

POBOLJŠANJE MODELIRANJA PRIJENOSA TOPLINE U BATERIJSKIM SUSTAVIMA HLAĐENIM TEKUĆINOM

Rogović, Dan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:843307>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**POBOLJŠANJE MODELIRANJA PRIJENOSA TOPLINE U
BATERIJSKIM SUSTAVIMA HLAĐENIM TEKUĆINOM**

Rijeka, srpanj, 2024.

Dan Rogović

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**POBOLJŠANJE MODELIRANJA PRIJENOSA TOPLINE U
BATERIJSKIM SUSTAVIMA HLAĐENIM TEKUĆINOM**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Komentor: v. asist. dr. sc. Ivana Lučin

Rijeka, srpanj, 2024.

Dan Rogović

0035216311

Rijeka, 18.03.2024.

Zavod: Zavod za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo
Predmet: Računarska dinamika fluida

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Dan Rogović (0035216311)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva (1100)
Modul: Računarska mehanika i inženjerstvo (1120)

Zadatak: **Poboljšanje modeliranja prijenosa topline u baterijskim sustavima hlađenim tekućinom / Enhancing Heat Transfer Modelling In Liquid Cooled Battery Systems**

Opis zadatka:

Rezultati numeričkih simulacija strujanja fluida u 3D kanalima za hlađenje baterijskih sustava će se iskoristiti za bolju procjenu analitičkih korekcijskih faktora koji se koriste za predikciju prijenosa topline u 0D i 1D jednostavnim i brzim numeričkim proračunima. U tu svrhu potrebno je napraviti: pregled literature, izraditi geometriju i numeričku mrežu, dostići tzv. "mesh independent solution" te nadalje napraviti prethodno definirani skup numeričkih simulacija. Temeljem dobivenih rezultata potrebno je odrediti nove vrijednosti korelacijskih faktora koji će se ubuduće koristiti za 0D/1D proračune u projektiranju baterijskih sustava.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
prof. dr. sc. Zoran Čarija

Komentor:
dr. sc. Ivana Lučin

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:
izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

IZJAVA

Izjavljujem da sam ja, Dan Rogović, sukladno članku 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci samostalno izradio diplomski rad naziva „Poboljšanje modeliranja prijenosa topline u baterijskim sustavima hlađenim tekućinom“ uz pomoć mentora prof. dr. sc. Zorana Čarije i komentorice v. asist. dr. sc. Ivane Lučin, znanja stečenog tijekom fakultetskog obrazovanja te koristeći navedenu literaturu.

Srpanj, 2024.

Dan Rogović

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Čariji te posebno v. asist. dr. sc. Ivani Lučin na usmjeravanju prilikom izrade diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem Rimac Technologyu na ukazanoj prilici pri odabiru teme za diplomski rad. Posebno bih želio istaknuti podršku i savjete koje su mi pružili moji mentori: Borna Šojat, Karl Hohenberg i Marko Tomić. Njihovo strpljenje, znanje i profesionalnost doprinijeli su ne samo kvaliteti ovog rada, već i mom osobnom i profesionalnom razvoju.

Također, želim se zahvaliti svojoj majci i bratu što su uvijek bili tu uz mene, a posebno u najtežim trenucima. Bez njihove potpore ne bih bio tu gdje jesam.

Na kraju, volio bih se zahvaliti svojoj djevojci Eni na konstantnoj potpori.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. MATEMATIČKI MODEL	3
2.1. Računarska dinamika fluida	3
2.2. Jednadžba protoka fluida	5
2.3. Konjugirani prijenos topline	5
2.4. Toplinski granični uvjeti.....	6
2.5. Spregnuti toplinski granični uvjet	6
2.6. Metoda konačnih volumena	7
2.7. Diskretizacija	8
2.8. Jednadžba tlaka.....	10
3. DEFINIRANJE GEOMETRIJE I ANALITIČKI PRORAČUN	11
3.1. Definiranje geometrije cjevovoda	11
3.2. Analitički proračun	12
3.3. Definiranje geometrije ravnog cjevovoda	13
3.4. Definiranje geometrije zmijolikog cjevovoda	14
3.5. Definiranje ispitanih slučajeva za geometrije ravnog i zmijolikog cjevovoda	15
4. IZRADA NUMERIČKE MREŽE	16
4.1. Izrada numeričkih mreža za ravni cjevovod	16
4.1.1. Izrada polihedralne numeričke mreže	16
4.1.2. Izrada strukturirane numeričke mreže.....	21
4.2. Izrada numeričkih mreža za zmijoliki cjevovod	23
4.3. Mesh independence study	25
5. POSTAVKE I PRIPREMA SIMULACIJE	32
5.1. Pre-processing.....	32
6. VIZUALIZACIJA I ANALIZA REZULTATA.....	35
6.1. Ravni cjevovod polihedralne mreže grijane s gornje strane	35
6.1.1. Protok fluida $Q = 1.6 \text{ L/min}$	35
6.1.2 Protok fluida $Q = 3.2 \text{ L/min}$	38
6.1.3. Protok fluida $Q = 4.8 \text{ L/min}$	41
6.2. Ravni cjevovod polihedralne mreže grijane sa gornje i donje strane	42
6.2.1. Protok fluida $Q = 1.6 \text{ L/min}$	42
6.2.2. Protok fluida $Q = 3.2 \text{ L/min}$	44
6.2.3. Protok fluida $Q = 4.8 \text{ L/min}$	46
6.3. Ravni cjevovod polihedralne mreže grijane sa svih strane	48

6.3.1. Protok fluida $Q = 1.6 \text{ L/min}$	48
6.3.2. Protok fluida $Q = 3.2 \text{ L/min}$	50
6.3.3. Protok fluida $Q = 4.8 \text{ L/min}$	52
6.4. Ravni cjevovod strukturirane mreže	54
6.4.1. Zagrijavanje <i>coldplate-a</i> sa gornje strane	54
6.4.2. Zagrijavanje <i>coldplate-a</i> sa gornje i donje strane	57
6.4.1. Zagrijavanje <i>coldplate-a</i> sa svih strana	58
6.6. Zmijoliki cjevovod	60
6.6.1. Zmijoliki cjevovod za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	60
6.6.2. Zmijoliki cjevovod za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	63
6.6.3. Zmijoliki cjevovod za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	65
7. USPOREDBA REZULTATA	69
7.1. Usporedba jednog kanala ravnog cjevovoda s literaturom	69
7.1.1. Zagrijavanje jednog kanala cjevovoda sa svih strana	70
7.1.2. Zagrijavanje jednog kanala cjevovoda sa gornje i donje strane	71
7.2. Usporedba eksperimentalnih i simulacijskih rješenja za jedan kanal	73
7.3. Usporedba rezultata ravnog cjevovoda	74
7.3.1. Usporedba rezultata između Slučaja	74
7.3.2. Usporedba rezultata između eksperimenta i simulacije	74
7.4. Usporedba rezultata zmijolikog cjevovoda s literaturom	77
9. ZAKLJUČAK	79
LITERATURA	80
POPIS SLIKA	81
POPIS TABLICA	86
POPIS GRAFOVA	89
SAŽETAK	90
ABSTRACT	91

1. UVOD

U današnje doba je sve veća potražnja za električnim automobilima. Razlog tomu je potreba za smanjenjem emisije štetnih plinova koje proizvode klasični automobili s unutarnjim izgaranjem. Glavna komponenta električnih automobila je električna baterija, koj kojih je česti problem njihovo zagrijavanje i potreba za prikladnim hlađenjem. Jedan od glavnih elemenata u sustavu hlađenja električnih baterija je *Coldplate*.

Coldplate je komponenta koja se nalazi u sustavima za hlađenje električnih baterija automobila. Sastoji se od kanala koji mogu biti raznih izvedbi poput ravnih ili zmiolikih. Najčešći materijali koji se koriste za izradu *coldplate-a* su metali s dobrom vodljivosti poput aluminija. Sastoji se od kanala kroz koje protječe fluid koji služi za prijenos topline.

Sam *coldplate* koristi se za indirektno hlađenje, gdje fluid koji može biti električno vodljiv, protječe kroz kanale i time prenosi toplinu koja konvekcijom prelazi sa stijenke *coldplatea* na sami fluid koji cirkulira i odvodi toplinu. Princip njegovog rada može se opisati na primjeru hlađenja električne baterije u automobilu. Prednosti ovakvog sustava su visoka učinkovitost prilikom hlađenja kao i njihov kompaktni dizajn jer mogu biti dizajnirane tako da zauzimaju jako malo prostora u odnosu na neke druge oblike hlađenja poput ventilatora. Izuzetno su pouzdani te se time smanjuje rizik od eventualnog kvara. Također, mogu koristiti termofluid vrlo povoljnih svojstava. Ovaj diplomski rad bavi se analizom *coldplate-a* za dvije različite izvedbe geometrije te za tri različita slučaja zagrijavanja s tri različite ulazn protoka. Također, osim analize *coldplate-a* analizirat će se sami fluid te će ti rezultati biti uspoređeni s literaturom: „Laminar Flow Forced Convection Heat Transfer and Flow Friction in Straight and Curved Ducts – A Summary of Analytical Solutions“, autora: R. K. Shah i A. L. London [1] prema kojoj je i napravljena geometrija cjevovoda unutar *coldplate-a*. U sklopu literature, navedene su ekperimentalno dobiveni Nusseltovi brojevi za različite izvedbe zagrijavanja fluida. Cilj rada je usporediti eksperimentalne vrijednosti s vrijednostima dobivenim putem numeričkih simulacija. U slučaju odstupanja rezultata između eksperimentalnih rješenja i rješenja dobivenih numeričkim simulacijama potrebno je uvesti korekcijske faktore u cilju poboljšanja modeliranja prijenosa topline. U drugom poglavlju opisana je računarska dinamika fluida te matematički modeli koji se koriste za provođenje numeričkih simulacija strujanja fluida. U trećem poglavlju definirana je geometrija koja je dobivena analitičkim proračunom cjevovoda pomoću literature [1].

U četvrtom poglavlju su opisane postavke korištene pri izradi numeričkih mreža.

U petom poglavlju su definirane postavke koje su se koristile prilikom izrada simulacija. Također, u sklopu petok poglavlja napravljen je *Mesh independence study* pomoću kojega su izrađene tri različite numeričke mreže koje su se razlikovale po broju elemenata. Ukupno su izrađene tri mreže: gruba, srednja i fina numerička mreža te su njihovi rezultati prikazani konturama temperatura, a

rezultati izraženi u tablicama u kojima su uspoređeni rezultati. U šestom poglavlju prikazani su rezultati temperatura pomoću kojih su se računali koeficijenti prijelaza topline i Nusseltov broj. Osim toga, grafički su prikazane konture temperatura te strujnice brzina. U sedmom poglavlju obrađena je usporedba eksperimentalnih rezultata iz navedene literature [1] sa simulacijskim rezultatima za različite slučajeve zagrijavanja i protoka. Također u ovom poglavlju su uspoređeni i rezultati pojedinih slučajeva zagrijavanja za različite protoke. Nakon usporedbe rezultata, definirani su korekcijski faktori. Na kraju, u osmom poglavlju predstavljen je zaključak koji je objedinio cijeli rad.

2. MATEMATIČKI MODEL

2.1. Računarska dinamika fluida

Povijesno gledano, počeci računarske dinamike fluida (eng. Computational Fluid Dynamics) datiraju od sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Danas se može precizno i efikasno analizirati strujanje i dinamika fluida. Razvoj računarske dinamike fluida omogućio je smanjenje troškova prilikom razvoja prototipova i kompleksnih modela. Kroz ovo poglavlje opisan će se matematički model korišten za simulaciju strujanja fluida unutar *coldplate-a*.

Režim strujanja definira se pomoću Reynoldsovog broja. Reynoldsov broj je bezdimenzijska veličina koja se koristi za karakterizaciju različitih režima strujanja fluida [2].

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (2.1)$$

Gdje je:

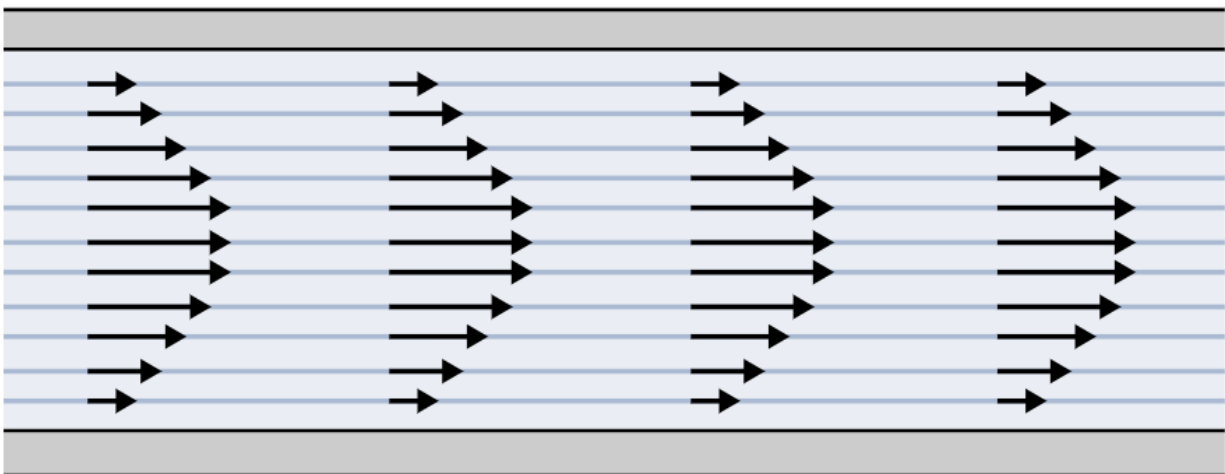
Re – Reynoldsov broj

ν – Kinematički viskozitet $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Režime strujanja fluida djelimo na:

- Laminarno (Slika 2.1.)

Čestice fluida gibaju se u paralelnim slojevima bez međusobnog miješanja. Izmjena topline poprečno na slojeve se vrši isključivo provođenjem. Profil brzine fluida u cijevi je paraboličan, a to znači da je brzina u centru najveća, a smanjuje se prema zidovima stijenke cijevi.



Slika 2.1 Laminarno strujanje u cijevi [3]

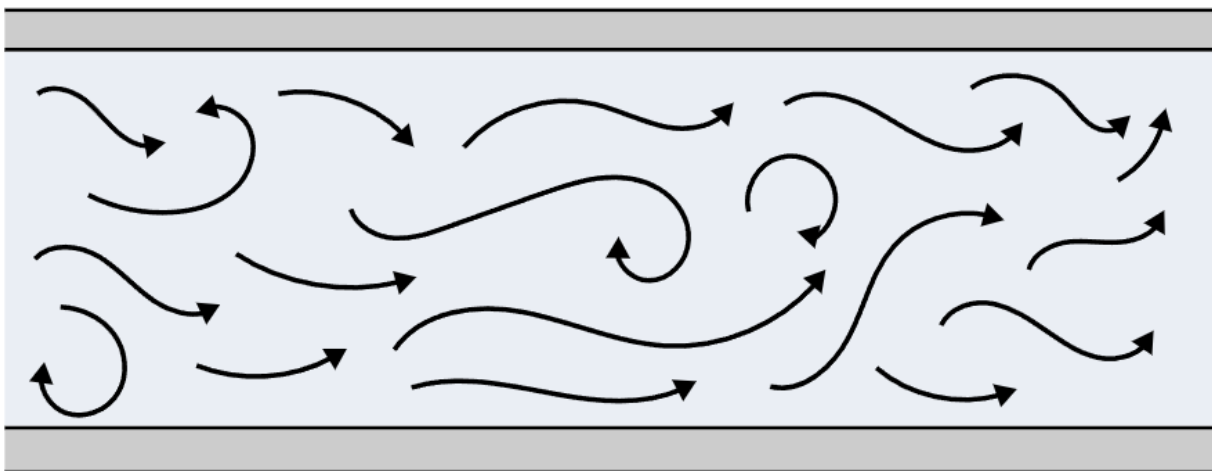
Za laminarni režim strujanja vrijedi sljedeći izraz:

$$Re < 2300$$

- Turbulentno (Slika 2.2.)

Strujanje fluida u ovom režimu može se opisati kao kaotično i nepravilno kretanje čestica. U odnosu na laminarno, čestice turbulentnog strujanja kreću se nasumično te stvaraju vrtloge. Ovakav tip strujanja pojavljuje se kada:

$$Re > 3000$$



Slika 2.2 Turbulentno strujanje u cijevi [3]

Nusseltov broj za potpuno razvijeno laminarno strujanje unutar cijevi kada je temperatura zidova konstantna, iznosi 3.66 [1].

$$Nu_D = 3.66 + \frac{0.065 \cdot Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L}}{1 + 0.04 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (2.2)$$

Gdje je:

Pr – Prandtlov broj

Formulom 2.2 moguće je odrediti Nusseltov broj koristeći osnovni Nusseltov broj za potpuno razvijeno laminarno strujanje unutar cijevi te korekcijski faktor koji uzima u obzir Reynoldsov i Prandtlov broj te omjer promjera i duljine cijevi.

2.2. Jednadžba protoka fluida

Jednadžba kontinuiteta za nekompresibilni fluid

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.3)$$

Gdje je:

∇ - Divergencija protoka mase

\mathbf{u} - Vektorsko polje brzine fluida

Jednadžba količine gibanja:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \sigma \quad (2.4)$$

Gdje je:

ρ – Gustoća fluida

t – vrijeme

g – sila gravitacije

σ – tenzor naprezanja

Jednadžba očuvanja energije:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{u}) = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (\sigma \cdot \mathbf{u}) - \nabla \cdot \mathbf{q} + \rho S \quad (2.5)$$

Gdje je:

e – ukupna specifična energija fluida

\mathbf{q} – vektor toplinskog toka

S – Izvor energije

Važno je napomenuti kako se gravitacija u ovim jednadžbama također može zanemariti pošto se radi o strujanju fluida unutar *coldplate-a*.

