

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

School of Energy Systems

Energiatekniikka

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

HAIHDUTTAMON LAUHDEPUOLEN LÄMMÖNSIIRTO

Lappeenrannassa 04.03.2022

Konsta Käyhkö

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikka

Konsta Käyhkö

Haihduuttamon lauhdepuolen lämmönsiirto

Kandidaatintyö 2022

Tarkastaja: Professori Esa Vakkilainen

Ohjaaja: Professori Esa Vakkilainen

28 sivua, 2 taulukkoa ja 11 kuvaa

Hakusanat: Lauhdelämmönsiirto, Laskevankalvonhaidutin, FF-haidutin, monivaihehaiduttamo, lauhtumaton kaasu, lauhtuminen, lämmönsiirtokertoimen laskenta

Teollisuudessa haihdutus on yleinen prosessin vaihe monelle tuotteelle. Varsinkin sellutehtaiden kemikaalien talteenotossa haihdutus on tärkeässä roolissa, kun pyritään nostamaan mustalipeän kuiva-ainepitoisuutta ja keräämään mustalipeässä olevat keittokemikaalit talteen.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli perehtyä haihdutusprosessiin, lauhtumattomien kaasujen vaikutukseen lauhdelämmönsiirrossa ja havainnollistaa tätä yksinkertaisella laskentamenetelmällä mustalipeähaiduttamon toiselle efektille. Laskentamenetelmän yksinkertaisuuksista johtuen sen antamat tulokset eivät korreloineet tarkasti kirjallisuudesta löytyvien arvojen kanssa. Menetelmä kuitenkin osoittaa lämmönsiirron heikentymistä lauhtumattomien kaasujen johdosta ja on tässä mielessä yksinkertainen ja helppo menetelmä paikallisten lämmönsiirtokertoimien määrittämiseen.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	6
2	HAIHDUTTIMIT	7
2.1	FF-haihdutin	7
2.1.1	Lamellirakenne	7
2.1.2	Putkirakenne	9
2.1.3	Hyödyt	10
2.2	Mustalipeänhaihdutus	11
3	LAUHTUMINEN	13
3.1	Filmilauhtuminen suoralle seinälle	14
3.2	Filmilauhtuminen lauhtumattoman kaasun läsnä ollessa	15
4	LASKENTA	18
4.1	Puhtaan höyryn lauhtuminen suoralle seinälle	18
4.2	Lauhtumattomien kaasujen vaikutuksen laskenta	19
4.2.1	Kondensaatiokäyrä	20
4.2.2	Approksimaatiomenetelmä	21
5	TULOKSET	22
5.1	Filmilauhtuminen suoralle seinälle ilman lauhtumatonta kaasua	22
5.2	Paikallinen lämmönsiirtokerroin höyryn sisältäessä lauhtumatonta kaasua	23
5.3	Tulosten tarkastelu	24
6	YHTEENVETO	26
	LÄHTEET	27

LIITTEET

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	m^2
b	leveys	m
c_p	ominaislämpökapasiteetti	kJ/kgK
g	putoamiskiihtyvyys	m/s^2
h	konvektion lämmönsiirtokerroin	$\text{W/m}^2\text{K}$
h	latenttilämpö	kJ/kg
h'	muokattu latenttilämpö	kJ/kg
H	entalpia	kJ/kg
k	lämmönjohtavuus	W/mK
L	korkeus	m
Nu	Nusseltin luku	-
P	parametri	-
p	paine	bar, Pa
Pr	Prandtlin luku	-
q	lämpöteho	W
q''	lämpövuoto	W/m^2
q_m, \dot{m}	massavirta	kg/s
R	lämpövastus	K/W
Re	Reynoldsin luku	-
T	lämpötila	$\text{K}, ^\circ\text{C}$
u	virtausnopeus	m/s
x	paikka	m
Z	kerroin	-
v	Ominaistilavuus	m^3/s
W	massaosuus	-
FF	Falling film	-

Kreikkalaiset

μ	dynaaminen viskositeetti	Ns/m ²
ρ	tiheys	kg/m ³
δ	Paksuus	-

Alaindeksit

c	lauhde (condensate)
f	filmi
fg	latenttilämpö (olomuodonmuutos)
g	kaasu (gas)
l	neste (liquid)
L	keskimääräinen
Main	päävirtaus
s	pinta
sat	kylläinen tila
0	tarkastelupiste

1 JOHDANTO

Haihduuttamot ovat joko levyypinta eli lamelli- tai putkirakenteisia. Haihduuttamot voivat olla yksi tai monivaiheisia ja niiden perusideana on, että niihin johdetaan kylläistä höyryä lämmönsiirtimen toiselle puolelle, minkä lauhtuessa lämmönsiirtimen toisella puolella olevasta nesteestä höyrystyy pois vettä. Työssä käsiteltäviä laskevankalvonhaihduuttimia (engl. Falling Film, FF) esiintyy paperi-, sellu-, kalanjalostus-, tärkkelys-, mineraali- ja meijeriteollisuudessa, joten kyseessä hyvin yleinen teollisuuden prosessi. (Ajon Apu Oy, 2011)

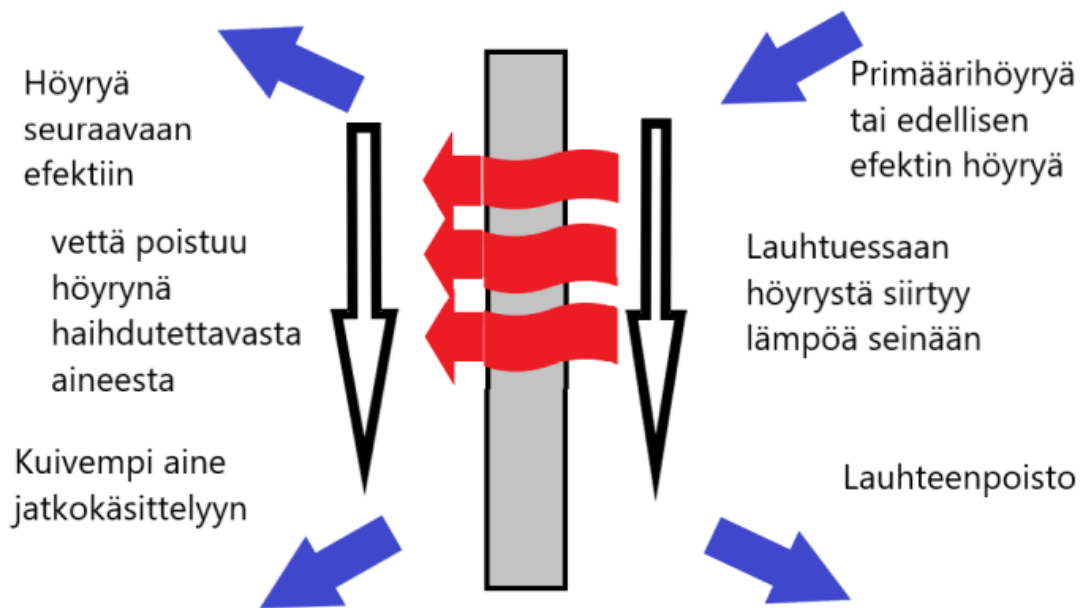
Kandidaatintyössä esitellään erilaisia FF-haihduuttamotyyppisiä ja toimintaperiaatteita. Työssä kuitenkin keskitytään käsittelemään FF-haihduuttimien lämmönsiirtoa, käsittelyn kohteena ovat lauhdepuolen lämmönsiirtoilmiöt ja lauhtumattomien kaasujen vaikutus lämmönsiirron tehokkuuteen. Työssä lasketaan yksinkertainen esimerkki lauhtumattomien kaasujen vaikutuksesta lämmönsiirron tehoon.

Työssä ei perehdytä haihduutettavalla puolella tapahtuviin ilmiöihin, jotta työn laajuus pysyy järkevässä mitassa.

Työn tavoitteena on perehtyä haihduuttamoiden toimintaan ja esittää lauhdelämmönsiirron laskennan menetelmiä ja lauhdelämmönsiirtoon vaikuttavia tekijöitä. Työssä esitetään myös yksinkertainen laskentamenetelmä lauhtumattomien kaasujen vaikutuksesta lämmönsiirtokertoimeen lauhdepuolella, yhden efektin aikana.

2 HAIHDUTTIMIT

Kuvassa 1 esitellään yksinkertaisesti haihdutusprosessin toiminta, jossa höyryä pyritään tuomaan prosessiin kylläisessä tilassa ja lauhtuessaan se luovuttaa lämpöä kylmemmälle puolelle. Kylmemmällä puolella virtaava neste kuumenee ja nesteessä oleva vesi höyrystyy ja prosessista saadaan kuivempaa ainetta, höyryä ja lämmintä vettä.



