

Heikki Kauppi

TYHJÖHAIHDUTTIMEN HYÖTYSUHTEEN PARANTAMINEN

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Tekniikan Porin yksikkö

Kemiantekniikan koulutusohjelma

2006

ALKUSANAT

Tämä insinööri työ on tehty Kemira Pigments Oy:n toimeksiannosta Porin tehtailla. Työ tehtiin tammikuun 2006 ja huhtikuun 2006 välisenä aikana.

Työni valvojana toimi Timo Hannelius, häntä haluan kiittää arvokkaista neuvoista ja laajasta tuesta työn aikana.

Lisäksi haluan kiittää yhteys henkilöinäni Matti Myllymäkeä ja Ipo Harjua laajasta ja asiantuntevasta opastuksesta. Kiitos kuuluu myös kaikille Kemiralaisille, jotka auttoivat minua työssäni, etenkin Kimmo Nauhalle ja Harri Dahlbergille.

Haluan kiittää myös Satakunnan ammattikorkeakoulun kemiantekniikan osastoa ja opettajia, saamastani avusta ja työkaluista.

Perheelleni ja ystäväilleni, eritoten Ossille, kuuluu myös suuri kiitos avusta ja tuesta työni ja koko opiskeluni aikana.

Porissa 11.4.2006

Heikki Kauppi

TYHJIÖHAIHDUTUKSEN HYÖTYSUHTEEN PARANTAMINEN

Kauppi, Heikki

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Pori

Kemiantekniikan koulutusohjelma

Toukokuu 2006

Sivumäärä: 47+6

Avainsanat: haihdutus, tyhjiötekniikka, lämmön siirtyminen, lämmönvaihtimet

UDK: 621.576, 66.049.1

Työssä keskityttiin Kemira Pigments Oy:n Porin tehtailla käytettyyn tyhjiöhaihdutuslaitteistoon. Ensimmäiseksi selvitettiin tyhjiöhaihdutuslaitteiston yhteydessä käytetyn levylämmönvaihtimen tarpeellisuutta. Toiseksi tutkittiin mahdollisuutta kasvattaa esilämmittimen lämmitystehokkuutta. Työ aloitettiin rakentamalla simulointikaavio tyhjiöhaihdutuslaitteistosta Chemcad-ohjelmalla. Simulointikaavion tarkkuus varmistettiin simuloimalla sitä ja vertaamalla tuloksia kokeellisesti tunnettuihin tuloksiin. Haihduttamoita 11 ja 12 käytettiin simuloinnissa lähdetietoina. Lisäksi todettiin, että haihduttamo 21 antaa vastaavanlaisia tuloksia haihduttamoiden rakenteiden ja koon yhtenevyydestä johtuen.

Haihduttamoiden 11 ja 12 esilämmittimien maksimaalisia lauhdutuskapasiteetteja arvioitiin haihduttamoiden vuosittaisista käyttötiedoista. Tietoja käytettiin pohjana muokatun järjestelmän laskennalle. Molemmille haihduttamoille laskettiin uudet hyötysuhteet ja niiden avulla arvioitiin höyryn kulutuksesta kertyvä säästö. Laskennallisesti höyryn säästöä kertyisi yli 100 000 € vuodessa. Mikäli esilämmittimet mitoitettaisiin uudestaan, nousisi höyryn säästö jopa yli kaksinkertaiseksi.

Levylämmönvaihtimen käytöstä kertyviä vuosittaisia kustannuksia verrattiin haihduttamon vuosittaisista tiedoista laskettuun arvioon höyryn käytön lisääntymisestä. Tuloksista todettiin, että haihduttamon 11 levylämmönvaihtimen poistaminen toisi säästöjä. Mutta haihduttamon 12 höyryn kulutus ylittäisi säästöt. Lisäksi havaittiin, että levylämmönvaihtimen poistaminen nostaisi tuotantomäärää. Tuotantomäärän kasvusta johtuva myyntitulojen kasvu olisi haihduttamoilla 11 ja 12 yhteensä yli 1,2 miljoonaa euroa vuodessa. Lopuksi todettiin myös, että haihduttamoiden 11 ja 12 levylämmönvaihtimen poistaminen toisi huomattavia säästöjä.

ABSTRACT

Kauppi, Heikki

Satakunta University of Applied Sciences

Unit of Technology in Pori

Chemical engineering

May 2006

Pages: 47+6

Keywords: evaporation, vacuum technology, heat transfer, heat exchangers

UDC: 621.576, 66.049.1

The main object of this work was to study effectivity of vacuum evaporation system used by Kemira Pigments Oy factory in Pori. First, the necessity of plate heat exchanger used in connection with the vacuum evaporation equipment was studied. The possibility to increase the effectiveness of pre-warmer was studied as well. At the beginning, a simulation chart of vacuum evaporation equipment was evaluated with Chemcad program. Precision of the simulation chart was ensured by simulating it and comparing the results with experimentally known results. Vacuum evaporation units 11 and 12 were used as reference in the simulation. It was also noted that results of evaporator 21 would be similar to evaporation systems 11 and 12, because of their identical constructions.

The maximal condensation capacities of pre-warmers in the evaporators 11 and 12 were estimated from annual operation reports. This information was used as a base in calculation of modified system. New efficiencies were calculated for both evaporation systems. This information was used in calculation of savings in steam consumption. Annual steam saving would be over 100 000 €. If the pre-warmers would be replaced with larger ones, the saving would be doubled.

Estimated increased steam consumption of evaporation system was compared to annual operation costs of plate-heat exchangers. Results indicated that if plate-heat exchanger from evaporation system 11 would be removed, overall savings would be positive. However, removing the plate-heat exchanger in unit 12 would result in increased steam consumption, which exceeds the savings. It was also noticed that removal of the plate-heat exchanger, would lead to production capacity increase. Total production increase in units 11 and 12 would correspond over 1,2 million € annual sales increase. Finally, it was noticed that removing the plate-heat exchangers from evaporation systems 11 and 12 would result significant process economical savings.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	7
2	TEORIA	8
2.1	Lämmönsiirron perusteet	8
2.1.1	Johtuminen	8
2.1.2	Konvektio.....	9
2.1.3	Säteily.....	9
2.2	Lämmönsiirtimet.....	10
2.2.1	Levylämmönsiirrin.....	10
2.2.2	Putkilämmönsiirrin.....	12
2.2.2.1	Kaksoisputkilämmönsiirrin.....	12
2.2.2.2	Putki- ja vaippalämmönsiirrin.....	12
2.2.3	Spiraalilämmönsiirrin.....	13
2.2.4	Lämmönsiirtimen valintakriteerit	14
2.2.5	Konvektiokertoimen määrittäminen.....	15
2.2.6	Lämmönsiirron dimensiottomat tunnusluvut	17
2.2.7	Likaantuminen.....	18
2.2.8	Korjauskerroin.....	20
2.3	Haihdutus	20
2.3.1	Paineen vaikutus kiehumispisteeseen	21
2.3.2	Tyhjiöhaidutus	22
2.3.2.1	Tyhjiöhaidutintyyppit.....	23
3	HAIHDUTTAMOT NRO 11 JA 12	26
3.1	Prosessin kuvaus	26
3.2	Aine- ja energiataseiden simulointi.....	27
3.3	Kirkkaan liuoksen aineominaisuudet	29
3.4	Haiduttamoiden hyötysuhteet.....	30
3.5	Esilämmittimien (232.11 ja 232.12) tehokkuus	31
3.5.1	Lämmönsiirtokertoimien määrittäminen	32
3.6	Muokattu järjestelmä.....	35
3.7	Muokatun järjestelmän simulointi	35

4	LEVYLÄMMÖNVAIHDIN.....	41
4.1	Levylämmönvaihtimen vuosittaiset kustannukset	41
4.2	Haihduksen toiminta levylämmönvaihtimen kanssa ja ilman.....	42
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	46
	LÄHDELUETTELO.....	47
	LIITELUETTELO	

1 JOHDANTO

Viime vuosikymmeneltä lähtien Kemira Pigments Oy on panostanut energiataloudellisuuteen ja ympäristön suojeluun. Nämä seikat yhdistettynä sekundaarienergian hyötykäyttöön, tarjoavat kattavan pohjan tuotannon tehostamiseen ja jätekuormituksen minimoimiseen. Hukkaenergian minimoiminen on tehostunut laiteuudistusten ja osaamisen kasvamisen vaikutuksesta. Haihduttamoiden sekundaarienergian hyötykäyttö ja sen tehostaminen ovat olennainen osa energiataloudellisuuden ja ympäristön suojelemisen vaalimista ja parantamista.

Titaanidioksidipigmentin valmistuksessa yksittäisistä prosessivaiheista haihduttamot ovat yksi suurimmista energiankuluttajista. Haihdutuksesta vapautuu valtavia määriä lämpöenergiaa sitoutuneena vesihöyryyn. Tällaista sekundaarienergiaa on mahdollista ja kannattavaa käyttää uudelleen. Näillä höyryillä kuumennetaan haihduttamoon syötettävää liuosta kahdessa eri vaiheessa. Työssä tutkittiin millä tavalla voitaisiin tehostaa haihduttamon lämmönsiirtoa ja kasvattaa esilämmittimen tehokkuutta.

Tämä työ tehtiin Kemira Pigments Oy:n Porin tehtailla. Työn tavoitteena oli tutkia haihduttamoiden edessä käytettyjen levylämmönvaihtimien tarpeellisuutta. Toissijaisessa tehtävässä perehdyttiin esikuumentimen kapasiteetin ja tehokkuuden parantamiseen. Levylämmönvaihtimien tarpeellisuuden tutkiminen on kustannustehokkuuden kannalta hyvin tärkeätä, koska niiden huoltokustannukset ovat vuodessa todella suuria. Esilämmittimen tehokkuuden parantaminen on energiataloudellisuuden kannalta tärkeätä, koska tehokkuutta ja lauhduskapasiteettia kasvattamalla saadaan aikaan merkittävää tuorehöyryn säästöä.

Alussa työssä käsitellään prosessin kulkua ja haihduttamon rakennetta, jotta saadaan selkeä kuva tarpeellisista tiedoista. Jatkossa perehdytään aine- ja energiataaseiden laskeamiseen ja niiden simulointiin, jotta saadaan varmuus simuloinnin tarkkuudesta. Seuraavaksi tarkastellaan esilämmittimen tehokkuutta, rakennetaan muokattu järjestelmä ja simuloidaan sitä. Työn levylämmönvaihdinta käsittelevässä osuudessa tutkitaan levylämmönvaihtimen tarpeellisuutta ja vuosikustannuksia.

2 TEORIA

2.1 Lämmönsiirron perusteet

Kun kaksi eri lämpötiloissa olevaa kappaletta ovat vuorovaikutuksissa toisiinsa, lämpö virtaa korkeamman lämpötilan omaavasta kappaleesta matalamman lämpötilan omaavaan kappaleeseen. Termodynamiikan pääsäännön mukaan lämpövirta tapahtuu aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämmön siirtyminen voi tapahtua kolmella eri tavalla, jotka ovat; johtuminen, konvektio ja lämpösäteily. /1/

1. Johtumista tapahtuu kiinteissä aineissa tai fluideissa lämpötilaeron vaikutuksesta.
2. Konvektiossa lämpöä siirtyy kiinteän kappaleen sekä virtaavan fluidin välillä.
3. Lämpösäteilyssä lämpö kulkee ilman väliainetta.

Konvektio voidaan luokitella kahteen osaan virtauksen luonteen mukaan. Pakotetussa konvektiossa virtaus on saatu liikkeeseen mekaanisella laitteella esim. pumpulla tai puhaltimella. Vapaa konvektio on vastakohta pakotetulle konvektiolle, se aiheutuu puhtaasti gravitaatiosta eli maan vetovoiman aikaansaamasta virtauksesta. Pakotetun konvektion tapauksessa voidaan lämpösäteilyn vaikutus jättää yleensä huomioimatta. Täten muutokset energian varastoitumisessa johtuvat ainoastaan systeemin sisäisen lämpöenergian muutoksesta tai faasin muutostapauksessa latenttilämmöstä.

