

Lauri Saviluoto

Levylämmönsiirtimen levyparin välisen virtauksen ja lämmönsiirron kehittyminen sekä lämpötilan muutos lämpölevyn yli

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

18.11.2014

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Lauri Saviluoto Levylämmönsiirtimen levyparin välisen virtauksen ja lämmönsiirron kehittyminen sekä lämpötilan muutos lämpölevyn yli 41 sivua + 5 liitettä 18.11.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaaja	Tutkintovastaava Tomi Hämäläinen
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoululle. Työn tavoitteena oli perehtyä levylämmönsiirtimen toimintaan ja selvittää sen levylämmönsiirtimen levyparin välissä kulkevan nesteen virtauksen käyttäytymistä ja lämmönsiirtoa. Lisäksi tutkittiin, miten lämpötila muuttuu yksittäisen levylämmönsiirtimessä käytettävän lämpölevyn yli.</p> <p>Comsol Multiphysics -ohjelman avulla luotiin tietokoneavusteiset simulointimallit sille, miten virtaus käyttäytyy ja lämmönsiirto tapahtuu levylämmönsiirtimen levyparin välissä sekä miten lämpötila muuttuu lämpölevyn yli kulkiessaan. Levyparin välissä tapahtuvalle virtaukselle laskettiin myös Reynoldsin luku ja Nusseltin luku. Luotujen mallien ja niistä tehtyjen kuvaajien avulla voitiin visuaalisesti havainnollistaa, miten tutkittavat virtaus- ja lämpötekniset ilmiöt tapahtuvat levylämmönsiirtimen sisällä.</p> <p>Mallien ja kuvaajien pohjalta saadut tulokset osoittivat niiden olevan virtaustekniikan ja lämmönsiirron teorioiden mukaisia, joten luotuja malleja voitiin pitää onnistuneina. Niitä voidaan käyttää jatkossa lämmönvaihtimia käsittelevien luentomateriaalien tukena, ja niiden avulla voidaan visuaalisesti havainnollistaa käsiteltävien teorioiden toimintaa.</p>	
Avainsanat	levylämmönsiirrin, lämpölevy, virtaus, väliaine, konvektio, simulointimalli

Author(s) Title Number of Pages Date	Lauri Saviluoto The Progress of Fluid Flow and Heat Transfer Between a Pair of Plates in the Plate Heat Exchanger and the Change in Temperature Over a Plate 41 pages + 5 appendices 18 November 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Specialisation option	Energy and Environment Technology
Instructor(s)	Tomi Hämäläinen, Lecturer
<p>This Bachelor's thesis was made for Metropolia University of Applied Sciences. The aim of this thesis was to examine, how the plate heat exchanger operates, and how the heat transfer and the fluid flow acts between a pair of plates inside the plate heat exchanger. In addition, it was examined how the temperature changes over a single heat plate used in the plate heat exchanger.</p> <p>Computer-aided simulation models were created with Comsol Multiphysics software to demonstrate, how the fluid flow and the heat transfer occurs between a pair of plates inside the plate heat exchanger, and how the temperature changes when passing over a heat plate. The Reynolds number and Nusselt number were also calculated for the flow taking place between the pair of plates. With the created models and the diagrams based on those models, it could be visually demonstrated, how the flow effects and the heat technical effects occur inside the plate heat exchanger.</p> <p>The results based on the created models and on their diagrams demonstrated that they were in accordance with the theories of fluid mechanics and heat transfer. Therefore, the created models could be considered successful. In the future these models can be used as support materials for lectures concerning heat exchangers and they can visually demonstrate the operations of the related theories.</p>	
Keywords	Fluid flow, heat transfer, plate heat exchanger, convection

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lämmönsiirtimet	1
2.1	Kaksoisputkilämmönsiirrin	2
2.2	Kompaktilämmönsiirrin	3
2.3	Putkilämmönsiirrin	5
2.4	Regeneraattori	6
3	Levylämmönsiirrin	7
3.1	Levylämmönsiirtimen toimintaperiaate	7
3.1.1	Tiivisteelliset levylämmönsiirtimet	9
3.1.2	Hitsatut ja puolihitsatut levylämmönsiirtimet	10
3.1.3	Juotetut levylämmönsiirtimet	10
3.2	Levylämmönsiirtimien tyypillisiä käyttökohteita	11
3.3	Levylämmönsiirtimessä käytettävät levyprofiilit	12
3.3.1	Levyprofiilien kuviointi	12
3.3.2	V-profiilisten lämpölevyjen geometrinen tarkastelu	14
3.3.3	Lämpölevyissä käytettävä materiaali	15
3.4	Levylämmönsiirtimen edut ja rajoitukset	15
4	Levylämmönsiirtimen teoreettinen tarkastelu	17
4.1	Lämmön siirtyminen konvektion avulla	17
4.2	Nusseltin luku	19
4.3	Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus	20
4.4	Reynoldsin luku	22
4.5	Nopeusprofiilin lähempi tarkastelu	23
4.6	Terminen rajakerros	24
4.7	Prandtlin luku	26
4.8	Virtaus litteään levypinnan yli	26
4.9	Lämpölevyparin teoreettinen tarkastelu	27
5	Virtausmallin luominen Comsol Multiphysics -ohjelmalla	29

5.1	Mallinnuksen eri vaiheet ohjelmassa	29
5.2	Mallin luominen virtaukselle levyparin välissä	30
5.2.1	Geometrian luominen levyparille	30
5.2.2	Syntyneet mallit ja kuvaajat	31
5.2.3	Reynoldsin luvun ja Nusseltin luvun laskeminen mallille	33
5.3	Virtausmalli litteälle levypinnalle	35
5.3.1	Parametrien ja geometrian määrittäminen	35
5.3.2	Syntynyt malli ja kuvaaja	36
6	Mallien ja kuvaajien analysointi	37
6.1	Analyysit virtaukselle levyparin välissä	37
6.2	Analyysit lämpötilan muutokselle yli ohuen levypinnan	38
7	Yhteenveto	39
	Lähteet	40
	Liitteet	
	Liite 1. Levylämmönsiirtimen rakenne	
	Liite 2. Virtausnopeuden kuvaaja	
	Liite 3. Lämpötilan muutoksen kuvaaja levyparin välissä	
	Liite 4. Kuvaaja lämpötilan muutoksesta levyn pinnalla	
	Liite 5. Taulukko veden ominaisuuksista eri lämpötiloissa	

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan levylämmönsiirtimen levyparin välissä tapahtuvaa virtauksen kehittymistä ja lämmönsiirtymistä, sekä lämpötilan kehittymistä ohuen levy-pinnan yli. Työn tavoitteena on kehittää Comsol Multiphysics -ohjelman avulla simulaatiomallit levylämmönsiirtimen levyparin välissä kulkevalle nesteen virtaukselle ja lämmönsiirrolle. Levyparin välissä tapahtuvalle nesteen virtausmallille lasketaan myös Reynoldsin luku ja Nusseltin luku. Mallien avulla pyritään havainnollistamaan, miten veden virtausnopeus ja lämpötila muuttuvat levyparin välissä. Lisäksi luodaan malli sille, miten lämpötila kehittyy ja muuttuu yksittäisen tarkasteltavan lämpölevyn yli.

2 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirtimiksi kutsutaan laitteita, joilla siirretään kahden eri lämpötilassa olevan väliaineen välillä lämpöä ilman, että väliaineet sekoittuvat keskenään lämmönsiirron aikana. Lämmönsiirtimissä käytetään väliaineena nestettä tai kaasua. Lämmönsiirtimiä käytetään lukuisissa erilaisissa sovelluksissa, kuten kotitalouksien lämmitys- ja ilmastointijärjestelmissä, tehtaiden kemiallisissa prosesseissa sekä voimalaitosten energiantuotannossa. Lämmönsiirto lämmönsiirtimissä tapahtuu yleensä konvektion avulla, jossa lämpöenergia siirtyy väliaineessa lämmön aiheuttamien virtausten johdosta. Lisäksi lämpöä siirtyy myös konduktion eli johtumisen seurauksena, jolloin lämpöenergia siirtyy väliaineesta toiseen lämmönsiirtimissä olevien kiinteiden rakenteiden, kuten seinämien läpi kuumasta kylmempää kohti. Lämmönsiirron suuruus on suoraan suhteessa virtaavien väliaineiden lämpötilaeroon. Väliaineiden lämpötilaerojen suuruus puolestaan vaihtelee lämmönsiirtimen eri kohdissa. (1, s.629–633.)

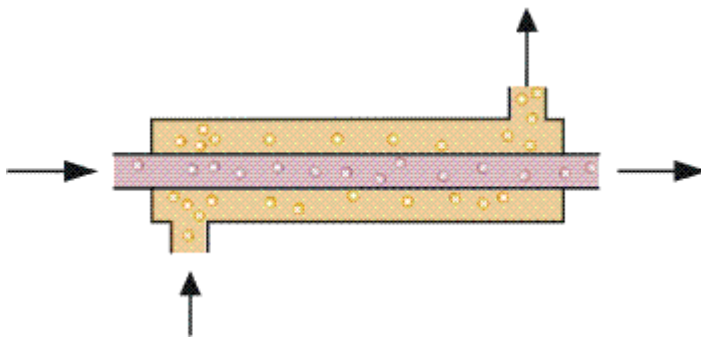
Lämmönsiirtimiä valmistetaan lukuisia eri tyyppisiä, joista yleisimpiä ovat

- kaksoisputkilämmönsiirrin
- kompaktilämmönsiirrin
- putkilämmönsiirrin
- regeneraattori
- levylämmönsiirrin

Levylämmönsiirtimien toiminnasta kerrotaan yksityiskohtaisemmin luvussa 3, Levylämmönsiirtimet.

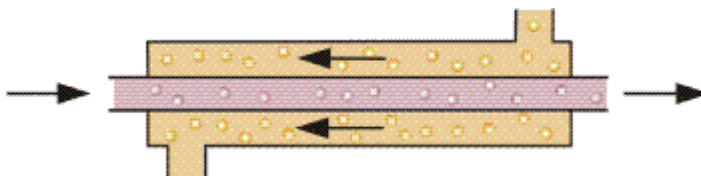
2.1 Kaksoisputkilämmönsiirrin

Rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan kaksoisputkilämmönsiirrin on yksinkertaisin kaikista lämmönsiirtimistä. Se koostuu putkesta ja sen sisällä olevasta halkaisijaltaan pienemmästä samankeskisestä putkesta, joiden sisällä virtaavat kylmä ja kuuma väliaine. Kaksoisputkilämmönsiirtimissä väliaine virtaa kahdella eri tavalla. Se voi virrata myötävirtaan, jolloin kylmä ja kuuma väliaine virtaavat putkien sisällä samaan suuntaan. Tällaisella toimintaperiaatteella toimivaa kaksoisputkilämmönsiirrintä kutsutaan myötävirtasiirtimeksi. Kuvassa 1 on esitetty myötävirtasiirtimen toimintaperiaate. (1, s. 629–633; 2.)



Kuva 1. Myötävirtasiirtimen toimintaperiaate (2).

Vastavuoroisesti kuuma ja kylmä väliaine voivat myös virrata vastavirtaan putkissa, jolloin kyseessä on niin sanottu vastavirtasiirrin. Kuvassa 2 on esitetty vastavirtasiirtimen toimintaperiaate. (1, s. 629–633; 2.)

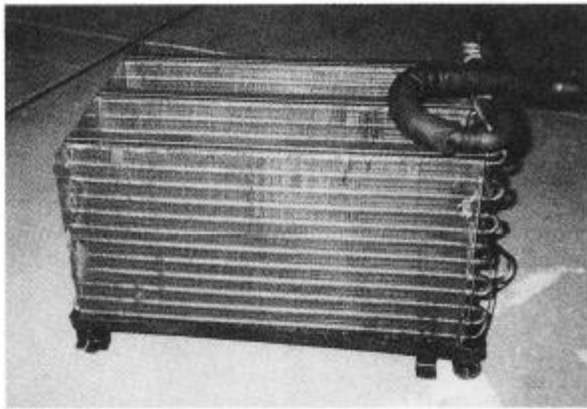


Kuva 2. Vastavirtasiirtimen toimintaperiaate (2).

Kaksoisputkilämmönsiirtimet ovat huollon ja suunnittelun osalta edullisia, mutta niillä on huonompi hyötysuhde kuin muilla lämmönsiirrintyypeillä. Lisäksi suurempi tilantarve rajoittaa niiden käyttöä ahtaissa tiloissa. (3.)

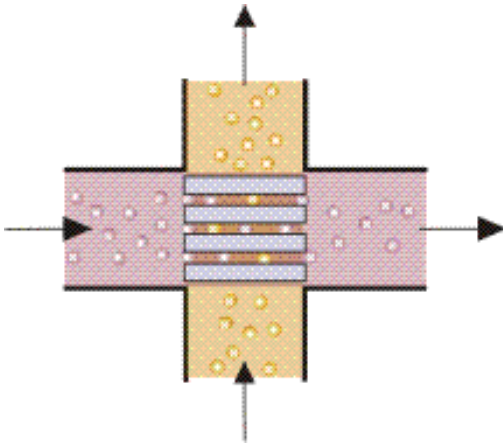
2.2 Kompaktilämmönsiirrin

Kompaktilämmönsiirtimet ovat lämmönsiirtimiä, jotka sisältävät suuren määrän lämmönsiirtopinta-alaa tilavuusyksikköä kohti. Suhdeluku β kuvaa kappaleen lämmönsiirtopinta-alaa tilavuusyksikköä kohti, ja lämmönsiirrin, jonka $\beta > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ luokitellaan ominaisuuksiltaan kompaktilämmönsiirtimeksi. Esimerkiksi auton jäädyttimen β -luku on noin $1\,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ja ihmisten keuhkojen β -luku puolestaan noin $20\,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Kompaktilämmönsiirtimiä käytetään yleisesti sovelluksissa, joissa siirretään lämpöä kaasusta kaasuun, esimerkiksi savukaasusta ilmaan ilman esilämmittimessä, tai kaasusta nesteeseen kuten ekonomaiserissa, jossa siirretään lämpöä savukaasusta syöttöveiteen. Kuvassa 3 on esitetty kompaktilämmönsiirrin, joka siirtää lämpöä kaasusta nesteeseen. (1, s. 629–633.)



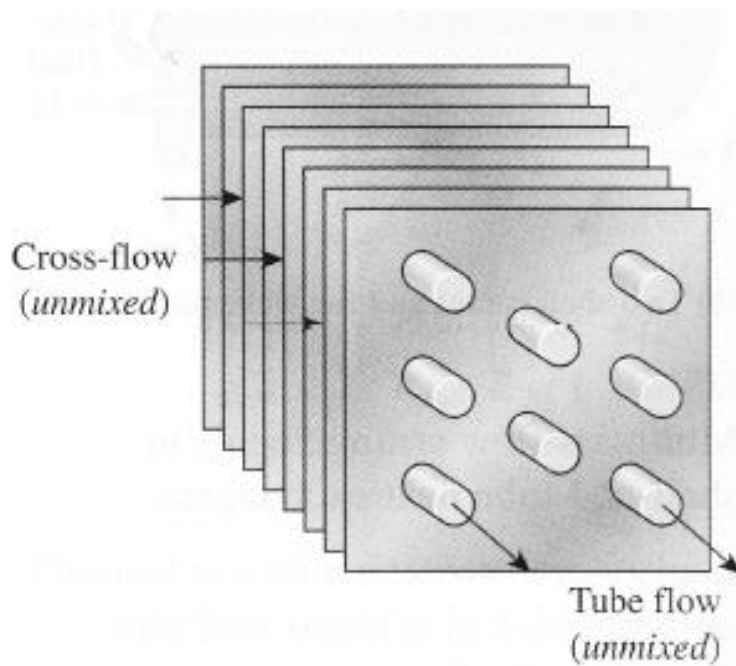
Kuva 3. Ilmastointijärjestelmässä käytettävä kompaktilämmönsiirrin (1, s. 629–633).

Tyypillisesti kompaktilämmönsiirrin toimii kuvan 4 osoittamalla niin sanotulla ristivirta-siirtimen periaatteella, jossa kylmä ja kuuma väliaine virtaavat kohtisuoraan toisiinsa nähden. (1, s. 629–633.)



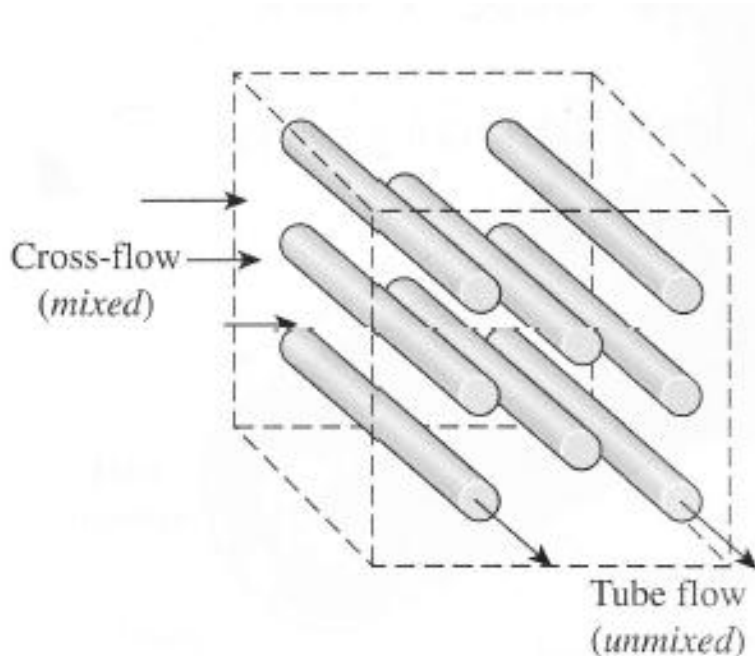
Kuva 4. Ristivirtaperiaatteella toimiva lämmönsiirrin (2).