2.3. Konjugirani prijenos topline

Vrijedi jednadžba očuvanja energije za fluid:

$$\frac{\partial(\rho_a c_{p,a} T_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a c_{p,a} T_a \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\lambda_a \Delta T_a) \quad (2.6)$$

Također, vrijedi i jednadžba očuvanja energija za *solid*:

$$\frac{\partial(\rho_s c_{p,s} T_s)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \Delta T_s) + S \quad (2.7)$$

Gdje je:

ρ_s -Gustoća materijala *solid-a*

$c_{p,s}$ – Specifični toplinski kapacitet *solid-a*

T_s – Temperatura *solid-a*

λ_s – Koeficijent toplinske vodljivosti *solid-a*

S – Izvorni član koji predstavlja unutarnji izvor topline

2.4. Toplinski granični uvjeti

Kroz ovaj rad razmatrat će se tri različita slučaja zagrijavanja *coldplate-a*. Prvi slučaj obuhvaća grijanje *coldplate-a* sa gornje strane. U drugom slučaju grijanje *coldplate-a* bit će s gornje i donje strane dok će se u trećem slučaju *coldplate* grijati sa svih strana. Kako se razmatra tri različita slučaja zagrijavanja *coldplate-a* tako će postojati i tri toplinska granična uvjeta. Na područjima gdje nema zagrijavanja bit će postavljeni adijabatski zidovi za koje će vrijediti slijedeći zakon:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (2.8)$$

2.5. Spregnuti toplinski granični uvjet

U području između fluida i *solida* postoje *wall* i *wall-shadow* kroz koji postoji prijelaz topline sa *solid-a* na fluid, kao i sa fluida na *solid*. Kako bi se ispunio spregnuti toplinski granični uvjet na području kontakta između fluida i *solida*, potrebno je ispuniti dva uvjeta:

$$T_{fluid} = T_{solid} \quad (2.9)$$

Gdje je:

T_{fluid} – Temperatura fluida

T_{solid} – Temperatura *solida*

$$\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\right)_{fluid} = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\right)_{solid} \quad (2.10)$$

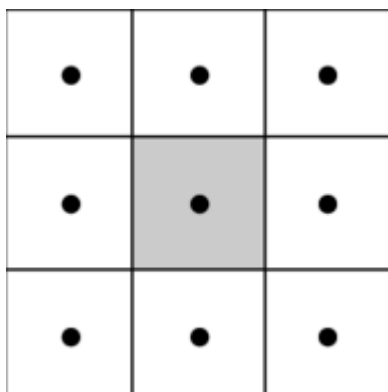
Gdje je:

λ – Koeficijent provođenja topline

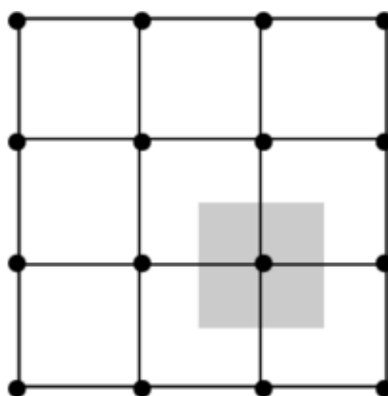
2.6. Metoda konačnih volumena

Metoda konačnog volumena izravno koristi zakone očuvanja, integralnu formulaciju Navier – Stokes i Eulerovih jednažbi. Metoda dijeli prostor na određeni broj proizvoljnih poliedarskih kontrolnih volumena. Kako je metoda konačnih volumena temeljena na izravnoj diskretizaciji zakona očuvanja energije, mase i momentuma, također su očuvani i numeričkom modelom. Postoji nekoliko načina definiranja pozicije i oblika kontrolnog volumena [4]:

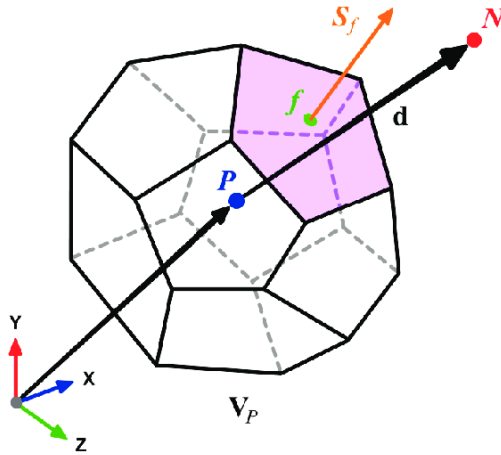
1. „Cell-centered“ – Količina protoka pohranjena je na centroidima ćelija rešetke [5]. Radi toga, kontrolni volumeni su identični ćelijama rešetke. Vrijednosti fizičkih veličina poput brzina, tlaka, temperature se računa u centru svake ćelije. Domena se dijeli u obliku heksaedra (3D) odnosno, pravokutnika (2D).
2. „Cell-vertex“ – Količina protoka pohranjuje se na rešetkama. Kontrolni volumen tada može biti unija svih ćelija koje dijele rešetku, ili neki volumen koji je centriran oko rešetke. Granični uvjeti postavljeni su između dvije točke [5]. U odnosu na *Cell-centered* metodu, ovdje se vrijednosti fizičkih veličina poput brzine, tlaka i temperature pohranjuju u vrhovima ćelija.



Slika 2.3 Cell-vertex [6]



Slika 2.4 Vertex centered grid [6]



Slika 2.5 Polihedralni kontrolni volumen [7]

Slika 2.5 prikazuje polihedralni kontrolni volumen te vrijednosti P i N označavaju težišta promatranih i susjednih volumena, a f predstavlja težište stranice S_f .

2.7. Diskretizacija

Zakoni očuvanja energije, mase i momenta opisuju ponašanje kontinuuma koji je u interakciji s njegovom okolinom. Ovi matematički zakoni izraženi su u obliku diferencijalnih odnosno, integralno – diferencijalnih transportnih jednadžbi. Transportna jednadžba u integralno – diferencijalnom obliku glasi:

$$\int_{V_P} \frac{\partial \phi}{\partial t} dV + \oint_{\partial V_P} \phi (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) dS - \oint_{\partial V_P} \gamma (\mathbf{n} \cdot \nabla \phi) dS = \int_{V_P} q_v dV \quad (2.11)$$

Kako je kontrolni volumen ograničen površinama, tada se površinski integral duž granice kontrolnog volumena može zapisati kao suma površinskih integrala preko tih površina.

$$\oint_{\partial V_P} \phi(r) dS = \sum_f \int_{S_f} \phi(r) dS \quad (2.12)$$

Pod pretpostavkom da:

$$\int_{S_f} \phi(r) dS \approx \phi_f S_f \quad (2.13)$$

Gdje je:

S_f – Površina granice kontrolnog volumena

ϕ_f – vrijednost varijable ϕ u težištu lica f

Nestacionarni izraz:

U ovom radu, tok fluida je opisan kao stacionaran. Radi ovoga, nestacionarni izraz može se zanemariti.

Konvekcijski izraz:

U ovom radu, korištena je „second order upwind“ metoda.

$$\oint_{\partial V_P} \phi(\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) dS = \sum_f \phi_f (S_f \cdot \mathbf{u}_f) = \sum_f \phi_f \cdot F_f \quad (2.14)$$

Te za ϕ vrijedi:

$$\phi_f = \begin{cases} \phi_P + (\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_P) \cdot (\nabla \phi)_P : (\mathbf{n}_f \cdot \mathbf{u}_f) > 0 \\ \phi_N + (\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_N) \cdot (\nabla \phi)_N : (\mathbf{n}_f \cdot \mathbf{u}_f) < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

Gdje je gradijent izračunat metodom „Least Squares Method“. Ova metoda minimizira kvadratnu grešku između stvarnih i predviđenih vrijednosti modela.

Difuzijski izraz:

Za izračunavanje površinskog integrala difuzijskog člana koristi se sljedeći izraz:

$$\oint_{\partial V_P} \gamma(\mathbf{n} \cdot \nabla \phi) dS = \sum_f \int_{S_f} \gamma(\mathbf{n} \cdot \nabla \phi) dS = \sum_f \gamma_f S_f \mathbf{n}_f \cdot (\nabla \phi)_f \quad (2.16)$$

Gdje je:

γ – Difuzijski koeficijent

\mathbf{n} – Jedinični normalni vektor na granici površine ∂V_P

$\nabla \phi$ – Gradijent varijable ϕ

Također, potrebno je dodati korekciju za nesavršenost mreže:

$$\mathbf{n}_f \cdot (\nabla \phi)_f = \frac{\phi_N - \phi_P}{d_{fn}} + \frac{k_{fn} \cdot (\nabla \phi)_N - k_{fP} \cdot (\nabla \phi)_P}{d_{fn}} \quad (2.17)$$

$$k_{fP} = (I - \mathbf{n}_f \mathbf{n}_f) \cdot (\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_P) \quad (2.18)$$

$$k_{fN} = (I - \mathbf{n}_f \mathbf{n}_f) \cdot (\mathbf{r}_N - \mathbf{r}_f) \quad (2.19)$$

Izvorni član:

Izvorni član sadrži sve što se ne može klasificirati u druge izraze. Njegova diskretizacija glasi:

$$\int_{V_P} q_v dV = q_v S_P \quad (2.20)$$

2.8. Jednadžba tlaka

Jednadžba tlaka može se izraziti kombiniranjem diskretizirane jednadžbe momenta i diskretizirane jednadžbe očuvanja mase. Za kontrolni volumen P, diskretizirana jednadžba očuvanja mase glasi:

$$\sum_f \mathbf{n}_f \cdot \mathbf{u}_f S_f = 0 \quad (2.21)$$

Također, diskretizirana jednadžba momenta za kontrolni volumen P glasi:

$$a_P^u \mathbf{u}_P + \sum_N a_P^u \mathbf{u}_N = \mathbf{r}_P - (\nabla p)_P \quad (2.22)$$

Gdje je:

a_P^u -Konvektivni član brzine u kroz kontrolni volumen P

$(\nabla p)_P$ - Gradijent tlaka p u kontrolnom volumenu P

Tada, brzina u centru promatrane ćelije, kontrolnog volumena P, može se izraziti:

$$\mathbf{u}_P^u = \frac{H(\mathbf{u})}{a_P^u} - \frac{1}{a_P^u} (\nabla p)_P \quad (2.23)$$

Gdje je:

$$H(\mathbf{u}) = -\sum_N a_P^u \mathbf{u}_P^u + \mathbf{r}_P \quad (2.24)$$

Brzina u centru kontrolnog volumena u diskretiziranoj jednadžbi očuvanja mase može se odrediti pomoću Rhie-Chow interpolacijske jednadžbe:

$$\sum_f \left(\frac{1}{a_P^u} \right)_f (\mathbf{n} \cdot \nabla p)_P S_f = \sum_f \left(\frac{H(\mathbf{u})}{a_P^u} \right)_f \cdot \mathbf{n}_f S_f \quad (2.25)$$

Nakon rješavanja jednadžbe tlaka, može se izračunati volumen protoka fluida kroz površine kontrolnog volumena:

$$F_f = \mathbf{n}_f \left(\frac{H(\mathbf{u})}{a_P^u} \right)_f S_f - \left(\frac{1}{a_P^u} \right)_f (\mathbf{n} \cdot \nabla p)_P S_f \quad (2.26)$$

3. DEFINIRANJE GEOMETRIJE I ANALITIČKI PRORAČUN

3.1. Definiranje geometrije cjevovoda

U sklopu rada, kroz dva potpoglavlja definirat će se dvije različite geometrije *coldplate-a*. Gabariti samog *coldplate-a* su jednake, jedina razlika je u izvodu cjevovoda. U prvom slučaju promatrat će se slučaj kada kroz *coldplate* prolazi ravan cjevovod pravokutnog poprečnog presjeka. U drugom slučaju će se razmatrati cjevovod koji poprma zmijolik oblik. Prilikom postavljanja geometrije bilo je potrebno odrediti omjer stranica pravokutnog poprečnog presjeka. Koeficijent omjera stranica koji smo željeli postići iznosio je 0,3 [1] kako bi se rezultati mogli validirati s literaturom. Formula za omjer stranica pravokutnika je:

$$\alpha^* = \frac{2 \cdot a}{2 \cdot b} \quad (3.1)$$

Gdje je:

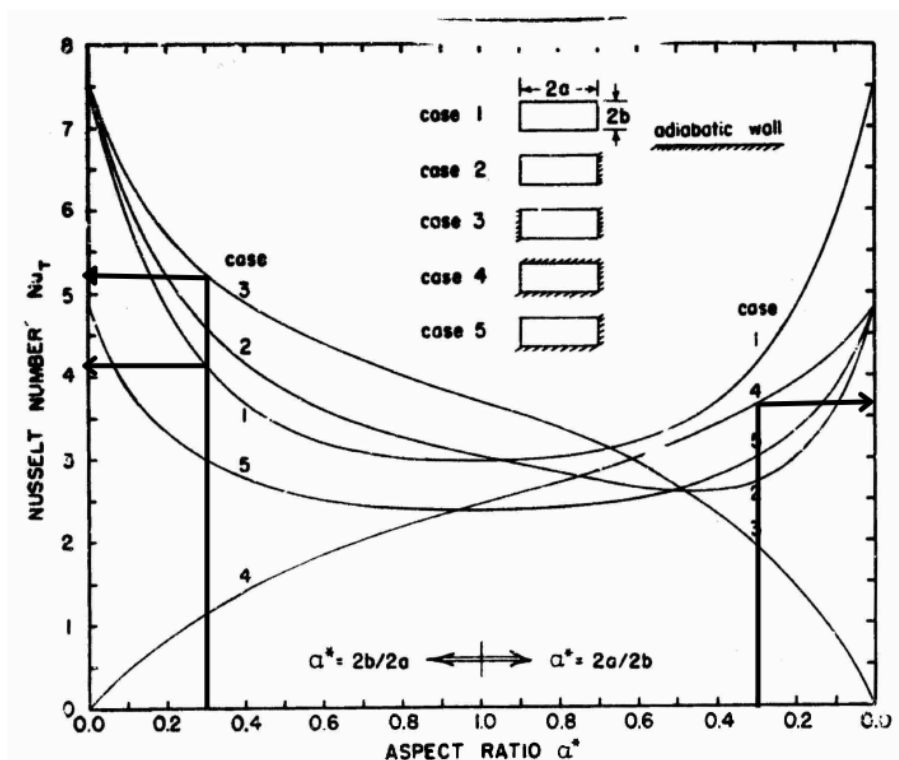
a - Horizontalna stranica pravokutnika

b - Vertikalna stranica pravokutnika

Nakon zadavanja omjera stranica a i b , bilo je potrebno odrediti veličinu stranica koji je zadovoljavao ovaj omjer. Kroz ovaj rad, usvojene su sljedeće veličine:

$$2a = 20 \text{ mm}, 2b = 6 \text{ mm}, \text{ za Case 1 i Case 3}$$

$$2a = 6 \text{ mm}, 2b = 20 \text{ mm}, \text{ za Case 4}$$



Slika 3.1 Omjer stranica [1]

3.2. Analitički proračun

U ovoj cjelini proći će se postupak izračunavanja protoka i brzine koje će se koristiti u postavkama simulacija za obje geometrije. Prvi korak bio je definirati režim strujanja.