2.1.1 Johtuminen

Jos aineessa esiintyy lämpötilaero, lämpö voi siirtyä ilman havaittavaa materian siirtymistä. Tällaista lämmönsiirtymistä kutsutaan johtumiseksi. Metalleissa lämmön johtuminen tapahtuu vapaiden elektronien avulla, siksi metallien sähkönjohtavuuden ja lämmönjohtavuuden välillä vallitsee hyvä vastaavuus. Kiinteissä aineissa ja useimmissa liuksissa, joilla on huono sähkönjohtavuus ja lämmönjohtavuus, aiheutuu yksittäisten molekyylien liikemäärän siirtymisestä lämpötilaeron suunnassa. Kaasuissa johtuminen aiheutuu yksittäisten molekyylien satunnaisesta liikkeestä, siten että lämpö diffusoituu kuumemmasta alueesta kylmempään. Yleisin esimerkki tästä on lämmön johtuminen

esimerkiksi uunin tiiliseinässä tai kuumassa putkessa. Lämpövuoto on lämpövirta isotermissen pinnan poikki suhteessa pinnan lämpötilagradienttiin. Tätä yleistystä, mikä pätee mihin tahansa kappaleeseen, kutsutaan Fourierin laiksi.

$$\dot{Q} = -kA \frac{\partial T}{\partial L} \quad (1)$$

2.1.2 Konvektio

Konvektio on lämpöenergian siirtymistä fluidissa lämpötilaeron aiheuttamien virtausten mukana. Konvektio aiheutuu siis lämpötilaerosta, joka aiheuttaa fluidiin tiheyseroja. Kuuma, harvempi fluidi kohoaa painovoimakentässä ylöspäin nosteen ansiosta ja tiheämpi, viilentynyt aine laskeutuu alaspäin. Tällaista tapahtumaa kutsutaan vapaaksi konvektioksi. Esimerkiksi ilman kulkeutuminen lämpöpatterin läpi on esimerkki vapaasta konvektiosta. Jos fluidi saatetaan liikkeeseen mekaanisen laitteen, esimerkiksi pumpun tai puhaltimen avulla, on kyse pakotetusta konvektiosta. Hyvä esimerkki tästä on fluidin lämmitys, jota pumpataan kuumennetun putken läpi. Molemmat konvektiota-
vat voivat esiintyä fluidissa samaan aikaan. Konvektiossa tapahtuvaa lämmön siirtymistä fluidin ja kiinteän kappaleen välillä voidaan kuvata ao. kaavalla.

$$\dot{Q} = UA\Delta T \quad (2)$$

2.1.3 Säteily

Lämpösäteily on energian siirtymistä elektromagneettisen säteilyn avulla tilan läpi. Lämpösäteilyn kulkiessa tyhjän tilan läpi se ei muutu lämmöksi tai muuksi energiaksi, eikä se muuta suuntaansa. Jos kuitenkin materiaa esiintyy sen kulkusuunnassa, se voi, siirtyä, heijastua tai absorboitua materiaan. Vain absorboitunut säteily esiintyy lämpönä materiassa. Esimerkiksi kvartsi johtaa lähes kaiken siihen osuneesta säteilystä; kiillotettu läpinäkymätön pinta tai peili heijastaa suurimman osan siihen kohdistuneesta säteilystä; musta tai matta pinta absorboi lähes kaiken säteilyn ja muuntaa absorboitun sätei-

lyn lämmöksi. Pinnan emittoiman kokonaissäteilyn lämpövirta puoliavaruuteen voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\dot{q} = \varepsilon\sigma T^4 \quad (3)$$

2.2 Lämmönsiirtimet

Lämpöenergian siirtäminen kuumemmasta fluidista kylmempään fluidiin on yleistä kemianteollisuudessa, tämä tapahtuu yleensä kiinteän seinämän läpi. Siirretty lämpöenergia voi olla latenttilämpöä johon sisältyy faasinmuutos, esimerkiksi höyryn lauhtuminen tai nesteen haihtuminen, tai se voi kehittyä nesteen lämpötilan muutoksesta ilman faasinmuutosta. Tyypillinen esimerkki on kuumen fluidin lämpötilan laskemista siirtämällä lämpöenergiaa kylmempään fluidiin. Tämä voidaan saavuttaa lauhtuttamalla höyryä jäähdytysvedellä tai höyrystämällä liuosta lauhtuttamalla höyryä korkeammassa paineessa.

Lämmönsiirtimet voidaan luokitella kolmeen ryhmään niiden syöttöjärjestelyiden perusteella. Myötavirtajärjestelmässä molemmat fluidit syötetään samasta päästä, fluidit kulkevat tuubeissa ja vaipassa samaan suuntaan. Vastavirtajärjestelmässä fluidit syötetään eri päistä ja ne virtaavat toisiaan vastaan tuubeissa ja vaipassa. Tyypillinen vastavirtalämmönsiirtimen rakenne selviää kuvasta 2. Vastavirtamenetelmä on huomattavasti tehokkaampi kuin myötavirtamenetelmä. Ristivirtajärjestelmässä fluidit syötetään lämmönsiirtimeen toisiinsa nähden kohtisuorassa.

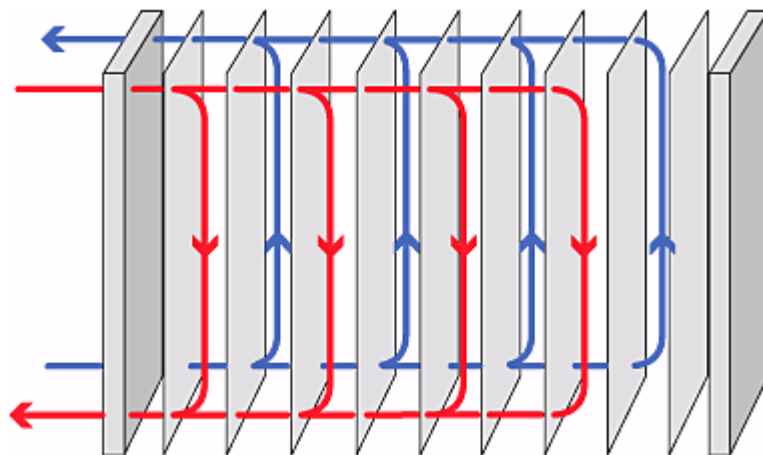
2.2.1 Levylämmönsiirrin

Levylämmönsiirrin muodostuu yleensä muotoilluista metallilevyistä, jossa on kulkuaukot kahdelle nesteelle. Levyn pintaprofiilin aallotus lisää nesteen turbulenssia ja antaa levyille tukea paine-eroja vastaan. Liuoksen turbulentsisuus kasvattaa lämmönsiirtokerrointa, kertoimen kasvaessa suurenee myös vaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin ja lämmönsiirto vaihtimessa virtaavien nesteiden välillä tehostuu.



Kuva 1. Alfa Lavalin levylämmönvaihdin (M15-FM8).

Fluidien kierto on järjestetty levylämmönsiirtimissä siten, että kuuma lämmitysneeste kiertää levyjen välissä vuorotellen kylmän kuumennettavan nesteen kanssa, kuten kuvasta 2 näkyy. Levyt ovat tyypillisesti n. 5 mm erillään toisistaan. Ne voidaan irrottaa toisistaan helposti, esimerkiksi puhdistusta varten ja lisää lämmönsiirtopinta-alaa saadaan yksinkertaisesti lisäämällä levyjen lukumäärää. Levylämmönsiirtimien tyypillinen maksimi käyttölämpötila on n. 150 °C johtuen käytetyistä tiivisteistä ja maksimi pinta-ala n. 500 m². Levylämmönsiirtimet ovat tehokkaita kuumennettaessa hyvin viskooseja liuoksia, viskositeetin ollessa jopa 300 P.



Kuva 2. Vastavirtalevylämmönsiirtimen rakenne

2.2.2 Putkilämmönsiirrin

Putkilämmönsiirrin koostuu nipusta metallisia putkia eli tuubeja, joita ympäröi metallinen putki tai vaippa. Vaippaan syötetään kuumentava neste ja putkissa kiertää kuumentava neste. Putkilämmönsiirtimet soveltuvat rakenteensa johdosta korkeita paineita ja lämpötiloja vaativiin käyttötarkoituksiin. Yleisimmät putkilämmönsiirrintyytit ovat kaksoisputkilämmönsiirrin sekä putki- ja vaippalämmönsiirrin.

Putkilämmönsiirtimessä vaippa- ja tuubipuolen lämmönsiirtokertoimet ovat molemmat yhtä tärkeitä, jos halutaan saavuttaa hyvä kokonaislämmönsiirto, on molempien oltava verrattain suuria. Liuoksen nopeus ja turbulentsuus ovat myös erittäin tärkeitä tekijöitä. Jotta lämmönsiirtimessä saataisiin aikaan ristivirtausta ja nostettua vaippapuolen liuoksen nopeutta, asennetaan vaippaan ohjauslevyjä, joiden sijainti ja koko nähdään hyvin kuvasta 3.

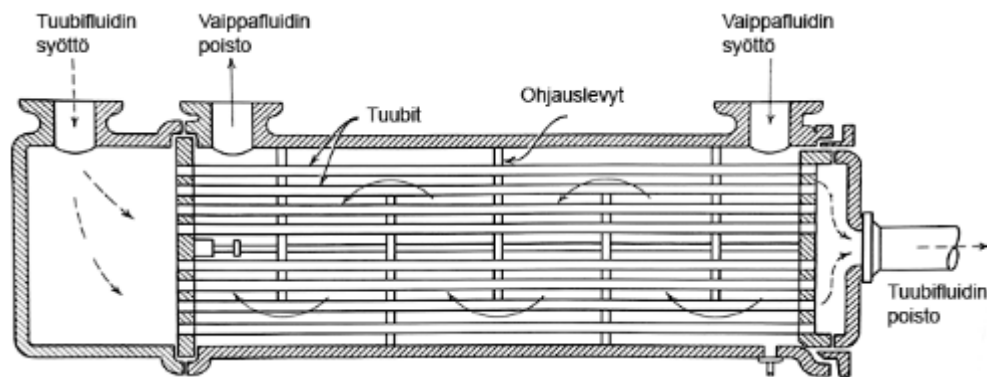
2.2.2.1 Kaksoisputkilämmönsiirrin

Kaksoisputkilämmönsiirtimien rakenne on hyvin yksinkertainen. Ne koostuvat kahdesta putkesta joista toinen on toisen sisällä. Kun tarvittava lämmönsiirtopinta on pieni ja prosessivirrat ovat korkeassa paineessa, käytetään yleensä kaksoisputkilämmönsiirrintä. Jotta kapasiteettia ja lämmönsiirtotehoa saadaan kasvatettua, lämmönsiirtimiä voidaan asentaa useampia sarjaan tai rinnan

2.2.2.2 Putki- ja vaippalämmönsiirrin

Putkilämmönsiirrin koostuu pääpiirteittäin metallisista putkinipuista, joita ympäröi metallinen vaippa. Putket ovat kiinnitetty päistään putkilevyyn, joka erottaa putki- ja vaippapuolen nesteet toisistaan. Vaipan sisälle on kiinnitetty ohjauslevyjä lisäämään vaippapuolen virtausnopeutta, tehostamaan lämmönsiirtokerrointa sekä tukemaan putkiryhmää. Putkien sijoittelua voidaan muuttaa käyttötarkoituksen mukaan, yleisimmät käytetyt tavat ovat neliö, kolmio ja käännetty neliö. /2/

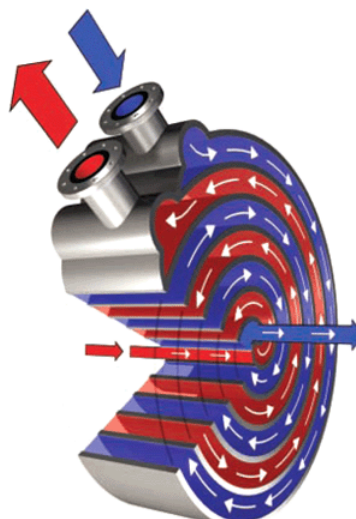
Putki- ja vaippalämmönsiirrin on eniten käytetty lämmönsiirrintyyppi prosessiteollisuudessa, vaikka niillä saavutetaan kuitenkin suhteellisen alhainen teho/kustannussuhde. Niiden suosio perustuu pitkälti luotettavuuteen, kestävyYTEEN ja rakenteiden monipuolisuuteen. Tästä syystä putki ja vaippalämmönsiirtimien suunnittelu- ja valmistusmenetelmät ovat laajalti tunnettuja. Putkilämmönsiirtimet ovat mekaanisesti monipuolisimpia ja niitä voidaan käyttää laajalla virtausalueella muuntelemalla esimerkiksi putkikokoa, putken pituutta, putkijakoa, läpikäyntien lukumäärää, välilevyjen etäisyyttä, ohjauslevyjen leikkauksia tai laittamalla useampi vaippa rinnakkain tai sarjaan.



Kuva 3. Tyypillisen putkilämmönsiirtimen rakenne

2.2.3 Spiraalilämmönsiirrin

Spiraalilämmönvaihdin koostuu kuvan 4 havainnollistamalla tavalla keskeisen sydämen ympäri kierretystä metalliliuskasta, joiden välillä siirretään lämpöenergiaa.



Kuva 4. Spiraalilämmönsiirtimen rakenne

Koska spiraalilämmönsiirtimessä ei ole tiivisteitä, niiden maksimi käyttölämpötila on jopa +400 °C ja painekestävyys on noin 40 baaria (abs). Pinta-alaltaan spiraalilämmönsiirrin voi olla jopa 700 m². /5/ Spiraalilämmönsiirrin voi toimia vasta- tai ristivirtaperiaatteella ja se soveltuu neste-neste ja neste-kaasu käytön lisäksi myös lauhdutukseen ja kiehutukseen. Nämä lämmönsiirtimet ovat tehokkaita käsiteltäessä lietemäisiä ja viskooseja nesteitä. Spiraalilämmönsiirtimien itsepuhdistus ominaisuus perustuu siihen, että aineen kertyessä kanavaan kanavan poikkipinta-ala pienenee, jonka seurauksena nesteen virtausnopeus kasvaa ja kertyneet aineet irtoavat.

2.2.4 Lämmönsiirtimen valintakriteerit

Useasti saattaa olla samaan lämmönsiirtotehtävään useita mahdollisia lämmönsiirrintyyppisiä. Kuitenkaan ei ole tärkeintä löytää tehokkain ja korkeimman tehokkuuden omaava siirrin, vaan tehtävään täytyy valita siirrin, joka täyttää prosessin vaatimukset. Siirtimen tulee siis täyttää prosessivirtojen lämpötilan muutos annetuin painehäviöin. Samalla siirtimen tulee kestää mahdolliset prosessin häiriötapausten johtuvat rasitukset. Lisäksi lämmönvaihtimessa tulee olla hyvä ja tehokas huollettavuus

Yleensä lämmönsiirtimen valintaa hallitsee yksi määräävä tekijä. Esimerkiksi elintarviketeollisuudessa lämmönsiirtimen tulee olla mahdollisuuksien mukaan helposti puhdistettavissa. Joskus prosessi saattaa olla erittäin herkkä epäpuhtauksille, tällöin on syytä valita tiivisteetön ja hitsattu rakenne. Nykyään ympäristö- ja turvallisuusnäkökohdat vaikuttavat yhä enemmän lämmönsiirrinten suunnitteluun ja valintaan. Haluttu käyttöikä vaikuttaa omalta osaltaan lämmönsiirtimen valintaan ja siirtimeltä vaadittuihin kestävyysominaisuuksiin.