Ristivirtaperiaatteella toimiva lämmönsiirto voidaan vielä jakaa erikseen sekoittuneeksi ja sekoittumattomaksi virtaukseksi. Kuvassa 5 on esitetty ristivirtaperiaatteella toimiva kompaktilämmönsiirrin, jonka putkissa virtaava ja putkia vastaan kohtisuoraan levyjen välissä virtaava väliaine eivät pääse sekoittumaan keskenään eikä myöskään väliaine itse eri putkien tai levyjen välillä. (1, s. 629–633.)



Kuva 5. Sekoittumaton ristivirtaus lämmönsiirtimessä (1, s. 629–633).

Tilanne, jossa putkien ulkopuolinen väliaine on päässyt sekoittumaan ristivirtauksessa, on esitetty kuvassa 6. Itse putkien sisällä oleva väliaine ei kuitenkaan sekoitu. Tällaista tilannetta kutsutaan sekoittuneeksi ristivirtaukseksi. (1, s. 629–633.)

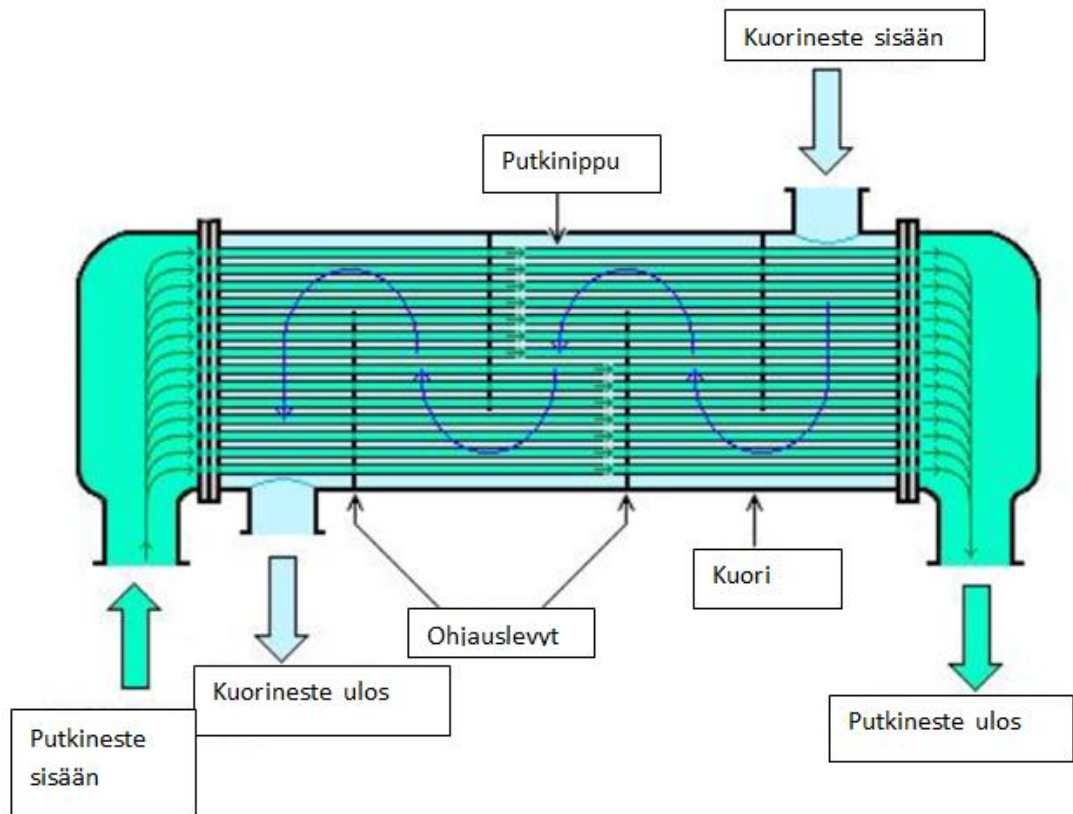


Kuva 6. Sekoittunut ristivirtaustilanne lämmönsiirtimessä (1, s. 629–633).

2.3 Putkilämmönsiirrin

Yleisin teollisissa sovelluksissa käytössä oleva lämmönsiirrintyyppi on niin sanottu putkilämmönsiirrin. Putkilämmönsiirrin koostuu kuoresta, jota voidaan pitää paineastiana ja jonka sisään on pakattu suuri määrä putkinippuja. Kuoren sisällä olevan vaipan ja putkinippujen akselit ovat samansuuntaisia. Lämmönsiirto tapahtuu niin, että yksi väliaine virtaa putkien sisällä samalla, kun toinen väliaine virtaa putkien ulkopuolella vaipan lävitse. Väliaine tulee säiliöön sisään etupäätykappaleeseen, mistä se jakaantuu itse putkiin. Putkista väliaine jatkaa kulkuaan säiliön toisella puolella olevaan takapäätykappaleeseen, jonka jälkeen se poistuu säiliöstä ulostuloaukon kautta. Vaippapuolen ohjauslevyjä käytetään ohjaamaan vaipan väliaineen virtausta säiliön poikki, minkä seurauksena lämmönsiirtotehokkuus paranee. Putkilämmönsiirtimet voidaan luokitella vielä erikseen niiden rakenteen perusteella muun muassa kaksoisputki-, vaippaputki- ja ripaputkilämmönsiirtimiin. Putkilämmönsiirrin ei sovellu käytettäväksi ajoneuvo- ja lentotekniikan eri sovelluksissa, johtuen sen verrattain suuresta koosta ja painosta. Putki-

lämmönsiirtimen yleisimpiä käyttösovelluksia ovat muun muassa hydraulinesteen ja öljyn jäähditys moottoreissa, vaihteistoissa ja hydraulikoneistoissa. Kuvassa 7 on esitetty putkilämmönsiirtimen yleinen toimintaperiaate. (1, s. 629–633.)

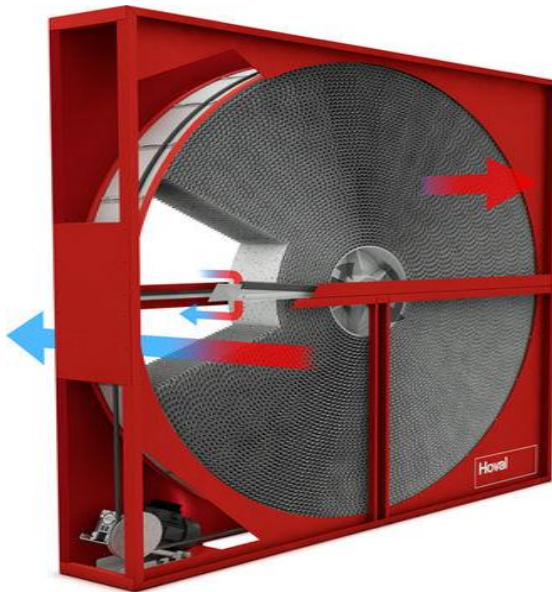


Kuva 7. Yksisuuntaisen putkilämmönsiirtimen rakenne.

2.4 Regeneraattori

Regeneroiva lämmönsiirrin eli regeneraattori on lämmönsiirrintyyppi, jossa kuuman väliaineen sisältämä lämpö varastoituu korkean lämmönsiirtokapasiteetin omaavaan kappaleeseen, minkä jälkeen kylmä väliaine korvaa kuuman väliaineen lämmönsiirtimessä ja imee itseensä kappaleeseen sitoutuneen lämpöenergian. Regeneraattoreissa virtaus on jaksottaista, ja ne voidaan jakaa kahteen päätyyppiin. Staattinen regeneraattori koostuu huokoisesta massasta, kuten metalliverkolla vuoratusta keraamisesta kappaleesta, jolla on suuri lämmönsiirtokapasiteetti. Kuvassa 8 on esitetty dynaaminen regeneraattori, joka sisältää pyörivän kiekon. Kiekon eri kohdat ovat jaksoittain kosketuksissa kuuman ja kylmän väliaineen kanssa niin, että kiekko varaa itseensä lämpöä

kuumasta väliaineesta, jonka se luovuttaa vuorostaan kylmälle väliaineelle. (1, s. 629–633; 5.)

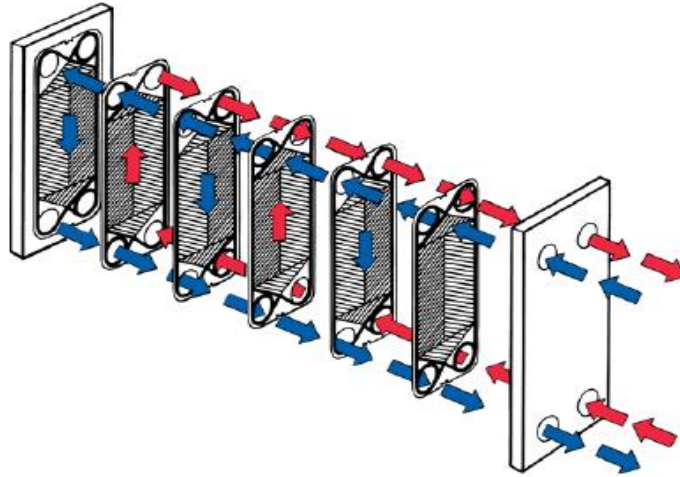


Kuva 8. Pyörivä regeneraattori (6).

3 Levylämmönsiirrin

3.1 Levylämmönsiirtimen toimintaperiaate

Levylämmönsiirrin koostuu levykastasta eli sarjasta ohuita toisiinsa kiinnitettäviä lämpölevyjä, joiden päissä on virtauskanavat kylmälle ja kuumalle väliaineelle. Kuvassa 9 on havainnollistettu, miten väliaineet kulkevat vastakkaisiin suuntiin levyjen eri puolilla ja kuinka joka toisen levyparin välissä virtaa kuuma väliaine ja joka toisen välissä kylmä väliaine. Lämpösiirtolevyjen tehtävänä on siirtää lämpöä väliaineesta toiseen levyjen välityksellä. Väliaineet virtaavat virtauskanavien kautta lämmönsiirtimen sisälle, ja koska lämpölevyt on kiinnitetty toisiinsa juottamalla, puolihitsaamalla tai tiivisteiden avulla, eivät kylmä ja kuuma väliaine pääse sekoittumaan keskenään. (1, s. 632; 8, s. 3; 4, s. 17.22–17.25.)



Kuva 9. Väliaineiden virtaus levylämmönsiirtimessä (7, s. 1).

Levylämmönsiirtimet sopivat hyvin sovelluksiin, joissa lämpöä siirretään nesteestä toiseen. Levypakka asennetaan raamiin ja puristetaan tiiviisti etulevyn sekä painelevyn väliin pulttien ja kiristystankojen avulla (liite 1). Levylämmönsiirtimet voidaan jakaa yhteiden sijoitustavan perusteella yksi-, kaksi- ja monivaiheisiin levylämmönsiirtimiin kuvan 10 osoittamalla tavalla. Yksivaiheisessa virtauksessa kaikki yhteydet on sijoitettu samaan päätylevyyn, kun taas kaksi- ja monivaiheisessa (3 tai enemmän) virtauksessa on kaksi yhdettä sijoitettu etulevyyn ja kaksi yhdettä sijoitettu takalevyyn. (1, s. 632; 8, s. 3; 4, s. 17.22–17.25.)

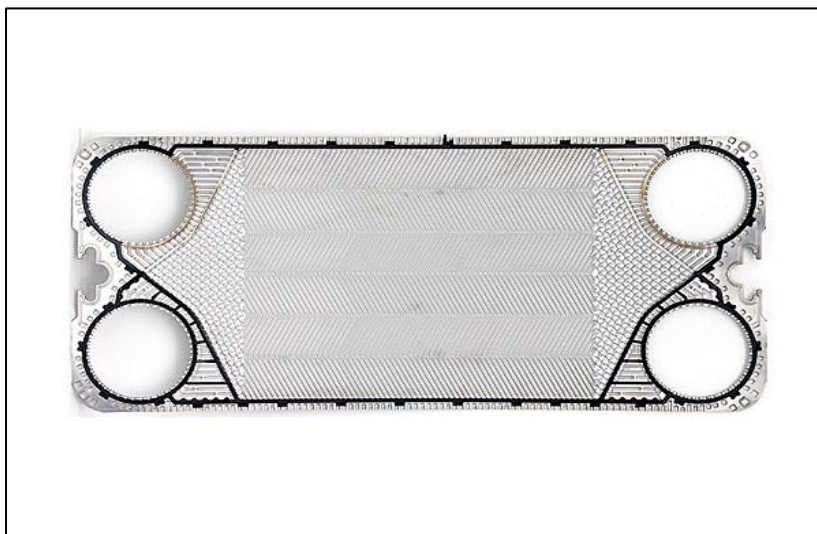


Kuva 10. Yhteiden sijoitustavat levylämmönsiirtimen päätylevyissä (8, s. 3).

Virtausperiaate levylämmönsiirtimissä perustuu yleensä vastavirtausperiaatteeseen, mikä takaa tehokkaan lämmönsiirtotehokkuuden. Lämmönsiirtoteho levylämmönsiirtimessä perustuu myös useisiin muihin osatekijöihin, kuten käytössä olevien levyjen määrään, niiden kokoon sekä levyjen materiaaliin. Levylämmönsiirtimien lämmönsiirtopinta-alaa ja sitä kautta sen lämmönsiirron määrää voidaan kasvattaa lisäämällä lämpölevyjen määrää. (1, s. 632.)

3.1.1 Tiivisteelliset levylämmönsiirtimet

Tiivisteillä varustettua levylämmönsiirrintä kutsutaan myös avattavaksi levylämmönsiirtimeksi, sillä sen sisältämät lämpölevyt voidaan erikseen irrottaa raamista ja puhdistaa liasta esim. painepesurin avulla. Lämpölevyjen säännöllisen puhdistuksen johdosta niiden lämmönsiirtotehokkuus pysyy mahdollisimman korkeana. Lämpölevyjen pinnassa on urat, joihin tiivisteet kiinnitetään kuvan 11 osoittamalla tavalla. Tiivisteiden materiaalina käytetään useimmiten nitrilikumia johtuen sen kyvystä kestää syövyttävien aineiden aiheuttamaa kulutusta ja sen laajasta lämpötilan käyttövälistä. Myös erilaiset fluorikumit ja EPDM-kumit ovat suosittuja tiivistevaihtoehtoja. Tiivisteelliset lämmönsiirtimet soveltuvat parhaiten käytettäväksi n. -35 °C - $+220\text{ °C}$ lämpötiloissa, sekä alle 25 barin paineessa. Juotettuihin levylämmönsiirtimiin verrattuna, tiivisteelliset lämmönsiirtimet kestävät heikommin korkeita lämpötiloja ja painemääriä. Toisaalta ne voidaan avata kätevämmiin huollon tarpeita varten ja samalla muokata niiden lämpötehoa lisäämällä tai poistamalla yksittäisiä levyjä levypakasta. (4, s. 17.22–17.25; 8, s. 3.)

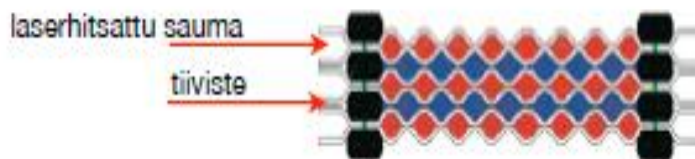


Kuva 11. Tiivisteellisen levylämmönsiirtimen lämpölevy tiivisteineen (9).

3.1.2 Hitsatut ja puolihitsatut levylämmönsiirtimet

Hitsatuissa levylämmönsiirtimissä ei ole lainkaan käytössä tiivisteitä lämpölevyissä. Lämpölevyjen reunat on tapana hitsata laserilla yhteen, minkä johdosta hitsatuilla levylämmönsiirtimillä on suuret lämpötila-alueet; -55 °C - $+335\text{ °C}$. Lisäksi tällaiset levylämmönsiirtimet kestävät käytössä koviakin 40 barin painemääriä. (4, s. 17.22–17.25; 10.)

Lämmönsiirtolevyt voidaan liittää toisiinsa myös niin sanotun puolihitsaus-menetelmän avulla (kuva 12). Siinä tiivisteelliset lämpölevyt laserhitsataan tiivisteurista kiinni toiseen lämpölevyyn. Tällä menetelmällä saadaan yhdistettyä tiivisteellisten ja hitsattujen menetelmien hyviä puolia, kuten vahvemman rakenteen aikaansaaminen vähemmällä tiivisteillä. Tämä menetelmä sopii parhaiten käytettäväksi n. -47 °C - $+150\text{ °C}$ lämpötiloissa ja noin 40 barin paineeseen asti. (8, s. 4; 10.)



Kuva 12. Puolihitsatun levylämmönsiirtimen lämpölevyjen läpileikkausmalli (8, s. 4).