Kuva 1. Haihdutusprosessin periaatekuva.

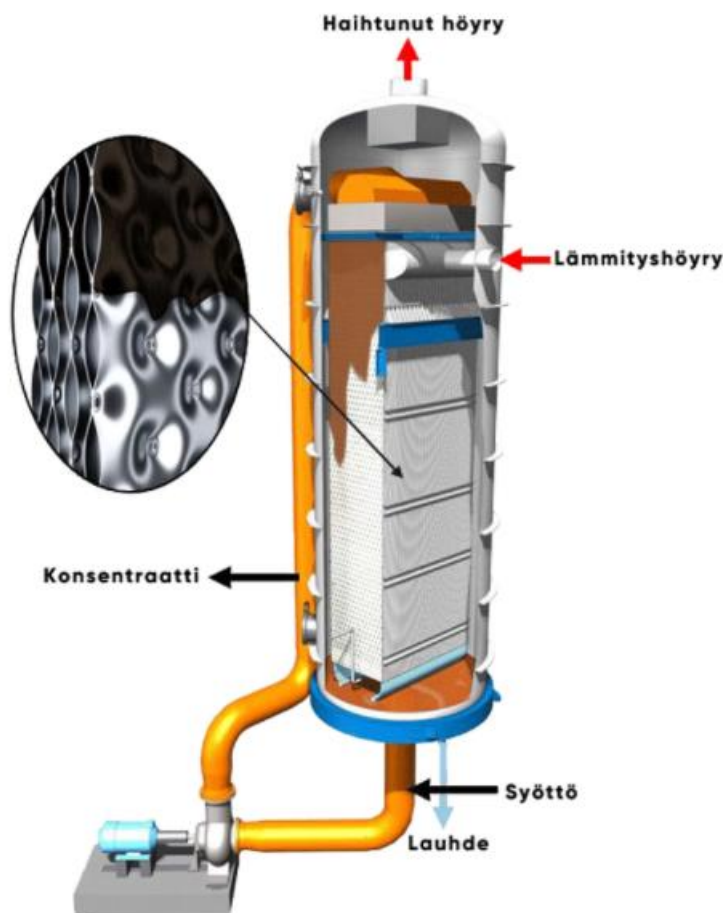
2.1 FF-haihdutin

FF-haihduttimia voidaan erotella toisistaan lämpöpintojen geometrioiden, höyryn virtauspuolen ja höyryn syötön mukaan. Pääasiallisia lämpöpinnan geometrioita on kahdenlaisia levylämpöpinta eli lamellirakenne ja putkirakenne. Höyryn syöttö voidaan toteuttaa joko ala- tai yläsyöttöisenä mallina. (Knowpulp, 2022) Höyryn virtaus toteutetaan joko rakenteen sisä- tai ulkopuolella, esim. putken sisä- tai ulkopuolella (Vakkilainen, 2007).

2.1.1 Lamellirakenne

Levylämpöpintaa eli lamellirakennetta käyttävissä haihdutinrakenteissa lämmityshöyry tuodaan lamellien sisälle lauhtutettavaksi ja haihdutettava aine nostetaan kiertopumpulla

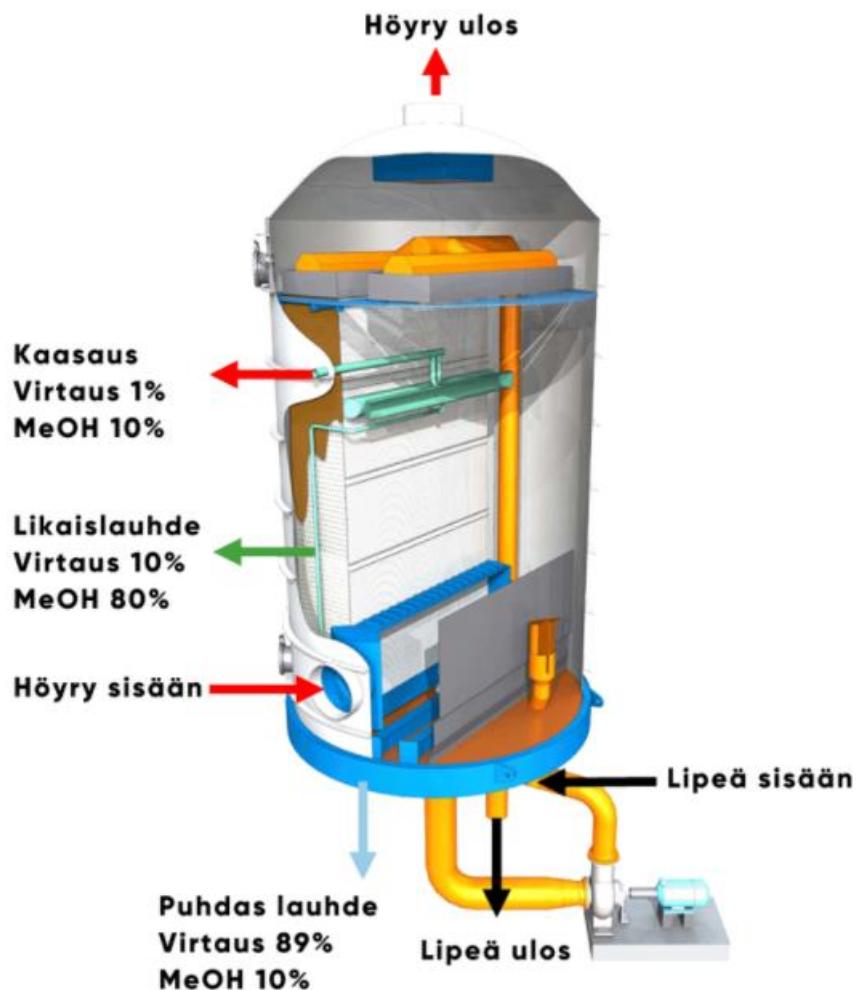
jakojärjestelmään, josta se virtaa tasaisesti ohuena kalvona lamellien ulkopinnalla painovoiman johdosta, konsentraatti kerääntyy haihdutinyksikön pohjalle ja aineesta haihtunut höyry otetaan haihdutinyksikön yläpäästä talteen ja hyötykäyttöön. Kuvassa 3 on esitetty yläsyöttöinen haihdutinyksikkö, jossa höyrynsyöttö toteutetaan yläpäästä ja lauhdeksi muuttunut vesi poistetaan alapäästä. Yläsyöttöistä haihdutinyksikköä käytetään, kun lauhteen sisäistä puhdistusta ei tarvita eli käytettäessä primäärihöyryä, josta saadaan tuotteena puhdasta lauhdetta. (Tikka, 2008)



Kuva 2. Lamellirakenteinen yläsyöttöinen haihdutinyksikkö (Knowpulp, 2022)

Kuvassa 4 on esitettyä alasyöttöinen haihdutinyksikkö, kuvassa myös esitettyä lauhteen ja lauhteessa olevan metanolin määrän jakautuminen. Alasyöttöisen haihdutinrakenteen vahvuutena on sen tehokas sisäinen lauhteenpuhdistus. Sisäinen lauhteenpuhdistus perustuu lämpöelementin kahtiajakoon, jossa on esi- ja jälkilauhtumisosiot (puhdas lauhde ja likaislauhde), kuten kuvassa 4 esitetään. Rakenteessa lämmityshöyry virtaa lamellipaketin

sisälle alhaalta, sisältäen epäpuhteita aineita, kuten metanolia ja lauhtumattomia pelkistyneitä rikkiyhdisteitä. Rakenteen sisällä höyry virtaa lauhteen kanssa vastakkaiseen suuntaan ja kuljettaa mukanaan likaisyyhdisteitä ylempään lauhtumisosioon, jossa likaisyyhdisteistä rikastunut höyry lauhtuu erilliseen osioon. Tämän osion lauhde erotetaan likaislauhteena ja se sisältää suurimman osan metanolista. Lauhtumattomat kaasut kaasataan yksikön yläpäästä ulos. (Tikka, 2008)