2.2.5 Konvektiokertoimen määrittäminen

Lämmönsiirtimen kokonaistehon määrittämiseksi täytyy tietää konvektiokertoimen suuruus. Vaikka konvektion määrittäminen on erittäin monimutkainen ja vaikea laskennallisesti, voidaan sitä kuvata yksinkertaistetulla kaavalla:

$$\dot{Q} = UA\Delta T_L \quad (4)$$

Kokonaisteho voidaan myös määrittää syöttöliuoksen tietojen perusteella seuraavalla kaavalla:

$$\dot{Q} = C_p \dot{m} \Delta T \quad (5)$$

Lämmönläpäisystä puhuttaessa tarkoitetaan tilannetta, jossa lämpöenergiaa siirtyy virtaavasta fluidista kiinteään seinämään ja edelleen seinämästä toiseen virtaavaan fluidiin. Lämmönsiirtimen lämmönläpäisykerrointa eli konvektiokerrointa (U) määritettäessä tulee tietää vaippa- ja tuubipuolen lämmönsiirtokertoimet, seinämän lämmönjohtavuuskerroin ja paksuus. Kun nämä arvot tiedetään, voidaan laskea U seuraavalla kaavalla: /6/

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_t} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_v}} \quad (6)$$

Taulukko 1. Nesteille ja kaasuille tyypillisiä lämmönsiirtokertoimia

Prosessi	α :n suuruus
	Vapaa konvektio
Kaasut	2–25
Nesteet	50–1000
	Pakotettu konvektio
Kaasut	25–250
Nesteet	50–20000
	Konvektio faasin muutoksella
Kiehumisen ja kondensaatio	2500–100000

Taulukossa 1 on luetteloitu lämmönsiirtokertoimia erilaisista tapahtumista. Taulukosta voidaan nähdä että tämän työn kannalta kyseessä olevan pakotetun konvektion lämmönsiirtokerroin on väliltä 2500–100000 W/m²K. On kuitenkin huomattava että arvot vaihtelevat hyvin suurella välillä, joten on tärkeää ymmärtää oikean mallilain käyttäminen.

Jotta lämmönsiirtimien tehoja voitaisiin laskea, täytyy tietää kuumennettavan nesteen ja kuumentavan nesteen lämpötilan muutokset. Tätä varten otetaan käyttöön käsite logaritminen keskilämpötilaero, eli LMTD, lämpötilaero voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$\Delta T_L = \frac{(\vartheta_{ho} - \vartheta_{ci}) - (\vartheta_{hi} - \vartheta_{co})}{\ln \frac{(\vartheta_{ho} - \vartheta_{ci})}{(\vartheta_{hi} - \vartheta_{co})}} \quad (7)$$

$$\Delta T_L = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$

Jos lämpötilaerot ΔT_2 ja ΔT_1 ovat melkein yhtä suuria, tulee kaavasta 7 määrittelemätön. Tällöin voidaan kaava 7 korvata lämpötilaerojen aritmeettisella keskiarvolla.

$$\Delta T_L = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2} \quad (8)$$

Kaava 8 pätee, kun $1 < \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} < 1,2$. /3 s. 154/

Vaippapuolen lämmönsiirtokertoimen määrittämiseksi on kehitetty likiarvokaava: /4, s. 711/

$$\alpha_v = 0,27 \cdot \lambda_f \left(\frac{\eta^2}{\rho_f (\rho_f - \rho_h) g} \right)^{-1/3} \quad (9)$$

2.2.6 Lämmönsiirron dimensiottomat tunnusluvut

Jotta lämmönsiirtimen mitoittaminen olisi mahdollista, täytyy selvittää lämmönsiirtotahtuman osalta kolme tärkeätä lukua. Näitä lukuja kutsutaan myös usein lämmönsiirtimen dimensiottomiksi tunnusluvuiksi, nämä luvut ovat Reynoldsin luku, Prandtin luku ja Nusseltin luku.

Reynoldsin luku kuvaa virtauksen tilaa, virtaus voi olla kolmen tyyppinen, laminaarinen, muutostilassa tai turbulenttinen. Laminaarinen virtaus on kaikkein yksinkertaisin, siinä fluidi virtaa tasaisesti putkistossa eikä siinä tapahdu juurikaan sisäistä sekoittumista. Laminaarinen virtaus on myös kaikkein tehottomin ajatellen lämmönsiirtotapahtumaa. Kun virtauksen Reynoldsin luku on 2300 tai pienempi, se on vielä laminaarinen. /3, s. 61/ Muutostilassa oleva virtaus ei ole enää laminaarinen, eikä vielä täysin turbulenttinen. Virtaus on muutostilassa kun sen Reynoldsin luku on välillä 2300–10000. Turbulenttisessa virtauksessa fluidin sisällä tapahtuu voimakasta pyörteilyä, tämä edesauttaa hyvin tehokkaasti lämmönsiirtoa. Reynoldsin luku Re voidaan ilmaista hitausvoimien ja kitkavoimien dimensiottomana suhteena virtausrajakerroksessa.

$$Re = \frac{\rho d_i w}{\eta} \quad (10)$$

Prandtin luku kuvaa fluidin liikemäärän ja termisen diffuusion suhdetta.

$$Pr = \frac{\eta C_p}{\lambda} \quad (11)$$

Nusseltin luku Nu kertoo putken halkaisijan suhteen termisen rajakerroksen paksuuteen.

$$Nu = \alpha \frac{d_i}{\lambda} \quad (12)$$

Koska kaavalla 12 lämmönsiirtokerrointa ei voida määrittää ilman Nusseltin lukua, on laminaariselle täysin kehittyneelle putkivirtaukselle kehitetty likiärvokaava, jossa ei ole lämmönsiirtokerrointa. /4, s. 664/

$$Nu = 1,86 \cdot (\text{Re} \cdot \text{Pr})^{0,33} \left(\frac{d_i}{l} \right)^{0,33} \left(\frac{\eta}{\eta_s} \right)^{0,14} \quad (13)$$

Ja vastaavasti turbulenttiselle virtaukselle on kehitetty likiärvokaava: /4, s. 663/

$$Nu = 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,33} \left(\frac{\eta}{\eta_s} \right)^{0,14} \quad (14)$$

2.2.7 Likaantuminen

Todellisuudessa lämmönsiirrin altistuu prosessissa mukana virtaaville epäpuhtauksille ja saostumille. Lika ja saostumat kerääntyvät lämmönsiirtopinnoille ja voivat muodostaa pinnalle tehokkaasti lämmönsiirtoa heikentävän kerroksen. Tämä on tietenkin epätoivottua ja siksi lämmönsiirtimiä täytyy puhdistaa aika ajoin. Suurin likaantumista aiheuttava aine on kalsiumkarbonaatti eli kalkkikivi CaCO_3 (s), tätä kutsutaan myös joskus kattilakiveksi.

Lämmönsiirrintä mitoitettaessa likaantuminen voidaan kuitenkin ottaa huomioon erityisellä likaantumisvastuksella R_f , joka nostaa vaadittavaa lämmönsiirtopinta-alaa. Likaantumisvastus voidaan yksinkertaisesti ottaa huomioon kaavassa 6 lisäämällä siihen likaantumisvastus R_f :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_v} + R_f} \quad (15)$$

Likaantumisvastus on ylimääräinen este nesteiden väliselle lämmönsiirrolle, ja sen suuruus on riippuvainen vaihtimen käyttölämpötilasta, nesteen nopeudesta ja puhdistusvälin pituudesta. Likaantumisen nopeuteen vaikuttavat esim. lämpövirran suuruus, liuoksen virtausnopeus, siirtimen geometria ja fluidin ominaisuudet. Koska likakerrokset vaikuttavat olennaisesti lämmönvaihtimien siirtotehoihin, on niiden asettamien reunaehdojen huomioon ottaminen käytännön suunnittelussa ja mitoituksessa erittäin tärkeää.

Lämmönsiirtimen pesu voidaan suorittaa monella eri tavalla, ne voidaan pestä paikallaan vastavirtahuuhtelulla, happo- tai emäskylvyissä tai painepesulla. Yksinkertaisin tapa on huuhdella lämmönvaihdin esim. prosessin tauon aikana. Jos likakerrokset eivät irtoa huuhtelulla, voidaan tuubit pestä painepesulla tai happo- tai emäskylvyissä. Tuubit irrotetaan ja ne pestään painepesulla, tämä tapa on tehokkaampi kuin pelkkä vastavirtahuuhtelu. Tehokkain tapa on pestä tuubit happo- tai emäskylvyissä, tämä on kuitenkin hieman kalliimpi menetelmä. Riippuen tuubien materiaalista, tämä menetelmä saattaa rasittaa kuitenkin tuubin pintaa.

Tämän työn puitteissa esiteltyjen haihduttamoiden pesu suoritetaan ns. keittämällä. Haihduttamoon ajetaan puhdasta vettä ja sitä haihdutetaan pienellä määrällä tuorehöyryä, tällä tavalla saadaan esilämmittimen, esikuumentimen ja jälkikuumentimen pintaan kertynyt paksu likakerros irtoamaan. Haihduttamoiden keitto suoritetaan yleensä n. 5 vrk:n välein. Keitto kestää yleensä n. 3-6 tuntia. Joskus keittäminen ei kuitenkaan riitä irrottamaan kaikkea lämmönsiirtimeen kertynyttä likaa. Tämän takia putkilämmönsiirtimeet joudutaan pesemään ns. korkeapainevesipesulla keskimäärin kerran vuodessa. Painepesussa tuubien sisäpintaa puhdistetaan hieromalla niitä mekaanisesti ja suihkuttamalla niihin vettä jopa 1200 baarin paineella. Tämä menetelmä on erittäin radikaali ja se kuluttaa tuubien sisäpintaa hyvin voimakkaasti.

2.2.8 Korjauskerroin

Eri lämmönsiirtimien rakenteen, pintamateriaalin ja lämmönsiirtopinnan profiilien eroavaisuuksien takia mallinnuksessa käytetään korjauskerrointa. Tällä korjauskertoimella voidaan huomioida yllämainittujen seikkojen vaikutukset lämmönsiirtotehoon. Korjauskertoimen avulla voidaan säätää ennalta tunnetut lämmönsiirtimen jättölämpötilat vastaamaan tunnettuja jättölämpötiloja. Kaavaan 15 lisätään lämmönsiirtokertoimien eteen korjauskerroin R .

$$U = \frac{1}{\frac{1}{R\alpha_t} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{R\alpha_v} + R_f} \quad (16)$$

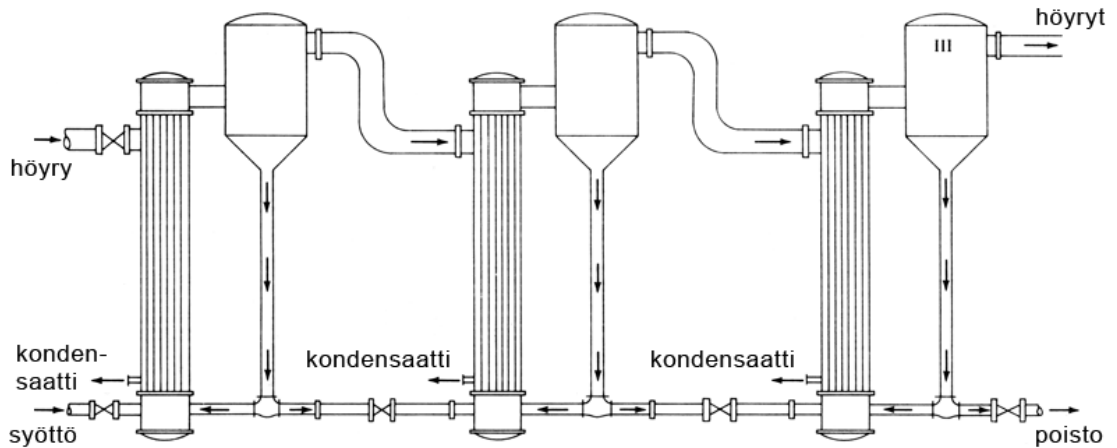
Korjauskerroin vaikuttaa suoraan lämmönsiirtokertoimien suuruuteen. Sen vaikutus on kokonaislämmönsiirtokerrointa pienentävä, jos $R < 1$ ja kasvattava, jos $R > 1$.

2.3 Haihdutus

Haihdutuksen periaatteena on konsentroida liuosta, joka sisältää haihtumatonta komponenttia ja haihtuvaa liuotinta. Valtaosassa tapauksia yleisin haihtuva liuotin on vesi. Konsentroida suoritetaan haihuttamalla osa liuottimesta pois, jolloin saadaan konsentroitua haihtumatonta komponenttia. Toisinaan liuoksessa ei ole lainkaan haihtumatonta komponenttia, vaan molemmat tai kaikki komponentit ovat haihtuvia, tislauksen on hyvä esimerkki tällaisesta tapauksesta. Tyypillisesti väkevöitävä liuos on haluttu tuote ja vapautuvat höyryt nesteytetään ja poistetaan. Toisinaan kuitenkin halutaan ottaa talteen vapautuvat höyryt, tällaisesta on esimerkkinä meriveden höyrystäminen juomakelpoiseksi vedeksi. Kuitenkin tässä menetelmässä vain murto-osa vedestä saadaan höyrystettyä ja konsentroitua merivesi palaa takaisin mereen.