3.1.3 Juotetut levylämmönsiirtimet

Kuvassa 13 on esitetty juotettuja levylämmönsiirtimiä, joiden yksittäiset lämpölevyt on kovajuotettu kuparilla toisiinsa kiinni niin sanotun tyhjiöjuoton avulla. Lämpölevyt on puristettu tiivisti etu- ja päätylevyn väliin ja juotosmateriaalina käytetty kupari pitää levyt kiinni toisissaan sekä toimii lisäksi hyvänä tiivisteenä. Juotettu levylämmönsiirrin kestää paremmin kovia paineita ja omaa suuremman lämpötilaskaalan, kuin tiivisteelliset lämmönsiirtimet. Juotetut levylämmönsiirtimet ovat myös rakenteeltaan kompakteja, sillä niissä käytetty materiaali on käytetty lähes kokonaan lämmönsiirtoon, minkä lisäksi ne ovat kevyitä ja nestetilavuudeltaan pieniä. Likaantumista pyritään estämään itsepuhdistavalla turbulenttivirtauksella, jossa turbulenttisen virtauksen aiheuttamat pyörteiset voimat estävät lian takertumista levyn pintaan. Kyseistä menetelmää käytetään, koska siirrintä ei ole mahdollista avata ja mekaanisesti puhdistaa, kuten tiivisteellisiä levylämmönsiirtimiä. (4, s. 17.22–17.25; 11, s. 4–5.)



Kuva 13. Alfa Lavalin valmistamia juotettuja levylämmönsiirtimiä (11, s. 4).

3.2 Levylämmönsiirtimien tyypillisiä käyttökohteita

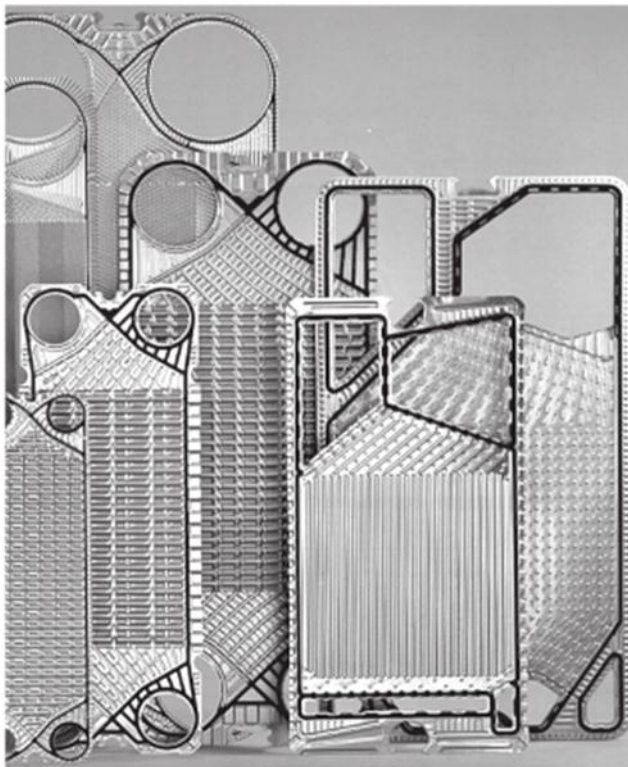
Levylämmönsiirtimiä käytetään laajalti eri sovelluksissa. Tiivisteellisiä levylämmönsiirtimiä käytetään etenkin eri LVI-ratkaisuissa ja teollisuuden aloilla, kuten puunjalostus-, paperi- ja elintarviketeollisuudessa, johtuen muun muassa niiden avuttavuudesta ja helposta puhdistettavuudesta. Puolihitsaus-menetelmä soveltuu parhaiten tiettyjen happojen jäähdytysprosesseihin ja sellaisiin sovelluksiin, joissa käytetään niin sanottuja aggressiivisia väliaineita, kuten ammoniakkia (NH₃). Tämän johdosta puolihitsaus-menetelmä soveltuu erinomaisesti kemianteollisuuden eri prosessien lämmönsiirtoon. (8, s. 6; 10.)

Hitsatut levylämmönsiirtimet ovat erityisen käytännöllisiä mm. happamien ja alkalisten jätevesien käsittelyssä, lipeän käsittelyssä, ja myös hajukaasujen jäähdytyksessä. Hitsatut levylämmönsiirtimet kestävät parhaiten kovia paineita ja korkeita lämpötiloja. Kovajuotettuja levylämmönsiirtimiä käytetään paljon lämmitys- ja jäähdytysratkaisuissa, kuten patterien ja lattioiden lämmityksessä sekä kaukojäähdytyksessä. Ne sopivat myös käytettäväksi korkeissa lämpötiloissa ja paineissa, mutta eivät kestä yhtä kovia olosuhteita kuin hitsatut levylämmönsiirtimet. Pieniä juotettuja levylämmönsiirtimiä puolestaan käytetään yleisesti erityyppisissä lämminvesivaraajissa. (12; 13, s. 3.)

3.3 Levylämmönsiirtimessä käytettävät levyprofiilit

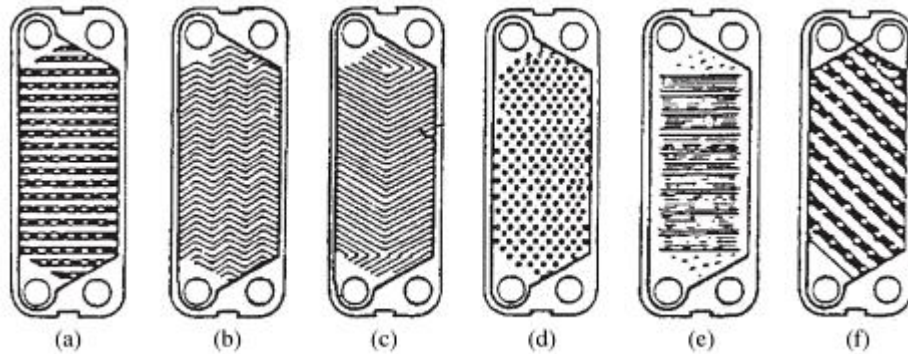
3.3.1 Levyprofiilien kuviointi

Levylämmönsiirtimissä käytettävien lämpölevyjen termodynaamiset ja virtaustekniset ominaisuudet riippuvat niiden virtauspintojen kuvioinneista. Lämpölevy valmistetaan yleensä kohokuvioimalla, meistoamalla tai prässäämällä sen pintaan poimutettuja sekä aaltomaisia kuvioita. Lämpölevyjen reunoille tehdään samoilla menetelmillä myös urat tiivisteitä varten, joiden tehtävänä on tiivistää levy pari toisinaan vasten, estää kuuman ja kylmän väliaineen sekoittuminen keskenään ja jakaa väliaineen virtaaminen vaaditulla tavalla levyn pinnalla. Levyjen kuviointi on monipuolista ja myös virtauskanavien geometriat vaihtelevat runsaasti, kuten kuva 14 osoittaa. Levypintojen runsas geometrinen vaihtelevuus on seurausta tuotekehityskilpailusta eri valmistajien välillä, joskin niiden suorituskykyyn perustuvat edut on jokseenkin epäselviä. Poimutukset ja aaltomaiset muodot lämpölevyjen pinnoilla lisäävät niiden lämmönsiirtopinta-alaa ja siten myös lämmönsiirron määrää. (14, s. 11–13.)



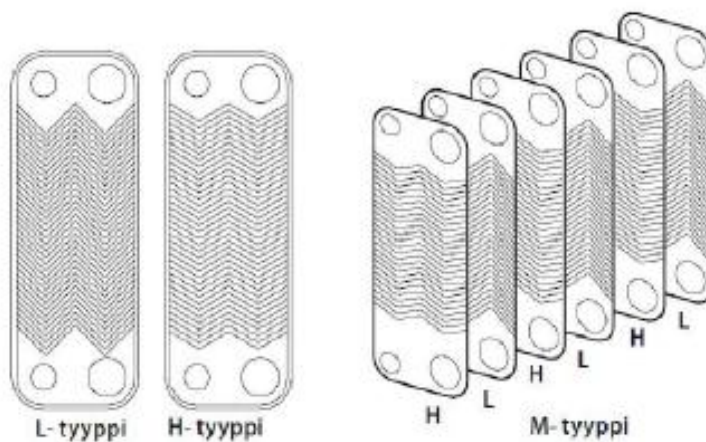
Kuva 14. Lämpölevyjä vaihtelevilla pinnan kuvioinneilla ja virtauskanavien muodoilla (14, s. 5).

Sadan viime vuoden aikana on kehitelty lämpölevyihin yli 60 erilaista pintakuviointia. Näihin pintakuviointeihin kuuluvat muun muassa kuvasta 15 löytyvät a) pyykkilautakuvio, b) kalanruotokuvio, c) V-kuvin, d) kohouma- ja painannelevykuviot, e) pyykkilauta varustettuna sekundaarisilla aallotuskuvioilla ja f) viisto pyykkilautakuvio. (14, s. 13–15.)



Kuva 15. Lämpölevyjen erilaisia pintakuviointityylejä (14, s.15).

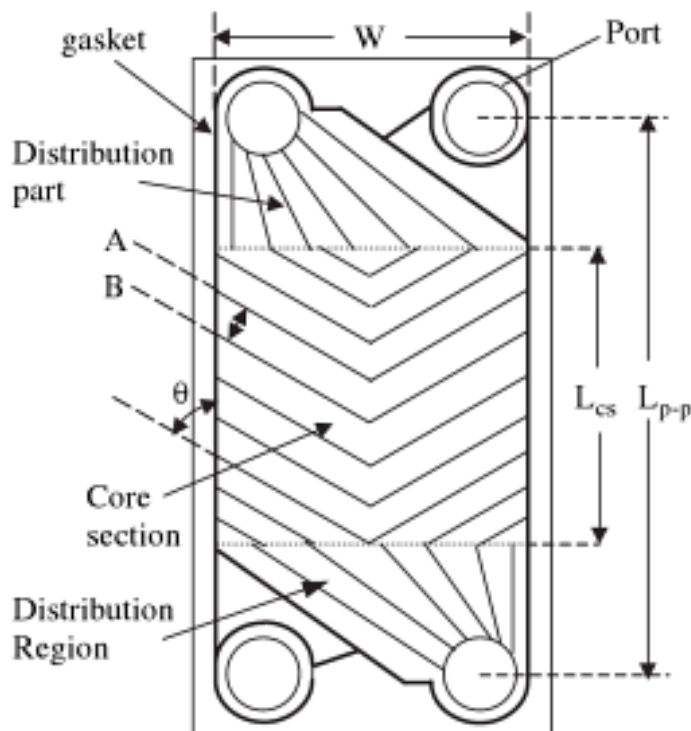
Levylämmönsiirtimien lämpölevyt voidaan jakaa myös kuvan 16 mukaisesti L-, H- ja M-tyyppisiin lämpöpintoihin. H-tyyppisille lämpöpinnolle on ominaista korkeat lämpötilan muutokset levypinnan yli ja suuri painehäviö. L-tyyppiset lämpöpinnat puolestaan omaavat kohtuullisen lämpötilan muutoksen levypinnan yli ja vähemmän painehäviön kuin H-tyyppiset lämpöpinnat. Levypakassa on mahdollista käyttää sekä L- että H-tyyppisiä lämpöpintoja yhdessä, jolloin näiden kahden yhdistelmää kutsutaan M-tyypiksi. M-tyypin lämpötilanmuutokset levypinnan yli ja painehäviö sijoittuvat suuruudeltaan L- ja H-tyyppien välimaastoon. (4, s. 17.22–17.25; 15, s. 2.)



Kuva 16. L-, H- ja M-tyypin lämpölevyt (4, s.18).

3.3.2 V-profiilisten lämpölevyjen geometrinen tarkastelu

V-profiilin omaavat lämpölevyt ovat kaikista kuviointityyleistä yleisimmin käytettyjä. Niissä virtauskanavat parantavat lämmönsiirtokerrointa kasvattamalla lämpölevyn kokonaispinta-alaa, sekoittamalla väliaineen virtauskerroksia ja edistämällä pyörrevirtausten syntyä. Pyörrevirtausten johdosta levyjen likaantuminen vähenee, sillä se lisää väliaineen sekoittumista urissa ja näin likapartikkelit eivät pääse kiinnittymään kuviointiuriin yhtä helposti kuin muissa pintakuviointeissa. V-profiilin kulmaa on myös mahdollista muuttaa vaatimusten mukaisesti. Korkeampi v-profiili valitaan, kun halutaan painehäviö pienemmäksi, ja matalampi v-profiili puolestaan parantaa lämmönsiirtotehoa, mutta kasvattaa painehäviötä. V-profiilin geometriaa on tarkasteltu tarkemmin kuvassa 17, josta nähdään kuinka lämpölevyn pinta on jaettu ylä- ja alavirtausalueisiin sekä keskellä olevaan päälämmönsiirto-osaan L_{cs} . Ylä- ja alavirtausalueiden tehtävänä on jakaa sisään tuleva väliaine tasaisesti päälämmönsiirto-osaan, josta väliaine puolestaan kerätään ja kanavoidaan ulostulokanavaan. Ylä- ja alavirtausalueet on suunniteltu niin, että väliaineen virtaus päälämmönsiirto-osassa olisi mahdollisimman tehokasta eikä heikentäisi näin lämpölevyn lämmönsiirtotehoa. (14, s. 15–16.)



Kuva 17. V-profiilin omaavan lämpölevyn geometria (14, s.16).

3.3.3 Lämpölevyissä käytettävä materiaali

Lämpölevyt valmistetaan useimmiten ruostumattomasta teräksestä johtuen sen kyvystä kestää korkeita lämpötiloja ja sen lujasta rakenteesta sekä hyvästä korroosionkestävyydestä (16). Lämmönsiirtimiä valmistavan Alfa Lavalin useimmiten lämpölevyissä käyttämä ruostumaton teräs on mallia AISI 316 (taulukko 1), joka soveltuu erinomaisesti käyttöön, kun väliaineena levylämmönsiirtimessä toimii vesi. Mikäli veden sisältämä kloridin määrä on vähäistä (n.10 ppm - 25 ppm), voidaan lämpölevyn materiaalina käyttää myös edullisempaa ruostumatonta terästä AISI 304. Suola- ja kloridipitoisemman veden kanssa tulisi käyttää vain titaniumista valmistettuja lämpölevyjä. (17, s. 7.)

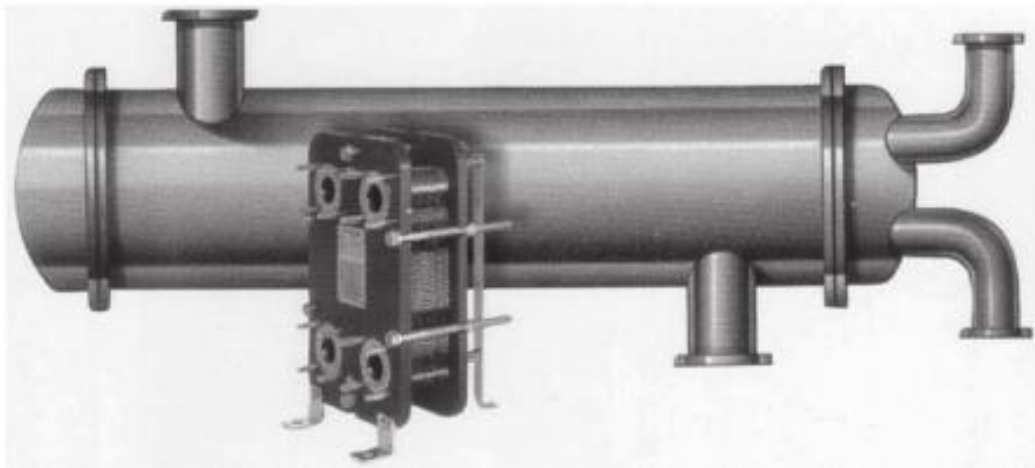
Taulukko 1. Alfa Lavalin käyttämät ruostumattomat teräkset eri kloridipitoisuuden omaaville vesille (17, s. 9).

Levyn materiaali	Maksimi lämpötila °C			
	60°C	80°C	100°C	120°C
Kloridipitoisuus (ppm)				
10 ppm	304	304	304	316
25 ppm	304	304	316	316
50 ppm	316	316	316	Ti
80 ppm	316	316	316	Ti
150 ppm	316	Ti	Ti	Ti
300 ppm	Ti	Ti	Ti	Ti
Tiivistemateriaali	Nitriili			
	EPDM			

3.4 Levylämmönsiirtimen edut ja rajoitukset

Levylämmönsiirtimet tarjoavat lukuisia etuja muihin lämmönsiirintyyppeihin verrattuna, johtuen niiden rakenteellisista ominaisuuksista. Lämpölevyjen aaltomaiset pinnanmuodot ensinnäkin tehostavat lämmön siirtymistä prosessissa lukuisilla eri tavoilla, kuten edistämällä pyörteisyyden eli turbulentsisuuden syntyä väliaineessa, sen virratessa yli lämpölevyn uurteisen pinnan. Aaltomainen pinnanmuoto lisää myös oleellisesti käytössä olevaa lämmönsiirtopinta-alaa, jonka johdosta lämmönsiirtomäärä voidaan kasvat-

taa. Toiseksi levylämmönsiirtimet ovat pienempikokoisia kuin monet muut lämmönsiirtimet, johtuen niiden korkeasta lämmönsiirtokertoimesta, jonka seurauksena saadaan siirrettyä suurempi määrä lämpöä pienemmällä pinta-alalla. Mikäli levylämmönsiirtimellä ja putkilämmönsiirtimellä on sama vaikuttava lämmönsiirtopinta-ala, niin levylämmönsiirtimen paino ja tilavuus ovat silti vain n. 20–30% siitä, mitä ne ovat putkilämmönsiirtimellä. Kuvassa 18 on havainnollistettu kokoeron suuruusluokka saman lämmönsiirtotehon omaavalle levy- ja putkilämmönsiirtimelle. Kokoerosta johtuen levylämmönsiirtimet ovatkin yleinen ratkaisu sellaisissa käyttökohteissa, joissa tilaa ei ole paljon käytettävissä, kuten merellä sijaitsevissa öljyn- ja kaasunporauslautoissa. (14, s. 6–9.)



