



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TUOMAS TERVO

OHJEKIRJA SOLIDWORKS-OHJELMISTON FLOW SIMULATION-
LISÄOSAN SOVELTAMISEEN

Kandidaatintyö

Tarkastaja: professori Pentti Saarenrinne
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
16. heinäkuuta 2017

TIIVISTELMÄ

Teknisten tieteiden tiedekunta: Ohjekirja SolidWorks-ohjelmiston Flow Simulation-lisäosan soveltamiseen

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 49 sivua, 5 liitesivua

Heinäkuu 2017

Konetekniikan Kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka

Tarkastaja: professori Pentti Saarenrinne

Avainsanat: SolidWorks, ANSYS Fluent, lämmönsiirrin, putkipaketti

Työssä esiteltävä ohjekirja auttaa käyttäjää suunnittelemaan lämmönsiirtimen SolidWorks -ohjelman lisäosan avulla. Ohjekirjassa mallinnetaan tutkittava tapaus ja asetetaan lämmönsiirtimen virtaukselle reunaehdot. Ohjekirjan esimerkkitapaukselle lasketaan tarvittavat alkuarvot ja asetetaan reunaehdot. Laskentaverkon luomiseen ja sen riittävän tiheyden määrittämiseen ohjekirja opastaa kohta kohdalta. Laskennan jälkeen esimerkkitapaukselle saadaan tulokset ja niiden avulla luodaan visuaaliset väriskaalatut kuvat ja numeeriset tulokset. Ohjekirja sisältää myös lisähuomautuksia ongelmatilanteiden, kuten joidenkin mahdollisten virheilmoituksen ratkaisemiseen.

Ohjekirjan esimerkkitapauksena on ristivirtalämmönsiirtimen lämmönsiirtotehon laskeminen. Ohjekirjassa sovelletaan lisäosaa ristivirtalämmönsiirtimeen, jossa on kymmenen 15mm halkaisijaltaan olevaa putkea ristikkäin aseteltuna poikkisuuntaan virtausta kohden. Putkissa virtaa 100-asteista vettä. Oletuksena on, että putkien pinnoilla lämpötila on vakio 100 astetta. Ristivirtalämmönsiirtimen lämmönsiirtolaskelmien tulokseksi saadaan, että putkipaketin lämmönsiirtoteho on 560W. Tällöin lämmönsiirtimessä lämmitettävä 293 K ilma lämpeni 96 astetta lämmönsiirtimen läpi virratessaan.

Työssä tarkistettiin SolidWorksilla lasketut lämmönsiirtimen tulokset vertailemalla laskennalla saatuja tuloksia kahdella muulla laskentatavalla saatuihin tuloksiin. Nämä kaksi vertailumenetelmää olivat laskenta ANSYS-Fluent laskentaohjelmiston avulla sekä laskenta käsin.

ABSTRACT

Faculty of Engineering Sciences: Work manual for SolidWorks Flow Simulation add-in

Tampere University of Technology

Bachelor of Science Thesis, 49 pages, 5 Appendix pages

June 2017

Bachelor Program in Mechanical engineering

Major: Energy and process technology

Examiner: Professor Pentti Saarenrinne

Keywords: SolidWorks, ANSYS Fluent, heat exchanger, tube bank

This work manual helps the user to design a heat exchanger in the SolidWorks add-in. The manual describes the case to be simulated and the boundary conditions to be set for the heat exchanger. In the example case of the manual an add-in is used to create and analyze crossflow heat exchanger.

In the manual, the user is instructed to calculate the initial values required for the calculations. The manual guides the user step by step to make a calculation mesh for the case and define an adequate density of the mesh. After calculations are done results of the case are received. The manual guides the user to use these results to create color scaled images and numerical results of the case. Manual also includes some help for solving possible errors.

The heat exchanger of the case consists of ten tubes. Diameter of the tubes is 15 mm. Tubes are laid staggered and arranged crosswise to the flow. Water of 100 degrees flows through the tubes. Assumption is that the surface temperature of the tubes is constant and same as the temperature of the fluid inside the tubes. The result of the calculation was that the heat transfer of the tube bank is 560 W. The inlet air flow of 293 K was heated by 96 degrees inside the heat exchanger.

The result of the calculation with SolidWorks were confirmed by replicating the heat exchanger calculations with two different methods. These two methods used in the confirmation were calculating the case with ANSYS-fluent software and calculating the case manually.

ALKUSANAT

Kandintyötä tehtiin yhtäjaksoisesti ahkerasti, kunnes elämäntilanne muuttui yrittäjyydeksi ja kandi jäi taka-alalle. Kun DI-työtä piti ottaa vastaan, niin huomasin kandintyön olevan vieläkin palauttamatta, vaikka kaikki kurssit oli jo suoritettu vuosi sitten. Tämä työ kaivettiin pöytälaatikosta ja työstettiin loppuun.

Opiskelu-aika oli ikimuistoista aikaa ja toivon tulevaisuuden tuovan yhtä hienoja muistoja ja kimmelluksia. DI-työ tuo uusia haasteita ja uskon sen opettavan lisää.

”Lamppu on aina kirkkaimmillaan juuri ennen kuin se sammuu.”

Kiitos kaikesta kuuluu aina tulevan Diplomi-Insinöörin vaimolle.

Tuomas Tervo

Tampereella, 16.07.2017

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	OHJEKIRJA.....	2
2.1	Lämmönsiirtimen esittely.....	2
2.2	Reunaehdot.....	2
2.3	Mallintaminen	3
2.4	Virtaustapaus	6
2.5	Reunaehdot.....	12
2.6	Verkko	14
2.7	Laskennan asetelut	18
2.8	Tulokset.....	21
2.9	Huomautuksia.....	27
3.	VERTAILUTULOKSET	28
3.1	Putkipakettien teoria.....	28
3.2	Käsinlaskenta	31
3.3	ANSYS-laskenta	32
3.4	SolidWorks.....	33
4.	TULOSTEN VERTAILU	34
5.	YHTEENVETO	35

LIITE A: MATHCAD, KÄSINLASKENNAN TULOKSET

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Putkipaketti</i>	2
<i>Kuva 2. Linear Pattern -työkaluvalikko</i>	3
<i>Kuva 3. Linear Pattern 2, akselin valinta</i>	3
<i>Kuva 4. Putkipakettiasetelman esittely</i>	4
<i>Kuva 5. Add-ins</i>	5
<i>Kuva 6. Add-ins Flow simulation</i>	5
<i>Kuva 7. Lids-työkalu</i>	6
<i>Kuva 8. Lids-pintojen valinta</i>	6
<i>Kuva 9. Wizard-valikko</i>	7
<i>Kuva 10. Project name -valikko</i>	7
<i>Kuva 11. Yksiköiden valinta</i>	8
<i>Kuva 12. Analyse type</i>	8
<i>Kuva 13. Fluid-valintalehti</i>	9
<i>Kuva 14. Solid-valikko</i>	9
<i>Kuva 15. Wall Condition</i>	10
<i>Kuva 16. initial conditions, alkuehdot</i>	11
<i>Kuva 17. Turbulenssin intensiteetti</i>	11
<i>Kuva 18. Results and Geometry resolution</i>	12
<i>Kuva 19. Reunaehdot</i>	12
<i>Kuva 20. Inlet, sisäpinnan valinta</i>	13
<i>Kuva 21. Outlet</i>	13
<i>Kuva 22. Vakiolämpöiset pinnat</i>	14
<i>Kuva 23. Referenssiverkko</i>	14
<i>Kuva 24. 2D-verkko</i>	15
<i>Kuva 25. Interface</i>	15
<i>Kuva 26. Cells</i>	16
<i>Kuva 27. Narrow channels</i>	16
<i>Kuva 28. Verkon laskenta</i>	17
<i>Kuva 29. Verkon laskenta</i>	17
<i>Kuva 30. Verkon asetukset</i>	18
<i>Kuva 31. Laskenta</i>	18
<i>Kuva 32. Laskennan perusnäky</i>	19
<i>Kuva 33. Goalejen asettelu</i>	19
<i>Kuva 34. Lämpötilan asettelu</i>	20
<i>Kuva 35. Tarkka lämpötila pinnalla</i>	20
<i>Kuva 36. Laskennan seuraaminen</i>	20
<i>Kuva 37. Kuvan asetukset</i>	21
<i>Kuva 38. Paineen muutos laskennan aikana</i>	21
<i>Kuva 39. Lämmönjohtavuus</i>	22
<i>Kuva 40. Laskenta</i>	22

Kuva 41. Pinnan leikkaus	23
Kuva 42. Oikea pinta	23
Kuva 43. Lämpötila	24
Kuva 44. Lämpötila	24
Kuva 45. Virtausnopeus	25
Kuva 46. Ilmaradat	25
Kuva 47. Pinnan läpi kulkeva lämpö	26
Kuva 48. Poistuvan ilman lämpötilat	26
Kuva 49. Putkipakettiasettelu	28
Kuva 50. Kitkatermi f	30
Kuva 51. Kitkatermi x	31
Kuva 52. ANSYS putkista siirtynyt lämpö	32
Kuva 53. Seinän pinta-ala	32
Kuva 54. Verkkoriippumattomuus	33
Kuva 55. SolidWorks verkko	33

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ANSYS	Amerikkalainen laskenta ja suunnittelu ohjelmisto.
Solid Works	Amerikkalainen suunnitteluohjelmisto
a	kiikhtyvvyys
Re	Raynoldsinluku
I	Turbulentin intensiteetti
K	Kelvin
m/s	nopeus
NU_D	Nussetinluku
P_T	Siirtotekijä
P_L	Dimenssioton pituustekijä
ST	Putkipakettien putkien etäisyys
SL	Putkipakettien putkien etäisyys
Ψ	Laskuissa käytettävä tekijä
Φ_{suorat}	Suorissa rivissä olevien putkiryppäiden tekijä
$\Phi_{ristikkäin}$	Suorissa rivissä olevien putkiryppäiden tekijä

1. JOHDANTO

Tämä työ on syntynyt tarpeesta vertailla SolidWorks-ohjelmistolla saatujen tulosten luotettavuutta suhteessa käsinlaskennalla sekä muilla ohjelmilla saatuihin tuloksiin. Kaupallisten sovellusten luotettavuuden ja toimintaperiaatteen todentaminen on vaikeaa, sillä ohjelmien lähdekoodi ei ole saatavilla. Tässä työssä esitellään eri laskentaperiaatteilla saadut tulokset ja vertaillaan näin saatuja tuloksia toisiinsa.

Tämän työn tarkoituksena on luoda SolidWorks-ohjelmiston Flow Simulation-lisäosan avulla toimiva ohjekirja ja soveltaa sitä lämmönsiirtimen suunnitteluun. Tavoite on, että ohjekirjaa lukeva käyttäjä voi suunnitella tämän tapauksen mukaisen jäähdyttimen ilman ulkopuolista apua. Oletuksena ohjekirjan lukijalle on perusosaaminen 3D-mallintamisesta SolidWorksilla ja perustiedot lämmönsiirrosta.

Ohjekirjassa opastetaan tapa, jolla esimerkkitapaus tulee mallintaa, jotta saadaan luotettavia tuloksia. Sen jälkeen ohjekirja keskittyy opastamaan käyttäjää reunaehtojen määrittämiseen, pakollisten alkuarvojen laskemiseen ja laskennan vaatiman laskentaverkon luomiseen. Lopuksi tuloksista saadaan luotua värikarttoja ja numeerisia arvoja.

Työssä vertaillaan SolidWorks-ohjelmalla lämmönsiirtimelle laskettuja lämpötilajakaumia käsin laskemalla saatuihin tuloksiin sekä ANSYS-Fluent-ohjelman tuottamiin tuloksiin. Työssä esitellään käsinlaskennassa käytetty ristivirtalämmönsiirrinten teoria. Teoriassa esitellään myös toinen tapa asetella ristivirtalämmönsiirtimen lämmönsiirtoputkipaketit. Tapausta, jossa putkipaketit on ristikkäisen asettelun sijaan aseteltu suoriin riveihin, ei ole esitelty esimerkkilaskennassa.

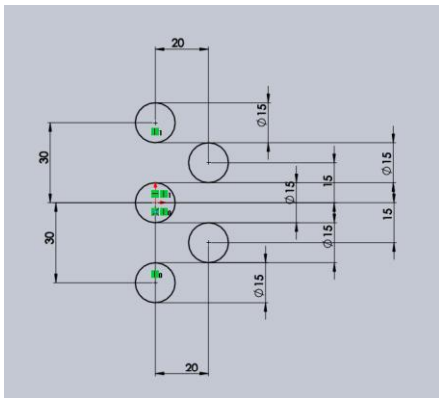
Työn lopputuloksena saatavan ohjekirjan tavoitteena on olla helppolukuinen opas lämmönsiirtimien suunnitteluun. Ohjekirja etenee kohta kohdalta opastaen käyttäjää lisäosan toimintojen löytämisessä ja painikkeiden käytön hallinnassa. Valmis ohjekirja on suunniteltu toimimaan perusohjeena uusille käyttäjille samalla tavoin kuin SolidWorksin oma Help-osio.

2. OHJEKIRJA

Tässä ohjekirjassa esimerkkinä käsitellään ristivirtauslämmönsiirintä. Lämmönsiirtimessä putkiryhmät on aseteltu ristikkäin. Samanlaisia viiden putken ryhmiä on peräkkäin kaksi kappaletta.

2.1 Lämmönsiirtimen esittely

Sisään ristivirtauslämmönsiirtimeen virtaa ilmaa nopeudella 10 m/s. Sisään virtaavan ilman lämpötila on 293 K. Lämmönsiirtimen putkissa virtaa 100 °C (373 K) vettä, josta oletetaan, ettei se jäähdy jäähdyttimessä merkittävästi. Lämmönsiirtimen putkijako on kuvan 1 mukainen. Putkia on yhteensä 10 kpl.



Kuva 1. Putkipaketti

Lämmönsiirtimessä on putkiryhmiä (tubeBank) kaksi kappaletta ja ne on aseteltu peräkkäin. Laskennan tuloksena saadaan ilman keskimääräinen loppulämpötila lämmönsiirtimen jälkeen sekä virtauksen lämpöteho.

2.2 Reunaehdot

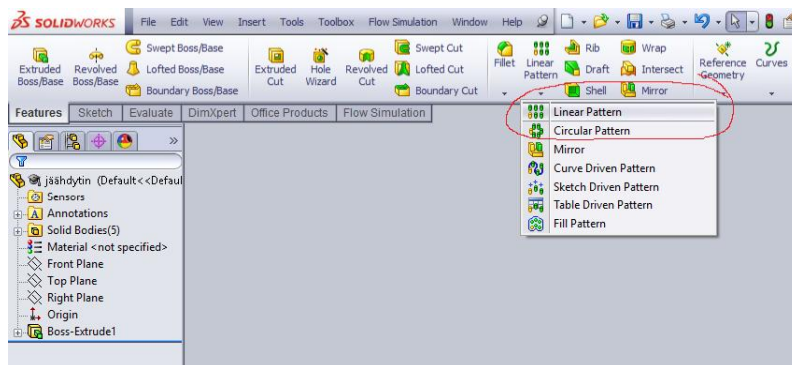
Ilman virtausnopeus sisääntuloaukossa on 10 m/s ja virtaavan ilman lämpötila 293 K. Putkissa virtaavan fluidin lämpötila on 373 K. Oletetaan, että putkessa virtaavan aineen nopeusjakauma on tasainen, jolloin koko poikkipinnan läpi vallitseva lämpötila on sama.