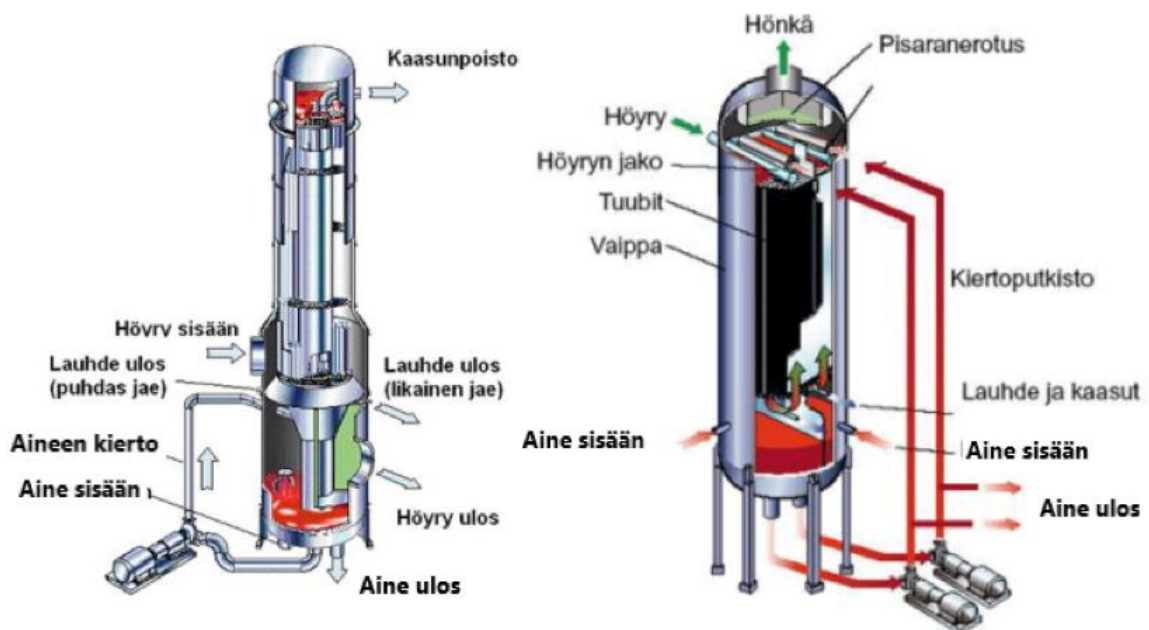


Kuva 3. Lamellirakenteinen alasyöttöinen haihdutinyksikkö (Knowpulp, 2022)

2.1.2 Putkirakenne

Putkirakenteisia FF-haihduttimia on pääasiassa kahta eri tyyppiä: haihdutettava aine putkien sisällä ja haihdutettava aine putkien ulkopuolella, jotka ovat esiteltynä kuvassa 5. Putkiensisäisenvirtauksen haihduttimissa höyrynsyöttö on toteutettu lämpöpinnan alapäästä, jotta voidaan mahdollistaa lauhteen sisäinen puhdistus välilevyä käyttäen. Sisäisen

virtauksen haihduttimia käytetään matalilla kuiva-ainepitoisuuksilla, kuten mustalipeän haihdutuksen vaiheissa 3-7 (Vakkilainen, 2007). Toisessa putkirakenteen mallissa haihdutettava aine virtaa putkien ulkopuolella, mikä ehkäisee haihduttimen tukkeutumista ja helpottaa puhdistusta. Tälle mallille on myös ominaista tukeva putkirakenne, joka mahdollistaa korkeapaineisen höyryn käytön. Nämä ominaisuudet mahdollistavat rakenteen käytön korkeilla kuiva-ainepitoisuuksilla. (Tikka, 2008) Ulkopuolisen kierron haihduttimia käytetäänkin esimerkiksi mustalipeän kuivatuksen vaiheissa 1-3 ja konsentraattorina (Vakkilainen, 2007).



Kuva 4. Putkihaidutinyksiköt, joissa kuivatettava aine putkien sisällä (vas.) ja kuivatettava aine putkien ulkopuolella (oik.) (kuvat muokattuja lähteestä: Knowpulp, 2022)

2.1.3 Hyödyt

FF-haihduttimet ovat kustannustehokkaimpia ja energiataloudellisimpia ratkaisuja, kun vertaillaan eri haihdutinratkaisuja (Myöhänen, Myöhänen and Myöhänen, 2019). FF-haihduttimissa päästään hyvinkin alhaisiin absoluuttisiin paineisiin (valuvaan kalvoon ei muodostu hydrostaattista painetta) ja lämpötilaeroihin, jotka ovat luokkaa 3-8C (fallfilmverdampfer, 2022). Edellä mainitun takia niitä käytetään haihdutettaessa vettä lämpöherkistä ja matalan viskositeetin omaavista nesteistä (Ajon Apu Oy, 2011). Käsiteltävä neste syötetään haihduttimeen yläpäästä, neste valuu haihduttimen lämpöpinnoille muodostaen tasaisen kalvon, jotta voidaan varmistaa veden tasainen

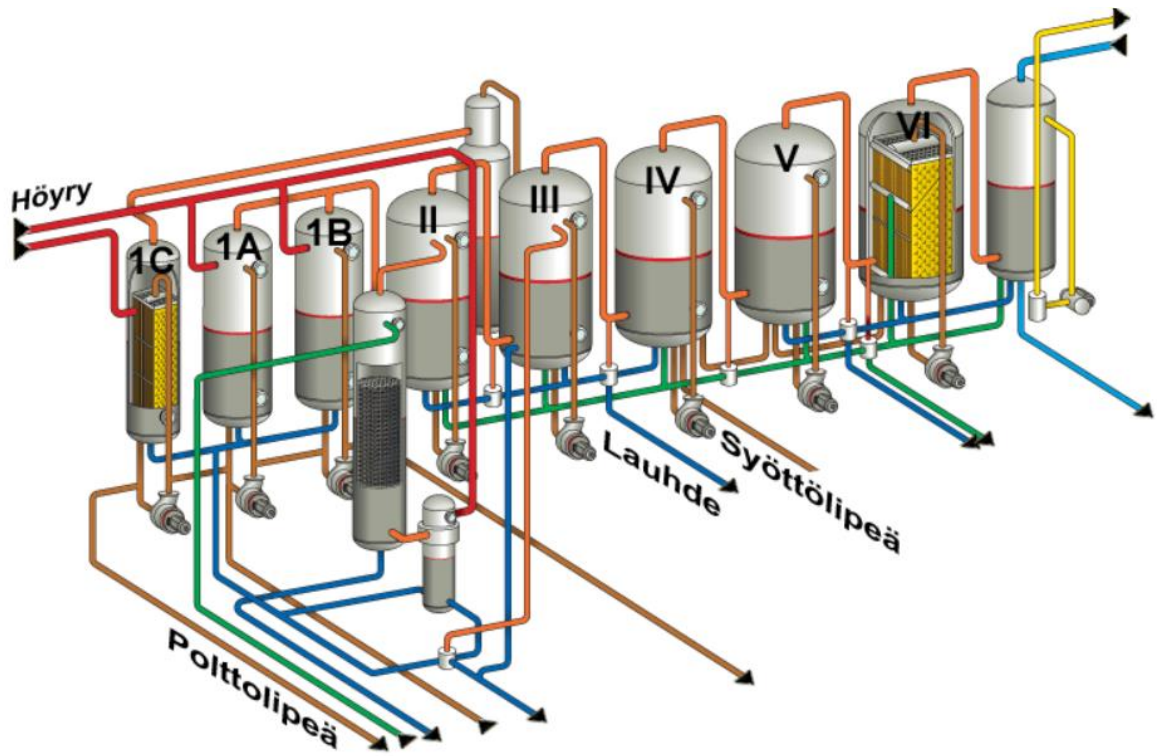
haihtuminen. Tasaisella syötöllä ja pienellä lämpötila erolla ehkäistään lämpöpintojen likaantuminen, joka on suurin syy haihduttimien kunnossapito-ongelmiin. Useimmiten lauhduttimeen tuotava lämpö tulee höyryn muodossa. ('Types of Evaporators & uses - Shachi Engineering', 2021)

FF-haihduttimet ovat myös hyvin yleisessä käytössä meijeri- ja mehutuotteiden konsentroinnissa. FF-haihduttimet ovat energiatehokas valinta tähän prosessiin, koska niillä saadaan säilytettyä korkeat lämmönsiirtokertoimet pienillä lämpötilaeroilla, joka mahdollistaa usean haihdutin efektin käytön. (Hoffman, 2004, pp. 515–520)

2.2 Mustalipeänhaihdutus

Haihduttamoteknologiaa käytetään sellu-/paperitehtailla mustalipeän kuivatukseen, jotta mustalipeä soveltuu poltettavaksi kattilassa. Samassa prosessissa otetaan talteen hyödyllisiä kemikaaleja ja energiaa, kuten raakasuopaa, metanolia, tärpättiä, primäärilauhdetta, sekundäärilauhdetta ja lämmintä vettä. Mustalipeähaihduttamon havainnekuva esitetään kuvassa 2. (Myöhänen, Myöhänen and Myöhänen, 2019)