Kuva 18. Havainnollistava kuva levy- ja putkilämmönsiirtimen kokoerosta (14, s. 8).

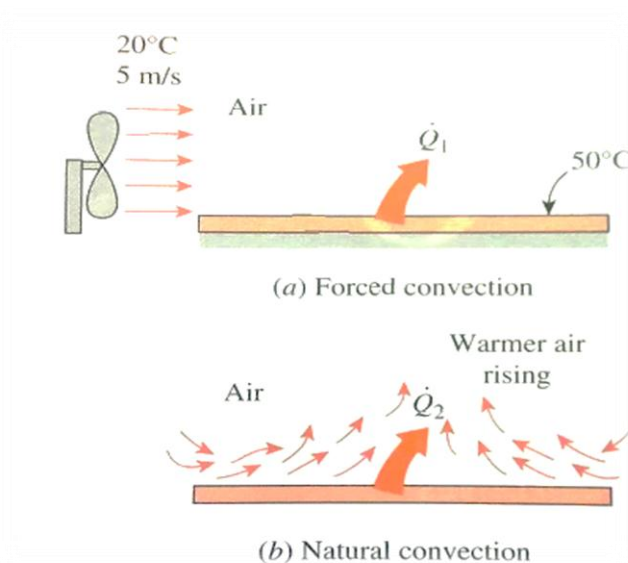
Kolmanneksi levylämmönsiirtimet sopivat hyvin käytettäväksi, kun halutaan ottaa lämpöä talteen heikompilaatuisista lämpölähteistä. Tämä perustuu levylämmönsiirtimen korkeaan lämmönsiirtokertoimeen ja vastavirtaperiaatteen hyödyntämiseen, minkä seurauksena levylämmönsiirtimiä voidaan käyttää virtaustilanteissa, vaikka levyn eri puolilla virtaavan väliaineen välinen lämpötilaero olisi vain noin yksi celsiusaste. Neljänneksi levylämmönsiirtimen levyparin välissä virtaavaa väliainetta on helppo hallita ja sen olosuhteita muuttaa, johtuen levyjen väliin jäävän väliaineen pienestä tilavuudesta. Myös lämpöhäviöt ovat merkityksettä levylämmönsiirtimessä, sillä vain levypakassa olevien levyjen reunat altistuvat ympäröivälle ilmalle ja näin ollen mitään erillistä eristystä ei ole levylämmönsiirtimiin tarpeellista asentaa. Lopuksi levylämmönsiirtimen levypakassa olevien levyjen geometriaa vaihtelemalla ja niitä keskenään sekoittamalla, voidaan levylämmönsiirtimen toimintaa ja suoritustehoa optimoida parhaiten kulloiseenkin tilanteeseen sopiviksi. (14, s. 6–9.)

Merkittävimpiä haittapuolia levylämmönsiirtimien kohdalla on se, että ne soveltuvat huonosti käytettäviksi tilanteissa, joissa virtaavan väliaineen paine ja lämpötilat ovat korkeita. Tämä on puolestaan seurausta tiivisteiden rajallisesta kyvystä kestää korkeita paineita ja lämpötiloja sekä erittäin syövyttäviä nesteitä. Edellä mainitut rajoitteet koskevat tiivisteillä varustettuja ja puolihitsattuja levylämmönsiirtimiä. Täysin hitsatut levylämmönsiirtimet puolestaan kestävät haastavampia olosuhteita, johtuen muun muassa hitsausaumojen paremmasta korroosion kestävydestä. (14, s. 6–9.)

4 Levylämmönsiirtimen teoreettinen tarkastelu

4.1 Lämmön siirtyminen konvektion avulla

Levylämmönsiirtimessä lämpöenergian siirtyminen tapahtuu lähes kokonaan konvektion avulla. Konvektiossa lämpö siirtyy nesteestä tai kaasusta toiseen lämmön aiheuttaman virtauksen johdosta. Konvektio voidaan jakaa erikseen kuvan 19 mukaisesti pakkokonvektioon tai vapaaseen konvektioon, riippuen siitä miten väliaineen liike on pantu alulle. Pakkokonvektiossa väliaine pakotetaan virtaamaan pinnan ylitse tai putkessa ulkoisin keinoin, kuten pumpun tai tuulettimen avulla. Vapaassa konvektiossa sen sijaan lämpö siirtyy spontaanisti aina korkeammasta lämpötilasta matalampaa kohti. (1, s. 373–374.)



Kuva 19. Pakkokonvektio (a-kohta) ja vapaa konvektio (b-kohta) levypinnan yli (1, s. 374).

Konvektion kautta tapahtuva lämmönsiirto levylämmönsiirtimessä riippuu merkittävästi siinä käytettävän väliaineen eri ominaisuuksista, kuten dynaamisesta viskositeetista μ , lämmönjohtavuudesta k , tiheydestä ρ , ominaislämpökapasiteetista c ja väliaineen nopeudesta V . Myös käytettävän lämpölevyn geometria ja pinnan karheus vaikuttavat lämmönsiirron määrään konvektiossa, kuten myös se onko virtaus luonteeltaan laminaarista vai turbulenttista. On vaikea sanoa, mitkä edellä mainituista suureista ja ominaisuuksista vaikuttavat merkittävimmin konvektion kautta syntyvään lämmönsiirtoon, sillä niiden suhteet toisiinsa ovat hyvin monimutkaisia eikä näin ollen mitään yleispätevää analyysiä ole mahdollista tehdä. (1, s. 374.)

Konvektion kautta tapahtuvan lämmönsiirron on havaittu olevan suhteessa lämpötilaeroon ja tätä voidaan kätevästi havainnollistaa Newtonin jäähtymislain (kaava 1) avulla seuraavasti (1, s. 374–375):

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

missä

- h on lämmönsiirtokerroin
- A_s on lämmönsiirtopinta-ala
- T_s on pinnan lämpötila
- T_∞ on väliaineen lämpötila riittävän kaukana pinnasta

Lämmönsiirtokerroimen mittayksiköistä (W/m^2K) päätellen, se voidaan määritellä lämmönsiirron määräksi kiinteän pinnan ja väliaineen välillä, pinta-ala- ja lämpötilaeroyksikköä kohti (1, s. 375). Taulukossa 2 on esitetty muutamia esimerkkejä konvektiivisen lämmönsiirron suuruusluokista (18).

Taulukko 2. Lämmön- eli konvektiokerroimen arvoja eri tapauksissa (18).

Tapahtuma	Konvektiokerroin h
Vapaa konvektio (ilma, kaasut)	$h = 0.5 \dots 1000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
Pakotettu konvektio, ilma	$h = 10 \dots 1000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
Pakotettu konvektio, neste	$h = 50 \dots 10000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
Kiehumiskonvektio, vesi	$h = 3000 \dots 100\,000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
Lauhtuminen, höyry	$h = 5000 \dots 100\,000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

4.2 Nusseltin luku

Konvektiota tutkittaessa on yleinen menetelmä muuttaa sitä kuvaavat yhtälöt dimensiottomiksi yhdistämällä muuttujia siten, että niiden seurauksena syntyy dimensiottomia lukuja ja näin saadaan pienennettyä ratkaistavien muuttujien kokonaismäärää. On myös yleinen käytäntö esittää lämmönsiirtokerroin h Nusseltin luvun avulla kaavan 2 mukaisesti. (1, s. 376.)

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (2)$$

missä

- k on väliaineen lämmönjohtavuus
- L_c on karakteristinen pituus
- h on lämmönsiirtokerroin

Nusseltin luvun merkittävyys selkeytyy, kun tarkastellaan nestekerrosta, jonka paksuus on L ja jonka lämpötilaero on $\Delta T = T_2 - T_1$. Lämmönsiirron nestekerroksessa aiheuttaa konvektio, jos neste liikkuu, ja johtuminen, jos neste pysyy paikallaan. Lämpövuolle saadaan näin ollen seuraavat yhtälöt: (1, s. 376.)

$$\dot{q}_{conv} = h\Delta T \quad (3)$$

ja

$$\dot{q}_{cond} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (4)$$

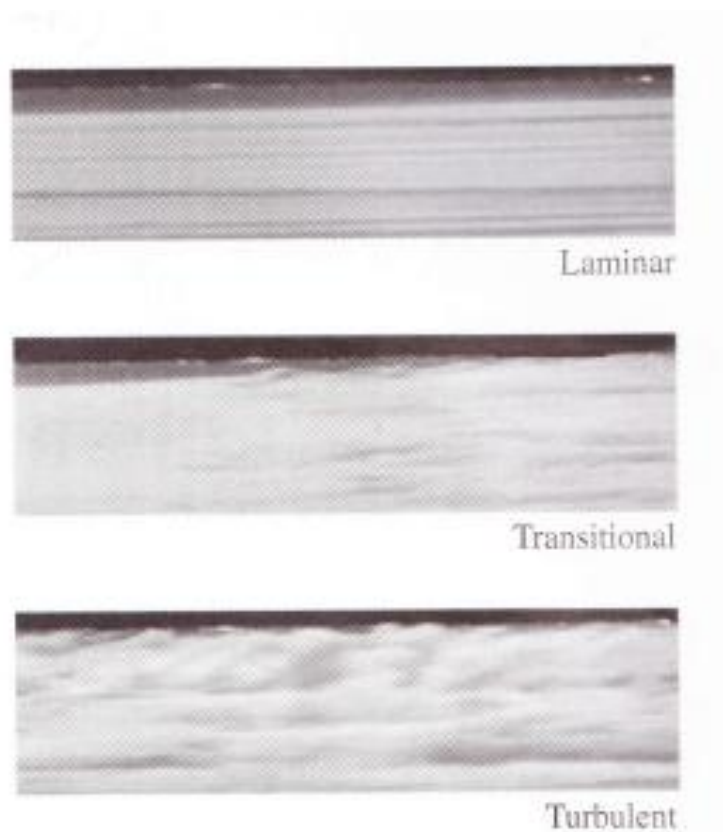
Kaavojen 3 ja 4 suhdeluvusta seuraa:

$$\frac{\dot{q}_{conv}}{\dot{q}_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k\frac{\Delta T}{L}} = \frac{hL}{k} = Nu \quad (5)$$

Näin ollen Nusseltin luku kuvaa konvektio- ja johtumislämmönsiirron suhdetta tarkastelun kohteena olevassa nestekerroksessa. Mitä suurempi Nusseltin luku on, sitä tehokkaammin lämpöä siirtyy nestekerroksessa puhtaasti konvektion kautta. (1, s. 376.)

4.3 Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus

Kuvassa 20 on esitetty, miten virtaustilanteet voivat olla luonteeltaan joko tasaisia ja rauhallisia tai vastaavasti hyvinkin kaoottisia sekä jotain näiden kahden väliltä. Ensimmäiseksi mainitussa tilanteessa virtaavan väliaineen, kuten nesteen, hiukkaset etenevät tasaisissa rinnakkaisissa kerroksissa ja tällaista virtaustilannetta kutsutaan laminaarisiksi. Korkean viskositeetin omaavien nesteiden, kuten öljyn, virtaus on laminaarista alhaisilla virtausnopeuksilla. Mikäli virtaavat kerrokset sekoittuvat keskenään ja ovat epäjärjestyksenomaisessa tilanteessa, kutsutaan virtausta turbulenttiseksi. Turbulenttinen virtaustilanne on hyvin yleinen, kun virtausnopeudet nesteellä tai kaasulla ovat korkeat. Alhaisen viskositeetin omaavien väliaineiden, kuten ilman, virtaus on turbulenttista suurilla virtausnopeuksilla. (1, s. 379.) Suurin osa virtaustilanteista on luonteeltaan turbulenttisia. Kuvan 20 keskimäinen tilanne esittää siirtymävaihetta, joka syntyy, kun laminaarinen virtaus on muuttumassa turbulenttiseksi. Siirtymävaihe osoittaa, että virtauksen muuttuminen laminaarisesta turbulenttiseksi ei tapahdu välittömästi, vaan asteittain. (1, s. 384.)

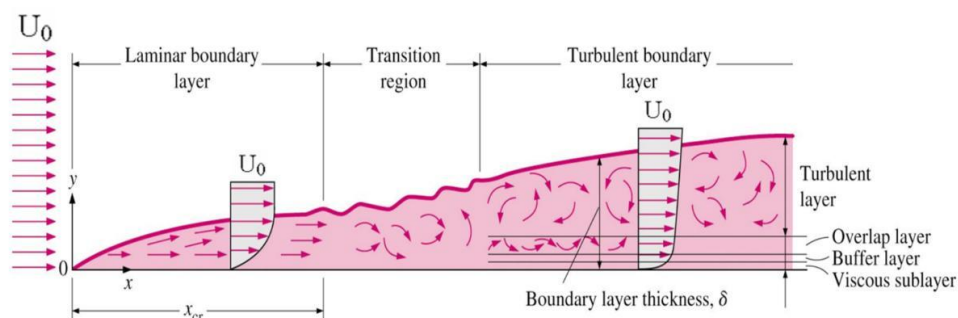


Kuva 20. Laminaarisen, turbulenttisen ja siirtymävaiheen virtaus (1, s. 379).

Kuvassa 21 on esitetty, kuinka yhdensuuntaisen virtauksen rajakerros kehittyy matkalla litteän levypinnan yli. Tämän rajakerroksen kehittymistä voidaan soveltaa myös levy-lämmönsiirtimen yksittäisen lämpölevyn ylitse virtavan nesteen rajakerroksen tarkasteluun. X-koordinaatti kuvaa etäisyyttä levyn etureunasta, jota pitkin väliaine kuten neste virtaa, ja y-koordinaatti puolestaan kuvaa rajakerroksen paksuuden (δ) etäisyyttä litteästä pinnasta. Alussa neste lähestyy levyn etureunaa x-suunnassa vakionopeudella U_0 . Levyn etureunan ylityksen jälkeen virtaus etenee litteänä ja virtaviivaisena laminaarisen rajakerroksen yli, kunnes se saapuu muutoskerroksen alkuun kohdassa x_{cr} . Muutoskerroksen alussa laminaarinen virtaus alkaa muuttua hiljalleen kaoottisemmaksi, kunnes se saavuttaa turbulenttisen rajakerroksen alkukohtaan, minkä jälkeen virtaus on pelkästään turbulenttista. (1, s. 381; 1, s. 385.)

Turbulenttinen rajakerros voidaan jakaa y-suunnassa neljään eri alueeseen sen mukaan, kuinka kaukana alueet sijaitsevat litteästä pinnasta. Pintaa lähimpänä oleva ohut kerros on niin sanottu laminaarinen rajakerros (*viscous sublayer*), jossa viskositeetin vaikutukset ovat suurimmat. Tässä rajakerroksessa nesteen virtaus muuttuu laminaariseksi. Laminaarisen rajakerroksen yläpuolella sijaitsee ns. puskurikerros (*buffer layer*),

jossa turbulenttiset vaikutukset ovat jo paremmin esillä, mutta jossa viskositeetin vaikutukset ovat edelleen hallitsevia. Puskurikerroksen yläpuolella sijaitsee ns. transitoalue (*overlap layer*), jossa turbulenttiset vaikutukset ovat jo selvästi nähtävillä, mutta eivät edelleenkaan hallitsevat. Ylin kerros on turbulenttinen kerros, missä turbulenttiset ominaisuudet ylittävät viskositeettiset ominaisuudet selvästi. (1, s. 385.)



Kuva 21. Rajakerroksen kehittyminen virtauksessa ja eri virtausalueet (1, s. 381).