Veden virtausnopeus oletetaan niin suureksi, ettei lämpötila muutu putken pituuden suhteen, jolloin putkien pinnalla vallitsee vakiolämpötila. Tällöin putken pinnan lämpötila on koko ajan sama kuin fluidin lämpötila eli 373 K. Lämmönsiirtimen seinät eivät siirrä lämpöä.

2.3 Mallintaminen

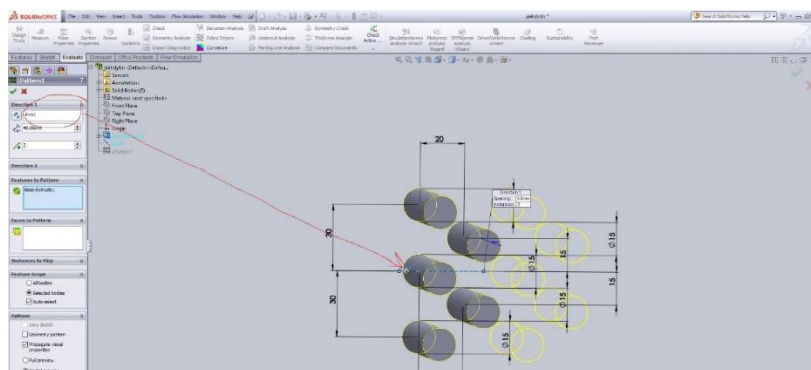
Oletuksena on, että käyttäjä osaa käyttää ennestään jo hieman SolidWorksin mallinnustyökaluja. Tämä osio ohjekirjasta käsittelee sitä, millä tavalla toimiva virtausmalli luodaan SolidWorkissa.

Esimerkkilämmönsiirtimen tapauksessa mallinnetaan vain yksi putkipaketti ja loput lisätään SolidWorksin Linear Pattern -työkalulla, kuten Kuva 2. Työkalulla on helppo lisätä putkipakettien määrää, jos lämmönsiirtimen lämmönsiirtokykyä on tarvetta lisätä.

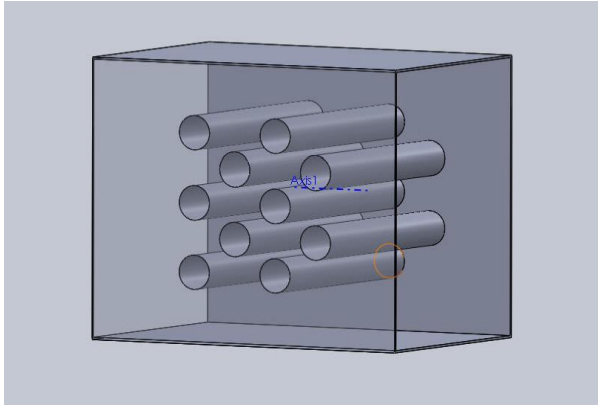


Kuva 2. Linear Pattern -työkaluvalikko

Valitaan kuvan 3 mukainen akseli suunnaksi monistukselle (punainen nuoli), jolloin saadaan kaksi peräkkäistä putkiryhmittä. Tällöin putkipakettien määrä kasvaa monistuksen suuntaan samalla jaolla. Työkaluun voi valita samanaikaisesti myös kaksi suuntaa, jolloin voidaan tehdä tehokkaasti suuriakin kokonaisuuksia.



Kuva 3. Linear Pattern 2, akselin valinta



Kuva 4. Putkipakettiasetelman esittely

Lämmönvaihtimen putkien asettelu on esitelty Kuva 4. Ohjelmiston virtaustapauksen mallinnuksessa ei tarvitse mallintaa virtaavaa ainetta, vaan mallissa tehdään kappale ja mallinnetaan virtauskanava. Jäähdytintapauksessa kanava kuvaa hyvin oikeaa tapausta, jossa olisi kyseessä jäähdyttimen runko. Tällöin malliin on helppo lisätä sisään- ja ulosvirtauskohdat ilmalle.

Mallinnuksessa on otettava huomioon, kuinka lähellä seinät ovat putkipakettia. Seinän ja putken välinen rako vaikuttaa ilmavirtaukseen. Jos halutaan vain tietää putkien kyky siirtää lämpötehoa, on seinä vietävä riittävän kauas. Isojen rakojen vaikutus on pieni laskennan sujuvuuden kannalta, sillä SolidWorks ei priorisoi alueita, jotka eivät ole merkittäviä laskennan kannalta.

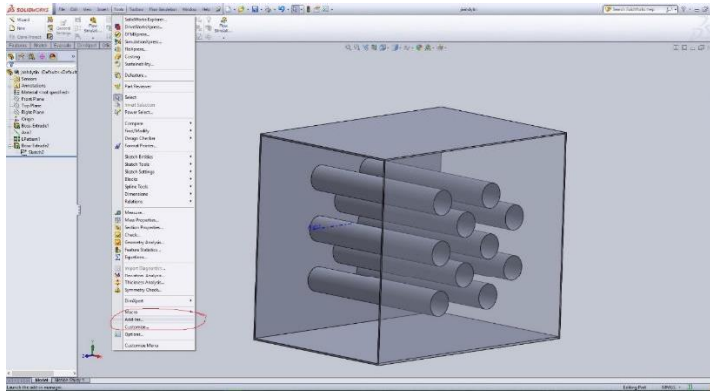
Kun halutaan mallintaa todellinen lämmönsiirrin ja tunnetaan mitat, on seinän ja putken välinen rako tällöin tiedossa. Muissa tapauksissa on rako jätettävä riittävän suureksi.

Mallinnuksen voi myös tehdä ulkoisena virtauksena, jossa putkipaketti mallinnetaan ilman runkoa. Tällöin ei tarvitse mallintaa virtauskanavaa. Esimerkkilämmönsiirtimen tapauksessa mallinnus muistuttaa hyvin paljon oikeaa lämmönsiirrintä.

SolidWorksin virtauslaskentaohjelmisto avataan kohdasta

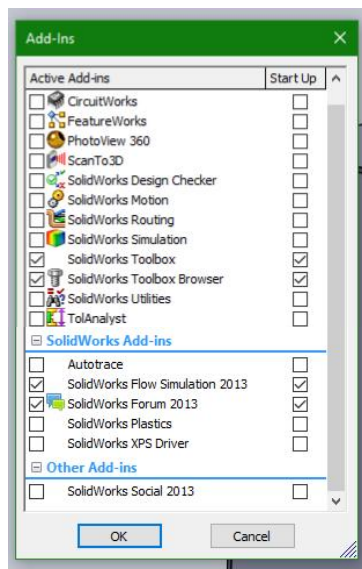
Tools – Add-ins Kuva 5

Valikosta (Kuva 6) valitaan SolidWorks Flow Simulation -ohjelmisto. Sen voi valitessa käynnistää aina tai vain tällä kertaa. Jos lisäosan valitsee käynnistymään aina ohjelmaa avatessa, hidastaa se ohjelmiston käynnistymistä merkittävästi.



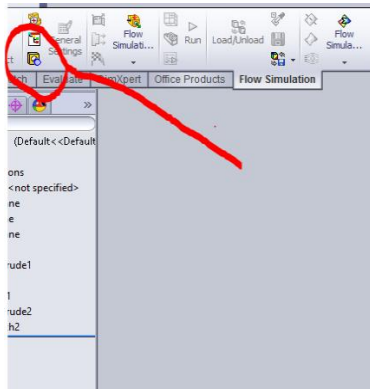
Kuva 5. Add-ins

Laitettaessa merkki vasemmanpuoleiseen sarakkeeseen avautuu ohjelmisto vain tällä kertaa ja oikealle laitettaessa avautuu ohjelmisto aina SolidWorksia avattaessa.



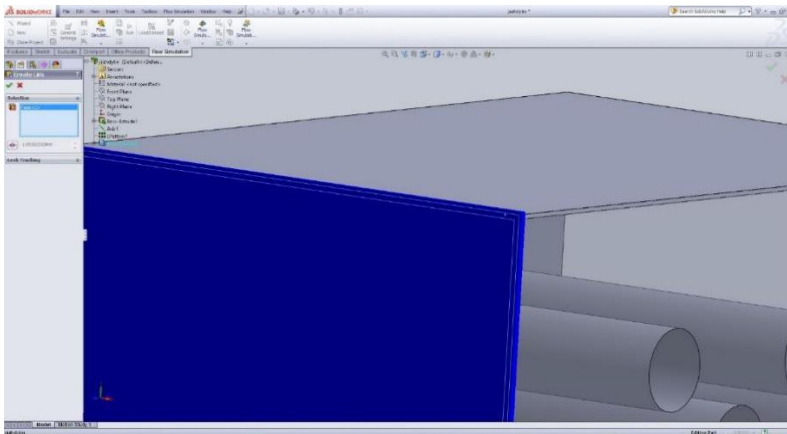
Kuva 6. Add-ins Flow simulation

Mallin täytyy olla tiivis, jotta virtaavaa ainetta ei pääse pois muualta kuin halutuilta pintoilta. Siihen ohjelma tarjoaa oman lids -työkalun (Kuva 7). Työkalun avulla määritellään myös sisään- ja ulosvirtauskohdat. Työkalu lisää lämmönsiirtimeen äärettömän ohuita ja massattomia seinämiä, mutta ei lisää lainkaan massaa eikä pinta-alaa. Pintoja ei lisätä alkuperäiseen 3D-malliin.



Kuva 7. Lids-työkalu

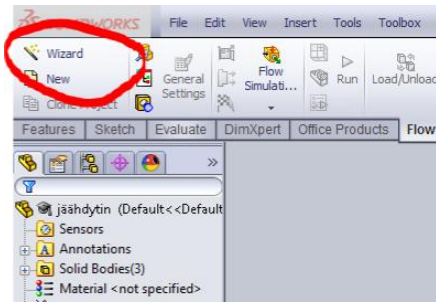
Jotta voidaan sulkea malli tiiviiksi, valitaan vain avonaiset pinnat. Tällöin niistä tulee laskentaa rajoittavia rajapintoja. Näihin pintoihin voi myöhemmin asettaa reunaehtoja ja pinnat toimivat kuten muutkin seinät. Kuvassa 8 lisätty seinä näkyy sinisenä.



Kuva 8. Lids-pintojen valinta

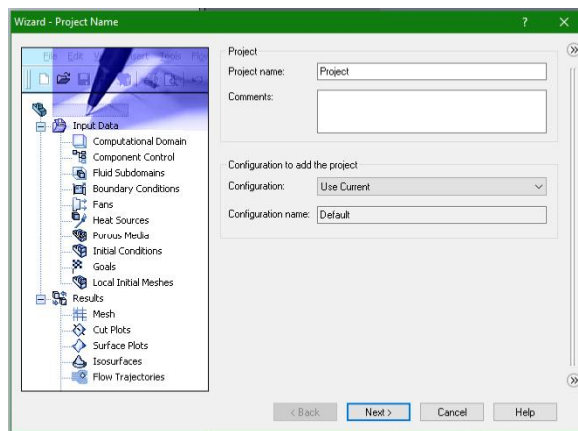
2.4 Virtaustapaus

Helpoin tapa määrittää tapaukselle virtausaineita ja muita arvoja on valita Wizard-kohta, kuten Kuva 9. Aina työkalua käytettäessä avataan uusi projekti, jolloin voit tehdä samalle virtaustapaukselle helposti eri variaatioita. Projekteissa on helppoa muuttaa väliainetta ja lämpötiloja, jolloin voidaan tutkia esimerkiksi materiaalien vaikutusta lämmönsiirtokykyyn.



Kuva 9. Wizard-valikko

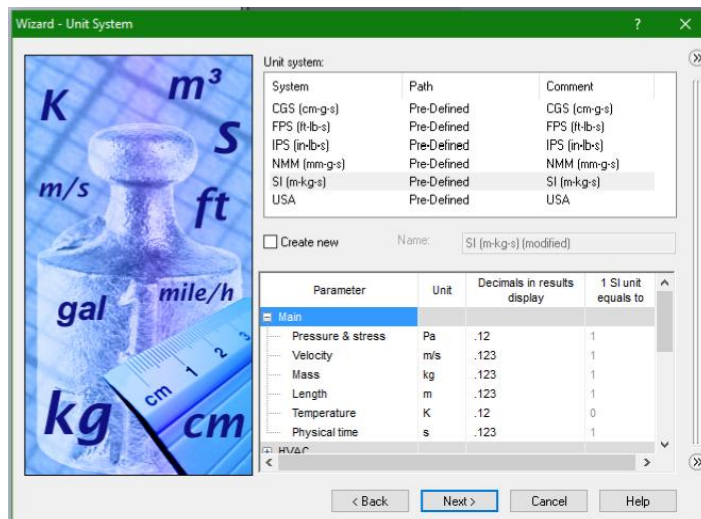
Ensimmäisellä lehdellä (Kuva 10) määritetään tapaukselle nimi ja sille voi määrittää eri variaatioita. Esimerkiksi samasta jo lasketusta mallista voitaisi käyttää virtausaineena vettä tai ilmaa.



Kuva 10. Project name -valikko

Etene painamalla next.

Kullekin tapaukselle määritetään käytettävät suureet, jotka näkyvät Kuva 11. **Yk.** Oletusarvona on SI-järjestelmän mukaiset yksiköt. Jos annetut yksiköt tapaukselle ovat esimerkiksi paunoina ja tuumina, on silloin helppo käydä valikossa muuttamassa yksiköitä. Tällöin käyttäjän ei tarvitse itse laskea muunnoksia vaan SolidWorks suorittaa muunnokset itse.

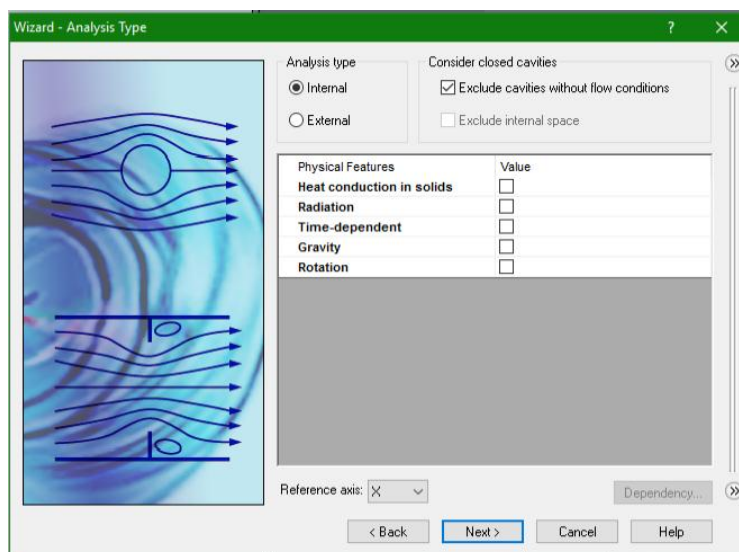


Kuva 11. Yksiköiden valinta

Analysis Type kohdassa (Kuva 12) valitaan sisäinen tai ulkopuolinen virtaus. Esimerkkitilanteissa on kyseessä sisävirtaus, jossa on virtauksessa häiriöitä aiheuttavia tekijöitä eli lämmönsiirtimen putkia. Tällöin valitaan valikosta Internal.

