mittausten tiedoista saatiin laitteiston sisälämpötilat. Ulkolämpötila ja tuulen nopeus saatiin Kilpilahden alueen säämittauspisteistä saaduista mittaus tiedoista. Säteilylämpöhäviöiden laskennassa ympäristön lämpötilaksi asetettiin tarkasteltavan ajanjakson ulkolämpötila. Kokonaislämpöhäviöiden laskennassa käytetyt mittauksien tiedot ovat esitettynä taulukossa 8 (21).

Taulukko 8. Kokonaislämpöhäviön laskennassa käytetyt mittauksien tiedot (21)

Nro	Päivä	Lämpötila						
		Tuuli	Tuuli	Ulko- ilma	Riser	Regeneraattori		Savu- kaasu
		Nopeus	Suunta			Yläosa	Alaosa	
		m/s	Astetta	°C	°C	°C	°C	°C
1	2.9.2015	5,2	79	17,2	515	678	700	717
2	30.6.2015	3,4	211	16,5	549	688	699	707
3	8.3.2016	1,6	94	1,7	550	681	696	709
4	15.3.2016	2,8	65	1,4	520	676	692	708

Ulkopuolisena lämmönsiirtymiskertoimena käytettiin kirjallisuudesta saatuja arvoja sekä laskettiin laitteiston pintalämpötilan ja ympäristön lämpötilan mukaan säteilylämmönsiirtokerroin ja näiden yhdistelmälämmönsiirtokerrointa käytettiin ulkopinnan lämmönsiirtovastuksen laskentaan (18). Sisäpuolisena lämmönsiirtokerroimena käytettiin kirjallisuudesta saatuja arvoja, joita käytettiin sisäpinnan lämmönsiirtovastuksen laskentaan (19).

Vuorausmateriaalin lämmönjohtavuus arvioitiin sen sisä- ja ulkopinnan lämpötilan mukaan valitulla keskimääräisellä lämmönjohtavuudella sekä lisättiin vuorausmateriaalin paksuudelle sopiva ankkurikorjauskertoimen mukaan laskentaan.

Näin laskettujen osakokonaisuuksien lämpöhäviöiden summana saatiin laitteistokokonaisuuden lämpöhäviöt laskettua. Taulukossa 9 on esitetty lasketut lämpöhäviöt laitteistokohtaisesti sekä laskettu laitteistokokonaisuuden kokonaislämpöhäviö.

Taulukko 9. Lasketut lämpöhäviöt

Laite / Lämpöhäviö / MW						
Päivä	Reaktori	Regene- raattori	Riser	Hopper	Savu- kanava	Kokonais- lämpöhäviö
2.9.2015	0,94	1,66	0,47	0,37	0,64	4,08
30.6.2015	0,99	1,65	0,50	0,36	0,62	4,12
8.3.2016	0,94	1,60	0,48	0,35	0,59	3,95
15.3.2016	0,95	1,66	0,48	0,36	0,63	4,09

Kokonaislämpöhäviöerot eri ajotapojen välillä ja eri ulkoilman lämpötilojen välillä ovat melko pieniä. Kokonaislämpöhäviöt ovat kaikissa tarkastelluissa tapauksissa noin 4 MW:n luokkaa.

Taulukossa 10 on esitetty päälaitteiden lämpöhäviöt. Päälaitteiden lämpöhäviö tietoa voidaan käyttää yhtiön tasemonitorointimallissa.

Taulukko 10. Päälaitteiden lämpöhäviöt

Laite / Lämpöhäviö / MW					
Päivä	Reaktori	Regene- raattori	Riser	Hopper	Kokonais- lämpöhäviö
2.9.2015	0,94	1,66	0,47	0,37	3,44
30.6.2015	0,99	1,65	0,50	0,36	3,50
8.3.2016	0,94	1,60	0,48	0,35	3,36
15.3.2016	0,95	1,66	0,48	0,36	3,46

Taulukossa 11 on tarkasteltu vaipan ulkopinnan emissiivisyys arvon vaikutusta laitteistokokonaisuuden lämpöhäviöihin. Lämpökamerakuvauksissa on havaittu uuden maalattun pinnan emissiivisyys arvon olevan 0,37 (20). Taulukossa 11 on käytetty 15.3.2016 laskenta-arvoja ja muutettu ainoastaan ulkopinnan emissiivisyysarvoa.