Haihdutus voi tapahtua yksi-, kaksi- tai monivaiheisena. Yksivaiheisessa järjestelmässä liuosta haihdutetaan ainoastaan yhdessä vaiheessa, monivaiheisessa järjestelmässä liuosta haihdutetaan monessa eri vaiheessa. Yksivaiheinen järjestelmä on hyvin yksinkertainen, sen heikkona kohtana on höyryn matala hyödyntäminen. Yhden vesikilon haih-

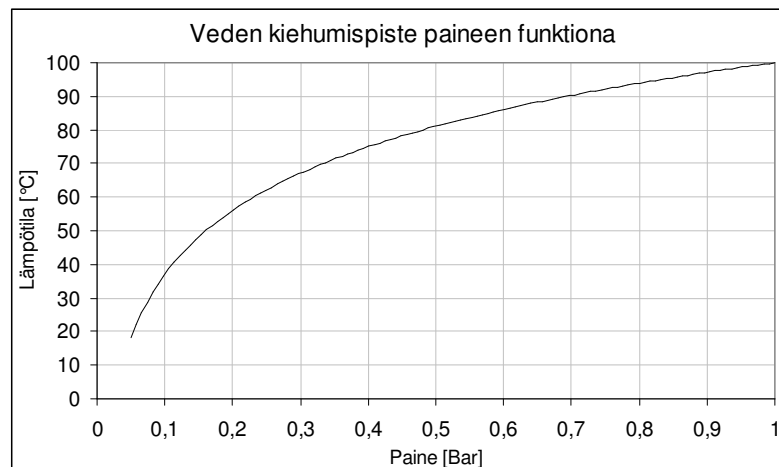
duttaminen liuksesta kuluttaa yleensä 1-1,3 kiloa höyryä. Jos ensimmäisestä vaiheesta vapautuvat höyryt johdetaan toiseen vaiheeseen ja toisesta vaiheesta vapautuvat höyryt johdetaan lauhduttimeen, järjestelmästä tulee kaksivaiheinen. Tämä järjestely vähentää höyryn kulutusta, koska vapautuvia höyryjä käytetään tuorehöyryn sijasta. Toisesta vaiheesta vapautuvia höyryjä voidaan vielä käyttää hyödyksi seuraavassa vaiheessa ja niin edelleen. Tällaisia järjestelmiä kutsutaan monivaiheisiksi järjestelmiksi. /1, s. 465/



Kuva 5. Periaatekuva kierrätetystä kolmivaiheisesta haihdutusjärjestelmästä

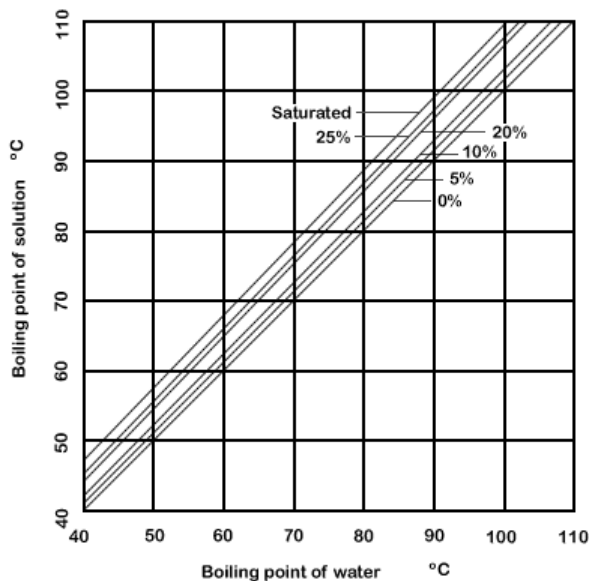
2.3.1 Paineen vaikutus kiehumispisteeseen

Kaikkien nesteiden kiehumispiste muuttuu paineen muuttuessa. Kun paine alenee, alenee myös nesteen kiehumispiste, kuten kuva 6 osoittaa.



Kuva 6. Veden kiehumispiste paineen funktiona

Kun halutaan määrittää tunnetun nesteen kiehumispiste tietyssä paineessa, voidaan käyttää ns. Dühringin sääntöä. Tämän säännön mukaan nesteen kiehumispiste on suoraan verrannollinen puhtaan veden kiehumispisteeseen annetussa paineessa. /1, s. 471/ Jos piirretään nesteen kiehumispiste veden kiehumispisteen funktiona, saadaan suora viiva, Kuva 7. Rajatulla alueella sääntö pätee karkeasti. Painealue, jolla tämä sääntö pätee, riippuu aineesta.



Kuva 7. Esimerkki Dühringin säännöstä natriumkloridiliuoksella

2.3.2 Tyhjiöhaidutus

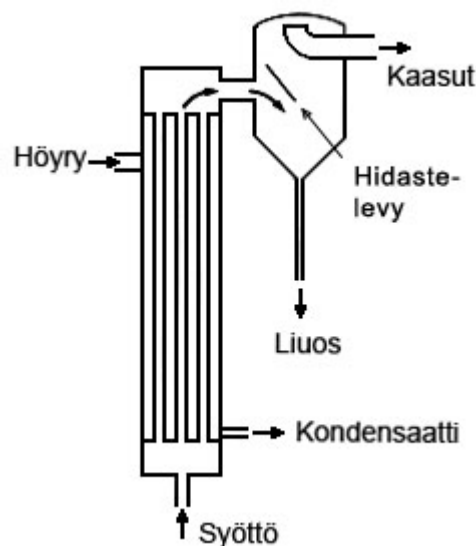
Tyhjiöhaidutuksessa haihdutettava neste saatetaan alipaineeseen, jolloin nesteen kiehumispiste alenee, tällöin nesteen haihduttamiseen kuluu vähemmän energiaa. Tyhjiöhaidutusta käytetään myös, kun haihdutettava neste ei kestä korkeita lämpötiloja tai haihdutettavan liuoksen kiehumispiste on niin korkea, ettei materiaali kestäisi sellaista kuumuutta. Tällöin liuos voidaan haihduttaa alhaisemmassa lämpötilassa ja voidaan valita materiaali joka kestää sellaiset olosuhteet.

Kemianteollisuudessa tyhjiöhaihdutuksella on monta käyttökohdetta. Elintarviketeollisuudessa käytetään juomien valmistuksessa alipainehaihdutusta, koska juoma ei kestä väkevöintiä normaalissa paineessa. Suolojen valmistuksessa vesi-suolaliuoksesta haihdutetaan alipaineessa vettä pois ja näin saadaan väkevöityä liuosta.

Haihduttimet jaetaan kahteen ryhmään niiden rakenteen ja toimintaperiaatteen perusteella, nämä ryhmät ovat kertaläpäisevät tai kierrätetyt.

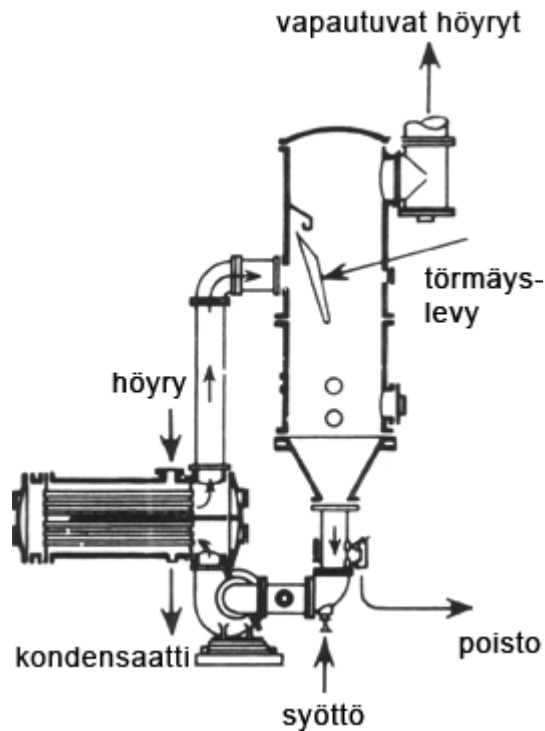
2.3.2.1 Tyhjiöhaihdutintyytit

Kertaläpäisevissä haihduttimissa neste virtaa lämmönsiirtimen läpi ainoastaan kerran ja poistuu yksiköstä konsentroituna nesteenä. Kaikki haihtuminen tapahtuu yhdessä vaiheessa. Tämän tyyppisissä haihduttimissa syötön ja haihdutuksen suhde on rajallinen, joten nämä haihduttimet soveltuvat hyvin monivaihehaihduttimiksi. Sekoitettu filmihaihdutus toimii aina kertaläpäisevänä. Nouseva ja laskeva filmihaihduttimet voivat myös toimia tällä tavalla.



Kuva 8. Periaatekuva kertaläpäisevästä haihduttimesta

Kiertohaihduttimissa haihdutuskammiossa on koko ajan nestettä, tuleva syöte sekoittuu kammiossa olevan nesteen kanssa ja seos kiertää tuubien läpi. Haihtumaton liuos poistuu tuubeista ja palaa takaisin haihdutuskammioon, joten vain osa haihdutuksesta tapahtuu kerralla.



Kuva 9. Kiertohaihduttimen periaatekuva

Kaikki pakotettuun kierrätykseen perustuvat haihduttimet toimivat tällä tavalla. Nouseva filmihaihdutus tapahtuu myös usein tällä tavalla.

Tyypillinen nouseva filmihaihdutin on esitetty kuvassa 8, ainoana poikkeuksena on se, että kammiossa poistuva liuos kiertää takaisin lämmönsiirtimen syöttöön. Haihduttimen tärkeimmät osat ovat, 1. lämmönsiirrin, 2. haihdutuskammio ja 3. palautusputki haihdutuskammiossa lämmönsiirtimen alapäähän. Syöttö tapahtuu haihdutuskammion alaosaan ja syöte sekoittuu kammiossa olevan nesteen kanssa. Konsentroitunut liuos imetään lämmönsiirtimen läpi alhaalta, liuos höyrystyy osittain noustessaan lämmönsiirtimen läpi. Liuoksen ja höyryn seos virtaa kammioon, jossa sen nopeus laskee nopeasti. Vähentääkseen liuospisaroiden kulkeutumista eteenpäin höyry törmää ja kulkee hidastelevyjen ohi ennen poistumistaan kammiossa, ks. kuva 8. Tämä menetelmä myös vähentää vaahtoamista erittäin tehokkaasti.

Laskeva filmihaihdutin koostuu lämmönsiirtimestä, jonka alaosassa on haihdutuskammio. Kuumennusherkkien liuosten, kuten appelsiinimehun kuumennus vaatii minimaalista kuumennusaikaa. Tämä saavutetaan kertaläpäisellä laskevafilmi haihdutuksella, jossa liuos syötetään ylhäältä, virtaa tuubien sisällä alas ja poistuu pohjalta. Kehittyvät höyryt kulkeutuvat yleensä liuoksen mukana alas ja poistuvat lämmönsiirtimen alaosasta. Tämän järjestelmän heikkona kohtana on liuoksen syöttäminen tuubeihin tasaisesti.

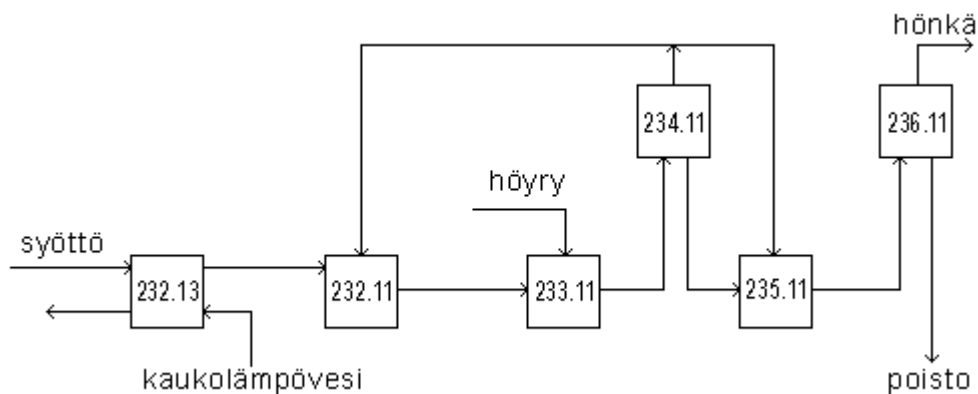
3 HAIHDUTTAMOT NRO 11 JA 12

Tässä osiossa perehdytään haihduttamoiden hyötysuhteen parantamiseen. Haihduttamoiden esilämmittimien tehokkuutta pyritään mahdollisuuksien mukaan kasvattamaan.

Työssä simuloidaan 11 ja 12 haihduttamoita ja arvioidaan niiden esilämmittimien tehokkuutta ja kapasiteettia. Haihduttamo 21 ei tässä työssä voida simuloida, koska siinä oleva esilämmitin on ohitettu. Haihduttamo 21 on kuitenkin rakenteeltaan ja mittasuhteiltaan samanlainen haihduttamoiden 11 ja 12 kanssa. Tästä voidaan päätellä, että esilämmittimen ottaminen käyttöön 21 haihduttamossa antaisi samansuuntaisia tuloksia kuin 11 ja 12 haihduttamoissa.

3.1 Prosessin kuvaus

Haihduttamot 11 ja 12 ovat rakenteeltaan täysin identtisiä keskenään, joten kuvassa 10 esitetty prosessin kuvaus pätee molempiin haihduttamoihin. Haihduttamo 21 poikkeaa kuvan 9 virtauskaaviosta siten, että esilämmitin on ohitettu. Tyhjiöhaihduttamossa konsentroidaan rikkihapon (H_2SO_4), veden ja titaanidioksidin (TiO_2) seosta. Liuos syötetään ennen haihdutusta levylämmönsiirtimeen (232.13), jossa sitä kuumennetaan kaukolämpövedellä $65\text{ }^\circ\text{C}$. Kuumennettu liuos syötetään esilämmittimeen (232.11), jossa sitä kuumennetaan myöhemmin vapautuvilla höyryillä, tyypillisesti tässä saadaan kuumennettua liuosta ainoastaan $2\text{-}4\text{ }^\circ\text{C}$. Tämän jälkeen liuosta kuumennetaan tuorehöyryllä esikuumentimessa (233.11). Tämän putkilämmönsiirtimeen yläpäähän on liitetty esierotin (234.11), jossa liuos kiehuu $0,7$ baarin (abs) paineessa. Poistuvat höyryt johdetaan esilämmittimeen ja jälkikuumentimeen (235.11). Esikuumentimen jälkeen liuos kulkee jälkikuumentimeen. Tähän kuumentimen yhteyteen on liitetty jälkierotin (236.11), jossa liuos kiehuu $0,2$ baarin (abs) paineessa. Jälkierottimesta poistuva liuos kulkee eteenpäin prosessissa.



Kuva 10. Haihduttamon virtauskaavio.

3.2 Aine- ja energiataseiden simulointi

Haihduttamosta 11 määritettiin aine- ja energiataseet simuloimalla sitä Chemcad ohjelmalla. Työn onnistumisen kannalta on hyvin tärkeää tietää kuinka tarkkaan prosessia voidaan simuloida. Siksi titaanipigmentin valmistusprosessista tulostettiin kopiot damaticilta kahden päivän tiedoista ja näiden tietojen pohjalta simuloidaan lämmönsiirtoa.