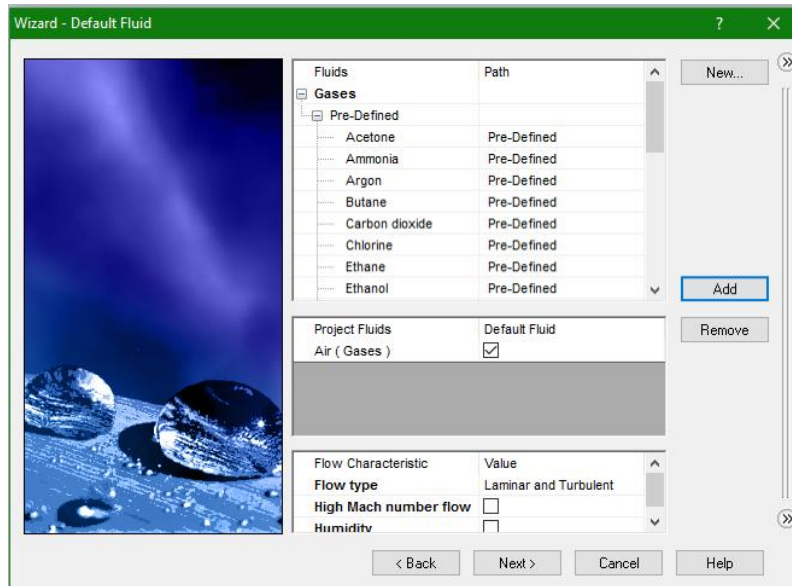
Laskennassa on myös mahdollista ottaa huomioon lämpösäteily, lämmönsiirto pintojen välillä, aikariippuvuus, painovoima ja pyöriminen. Ominaisuuksien lisääminen hidastaa laskentaa. Jos voidaan arvioida, ettei esimerkiksi painovoima merkittävästi vaikuta laskentaan, kannattaa se jättää pois laskennasta. Ominaisuuksien lisääminen saattaa moninkertaistaa laskentaan kuluvan ajan.

Laskentaesimerkissä ei valita mitään näistä ominaisuuksista. Tämä yksinkertaistaa tapusta ja lyhentää laskenta-aikaa.



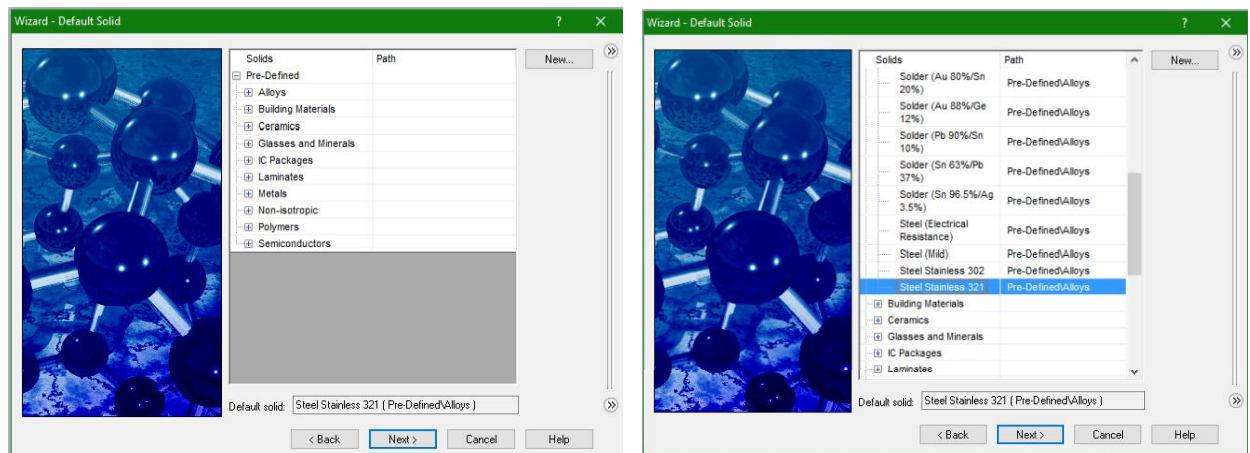
Kuva 12. Analyse type

Seuraavassa vaiheessa valitaan tapauksessa virtaava fluidi (Kuva 13). Listasta etsitään tapauskohtainen aine, joka on tällä kertaa ilma. Liitetään virtausaine valitsemalla Add. Virtaustyyppiä valitaan laminaari ja turbulenti. Jos tunnettaisi tapaus hyvin ja kyseessä olisi esimerkiksi vain laminaari virtaus, voitaisi se valita nopeuttamaan laskentaa. Usein on hyvä valita laminaari ja turbulenti virtaus, jolloin ohjelmisto ottaa tehokkaasti huomioon kaikki virtaustapaukset mallin sisällä.



Kuva 13. Fluid-valintalehti

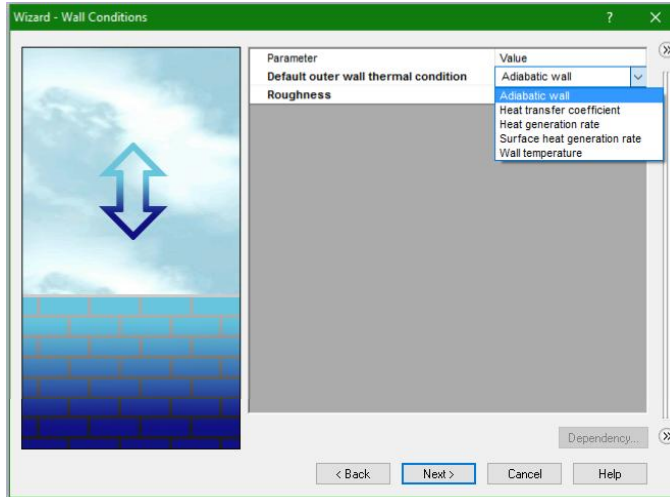
Valitaan pintojen materiaalit (Kuva 14). Pintamateriaalit vaikuttavat varsinkin, jos säteilylämmön siirto on valittu osaksi laskentaa. Valitaan laskentatapaukselle materiaaliksi Ruostumaton teräs 321 (Steel Stainless 321). Tällöin SolidWorks asettaa materiaalin arvot laskennalle.



Kuva 14. Solid-valikko

”Wall Condition” välilehdellä (Kuva 15) valitaan, kuinka tapauksen seiniä käsitellään. Tässä esimerkissä käsitellään seinät täysin adiabaattisena. Seinille voi myös määrittää lämmöntuottoa, lämmönsiirtoa tai seinälle voi asettaa vakiolämpötilan.

Tapaukselle voi myös määrittää seinän karheutta, jos tapaus tunnetaan hyvin. Muussa tapauksessa ohjelma käsittelee seinät sileinä pintoina.



Kuva 15. *Wall Condition*

Initial conditions -välilehdellä annetaan ilmassa vallitsevien olosuhteiden arvot. Kaikkia arvoja voi myös muokata jälkikäteen.

Muut arvot annetaan olla oletusarvossa, mutta muutetaan turbulentin intensiteetin arvo. Turbulentin intensiteetti lasketaan kaavalla (1)[1]

$$I = 0.16 * Re_H^{-1/8}, \quad (1)$$

$$\text{jossa } Re_H = \frac{U * H}{\nu}. \quad (2)$$

Muut suureet ovat seuraavat:

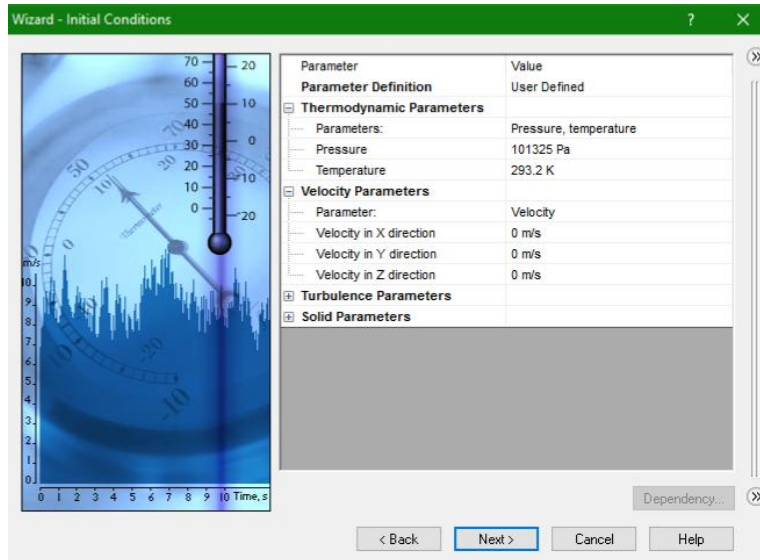
$$H = 100\text{mm ja}$$

$$U = 10 \frac{m}{s} \nu = 19,32 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}. \quad (3)$$

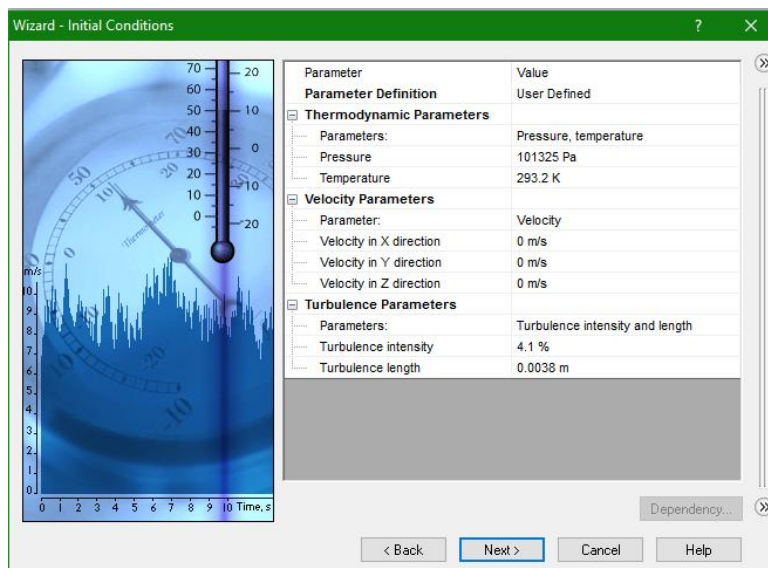
Intensiteetiksi tällöin saadaan

$I = 0,041$ ja

$L = 0.038 * H = 0,0038.$

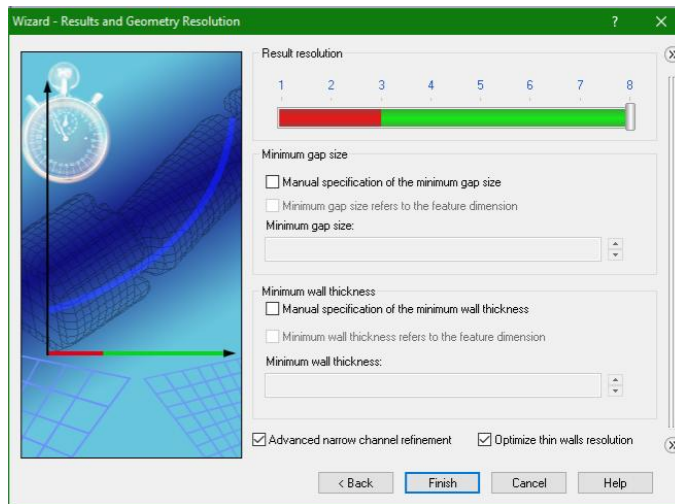


Kuva 16. initial conditions, alkuehdot



Kuva 17. Turbulenssin intensiteetti

Intensiteetti ilmoitetaan prosentteina ja syötetään ohjelmalle Kuvan 17 mukaisesti. Virta-
tausnopeutta ei määritetä tässä vaiheessa, sillä se syötetään myöhemmin reunaehtoina.

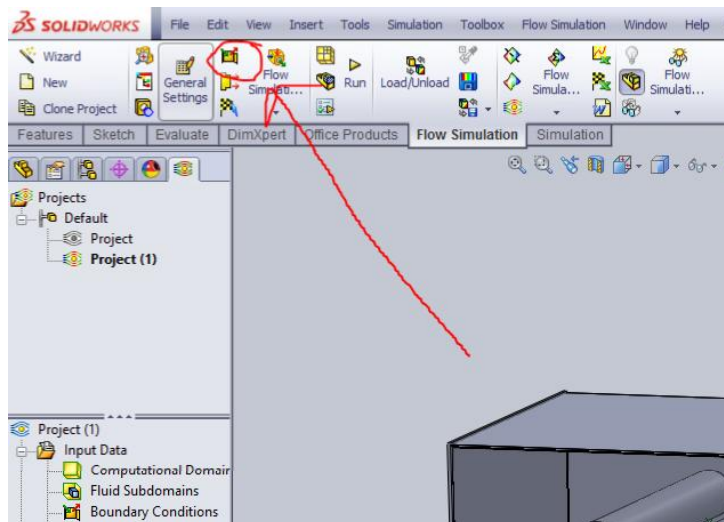


Kuva 18. Results and Geometry resolution

Voit määrittää verkotuksen resoluution välillä 1 – 8, kuten Kuva 18 ja SolidWorks optimoi mielestään parhaan verkon tiheyden laskennalle. Laskentaverkon voi määrittää käsin tarkemmin ja lisäämällä verkontiheyttä lisätään laskentakoppien määrää. Verkon tiheyttä kannattaa kuitenkin muuttaa myöhemmin, jolloin muut laskentaa määrittävät tekijät on jo määritelty.

2.5 Reunaehdot

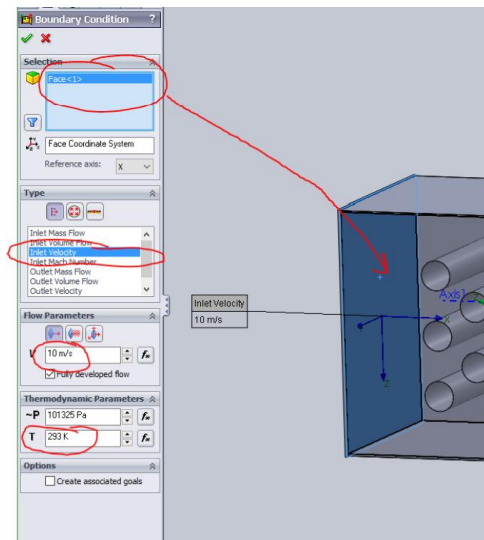
Seuraavaksi määritetään laskennalle reunaehdot (Kuva 19). Niissä asetetaan sisään tulevan ilman nopeus ja lämpötila ja valitaan lämmitetyt pinnat.



Kuva 19. Reunaehdot

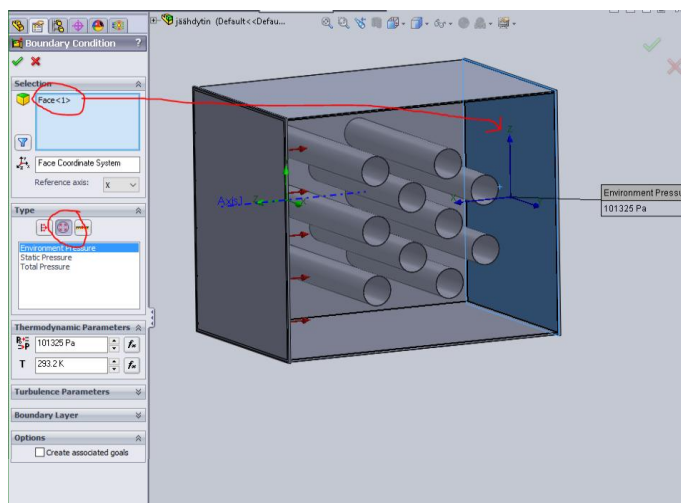
Asetetaan ensimmäiseksi tulevan ilman lämpötila ja virtausnopeus.