4.4 Reynoldsin luku

Muutos laminaarisesta turbulenttiseen virtaukseen riippuu useista eri tekijöistä, kuten pinnan geometriasta ja karheudesta, virtausnopeudesta, pinnan lämpötilasta ja väliaineen ominaisuuksista. Virtausalue riippuu pääasiassa väliaineen hitausvoiman ja viskositeetin synnyttämien voimien suhteesta. Tätä suhdetta kutsutaan Reynoldsin luvuksi (Re) ja se on dimensioton suure, joka ilmaistaan kaavan 6 mukaisesti. (1, s. 385–386.)

$$Re = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VL_c}{\mu} \quad (6)$$

missä

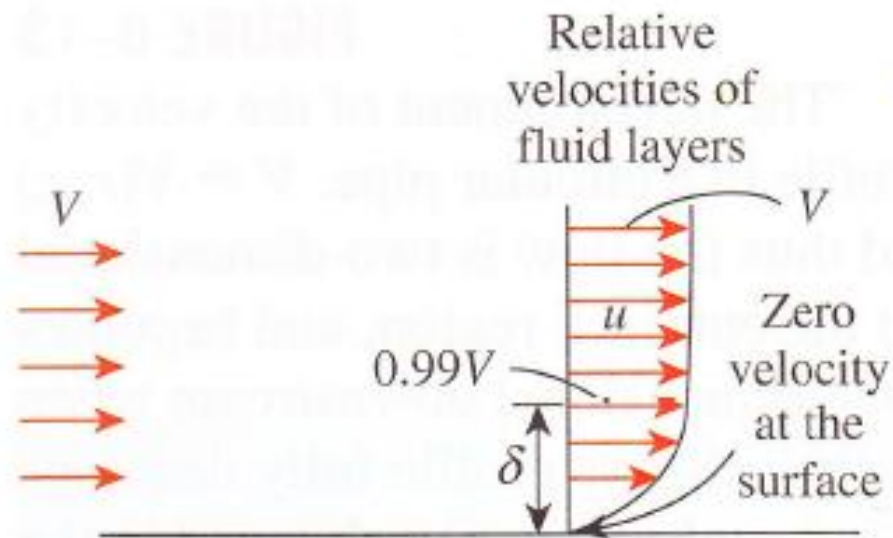
- V on virtauksen nopeus
- L_c on geometrian karakteristinen pituus
- ν on väliaineen kinemaattinen viskositeetti

Kinemaattinen viskositeetti saadaan, kun dynaaminen viskositeetti μ jaetaan tiheydellä ρ . Levylämmönsiirtimen lämpölevyn kaltaiselle litteälle levylle karakteristinen pituus on etäisyys virtaussuunnassa x kappaleen etureunasta. (1, s. 385–386.)

Hitausvoimat ovat suuria suhteessa viskositeetin synnyttämiin voimiin suurilla Reynoldsin luvuilla, täten viskositeetin synnyttämät voimat eivät kykene estämään väliaineen satunnaista ja nopeaa vaihtelua. Pienillä tai kohtalaisilla Reynoldsin luvuilla viskositeetin synnyttämät voimat ovat tarpeeksi suuria tukahduttaakseen edellä mainitut väliaineen epäjärjestykset ja pitääkseen sen niin sanotusti ”linjassa”. Suurilla Reynoldsin luvuilla väliaine virtaa toisin sanoen turbulentlyisesti ja jälkimmäisessä tapauksessa laminaarisesti. Reynoldsin lukua, missä virtaus muuttuu turbulentyiseksi, kutsutaan kriittiseksi Reynoldsin luvuksi. Sen arvo riippuu siitä, mikä on kappaleen geometria ja mitkä ovat virtausolosuhteet. Esimerkiksi litteän pinnan yli kulkeva virtaus muuttuu laminaarisesta turbulentyiseksi, kun Reynoldsin luku on n. $5 \cdot 10^5$. (1, s. 385–286.)

4.5 Nopeusprofiilin lähempi tarkastelu

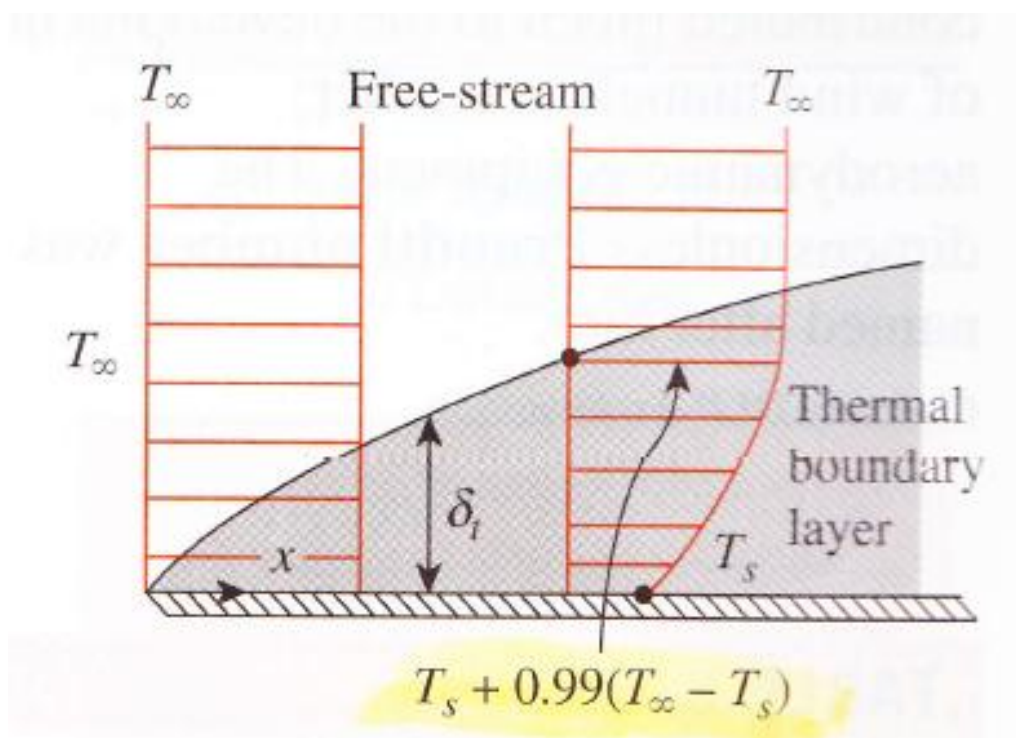
Väliaine, joka ylittää litteän levyn, voidaan jakaa kuvan 22 mukaisesti lukuisiin päällekkäisiin rajakerrokseen nopeuden perusteella. Lähinnä levyn pintaa olevan rajakerroksen partikkelien nopeus on nolla, johtuen niin sanotusta no-slip -ilmiöstä. No-slip -ilmiössä liikkumaton kerros hidastaa viereisen rajakerroksen partikkeleiden nopeutta aiheuttamalla kitkaa niiden välille, ja tästä seuraa, että väliaineen nopeus on kauempana levyn pinnasta suurempi kuin lähellä sen pintaa. Levyn pinta siis vaikuttaa aina termin δ , y -suunnassa olevaan ylärajaan asti, minkä jälkeen nopeusprofiili pysyy käytännössä muuttumattomana. Väliaineen nopeus μ vaihtelee x -suunnassa nolasta (kun $y=0$) aina suuruuteen V (kun $y= \delta$) asti. Virtausaluetta, joka sijaitsee termin δ välissä, kutsutaan nopeusrajaerrokseksi, ja sen yläpuolella nopeus on vakio. (1, s. 381–382.)



Kuva 22. Nopeusrajakerroksen kehittyminen litteään kappaleen pinnalla (1, s. 382).

4.6 Terminen rajakerros

Terminen rajakerros kehittyy kuvan 23 osoittamalla tavalla, kun tietyssä lämpötilassa oleva neste virtaa eri lämpötilassa olevan pinnan ylitse. Vakiolämpötilassa T_∞ oleva neste virtaa isotermisen litteään levyn ylitse, jonka pinnan lämpötila on T_s . Levyn pintaa lähinnä olevan nestekerroksen partikkelit saavuttavat termisen tasapainotilan levyn pinnan lämpötilan T_s kanssa. Nämä partikkelit välittävät sisältämänsä energian päällä olevan nestekerroksen partikkeleille ja näin edelleen aina kohti ylintä nesterajapintaa. Tämän seurauksena virtaukselle kehittyy lämpöprofiili, joka vaihtelee pinnan lämpötilasta T_s aina riittävän kaukana levyn pinnasta olevaan vakiolämpötilaan T_∞ asti. Termiseksi rajakerrokseksi kutsutaan sitä pinnan yläpuolella olevaa virtauskerrosta, jossa lämmönsiirtoa tapahtuu pinnan normaalin suuntaisesti. Termisen rajakerroksen paksuus δ_t voidaan levyn pintaa pitkin paikasta riippumatta määrittää etäisyytenä pinnasta, jossa lämpötilaero $T - T_s$ on yhtä suuri kuin $0.99 (T_\infty - T_s)$. (1, s. 383–384.)



Kuva 23. Suoran pinnan yllä sijaitseva termien rajakerros (1, s. 383).

Termisen rajakerroksen paksuus kasvaa virtaussuunnassa, koska lämmönsiirron vaikutukset tapahtuvat kauempana pinnasta. Konvektion kautta tapahtuva lämmönsiirto missä tahansa pinnan pisteessä riippuu siinä kohtaa olevasta lämpötilaerosta. Siten termisessä rajakerroksessa sijaitsevan lämpöprofiilin muoto määrittää pinnan ja sen yläpuolella virtaavan nesteen välisen, konvektion kautta tapahtuvan lämmönsiirron määrän. Nesteen virratessa kuumennettavan tai jäähdytettävän pinnan yli sekä termien, että nopeusrajakerros kehittyvät samanaikaisesti. Kehittyvien rajakerrosten suhde vaikuttaa voimakkaasti konvektion kautta tapahtuvaan lämmönsiirtoon. Tämä on seurausta nesteen nopeuden vaikutuksesta suoraan lämpötilaprofiiliin. (1, s. 383–384.)

4.7 Prandtlin luku

Nopeusrajakerroksen ja termisen rajakerroksen suhteellista paksuutta voidaan parhaiten kuvailla dimensiottoman Prandtlin luvun avulla, joka on määritetty kaavassa 7.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (7)$$

missä

- μ on dynaaminen viskositeetti
- c_p on väliaineen ominaislämpötila vakiopaineessa
- k on väliaineen lämmönjohtavuus

Prandtlin luku vaihtelee nestemäisten metallien alle 0.01:stä aina yli 100 000:een ras-kaille öljyille (taulukko 3). Kaasujen Prandtlin luku sijoittuu noin välille 0,7 - 1,0, mikä ilmaisee, että kaasun rajakerrokset muistuttavat toisiaan. Lämpö sekoittuu nestemäisissä metalleissa ($Pr < 1$) suhteessa liikemäärään hyvin nopeasti ja öljyissä ($Pr > 1$) hyvin hitaasti. (1, s. 384.)

Taulukko 3. Prandtlin luvun arvoja eri nesteille ja kaasuille (1, s. 384).

Väliaine (neste tai kaasu)	Pr
Nestemäiset metallit	0.004 - 0.03
Kaasut	0.7 - 1.0
Vesi	1.7 - 13.7
Kevyet orgaaniset nesteet	5 - 50
Öljyt	50 - 100 000
Glyseriini	2 000 - 100 000

4.8 Virtaus litteän levypinnan yli

Tarkastellaan lämmönsiirtotehoa litteän levyn ja virtaavan väliaineen välillä sekä tarkastellaan tarkemmin korrelaatioyhtälöillä laskemista. Keskimääräinen Nusseltin luku

saadaan Reynoldsin ja Prandtin lukujen kautta kaavan 8 osoittamalla tavalla (1, s. 420).

$$Nu = C Re_L^m Pr^n \quad (8)$$

- m ja n ovat vakioeksponenttilukuja
- C on vakioluku, joka riippuu geometriasta ja virtauksesta
- L on karakteristinen mitta ja levyn tapauksessa voidaan käyttää levyn pituutta virtaussuunnassa.

Väliaineen lämpötila termisessä rajakerroksessa vaihtelee pinnan lämpötilan T_s ja rajakerroksen ulkoreunan T_∞ välillä. Myös väliaineen eri ominaisuudet, kuten dynaaminen viskositeetti μ , vaihtelevat lämpötilan ja paikan mukaan rajakerroksessa. Väliaineen aineominaisuuksien lämpötilariippuvuus otetaan laskuissa huomioon ja määritellään ns. filmin lämpötilassa T_f kaavan 9 mukaisesti, missä filmin lämpötila on levyn pinnan ja vapaan virtauksen lämpötilojen aritmeettinen keskiarvo. (1, s. 420–421.)

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (9)$$

- T_s on pinnan lämpötila
- T_∞ on vapaan virtauksen lämpötila

4.9 Lämpölevyparin teoreettinen tarkastelu

Reynoldsin luvun määrittäminen virtaukselle levylämmönsiirtimen lämpölevyjen välissä eroaa hieman kaavassa 6 esitetystä yleisestä Reynoldsin luvun kaavasta. Kun tarkastellaan virtauksen käyttäytymistä levylämmönsiirtimen lämpölevyparin välissä, tarkemman tuloksen Reynoldsin luvulle antaa kaava 10.

$$Re = \frac{\rho V d_h}{\mu} \quad (10)$$

- d_h on hydraulinen halkaisija lämpölevylle

Hydraulisen halkaisijan määrittämiseksi on tiedettävä tutkittavan lämpölevyn sinimuotoisen aaltokuvioinnin amplitudi sekä aaltomaisen levynpinnan suhde levyn tasoprojek-

tioon eli niin sanottu pinnan kohennuskerroin. Hydraulinen halkaisija ratkaistaan kaavan 11 mukaisesti.

$$d_h = 4\hat{a}/\Phi \quad (11)$$

- \hat{a} on sinimuotoisen aaltokuvioinnin amplitudi
- Φ on pinnan kohennuskerroin 1,22

Teknisten lämpölevyjen, kuten v-mallisten lämpölevyjen kohdalla, voidaan Nusseltin luvun riippuvuutta Reynoldsin luvusta esittää parhaiten hieman muunnellun L ev equen kaavan toimesta (kaava 12). (19, s. 1519.)

$$Nu = c_q Pr^{1/3} (\eta/\eta_w)^{1/6} [2Hg \sin(2\varphi)]^q \quad (12)$$

- c_q on vakio 0,122
- (η/η_w) on väliaineen dynaamisen viskositeetin korjauskerroin (vedelle ≈ 1)
- Hg on Hagenin numero
- φ on l emp levyn profiilin kallistuskulma asteina
- q on vakio 0,374

Edellisessä kaavassa esiintyvä Hagenin numero saadaan puolestaan selville kaavan 13 mukaisesti.

$$Hg = \rho(\Delta p/L_p)d_h^3/\eta^2 \quad (13)$$

- L_p on l emp levyn sis aantulo- ja ulostuloaukon välinen et aisyyss
- η on väliaineen dynaaminen viskositeetti
- ρ on väliaineen tiheys
- Δp on paineen laskun suuruus sis aantulo- ja ulostuloaukon välillä

5 Virtausmallin luominen Comsol Multiphysics -ohjelmalla

Comsol Multiphysics –simulointiohjelmiston avulla on mahdollista ratkaista ja mallintaa sekä analysoida erilaisia fysiikan ja insinööritieteiden ongelmia. Ensimmäinen versio simulointiohjelmasta julkistettiin v. 1998 Comsol Groupin toimesta ja se oli nimeltään Toolbox. Nykyisellä versiolla voidaan simuloida esimerkiksi lämmönsiirtoa, väliaineen virtausta ja akustiikkaa sekä lukuisia muita fysiikan ilmiöitä. Tässä opinnäytetyössä mallinnukset suoritetaan käyttämällä lämmönsiirtomoduulia ja väliaineen virtauksen moduulia.

5.1 Mallinnuksen eri vaiheet ohjelmassa

Comsol Multiphysics -ohjelmasta löytyvien eri moduulien avulla on mahdollista simuloida esim. virtausprosessin kehittymistä erilaisissa rakenteissa, kuten esim. levyn pinnalla tai levyparin välissä. Oli valittu moduuli mikä hyvänsä, voidaan mallinnuksen eri vaiheet jakaa kolmeen pääosaan, jotka ovat seuraavat:

- a) *Geometry modeling*. Haluttu geometrinen muoto voidaan tilanteesta riippuen luoda joko 1-, 2- tai 3D-mallina.
- b) *Physics settings*. Fysikaalisten asetusten määrittäminen tutkittavassa prosessissa tapahtuu kahden erillisen toiminnon kautta. Ensimmäiseksi *subdomain settings* -kohdassa on aluksi määritettävä mallille materiaali ja lähtötilanteen ehdot, kuten esim. väliaineen sisääntulolämpötila, seinämän lämpötila jne. Toiseksi rajaviivojen asetukset kappaleen ja ympäristön välillä tulee määrittää *boundary settings* -kohdassa.
- c) *Solving*. Erilaisten tilanteiden simulointiin käytetään lopuksi *solving*-toimintoa, jonka seurauksena ohjelmisto laskee asetettujen lähtöarvojen ja rajaviivoille määritettyjen ehtojen perusteella simulointimallit tutkittaville tilanteille ja antaa niistä mallikuvat, joiden avulla voidaan havainnollistaa esim. aineen virtaamista tutkittavan kappaleen eri kohdissa.

5.2 Mallin luominen virtaukselle levyparin välissä

Lähtökohtana on luoda Comsol Multiphysics -ohjelmasta löytyvän väliaineen virtausmoduulin (*fluid flow module*) avulla yksinkertaistettu geometrinen malli levylämmönsiirtimeen yksittäiselle levyparille. Tämän jälkeen simuloinnin kautta määritetään, miten nesteenä käytettävän veden nopeusprofiili käyttäytyy kyseisen levyparin välissä ja kuinka veden lämpötila muuttuu sen edetessä levyparin välissä. Lopputuloksena esitetään 2D-mallit veden virtauksen ja sen lämpötilan kehityksestä levyparin välissä ja lisäksi kuvaajat, joka havainnollistavat lämpötilan ja nesteen nopeuden kehittymistä virtausprosessin aikana.