Taseet laskettiin kahden eri päivän tiedoista, ensimmäisenä päivänä haihduttamon levylämmönvaihdinta ei käytetty, toisena päivänä se oli käytössä. Aineistot ovat keskenään hyvin vertailukelpoisia, koska haihduttamon kapasiteetit olivat molempina päivinä hyvin lähellä toisiaan ja liuoksen aineominaisuudet eivät poikenneet toisistaan paljoakaan. Simuloidut järjestelmät vastasivat hyvin todellista tilannetta prosessin aikana. Tämä on erittäin tärkeää tietää, jotta voidaan simuloida tarkkaan prosessia, kun levylämmönvaihdin on ohitettuna ja käytössä. Laskettujen taseiden pohjalta laskettiin tase muokatulle järjestelmälle ja määritettiin käytetty tuorehöyryn kulutus.

Lasketaan taseet seuraavista arvoista:

Taulukko 2. Lähtöarvot taselaskennalle

	Päivä 1	Päivä 2
kirkkaan TiO ₂ -pitoisuus %, TiO _{2ki}	9,36 %	9,33 %
väkevän TiO ₂ -pitoisuus %, TiO _{2vä}	13,5 %	13,05 %
syöttöliuoksen lämpötila, T _{svöttö}	42 °C	43 °C
lämpötila esilämmittimen jälkeen, T _{esil}	62,9 °C	67,4 °C
lämpötila esierottimen jälkeen, T _{esier}	102,3 °C	102,6 °C

Selvyiden vuoksi määritellään vielä simuloidut prosessilaitteet:

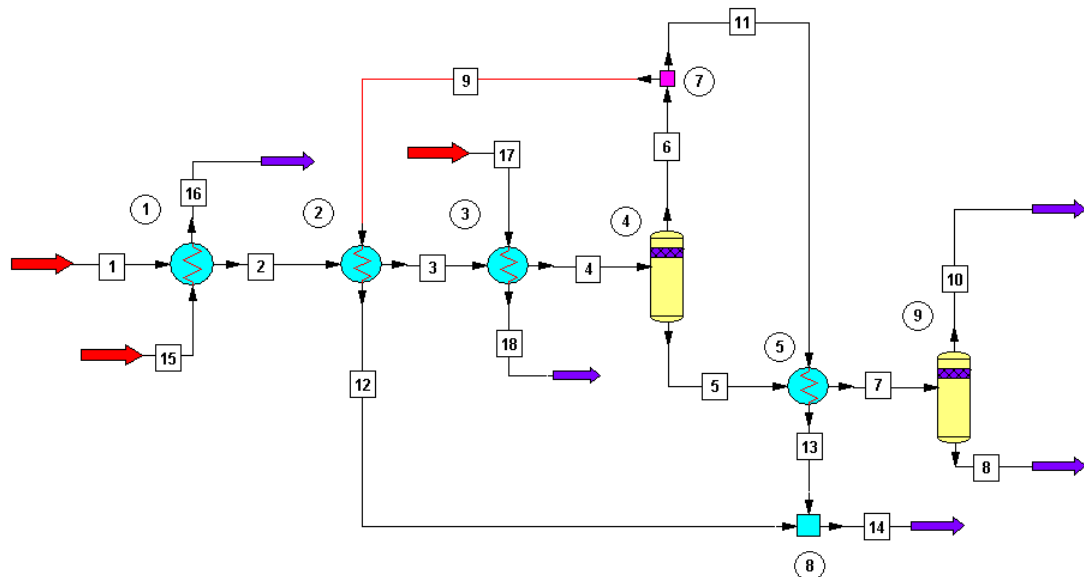
Taulukko 3. Prosessilaitteet

1. Levylämmönvaihdin	(232.12)
2. Esilämmitin	(232.11)
3. Esikuumennin	(233.11)
4. Esierotin	(234.11)
5. Jälkikuumennin	(235.11)
9. Jälkierotin	(236.11)

Sekä tunnettujen prosessivirtojen tiedot:

Taulukko 4. Prosessivirtojen tiedot

	Päivä 1	Päivä 2
1. Liuoksen syöttölämpötila	42 °C	43 °C
1. Liuoksen syöttömäärä	43,4 t/vrk	41,9 t/vrk
3. Liuos esilämmittimen jälkeen	62,9 °C	67,4 °C
5. Liuos esierottimen jälkeen	102,3 °C	102,6 °C
8. Liuos jälkierottimen jälkeen	59,1 °C	58,3 °C
15. Levylämmönvaihtimen syöttölämpötila	-	87 °C
15. Levylämmönvaihtimen syöttö	0 m ³ /h	8 m ³ /h
16. Levylämmönvaihtimen poistolämpötila	-	51 °C
17. Tuorehöyryn syöttö	4,42 t/h	4,03 t/h



Kuva 11. Simulointikaavio

Simulointi aloitettiin rakentamalla ensin simulointikaavio (kuva 11), jonka jälkeen valittiin liuoksen sisältämät aineet ja suhteet. Kun syöttö oli määritetty, määritettiin kaikki lämmönvaihtimien ja flash-erottimien asetukset.

Simulointikaavioon määritettiin syöttöön seuraavat massaosuudet molempien päivien prosessitiedoista:

Taulukko 5. Syötön massaosuudet

	Päivä 1	Päivä 2
Vesi	0,689	0,690
Rikkihappo	0,180	0,177
Titaanidioksidi	0,094	0,093
Rautasulfaatti	0,038	0,040

Simulointikaaviossa oli kaksi määräävää tekijää, jotka saattoivat kaavion tasapainoon. Esilämmittimen höyryn syöttö säädettiin sopivaksi, jotta esilämmittimestä poistuva liuoksen lämpötila täsmäsi määritetyn arvon kanssa. Toinen arvo, jolla säädettiin simulointikaavio tasapainoon, oli esikuumentimen tuorehöyrösyöttö. Tämä arvo säädettiin vastaamaan hetkellistä tilannetta prosessikaaviosta. Kun nämä kaksi arvoa oli määritetty, asetui simulointikaavio tasapainoon.

Kun simuloitu prosessi oli saatu tasapainoon, tarkasteltiin prosessivirtojen tietoja ja verrattiin niitä prosessikaaviosta saatuihin arvoihin. Vertailukohtana toimivat esierottimesta poistuvan liuoksen lämpötila ja väkevän liuoksen titaanipitoisuus.

Esierottimesta poistuvan liuoksen lämpötila piti erittäin hyvin paikkansa simulointimallin antamaan lämpötilaan kanssa. Lämpötilojen välille muodostui heittoa ainoastaan n. yhden asteen verran. Myös haihduttamosta poistuvan liuoksen titaanidioksidipitoisuus piti hyvin paikkansa simulointimallin antaman tulosten kanssa. Tästä voitiin vetää johtopäätös, että simulointimalli piti riittäväällä tarkkuudella paikkansa ja sillä voidaan arvioida muokattua järjestelmää.

3.3 Kirkkaan liuoksen aineominaisuudet

Jotta voidaan arvioida esilämmittimen lämmönsiirtokertoimia, täytyy syöttöliuoksesta tietää monia aineominaisuuksia, kuten viskositeetti, lämmönjohtavuus, tiheys ja ominaislämpökapasiteetti. Taulukon 6 tiedot on kerätty Chemcad-ohjelmasta, pois lukien liuoksen tiheys, joka on saatu Kemiran omasta tiedonkeruujärjestelmästä. Liitteessä 3 on esitetty prosessin joka vaiheen liuoksen kyseiset tiedot.

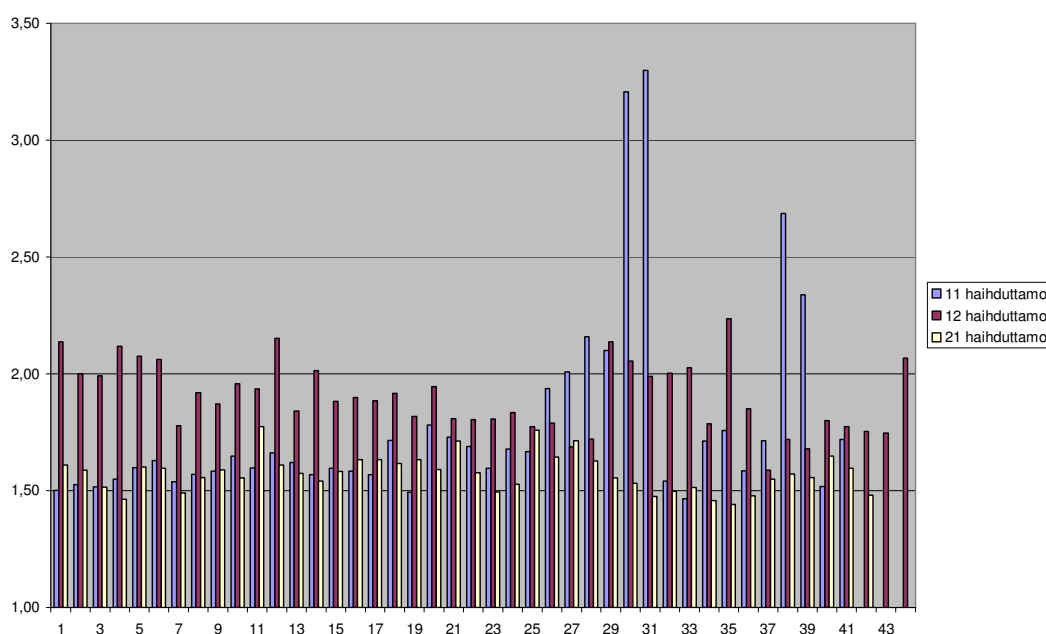
Taulukko 6. Kirkkaan liuoksen aineominaisuudet

Ominaisuus	Arvo
Viskositeetti, η	$1,268 \cdot 10^{-3}$ Pas
Lämmönjohtavuus, λ	0,5922 W/m*K
Tiheys, ρ	1425 kg/m ³
Ominaislämpökapasiteetti, C_p	3255,2 J/kg*K

3.4 Haihduttamoiden hyötysuhteet

Haihduttamon hyötysuhde ilmoittaa kuinka monta tonnia höyryä kulutetaan yhden tiitaanipigmenttitonnin tuottamiseen. Hyötysuhdetta parempi termi olisi ominaishöyrykulutus, mutta koska hyötysuhde on jo niin vakiintunut termi haihduttamoiden keskuudessa, tässä työssä käytetään ominaishöyrykulutuksesta termiä hyötysuhde.

Kuvan 11 hyötysuhteet on laskettu 24.2.2005–24.2.2006 välistä tiedoista. Yksi palkki kuvaa keittojen välisen haihdutustapahtuman keskimääräistä hyötysuhdetta. 11 ja 21 haihduttamoissa hyötysuhde pysyy yleensä alle 2:ssa, mutta 12 haihduttamossa hyötysuhde on hieman korkeampi. 11 haihduttamon 30 ja 31 haihdutustapahtumien korkeat hyötysuhteet johtuvat toimintahäiriöistä.



Kuva 12. Haihduttimien 11, 12 ja 21 keskimääräiset hyötysuhteet

3.5 Esilämmittimien (232.11 ja 232.12) tehokkuus

Jotta esilämmittimestä poistuvan liuoksen lämpötilaa voidaan arvioida, täytyy tietää kuinka paljon se pystyy lauhduttamaan höyryä. Haihduttamon 11 korkein hetkellinen teho on ollut 574 422 W ja 12 haihduttamon 673 943 W. Vaikka tässä laskennassa käytetään korkeinta hetkellistä tehoa, voidaan olettaa esilämmittimen kykenevän lauhduttamaan saman määrän höyryä jatkuvasti. Todellisuudessa esilämmittimet saattavat pysyä lauhduttamaan höyryä vielä enemmän, mutta tarkkuuden varmistamiseksi näitä arvoja ei ylitetä. Lasketaan kuinka paljon haihduttamon 11 esilämmitin on lauhduttanut höyryä:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{h\ddot{o}} &= \frac{\dot{Q}}{Q_h} \\ \dot{m}_{h\ddot{o}} &= \frac{574422W}{2258000 \frac{J}{kg}} \\ \dot{m}_{h\ddot{o}} &= 0,25 \frac{kg}{s}\end{aligned}$$

Haihduttamo 12 pystyy lauhduttamaan höyryä:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{h\ddot{o}} &= \frac{\dot{Q}}{Q_h} \\ \dot{m}_{h\ddot{o}} &= \frac{673943W}{2258000 \frac{J}{kg}} \\ \dot{m}_{h\ddot{o}} &= 0,3 \frac{kg}{s}\end{aligned}$$

Muokatun järjestelmän simuloinnissa voidaan siis olettaa esilämmittimen (232.11) lauhduttavan korkeintaan 0,25 kg/s höyryä ja (232.12) 0,3 kg/s höyryä.