Avaa boundary condition ja valitse laskentaympäristön sisäpinta. Valitusta pinnasta ilman nopeus on aina normaalin suuntaan ja sen vuoksi täytyy valita sisäpinta.



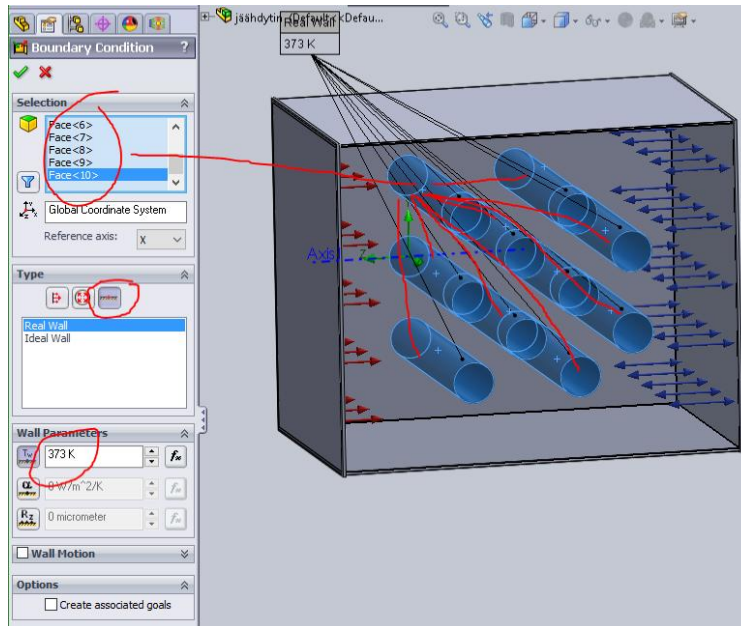
Kuva 20. Inlet, sisäpinnan valinta

Seuraavaksi valitaan ilman ulosvirtauspinta eli pressure outlet/Environment pressure. Tämä määrittää virtaukselle suunnan.



Kuva 21. Outlet

Valitaan lämmönsiirtimessä lämpösiirtävät elementit / pinnat. Pinnoille määritetään vaihtolämpötila. Pinnoille voi myös määrittää lämmönkehitystä, jos kyseessä olisi esimerkiksi vastukset, jotka lämmittävät ilmaa. Kyseisessä tapauksessa putkissa kulkee vettä, joka pitää putkien pinnanlämpötilan vakiona. Todellisuudessa veden tulopäässä ja lähtöpäässä on eri pinnanlämpötilat. Helpotamme laskentaa olettamalla veden virtauksen nopeuden niin suureksi, ettei pinnan lämpötila muutu merkittävästi.

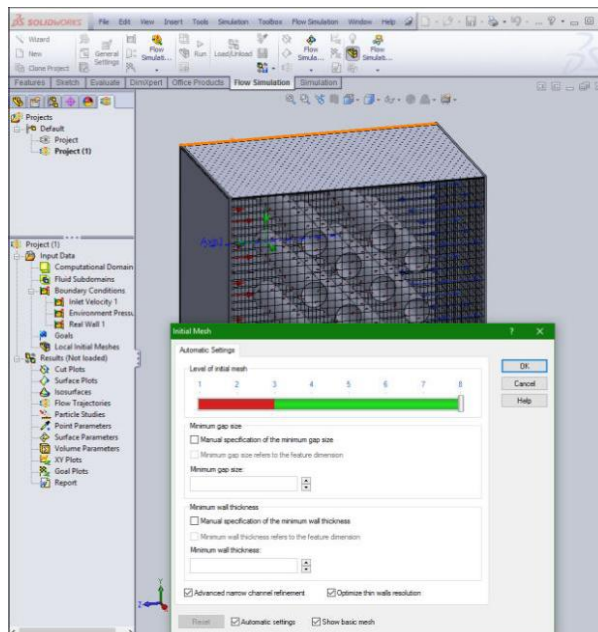


Kuva 22. Vakiolämpöiset pinnat

Jos halutaan mallintaa tapaus virtaavalla vedellä tarkasti, määritetään silloin vedelle tulo-suunta, poisvirtaussuunta ja lämpötila, kuten tapauksen tuloilmalle määritettiin.

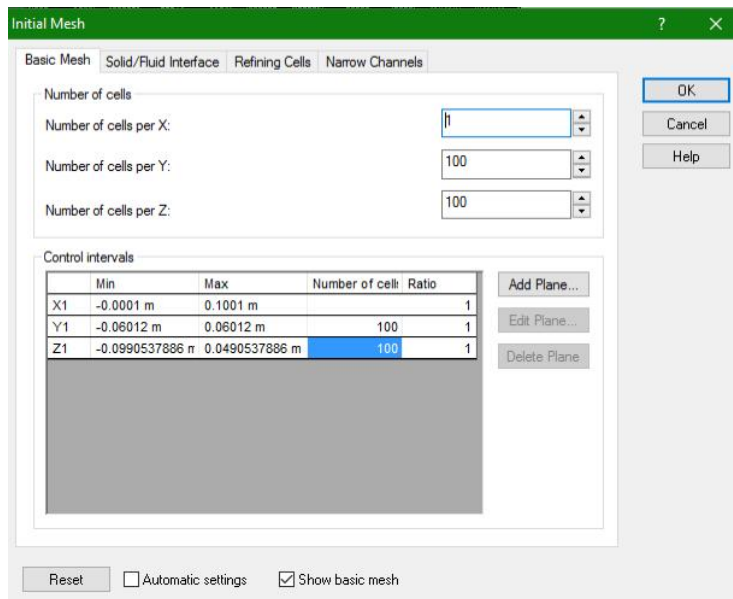
2.6 Verkko

SolidWorks on tehnyt automaattisesti 3D-verkon, jonka referenssiverkon voi näyttää valitsemalla Show basic mesh. Tämä ei ole kuitenkaan laskennassa käytettävä verkko todellinen laskentaverkko lasketaan myöhemmin.



Kuva 23. Referenssiverkko

Käytetään tässä laskennassa 2D-verkkoa saadaksemme tiheämmän verkon ja oletetaan, että putket eivät siirrä lämpöä muuten kuin virtauksen suunnassa.

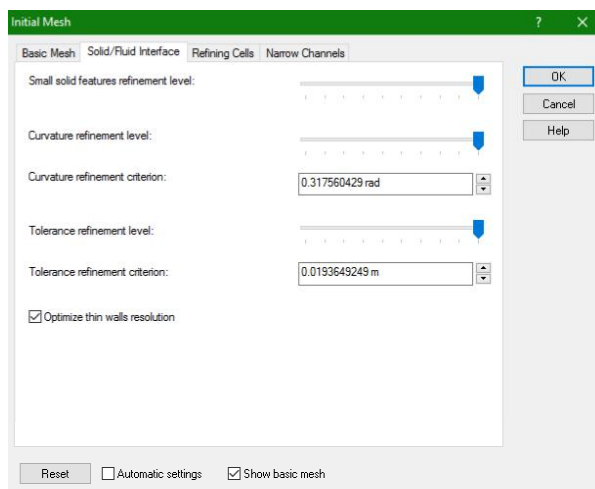


Kuva 24. 2D-verkko

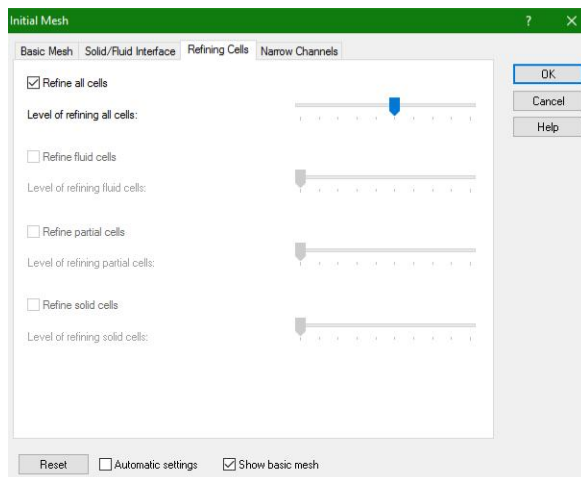
Laskentakoppien määrän voi määrittää itse tai antaa SolidWorksin määrittää oletusarvo. Laskentakoppien määrä vaikuttaa laskenta-aikaan. Suurella laskentakoppien määrällä saa tarkempia ja parempia tuloksia.

Pinnoille voi määrittää SolidWorksissa tihennyksiä, mutta ne näkyvät vasta, kun verkko on laskettu ja määritetty.

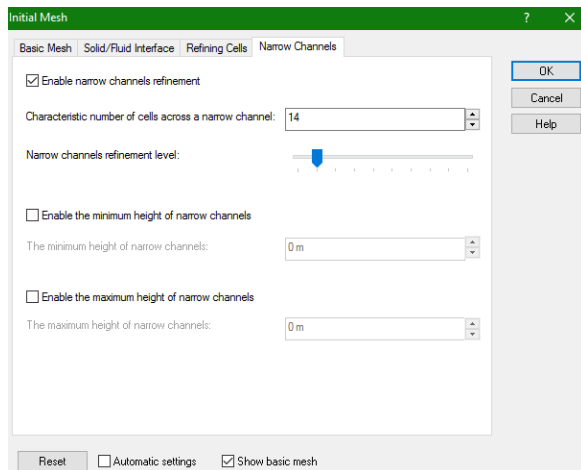
Kuvien 23-25 mukaisia liukukytkimiä käyttäen voidaan painottaa eri asioita geometriassa.



Kuva 25. Interface

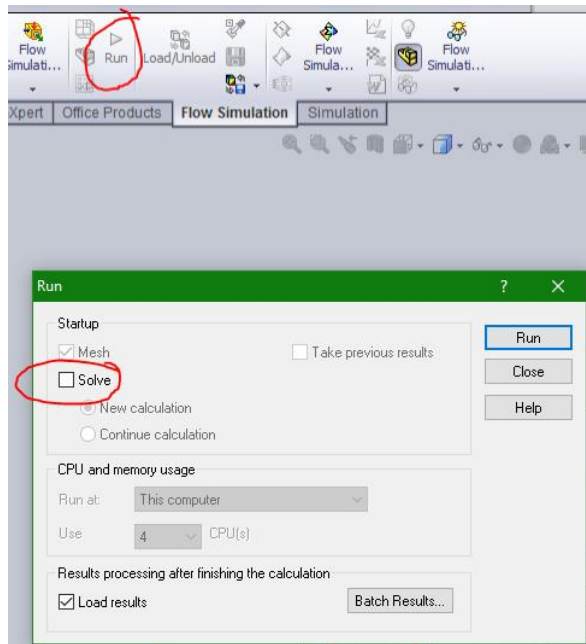


Kuva 26. Cells

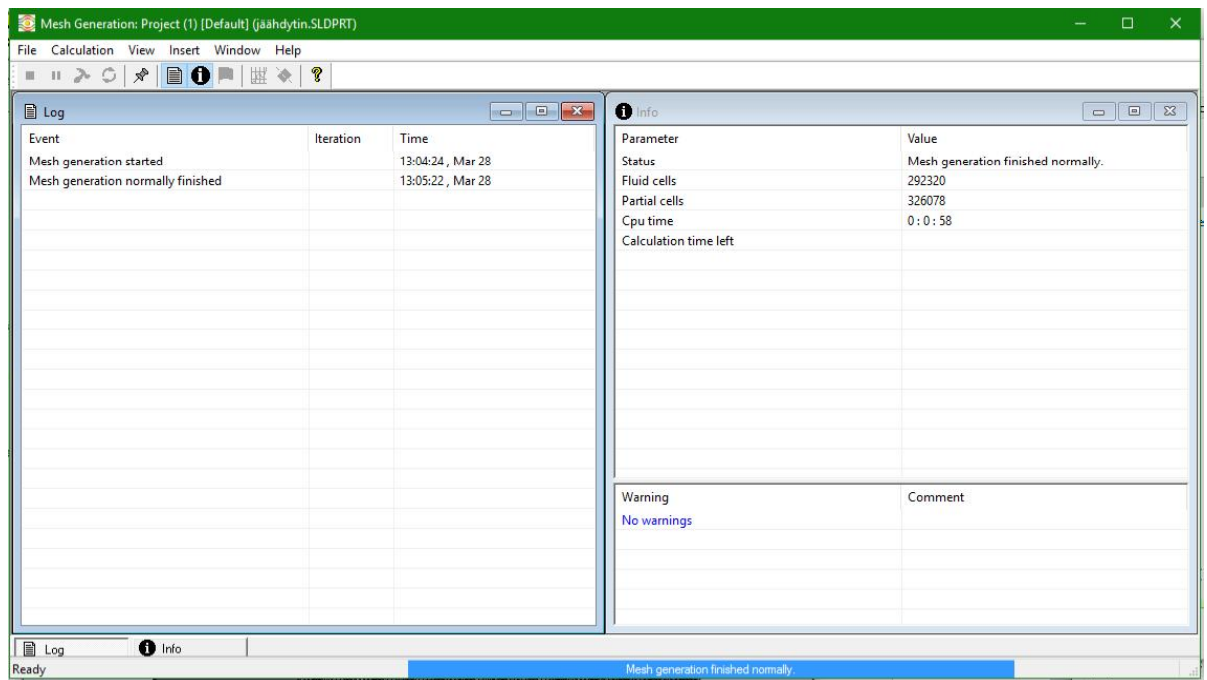


Kuva 27. Narrow channels

Voit luoda verkon ennen kuin käynnistät laskennan (Kuva 28). Paina RUN ja valitse solve-kohdan rasti pois, jolloin SolidWorks laskee pelkästään verkon. Voit käyttää tätä verkkoa laskennassa tai muuttaa sitä ja tehdä verkon uudelleen.

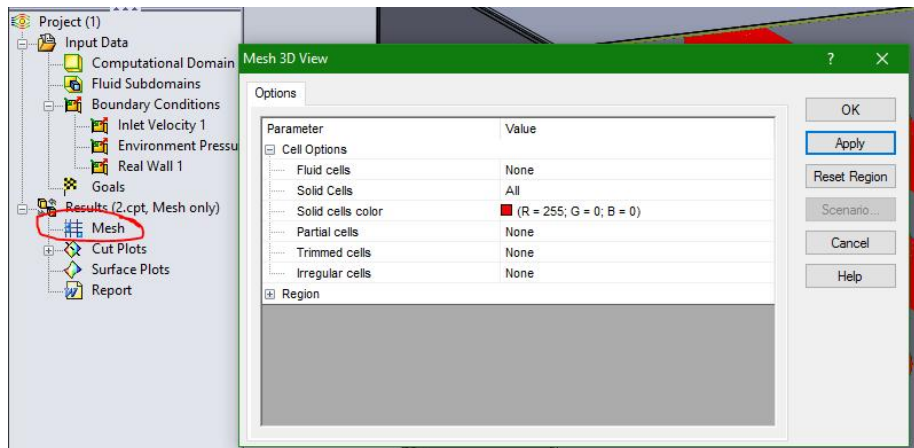


Kuva 28. Verkon laskenta



Kuva 29. Verkon laskenta

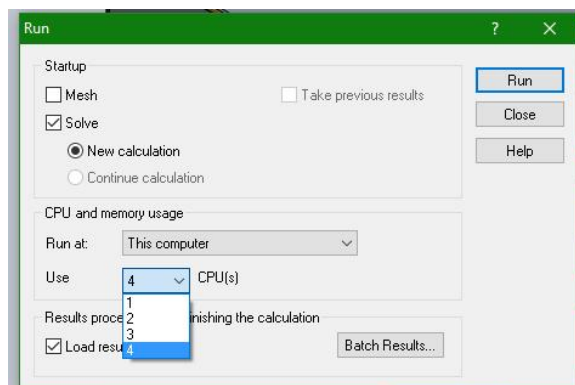
Nyt voit esikatsella tehtyä verkkoa ja parantaa sitä parhaaksi mahdolliseksi. Voit parantaa pintojen tihennyksiä.