Za izračun brzine i protoka fluida koji će se koristiti u simulacijama definirat će se tri Reynoldsova broja.

$$Re_1 = 500$$

$$Re_2 = 1000$$

$$Re_3 = 1500$$

Nakon definiranja Reynoldsovih brojeva, sljedeći korak bio je definiranje ekvivalentnog promjera kako bi se mogle izračunati brzine i protoci. Kako je prethodno definirano:

$$a = 20 \text{ mm}$$

$$b = 6 \text{ mm}$$

Na početku je potrebno izračunati površinu i opseg pravokutnika:

$$F = a \cdot b = 0.02 \cdot 0.006 = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$O = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (0.02 + 0.006) = 0.052 \text{ [m]}$$

Nakon toga moguće je definirati ekvivalentni promjer:

$$d_{ekv} = \frac{4F}{O} \quad (3.2)$$

Gdje je:

d_{ekv} – Ekvivalentni promjer cjevovoda [m]

F – Površina poprečnog presjeka cjevovoda [m²]

O – Opseg poprečnog presjeka cjevovoda [m]

Uvrštavanjem se dobiva:

$$d_{ekv} = \frac{4F}{O} = \frac{4 \cdot 1.2 \cdot 10^{-4}}{0.052} = 0.00923 \text{ [m]}$$

Nakon toga moguće je izračunati brzine za ta 3 slučaja:

$$Re_1 = \frac{u \cdot d}{\nu} \rightarrow 500 = \frac{u \cdot 0.00923}{4.11 \cdot 10^{-6}} \rightarrow u_1 = \frac{500 \cdot 4.11 \cdot 10^{-6}}{0.00923} \rightarrow u_1 = 0.223 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$Re_2 = \frac{u \cdot d}{\nu} \rightarrow 1000 = \frac{u \cdot 0.00923}{4.11 \cdot 10^{-6}} \rightarrow u_2 = \frac{1000 \cdot 4.11 \cdot 10^{-6}}{0.00923} \rightarrow u_2 = 0.445 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$Re_3 = \frac{u \cdot d}{\nu} \rightarrow 1500 = \frac{u \cdot 0.00923}{4.11 \cdot 10^{-6}} \rightarrow u_3 = \frac{1500 \cdot 4.11 \cdot 10^{-6}}{0.00923} \rightarrow u_3 = 0.668 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Nakon toga, moguće je definirati protoke:

$$Q = u \cdot F \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (3.3)$$

Iz toga slijedi:

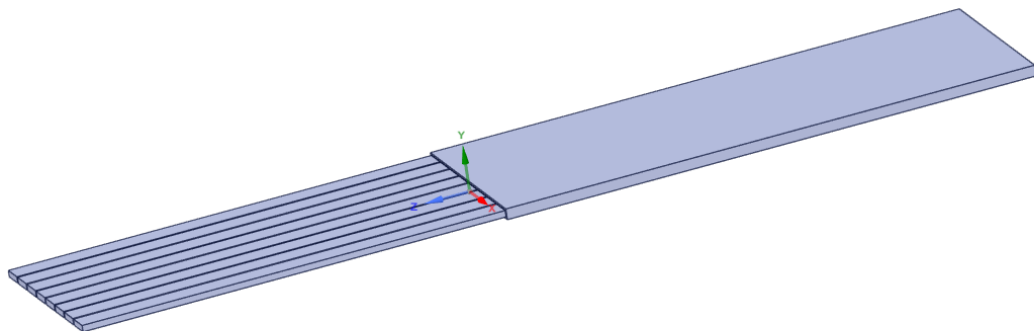
$$Q_1 = u_1 \cdot F = 0.223 \cdot 1.2 \cdot 10^{-4} = 2.67 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$Q_2 = u_2 \cdot F = 0.445 \cdot 1.2 \cdot 10^{-4} = 5.34 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

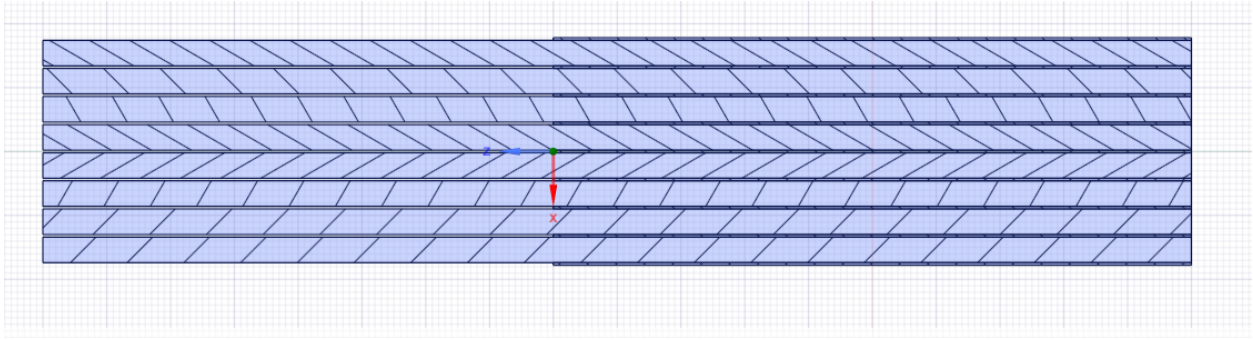
$$Q_3 = u_3 \cdot F = 0.668 \cdot 1.2 \cdot 10^{-4} = 8.016 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

3.3. Definiranje geometrije ravnog cjevovoda

Dimenzije *coldplate-a* su 178x500 mm. Materijal je postavljen kao aluminij, a debljina stijenke je 2 mm. Iz toga proizlazi kako je postavljeno sveukupno 8 kanala cjevovoda za hlađenje. Također, bilo je potrebno i odrediti zaletnu duljinu kojom se postiže izraženo laminarno strujanje prilikom ulaska fluida u područje *coldplate-a*. Kao zaletnu duljinu odabralo se 400 mm (Slika 3.2)



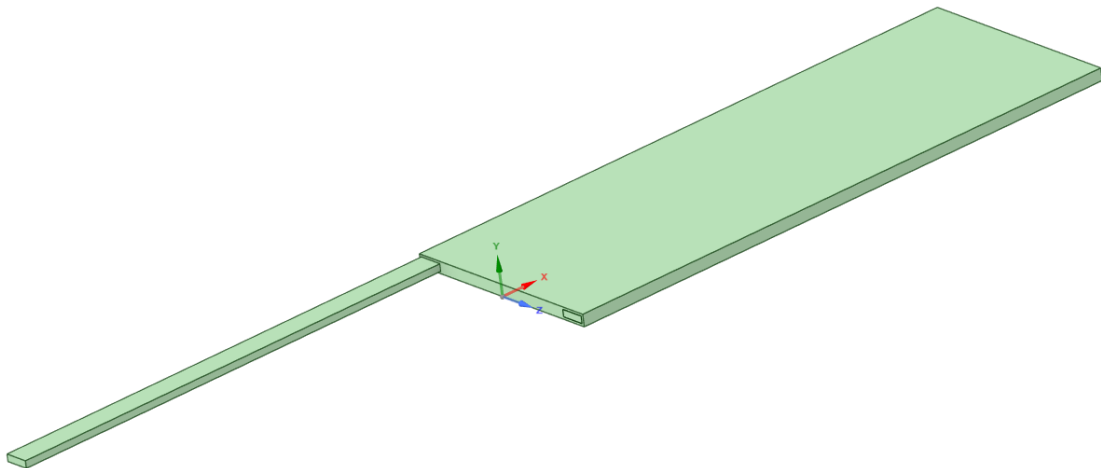
Slika 3.2 Prikaz geometrije ravnog cjevovoda



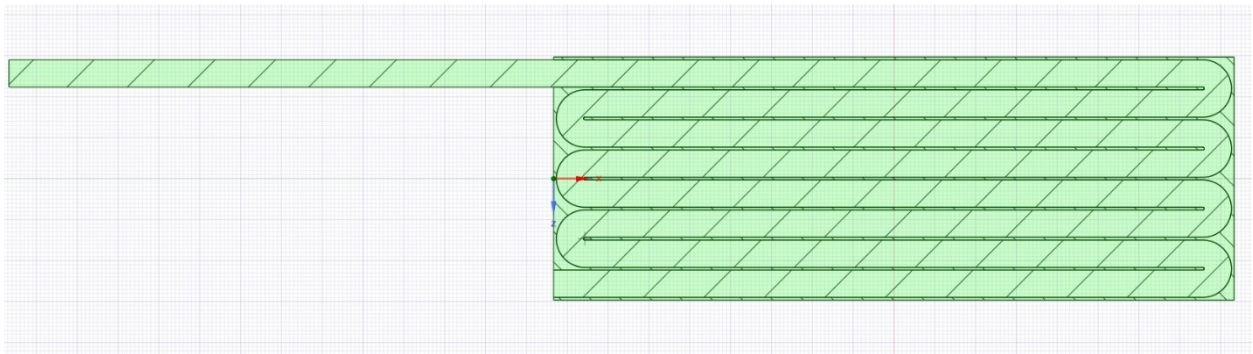
Slika 3.3 Prikaz poprečnog presjeka ravnog cjevovoda

3.4. Definiranje geometrije zmijolikog cjevovoda

Izvedba *coldplate-a* jednaka je kao i u slučaju ravnog cjevovoda odnosno, dimenzije su također 178x500 mm (Slika 3.4). Također, zaletna duljina je 400 mm.



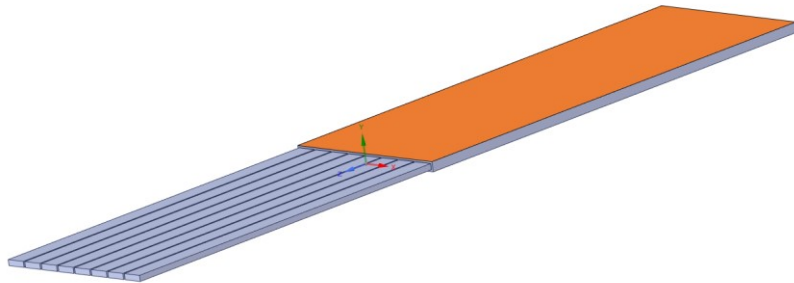
Slika 3.4 Prikaz geometrije zmijolikog cjevovoda



Slika 3.5 Prikaz poprečnog presjeka zmijolikog cjevovoda

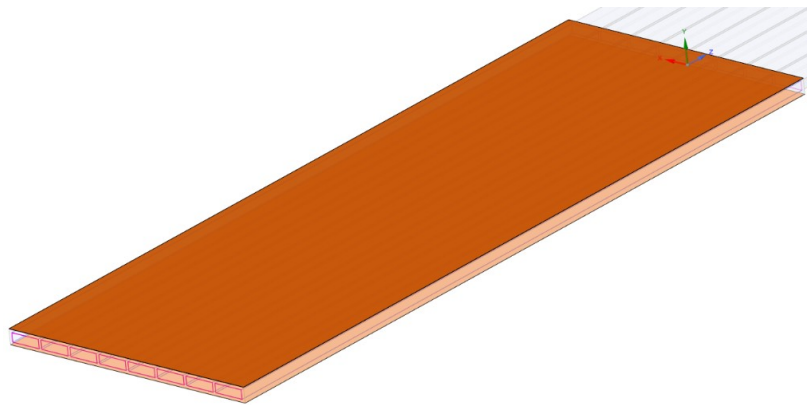
3.5. Definiranje ispitanih slučajeva za geometrije ravnog i zmijolikog cjevovoda

Nakon definiranja geometrije bilo je potrebno definirati slučajeve koji će se ispitivati. Za izvedbu ravnog cjevovoda definirati će se tri različita slučaja zagrijavanja *coldplate-a*.



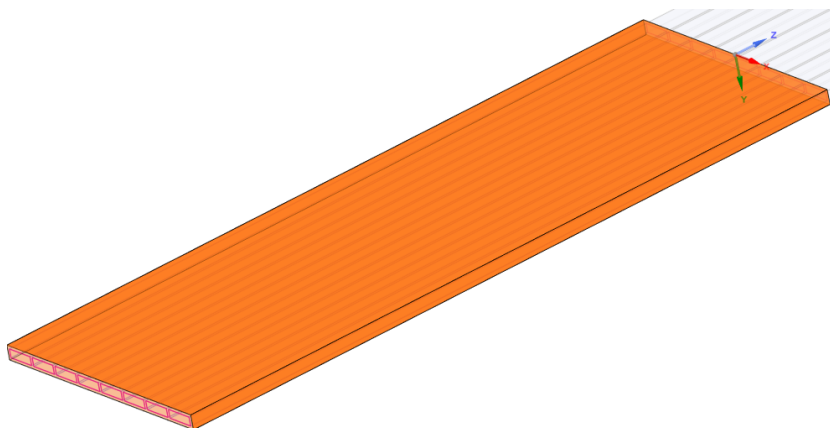
Slika 3.6 Zagrijavanje sa gornje strane

U prvom slučaju zagrijavala se samo gornja strana (Slika 3.6). U drugom slučaju, zagrijavanje je bilo sa gornje i donje strane (Slika 3.7)



Slika 3.7 Zagrijavanje sa gornje i donje strane

U zadnjem slučaju zagrijavale su se sve četiri strane *coldplate-a* (Slika 3.8).



Slika 3.8 Zagrijavanje sa svih strana

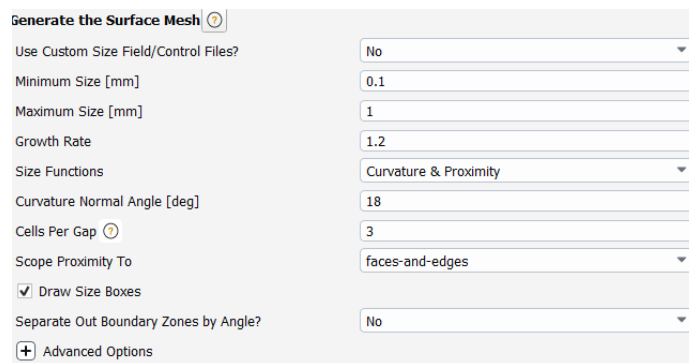
4. IZRADA NUMERIČKE MREŽE

Napravljene su tri polihedralne mreže različite gustoće (prostorne diskretizacije) u svrhu provođenja Mesh Independence analize. Također, izrađena je jedna strukturirana mreža za ravni cjevovod. Za zmijoliki cjevovod napravljena je jedna polihedralna mreža. Za sve numeričke mreže korištena su tri različita rubna uvjeta zagrijavanja stijenke *coldplate-a* i tri različita protoka. Sve numeričke mreže izrađene su pomoću Fluentovog Mesh programa.

4.1. Izrada numeričkih mreža za ravni cjevovod

4.1.1. Izrada polihedralne numeričke mreže

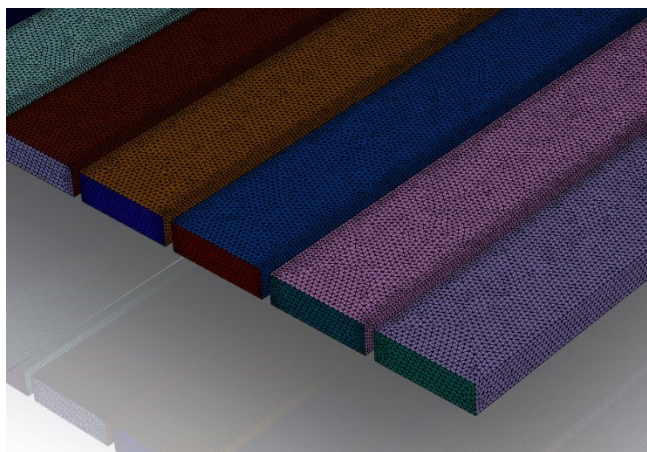
Prilikom izrade numeričke mreže u sklopu Fluent meshera, prvo je bilo potrebno definirati minimalnu i maksimalnu veličinu elemenata. Kao minimalnu vrijednost uzelo se 0.1 mm, a kao maksimalnu 1mm. Ovime se želi postići što gušću mrežu kako bi rezultati bili što točniji. Stopa rasta (eng. Growth rate) je postavka kojom se određuje mijenjanje veličine elemenata od jedne zone do druge. U ovom slučaju koristit će se koeficijent 1.2 odnosno, povećanje elemenata od 20%.



Parameter	Value
Use Custom Size Field/Control Files?	No
Minimum Size [mm]	0.1
Maximum Size [mm]	1
Growth Rate	1.2
Size Functions	Curvature & Proximity
Curvature Normal Angle [deg]	18
Cells Per Gap	3
Scope Proximity To	faces-and-edges
Draw Size Boxes	<input checked="" type="checkbox"/>
Separate Out Boundary Zones by Angle?	No

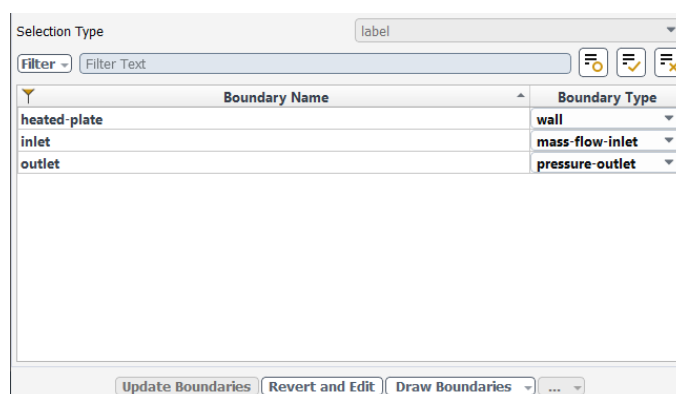
Slika 4.1 Postavke za "Surface mesh"

Nakon toga dobiva se numerička mreža koja obuhvaća samo površinski dio. Površinska mreža (eng. Surface mesh) služi kao osnovno definiranje oblika i dimenzija površine modela. Slika 4.2 prikazuje izrađenu površinsku mrežu za coldplate sa ravnim cjevovodom.



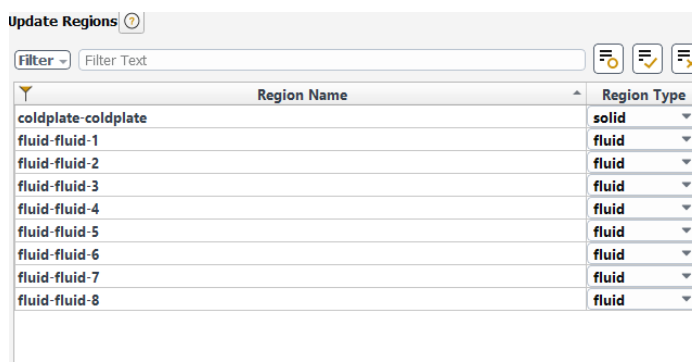
Slika 4.2 Surface mesh ravnog cjevovoda

Slijedeći korak bio je definiranje rubnih uvjeta. Slikom 4.3 definirani su rubni uvjeti. Kao ulazni parametar fluida definirao se maseni protok, a za izlazni parametar tlak. Na područje zagrijavanja coldplate-a je postavljen *wall* rubni uvjet. Ovi parametri će se kasnije dodatno definirati kada će se govoriti o postavkama simulacije.



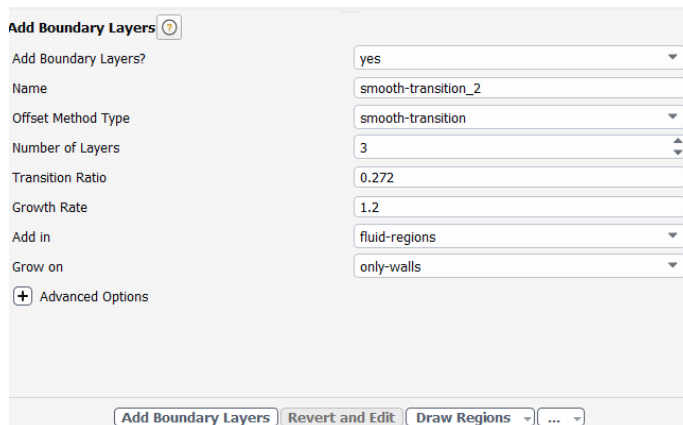
Slika 4.3 Definiranje rubnih uvjeta

Regije su postavljene tako da su područja u kojima se nalazi fluid postavljen kao „Fluid region“, a coldplate je postavljen kao „Solid region“ (Slika 4.4).