Kuvassa 2 esitelty monivaihehaihduttamo on käytössä lähes kaikissa sulfaattisellutehtaissa. Efektien lukumäärä on useimmiten 5–7 ja optimaalinen efektien määrä riippuu tehtaan höyryntuotannosta. Primäärihöyry tulee tehtaan matalanpaineen höyryn jakojärjestelmästä, joka on paineeltaan välillä 0.35–0.45 MPa, joka vastaa noin 139 °C – 148 °C lauhtumislämpötilaa. Efektit numeroidaan höyryn kiertojärjestyksessä, joten ensimmäiseen efektiin syötetään primäärihöyryä ja siinä mustalipeästä höyrystyvä matalamman paineen ja lämpötilan omaava höyry syötetään toisen efektin lämmönsiirtimeen ja siitä saatava höyry efektiin 3, josta kierto jatkuu samalla tavalla. Lopulta viimeisestä efektistä höyry lauhtuu 57 °C - 60 °C asteisena. Työssä ei käydä läpi mustalipeän kierron mahdollisuuksia, koska se on mahdollista toteuttaa monilla eri tavoilla. (Tikka, 2008)

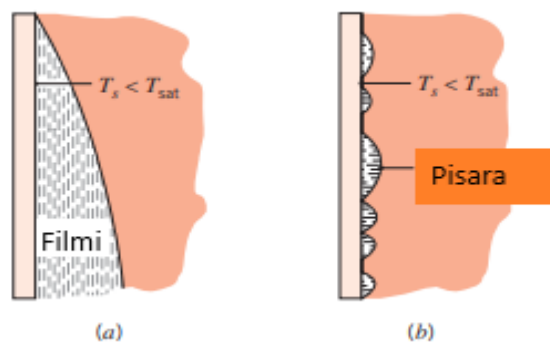


Kuva 5. Mustaliipeä haihduttamon havainnekuva (Knowpulp, 2022)

3 LAUHTUMINEN

Lauhtuminen tapahtuu, kun höyryn lämpötila laskee alle höyryn vallitsevan lauhtumislämpötilan, joka riippuu vallitsevasta paineesta. Teollisissa laitteissa lauhtuminen tapahtuu useimmiten höyryn ja pienemmän lämpötilan omaavan pinnan kosketuksesta, esitettynä kuvassa 6. Lauhdetta eli vettä muodostuu, kun höyryyn sitoutunut lämpöenergia vapautuu ja siirtyy matalamman lämpötilan pintaan. Muita yleisiä lauhtumismuotoja ovat suoran kontaktin lauhtuminen, jossa lauhtuva höyry on suorassa kosketuksessa sitä kylmempään nesteeseen ja homogeeninen lauhtuminen, jossa höyry lauhtuu pisaroiksi paineen nousun myötä ja näin muodostuu sumua. Tässä työssä käsitellään vain pintalauhtumisen ilmiöitä. (Lavine *et al.*, 2017) (VDI *heat atlas*. 2nd edn, 2010)

Pintalauhtuminen voi tapahtua kahden eri mallin mukaan riippuen pinnan olosuhteista eli joko filmilauhtumisena tai pisaralauhtumisena esitettynä kuvassa 6. Filmilauhtuminen on pääasiainen lauhtumisen muoto. Tässä lauhtumismuodossa koko lauhtumispinta peittyy lauhtuvasta nesteestä muodostaen lauhdefilmin, joka valuu jatkuvasti pintaa pitkin alas painovoiman johdosta. Pisaralauhtumisessa tyypillisesti 90 % pinnasta peittyy pisaroista, jotka valuvat painovoiman johdosta seinäpintaa pitkin alas. Pisaralauhtuminen on saavutettavissa, mikäli lauhtumispinta päällystetään kostumista ehkäisevällä materiaalilla, kuten silikonilla, teflonilla, tietyillä vahoilla tai rasvahapoilla. (Lavine *et al.*, 2017)



Kuva 6. Filmilauhtuminen. (a) Pisaralauhtuminen (b). Kuvat muokattu lähteestä (Lavine *et al.*, 2017)

Riippumatta siitä kumpaa pintalauhtumisen muotoa käsitellään lauhdekerros aiheuttaa, joka tapauksessa lämpövastusta lämmönsiirrolle höyryn ja pinnan välillä. Tämän lämpövastuksen takia on suositeltavaa käyttää lyhyitä pystysuoria pintoja tai vaakasuoria

sylintereitä lauhdutus pintana, sillä lauhteen paksuus määrittää lämpövastuksen suuruuden ja lauhteen paksuus kasvaa virtauksen suunnassa. Mikäli halutaan ylläpitää mahdollisimman korkea lauhtumismäärä ja lämmönsiirronaste on pisaralauhtuminen filmilauhtumista tehokkaampi vaihtoehto ohuemman lauhdekerroksen ansiosta. Pisaralauhtumisen ollessa haluttu lauhtumismuoto sen ylläpito on kuitenkin haastavaa teollisissa ratkaisuisissa, sillä edellä mainitut pintapäälysteet menettävät tasaisesti tehokkuuttaan ajan kuluessa ja tämä johtaa pintalauhtumiseen. Tämän takia lauhtumisen laskentamalleissa ja lauhduttimien suunnittelussa otetaan useimmiten käyttöön oletus filmilauhtumisesta. Työssä käsitellään jatkossa vain filmilauhtumisen ilmiöitä ja laskentaa. (Lavine *et al.*, 2017)

3.1 Filmilauhtuminen suoralle seinälle

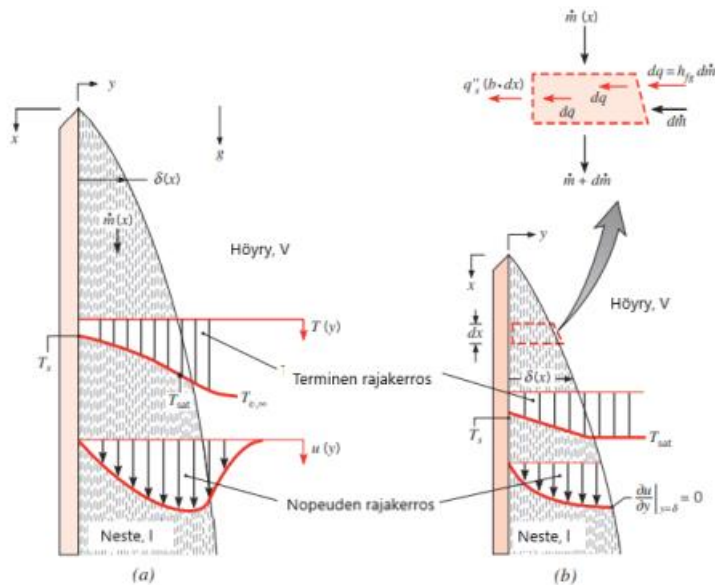
Kuten kuvasta 7 voidaan nähdä, filmilauhtumisen tarkastelussa on paljon monimutkaistavia tekijöitä. Kuvasta nähdään myös, että filmi alkaa muodostumaan lämpöpinnan yläpäässä, josta se valuu alas painovoiman johdosta. Jatkuvan lauhtumisen johdosta, joka tapahtuu neste-höyry-rajapinnalla lämpötilassa T_{sat} filmin paksuus δ ja lauhteen massavirta \dot{m} kasvavat mentäessä x -akselia pitkin alaspäin. Yleisimmissä sovelluksissa höyry on tulistetussa tilassa ja saattaa sisältää lauhtumattomia kaasuja. Neste-kaasu-rajapinnalla esiintyy myös tietty määrä leikkausjännitystä, joka vaikuttaa niin filmin, kuin kaasun nopeusgradienttiin. (Lavine *et al.*, 2017)

Monimutkaisuuksista huolimatta filmilauhtumisesta saadaan laskennallisesti helpommin käsiteltävää, kun tehdään tiettyjä yksinkertaistavia oletuksia, jotka ovat peräisin Nusseltin analyysistä.