Taulukko 11. Eri emissiivisyysarvoilla lasketut lämpöhäviöt

Ulkopinnan emissiivisyys	Lämpöhäviö MW	Lämpöhäviö GWh/v
0,37	4,019	35,21
0,67	4,090	35,83
0,95	4,151	36,36

5 Johtopäätökset

Teoriaosassa tarkasteltiin lämmönsiirron teoriaa sekä erityyppisiä seinämärakenteita ja näiden lämpöhäviöiden laskentaan käytettäviä kaavoja. Teoriaosan kaavoja sovellettiin tarkasteltavan laitteiston eri seinämätyyppien lämpöhäviöiden laskentaan Excel-taulukkolaskentaohjelmistossa.

Vuorausmateriaalin paikallaan pitoon tarkoitetut V-ankkurit lisäävät vuorauskerroksen lämmönjohtavuutta merkittävästi, koska teräksen lämmönjohtavuus on merkittävästi suurempi kuin vuorausmateriaalin. V-ankkureiden vaikutus otettiin huomioon lämpöhäviöiden määrittämisessä laskemalla niille ankkurikorjauskerroin.

Materiaalien lämmönjohtavuus vaihtelee lämpötilan mukaan. Suuren sisä- ja ulkopinnan lämpötilaeron johdosta vuorausmateriaalin lämmönjohtavuus muuttuu materiaalissa tarkasteltavan pisteen lämpötilan mukaan. Laskennan avulla tarkasteltiin, miten paloittain lasketun seinämärakenteen lämpöhäviöt poikkeavat yhtenä palana laskettuun seinämärakenteeseen. Paloittain lasketussa seinämärakenteen laskennassa otettiin huomioon lämmönjohtavuuden muuttuminen seinämän sisällä. Laskennassa havaittiin laskentatapojen välisen eron olevan pieni käytettäessä keskimääräistä materiaalikerroksen lämmönjohtavuutta. Eri materiaalien lämmönjohtavuuksista tehtiin käyränsovitussmallit. Näistä malleista saatiin keskimääräinen lämmönjohtavuusarvo laskentaan.

Kokonaislämpöhäviö laitteistokokonaisuudelle on noin 3,4 MW:n luokkaa. FCC-yksiköiden lämpöhäviöt ovat 2–3,5 prosentin luokkaa koksinpoltosta saadusta energiasta ja tässä työssä lasketut lämpöhäviöt ovat tällä alueella (22).

Ulkovuorauksen pinnan emissiivisyys vaikuttaa suoraan säteilylämpöhäviöihin. Laitteiston vaipan pintalämpötilat nousevat osittain melko korkeiksi ja tällöin säteilyn osuus lämpöhäviöistä nousee merkittävästi (20). Vaipan maalipinta on osittain kulunut pois tai likaantunut, jolloin emissiivisyys on näiltä osin luokkaa 0,95 (20). Säteilylämpöhäviöiden minimoimiseksi ja korroosion vähentämiseksi olisi harkittava ainakin laitteiston osista maalaamista uudelleen ruosteisista paikoista matalaemissivisellä maalilla.

Lämpöhäviölaskelmat on tehty suunnittelumittojen mukaan. Lämpökamerakuvauksissa todetut pintalämpötilat ovat korkeammat kuin laskennalliset pintalämpötilat (20). Kuvauksissa saadut korkeammat pintalämpötilat selittyvät laitteiston vuorauksessa tapahtuneesta eroosiosta sekä vuorauksen halkeilusta (20). Laitteiston todellinen lämpöhäviö on suurempi kuin laskennallinen lämpöhäviö.