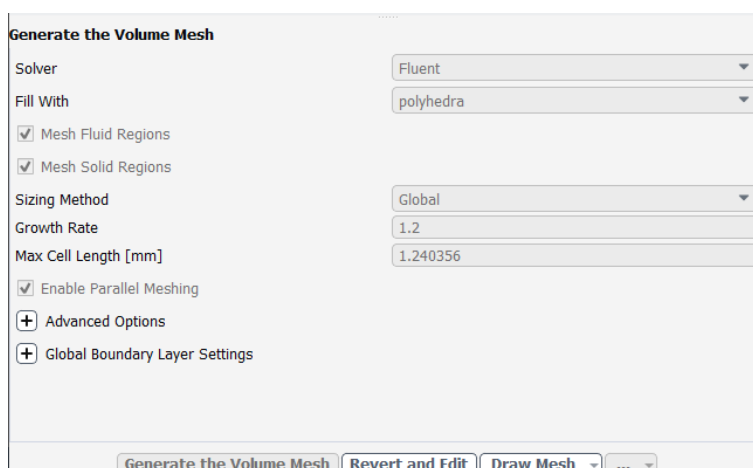
Slika 4.4 Definiranje Regija modela

Zbog visokih gradijenata uslijed visoke gustoće toplinskog toka, u graničnom sloju korišteni su prizmatični elementi malih dimenzija u smjeru normale. Definirana su 3 granična sloja s parametrima prikazanim na slici 4.5.



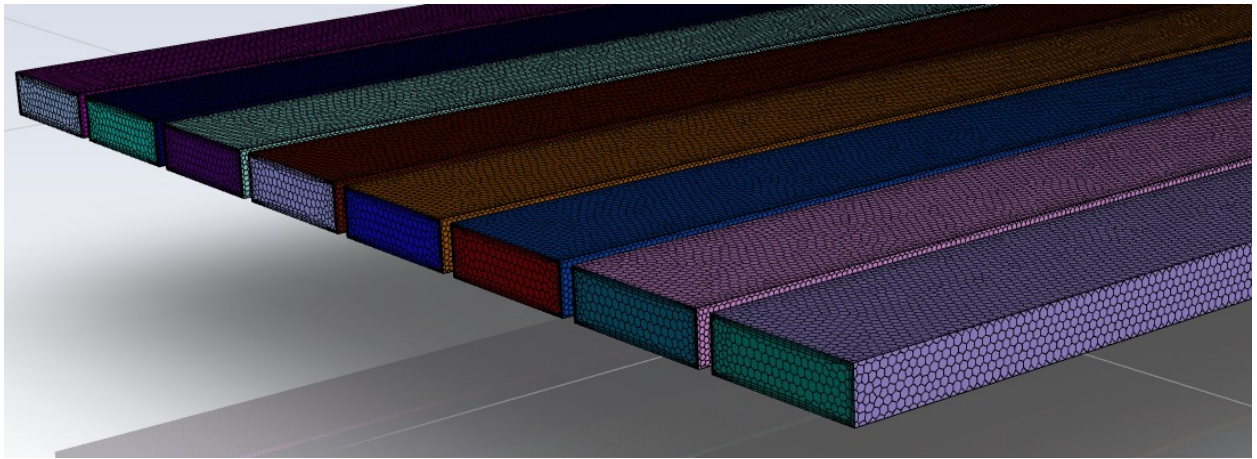
Slika 4.5 Definiranje graničnog sloja

Kako bi se domena ispunila konačnim volumenima, na kraju se definiraju postavke za izradu mreže. Za nestrukturirane mreže koristit će se polihedralni elementi s parametrima definiranim na slici 4.6.

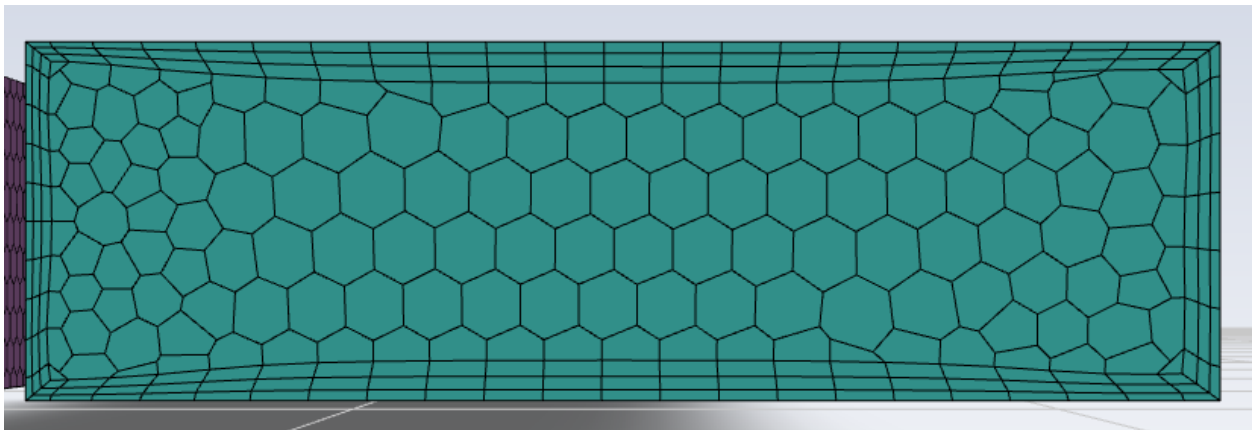


Slika 4.6 Definiranje vrste elementa

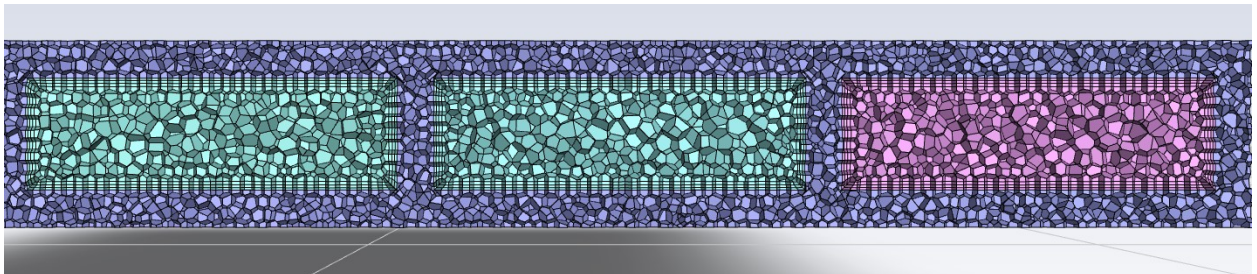
Ovime se dobiva potpuno definirana numerička mreža (slika 4.7.) Slikom 4.8. prikazana je numerička mreža na ulazu u cjevovod. Slikom 4.9. prikazana je polihedralna mreža u presjeku. Na kraju, ukupan broj elemenata polihedralne mreže iznosi 6 507 582 (Slika 4.10.)



Slika 4.7 Numerička mreža za ravni cjevovod



Slika 4.8 Detalj numeričke mreže na ulazu u cjevovod



Slika 4.9 Polihedralna mreža u presjeku

Report Mesh Size [Close]

	Boundary	Interior
Nodes	4744465	21799770
Faces	1344179	33498816
Cells		6507582

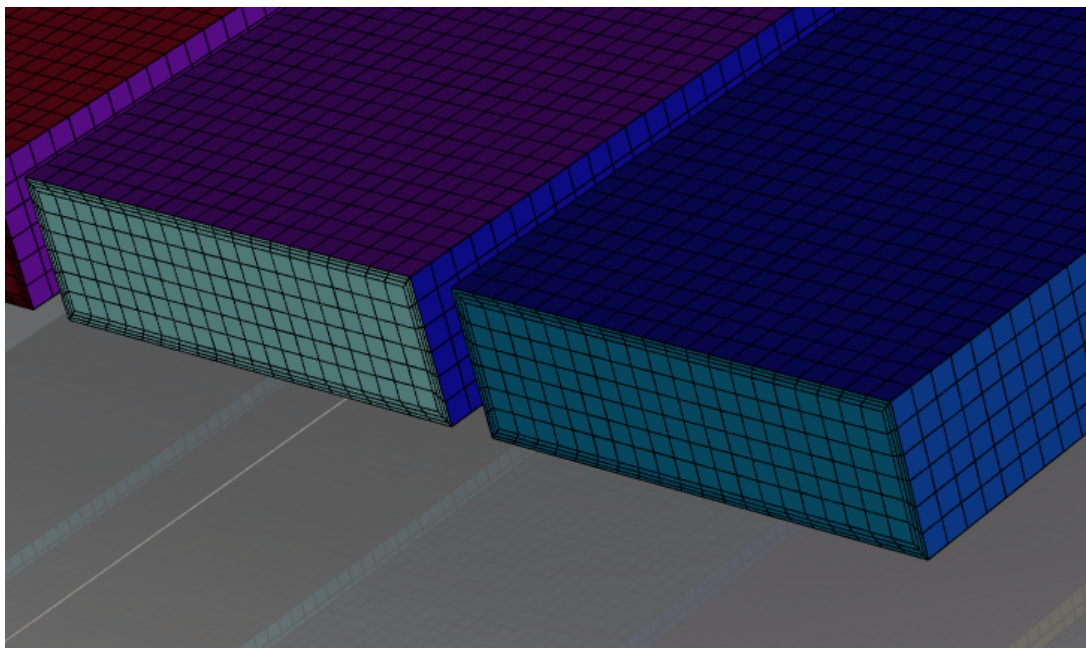
Report Number Meshed

Update **Close** **Help**

Slika 4.10 Ukupan broj elemenata

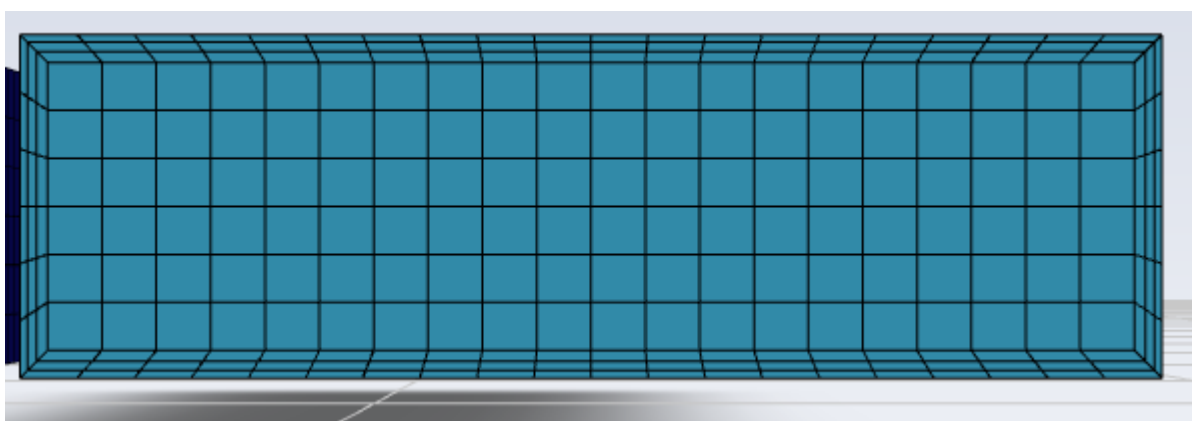
4.1.2. Izrada strukturirane numeričke mreže

Prilikom definiranja strukturirane mreže, veličina elementa postavljena je tako da minimalna i maksimalna veličina bude jednake odnosno, 1 mm. Nakon toga bilo je potrebno uključiti opciju za Multizone Meshing. Kao i u prethodnom slučaju, definirale su se regije te su postavljena tri granična sloja prizmatičnih elemenata uz zidove u području fluida. Slikom 4.11. prikazana je strukturirana numerička mreža za ravni cjevovod.



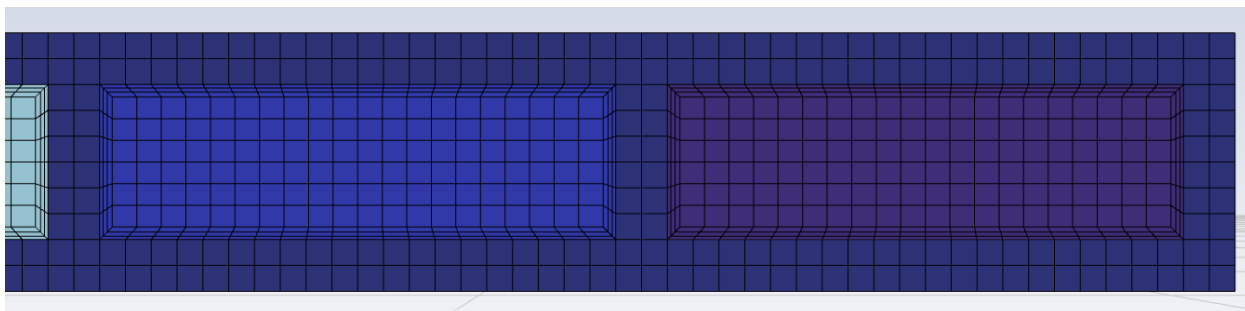
Slika 4.11 Definirana strukturirana mreža ravnog cjevovoda

Ulaz u cjevovod strukturirane mreže prikazan je slikom 4.12.



Slika 4.12 Detalj prikaza mreže na ulazu u cjevovod

Strukturirana mreža u presjeku, prikazana je slikom 4.13. U konačnici ukupan broj elemenata strukturirane mreže iznosio je 3 722 000 odnosno, gotovo duplo manje nego u slučaju polihedralne mreže (Slika 4.14.)



Slika 4.13 Strukturirana mreža u presjeku

A screenshot of a software dialog box titled "Report Mesh Size". The dialog has a close button (X) in the top right corner. It contains a table with two columns: "Boundary" and "Interior". The rows are "Nodes", "Faces", and "Cells". Below the table is a checkbox labeled "Report Number Meshed" which is currently unchecked. At the bottom of the dialog are three buttons: "Update", "Close", and "Help".

	Boundary	Interior
Nodes	2835680	3218075
Faces	818324	10652972
Cells		3722000

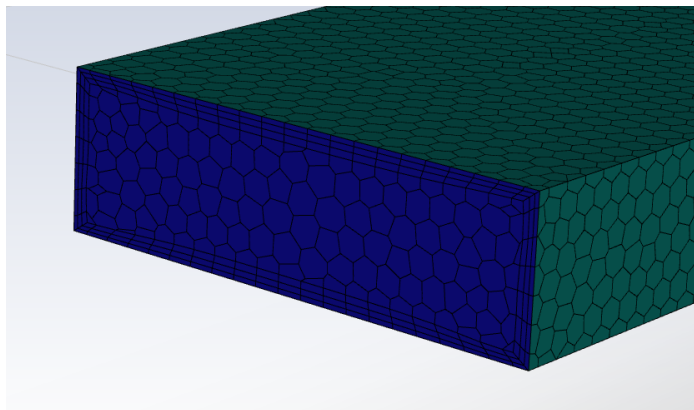
Report Number Meshed

Update Close Help

Slika 4.14 Ukupan broj elemenata strukturirane mreže

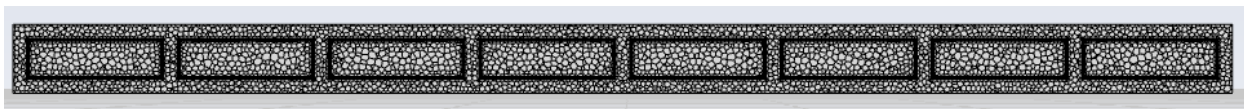
4.2. Izrada numeričkih mreža za zmijoliki cjevovod

U ovom radu biti će izrađena jedna polihedralna numerička mreža za zmijoliki cjevovod. Za izradu mreže odabrane su jednake postavke kao i u slučaju s ravnim cjevovodom. Slikom 4.15. prikazan je ulaz u zmijoliki cjevovod.