3.5.1 Lämmönsiirtokertoimien määrittäminen

Jotta voisimme päättää mitä Nusseltin luvun kaavaa voidaan käyttää tässä tapauksessa, täytyy laskea virtauksen Reynoldsin luku. Reynoldsin luvun laskemiseksi täytyy määrittää ensin prosessiliuoksen virtausnopeus. Tuubien lukumäärä esilämmittimessä on 60 kpl. Lasketaan liuoksen virtausnopeus tuubeissa:

$$w = \frac{\dot{V}}{A}$$

$$w = \frac{13,4 \frac{m^3}{h}}{3600s}$$

$$w = \frac{13,4 \frac{m^3}{h}}{\pi \cdot (0,0243m)^2 \cdot 60}$$

$$w = 0,03344 \frac{m}{s}$$

Nyt Reynoldsin luku on mahdollista laskea:

$$Re = \frac{\rho dw}{\eta}$$

$$Re = \frac{1425 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,0486m \cdot 0,03344 \frac{m}{s}}{1,268 \cdot 10^{-3} Pas}$$

$$Re \approx 1826$$

Koska Reynoldsin luku on alle 2300, voidaan hyvällä tarkkuudella käyttää kaavaa 13 Nusseltin luvun laskemiseksi. Kaava 13 edellyttää vielä Prandtin luvun laskemista:

$$Pr = \frac{\eta C_p}{\lambda}$$

$$Pr = \frac{1,268 \cdot 10^{-3} Pas \cdot 3255,2 \frac{J}{kgK}}{0,5922 \frac{W}{mK}}$$

$$Pr = 7,0$$

Nyt Nusseltin luku on mahdollista laskea:

$$Nu = 1,86 \cdot (\text{Re} \cdot \text{Pr})^{0,33} \left(\frac{d_i}{l} \right)^{0,33} \left(\frac{\eta}{\eta_s} \right)^{0,14}$$

$$Nu = 1,86 \cdot (1826 \cdot 7)^{0,33} \cdot \left(\frac{0,0486m}{3,25m} \right)^{0,33} \cdot \left(\frac{1,268 \cdot 10^{-3} \text{Pas}}{1,0 \cdot 10^{-3} \text{Pas}} \right)^{0,14}$$

$$Nu = 10,9$$

Annetuista tiedoista on mahdollista laskea siirtimen tuubipuolen lämmönsiirtokerroin:

$$Nu = \alpha_i \frac{d}{\lambda}$$

$$\alpha_i = Nu \frac{\lambda}{d}$$

$$\alpha_i = 10,9 \cdot \frac{0,5922 \frac{W}{mK}}{0,0486m}$$

$$\alpha_i \approx 133 \frac{W}{m^2K}$$

Lasketaan kaavan 9 avulla siirtimen vaippapuolen lämmönsiirtokerroin:

$$\alpha_v = 0,27 \cdot \lambda_f \left(\frac{\eta^2}{\rho_f (\rho_f - \rho_h) g} \right)^{-1/3}$$

$$\alpha_v = 0,27 \cdot 0,6791 \frac{W}{mK} \cdot \left(\frac{(0,282 \cdot 10^{-3} \text{Pas})^2}{958,4 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(958,4 \frac{kg}{m^3} - 0,4358 \frac{kg}{m^3} \right) \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} \right)^{-1/3}$$

$$\alpha_v = 8871 \frac{W}{m^2K}$$

Ennen kuin konvektiokerroimen suuruus voidaan laskea, täytyy tietää lämmönsiirtimen logaritminen keskilämpötilaero. Tämä voidaan laskea kaavasta 7 tai 8. Sitä ennen täytyy tarkistaa lämpötilaerojen suhde, jotta voidaan päättää käytettävä kaava.

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{(88 - 42)^\circ\text{C}}{(102 - 62,9)^\circ\text{C}}$$

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = 1,18$$

Koska lämpötilaerojen suhde on alle 1,2 täytyy käyttää aritmeettista keskiarvolämpötilaa, tämä voidaan laskea kaavasta 8.

$$\Delta T_L = \frac{(102 - 62,9)^\circ\text{C} + (88 - 42)^\circ\text{C}}{2} = 42,55^\circ\text{C}$$

Nyt kaikki tarpeelliset arvot on määritetty ja voidaan laskea konvektio kertoimen suuruus.

$$\dot{Q} = UA\Delta T_L$$

$$U = \frac{\dot{Q}}{A\Delta T_L}$$

$$U = \frac{360578\text{W}}{31,243\text{m}^2 \cdot 42,55^\circ\text{C}}$$

$$U \approx 271 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Kun tiedetään konvektio kertoimen ja molempien lämmönsiirtokertoimien suuruudet, on mahdollista laskea lämmönsiirtokertoimien korjauskertoimet. Arvioidaan likaantumiskertoimeksi n. 2000 W/m²*K.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{R\alpha_t} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{R\alpha_v} + R_f}$$

$$271 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = \frac{1}{\frac{1}{R \cdot 133 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} + \frac{0,0012\text{m}}{21,9 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{1}{R \cdot 8871 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} + \frac{1}{2000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}}}$$

$$R \approx 2,43$$

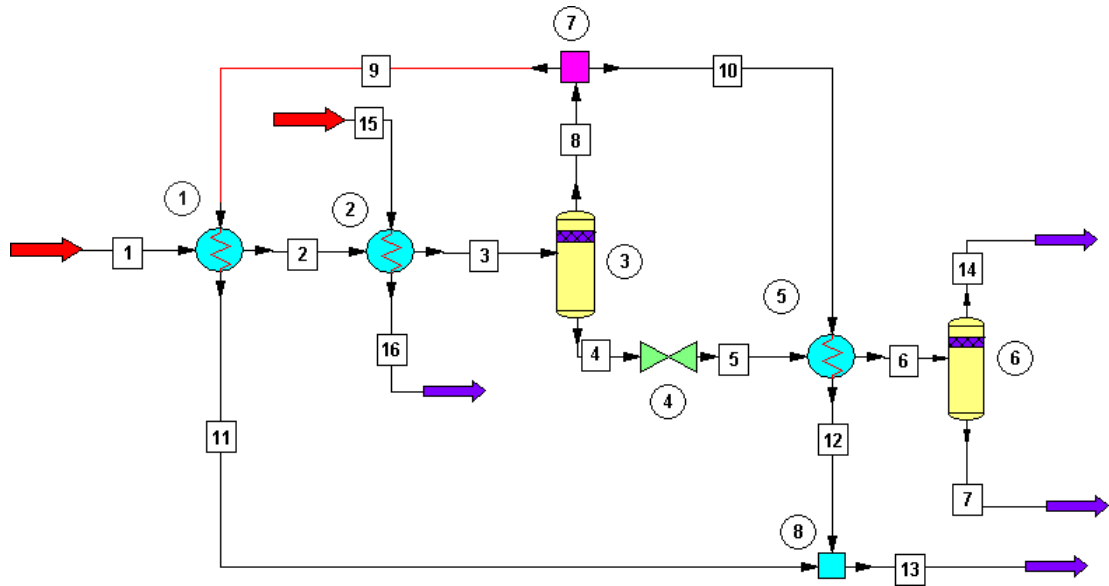
Laskettuja lämmönsiirtokertoimia voidaan verrata taulukon 1 arvoihin. Taulukosta nähdään että tuubipuolen lämmönsiirtokerroin on arvioitu olevan välillä 50–20000 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Tämä arvio pitää hyvin paikkansa laskennan kanssa, tuubipuolen lämmönsiirtokertoimeksi laskettiin 133 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, joka sijoittuu annetulle välille hyvin. Vaippapuolen lämmönsiirtokertoimeksi saadaan taulukosta 1 arvio välille 2500–100000 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Laskennasta saatiin tulokseksi 8871 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, myös tässä tulos vastaa hyvin arviota lämmönsiirtokertoimesta. Tuloksista voidaan vetää johtopäätös, että laskenta on onnistunut hyvällä tarkkuudella ja tulokset ovat käyttökelpoisia.

3.6 Muokattu järjestelmä

Esierottimessa höyry vapautuu liuoksesta samassa paineessa, joten niiden lämpötilat ovat samat. Jälkikuumentimessa oleva liuos on kuitenkin hieman alhaisemmassa paineessa kuin esierottimessa. Tämän johdosta jälkikuumentimeen johdettu höyry ei voi kuumentaa liuosta kovin tehokkaasti, koska niiden lämpötilat ovat lähellä toisiaan. Jotta kokonaislämmönsiirtoa haihduttamossa voitaisiin tehostaa ja tuorehöyrymäärää pienennettyä, pyritään esilämmittimeen tulevaa höyrymäärää kasvattamaan mahdollisimman paljon.

3.7 Muokatun järjestelmän simulointi

Prosessisimulointi vahvisti alkuperäistä arviota jälkikuumentimen tehokkuudesta. Tästä päädyttiin johtopäätökseen, että on tehokkaampaa ohjata mahdollisimman paljon esierottimessa vapautuvia höyryjä esilämmittimeen. Tämä idean pohjalta aloitettiin muokatun järjestelmän simuloiminen.



Kuva 13. Muokatun järjestelmän simulointikaavio.

Lämmönvaihtimien ja flash-erottimien asetukset pidettiin samoina kuin aiemmissa simuloinneissa. Koska esierottimessa vapautuvia höyryjä voidaan ohjata enemmän esilämmittimeen, saatiin esikuumentimen tuorehöyrymäärää pudotettua. Lasketaan esilämmittimen konvektiokerroin, jotta saadaan käsitys siitä, kuinka paljon lämmönsiirtoa on saatu tehostettua. Lasketaan ensin esilämmittimen logaritminen lämpötilaero ja teho:

Taulukko 7. Simuloidun järjestelmän esilämmittimen lämpötilat

Virtaus	Lämpötila
Esilämmittimen liuoksen syöttö	43 °C
Esilämmittimen liuoksen poisto	76,7 °C
Esilämmittimen höyryn syöttö	109,6 °C
Esilämmittimen höyryn poisto	90 °C

Lasketaan logaritminen lämpötilaero. Tarkistetaan ensin lämpötilaerojen suhde:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \frac{(90 - 43)^\circ\text{C}}{(109,6 - 76,7)^\circ\text{C}}$$

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = 1,43$$

$$\Delta T_L = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$

$$\Delta T_L = \frac{(90 - 43)^\circ\text{C} - (109,6 - 76,7)^\circ\text{C}}{\ln \frac{(90 - 43)^\circ\text{C}}{(109,6 - 76,7)^\circ\text{C}}}$$

$$\Delta T_L = 39,53^\circ\text{C}$$

Lasketaan esilämmittimen teho:

$$\dot{Q} = C_p \dot{m} \Delta T$$

$$\dot{Q} = 3255,2 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 5,3 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * (76,7 - 43)^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = 581411 \text{W}$$

Vaadittavat arvot on laskettu konvektiokerroimen laskemiseksi:

$$\dot{Q} = UA \Delta T_L$$

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \Delta T_L}$$

$$U = \frac{581411 \text{W}}{31,243 \text{m}^2 \cdot 39,53^\circ\text{C}}$$

$$U \approx 471 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Tuloksesta huomataan, että esilämmittimen konvektiokerroin on kasvanut lähes kaksinkertaiseksi. Tästä voidaan vetää johtopäätös, että esilämmittimen tehokkuus on kasvanut huomattavasti.

Muokatussa järjestelmässä haihduttamon syöttö on sama kuin 11 haihduttamon simuloinnissa, eli 43,4 t/vrk. Lasketaan muokatun järjestelmän hyötysuhde:

$$\eta_h = \frac{\dot{m}_{\text{höyry}} \cdot 24}{\dot{m}_{\text{TiO}_2}}$$

$$\eta_h = \frac{3820 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 24\text{h}}{43400 \frac{\text{kg}}{\text{vrk}}}$$

$$\eta_h = 2,11 \frac{\text{kgHöyryä}}{\text{kgTiO}_2}$$

Haihduuttamoa 12 simuloitaessa käytettiin syöttöä 49,65 t/vrk. Lasketaan 12 haihduttamon hyötysuhde:

$$\eta_h = \frac{\dot{m}_{\text{höyry}} \cdot 24}{\dot{m}_{\text{TiO}_2}}$$

$$\eta_h = \frac{3860 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 24\text{h}}{49650 \frac{\text{kg}}{\text{vrk}}}$$

$$\eta_h = 1,87 \frac{\text{kgHöyryä}}{\text{kgTiO}_2}$$

Tästä saadaan laskettua kuinka paljon höyryä säästyy:

$$X_{\text{höyry}} = \frac{(2,44 - 2,11) \frac{\text{kgHöyryä}}{\text{kgTiO}_2}}{2,44 \frac{\text{kgHöyryä}}{\text{kgTiO}_2}}$$

$$X_{\text{höyry}} = 0,13$$

Lasketaan haihduttamon 12 säästö:

$$X_{\text{höyry}} = \frac{(2,04 - 1,87) \frac{\text{kgHöyryä}}{\text{kgTiO}_2}}{2,04 \frac{\text{kgHöyryä}}{\text{kgTiO}_2}}$$

$$X_{\text{höyry}} = 0,08$$

Haihduttamossa 11 höyryä saataisiin tällä järjestelyllä säästettyä n. 13 % ja 12 haihduttamossa n. 8 %. Arvioitaessa vuosittaisen höyrymäärän säästöä, voidaan olettaa höyryä säästävän saman verran. Arvioidaan vuosittaisen höyrymäärän säästöä ja sen hintaa 11 haihduttamossa:

$$\dot{m}_{hö} = \frac{56,79 \frac{t}{vrk} \cdot (1,71 - 1,48)}{24h} \cdot 5765 \frac{h}{a}$$

$$\dot{m}_{hö} = 3138 \frac{t}{a}$$

$$C_{hö} = 3138 \frac{t}{a} \cdot 20,83 \frac{€}{t}$$

$$C_{hö} = 65365 \frac{€}{a}$$

Lasketaan 12 haihduttamon vastaavat tiedot:

$$\dot{m}_{hö} = \frac{49,65 \frac{t}{vrk} \cdot (2,04 - 1,87)}{24h} \cdot 5107 \frac{h}{a}$$

$$\dot{m}_{hö} = 1796 \frac{t}{a}$$

$$C_{hö} = 1796 \frac{t}{a} \cdot 20,83 \frac{€}{t}$$

$$C_{hö} = 37411 \frac{€}{a}$$

Laskennassa käytetyt arvot on laskettu 24.2.2005–24.2.2006 välisistä tiedoista. 11 haihduttamon keskimääräinen hyötysuhde on n. 1.71 ja 12 haihduttamon 2.04, luvut on laskettu haihdutusten keskimääräisistä arvoista (Liite 2). Höyryn hinta perustuu Kemira Pigments Oy:n viimeisimpään laskelmaan. Arvio on laskettu keskimääräisistä arvoista, joten se ei ole kovin tarkka.

Tällä järjestelyllä kolmannes vapautuvista höyryistä voitaisiin käyttää esilämmittimessä. Yhteensä säästöä syntyisi yli 100 000 €. Tuloksista nähdään, että jos kaikki höyry voitaisiin lauhduttaa esilämmittimessä, syntyisi moninkertaisia säästöjä. Tämä kuitenkin edellyttää esilämmittimen mitoittamista uudelleen. Tämän työn tehtävänä ei kuitenkaan ole mitoittaa esilämmitintä uudelleen, joten siihen ei perehdytä jatkossa.