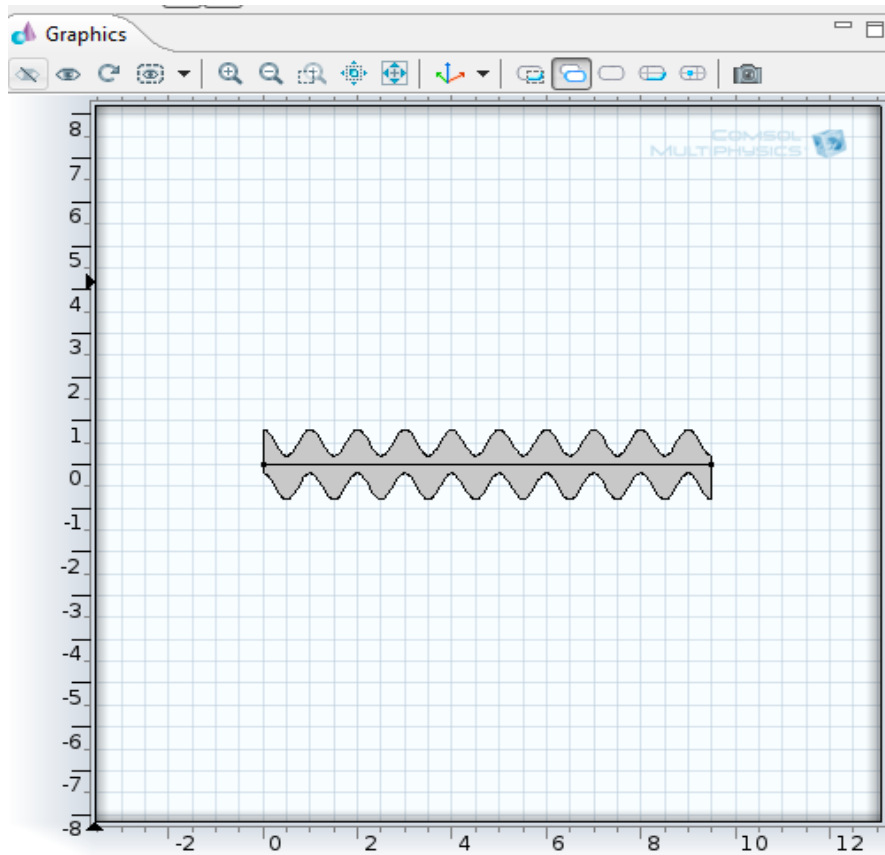
5.2.1 Geometrian luominen levyparille

Aluksi määritetään taulukon 4 mukaisesti parametrit nesteen sisääntulolämpötilalle (T_{in}), levyparin seinämän lämpötilalle (T_{wall}) ja nesteen sisääntulon virtausnopeudelle (u_{avg}). Näiden lähtötietojen avulla, ohjelmisto pystyy myöhemmin *compute*-toiminnolla laskemaan simulointiprosessin lopuksi nesteen ulostulolämpötilan (T_{out}), paineen laskun suuruuden ja virtaustapahtuman lämmönsiirtokertoimen (h). Väliaineena mallinnuksessa on käytetty vettä. Mallinnus on tehty siten, että levyn seinämä pysyy vakiolämpötilassa. Keskimääräinen virtausnopeus on valittu väliltä 0,2 - 0,8 m/s. Tätä virtausnopeusaluetta pidetään taloudellisesti järkevimpänä sellaisiin levylämmönsiirtimein, joissa on käytössä v-malliset lämpölevyt (19, s. 1520.)

Taulukko 4. Parametrien määrittely alkutilanteelle.

Name	Expression	Description
T_wall	80 [degC]	Temperature wall
T_in	25 [degC]	Temperature inlet
u_avg	0,25 [m/s]	Average inlet velocity

Levyparin geometrian määrittäminen aloitetaan piirtämällä sinimuotoiset kuviot, joiden molemmat päät yhdistetään suoralla pystyviivalla kuvan 24 mukaisesti. Levyparin väliin piirretään myös erillinen läpileikkausviiva, jonka avulla voidaan myöhemmin määrittää se, kuinka virtaus käyttäytyy sen molemmin puolin.



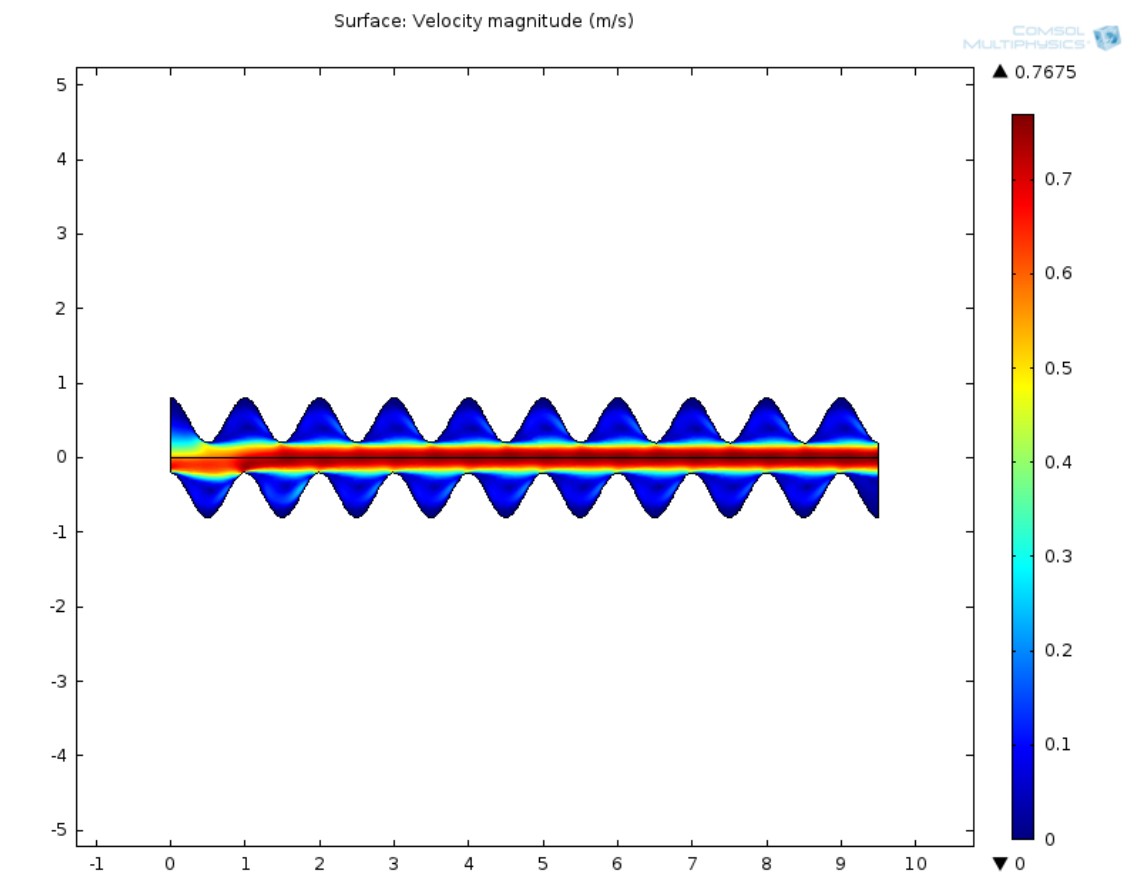
Kuva 24. Geometrian luominen levyparille *geometry*-toiminnolla.

Seuraavassa vaiheessa määritetään virtauksessa käytettävä väliaine, joka tässä tapauksessa on vesi. Ohjelma antaa suoraan vedelle tiedossa olevat suureet, kuten sen tiheyden ja dynaamisen viskositeetin. Myös virtaustilanteen luonne määritetään erikseen sisään tulevalle vedelle laminaariseksi. Lopuksi määritetään vielä, mitä fysikaalisia tilanteita kussakin piirretyssä geometriassa tarkastellaan.

5.2.2 Syntyneet mallit ja kuvaajat

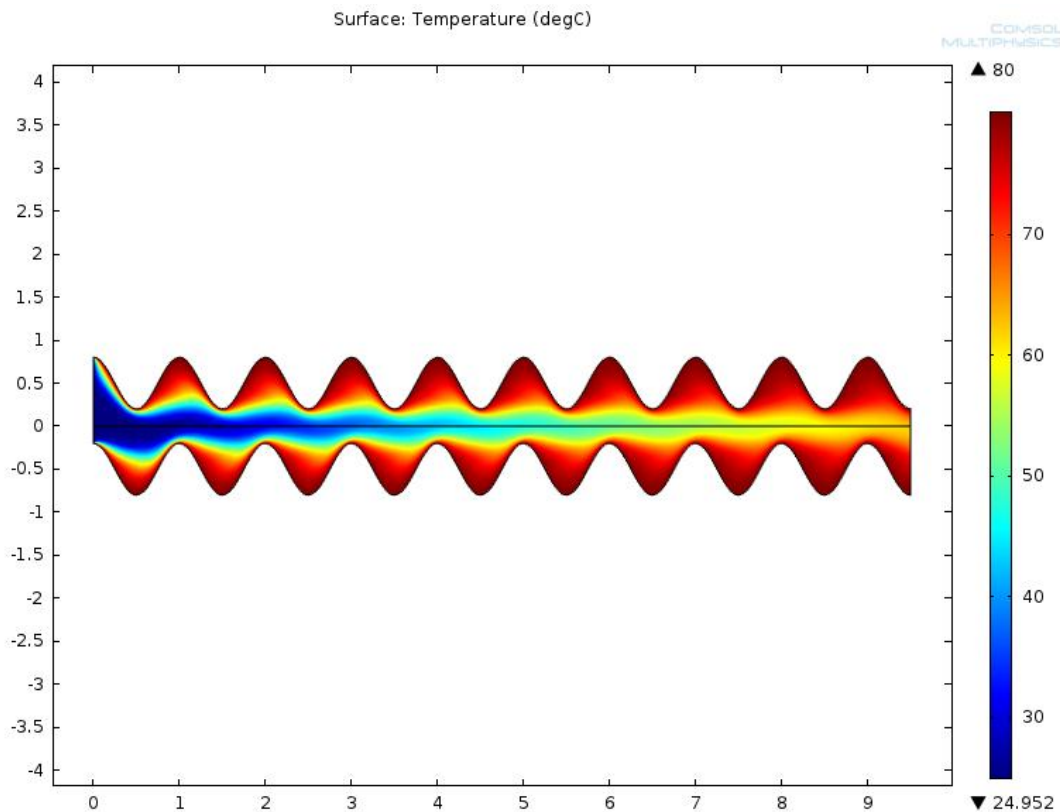
Kun kaikki tarvittavat välivaiheet on saatu valmiiksi, suoritetaan varsinainen mallin simulointi, joka tapahtuu *compute*-symbolia painamalla. Kun simulointiprosessi on val-

mis, ilmestyy tarkasteltavaksi kuvassa 25 esitetty nopeusprofiili veden virtausnopeudelle levyparin välissä. Kyseisen virtausmallin kuvaaja löytyy liitteestä 2.



Kuva 25. Valmis virtausmalli levyparin välissä etenevälle vedelle.

Veden virtausmallin lisäksi saadaan myös kuvassa 26 esitetty veden lämpötilan muutoksesta levyparin välissä kertova simulointimalli. Lämpötilan muutosta havainnollistava kuvaaja löytyy liitteestä 3.



Kuva 26. Veden lämpötilan kehittyminen levyparin välissä.

5.2.3 Reynoldsin luvun ja Nusseltin luvun laskeminen mallille

Reynoldsin luvun määrittäminen

Levyparin välissä tapahtuvalle virtaustapahtumalle lasketaan Reynoldsin luku, jonka avulla määritetään, onko virtaustapahtuma laminaarista vai turbulენტista (kaava 10). Ennen Reynoldsin luvun laskemista on kuitenkin määritettävä aritmeettinen keskiarvo veden lämpötilalle kaavan 14 mukaisesti.

$$T_m = \frac{1}{2}(T_{in} + T_{out}) \quad (14)$$

- T_{in} on sisään menevän veden lämpötila
- T_{out} on ulostulevan veden lämpötila

Sisään menevän veden lämpötilaksi on taulukossa 1 annettu arvo 25 °C. Ulostulevan veden lämpötilaksi saadaan simulointiohjelman laskelmien perusteella 65 °C. Näin ollen veden lämpötilan aritmeettiseksi keskiarvoksi saadaan (kaava 14)

$$T_m = \frac{1}{2}(T_{in} + T_{out}) = \frac{1}{2}(25^\circ\text{C} + 65^\circ\text{C}) = 45^\circ\text{C}$$

Kun tiedetään veden keskilämpötila, niin seuraavaksi katsotaan veden ominaistaulukosta (liite 5), mitkä ovat sen dynaaminen viskositeetti μ ja tiheys ρ sekä Prandtin luku kyseisessä 45 °C:n lämpötilassa. Kyseisessä lämpötilassa veden tiheyden arvoksi saadaan 990,1 kg/m³, dynaamiseksi viskositeetiksi 0,596·10⁻³ kg/m·s ja Prandtin luvuksi 3,91 sekä keskimääräinen virtausnopeus on taulukon 1 mukaisesti 0,25 m/s.

Ennen Reynoldsin luvun laskemista on vielä määritettävä lämpölevyn hydraulinen halkaisija d_h . Hydraulinen halkaisija lämpölevylle saadaan laskettua kaavan 11 perusteella, kun tiedetään lämpölevyn amplitudi ja pinnan kohennuskertoimen suuruus. Lämpölevyn amplitudin \hat{a} arvoksi valitaan 2 mm ja pinnan kohennuskertoimena Φ voidaan käyttää arvoa 1,22, joka on tyypillinen arvo teknisille lämpölevyille (19, s. 1516).

$$d_h = 4\hat{a}/\Phi = 4 \cdot 2\text{mm}/1,22 = 6,55\text{mm}$$

Hydraulisen halkaisijan laskemisen jälkeen ovat tiedossa kaikki tarvittavat suureet, jotta Reynoldsin luku voidaan laskea (kaava 10):

$$Re = \frac{\rho V d_h}{\mu} = \frac{990,1 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,25 \text{ m/s} \cdot 0,00655 \text{ m}}{0,596 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}} = 2720$$

Reynoldsin luvun suuruuden perusteella virtaustilanne levyparin välissä on turbulenttinen, sillä se ylittää turbulenttisuuden rajan ($Re \geq 2000$). (19, s.1517.)

Nusseltin luvun määrittäminen

Nusseltin luvun määrittämiseksi on ensin laskettava Haagenin luku Hg . Lämpölevyn kallistuskulman φ arvoksi valitaan 30° ja kaavassa 13 esitetyn termin $\Delta p/L_p$ arvoksi annetaan 0,1 bar/m (19, s. 1520). Muut kaavassa tarvittavat suureet on jo määritetty veden ominaistaulukon perusteella, kun veden lämpötilan aritmeettinen keskiarvo on tiedossa. Haagenin luvun arvoksi saadaan (kaava 13)

$$Hg = \rho(\Delta p/L_p)d_h^3/\eta^2 = 990,1kg/m^3 \cdot 0,1bar/m \cdot (0,00655m)^3 / (5,96 \cdot 10^{-7}kPa \cdot s)^2$$

$$= 78326810 \approx 79 \cdot 10^6$$

Kun Haagenin luku on saatu laskettua, niin lopuksi voidaan laskea Nusseltin luku virtaustilanteelle (kaava 12).

$$Nu = c_q Pr^{1/3}(\eta/\eta_w)^{1/6}[2Hg \sin(2\varphi)]^q$$

$$= 0,122 \cdot 3,91^{1/3} \cdot 1^{1/6} \cdot [2 \cdot (79 \cdot 10^6) \cdot \sin(2 \cdot 30^\circ)]^{0,374} = 211,45 \approx 211$$

5.3 Virtausmalli litteälle levyypinnalle

Tavoitteena on luoda lämmönsiirtomodulin (*heat transfer module*) avulla malli sille, miten lämpötila muuttuu litteän metallisen levyypinnan yli. Lopputuloksena saadaan havainnollistava 3D-simulointimalli ja kuvaaja lämpötilan muutoksesta levyypinnan yli. Litteällä levyllä on vakiolämpötila yhdessä päässä ja toisesta päästä se on eristetty. Levyä ympäröivä neste viilentää sitä konvektion toimesta. Tätä yksinkertaistettua mallia ja siinä tapahtuvaa lämpötilan muutosta voidaan pitää vertailukelpoisena tilanteelle, jossa lämpötila muuttuu jäähdytystilanteessa yksittäisen lämpölevyn pinnan yli.