Slika 4.15 Prikaz ulaza za zmijoliki cjevovod

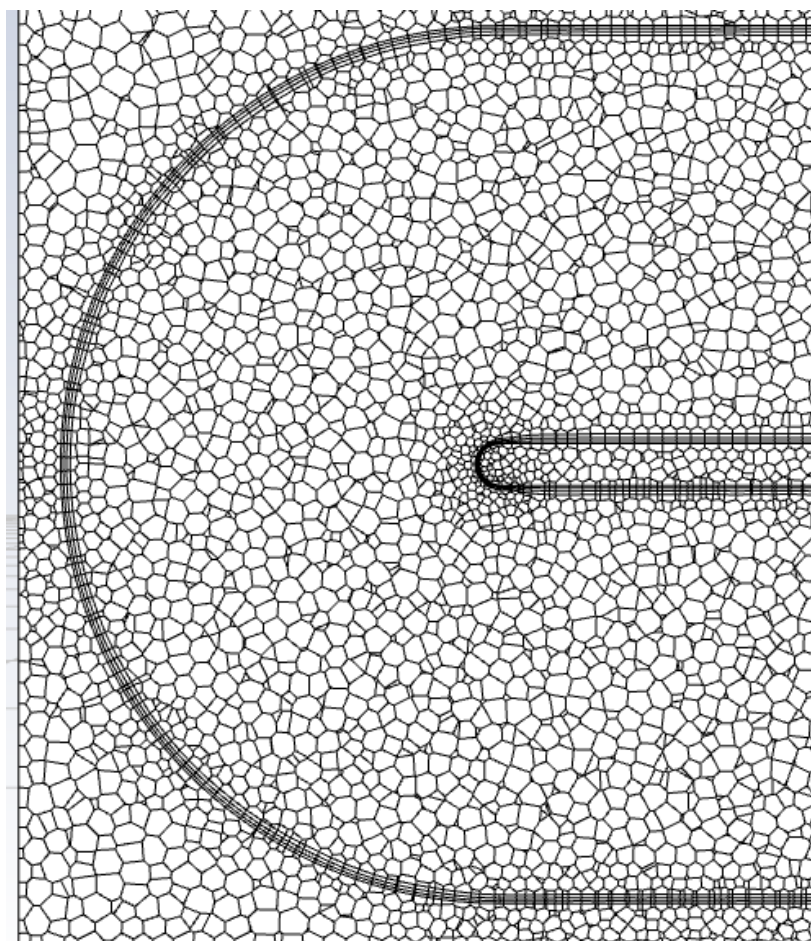
Slika 4.16. prikazuje presjek zmijolikog cjevovoda u smjeru yz. Slika 4.17. prikazuje tlocrtni presjek zmijolikog cjevovoda, a slika 4.18 prikazuje detalj tlocrtnog presjeka u području zakrivljenja.



Slika 4.16 Prikaz numeričke mreže zmijolikog cjevovoda u presjeku yz



Slika 4.17 Tlocrtni prikaz numeričke mreže zmijolikog cjevovoda



Slika 4.18 Detaljan prikaz numeričke mreže koljena zmijolikog cjevovoda

Ukupan broj elemenata numeričke mreže zmijolikog cjevovoda je 5 224 238 elemenata (Slika 4.19.).

Report Mesh Size
×

	Boundary	Interior
Nodes	3728721	18248229
Faces	1076777	27531625
Cells		5224238

Report Number Meshed

Update
Close
Help

Slika 4.19 Ukupan broj elemenata zmijolikog cjevovoda

4.3. Mesh independence study

Mesh independence study je test kojim se ispituje točnost rezultata simulacija u ovisnosti o gustoći mreže. U testu su izrađene tri različite mreže koje prate sljedeću formulu:

$$r = \sqrt[3]{\frac{N_f}{N_g}}$$

Gdje je:

r – Omjer dorade numeričke mreže

N_f – Broj elemenata fine mreže

N_g – Broj elemenata grube mreže

Za ispitivanje u ovom radu usvaja se:

$$r = 1.2$$

Definiranje numeričkih mreža:

Tablicom 4.1 definirane su gruba, srednja i fina numerička mreža te omjer numeričke mreže.

Tablica 4.1 Definiranje grube, srednje i fine numeričke mreže

	Broj Elemenata	r
Ng	2 099 835	-
Ns	3 602 726	1,21
Nf	6 507 582	1,19

Može se uočiti kako se koeficijent r zadovoljio.

Rezultati testa:

Tijekom proračuna pratilo se četiri različite temperature kao i dvije pomoćne veličine koje predstavljaju razliku temperatura, pomoću kojih se ocijenila konvergencija fizikalnih veličina.

Koristile su se:

$T_{foutlet}$ - Temperatura na površini izlaza

T_{finlet} - Temperatura na površini ulaza

T_{wavg} - Prosječna temperatura na stijenci fluida

T_{favg} - Prosječna temperatura fluida kroz cijelu domenu

dT - Razlika izlazne i ulazne temperature

dT_{avg} - Razlika temperature fluida i temperature površine stijenke

Ove vrijednosti biti će potrebne kasnije kada će se računati koeficijent prijelaza topline (α) te prilikom računanja Nusseltove značajke. Kako ravni cjevovod ima 8 različitih tako postoji i 8 različitih zona fluida. Zone su imenovane redom kako su imenovani rubni uvjeti ulaza i izlaza. Kako je ulazna temperatura za sve slučaje ista $T_{finlet} = 293\text{K}$, bit će prikazana samo u tablici 5.2. za grubu mrežu.

Pomoću naredbe *Reports* mogu se dobiti prosječne temperature na izlazu iz *coldplate-a*. U sklopu *Reports* odabere se naredba *Surface Integrals* te se označe svi izlazi te se preko naredbe *Area average* dobije prosječna temperatura za svaki izlaz. Nakon toga može se izračunati prijenos topline. Za računanje prijenosa topline koristi se izraz:

$$\phi = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \text{ [W]} \quad (4.1)$$

Gdje ΔT predstavlja razliku temperature na izlazu i ulazu fluida. Nakon toga potrebno je izračunati toplinski tok. Za računanje gustoće toplinskog toga vrijedi:

$$q = \frac{\phi}{F} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (4.2)$$

Za računanje alfe odnosno koeficijenta prijelaza topline koristi se formula:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T_f} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (4.3)$$

Gdje ΔT_f predstavlja:

$$\Delta T_f = T_{as} - T_{vf} \quad (4.4)$$

Gdje je:

T_{as} – Prosječna temperatura stijenke fluida

T_{vf} – Prosječna temperatura fluida kroz cijelu domenu *coldplate-a*

Za dobivanje prosječne temperature stijenke fluida potrebno je u *Reports* odabrati *Surface Integrals* te u dodatnom izborniku odabrati *Area – Weighted Average* i odabrati zidove stijenke fluida.

Za dobivanje prosječne temperature fluida kroz domenu *coldplate-a*, pod *Results* je potrebno odabrati *Volume Integrals* te odabrati *Volume – Average Temperature* i odabrati sve fluide.

Ovime su definirani svi izrazi te je moguće izračunati koeficijent prijelaza topline (α) i Nusseltovu značajku. Za računanje Nusseltove značajke koristit će se:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_{eq}}{v} \quad (4.5)$$

Tablicama 4.2, 4.3 i 4.4 prikazane su očitane vrijednosti temperatura za grubu, srednju i finu numeričku mrežu.

Tablica 4.2 Očitane vrijednosti temperatura za grubu numeričku mrežu

GRUBA	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT _{avg} [K]
Ulaz ₁	300,39	7,39	320,13	296,15	23,98
Ulaz ₂	300,39	7,39	319,66	296,09	23,56
Ulaz ₃	300,25	7,25	319,58	296,08	23,49
Ulaz ₄	300,26	7,26	319,58	296,08	23,49
Ulaz ₅	300,26	7,26	319,57	296,08	23,48
Ulaz ₆	300,28	7,28	319,58	296,08	23,49
Ulaz ₇	300,28	7,28	319,66	296,09	23,57
Ulaz ₈	300,26	7,26	320,14	296,15	23,99

Tablica 4.3 Očitane vrijednosti temperatura za srednju numeričku mrežu

SREDNJA	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT _{avg} [K]
Ulaz ₁	300,28	7,28	320,02	296,09	23,92
Ulaz ₂	300,27	7,27	319,53	296,03	23,49
Ulaz ₃	300,15	7,15	319,44	296,02	23,41
Ulaz ₄	300,14	7,14	319,43	296,02	23,40
Ulaz ₅	300,14	7,14	319,43	296,02	23,40
Ulaz ₆	300,16	7,16	319,44	296,02	23,42
Ulaz ₇	300,17	7,17	319,53	296,09	23,43
Ulaz ₈	300,14	7,14	320,02	296,03	23,98

Tablica 4.4 Očitane vrijednosti temperatura za finu numeričku mrežu

FINA	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT _{avg} [K]
Ulaz ₁	300,17	7,17	319,71	295,92	23,79
Ulaz ₂	300,17	7,17	319,21	295,92	23,29
Ulaz ₃	300,03	7,03	319,13	295,92	23,21
Ulaz ₄	300,01	7,01	319,12	295,92	23,20
Ulaz ₅	300,01	7,01	319,11	295,92	23,19
Ulaz ₆	300,04	7,04	319,12	295,92	23,20
Ulaz ₇	300,06	7,06	319,21	295,92	23,28
Ulaz ₈	300,01	7,01	319,71	295,92	23,79

Iz dobivenih podataka temperaturi dodatno su se izračunale vrijednosti koeficijenta prijelaza topline (α) i Nusseltovog broja, koji su prikazani tablicama 4.5, 4.6 i 4.7

Tablica 4.5 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za grubu numeričku mrežu

GRUBA	FI[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	699,82	26916,28	1122,11	26,49
Ulaz ₂	699,44	26901,72	1141,49	26,94
Ulaz ₃	686,86	26417,69	1124,39	26,54
Ulaz ₄	687,61	26446,81	1125,63	26,57
Ulaz ₅	687,33	26435,89	1125,69	26,57
Ulaz ₆	689,69	26526,87	1128,85	26,65
Ulaz ₇	689,32	26512,31	1124,83	26,55
Ulaz ₈	687,04	26424,97	1101,40	26,00

Tablica 4.6 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za srednju numeričku mrežu

SREDNJA	FI[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	688,94	26497,76	1107,39	26,14
Ulaz ₂	688,65	26486,84	1127,53	26,61
Ulaz ₃	676,64	26024,65	1111,30	26,23
Ulaz ₄	676,35	26013,73	1111,50	26,24
Ulaz ₅	675,60	25984,62	1110,16	26,20
Ulaz ₆	678,34	26090,16	1114,01	26,29
Ulaz ₇	678,53	26097,43	1113,51	26,28
Ulaz ₈	676,45	26017,37	1084,87	25,61

Tablica 4.7 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za finu numeričku mrežu

FINA	FI[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	679,10	26119,27	1097,67	25,91
Ulaz ₂	678,43	26093,79	1120,24	26,44
Ulaz ₃	665,19	25584,29	1102,05	26,01
Ulaz ₄	663,29	25511,51	1099,63	25,96
Ulaz ₅	663,29	25511,51	1099,77	25,96
Ulaz ₆	666,98	25653,44	1105,41	26,09
Ulaz ₇	668,50	25711,67	1104,02	26,06
Ulaz ₈	663,29	25511,51	1072,09	25,31

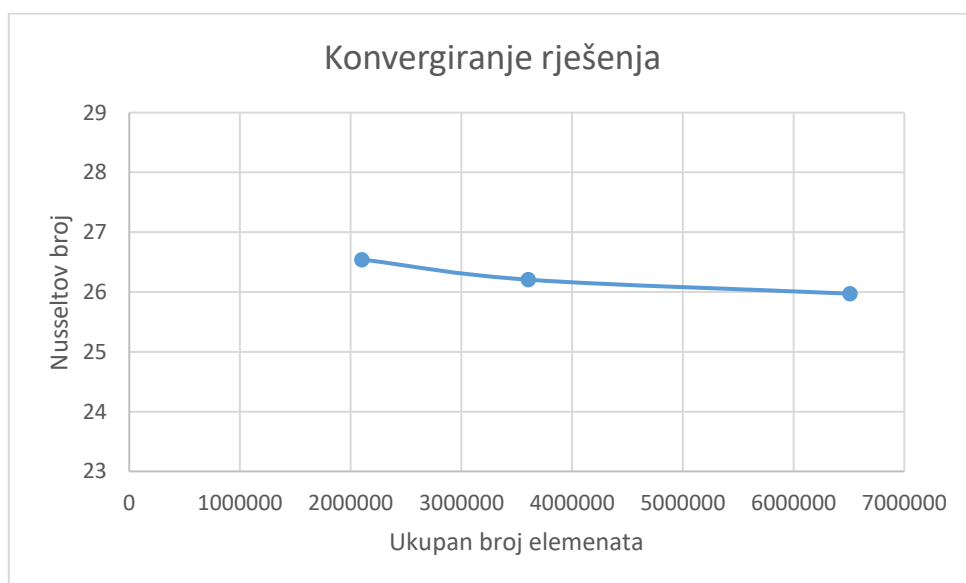
Gledajući srednje vrijednosti Nusseltovih značajki u ovisnosti o finoći numeričke mreže vidljivo je kako postoje blaga odstupanja.

$$Nu_g = 26.543$$

$$Nu_s = 26.206$$

$$Nu_f = 25.972$$

Slika 4.20 prikazuje graf konvergencije Nusseltove značajke u ovisnosti o finoći numeričke mreže. Iako je odstupanje od rezultata tek 2%, koristit će se fina mreža kako bi se postiglo što točnije rješenje prilikom usporedbe rezultata sa literaturom [1].



Slika 4.20 Graf konvergiranja rješenja Nusseltove značajke u odnosu na finoću numeričke mreže

$$\text{Nu}_g = 26.543$$

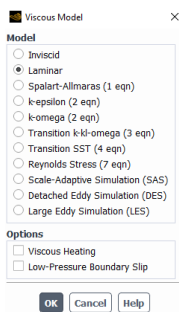
$$\text{Nu}_s = 26.206$$

$$\text{Nu}_f = 25.972$$

5. POSTAVKE I PRIPREMA SIMULACIJE

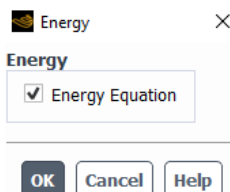
5.1. Pre-processing

Za provođenje numeričkih simulacija korišten je laminarni model strujanja fluida (slika 5.1).



Slika 5.1 Postavljanje laminarnog modela strujanja

Uz postavljanje laminarnog modela strujanja fluida bilo je potrebno postaviti i jednadžbu energije (Slika 5.2).



Slika 5.2 Uključivanje jednadžbe energije

Fluid koji se koristi za izradu simulacija je mješavina vode i glikola odnosno, antifriz na temperaturi od 20°C. Fluid je potrebno odabrati u Fluent-ovoj bazi materijala te naknadno upisati vrijednost za mješavinu. Karakteristike fluida dane su Tablicom 5.1.

Tablica 5.1 Karakteristike antifrizna na 20°C

	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Gustoća	ρ_a	1072	$\frac{kg}{m^3}$
Toplinski kapacitet	c_a	3310	$\frac{J}{KgK}$
Toplinska vodljivost	λ_a	0.391	$\frac{w}{mK}$
Kinematički viskozitet	ν_a	$4.11 * 10^{-6}$	$\frac{m^2}{s}$
Dinamički viskozitet	η_a	0.0044	Pas

Za materijal *coldplate-a* uzima se aluminij. Tablicom 6.2 opisane su fizikalne karakteristike aluminija.

Tablica 5.2 Karakteristike aluminija

	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Gustoća	ρ_{cp}	2719	$\frac{kg}{m^3}$
Toplinski kapacitet	c_{cp}	871	$\frac{J}{KgK}$
Toplinska vodljivost	λ_{cp}	202.4	$\frac{w}{mK}$

Slijedeći korak bio je definiranje rubnih uvjeta. Kao ulazni rubni uvjet definirao se *mass flow inlet* s protokom koji se mijenjao ovisno o promatranom slučaju. Maseni protok se definirao kao:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (6.1)$$

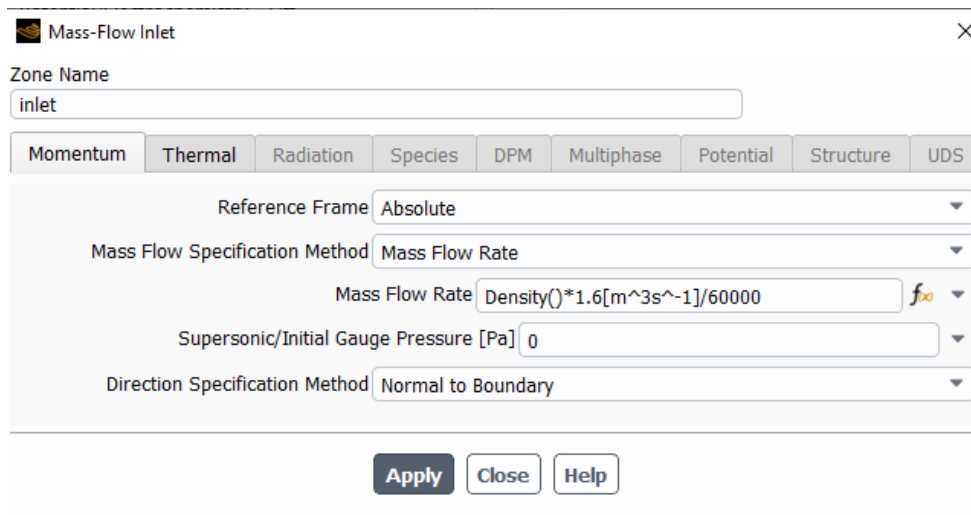
Iz toga se dobilo slijedeće:

$$\dot{m}_1 = 1072 \cdot \frac{1.6}{60000} = 0.0286 \text{ kg/m}$$

$$\dot{m}_2 = 1072 \cdot \frac{3.2}{60000} = 0.0572 \text{ kg/m}$$

$$\dot{m}_3 = 1072 \cdot \frac{4.8}{60000} = 0.08576 \text{ kg/m}$$

Ovime su definirani maseni protoci za sva tri slučaja masenih protoka (Slika 5.3).



Slika 5.3 Definiranje masenog protoka za prvi slučaj

Slijedeći korak bio je definiranje temperature na stijenci *coldplate-a*. Za *coldplate* vrijedi rubni uvjet *wall* koji je postavljen na 323 K odnosno, 50°C.