4 LEVYLÄMMÖNVAIHDIN

Tehtävänä oli tutkia titaanipigmentin valmistuksessa käytettyjen haihduttamoiden lämmönvaihtimen tarpeellisuutta. Vuosittaiset puhdistus- ja asennuskustannukset ovat todella suuria levylämmönvaihtimen osalta.

4.1 Levylämmönvaihtimen vuosittaiset kustannukset

Yhden levypakan puhdistus maksaa rahtikuluineen arviolta 2300 €. Levypakka tukkeutuu vuodessa 2-3 kertaa. Lasketaan levylämmönvaihtimen vuosittaiset puhdistuskustannukset:

$$C_{puh} = 2,5 \cdot 2300 \frac{\text{€}}{a}$$

$$C_{puh} = 5750 \frac{\text{€}}{a}$$

Jokaisella puhdistuskerralla levy kuluu ja siksi se tulee vaihtaa noin 8,5 vuoden välein. Viimeisen tarjouksen mukaan yhden levyn hinta tiivisteineen oli 305 €. Pakka sisältää 54 levyä, lasketaan koko pakan hinta:

$$C_{pakka} = 54 \cdot 305\text{€}$$

$$C_{pakka} = 16470\text{€}$$

Lasketaan uusien levyjen vuosittaiset hankintakustannukset:

$$C_{levy} = \frac{16470\text{€}}{8,5a}$$

$$C_{levy} = 1938 \frac{\text{€}}{a}$$

Lasketaan levylämmönvaihtimen vuosittaiset kokonaiskustannukset:

$$C_{tot} = 5750 \frac{\text{€}}{a} + 1938 \frac{\text{€}}{a}$$

$$C_{tot} = 7688 \frac{\text{€}}{a}$$

4.2 Haihduttamon toiminta levylämmönvaihtimen kanssa ja ilman

Tärkeänä osana tätä työtä oli tutkia esilämmittimen edessä olevan levylämmönvaihtimen tarpeellisuutta. Alkuperäinen arvio oli, että levylämmönvaihtimet olisivat tarpeettomia haihduttamoiden edessä ja itse asiassa kasvattaisivat vuosittaisia kustannuksia. Haihduttamoiden vuositiedoista on eroteltu tapaukset, jolloin levylämmönvaihdin oli toiminnassa ja jolloin se oli ohitettuna. Liitteeseen 1 on merkitty harmaalla ne tiedot, joissa levylämmönvaihdin oli ohitettuna. Ympyröidyt tiedot vastaavat tilannetta, missä levylämmönvaihdin on otettu pois käytöstä kesken haihdutustapahtuman.

Taulukko 8. Haihduttamoiden keskiarvotiedot levylämmönvaihtimen kanssa ja ilman

Haihduttamo 11	KA hyötysuhde	Esilämmittimen teho, W	KA syöttö, t/vrk	KA höyryn kulutus, t/a	KA tehokkuus
Levylämmönvaihdin käytössä	1,71	42 098	56,7	23 290	0,05
Levylämmönvaihdin ohitettuna	1,71	431 807	57,2	23 495	0,32
Haihduttamo 12	KA hyötysuhde	Esilämmittimen teho, W	KA syöttö, t/vrk	KA pigmentin tuotanto, t/a	KA tehokkuus
Levylämmönvaihdin käytössä	1,87	47 615	46,9	18 662	0,08
Levylämmönvaihdin ohitettuna	2,04	226 681	49,7	21 575	0,13

Taulukosta 8 nähdään, että molemmissa haihduttamoissa levylämmönvaihtimen ohittaminen kasvattaa höyryn kulutusta. Tärkeä havainto, joka huomataan taulukosta molempien haihduttamoiden kohdalla, on syötön pieneneminen levylämmönvaihdinta käytettäessä. Tämä johtaa tuotannon pienentymiseen ja sitä kautta myyntitulojen laskemiseen.

Tuotannon pienentyminen johtuu todennäköisesti levylämmönvaihtimen tukkeentumisesta. Levyjen pintaan muodostuu helposti niin paksu kerros likaa, että se haittaa merkittävästi lämmönsiirtoa. Levylämmönvaihtimen puhdistuksen kalleuden vuoksi levylämmönvaihdinta käytetään usein tukkeentuneenakin. Tämä aiheuttaa merkittävää tuotannon laskua, joten olisi järkevämpää puhdistaa levylämmönvaihdin riittävän usein maksimaalisen tuotannon takaamiseksi.

Arvioidaan höyryn kulutuksen lisääntymistä 11 haihduttamon tapauksessa, kun levylämmönvaihdin on ohitettuna:

$$\dot{m}_{hö} = 23495 \frac{t}{a} - 23290 \frac{t}{a}$$

$$\dot{m}_{hö} = 205 \frac{t}{a}$$

Lasketaan ylimääräisen höyryn hinta:

$$C_{hö} = 205 \frac{t}{a} \cdot 20,83 \frac{€}{t}$$

$$C_{hö} = 4270 \frac{€}{a}$$

Käytettäessä levylämmönvaihdinta, tuotantokapasiteetti laskee hieman. Pigmentin hinta perustuu Kemira Pigments Oy:n arvioon. Arvioidaan pigmentin määrää ja myyntihintaa:

$$\dot{m}_{pigm} = \frac{23495 \frac{t}{a}}{1,71} - \frac{23290 \frac{t}{a}}{1,71}$$

$$\dot{m}_{pigm} = 120 \frac{t}{a}$$

$$C_{pigm} = 120 \frac{t}{a} \cdot 1750 \frac{€}{t}$$

$$C_{pigm} = 210000 \frac{€}{a}$$

Lasketaan 12 haihduttamon vastaavat tiedot. Arvioidaan höyryn kulutuksen lisääntymistä ohitettaessa levylämmönvaihdin:

$$\dot{m}_{hö} = 21575 \frac{t}{a} - 18662 \frac{t}{a}$$

$$\dot{m}_{hö} = 2913 \frac{t}{a}$$

Lasketaan ylimääräisen höyryn hinta:

$$C_{hö} = 2913 \frac{t}{a} \cdot 20,83 \frac{€}{t}$$

$$C_{hö} = 60678 \frac{€}{a}$$

Arvioidaan pigmenttimäärä ja sen myyntihinta:

$$\dot{m}_{pigm} = \frac{21575 \frac{t}{a}}{2,04} - \frac{18662 \frac{t}{a}}{1,87}$$

$$\dot{m}_{pigm} = 596 \frac{t}{a}$$

$$C_{pigm} = 596 \frac{t}{a} \cdot 1750 \frac{€}{t}$$

$$C_{pigm} = 1043000 \frac{€}{a}$$

Tuloksista nähdään, että 11 haihduttamon tapauksessa levylämmönvaihtimen poistaminen kasvattaa höyrynkulutusta, mutta toisaalta levylämmönvaihtimen huoltokustannukset poistuvat. Höyryn kulutuksen kustannukset ovat pienemmät, kuin huoltokustannukset, joten levylämmönvaihtimen poistaminen säästäisi n. 3420 € vuodessa. Lisäksi tuotantoa voitaisiin nostaa, jos levylämmönvaihdin poistetaan. Tästä kertyisi n. 210 000 € vuosittaiset myyntitulot. Tulee kuitenkin huomata, että laskennassa on käytetty keskiarvoja, joten tämä tulos on vain karkea arvio.

Haihduuttamon 12 tapauksessa höyryn tuotannon kustannukset ovat lähes 8 kertaa suuremmat kuin huoltokustannukset. Tästä aiheutuisi n. 53000 € vuosittaiset lisäkustannukset. Kuitenkin tuotantoa voitaisiin nostaa merkittävästi ja tuotannon myyntitulot olisivat n. miljoona euroa vuodessa. Myyntituloihin verrattuna höyrystä aiheutuvat lisäkustannukset ovat minimaaliset.

Haihduuttamon 21 tapauksessa ei voida sanoa mitään tarkkaa summaa höyryn kulutuksen lisääntymisestä tai tuotannon kasvamisesta. Kohtuullisella varmuudella voidaan kuitenkin sanoa, että säästöt ovat samansuuntaisia kuin 11 ja 12 haihduuttamoissa. Eli levylämmönvaihtimen poistaminen ja esilämmittimen ottaminen käyttöön pienentäisi höyryn kulutusta 21 haihduuttamalla ja kasvattaisi tuotantoa.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Haihduuttamoissa syntyvää ylijäämälämpöä - sekundaarienergiaa - on tehokasta käyttää haihduttamon syöttöliuoksen lämmittämiseen. Energiataloudellisuuden kannalta on haihduttamossa vapautuvia höyryjä kannattava käyttää mahdollisimman tehokkaasti, koska ylijäävä osa höyryistä johdetaan lauhdekanaaliin. Huolellisella ja yksityiskohtaisella suunnittelulla on mahdollista saada aikaan merkittäviä energiasäästöjä.

Työ tehtiin Kemira Pigments Oy:n Porin tehtailla. Työn tavoitteeksi asetettiin levylämmönvaihtimien tarpeellisuuden tutkiminen ja esilämmittimen tehokkuuden parantaminen.

Luvussa 3 tutkittiin esilämmittimen tehokkuutta ja mahdollisuuksia sen parantamiseen. Prosessia simuloitiin Chemcad-ohjelmalla. Tulosten perusteella havaittiin jälkikuumentimen olevan tehoton ja esilämmittimessä olevan varaa nostaa lauhdutuskapasiteettia. Käyttämällä mahdollisimman paljon vapautuvia höyryjä hyödyksi esilämmittimessä, voitaisiin laskea tuorehöyryn syöttöä merkittävästi. Tämä säästäisi höyryn valmistumiskustannuksia vuodessa 11 haihduttamon osalta n. 65 000 €. Haihduttamon 12 osalta säästöt olisivat n. 37 000 €. Haihduttamoiden rakenteen samanlaisuudesta johtuen voidaan todeta, että esilämmittimen ottaminen käyttöön 21 haihduttamossa toisi myös merkittäviä säästöjä höyryn kulutukseen. Esilämmittimissä ei kuitenkaan kyetä niiden koosta johtuen käyttämään hyödyksi kuin osa vapautuvista höyryistä. Mikäli kaikissa haihduttamoissa investoitaisiin uusien esilämmittimien mitoittamiseen, voitaisiin tuorehöyryn säästöä nostaa vielä monin kertaiseksi.

Luvussa 4 tutkittiin levylämmönvaihtimien tarpeellisuutta. Vertailuaineiston ja laskelmien perusteella voidaan sanoa, että levylämmönvaihtimen poistaminen 11 haihduttamosta tulisi johtamaan n. 3400 € vuosittaisiin säästöihin. Lisäksi myyntituloja kertyisi lisää n. 210 000 € vuodessa. Haihduttamon 12 kohdalla höyryn kulutus kasvaisi ja siitä tulisi yli 50 000 € lisäkustannukset. Kuitenkin levylämmönvaihtimen huomattiin aiheuttavan tuotantokapasiteetin laskua. Mikäli levylämmönvaihtimen poistetaan 12 haihduttamon edestä, se toisi lisää lähes 1 miljoonaa euron myyntitulot.

Lähdeluettelo

1. McCabe, Smith, Harriott, *Unit Operations of Chemical Engineering*, 5 Painos, McGraw-Hill Inc., s. 285, 379, 465, 471, 1993.
2. Foust, Winzel, Clump, Maus, Andersen, *Principles of Unit Operations*, John Wiley & Sons, Inc., s. 241, 1964
3. Wagner W., *Lämmönsiirto*, Painatuskeskus Oy, s. 61, 154, 187, 1994.
4. R. K. Sinnott, *Coulson & Richardson's Chemical Engineering*, 3 painos, osa 6, Butterworth Heinemann, s. 663, 664, 711, 1999.
5. Alfa Laval, Käyttöohjeet, *Spiraalilämmönsiirrin*, s. 12.
6. Alfa Laval, Käyttöohjeet, *The Theory Behind Heat Transfer*, s. 6.
7. Wuori P. A., *Virtausmekaniikan Perusteet*, Otapaino, 1992.
8. David R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 84 painos, CRC Press, 2003.
9. Robert H. Perry, Don Green, *Perry's Chemical Engineering Handbook*, 6 painos, McGraw-Hill, 1984.
10. *VDI-Wärmeatlas*, 6 Laajennettu painos, VDI Verlag GmbH, 1991.
11. Louis C. Burmeister, *Convective Heat Transfer*, 2 Painos, John Wiley & Sons, Inc., 1993.