1. Vakioaineominaisuudet nestemäisessä filmissä.
2. Kaasufaasi oletetaan koostuvan puhtaasta höyrystä, jolla on yhtenäinen lämpötila T_{sat} . Koska höyrillä ei ole lämpötilagradienttia (katso kuva 7b), lämmönsiirto tapahtuu vain lauhtumisen johdosta eikä neste-höyry-rajapinnalla tapahdu johtumista.
3. Leikkausjännitys neste-höyry-rajapinnalla voidaan jättää huomiotta. Tämän ja yhtenäisen lämpötilan oletuksen vuoksi, laskennassa ei tarvitse huomioida höyryn nopeutta eikä termistä rajakerrosta.

4. Filmissä advektion johdosta tapahtuva liikemäärän ja energian siirto voidaan olettaa merkityksettömäksi. Oletus on järkevä ottaen huomioon matalat virtausnopeudet filmissä. Tästä seuraa, että filmissä tapahtuva lämmönsiirto voidaan olettaa tapahtuvan vain johtumisena, jolloin filmin lämpötilajakauma on lineaarinen.

Edellä luetteloitujen oletusten mukaiset olosuhteet on havainnollistettu kuvaan 7b.



Kuva 7. Filmilauhtumisen rajakerrosilmiöt suoralla seinällä. (a) Ilman oletuksia (b) Nusseltin analyysin oletuksiin muokattu havainnekuva. (Kuva muokattu lähteestä (Lavine et al., 2017))

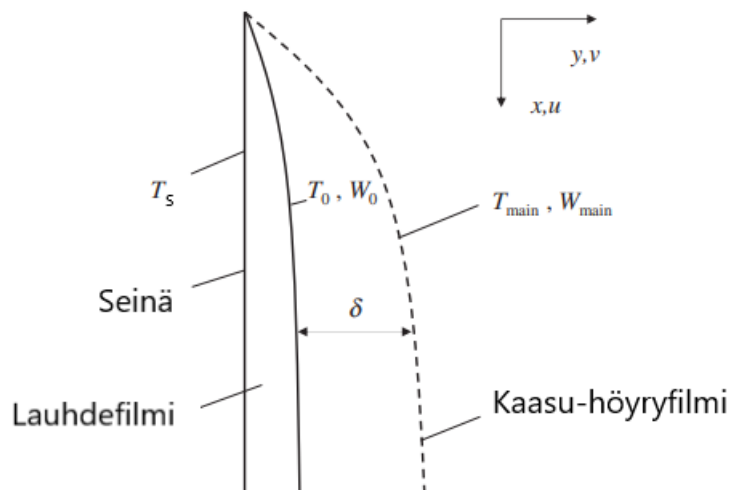
3.2 Filmilauhtuminen lauhtumattoman kaasun läsnäollessa

Kun tarkastellaan höyryn filmilauhtumista, lauhtumattomilla kaasuilla tarkoitetaan höyryn seassa olevia kaasuja, jotka eivät kyseisen prosessin aikana saavuta lauhtumislämpötilaansa. Kirjassa VDI Heat Atlas (2010, 919-932) lauhtumattomista kaasuista käytetään myös termiä inerttikaasu, mutta tässä työssä niihin viitataan sanoilla lauhtumattomia kaasuja, koska inerttikaasu viittaa yleisesti jalokaasuihin.

Kirjallisuudesta voidaan löytää, kuinka merkittäviä lauhtumattomien kaasujen vaikutukset ovat lämmönsiirrontehoon q , lauhteen massavirtaan \dot{m} ja lauhteen lämmönsiirtokertoimeen h_l . Incroperassa mainitaan, että q ja \dot{m} voivat laskea 65 %, mikäli höyry sisältää vain 1 % ilmaa massastaan (Lavine et al., 2017). X.M. Wu et al. (2017, 124–130) esittelevät artikkelissaan, vesihöyryn sisältäessä vain 0,5 % ilmaa massayksikköä kohden, lauhtumislämmönsiirron tehokkuus laskee 50 % tai enemmän. Huiqiang Xu et al. (2017,

1110-1119) kertovat artikkelissaan, että putken sisäiselle lauhtumiselle suoritettussa tutkimuksessa lämmönsiirtokertoimet saattoivat laskea jopa 65 %, kun ilman massaosuus oli ulostulossa 3 % virtauksessa. Edellä mainittujen huomioiden valossa lauhtumattomia kaasuja voidaan pitää vaikutukseltaan erittäin merkittävänä tekijänä, kun tarkastellaan lauhdelämmönsiirtoa.

Lauhtumattomien kaasujen läsnäoloa voidaan havainnollistaa kaksoisfilmiteorialla (englanniksi double-film theory), esitetty kuvassa 8. Tässä teoreettisessa esityksessä aiemmin kuvassa 7 esitellyn nestefilmin ulkopuolella on kaasu-höyry rajakerros, näin syntyy kaksoisfilmi, jossa samassa virtauksessa esiintyy nestefilmi ja kaasu-höyryfilmi, seinän ja päähöyryvirran välillä.



Kuva 8. Filmilauhtuminen lauhtumattoman kaasun läsnä ollessa. (Kuva muokattu lähteestä (X.M. Wu et al., 2017))

Kuvassa havainnollistetaan ajatusta, että nestefilmin pinnalla olevan kaasu-höyryseoksen lämpötila T_0 ja lauhtumattoman kaasun massaosuus W_0 ovat lämmön- ja aineensiirron näkökulmasta merkittävästi eroavia päähöyryvirran lämpötilaan T_{main} ja lauhtumattoman kaasun alkuperäiseen massaosuuteen W_{main} . Tämä johtuu lauhtumisesta, sillä kaasu-höyryvirtauksessa olevan höyryn päästessä kosketukseen kylmemmän pinnan kanssa (tässä tilanteessa filmilauhde) vain höyry lauhtuu ja pinnan läheisyyteen jää isompi konsentraatio lauhtumatonta kaasua kuin päähöyryvirran virtauksessa on. Tämän ilmiön johdosta höyryvirtauksen osapaine laskee, joka johtaa lämpötilagradientin laskuun nestefilmin ja kylmemmän puolen välillä, minkä johdosta lauhtumisteho laskee (VDI Heat Atlas, 2010)

Luonnollisesti virtaus kuitenkin pyrkii tasoittamaan tätä konsentraatioeroa rajakerroksen ja päänhöyryvirran välillä eli höyrymolekyylit siirtyvät virtauksessa lähemmäs kylmää pintaa. Se ei kuitenkaan tasoitu riittävällä vauhdilla, ja tämän takia virtaukseen muodostuu kaksoisfilmi. (X.M. Wu et al., 2017)

Kuten edellä mainitusta hahmottuu lauhtumattomilla kaasuilla, on merkittävä vaikutus tarkasteltaessa lauhdelämmönsiirtoa. Tämän ja lauhtumattomien kaasujen ympäristövaikutusten takia luvussa 2.2.1 mainittu ja kuvassa 4. esitetty lauhteen sisäinen puhdistus on hyvin oleellista monivaihehaihduttamoissa, jotka käyttävät edellisten efektien lauhtumattomia kaasuja sisältävää höyryä lämmönlähteenä seuraaville efekteille. Etenkin lämmönsiirron näkökulmasta tämä on hyvin merkittävää, sillä lauhtumattomat kaasut saadaan kaasattua ulos systeemistä, eivätkä ne jää heikentämään lämmönsiirtoa.

4 LASKENTA

Tässä luvussa esitetään laskentamenetelmä puhtaan höyryn keskimääräiselle lämmönsiirtokertoimelle, sekä paikallisen lämmönsiirtokertoimen laskennalle lauhtumattomien kaasujen läsnäollessa.

4.1 Puhtaan höyryn lauhtuminen suoralle seinälle

Tässä laskennassa käytetään luvun 3.1 oletuksia suoran seinän filmilauhtumiselle. Nestefilmin aineominaisuuksien määrittämistä varten tulee laskea tarkastelulämpötila T_f , joka saadaan seuraavasti

$$T_f = \frac{T_{sat} + T_s}{2} \quad (1)$$

Yhtälössä T_{sat} on höyryn lämpötila [K] (kylläisessä tilassa) ja T_s on seinän lämpötila [K]. Seuraavaksi lasketaan muokattu latenttilämpö h'_{fg} veden faasimuutokselle höyrystä nesteeksi

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0.68c_{p,l}(T_{sat} - T_s) \quad (2)$$

jossa h_{fg} on latenttilämpö [kJ/kg] höyryn lämpötilassa T_{sat} ja $c_{p,l}$ on ominaislämpökapasiteetti nestefilmin lämpötilassa T_f .