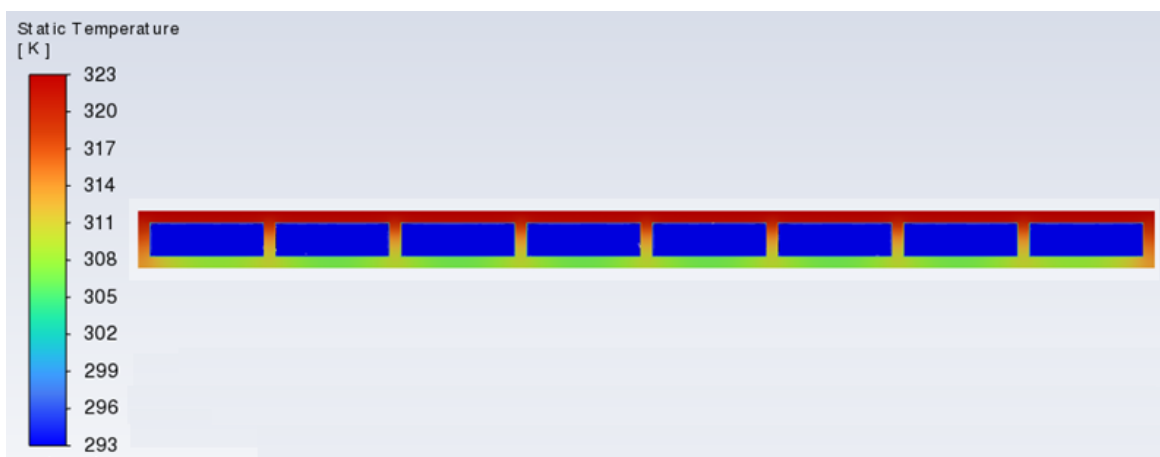
Za vrijeme proračuna kontinuirano se rješavaju jednadžbe brzine i tlaka te je odabrana metoda SIMPLEC (*Semi-Implicit Method of Pressure-Linked Equations Consistent*). Ova metoda zapravo je modificirana metoda SIMPLE algoritma koja je izvedena jednostavnim pretpostavljanjem da je korekcija brzine u točki C zapravo težinski prosjek korekcija u susjednim točkama mreže.

6. VIZUALIZACIJA I ANALIZA REZULTATA

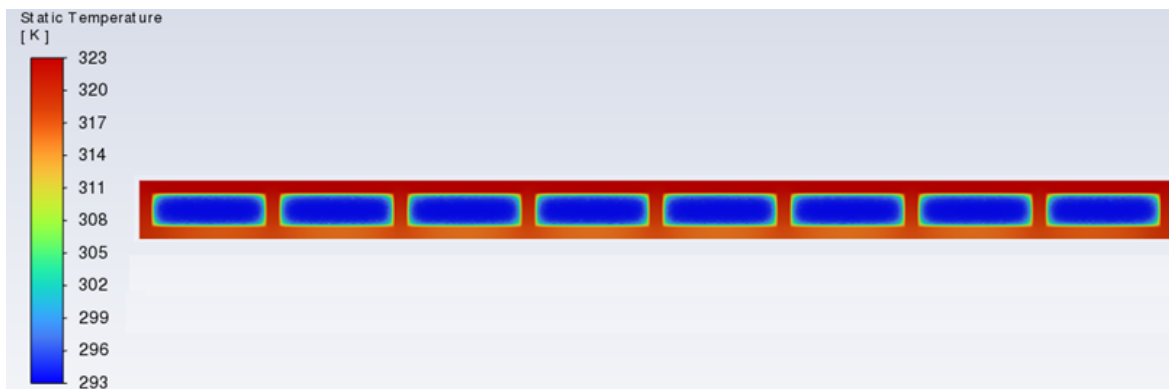
6.1. Ravni cjevovod polihedralne mreže grijane s gornje strane

6.1.1. Protok fluida $Q = 1.6$ L/min

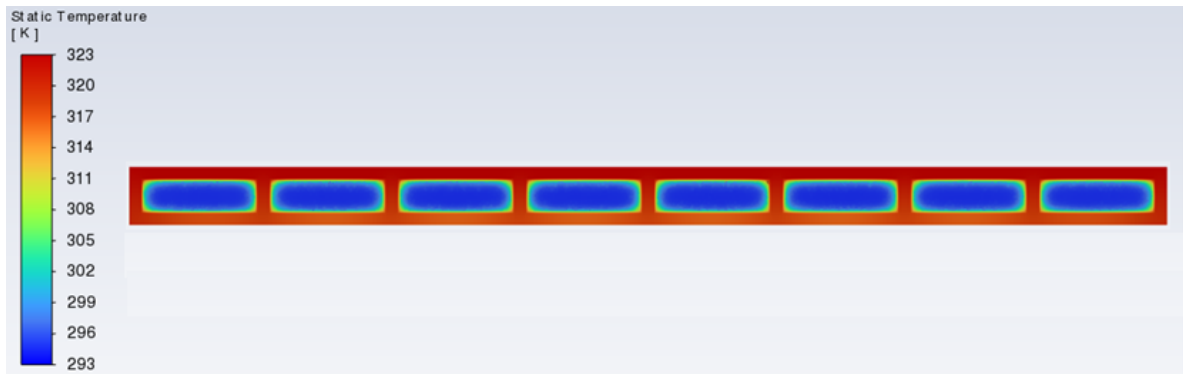
Slikama 6.1, 6.2 i 6.3 prikazane su konture temperatura na ulazu, sredini i kraju *coldplate-a* za slučaj grijanja s gornje strane.



Slika 6.1 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje strane za $Q = 1.6$ L/min

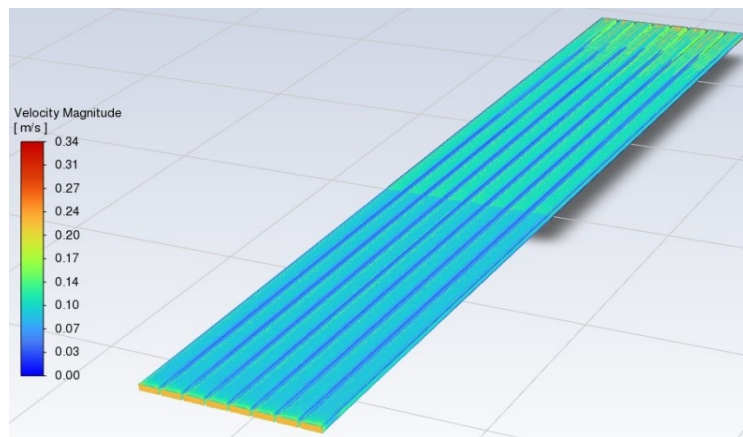


Slika 6.2 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 1.6$ L/min

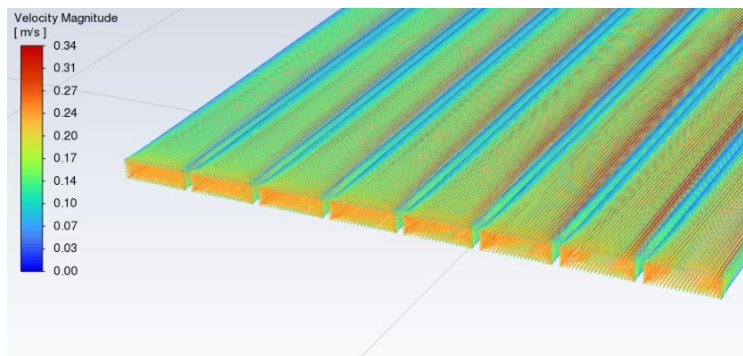


Slika 6.3 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 1.6$ L/min

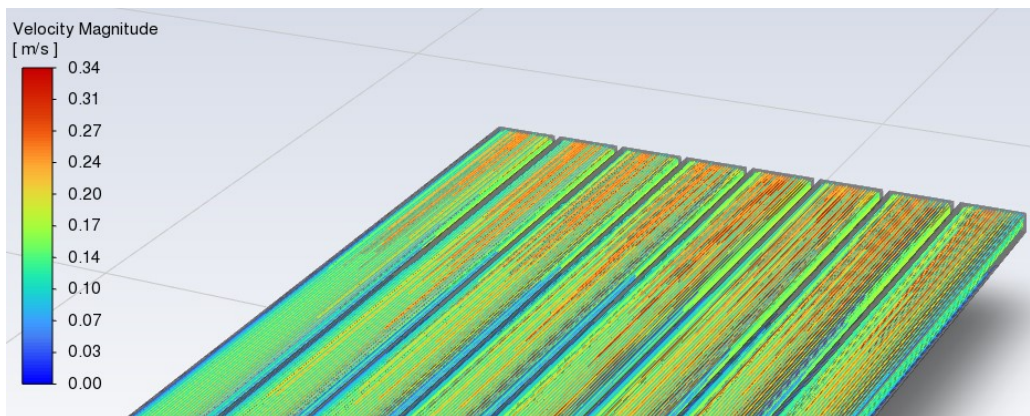
Slikama 6.4, 6.5 i 6.6 prikazane su strujnice brzine unutar cjevovoda za slučaj grijanja coldplate-a s gornje strane.



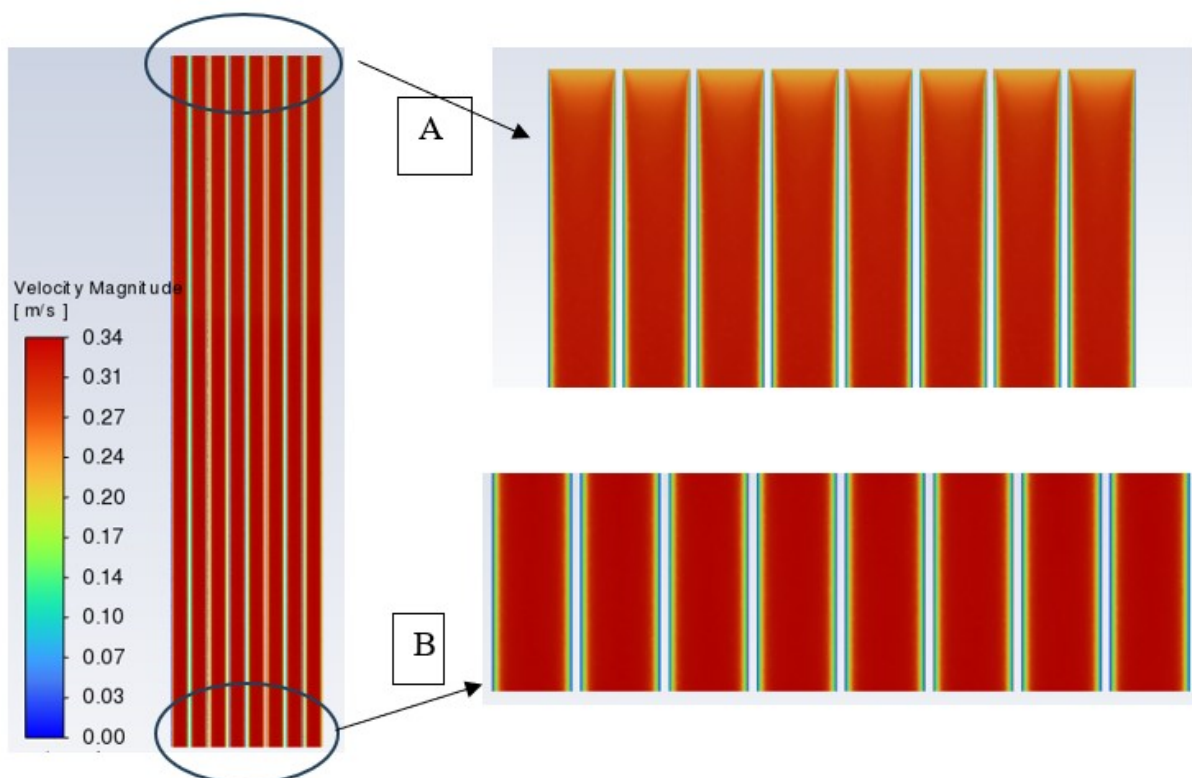
Slika 6.4 Prikaz strujnica brzine kroz cjevovod za coldplate grijan s gornje strane i $Q = 1.6$ L/min



Slika 6.5 Prikaz detalja strujnica brzine na ulazu u cjevovod za coldplate grijan s gornje strane i $Q = 1.6$ L/min



Slika 6.6 Prikaz detalja strujnica brzine na izlazu iz cjevovoda za coldplate grijan s gornje strane i $Q = 1.6 \text{ L/min}$



Slika 6. 7 Kontura brzine na presjeku s detaljima ulaza (A) i izlaza (B)

Slikom 6.6. prikazano je kako je postignuta laminarna brzina kroz cijelu domenu fluida s konturama brzina na ulazu odnosno, izlazu iz cjevovoda.

Tablicom 6.1. dani su rezultati temperatura koji su očitani putem *Ansys-a*.

Tablica 6.1 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT _{avg} [K]
Ulaz ₁	300,17	7,17	319,71	295,92	23,79
Ulaz ₂	300,17	7,17	319,21	295,92	23,29
Ulaz ₃	300,03	7,03	319,13	295,92	23,21
Ulaz ₄	300,01	7,01	319,12	295,92	23,20
Ulaz ₅	300,01	7,01	319,11	295,92	23,19
Ulaz ₆	300,00	7,04	319,12	295,92	23,20
Ulaz ₇	300,06	7,06	319,20	295,92	23,28
Ulaz ₈	300,01	7,01	319,71	295,92	23,79

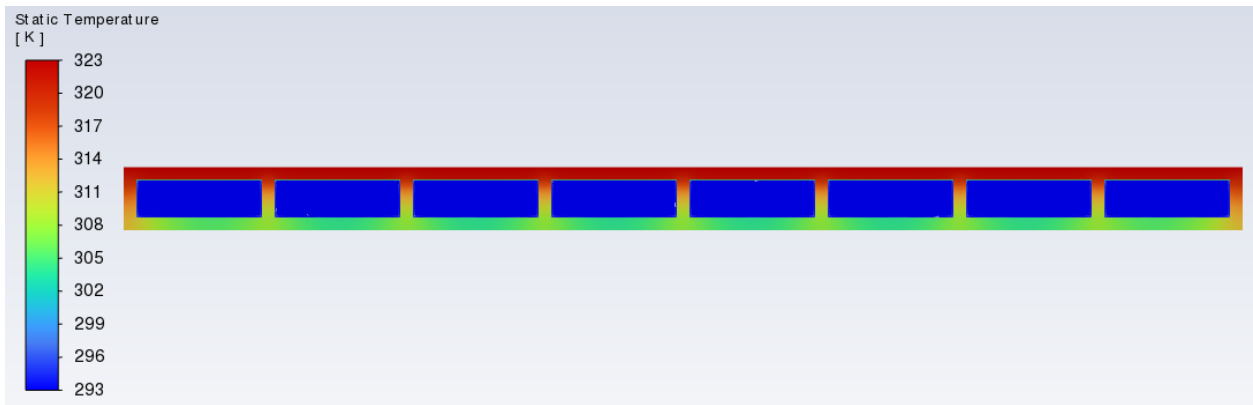
Tablica 6.2 prikazuje rješenja koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za slučaj zagrijavanja *coldplate-a* s gornje strane.

Tablica 6.2 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za *coldplate* grijan s gornje strane i $Q = 1.6 \text{ L/min}$

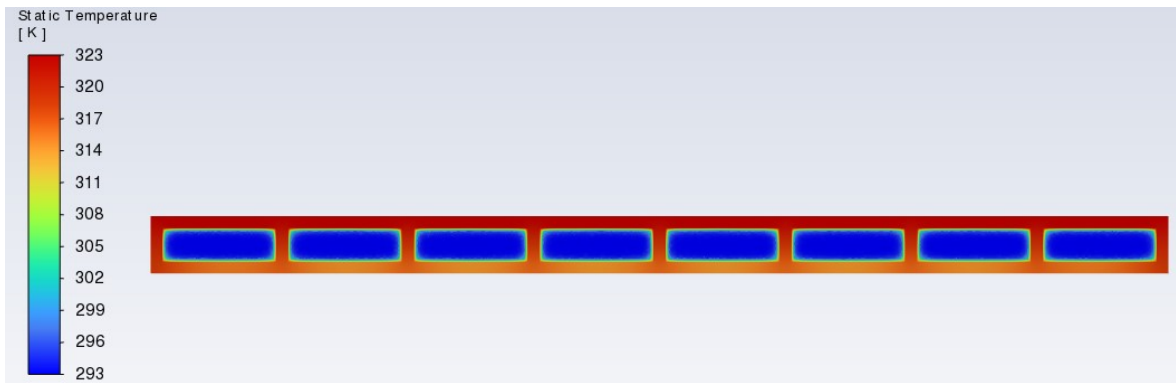
	FI[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	679,10	26119,27	1097,67	25,91
Ulaz ₂	678,43	26093,79	1120,24	26,44
Ulaz ₃	665,19	25584,29	1102,05	26,01
Ulaz ₄	663,29	25511,51	1099,63	25,96
Ulaz ₅	663,29	25511,51	1099,77	25,96
Ulaz ₆	666,98	25653,44	1105,41	26,09
Ulaz ₇	668,50	25711,67	1104,02	26,06
Ulaz ₈	663,29	25511,51	1072,09	25,31

6.1.2 Protok fluida $Q = 3.2 \text{ L/min}$

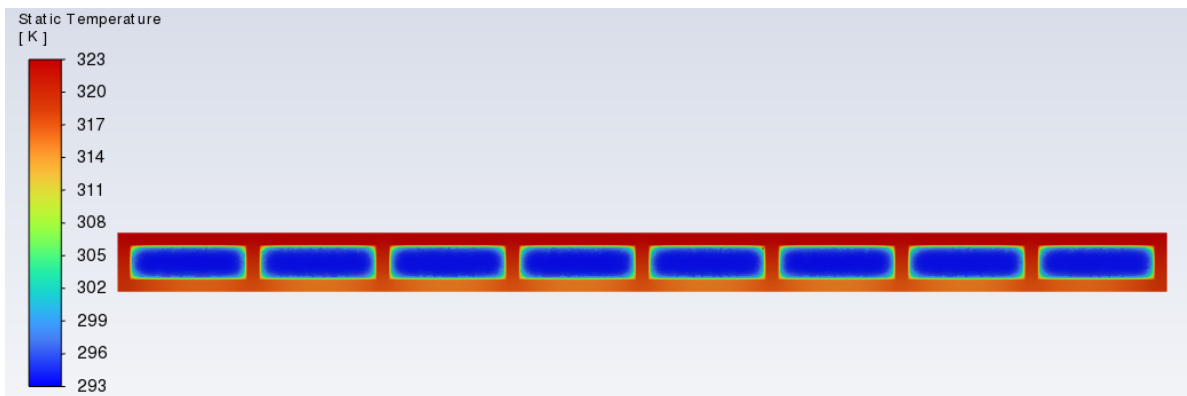
Slike 6.8, 6.9 i 6.10 prikazuju konture temperature na ulazu, sredini i izlazu za *coldplate* zagrijavan s gornje strane.