Lähteet

- 1 Hästbacka, Kaj. 1992. Neste öljystä muoveihin. Espoo: Neste Oy.
- 2 Juuremme. 2015. Verkkodokumentti. Neste Oyj.
<<https://www.neste.com/fi/fi/konserni/tietoa-meistä/juuremme>>. Luettu 29.6.2016.
- 3 Liiketoiminta-alueet. 2015. Verkkodokumentti. Neste Oyj.
<<https://www.neste.com/fi/fi/konserni/tietoa-meistä/liiketoiminta-alueet>>. Luettu 29.6.2016.
- 4 Jalostamot Suomessa. 2015. Verkkodokumentti. Neste Oyj.
<<https://www.neste.com/fi/fi/konserni/tietoa-meistä/tuotanto/jalostamot-suomessa>>. Luettu 29.6.2016.
- 5 Porvoo laitokset. 2015. Verkkodokumentti. Neste Oyj.
<<https://www.neste.com/fi/fi/konserni/tietoa-meistä/tuotanto/jalostamot-suomessa/porvoo>>. Luettu 29.6.2016.
- 6 Neste_tuotantolaitosesite_Porvoo_FI.pdf. 2015. Neste Oyj.
<<https://www.neste.com/fi/fi/konserni/uutiset-media/materiaalit/esitteet>>. Luettu 29.6.2016.
- 7 Ympäristölupapäätös, lsy-2004-y-120-päätös.pdf. 2006. Verkkodokumentti. Länsi-Suomen ympäristövirasto. <[http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa/Entisen_LansiSuomen_ymparistolupavirasto\(26417\)](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa/Entisen_LansiSuomen_ymparistolupavirasto(26417))>. Luettu 14.7.2016.
- 8 Inkinen, Pentti & Tuohi, Jukka. 2012. Momentti 1. Helsinki: Otava.
- 9 Suvanto, Kari. 2012. Tekniikan fysiikka 1. Helsinki: Edita Publishing Oy.
- 10 Cengel, Yunus A. & Ghajar, Afshin J. 2015. Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications, Fifth Edition in SI Units. New York, USA. McGraw-Hill Education.
- 11 hygiene-panels-purmo-outside.jpg. Rettig Lämpö Oy. 2016.
<<http://www.purmo.com/fi/tuotteet/vesikiertoiset-radiaattorit/paneeliradiaattorit/purmo-hygiene.htm>>. Luettu 2.9.2016.
- 12 Wagner, Walter. 1994. Lämmönsiirto. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

- 13 Aurinkolämmön laskentaopas, Aurinko Laskentaopas 2012_ver23082011.pdf. 2011. Verkkodokumentti. Helsinki. [http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Suomen_rakentamismaarayskokoelma\(3624\)](http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Suomen_rakentamismaarayskokoelma(3624)). Luettu 26.9.2016.
- 14 Tyypikuva L-105 FCC-yksikön V-ankkureiden asennuskuvio, NP4-18257.tiff. 2009. Espoo: Neste Oyj.
- 15 Vuorausmateriaalien ainearvoja. <http://www.rescoproducts.com/product-search.html>. Luettu 10.9.2016.
- 16 Vanne, Marko. Vuorausmateriaalien ainearvoja. Calderys Finland Oy. Sähköpostikeskustelu 6.10.2016.
- 17 Tulenkestävät vuoraukset L105 rev. 4. Spesifikaatio. 2010. Espoo: Neste Oyj.
- 18 SFS-EN ISO 6946. Rakenne- ja rakennusosat. Lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin. Laskentajärjestelmä. 2008. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 19 Tamminen, Esa. Suullinen tiedonanto. 30.9.2016.
- 20 Järvi, Jyri. TL2 FCC prosessiastioiden ja putkistojen lämpökuvaus. 2015. Replico Oy.
- 21 Tamminen, Esa. Kirjallinen tiedonanto. 24.10.2016.
- 22 Tamminen, Esa. Suullinen tiedonanto. 9.1.2017.