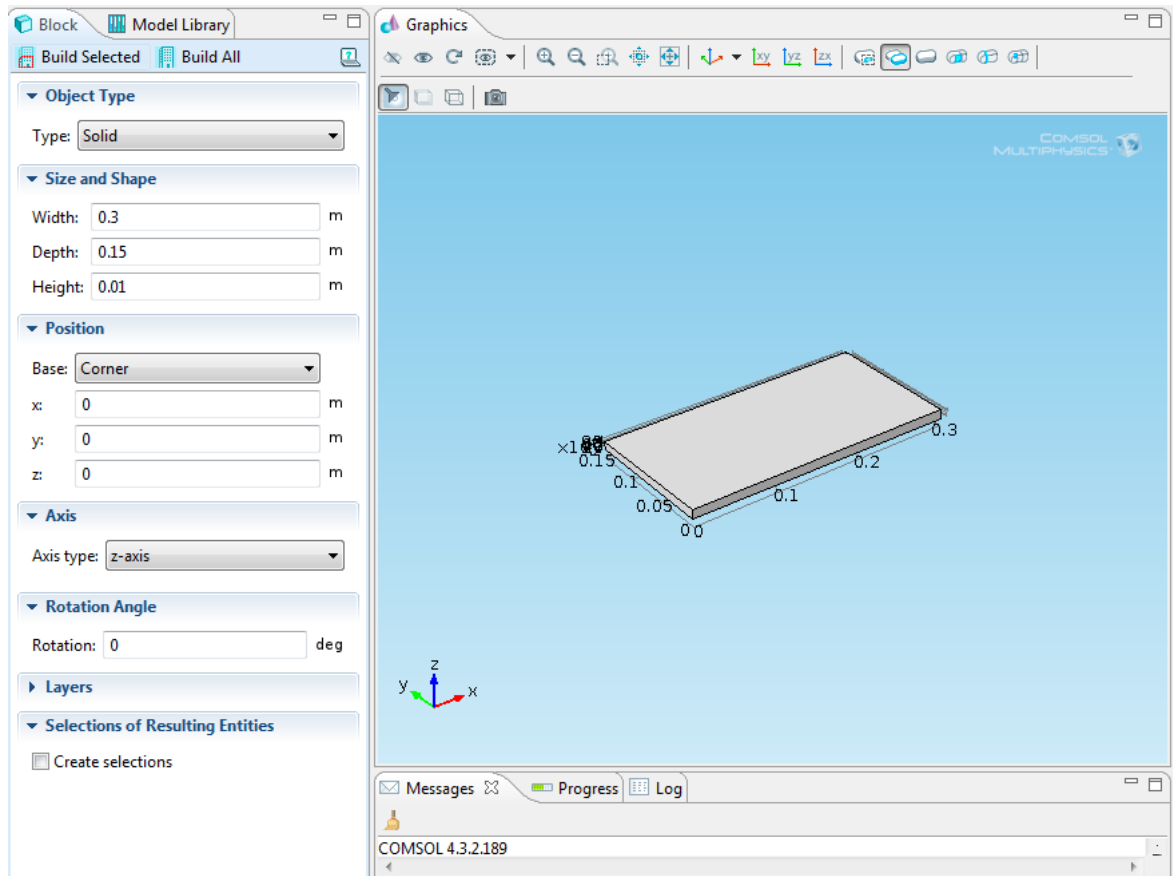
5.3.1 Parametrien ja geometrian määrittäminen

Ennen geometrian luomista määritellään parametrit taulukon 5 mukaisesti levyn pituudelle (*length*), lämpötilalle eristetyssä päässä (*T_ext*), levyn paksuudelle (*thickness*), lämmönsiirtokertoimelle (*h_c*) ja lämpötilalle levyn alkupäässä (*T_hot*). Levyn materiaaliksi valitaan ohjelman valittavana olevista vaihtoehdoista teräs AISI 4340, sillä se vastaa ominaisuuksiltaan eniten lämpölevyissä käytettäviä materiaaleja.

Taulukko 5. Tarkasteltavan levyn parametrit.

Name	Expression
length	0.3 [m]
T_ext	27 [degC]
thickness	10 [mm]
h_c	10 [W/(m^2*K)]
T_hot	527 [degC]

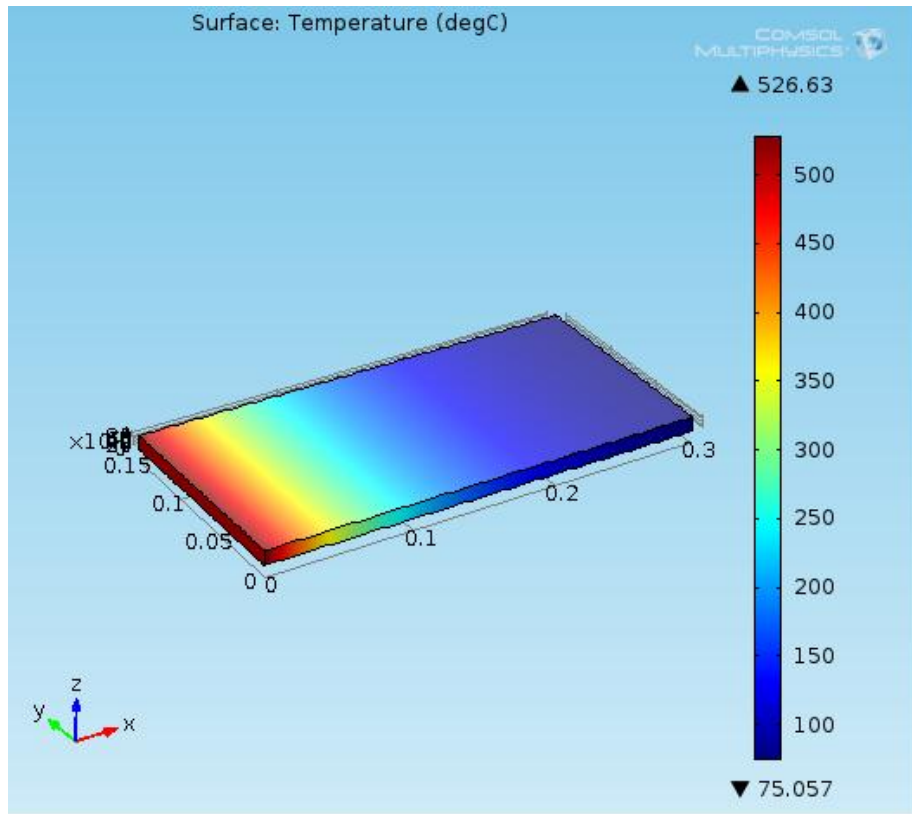
Litteän levyn 3D-piirustuksen aikaansaamiseksi on *geometry*-toiminnossa valittava *block*-muoto, jolloin on mahdollista lisätä alkuperäiseen 2D-piirustus pohjaan z-koordinaatisto. Levyn pituudeksi ja paksuudeksi valitaan taulukossa 5 esitetyt mitat. Leveydeksi valitaan puolestaan y-suunnassa 0.15 m, jolloin saadaan aikaiseksi kuvan 27 mukainen 3D-malli litteästä levystä.



Kuva 27. Litteän levyn valmis geometria.

5.3.2 Syntynyt malli ja kuvaaja

Fysikaalisten asetusten määrittämisen jälkeen saadaan *compute*-toiminnolla valmiiksi lämmönsiirtymistä kuvaava kuvan 28 esittämä simulointimalli ja liitteessä 4 löytyvä kuvaaja lämpötilan muutoksesta levyn pinnalla.



Kuva 28. Lämpötilan muutos levyn pinnalla.

6 Mallien ja kuvaajien analysointi

6.1 Analyysit virtaukselle levyparin välissä

Veden virtausnopeuden kehittyminen

Kuvan 25 esittämä veden virtausnopeusprofiili on virtausteorian mukaisesti jakautunut levyn reunoissa vallitsevaan laminaariseen virtausalueeseen ja levyparin keskellä sijaitsevaan turbulenttiseen virtausalueeseen. Veden virtausnopeus on lähinnä levyn pintaa olevassa rajakerroksessa nolla johtuen *no-slip* – ilmiön vaikutuksesta, minkä johdosta pinnan lähellä olevien veden partikkelien nopeus ei pääse pinnan aiheuttamien kitkavoimien vaikutuksesta kasvamaan. Kun siirrytään kauemmaksi lämpölevyjen pinnan läheisyydestä etäisyydelle noin 0,25 cm pinnasta (liite 2) huomataan, että veden virtausnopeus alkaa hiljalleen kasvaa. Tämä on seurausta samaisen *no-slip* – ilmiön vaikutuksen heikkenemisestä. Tämä liikkumaton rajakerros hidastaa edelleen vieristen rajakerrosten nopeuden kehittymistä johtuen kitkasta, mutta kitkavoiman vaiku-

tus alkaa heikentyä kerros kerrokselta, mitä lähemmäksi tullaan sisimpiä virtausalueita. Heti, kun siirrytään kauemmaksi levyjen reunoista (kohdat 0,25 cm ja 0,75 cm), alkaa veden virtausnopeus kasvaa voimakkaasti ja saavuttaen huippuarvonsa noin 0,75 m/s täsmälleen siinä rajakerroksessa, joka on levyparin puolellisavälissä (kohta 5 mm). Tässä rajakerroksessa veden virtaus on jo puhtaasti turbulenttista ja turbulenttisen kerroksen ominaisuudet ylittävät viskositeettiset ominaisuudet selvästi.

Veden lämpötilan muutos levyparin välissä

Tarkastellaan kuvan 26 esittämää tilannetta, missä vesi saapuu vasemmalta levyparin väliin. Veden sisääntulolämpötila on 25 °C ja levyjen seinämien lämpötila on 80 °C. Heti virtauksen alussa levyjen pintoja lähinnä olevat vesikerrosten partikkelit saavuttavat termisen tasapainotilan levyn pinnan lämpötilan kanssa. Sitä mukaa, kun virtaus etenee levyparin välissä, saavuttaa termisen tasapainotila myös sisemmät nestekerrokset ja niiden partikkelit. Liitteessä 3 on havainnollistettu kuvaajan avulla, miten veden lämpötila kehittyy ja muuttuu sen virratessa levyparin välissä. Aivan alussa ($x < 1$ mm) virtaavan veden lämpötila ei vielä nouse merkittävästi ja ainoastaan levyjen pinnan läheisyydessä olevan vesikerroksen lämpötila alkaa nousta. Kun vesi virtaa pidemmälle ($x > 1$ mm), niin huomataan, että veden lämpötila nousee tasaisesti sitä mukaa, kun se virtaa vasemmalta kohti oikealla olevaa ulostuloaukkoa. Konvektion toimesta tapahtuva veden lämpeneminen saavuttaa vaiheittain myös veden sisimmät rajakerrokset, ja tämän seurauksena virtauksen ulostuloaukon kohdalla veden lämpötilaksi saadaan ohjelman laskemana 65 °C, paineen laskun suuruudeksi sisääntulo- ja ulostuloaukon välillä 5,6 Pa ja lämmönsiirtokertoimeksi 1551 W/(m²·K). Kuvan 26 mukaisen yksinkertaisen virtausmallin voidaan katsoa havainnollistavan sitä, miten lämpö siirtyy yksittäisen lämpölevyparin välissä levylämmönsiirtimessä.

6.2 Analyysit lämpötilan muutokselle yli ohuen levypinnan

Kuvassa 28 on havainnollistettu, miten lämpötila muuttuu litteän ohuen levypinnan yli kulkiessaan. Levyn alkupäässä on vakiolämpötilaksi asetettu n. 526 °C ja liitteessä 3 on havainnollistettu, miten lämpötila ensi laskee nopeasti levyn alkupäässä, minkä jälkeen lämpötilan lasku jatkuu edelleen hidastuen levyn lämpötilalle eristettyä loppupäättä kohden. Levyn lopussa lämpötila on laskenut jo n. 75 °C:n tuntumaan. Lämpötilan lasku johtuu sitä ympäröivän viileän nesteen aiheuttamasta konvektiosta, jossa levyn

kuuma alkuosa luovuttaa sitä ympäröivälle nesteelle lämpöenergiaa, ja näin ollen lämpötila laskee sen edetessä kohti levyn loppupäätä. Luodun mallin avulla on mahdollista havainnollistaa, kuinka jäähdytys toimii nesteen virratessa levylämmönsiirtimen yksittäisen lämpölevyn yli.

7 Yhteenveto

Opinnäytetyössä selvitettiin virtauksen kehittymistä ja lämmön siirtymistä levylämmönsiirtimen levyparin välissä. Levyparin välissä tapahtuvalle virtaukselle laskettiin myös Reynoldsin luku ja Nusseltin luku.

Reynoldsin luvun arvoksi saatiin 2720, jonka perusteella virtaustilanne on turbulenttista. Nusseltin luvun suuruudeksi tuli noin 211. Lisäksi tutkittiin, miten lämpötila muuttuu ohuen levynpinnan, kuten levylämmönsiirtimen yksittäisen lämpölevyn yli. Comsol Multiphysics -ohjelmalla luodut simulaatiomallit virtauksen kehittymiselle ja lämmönsiirrolle levyparin välissä, kuten myös lämpötilan muuttuminen lämpölevyn yli, näyttävät olevan yhteneväisiä niitä koskevien lämmönsiirron ja virtausteorioiden kanssa, joten malleja ja niistä tehtyjä kuvaajia voidaan pitää onnistuneina. Haasteita mallinnukselle asetti Comsol Multiphysics -ohjelman vähäinen käyttökokemus, joten kokeneemman käyttäjän on mahdollista luoda rakenteeltaan monipuolisempia simulaatiomalleja tarkasteltaville ilmiöille.

Luotuja simulaatiomalleja ja niiden kuvaajia voidaan hyödyntää esim. luentomateriaaleissa virtaus- ja lämmönsiirtoteorioiden tukena, visuaalisesti havainnollistamaan käsiteltäviä teorioiden toimintaa.

Lähteet

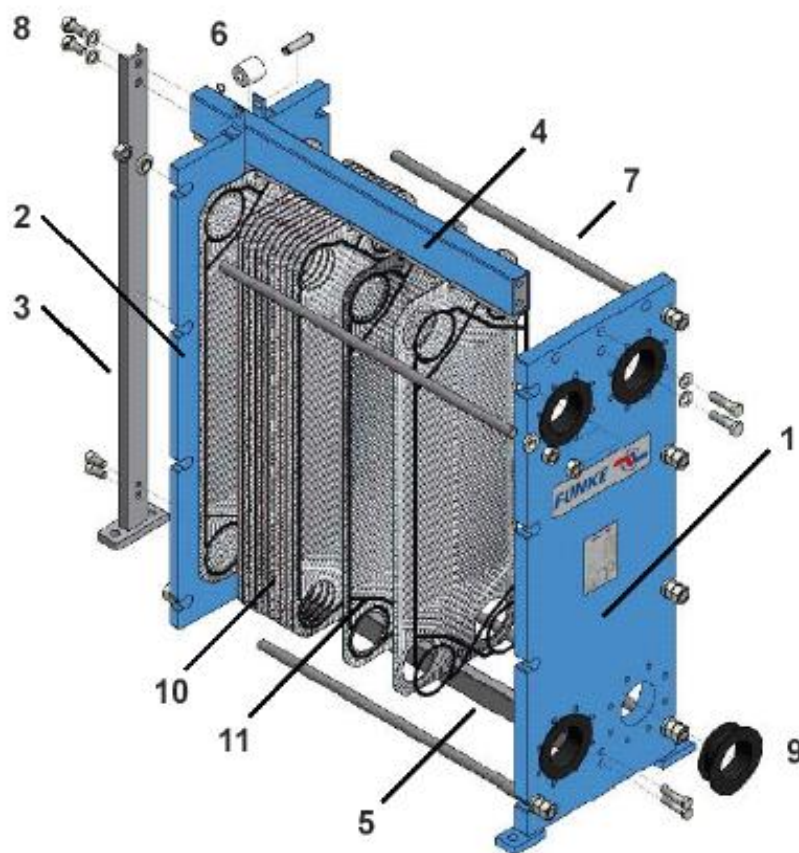
- 1 Cengel Y. A. & Ghajar A. J. 2011. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. 4th edition in SI units. New York: McGraw-Hill.
- 2 Brogan, R. J. 2011. Heat Exchangers. Verkkodokumentti. <<http://www.thermopedia.com/content/832/>>. Päivitetty 13.2.2011. Luettu 20.9.2014.
- 3 Heat Exchangers: Double pipe heat exchanger. 2014. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_exchanger#Double_pipe_heat_exchanger>. Päivitetty 9.9.2014. Luettu 21.9.2014.
- 4 Rohsenow W. M., Hartnett J. P & Cho Y.I 1998. Handbook of Heat Transfer. 3rd edition on SI units. New York: McGraw-Hill.
- 5 Regenerative heat exchanger. 2014. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Regenerative_heat_exchanger>. Muokattu 30.8.2014. Luettu 20.9.2014.
- 6 Heat recovery unit. 2014. Verkkodokumentti. ArchiExpo Ltd. <<http://www.archiexpo.com/prod/hoval-italia/heat-recovery-units-66161-977209.html>>. Luettu 22.9.2014.
- 7 Jonsson, S. & Westman, J. 2011. Cryogenic biogas upgrading using plate heat exchangers. Master's Thesis. Chalmers University of Technology.
- 8 Tiivisteelliset levylämmönsiirtimet. 2014. Verkkodokumentti. ViFlow Finland Oy. <<http://www.viflow.fi/uploads/putki.pdf>>. Viitattu 23.9.2014.
- 9 LWC – Laserhitsatut kasetit. 2014. Verkkodokumentti. GEA Heat Exchangers. <<http://www.gea-phe.com/finland/themes/tuotteet/ecoflex/lwc/>>. Viitattu 23.9.2014.
- 10 Puolihitsattu lämmönsiirrin ja sen ominaisuudet. 2014. Verkkodokumentti. Alfa Laval Nordic Oy. <<http://local.alfalaval.com/fi-fi/tarkeimmat-teollisuusalat/kylmatekniikka-ja-jaahdytys/tuotevalikoima/pages/tuotevalikoima.aspx>>. Viitattu 23.9.2014.
- 11 Juotetut levylämmönsiirtimet. 2014. Verkkodokumentti. Alfa Laval Nordic Oy. <http://local.alfalaval.com/fi-fi/tietoa_alfa_lavalista/ajankohtaista/Documents/Juotetut%20siirtimet_ECF00030_FI.PDF>. Viitattu 23.9.2014.