Slika 6.8 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje strane za $Q = 3.2$ L/min



Slika 6.9 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 3.2$ L/min



Slika 6.10 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 3.2$ L/min

Tablica 6.3 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje stranei $Q = 3.2 \text{ L/min}$

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT_{avg} [K]
Ulaz ₁	298,32	5,32	319,07	295,20	23,87
Ulaz ₂	298,36	5,36	318,49	295,14	23,34
Ulaz ₃	298,20	5,20	318,41	295,14	23,27
Ulaz ₄	298,19	5,19	318,40	295,14	23,26
Ulaz ₅	298,20	5,20	318,39	295,13	23,25
Ulaz ₆	298,22	5,22	318,40	295,14	23,25
Ulaz ₇	298,23	5,23	318,48	295,14	23,33
Ulaz ₈	298,21	5,21	319,07	295,20	23,87

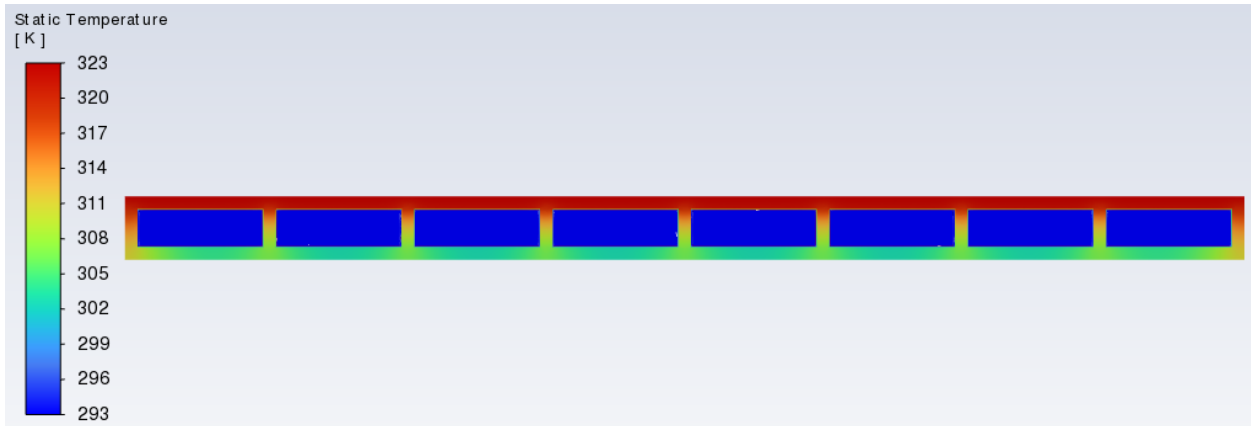
Tablica 6.4 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 3.2 \text{ L/min}$

Q1 = 3.2 l/min	Fl[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	1008,13	38774,58	1624,21	38,34
Ulaz ₂	1014,50	39019,51	1671,12	39,45
Ulaz ₃	985,46	37902,38	1628,25	38,43
Ulaz ₄	983,52	37828,00	1626,21	38,39
Ulaz ₅	984,90	37880,85	1628,60	38,44
Ulaz ₆	989,49	38057,42	1636,23	38,62
Ulaz ₇	990,18	38083,99	1632,08	38,53
Ulaz ₈	987,18	37968,77	1590,59	37,55

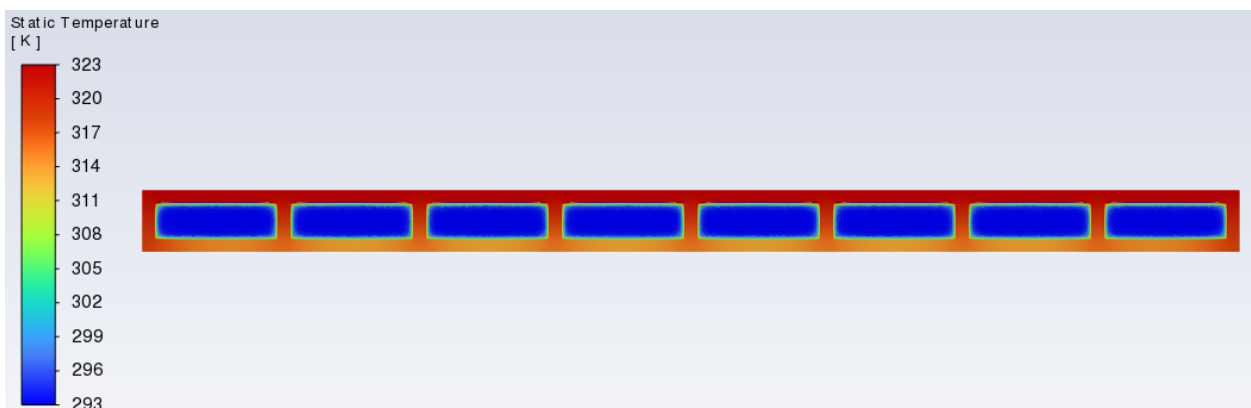
Tablicom 6.3 prikazane su temperature pomoću kojih su se izračunali koeficijenti prijelaza topline i Nusseltov broj (Tablica 6.4).

6.1.3. Protok fluida $Q = 4.8$ L/min

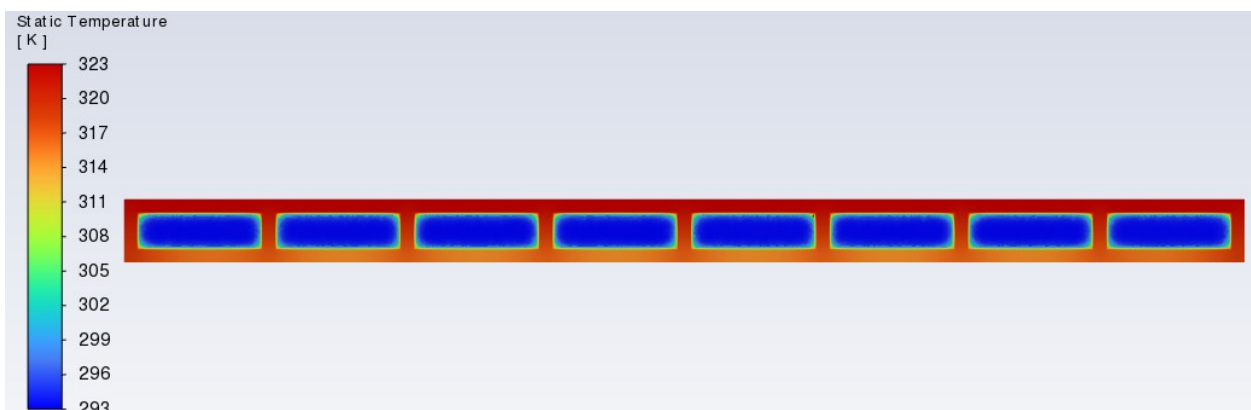
Slikama 6.11, 6.12 i 6.13 prikazane su konture temperature na ulazu, sredini i izlazu za *coldplate-a* za slučaj grijanja s gornje strane



Slika 6.11 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje strane za $Q = 4.8$ L/min



Slika 6.12 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 4.8$ L/min



Slika 6.13 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 4.8$ L/min

Tablica 6.5 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje strane i $Q = 4.8 \text{ L/min}$

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT_{avg} [K]
Ulaz ₁	300,42	7,42	320,29	296,06	24,22
Ulaz ₂	300,42	7,42	319,85	296,01	23,84
Ulaz ₃	300,29	7,29	319,77	296,00	23,77
Ulaz ₄	300,30	7,30	319,75	296,00	23,75
Ulaz ₅	300,30	7,30	319,75	296,00	23,75
Ulaz ₆	300,31	7,31	319,77	296,00	23,77
Ulaz ₇	300,31	7,31	319,85	296,01	23,84
Ulaz ₈	300,29	7,29	320,29	296,06	24,22

Tablica 6.6 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 4.8 \text{ L/min}$

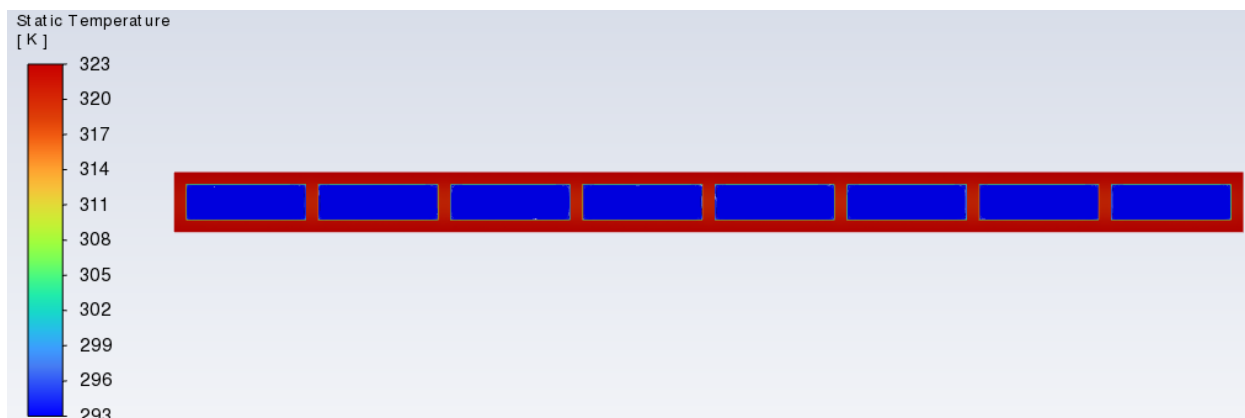
	F [W]	q [W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	1291,17	49660,64	2089,36	49,32
Ulaz ₂	1299,19	49968,86	2154,37	50,86
Ulaz ₃	1257,67	48372,11	2092,37	49,39
Ulaz ₄	1261,91	48535,12	2101,05	49,60
Ulaz ₅	1256,42	48324,07	2091,81	49,38
Ulaz ₆	1263,81	48608,38	2104,57	49,68
Ulaz ₇	1267,05	48732,95	2102,70	49,64
Ulaz ₈	1264,53	48636,11	2046,42	48,31

Tablicom 6.5 dane su temperature za slučaj grijanja *coldplate-a* s gornje strane, a Tablicom 6.7 prikazane su izračunate vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja.

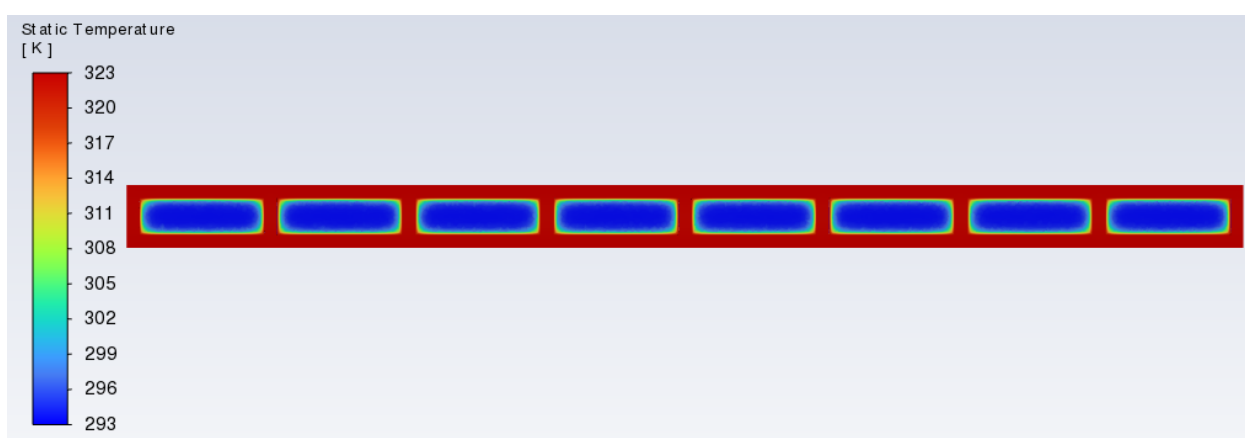
6.2. Ravni cjevovod polihedralne mreže grijane sa gornje i donje strane

6.2.1. Protok fluida $Q = 1.6 \text{ L/min}$

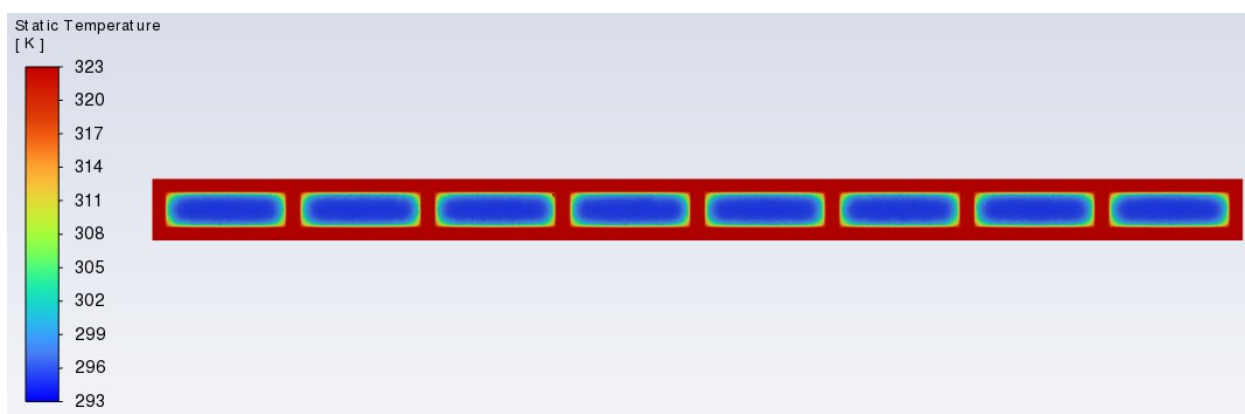
Slikama 6.14, 6.15 i 6.16 prikazane su konture temperature na ulazu, sredini i izlazu za slučaj zagrijavanja *coldplate-a* s gornje i donje strane.



Slika 6.14 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje i donje strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$



Slika 6.15 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$



Slika 6.16 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$

Graf 6.7 prikazuje očitane vrijednosti temperatura za *coldplate* grijan s gornje i donje strane.

Tablica 6.7 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje i donje strane i $Q = 1.6 \text{ L/min}$

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT_{avg} [K]
Ulaz ₁	300,89	7,89	322,76	296,26	26,49
Ulaz ₂	300,89	7,89	322,74	296,26	26,48
Ulaz ₃	300,88	7,88	322,74	296,26	26,48
Ulaz ₄	300,89	7,89	322,74	296,25	26,48
Ulaz ₅	300,86	7,86	322,74	296,26	26,48
Ulaz ₆	300,88	7,88	322,74	296,26	26,48
Ulaz ₇	300,90	7,90	322,74	296,26	26,47
Ulaz ₈	300,85	7,85	322,76	296,26	26,49

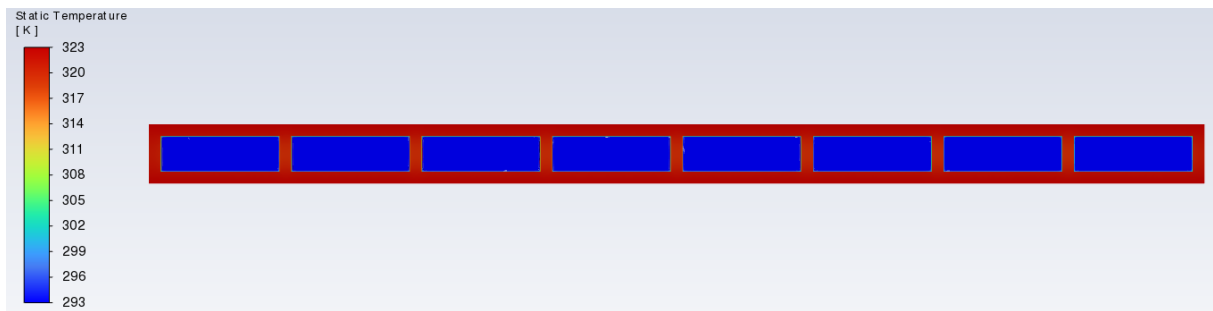
Tablicom 6.8 prikazane su vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za *coldplate* grijan s gornje i donje strane.