Filmilauhtumisessa tulee ottaa huomioon, onko nestefilmin virtaus laminaarista, aaltoilevaa laminaarista vai turbulanttista. Tässä työssä esitellään yhtälöt aaltoilevalle laminaariselle virtaukselle, sillä se on tämän työn laskennassa vallitseva muoto. Laminaariselle ja turbulantiselle virtaukselle korrelaatiot ovat löydettävissä Incropesta. Normaalisti virtauksen tyyppin määrittämiseen vaadittaisiin Reynoldsin luku, mutta sen määrittämiseen vaadittaisiin tieto lauhdekalvon paksuudesta. Tämän puuttuessa virtauksen tyyppi voidaan määrittää dimensiottoman parametrin P avulla seuraavasti. (Lavine *et al.*, 2017)

$$P = \frac{k_l L (T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_{fg} \left(\frac{v_l^2}{g}\right)^{1/3}} \quad (3)$$

jossa k_l on lämmönjohtavuus [W/mK], L on seinän korkeus (virtausmatka) [m], μ_l lauhdefilmin dynaaminen viskositeetti [Ns/m²], v_l on lauhdefilmin ominaistilavuus ja g on putoamiskiihtyvyys [m/s²]. Aaltoilevalle laminaariselle virtaukselle keskimääräinen Nusseltin luku Nu_L määritetään seuraavasti,

$$Nu_L = \frac{1}{P} (0.68P + 0.89)^{0.82} \quad (4)$$

joka pätee parametrin P arvojoukolla $15.6 \leq P \leq 2530$. Keskimääräisellä Nusseltin luvulla voidaan määrittää keskimääräinen konvektiolämmönsiirtokerroin h_L koko lauhtumispinta-alalle seuraavasti,

$$h_L = \frac{Nu_L k_l}{\left(\frac{v_l^2}{g}\right)^{1/3}} \quad (5)$$

Keskimääräisen konvektionlämmönsiirtokerroimen avulla voidaan määrittää lämmönsiirtopinnalle lämpöteho q seuraavasti,

$$q = h_L A (T_{sat} - T_s) \quad (6)$$

ja lämpövuoto q'' seuraavasti

$$q'' = h_L (T_{sat} - T_s) \quad (7)$$

Laskennan tulokset esitellään luvussa 5.

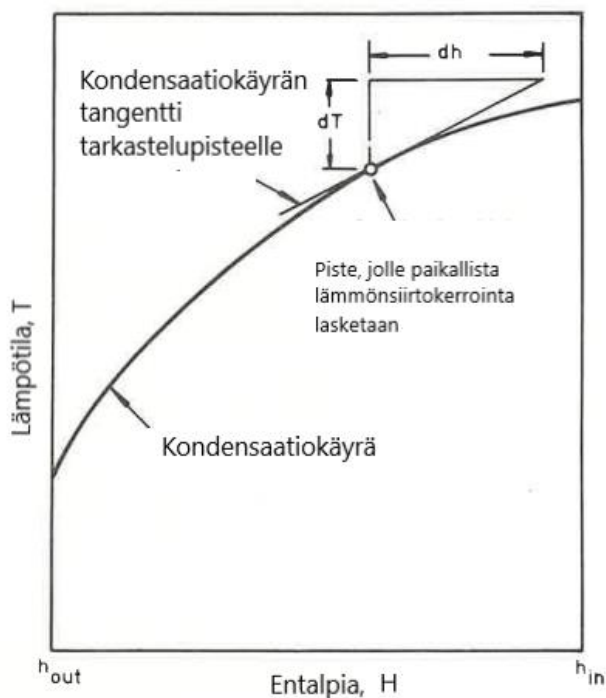
4.2 Lauhtumattomien kaasujen vaikutuksen laskenta

Tässä työssä esitellään yleinen approksimaatiomenetelmä paikallisten lämmönsiirtokerroimien laskennalle, kun lauhtuva virtaus sisältää lauhtumattomia kaasuja. Menetelmä on epätarkka ja todellisen systeemin suunnittelussa tulisi käyttää tarkempia laskentamenetelmiä. Tarkemmat menetelmät ovat kuitenkin iteratiivisia ja askeleittain

toteutettavia, ja tästä syystä hyvin haastavia käyttää. Tässä työssä annettavan metodin on alun perin esittänyt Silver (1947) ja uudelleen löytänyt ja järkevöittänyt Bell ja Ghaly (1972) (Butterworth, 1979). Tarkempia menetelmiä on löydetty VDI Heat Atlas-kirjasta ja International Communications in Heat and Mass Transfer journal:ssa. Varsinkin X.M. Wu et al. julkaisema approksimaatiomenetelmä lauhtumattomien kaasujen laskennalle vaikutti hyvinkin käytettävälle menetelmälle, jolla päästään 15 % tarkkuuteen verrattaessa kokeellisiin tuloksiin.

4.2.1 Kondensaatiokäyrä

Ennen kuin tätä metodia voidaan käyttää, tulee systeemille laskea kondensaatiokäyrä. Eli lämpötilan T [°C] ja virtauksen sisältämän entalpioiden h [kJ/kg] kuvaaja, tarkasteltavalle systeemille.



Kuva 9. Kondensaatiokäyrä. (Kuva muokattu lähteestä (Butterworth, 1979))

Kondensaatiokäyrän lisäksi pitää tietää nesteen ja kaasu-höyryseoksen seoksen aineominaisuudet laskentapisteissä, sekä kaasu-höyryseoksen massaosuus virtauksesta kyseisessä laskentapisteessä. Luvussa 5 esitetään laskettu kondensaatiokäyrä.

4.2.2 Approksimaatiomenetelmä

Seuraavaksi esitellään lauhtumisen lämmönsiirtokerroimen laskenta tietyssä pisteessä. Ensin lasketaan paikallinen lämmönsiirtokerroin h_c [W/m²K] pelkälle lauhteelle, ilman lauhtumattoman kaasun läsnäoloa, tässä työssä käytetään kaikissa pisteissä kuitenkin keskimääräistä lämmönsiirtokerrointa h_L [W/m²K] (esitetty luvussa 4.2). Sitten määritetään kaasu-höyryseoksen lämmönsiirtokerroin h_g [W/m²K], mikäli seos virtaisi systeemissä ilman lauhdefilmiä, eikä se lauhtuisi. Työssä käytetty menetelmä edellä mainitun laskentaan voidaan löytää Incroperan kappaleesta 7 (Lavine *et al.*, 2017). Seuraavaksi määritetään kerroin Z seuraavasti,

$$Z = W_g c_{p,g} \frac{dT}{dH} \quad (8)$$

jossa dT/dH on lämpötila-entalpia kuvaajan (Kondensaatio käyrän) jyrkkyys [kgK/kJ] ja $c_{p,g}$ on kaasu-höyryseoksen ominaislämpökapasiteetti.

Seuraavaksi voimme määrittää todellisen paikallisen lämmönsiirtokerroimen h_{cg} [W/m²K],

$$\frac{1}{h_{cg}} = \frac{1}{h_c} + \frac{Z}{h_g} \quad (9)$$

Menetelmän käyttörajoiksi suositellaan $0.5 \% \leq W_g \leq 70 \%$, tätä pienemmillä määrillä lauhtumaton kaasu suositellaan jätettäväksi huomiotta. Tällä menetelmällä laskettuja paikallisia lämmönsiirtokerroimia lauhtumattoman kaasun massaosuuksille 10 %, 5 %, 3 % ja 1 % on esiteltyinä luvussa 5.

5 TULOKSET

Tässä luvussa esitellään laskennalle oleelliset alkuarvot, laskennan tulokset suoran seinän filmilauhtumiselle ja paikallisia lämmönsiirtokertoimia.

Taulukko 1. Laskennalle oleelliset alkuarvot lähteineen.

Höyrypuolen alkuarvot	lukuarvo	Lähteet
T_{sat} [°C]	114,3	(Knowpulp,2022)
T_s [°C]	107,4	(Knowpulp,2022)
L [m]	9	(Tikka, 2008)
b [m]	1,5	(Tikka, 2008)
u [m/s]	2	

Knowpulp-oppimisympäristö otetut lämpötilan arvot ovat monivaihehaihuttamon efektille 2, jossa höyryn oletetaan tulevan haihuttimeen kylläisessä tilassa ja seinän oletetaan pysyvän haihduettavan aineen (mustalipeä) lämpötilassa eli toimivan isotermisenä pintana. Muut alkuarvot ovat määritettävissä höyryn ja nesteen lämpötilasta ja löytyvät kirjallisuudesta tai tietokoneohjelmilla. Tässä työssä aineominaisuuksien määrittämiseen käytettiin X Steam Tables excel-ohjelmaa, jonka on luonut Magnus Holmgren.