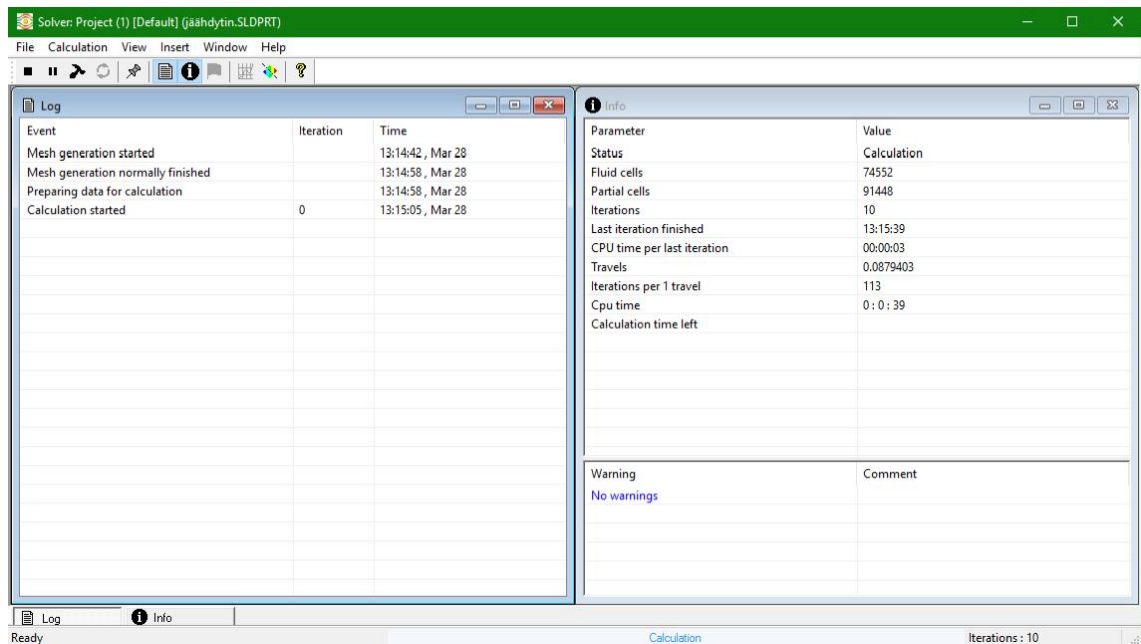
Kuva 30. Verkon asetukset

2.7 Laskennan asettelut

Voit asettaa laskennalle jo lasketun verkon, jolloin verkkoa ei tarvitse laskea uudelleen. Voit määrittää myös käytettävien prosessorin ytimien määrän.

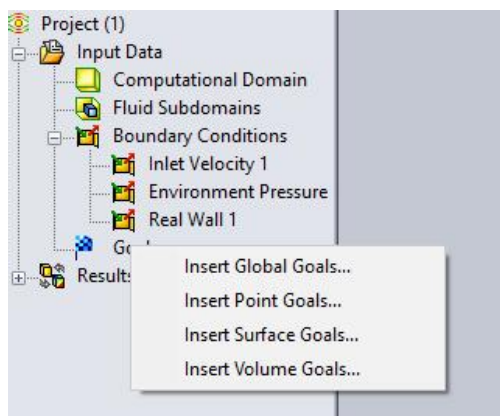


Kuva 31. Laskenta



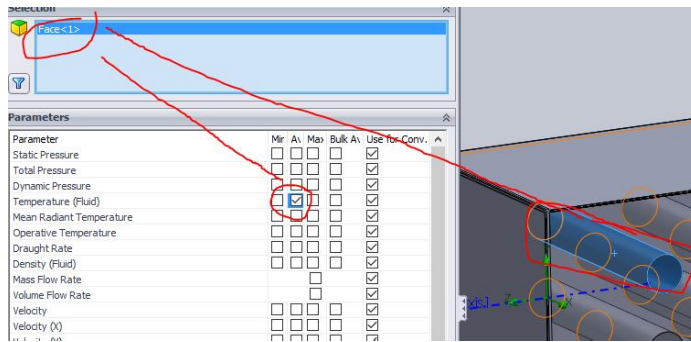
Kuva 32. Laskennan perusnäkökulma

Varmistaaksesi laskennan sujuvuuden täytyy laskentaan asettaa ”Goaleja”. Silloin voit seurata SolidWorksin laskennan aikana tuloksia ja nähdä milloin laskenta konvergoituu. Laskennan konvergoitua tulokset eivät muutu merkittävästi iteraatiokierrosten välissä. Näet myös alustavia tuloksia jo laskennan aikana.

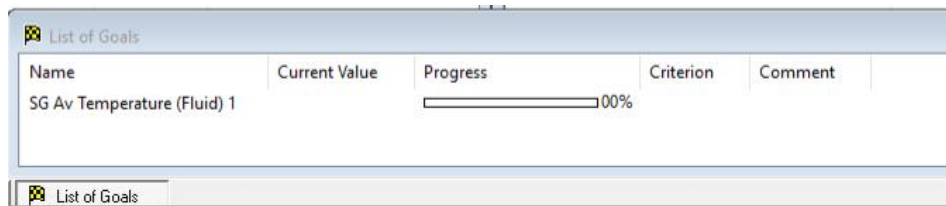


Kuva 33. Goalejen asettelu


Voit seurata esimerkiksi jonkin tietyn kohdan tarkkaa lämpötilaa asettamalla sen tavoitteeksi. Tavoitteiden asettelu myös tehostaa laskennan tarkkuutta näillä alueilla.

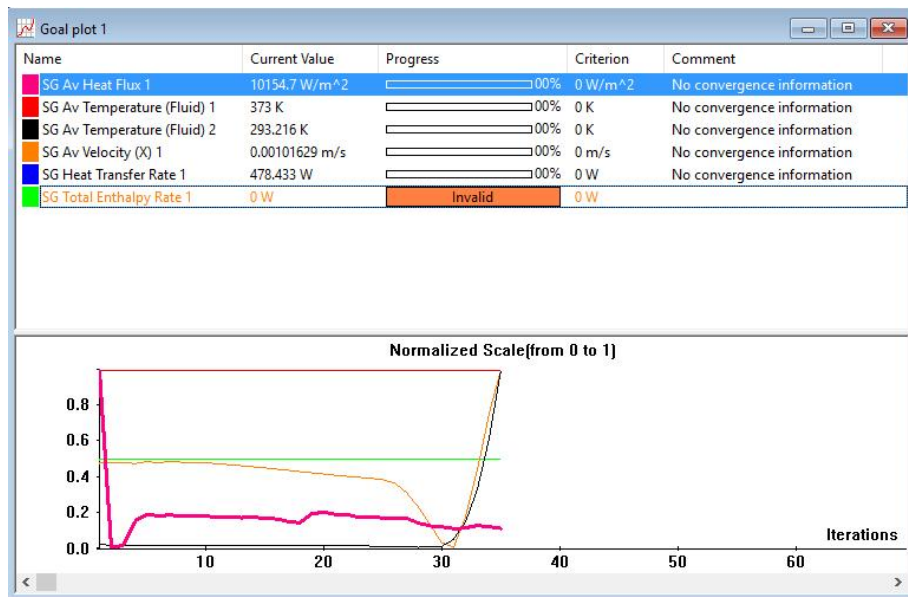


Kuva 34. Lämpötilan asettelu



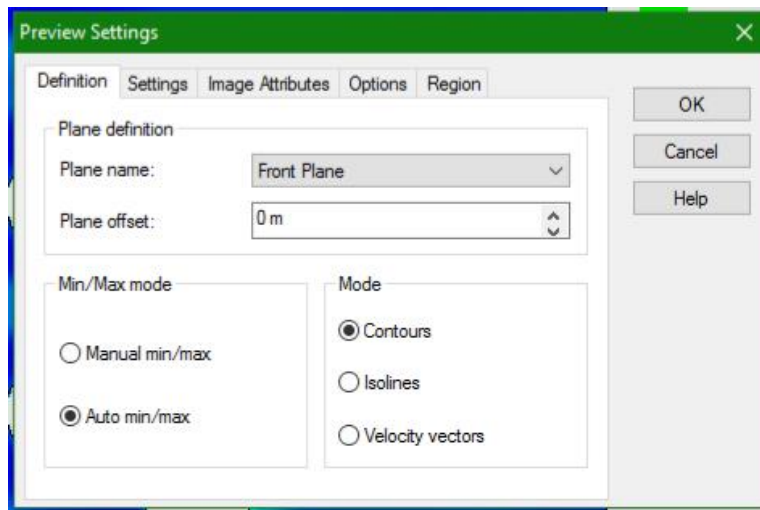
Kuva 35. Tarkka lämpötila pinnalla

Voit valita ”goaleiksi” useita tarkkailtavia pisteitä ja voit nähdä ne kaikki laskennan aikana painamalla  symbolia.

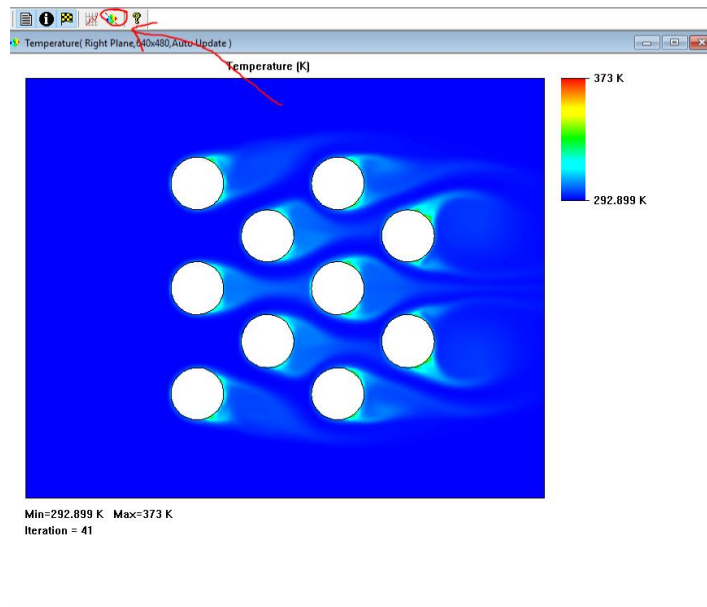


Kuva 36. Laskennan seuraaminen

Voit myös nähdä pinnoista skaalattuja kuvia laskennan aikana antamalla ohjelmalle halutun pinnan. Näet laskennan aikana kriittiset kohdat ja laskennan kehittymisen (Kuva 37 ja Kuva 38).



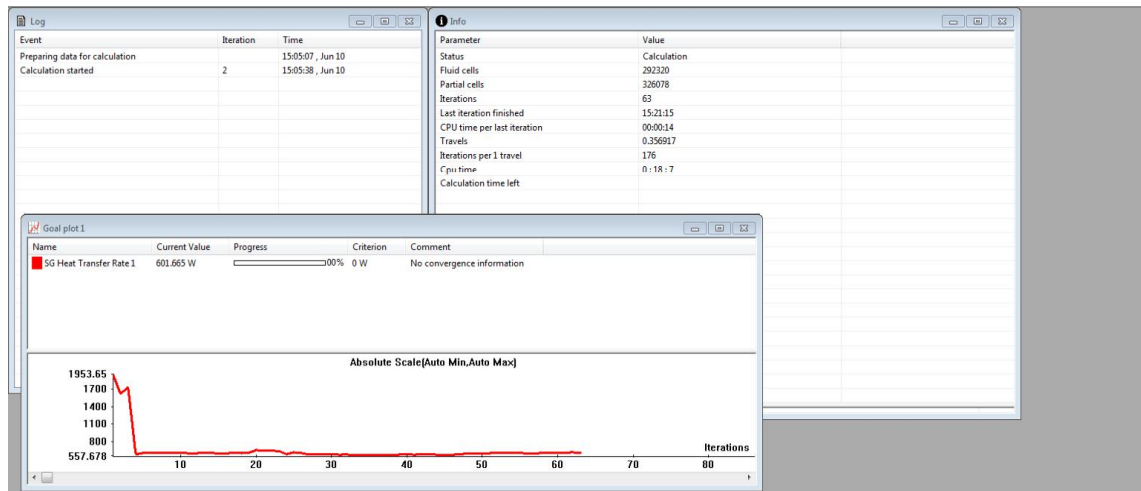
Kuva 37. Kuvan asetukset



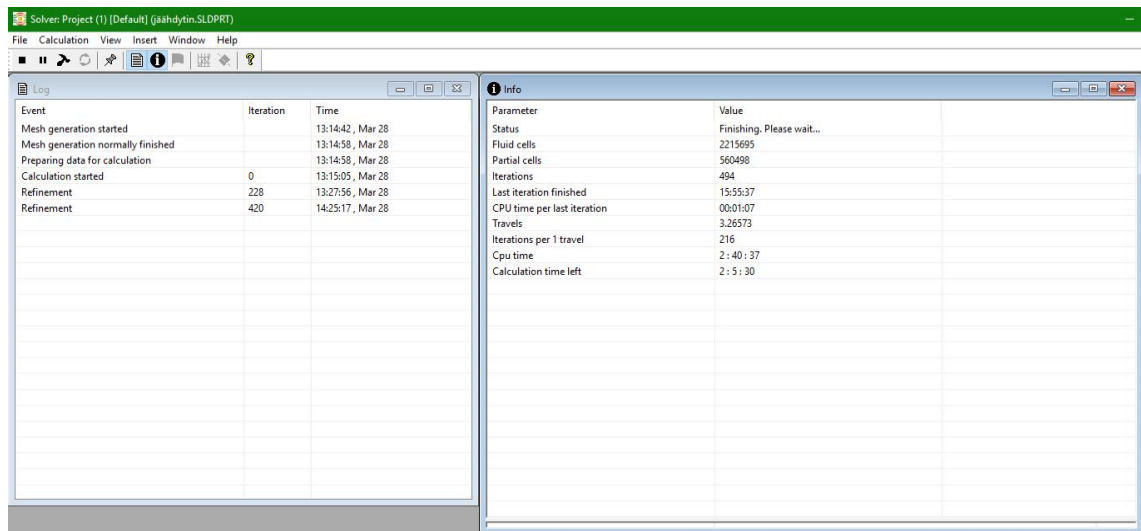
Kuva 38. Paineen muutos laskennan aikana

2.8 Tulokset

Kun laskenta on suoritettu, eli tulokset eivät ole muuttuneet merkittävästi iteraatiokierrosten välissä, tarkastetaan tulokset.