Liitteet

1. SYMBOLILUETTELO
2. HAIHDUTTAMOIDEN 11 JA 12 KESKIARVOTIEDOT
3. SIMULOINNIN 1 PROSESSITIEDOT
4. MUOKATUN JÄRJESTELMÄN SIMULOINNIN PROSESSITIEDOT

SYMBOLILUETTELO

Merkinnät

A	lämmönsiirtopinnan pinta-ala [m^2]
$C_{hö}$	höyryn hinta [$€/a$]
C_p	fluidin ominaislämpökapasiteetti [$J/(kg \cdot K)$]
C_{pigm}	pigmentin tuotto [$€/a$]
d_i	putken sisähalkaisija [m]
d_o	putken ulkohalkaisija [m]
g	putoamiskiihtyvyyys [m/s^2]
k	suhdevakio
L	etäisyys pinnasta [m]
l	putken pituus [m]
$\dot{m}_{hö}$	höyryn tuotantomäärä [t/a]
$\dot{m}_{höyry}$	tuorehöyryn massavirta [kg/h]
\dot{m}_{pigm}	pigmentin tuotantomäärä [t/a]
\dot{m}_{TiO_2}	titaanipigmentin tuotantomäärä [kg/vrk]
s	lämmönsiirtopinnan paksuus [m]
T	lämpötila [$°C$]
ΔT_v	vaippapuolen filmin lämpötilaero [$°C$]
ΔT_L	logaritminen keskilämpötilaero [$°C$]
ΔT	pinnan ja fluidin välinen lämpötilaero [$°C$]
U	konvektiokerroin [$W/(m^2 \cdot K)$]
\dot{V}_{kir}	kirkkaan liuoksen tilavuusvirta [m^3/h]
w	fluidin virtausnopeus [m/s]
\dot{Q}	lämmönsiirtimen kokonaisteho [W]

\dot{q}	lämpövirran tiheys $[W/m^2]$
Q_h	höyrystymislämpö $[J/kg]$
$X_{höyry}$	suhdevakio
X_{TiO_2}	titaanipigmentin massaosuus

Kreikkalaiset

α_t	tuubipuolen lämmönsiirtokerroin $[W/(m^2 \cdot K)]$
α_v	vaippapuolen lämmönsiirtokerroin $[W/(m^2 \cdot K)]$
ε	emissiivisyyskerroin
η	fluidin dynaaminen viskositeetti $[Pas]$
η_h	haihduttamon laskennallinen hyötysuhde $[kgHöyryä/kgTiO_2]$
η_s	dynaaminen viskositeetti putken seinämän lämpötilassa $[Pas]$
ϑ_{ci}	kuumennettavan fluidin sisääntulolämpötila $[°C]$
ϑ_{co}	kuumennettavan fluidin ulostulolämpötila $[°C]$
ϑ_{hi}	kuumentavan fluidin sisääntulolämpötila $[°C]$
ϑ_{ho}	kuumentavan fluidin ulostulolämpötila $[°C]$
λ	lämmönjohtavuuskerroin $[W/(m \cdot K)]$
ρ	fluidin tiheys $[kg/m^3]$
σ	Stefan-Boltzmannin vakio $[W/(m^2 \cdot K^4)]$

HAIHDUTTAMOIDEN 11 JA 12 KESKIARVOTIEDOT

Haihuttamo 11								Haihuttamo 12							
KA hyötysuhteet	Esiilämittimen teho							KA hyötysuhteet	Esiilämittimen teho						
	W	°C	m ³ /h	°C	°C	tehokkuus	°C		W	°C	m ³ /h	°C	°C	tehokkuus	°C
1,50	23 936	28,91	19,2	65,0	65,9	0,03	84,9	2,14	291 580	43,99	14,1	41,3	57,3	0,00	61,3
1,53	67 233	27,85	19,6	65,0	67,7	0,07	84,5	2,01	363 254	41,12	14,5	41,9	61,4	0,00	61,3
1,52	23 869	29,34	20,0	65,0	65,2	0,03	84,1	1,99	33 036	28,77	14,3	65,0	66,1	0,13	84,7
1,55	26 302	28,88	18,7	65,0	66,0	0,03	85,4	1,99	25 690	28,61	14,1	65,0	66,4	0,13	85,0
1,60	8 299	30,12	18,7	65,0	63,8	0,01	85,5	2,12	55 714	27,53	13,3	65,0	68,2	0,06	86,2
1,63	16 355	29,26	20,3	65,0	65,3	0,02	83,8	2,08	144 438	24,78	13,1	65,0	72,4	0,01	86,6
1,54	29 707	29,04	17,7	65,0	65,7	0,04	86,6	2,06	5 343	29,38	12,0	65,0	65,1	0,95	88,4
1,57	12 708	29,67	17,9	65,0	64,6	0,01	86,4	1,78	178 069	25,41	17,7	65,0	71,5	0,21	81,0
1,58	27 547	28,83	17,8	65,0	66,0	0,03	86,5	1,92	16 456	29,10	15,1	65,0	65,6	0,02	83,7
1,65	51 372	28,05	16,9	65,0	67,3	0,06	87,6	1,87	5 485	29,50	17,1	65,0	64,9	0,01	81,5
1,60	44 427	28,64	16,2	65,0	66,4	0,06	88,6	1,96	0	29,96	13,9	65,0	64,1	0,00	85,3
1,66	23 915	28,80	16,2	65,0	66,1	0,03	88,7	1,94	148 889	28,20	17,6	65,0	67,1	0,18	81,0
1,62	17 562	29,06	14,6	65,0	65,7	0,03	91,1	2,15	0	30,31	13,2	65,0	63,5	0,00	86,3
1,57	13 739	29,78	13,8	65,0	64,4	0,02	92,7	1,84	0	30,20	15,2	65,0	63,7	0,00	83,6
1,60	8 071	29,59	13,4	65,0	64,8	0,01	93,5	2,01	0	30,21	13,1	65,0	63,7	0,00	86,6
1,58	81 161	27,54	19,9	65,0	68,2	0,09	84,2	1,88	0	29,80	14,9	65,0	64,4	0,00	83,9
1,57	88 506	27,09	17,8	65,0	68,9	0,10	86,5	1,90	37 385	29,37	15,6	65,0	65,1	0,05	83,1
1,71	72 343	27,72	18,4	65,0	67,9	0,08	85,7	1,88	0	30,13	11,8	65,0	63,8	0,00	89,0
1,49	75 108	27,69	19,9	65,0	67,9	0,08	84,3	1,92	26 554	29,95	11,8	65,0	64,1	0,05	88,9
1,78	492 543	41,25	19,4	41,6	61,4	0,33	61,3	1,82	1 674	29,69	13,0	65,0	64,6	0,00	86,7
1,73	490 747	41,82	18,0	40,1	61,3	0,34	61,4	1,95	7 393	29,31	13,7	65,0	65,2	0,01	85,6
1,69	61 699	27,99	19,4	65,0	67,4	0,07	84,7	1,81	18 525	28,87	14,9	65,0	66,0	0,03	83,9
1,59	53 446	28,18	19,5	65,0	67,1	0,06	84,6	1,80	50 769	27,90	14,7	65,0	67,6	0,07	84,2
1,68	52 222	28,46	19,2	65,0	66,7	0,06	84,9	1,81	66 893	27,59	15,9	65,0	68,1	0,09	82,7
1,67	42 521	28,63	19,1	65,0	66,4	0,05	85,1	1,83	30 692	28,47	14,2	65,0	66,6	0,05	84,9
1,94	64 882	27,56	16,2	65,0	68,1	0,08	88,5	1,77	49 257	27,95	15,3	65,0	67,5	0,07	83,4
2,01	59 089	27,61	15,3	65,0	68,0	0,08	90,0	1,79	29 575	28,41	13,0	65,0	66,7	0,05	86,7
2,16	59 697	27,37	13,4	65,0	68,4	0,09	93,5	1,69	67 608	27,17	14,0	65,0	68,7	0,10	85,1
2,10	43 807	27,91	13,2	65,0	67,6	0,07	93,9	1,72	49 884	27,70	13,4	65,0	67,9	0,08	86,1
3,21	140 106	22,99	10,9	65,0	74,9	0,27	100,0	2,14	225 159	51,66	16,3	36,9	47,8	0,17	54,3
3,30	123 092	22,89	9,5	65,0	75,1	0,27	105,2	2,06	183 708	50,20	14,7	39,0	48,7	0,15	58,2
1,54	55 242	27,98	17,1	65,0	67,4	0,07	87,3	1,99	155 222	48,12	14,9	42,0	50,1	0,13	61,0
1,47	37 157	28,61	16,7	65,0	66,4	0,05	87,9	2,00	158 193	49,54	14,3	40,3	48,9	0,14	60,0
1,71	485 837	40,58	19,4	42,4	61,9	0,33	62,1	2,03	186 080	50,06	15,7	39,4	48,7	0,15	57,4
1,76	468 359	39,67	17,3	42,3	63,3	0,35	64,4	2,01	173 604	50,34	15,6	39,5	48,1	0,14	57,6
1,58	444 145	41,73	18,0	41,5	60,7	0,32	62,8	1,67	44 728	28,08	15,3	65,0	67,3	0,06	83,5
1,71	371 686	41,15	17,3	43,6	60,3	0,29	65,7	2,24	75 746	27,29	16,3	65,0	68,6	0,10	82,3
2,69	16 208	29,20	13,8	65,0	65,4	0,02	92,6	1,85	52 989	27,70	14,0	65,0	67,9	0,08	85,1
2,35	355 058	37,72	14,1	40,2	59,8	0,32	67,3	1,59	87 354	27,00	17,0	65,0	69,0	0,11	81,6
2,29	46 912	37,55	13,4	65,0	67,7	0,07	93,6	1,72	20 740	28,84	15,4	65,0	66,0	0,03	83,4
1,52	433 799	37,68	15,8	40,3	61,7	0,35	64,5	1,68	43 396	27,97	13,0	65,0	67,5	0,07	86,7
1,72	344 090	37,97	16,2	42,6	59,0	0,28	66,1	1,82	324 084	45,43	13,8	38,6	56,8	0,29	59,0
								1,80	3 518	29,64	12,8	65,0	64,7	0,01	87,1
								1,77	3 031	29,50	13,2	65,0	64,9	0,00	86,4
								1,75	0	30,12	12,9	65,0	63,8	0,00	86,8
								1,75	0	30,18	14,0	65,0	63,7	0,00	85,2
								2,07	205 931	50,48	15,4	38,3	48,8	0,16	56,6

SIMULOINNIN 1 PROSESSITIEDOT

Virta nro.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Koko virtaus								
Massavirta kg/s	5,3	5,3	5,3	5,3	4,3836	0,9164	4,3836	3,6702	0,155
Lämpötila C	42	42	62,9	102,094	102,094	102,094	105,3	73,2344	102,094
Paine Bar	1,5	1,5	1,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,2	0,75
Höyryn mooliosuus	0	0	0	0,2314	0	1	0,1804	0	1
	Höyryn osuus								
Massavirta kg/s				0,9164		0,9164	0,5492		0,155
Cp kJ/kg*K				1,8899		1,8899	1,8912		1,8899
Viskositeetti mPas				0,01226		0,01226	0,01239		0,01226
Lämmönjohtavuus W/m*K				0,0249		0,0249	0,0252		0,0249
	Nesteen osuus								
Massavirta kg/s	5,3	5,3	5,3	4,3836	4,3836		3,8344	3,6702	
Cp kJ/kg*K	3,2552	3,2552	3,2663	3,1077	3,1077		2,9519	2,8632	
Viskositeetti mPas	1,268	1,268	0,9136	0,7146	0,7146		0,8554	1,298	
Lämmönjohtavuus W/m*K	0,5922	0,5922	0,614	0,6343	0,6343		0,6282	0,6021	
Virta nro.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Koko virtaus								
Massavirta kg/s	0,7134	0,7614	0,155	0,7614	0,9164	0	0	1,2276	1,2276
Lämpötila C	73,2344	102,094	88,0448	91,7709	91,7709	0	0	125,2978	110
Paine Bar	0,2	0,75	0,75	0,75	0,75	0	0	2,34	2,34
Höyryn mooliosuus	1	1	0	0,2593	0,2143	0	0	1	0
	Höyryn osuus								
Massavirta kg/s	0,7134	0,7614		0,1974	0,1964			1,2276	
Cp kJ/kg*K	1,8783	1,8899		1,8855	1,8855			1,9004	
Viskositeetti mPas	0,01111	0,01226		0,01186	0,01186			0,0132	
Lämmönjohtavuus W/m*K	0,0227	0,0249		0,0241	0,0241			0,0271	
	Nesteen osuus								
Massavirta kg/s			0,155	0,564	0,7201				1,2276
Cp kJ/kg*K			4,2049	4,2109	4,2111				4,2337
Viskositeetti mPas			0,3226	0,3084	0,3084				0,2524
Lämmönjohtavuus W/m*K			0,6695	0,6717	0,6717				0,6801

MUOKATUN JÄRJESTELMÄN SIMULOINNIN PROSESSITIEDOT

Virta nro.	1	2	3	4	5	6	7	8
	Koko virtaus							
Massavirta kg/s	5,3	5,3	5,3	4,5042	4,5042	4,5042	3,6816	0,7958
Lämpötila C	43	76,7267	109,6424	109,6424	85,7601	88,6243	58,1357	109,6424
Paine Bar	1	1	1	1	0,4	0,4	0,1	1
Höyryn mooliosuus	0	0	0,2009	0	0,04547	0,2102	0	1
	Höyryn osuus							
Massavirta kg/s			0,7958		0,1439	0,6654		0,7958
Cp kJ/kg*K			1,8932		1,8831	1,8842		1,8932
Viskositeetti mPas			0,01257		0,01162	0,01172		0,01257
Lämmönjohtavuus W/m*K			0,0255		0,0237	0,0239		0,0255
	Nesteen osuus							
Massavirta kg/s	5,3	5,3	4,5042	4,5042	4,3603	3,8388	3,6816	
Cp kJ/kg*K	3,2536	3,2759	3,1444	3,1444	3,0836	2,9353	2,8566	
Viskositeetti mPas	1,246	0,7596	0,6416	0,6416	0,8534	1,006	1,568	
Lämmönjohtavuus W/m*K	0,5934	0,6261	0,6398	0,6398	0,6233	0,6175	0,5884	
Virta nro.	9	10	11	12	13	15	15	16
	Koko virtaus							
Massavirta kg/s	0,25	0,5458	0,25	0,5458	0,7958	0,8227	1,0609	1,0609
Lämpötila C	109,6424	109,6424	90	95	93,4302	58,1357	125,2978	115
Paine Bar	1	1	1	1	1	0,1	2,34	2,34
Höyryn mooliosuus	1	1	0	0	0	1	1	0
	Höyryn osuus							
Massavirta kg/s	0,25	0,5458				0,8227	1,0609	
Cp kJ/kg*K	1,8932	1,8932				1,8731	1,9004	
Viskositeetti mPas	0,01257	0,01257				0,01052	0,0132	
Lämmönjohtavuus W/m*K	0,0255	0,0255				0,0217	0,0271	
	Nesteen osuus							
Massavirta kg/s			0,25	0,5458	0,7958			1,0609
Cp kJ/kg*K			4,2076	4,2123	4,2109			4,2424
Viskositeetti mPas			0,315	0,2969	0,3024			0,2402
Lämmönjohtavuus W/m*K			0,6707	0,6735	0,6726			0,6818