5.1 Filmilauhtuminen suoralle seinälle ilman lauhtumatonta kaasua

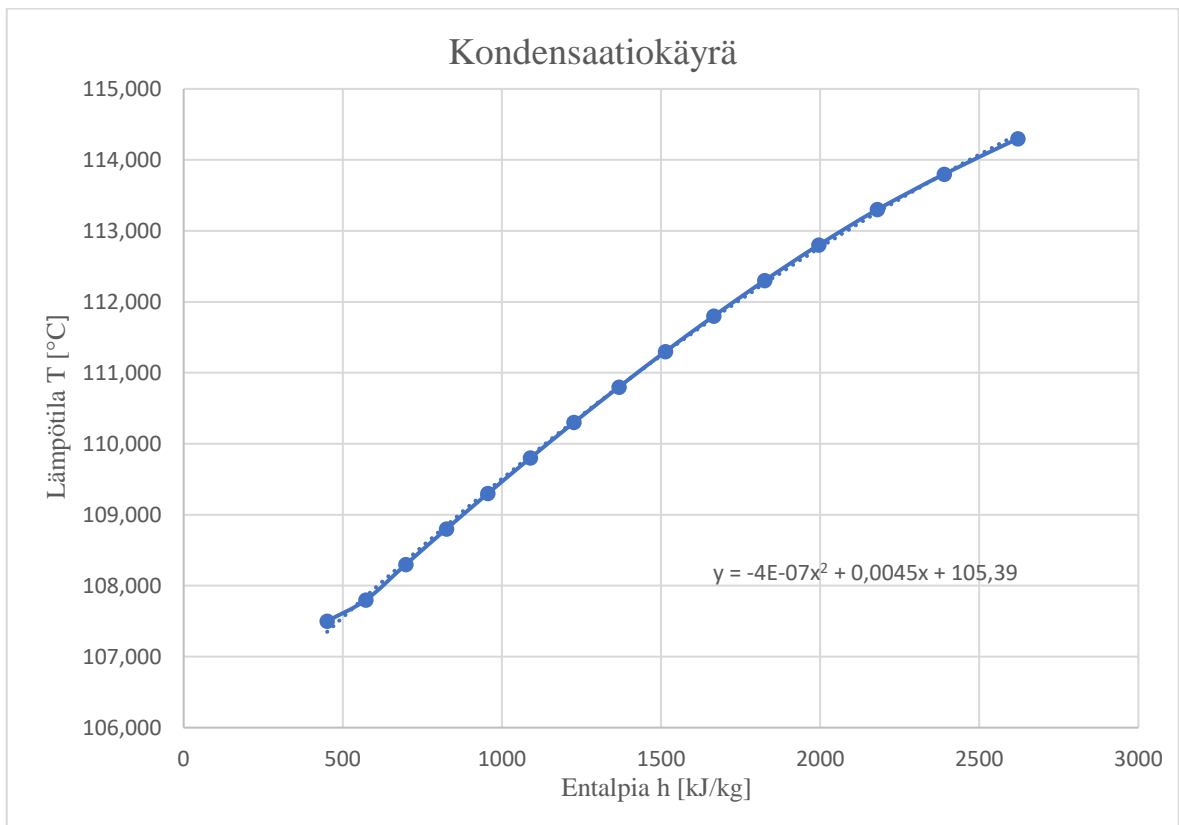
Tässä luvussa esitellään tulokset puhtaan höyryn lauhtumiselle. Tulokset on laskettu luvussa 4.1 esitellyllä tavalla.

Taulukko 2. Oleelliset tulokset filmilauhtumiselle suoralle seinämälle.

Selite	Symboli	Tulos
Filmin Lämpötila	T_f [°C]	110,9
Muokattu latenttilämpö	h'_{fg} [kJ/kg]	2237,8
Parametri	P	166,4
Nusseltin luku	Nu_L	0,3
Keskimääräinen Lämmönsiirtokerroin	h_L [W/m ² K]	2643,5
Kokonaislämpöteho	q [kW]	246,2
Lämpövuoto	q'' [kW/m ²]	18240

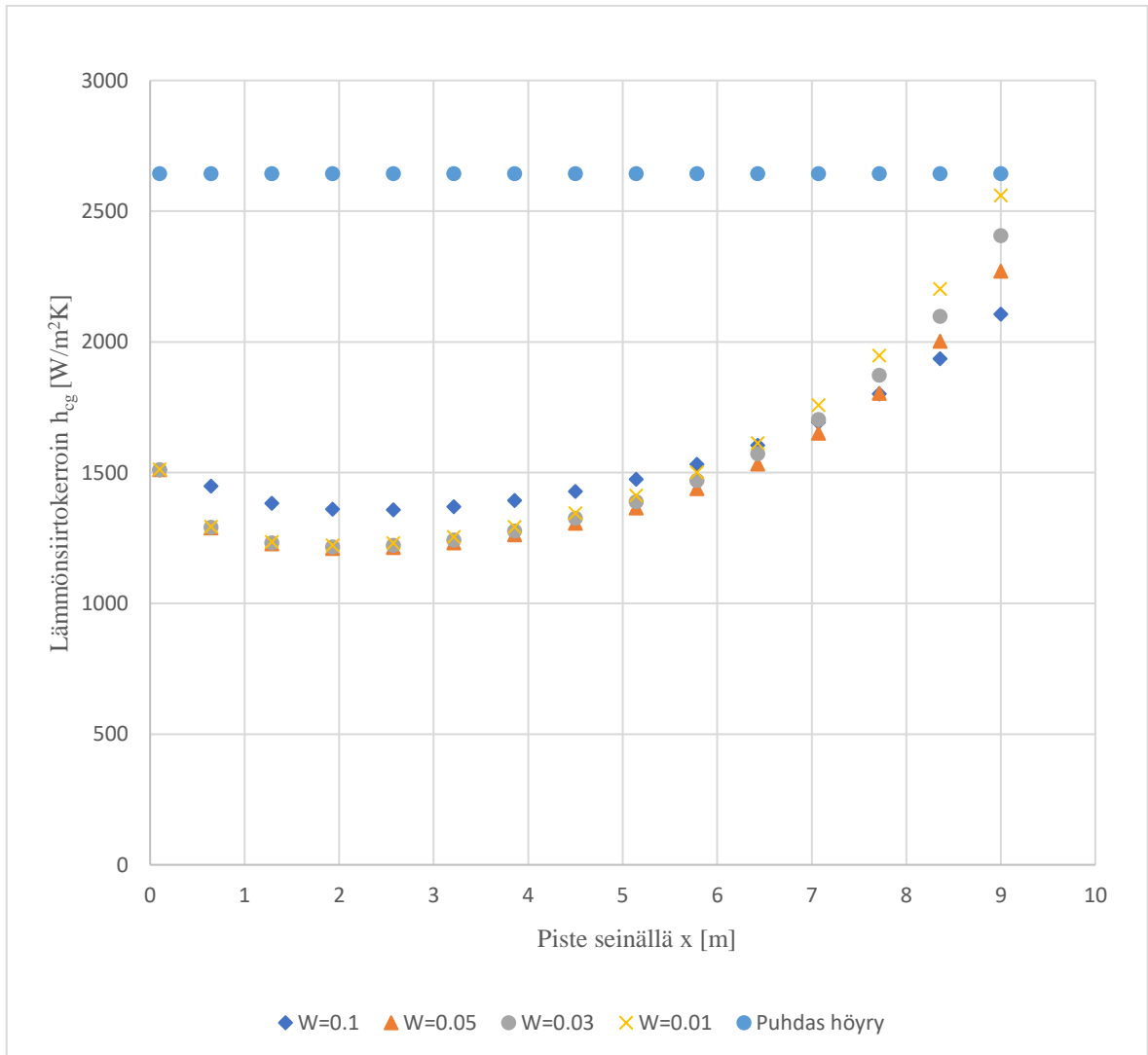
5.2 Paikallinen lämmönsiirtokerroin höyryn sisältäessä lauhtumatonta kaasua

Luvussa esitellään systeemille laskettu kondensaatiokäyrä kuvassa 10. Kondensaatiokäyrän määrittämisessä lämpötilan oletettiin laskevan tasaisesti pitkin lämmönsiirtopintaa, koska työtä varten ei ollut tarkempia mittaustuloksia, eikä menetelmää selvittävä tarkkaa lämpötilan putoamista. Kuvassa 10 on myös esillä kondensaatiokäyrän sovite ja sen yhtälö, jota käytettiin termin dT/dH määrittämiseen, jotta välttyttiin termin graafiselta määrittämiseltä.