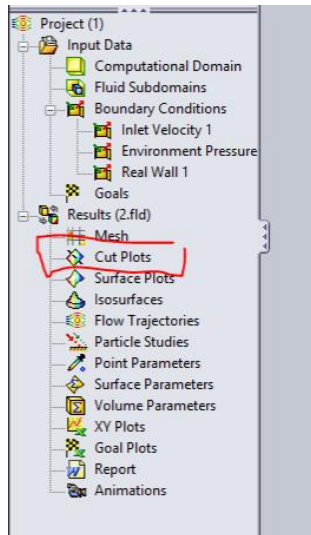


Kuva 39. Lämmönjohtavuus



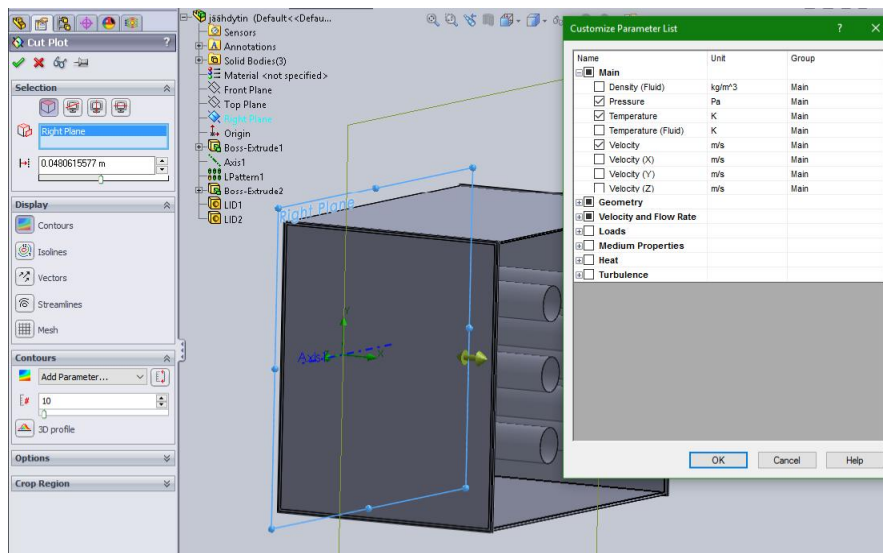
Kuva 40. Laskenta

Ensimmäinen tulos on jonkin pinnan leikkaus. Leikkauksesta voidaan pyytää mikä tahansa suure.



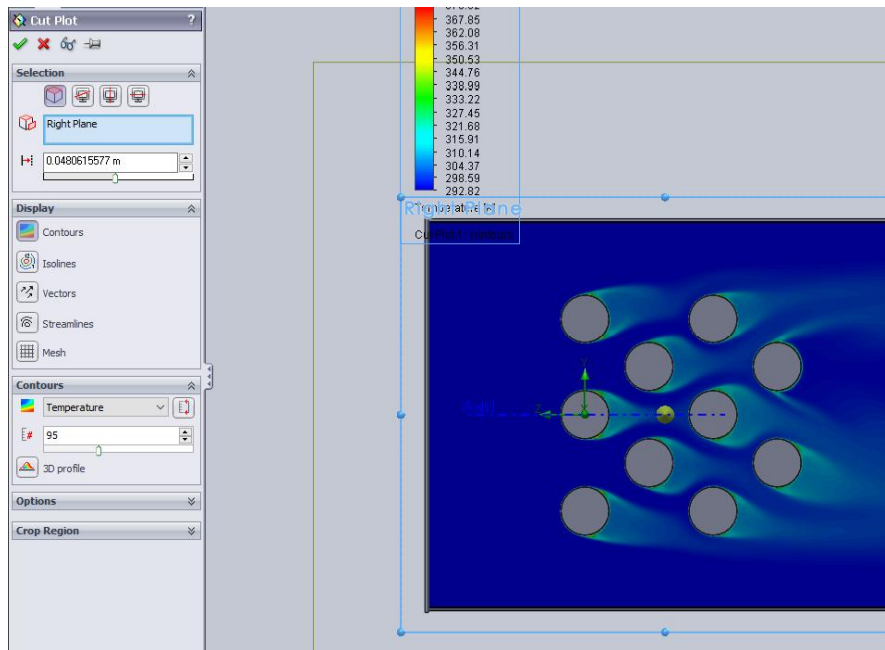
Kuva 41. Pinnan leikkaus

Jos haluttua parametria ei ole saatavilla painetaan add parameter ja valitaan halutut parametrit.

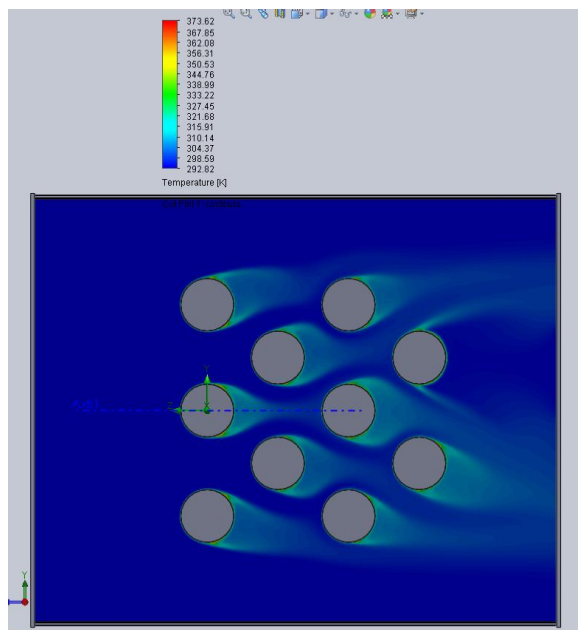


Kuva 42. Oikea pinta

Ensimmäisenä lämpötilakuva, jossa näkyy valitun leikkauksen lämpötila väriskaalattuna.

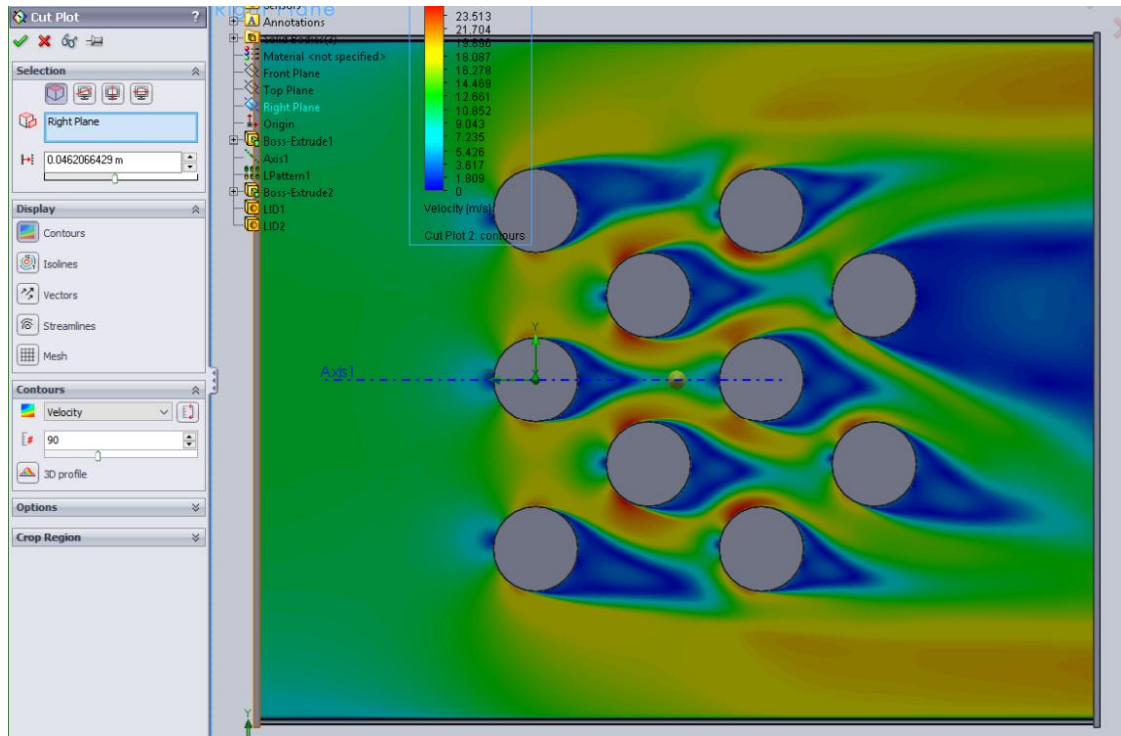


Kuva 43. Lämpötila



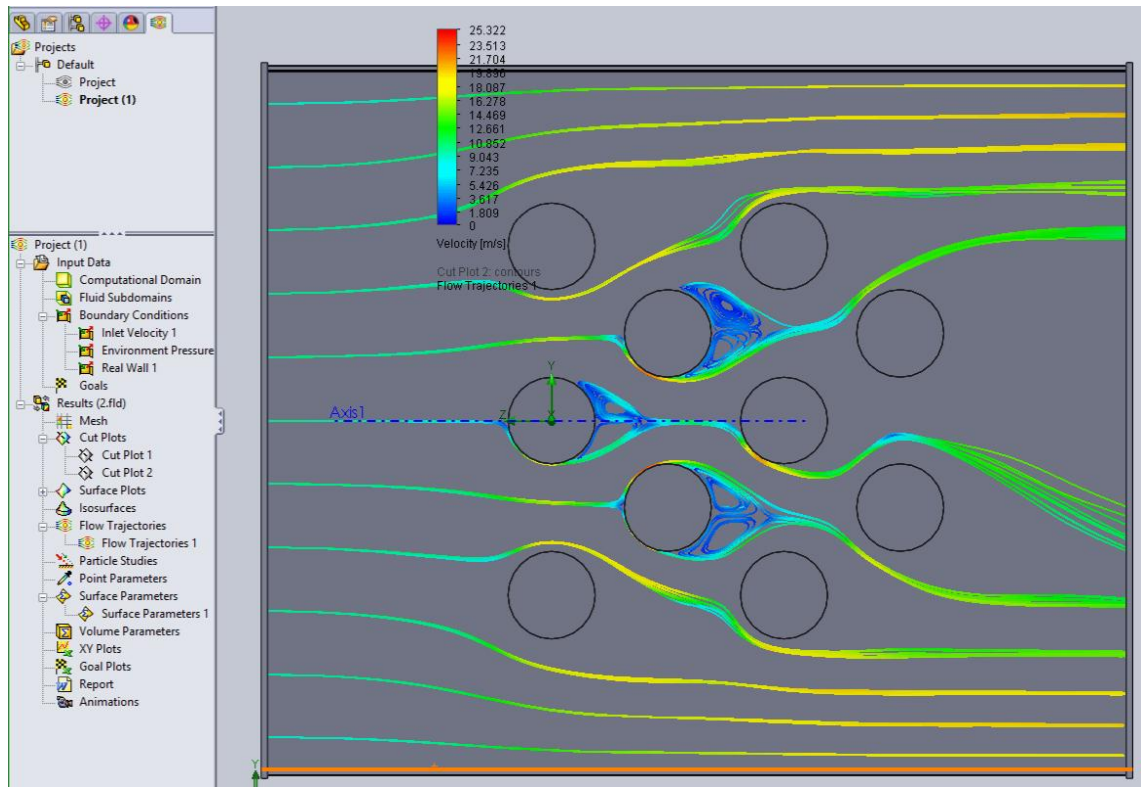
Kuva 44. Lämpötila

Virtausnopeudet otetaan Kuva 45 mukaisesti myös poikkileikkaustyökalulla.



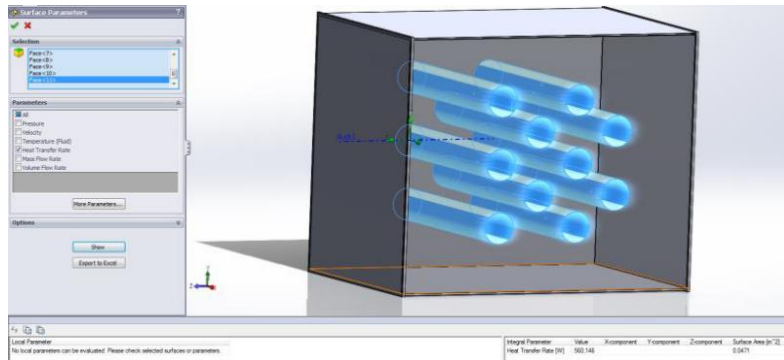
Kuva 45. Virtausnopeus

Virtauksen nopeus ja ilman radat. Kuvista voi havaita alueet, joissa virtaus on laminaaria ja missä turbulenttia.



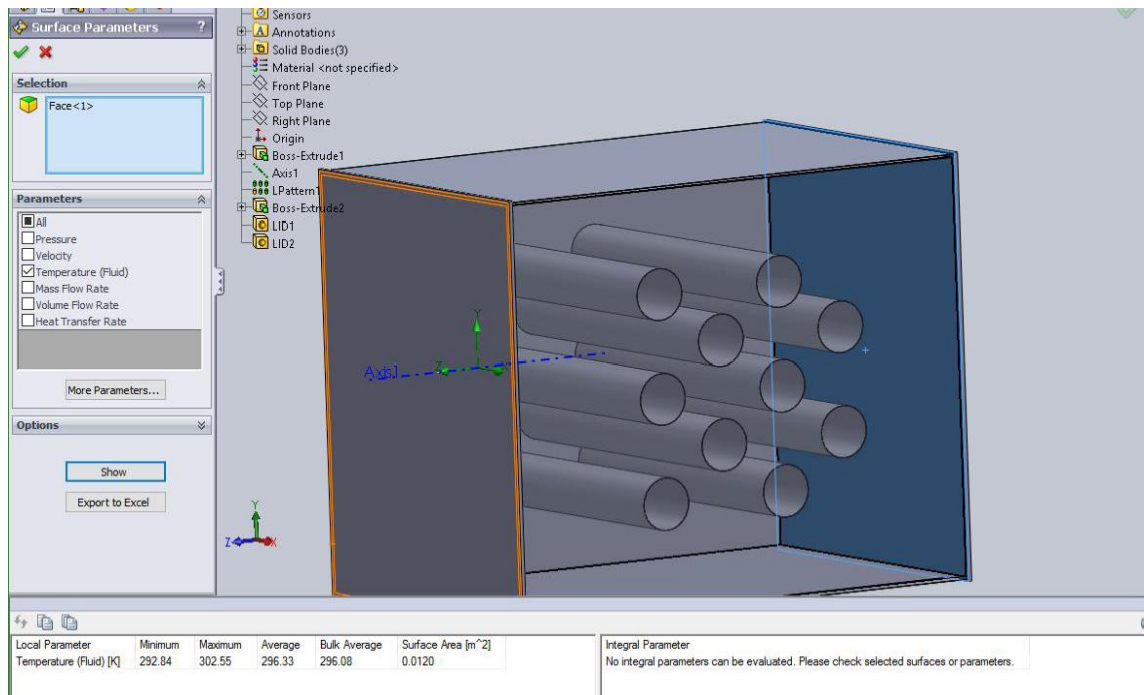
Kuva 46. Ilmaradat

Kun halutaan tietää pinnan läpi kulkevan lämmön määrä, valitaan halutut pinnat Kuva 47 mukaisesti. Tällöin saadaan tietää pinta-ala ja sen läpi kulkeva lämpö.