- 12 Lämmönsiirtimet. 2014. Verkkodokumentti. Sondex Tapiro Oy Ab. <<http://www.tapiro.fi/tuotteet/lammonsiirtimet.html>>. Viitattu 23.9.2014.
- 13 Laaja valikoima lämmönsiirtimiä LVI-laitteita varten. 2014. Verkkodokumentti. Alfa Laval Nordic Oy. <http://local.alfalaval.com/fi-fi/tietoa_alfa_lavalista/ajankohtaista/Documents/LevyI%C3%A4mm%C3%B6nvaihtimia_ECF00061FI.pdf>. Viitattu 23.9.2014.
- 14 Wang L., Sunden B. & Manglik R. M. 2007. Plate Heat Exchangers: Design, Applications and Performance. Great Britain: WIT Press. Verkkodokumentti. <<http://books.google.fi/books?id=P3gTR8YHLHgC&printsec=frontcover&hl=fi#v=onepage&q&f=true>>. Viitattu 2.10.2014.
- 15 Lines J.R. 2014. Asymmetric Plate Heat Exchangers. Verkkodokumentti. Graham Manufacturing Co. <<http://www.graham-mfg.com/usr/pdf/techlibheattransfer/11.pdf>>. Viitattu 3.10.2014.
- 16 Plate Heat Exchanger. 2014. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Plate_heat_exchanger>. Muokattu 25.9.2014. Viitattu 3.10.2014.
- 17 The Theory Behind Heat Transfer: Plate heat exchangers. 2004. Verkkodokumentti. Alfa Laval Nordic Oy. <<http://local.alfalaval.com/en-gb/about-us/news/Documents/The%20Theory%20behind%20heat%20transfer.pdf>>. Viitattu 3.10.2014.
- 18 The Engineering toolbox: Convective Heat Transfer Coefficients. 2014. Verkkodokumentti. <http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html>. Viitattu 11.11.2014.
- 19 Holger, M. 2010. VDI Heat Atlas: Pressure Drop and Heat Transfer in Plate Heat Exchangers. Berlin: Springer-Verlag.

Levylämmönsiirtimen rakenne

ViFlow Finlandin valmistaman levylämmönsiirtimen rakennekuva (8, s. 3).

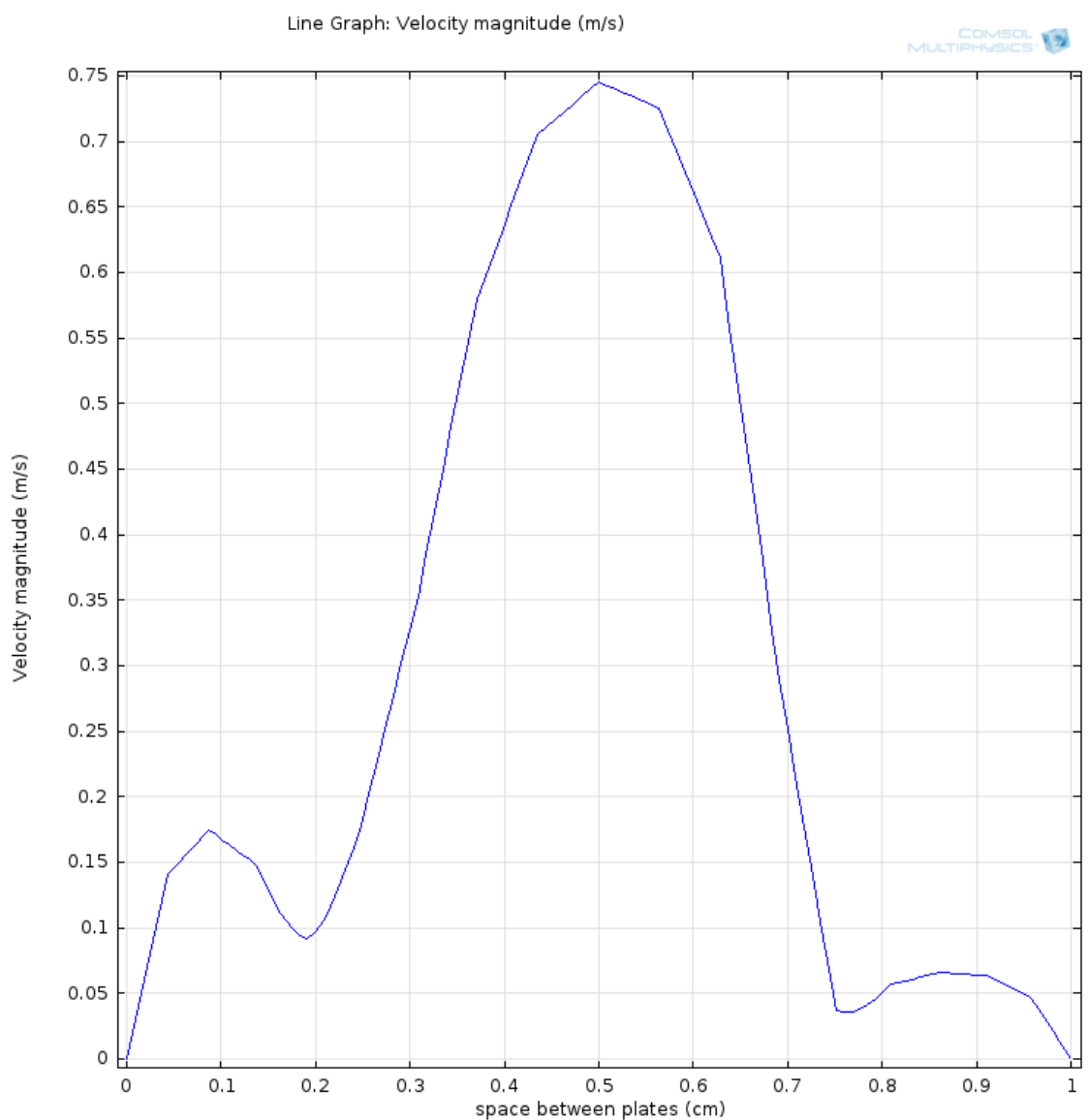
Levylämmönsiirtimen rakenne



- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1. Päätylevy /
etulevy | 6. Raamin kantorulla |
| 2. Liikuteltava takalevy | 7. Raamin kiristyspultit |
| 3. Raamin etutukipalkki | 8. Kiristysmutterit |
| 4. Raamin kantopalkki | 9. Yhteiden kumiointi |
| 5. Raamin ohjauspalkki | 10. Tiivisteet |
| | 11. Lämmönsiirtolevyt |

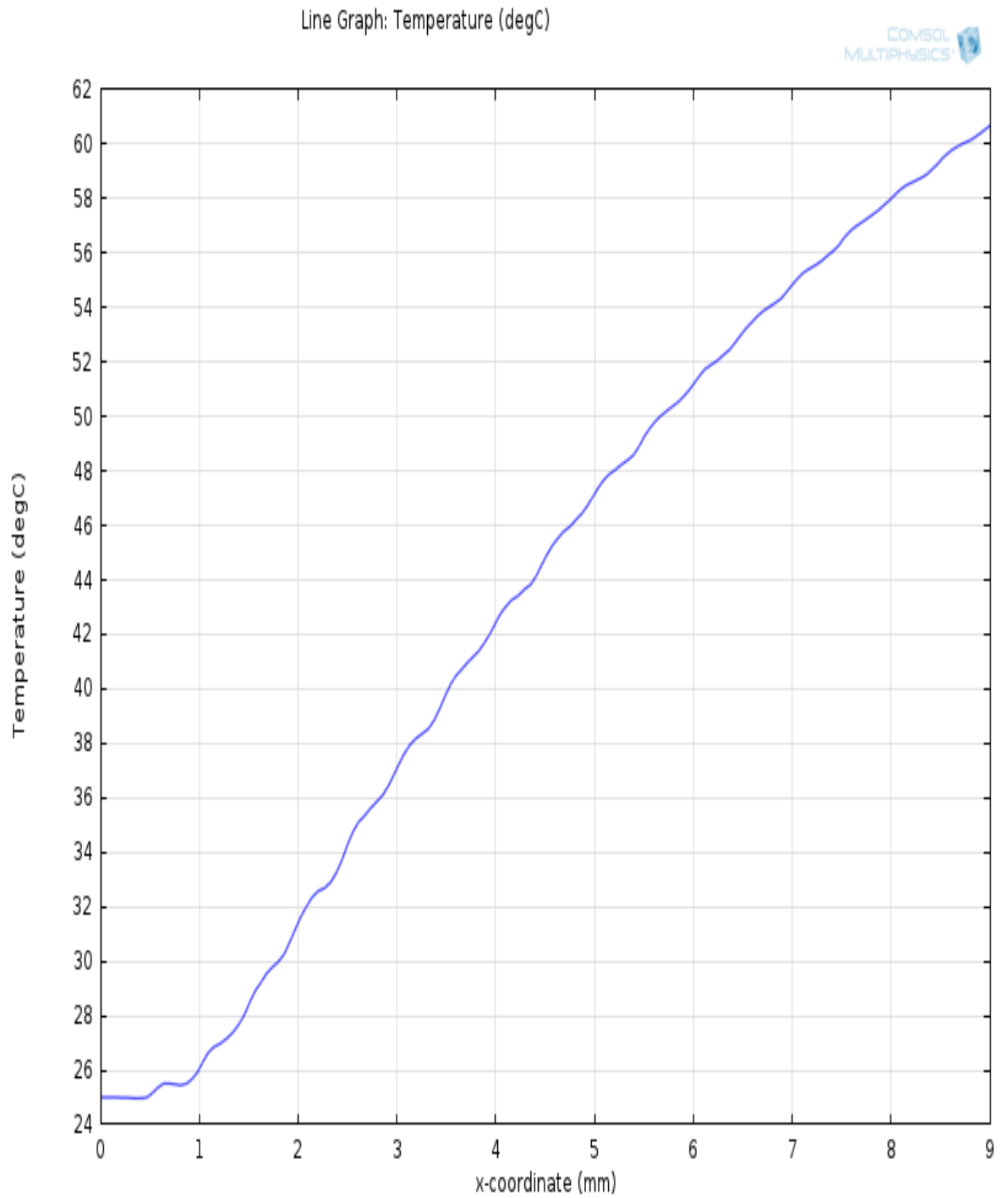
Virtausnopeuden kuvaaja

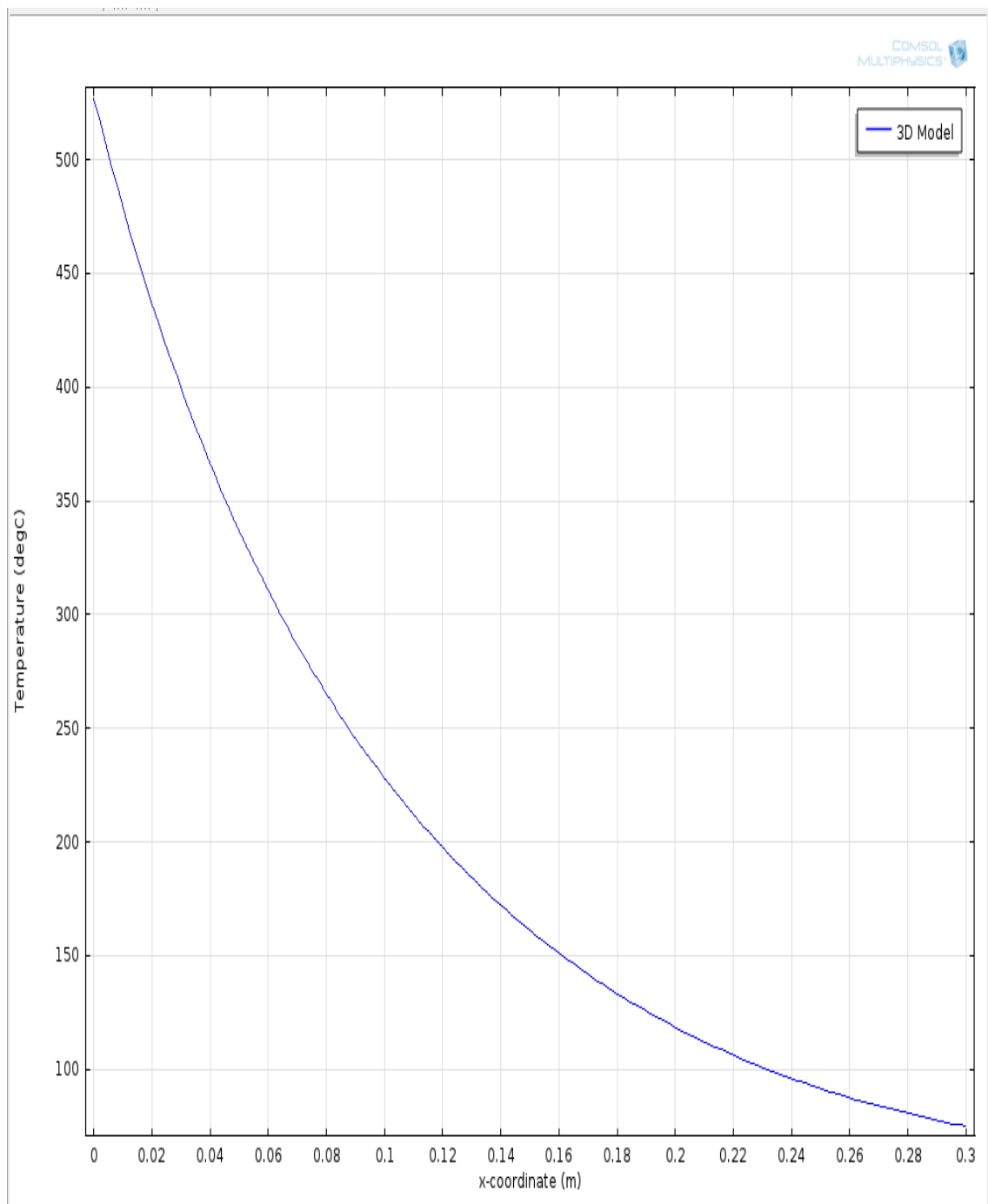
Kuvaaja esittää, miten veden virtausnopeus kehittyy levyparin välissä. Y-koordinaatti kertoo virtaavan veden nopeuden ja x-koordinaatti esittää, missä kohtaa virtauspiste sijaitsee levyparin välissä.



Lämpötilan muutoksen kuvaaja levyparin välissä

Kuvaaja esittää veden lämpötilan muuttumista yksittäisen lämpölevyparin välissä.



Kuvaaja lämpötilan muutoksesta levyn pinnalla

Taulukko veden ominaisuuksista eri lämpötiloissa

TABLE A-9

Properties of saturated water

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Saturation Pressure $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$		Enthalpy of Vaporization $h_{\text{fg}}, \text{kJ/kg}$	Specific Heat $c_p, \text{J/kg}\cdot\text{K}$		Thermal Conductivity $k, \text{W/m}\cdot\text{K}$		Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$		Prandtl Number Pr		Volume Expansion Coefficient $\beta, 1/\text{K}$
		Liquid	Vapor		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792×10^{-3}	0.922×10^{-5}	13.5	1.00	-0.068×10^{-3}
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519×10^{-3}	0.934×10^{-5}	11.2	1.00	0.015×10^{-3}
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307×10^{-3}	0.946×10^{-5}	9.45	1.00	0.733×10^{-3}
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4185	1863	0.589	0.0179	1.138×10^{-3}	0.959×10^{-5}	8.09	1.00	0.138×10^{-3}
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002×10^{-3}	0.973×10^{-5}	7.01	1.00	0.195×10^{-3}
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891×10^{-3}	0.987×10^{-5}	6.14	1.00	0.247×10^{-3}
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798×10^{-3}	1.001×10^{-5}	5.42	1.00	0.294×10^{-3}
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720×10^{-3}	1.016×10^{-5}	4.83	1.00	0.337×10^{-3}
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653×10^{-3}	1.031×10^{-5}	4.32	1.00	0.377×10^{-3}
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596×10^{-3}	1.046×10^{-5}	3.91	1.00	0.415×10^{-3}
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547×10^{-3}	1.062×10^{-5}	3.55	1.00	0.451×10^{-3}
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504×10^{-3}	1.077×10^{-5}	3.25	1.00	0.484×10^{-3}
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467×10^{-3}	1.093×10^{-5}	2.99	1.00	0.517×10^{-3}
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433×10^{-3}	1.110×10^{-5}	2.75	1.00	0.548×10^{-3}
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404×10^{-3}	1.126×10^{-5}	2.55	1.00	0.578×10^{-3}
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378×10^{-3}	1.142×10^{-5}	2.38	1.00	0.607×10^{-3}
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355×10^{-3}	1.159×10^{-5}	2.22	1.00	0.653×10^{-3}
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333×10^{-3}	1.176×10^{-5}	2.08	1.00	0.670×10^{-3}
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315×10^{-3}	1.193×10^{-5}	1.96	1.00	0.702×10^{-3}
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297×10^{-3}	1.210×10^{-5}	1.85	1.00	0.716×10^{-3}
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282×10^{-3}	1.227×10^{-5}	1.75	1.00	0.750×10^{-3}