Kuva 10. Kondensaatiokäyrä mustalipeän haihdutuksen 2. efektille.

Kuvassa 11 esitellään luvussa 4.3 esitellyn menetelmän mukaisia tuloksia eri lauhtumattoman kaasun pitoisuuksille pitkin lämmönsiirtopintaa.



Kuva 11. Paikallisten lämmönsiirtokertoimien arvot pitkin lämmönsiirtopintaa efektille 2 (ylhäältä alas), eri lauhtumattoman kaasun massaosuuksilla.

5.3 Tulosten tarkastelu

Verrattaessa puhtaan höyryn filmilauhtumisen tuloksia kirjallisuudessa esiintyviin arvoihin voidaan todeta keskimääräisen lämmönsiirtokertoimen laskennan antavan oikeanluokkaisia arvoja annetuilla alkuarvoilla. Tätä arvoa käytetään jatkossa vertauskohtana paikallisille lämmönsiirtokertoimille lauhtumattoman kaasun läsnäollessa ja tarkastellaan luvussa 4.2 esitellyn menetelmän toimintaa ja verrataan sitä kirjallisuudessa esiintyvien mittausten ja laskumenetelmien tuloksiin.

Menetelmällä saaduista tuloksista voitaisiin olettaa lämmönsiirtokertoimen pienenevän alkumatkalla mentäessä seinää alaspäin ja muutaman metrin jälkeen voidaan nähdä lämmönsiirtokertoimen alkavan kasvaa merkittävästi. Menetelmä myös viittaa, että lämmönsiirto on alussa sitä tehokkaampaa mitä enemmän höyryn seassa on lauhtumatonta kaasua ja vasta lämpöpinnan loppupäässä lämmönsiirto olisi tehokkaampaa mitä vähemmän virtauksen seassa on lauhtumatonta kaasua. Tämä kuitenkin sotii lauhdelämmönsiirron teoriaa vastaan, kuten luvussa 3 on esitetty lämmönsiirron tulisi heikentyä lauhdekalvon paksuuden kasvaessa. Myös kaasu-höyryseoksen muodostaman rajakerroksen tulisi teoreettisesti heikentää lämmönsiirron tehoa, koska sekin paksuntuu pitkin lämmönsiirtopintaa ja pinnan lähelle kerääntyy enemmän lauhtumatonta kaasua.

Kun menetelmän antamia tuloksia verrattiin kirjallisuudessa esiintyvien tutkimusten ja laskennan tuloksiin voitiin nähdä, että menetelmä toimii nurinkurisesti, sillä paikallisen lämmönsiirtokertoimen arvon tulisi pudota mentäessä lämmönsiirto pintaa pitkin alaspäin. Kuitenkin tuloksiin vaikuttavilla oletuksilla on iso merkitys, kuten lämpötilan tasaisen laskemisen oletuksella ja kaiken höyryn lauhtumisen oletuksella. Mikäli nämä arvot voitaisiin korvata mittausdatalle menetelmän mahdollinen tarkempi toiminta voisi olla mahdollista. Myöskin menetelmää voisi tarkentaa, jos filmilauhtumisen lämmönsiirtokerroin määritettäisiin myös paikallisesti, jolla voitaisiin huomioida lauhdefilmin paksuutumisen vaikutus lämmönsiirtoon.

Menetelmä kuitenkin osoittaa lauhtumattomien kaasujen laskevaa vaikutusta lämmönsiirron tehoon ja menetelmää esittelevissä artikkeleissa mainitaankin tämän olevan vain epätarkka approksimaatio, jota voidaan käyttää ei niin tarkkaa mitoitusta vaativissa laskelmissa. Tarkempien tulosten tarpeessa kannattaakin valita, jokin tarkempi laskumenetelmä, vaikka ne ovatkin hyvin haastavia, monimutkaisia ja monesti tietokoneella toteutettavaa laskentaa vaativia.

6 YHTEENVETO

Tässä Kandidaatintyössä esitetään erilaisia haihduttamorakenteita, teknisiä ratkaisuja ja käydään hieman läpi erilaisia käyttökohteita haihdutusteknologialle. Työssä kuitenkin pääpaino on höyryä lämmönlähteenä käyttävien haihdutusratkaisuiden lauhdepuolen lämmönsiirron ilmiöissä. Tämän takia työssä käydään syvällisemmin läpi höyryn lauhtumisen teoriaa ja tarkastellaan tarkemmin lauhtumattomien kaasujen vaikutusta lauhtumisessa.

Työssä laskettiin puhtaan höyryn filmilauhtumiselle keskimääräinen lämmönsiirtokerroin ja paikallisia lämmönsiirtokertoimia eri lauhtumattoman kaasun massaosuuksille pitkin lämmönsiirtopintaa mustalipeän haihdutusprosessissa, efektissä 2. Näitä arvoja vertailtiin keskenään ja tarkasteltiin lauhtumattoman kaasun määrän vaikutusta lämmönsiirtokertoimeen. Tuloksia vertailtiin kirjallisuudesta löytyviin mittaus- ja laskentatuloksiin.

Tavoitteena oli havainnollistaa lauhtumattomien kaasujen vaikutusta lämmönsiirtokertoimeen lauhdepuolella yksinkertaisen laskentamallin kautta. Laskentamallin kuitenkin huomattiin antavan kirjallisuuden tuloksista poikkeavia arvoja eli antavan turhankin korkeita lämmönsiirtokertoimia. Laskentamallin tuloksissa lämmönsiirtokerroin ensin putoaa mentäessä lämmönsiirtopintaa alaspäin, mutta alkaa kasvamaan, mitä ei todellisuudessa prosessissa tapahdu. Kuitenkin laskentamalli osoittaa lauhtumattomien kaasujen heikentävän lämmönsiirtoa ja virheellisyydestään huolimatta voidaan käyttää alustaviin mitoituksiin.

LÄHTEET

Ajon Apu Oy. Tuotteet & palvelut. [viitattu 01.02.2022]. Saatavissa:

http://ajonapu.com/PDF/EPCON_catalogue2011_FIN1C.pdf

Butterworth, D. 1979. Silver method for multi-component condensation. Teoksessa: Heat Transfer and Fluid Flow Service.

Fallfilmverdampfer saatavilla: <http://www.fallfilmverdampfer.info/english/applications>

[verkkoaineisto] [viitattu 28.02.2022]

Hoffman, P. (2004) 'Plate evaporators in food industry—theory and practice', 61(4), pp. 515–520. Saatavissa: [https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/S0260-8774\(03\)00296-6](https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/S0260-8774(03)00296-6).

Huiqiang Xu, Haifeng Gu ↑ , Zhongning Sun. 2017. Forced convection condensation of steam in the presence of multicomponent noncondensable gases inside a horizontal tube. Teoksessa: Tianshou Zhao. International Journal of Heat and Mass Transfer 104. 2017. S.1110-1119. ISSN: 0017–9310

'KnowPulp : Sellunvalmistuksen oppimisympäristö = Learning Environment for Chemical Pulping and Automation (LUT)' (no date). Proledge Oy, VTT Industrial Systems (Sellunvalmistuksen oppimisympäristö). Saatavissa tunnuksilla.

Lavine, A. S. *et al.* (2017) *Incropera's principles of heat and mass transfer*. Wiley. ISBN 978-1-119-38291-1.

Myöhänen, J. (2019) *Haihduttamon haihdutustehokkuuden/toimintavarmuuden kehittäminen* Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201904124917>.

Tikka, P. (2008) *Papermaking science and technology. Book 6, Chemical pulping. Part 2, Recovery of chemicals and energy*. 2nd edn. Helsinki: Finnish Paper Engineers' Association. ISBN 978-952-5216-26-4

Towler et al. (2013). Chemical Engineering Design - Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design (2nd Edition) - 17.3.3 Equilibrium Flash Calculations. Elsevier. Saatavissa: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00ANUDN3/chemical-engineering/equilibrium-flash-calculations>

‘Types of Evaporators & uses - Shachi Engineering’ (2021). (Spray Dryer | Evaporators Manufacturer and Supplier - Shachi Engineering). Saatavissa: <https://www.shachiengineering.com/evaporators-types-and-uses/> (Accessed: 1 February 2022).

VDI heat atlas. 2nd edn (2010). Berlin: Springer. ISBN 978-3-540-77876-9.

X.M. Wu*, Tong Li, Qianyu Li, Fuqiang Chu. Approximate equations for film condensation in the presence of non-condensable gases. Teoksessa: William Worek. International Communications in Heat and Mass Transfer 85. 2017. S.124-130. ISSN: 0735-1933.