Kuva 47. Pinnan läpi kulkeva lämpö

Poistuvalla ilmalla saadaan tietää maksimilämpötila, minimilämpötila ja keskimääräinen lämpötila. Lämpötilat ovat näkyvissä Kuva 48 alareunassa.



Kuva 48. Poistuvan ilman lämpötilat

2.9 Huomautuksia

Tehdessä virtauslaskentaa kannattaa tehdä aina mahdollisimman tiheä verkko. Jos halutaan tehdä harvempi verkko, on silloin hyvä tehdä verkkoriippumattomuustarkastelu, eli tehdä verkosta tiheämpi kuin alkuperäinen ja laskea uudelleen. Jos tulokset eivät muuttuneet, ei verkko vaikuta laskentaan.

Jos lidsejä tehdessä patternit ilmoittavat erroria, valitaan kohta patterns ja tehdään ne uudelleen.

Jos ohjelma lopettaa toimintansa muuntaessa laskentaa 2D-tapaukseksi pitää asetuksia käydä muuttamassa

tools > options > systems options > performance and enable use software opengl [6].

Jos tapaus olisi virtaustilanne, jossa on monimutkainen putkisto, ei silloin tarvitse mallintaa ns. tuulitunnelia, vaan silloin määritetään laskenta-alue ja lasketaan outlet-tapauksena.

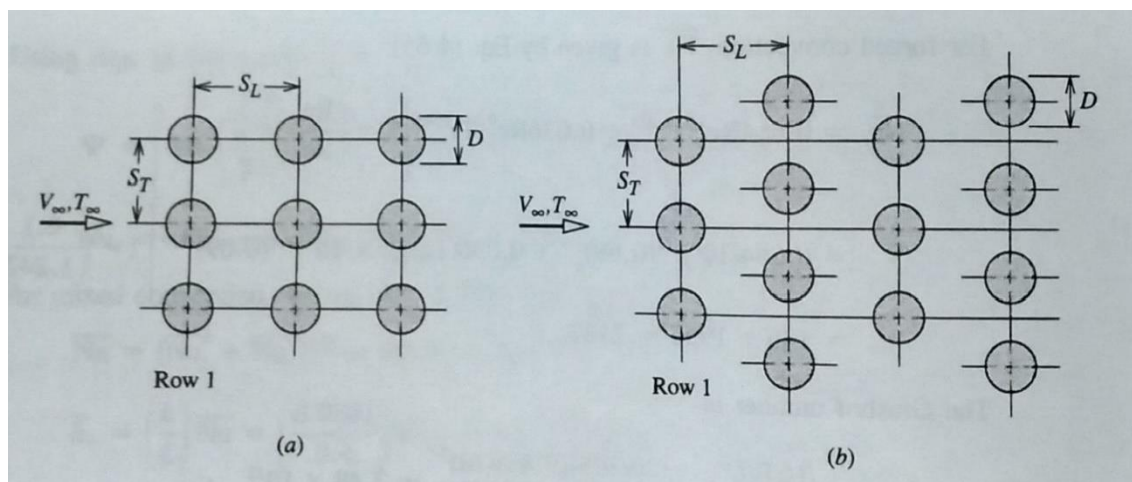
SolidWorks käyttää aina rakenteellista verkkoa, joka toimii täysin poiketen muiden laskentaohjelmistojen tavasta tehdä verkko. Heidän omat menetelmänsä korvaavat muodosta aiheutuvat virheet[5].

3. VERTAILUTULOKSET

Ohjekirjan mukaisten tulosten vertailu suoritetaan eri menetelmillä. Vertailumenetelminä käytetään saman laskentatapauksen laskemista toisella virtauslaskentatyökalulla sekä käsin laskemista kirjallisuudesta löytyvien analyyttisten kaavojen mukaan. Toisena laskentaohjelmana käytän ANSYS Fluent -ohjelmaa.

3.1 Putkipakettien teoria

Putkipakettien läpi kulkeva virtaus on pakotettua virtausta, jossa esiintyy sisäistä ja ulkoista virtausta (external and internal). Kanavassa ja jäähdyttimessä itsessään virtaus on sisäistä rakovirtausta, mutta kun tarkastellaan yksittäisen putken yli kulkevaa virtausta, on kyseessä silloin ulkopuolinen virtaustapaus. Putkipakettiteoriassa laskentamenetelmä riippuu siitä, kuinka putket on aseteltu. Mahdolliset vaihtoehdot teorian käytössä tulevat kyseeseen silloin, kun putket on aseteltu Kuva 49 mukaisesti suoriin linjoihin tai ristikkäin. Ohjekirjan tapauksessa putket olivat aseteltu ristikkäin. Putkien oletetaan usein olevan sileitä.



Kuva 49. Putkipakettiasettelu

Virtaus putkiryppäissä on monimutkainen sisältäen jokaisen putken rajakerroksen erikseen. Kuva 49 on D putkien halkaisija, S_L putkien etäisyys toisistaan putkipaketissa ja S_T putkien välinen rako.

Reynoldsin luku määritetään kahden putken välisen keskimääräisen nopeuden mukaan, joka lasketaan kaavan (4) mukaan

$$\frac{\bar{V}}{V_0} = \frac{S_T}{S_T - (\pi/4)D}. \quad (4)$$

V_0 on nopeus yhdelle putkelle vapaassa virtauksessa. A.F Mills, BASIC HEAT AND MASS TRANSFER kaavan 4.17 mukainen.[2] alla.

Lämmönsiirtokyky kasvaa ensimmäisten viiden putkipaketin aikana. Keskimääräinen nussetin luku määritetään yli 10 rivin järjestelyllä kaavan (5) mukaan

$$\overline{NU}_D^{10+} = \Phi \overline{NU}_D^1 \quad (5)$$

NU_D on nussetin luku ensimmäiselle putkiriville ja Φ putkipaketin järjestelytekijä. Dimensioton siirtotekijä lasketaan kaavalla $P_T = \frac{S_T}{D}$ ja dimensioton pituustekijä kaavalla $P_L = \frac{S_L}{D}$.

Tekijä ψ määritetään

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4P_T} \quad \text{kun } P_L \geq 1 \quad (6)$$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4P_T P_L} \quad \text{kun } P_L \leq 1 \quad (7)$$

Järjestystekijä määritetään

$$\Phi_{suorat} = 1 + \frac{0.7}{\psi^{1.5}} \frac{\frac{S_L}{S_T} - 0.3}{\left(\frac{S_L}{S_T} + 0.7\right)^2} \quad (8)$$

$$\Phi_{ristikkäin} = 1 + \frac{2}{3P_L} \quad (9)$$

Putkipaketille, jossa on vähemmän kuin 10 riviä, määritetään Nussetin-luku seuraavasti

$$\overline{NU}_D = \frac{1 + (N - 1)\Phi}{N} \overline{NU}_D^1 \quad (10)$$

Aineominaisuudet määritetään keskimääräisen fluidin lämpötilan mukaan $\frac{T_{in}-T_{out}}{2}$.

Prandtl lukuna käytetään

$n = -0.25$ lämmittäessä

$n = -0.11$ jäähdyttäessä.

Zukauskus[4] mukaan paineen aleneminen putkiryppäessä lasketaan kaavan (13) mukaan.

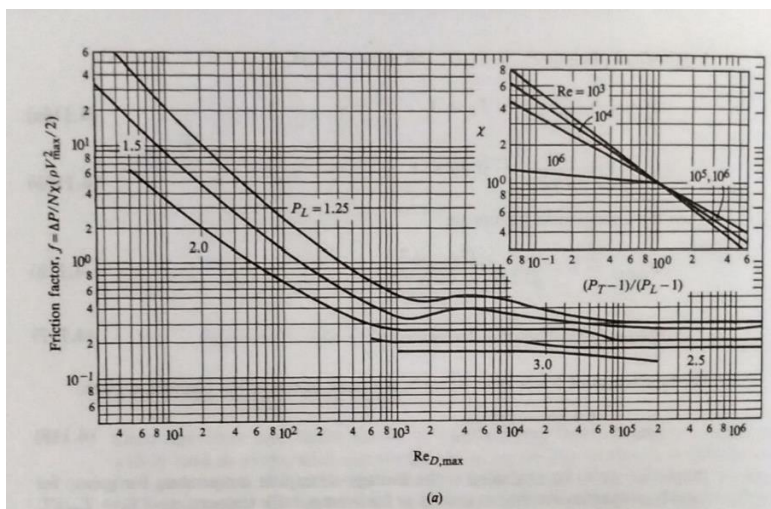
$$\Delta P = N\chi \left(\frac{\rho V_{max}^2}{2} \right) f \quad (11)$$

Kitkatekijä f ja korjaustermi χ on annettu kuvissa Kuva 50 ja Kuva 51. V_{max} on virtausnopeus putkipaketissa. Riveissä oleville paketeille nopeus lasketaan kaavan (12) mukaan.

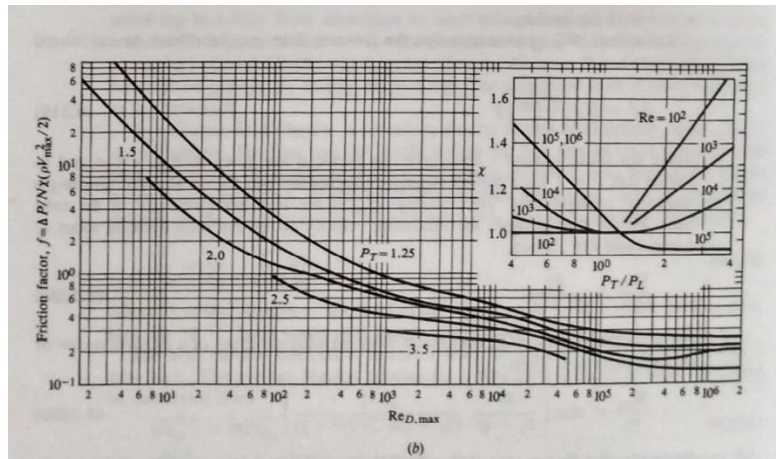
$$\frac{V_{max}}{V_0} = \frac{S_T}{S_T - D} \quad (12)$$

Ristikkäin sijoitetuille paketeille nopeus lasketaan kaavan (13) mukaan.

$$\frac{V_{max}}{V_0} = \max \left\{ \frac{S_T}{S_T - D}, \frac{\frac{S_T}{2}}{[S_L^2 + (S_T/2)^2]^{\frac{1}{2}} - D} \right\} \quad (13)$$



Kuva 50. Kitkatermi f



Kuva 51. Kitkatermi x

[2]

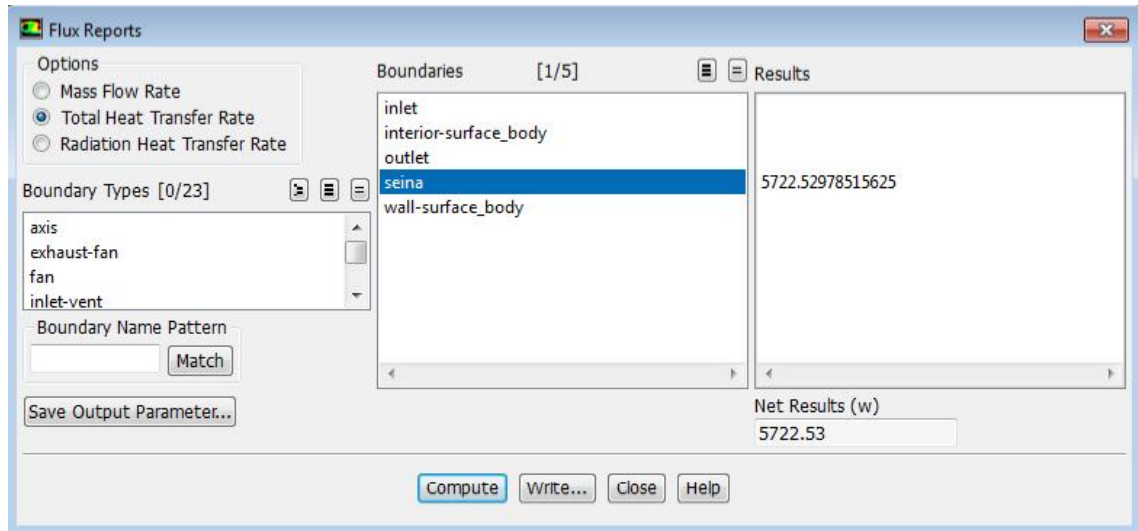
3.2 Käsinlaskenta

Käsinlaskenta suoritettiin Mathcad -ohjelmistoa avuksi käyttäen. Analyttisten kaavojen avulla lasketut tulokset löytyvät liitteestä A. Laskut perustuvat A.F. Mills Basic heat and mass transfer [2] -kirjan putkipakettien teoriaan.

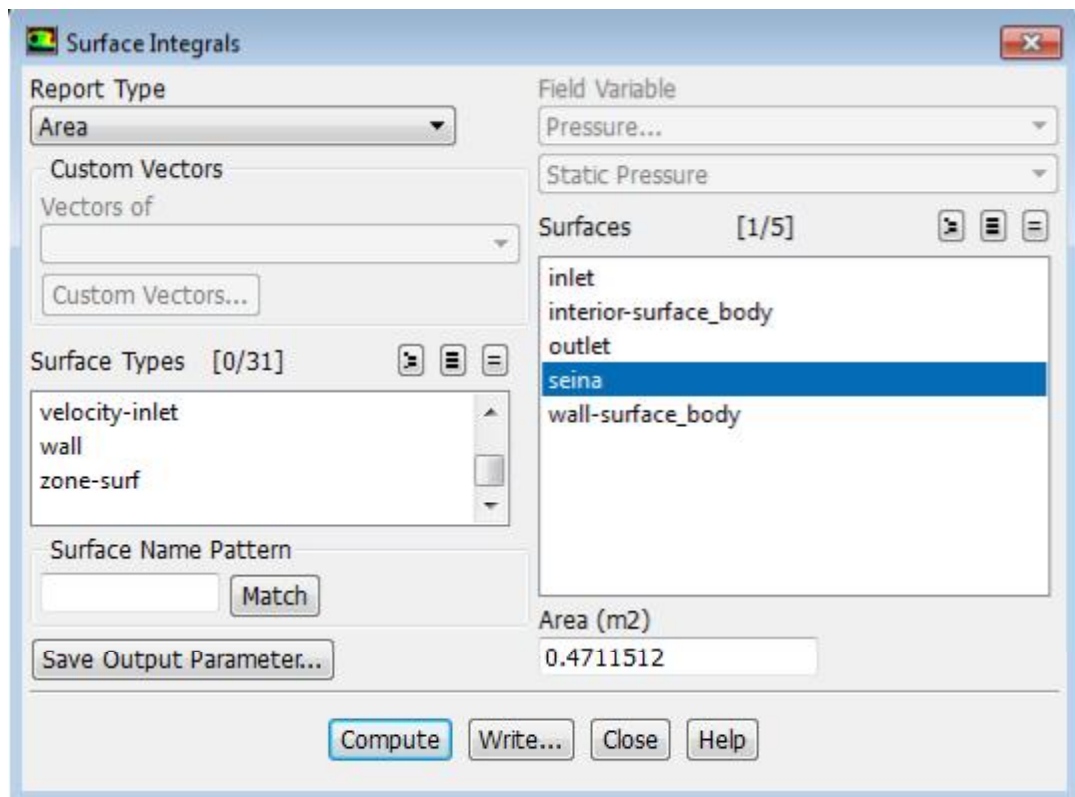
Lämmön siirto putkien pintojen yli on 527,6 W ja loppulämpötilaksi on saatu iteroimalla 296 K, joka on hyvin tarkasti sama kuin SolidWorksista saatu tulos. Tulosten ollessa lähes saman suuruiset voidaan jo heti havaita, ettei virheitä ole tullut käsinlaskennan kaavojen iteroinneissa.

3.3 ANSYS-laskenta

ANSYS -laskennan tulokset on saatu mallintamalla sama jäähdytinputkitapaus 2D mallina.



Kuva 52. ANSYS putkista siirtynyt lämpö



Kuva 53. Seinän pinta-ala

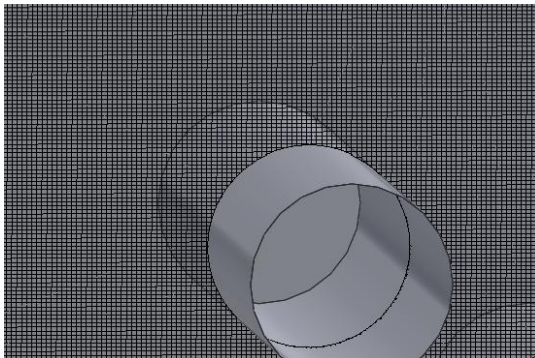
Tuloksena ANSYS-fluent ohjelmistolla on saatu samanlaiselle putkipaketille lämmön-siirtotehoksi 572,2 W.

3.4 SolidWorks

Laskennan oikeellisuudesta on hyvä tehdä verkkoriippumattomuustarkastelu. Tarkastuk-sen tavoite on ottaa selvää laskentaverkon vaikutuksesta laskentaan. Jos tulos ei muutu merkittävästi verkon kokoa muuttaessa, voidaan olettaa, että ohjelma on toiminut oikein. SolidWorksille on tehty verkkoriippumattomuustarkastelu tiheämmällä verkolla. Alku-peräisessä verkossa oli laskentakoppeja hieman alle 300 000 kappaletta ja uudessa ver-kossa niitä on yli 600 000 kpl.

Log			Info	
Event	Iteration	Time	Parameter	Value
Preparing data for calculation		12:31:34, Jun 29	Status	Calculation
Calculation started	215	12:32:55, Jun 29	Fluid cells	644616
			Partial cells	694698
			Iterations	218
			Last iteration finished	12:34:38
			CPU time per last iteration	00:00:32
			Travels	0.949756
			Iterations per 1 travel	229
			Cpu time	2 : 18 : 27
			Calculation time left	

Kuva 54. Verkkoriippumattomuus



Kuva 55. SolidWorks verkko

4. TULOSTEN VERTAILU

SolidWorksin työkalu on helppo käyttää ja käyttäjän on helppoa oppia tekemään havainnollisia kuvia. Ohjelman huono puoli on, että käyttäjä ei saa tietoa siitä, miten SolidWorks oikeasti käyttää verkkoa.

Eri laskentamenetelmillä tulosten erot olivat suhteellisen pieniä. Eri laskentamenetelmien erot esitetään taulukossa 1.

***Taulukko 1.** Tulokset koottuna*

SolidWorks	560,1 W
ANSYS Fluent	572,2 W
Kirjallisuuden perusteella käsinlaskut	527,5 W

SolidWorksin laskentaa voidaan pitää tällöin luotettavana vaikkakin käsinlasku antaa tuloksena varovaisemman arvion lämmönsiirtotehosta. Poikkeama näiden laskentamenetelmien tuloksissa on 32,6 W, joka on noin 6 %.

5. YHTEENVETO

Ohjekirja eteni systemaattisesti lisäosan vaatimassa järjestyksessä. Tällöin käyttäjän on helppo seurata ohjetta ja samalla suorittaa tarvittavat toiminnot. Reunaehdot saadaan suoraan omasta mallinnustapauksesta ja ne on tunnettava ennen mallintamisen aloittamista. Virtaustapauksen voi päätellä helposti ja lisäosa itsessään jo ohjaa käyttäjää valitsemaan laskentaan sopivan tapauksen. Ohjekirja antaa hyvät alkuohjeet verkon mallinnukseen, mutta käyttäjän on hyvä tarkastella niitä kriittisesti, jotta valittu verkon tiheys sopii oman tietokoneen laskentatehon ja käytettävissä olevan ajan puitteisiin.

Laskennan asettelussa on hyvä tietää mitä tuloksia haluaa ohjelman laskevan. Tällöin voi jo laskennan aikana seurata tulosten kehittymistä. Tulosten poikkeamien pysyessä vähäisinä tulosten laskennan aikana voi käyttäjä helposti todeta laskennan onnistuneen jo oletettua lyhyemmässä ajassa. Havainnollisten kuvien ja tulosten määrittämiseen ohjekirja antaa hyvät esimerkit ja näyttävät kuvat esimerkkilämmönsiirtimen tapauksesta.

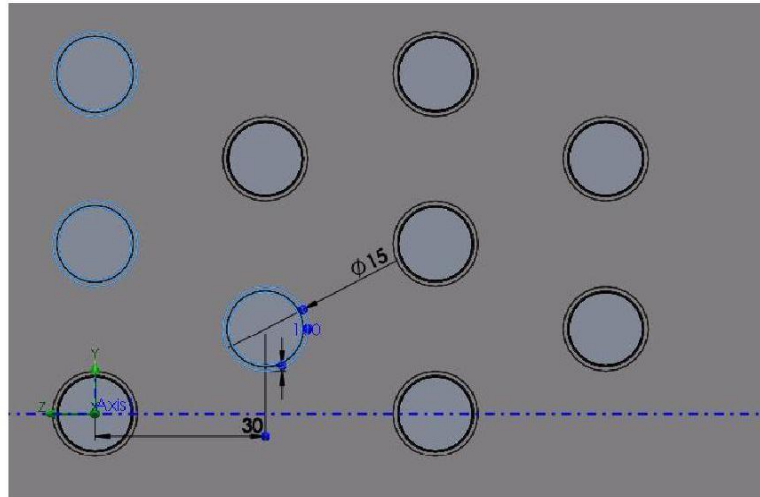
Putkipakettien teoriaan on hyvä tutustua ohjekirjaa käyttäessä, sillä teorian tunteminen helpottaa ymmärtämään tuloksia ja niiden muodostumista. Laskentamenetelmät eroavat täysin käsinlaskennassa ja lisäosan käyttämässä menetelmässä, minkä vuoksi on hyvä kiinnittää huomiota tulosten eroavaisuuksiin. Tulosten erojen ei pitäisi olla suuria, joten mahdolliset virheet on helppo havaita vertailemalla tuloksia keskenään. Lopuksi tehtäessä verkkoriippumattomuustarkastelu lisäosalla huomattiin, että alkuperäinen valittu verkko oli riittävän tiheä laskennan suorittamiseen.

Tulosten vertailussa huomataan, että kolmella tavalla laskettaessa erot ovat pieniä ja jokainen menetelmä voidaan todeta luotettavaksi poissulkematta mitään menetelmistä. Saatu 6 % tulosten ero voi reaalitylanteessa syntyä jo monestakin seikasta, kuten ilman ominaisuuksien muuttumisesta ja fluidin virtausta häiritsevistä ulkoisista tekijöistä.

LÄHTEET

- [1] CFD Online, Turbulence intensity, verkkosivu, saatavissa (viitattu 9.6.2017): https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity
- [2] A.F Mills, BASIC HEAT AND MASS TRANSFER, 2. Painos, Prentice Hall, New Jersey, 1999, 315-324 s.
- [3] SolidWorks, Numerical Basis of CAD-Embedded CFD White Paper, verkkojulkaisu, saatavissa (8.6.2017): https://www.solidworks.com/sw/docs/Flow_Basis_of_CAD_Embedded_CFD_Whitepaper.pdf
- [4] A. Zukauskas, Principles of Enhanced Heat Transfer in Tube Banks in Cross-flow, Hemisphere, New York, 1988.
- [5] SolidWorks, ADVANCED BOUNDARY CARTESIAN MESHING TECHNOLOGY IN SOLIDWORKS FLOW SIMULATION, verkkojulkaisu, saatavissa (8.6.2017): <http://www.goengineer.com/wp-content/uploads/2014/04/Enhanced-Boundary-Cartesian-Meshing-Technology-in-SolidWorks-Flow-Simulation.pdf>
- [6] SolidWorks, SolidWorks Forum, forum thread, saatavissa (8.6.2017): <http://my.solidworks.com/reader/forumthreads/90374/solidworks-freezes-when-trying-to-change-computational-domain-in-flow-simulation>

LIITE A: MATHCAD, KÄSINLASKENNAN TULOKSET



Sisään tuleva ilma on huoneen lämpöistä 293K

Putkien pintalämpötila 100 astetta 373K

$$v := 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$S_T := 30\text{mm} \quad L := 100\text{mm}$$

$$S_L := 30\text{mm} \quad H := 100\text{mm}$$

$$D := 15\text{mm}$$

$$P_T := \frac{S_T}{D} = 2$$

$$P_L := \frac{S_L}{D} = 2 \quad \text{eli millss 4.115a koska } PL > 1$$

$$\psi := 1 - \frac{\pi}{4 \cdot P_T} = 0.607$$

$$T_{\text{putki}} := 373\text{K}$$

$$T_{\text{ilma}} := 293\text{K}$$

$$T_{\text{arvaus_loppulämpötila}} := 324\text{K}$$

$$T_r := \frac{1}{2} \left(T_{\text{putki}} + \frac{T_{\text{ilma}} + T_{\text{arvaus_loppulämpötila}}}{2} \right) = 340.75\text{K}$$

$$v_{Tr} := 19.32 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{mills taulukko A.7}$$

$$k := 0.0294 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{mills taulukko A.7}$$

$$c_p := 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{mills taulukko A.7}$$

$$Pr := 0.69$$

$$\rho := 1.042 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{mills taulukko A.7}$$

$$v := v_{Tr} \frac{S_T}{S_T - \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot D} = 16.466 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Phi := 1 + \frac{2}{3 \cdot P_L} = 1.333 \quad \text{Mills 4.4117 ristikkäin rivit}$$

$$Re_D := \frac{v \cdot D}{v_{Tr}} = 1.278 \times 10^4$$

$$\text{Nu}_D := 0.3 + \frac{0.62 \cdot \text{Re}_D^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{\text{Pr}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{4}}} = 54.588$$

$$\text{Re} < 10^4 \text{ mills } 4.71a$$

$$\text{Nu}_{D10} := \Phi \cdot \text{Nu}_D = 72.784$$

$$h_c := \frac{\text{Nu}_{D10} \cdot k}{D}$$

$$h_c = 142.657 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$A_{\text{putken_ala}} := \pi \cdot D \cdot L = 4.712 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{\text{kanava}} := L \cdot H$$

$$m_{\text{virta}} := V \cdot \rho \cdot A_{\text{kanava}} = 0.172 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$A_{\text{Tube_Bank}} := A_{\text{putken_ala}} \cdot 5 = 0.024 \text{ m}^2$$

$$T_{\text{ulos}} := T_{\text{putki}} - (T_{\text{putki}} - T_{\text{ilma}}) \cdot e^{-\frac{h_c \cdot A_{\text{Tube_Bank}}}{m_{\text{virta}} \cdot c_p}} = 296.053 \text{ K} \quad \text{kaksi tubebankkia}$$

Tulosta voi parantaa muuttamalla arvattua lämpötilaa ja katso malla ilmalle uudet arvot

$$\Delta T := T_{\text{putki}} - \frac{T_{\text{ulos}} + T_{\text{ilma}}}{2} = 78.474 \text{ K} \quad \text{mills taulukko A.7}$$

Eli lämmönsiirtokyky

$$Q := h_c \cdot A_{\text{Tube_Bank}} \cdot \Delta T = 263.772 \text{ W}$$

Iterointi kierros 2

$$S_{T_1} := 30\text{mm} \quad L := 100\text{mm}$$

$$S_L := 30\text{mm} \quad H := 100\text{mm}$$

$$D := 15\text{mm}$$

$$P_{T_1} := \frac{S_T}{D} = 2$$

$$P_{L_1} := \frac{S_L}{D} = 2 \quad \text{eli millss 4.115a koska } PL > 1$$

$$\psi := 1 - \frac{\pi}{4 \cdot P_T} = 0.607$$

$$T_{\text{putki}} := 373\text{K}$$

$$T_{\text{ilma}} := 293\text{K}$$

$$T_{\text{arvaus_loppulämpötila}} := 263\text{K}$$

$$T := \frac{1}{2} \left(T_{\text{putki}} + \frac{T_{\text{ilma}} + T_{\text{arvaus_loppulämpötila}}}{2} \right) = 325.5\text{K}$$

$$\nu_{T_1} := 19.32 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{mills taulukko A.7}$$

$$k := 0.0294 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{mills taulukko A.7}$$

$$c_p := 1007 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{mills taulukko A.7}$$

$$Pr := 0.69 \quad \text{mills taulukko A.7}$$

$$\rho := 1.042 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{mills taulukko A.7}$$

$$V := v \cdot \frac{S_T}{S_T - \left(\frac{\pi}{4} \right) D} = 16.466 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Phi := 1 + \frac{2}{3 \cdot P_L} = 1.333 \quad \text{Mills 4.4117}$$

ristikkäin rivit

$$Re_D := \frac{V \cdot D}{\nu_{Tr}} = 1.278 \times 10^4$$

$$Nu_D := 0.3 + \frac{0.62 \cdot Re_D^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}}$$

Re < 10⁴ mills 4.71a

$$Nu_{D,0} := \Phi \cdot Nu_D = 72.784$$

$$h_{ov} := \frac{Nu_D 10^{-k}}{D}$$

$$h_c = 142.657 \frac{1}{m} \cdot \frac{W}{m \cdot K}$$

$$A_{putken_ala} := \pi \cdot D \cdot L = 4.712 \times 10^3 \cdot mm^2$$

$$A_{kanava} := L \cdot H$$

$$m_{virta} := V \cdot \rho \cdot A_{kanava} = 0.172 \frac{kg}{s}$$

$$A_{Tube_Bank} := A_{putken_ala} \cdot 5 = 0.024 m^2$$

$$T_{tulov} := T_{putki} - (T_{putki} - T_{ilma}) \cdot e^{\frac{-h_c \cdot A_{Tube_Bank} \cdot 2}{m_{virta} \cdot c_p}} = 296.053 \text{ K} \quad \text{kaksi tubebankkia}$$

Tulosta voi parantaa muuttamalla arvattua lämpötilaa ja katsomalla ilmalle uudet arvot

$$\Delta T := T_{putki} - \frac{T_{ulos} + T_{ilma}}{2} = 78.474 \text{ K}$$

mills taulukko A.7

Eli lämmönsiirtokyky

$$Q := h_c \cdot A_{Tube_Bank} \cdot \Delta T = 263.772 \text{ W}$$

Putkiryppäitä on kaksi peräkkäin eli lämmönsiirto on:

$$Q_{jäähdytin} := Q \cdot 2 = 527.544 \text{ W}$$