Tablica 6.8 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 1.6 \text{ L/min}$

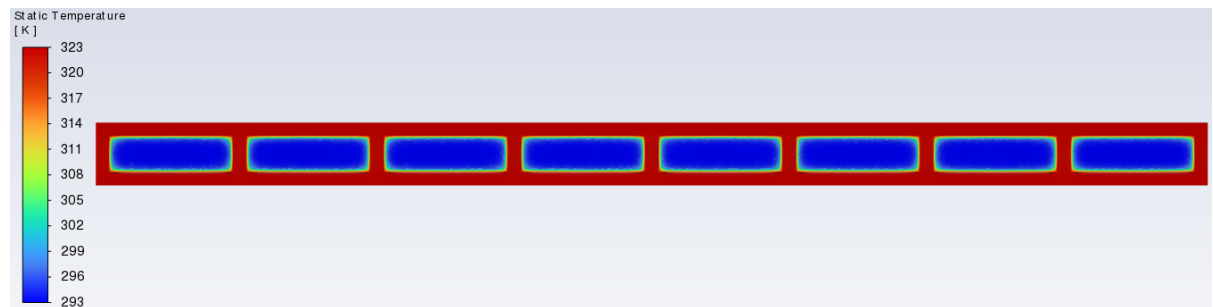
	FI[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	746,68	28718,82	1083,84	25,58
Ulaz ₂	747,26	28740,95	1085,36	25,62
Ulaz ₃	746,08	28695,53	1083,65	25,58
Ulaz ₄	746,87	28725,92	1084,57	25,60
Ulaz ₅	744,18	28622,67	1080,75	25,51
Ulaz ₆	745,73	28682,18	1083,12	25,57
Ulaz ₇	747,87	28764,35	1086,51	25,65
Ulaz ₈	743,57	28599,13	1079,33	25,48

6.2.2. Protok fluida $Q = 3.2 \text{ L/min}$

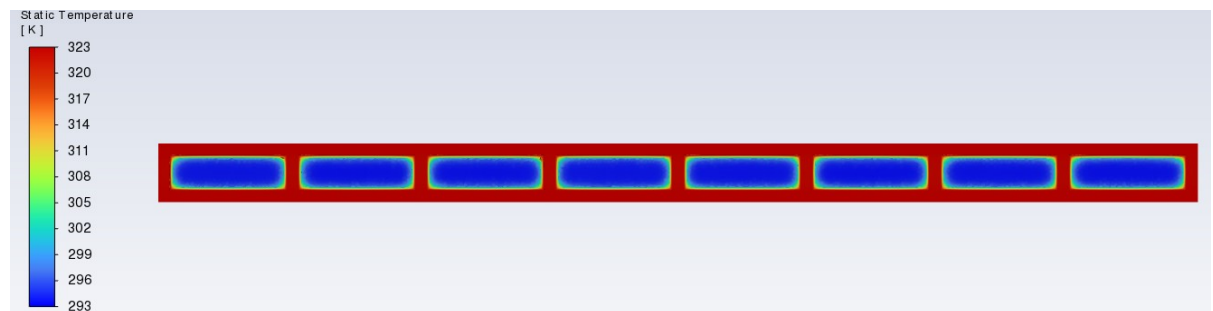
Slikama 6.17, 6.18 i 6.19 prikazane su konture temperatura na ulazu, sredini i izlazu iz cjevovoda za slučaj grijanja *coldplate-a* s gornje i donje strane.



Slika 6.17 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje i donje strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$



Slika 6.18 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$



Slika 6.19 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$

Tablicom 6.9 dane su vrijednosti temperatura pomoću kojih su u Tablici 7.10 izračunate vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja.

Tablica 6.9 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje i donje strane i $Q = 3.2 \text{ L/min}$

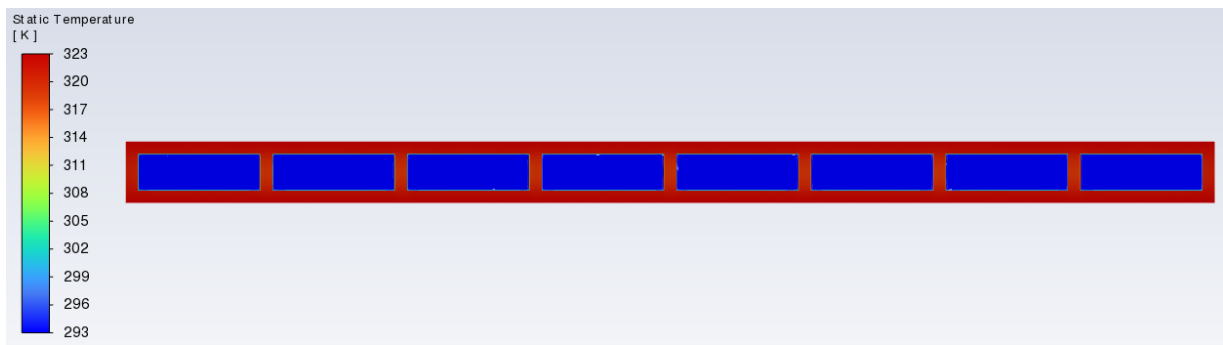
	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT _{avg} [K]
Ulaz ₁	299,00	6,00	322,70	295,51	27,18
Ulaz ₂	298,96	5,96	322,67	295,51	27,15
Ulaz ₃	298,97	5,97	322,67	295,51	27,16
Ulaz ₄	298,98	5,98	322,67	295,51	27,16
Ulaz ₅	298,97	5,97	322,67	295,51	27,16
Ulaz ₆	298,98	5,98	322,67	295,52	27,15
Ulaz ₇	299,00	6,00	322,67	295,52	27,14
Ulaz ₈	298,92	5,92	322,70	295,53	27,17

Tablica 6.10 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 3.2 \text{ L/min}$

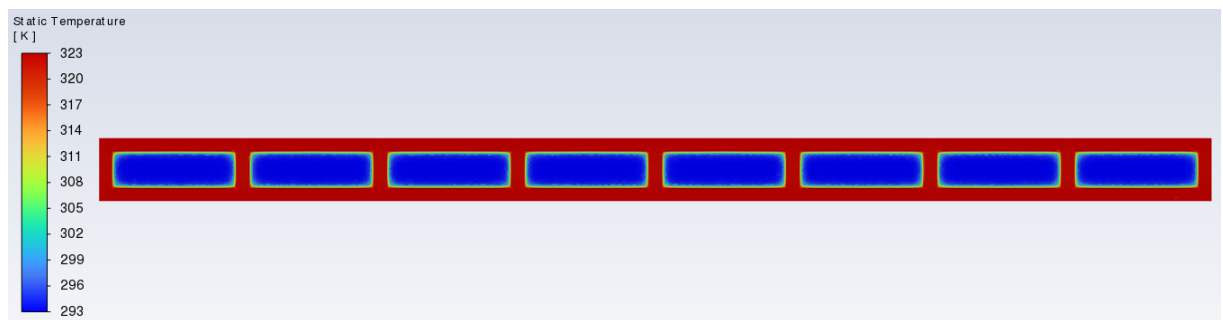
	FI[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	1136,41	43708,46	1607,73	37,95
Ulaz ₂	1128,30	43396,42	1597,91	37,72
Ulaz ₃	1129,83	43455,38	1599,87	37,77
Ulaz ₄	1132,11	43542,87	1602,78	37,83
Ulaz ₅	1131,06	43502,62	1601,43	37,80
Ulaz ₆	1132,68	43564,63	1604,45	37,87
Ulaz ₇	1136,53	43712,75	1610,31	38,01
Ulaz ₈	1121,66	43141,02	1587,54	37,47

6.2.3. Protok fluida $Q = 4.8 \text{ L/min}$

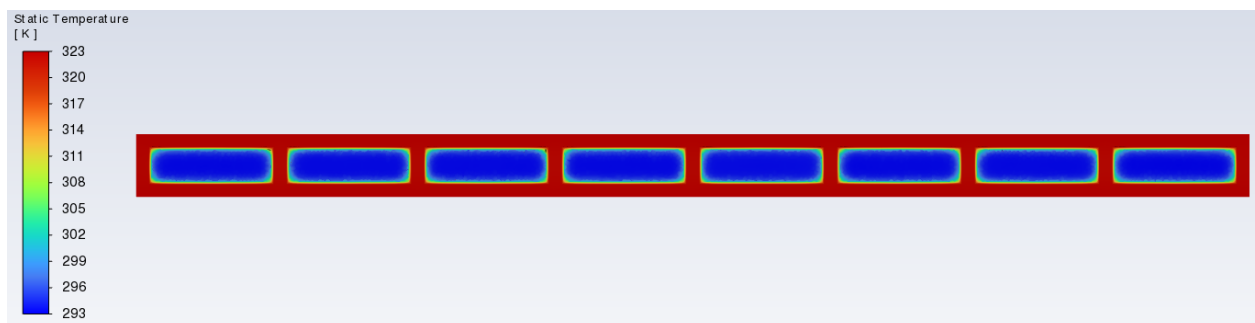
Slikom 6.20, 6.21, 6.22 prikazane su konture temperature za slučaj grijanja *colplate-a* s gornje i donje strane te protok od 4.8 L/min .



Slika 6.20 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje i donje strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$



Slika 6.21 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$



Slika 6.22 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$

Tablica 6.11 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje i donje strane i $Q = 4.8 \text{ L/min}$

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT_{avg} [K]
Ulaz ₁	298,19	5,19	322,65	295,17	27,48
Ulaz ₂	298,17	5,17	322,62	295,17	27,44
Ulaz ₃	298,11	5,11	322,62	295,17	27,45
Ulaz ₄	298,17	5,17	322,63	295,16	27,46
Ulaz ₅	298,16	5,16	322,62	295,16	27,46
Ulaz ₆	298,16	5,16	322,62	295,18	27,44
Ulaz ₇	298,18	5,18	322,62	295,18	27,43
Ulaz ₈	298,13	5,13	322,66	295,18	27,47

Tablica 6.12 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 4.8 \text{ L/min}$

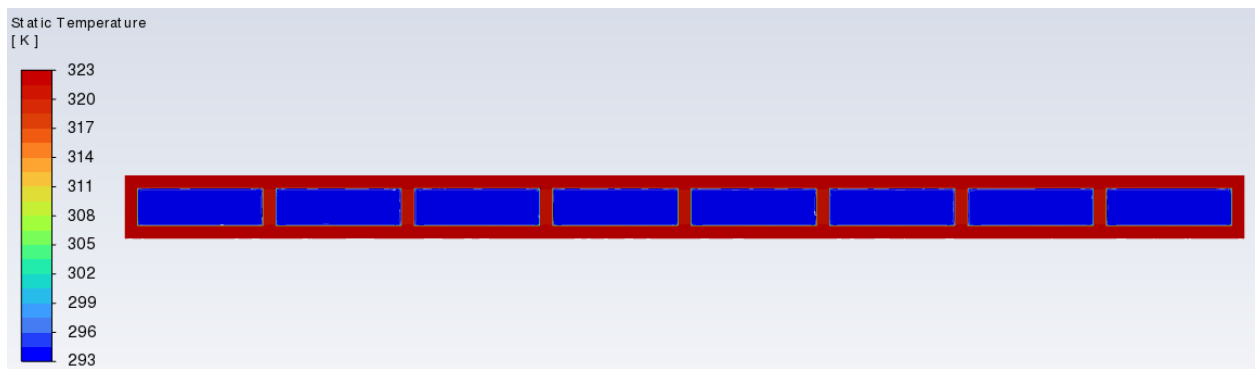
	F [W]	q [W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	1474,17	56699,09	2062,87	48,70
Ulaz ₂	1467,86	56456,28	2056,89	48,55
Ulaz ₃	1451,96	55844,66	2034,21	48,02
Ulaz ₄	1469,90	56534,67	2058,68	48,60
Ulaz ₅	1465,14	56351,68	2051,84	48,44
Ulaz ₆	1465,08	56349,28	2053,41	48,47
Ulaz ₇	1471,84	56609,35	2063,12	48,70
Ulaz ₈	1458,70	56103,85	2042,10	48,21

Tablicama 6.11 i 6.12 prikazani su rezultati očitanih temperatura odnosno, vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za slučaj grijanja *coldplate-a* s gornje i donje strane i protok od 4.8 L/min.

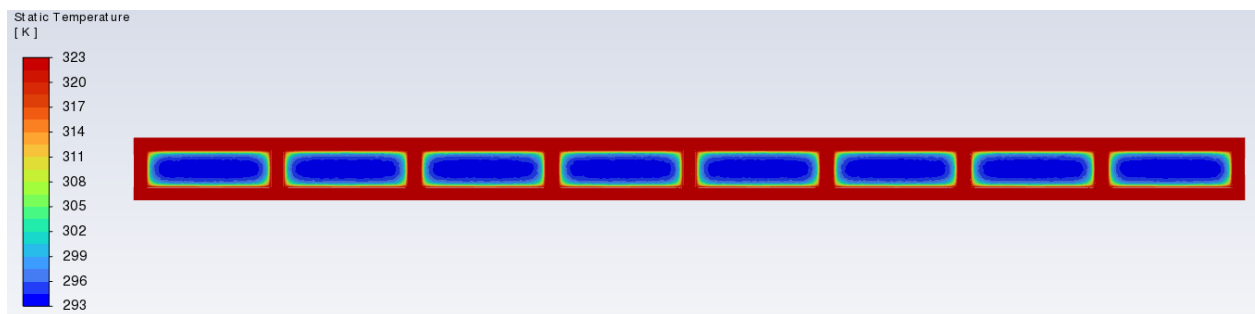
6.3. Ravni cjevovod polihedralne mreže grijane sa svih strane

6.3.1. Protok fluida $Q = 1.6 \text{ L/min}$

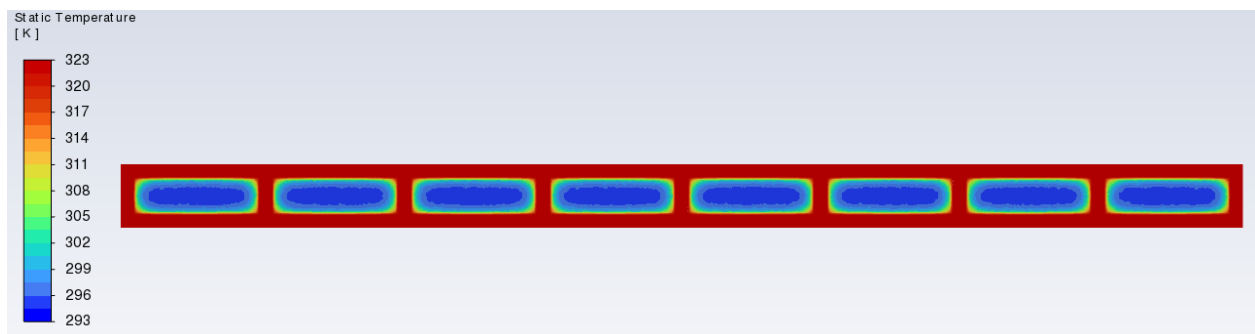
Slikama 6.23, 6.24, 6.25 prikazane su konture temperature na ulazu, sredini i izlazu, za slučaj grijanja *coldplate-a* sa svih strana te protok od 1.6 L/min.



Slika 6.23 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan sa svih strane za $Q = 1.6$ L/min



Slika 6.24 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 1.6$ L/min



Slika 6.25 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 1.6$ L/min

Tablica 6.13 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan sa svih strane i $Q = 1.6 \text{ L/min}$

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT_{avg} [K]
Ulaz ₁	300,90	7,90	322,79	296,27	26,52
Ulaz ₂	300,89	7,89	322,74	296,26	26,48
Ulaz ₃	300,87	7,87	322,74	296,25	26,48
Ulaz ₄	300,87	7,87	322,74	296,25	26,48
Ulaz ₅	300,86	7,86	322,74	296,26	26,48
Ulaz ₆	300,87	7,87	322,74	296,25	26,48
Ulaz ₇	300,89	7,89	322,74	296,26	26,47
Ulaz ₈	300,86	7,86	322,79	296,27	26,52

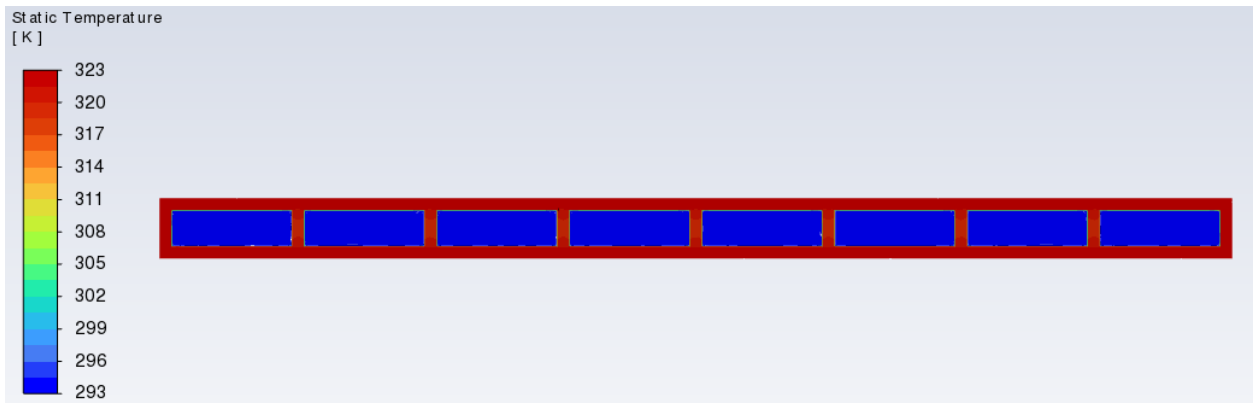
Tablica 6.14 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 1.6 \text{ L/min}$

	\dot{Q} [W]	q [W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	748,11	28773,67	1084,88	25,61
Ulaz ₂	747,39	28746,08	1085,57	25,62
Ulaz ₃	745,59	28676,68	1082,69	25,56
Ulaz ₄	744,78	28645,45	1081,46	25,53
Ulaz ₅	744,17	28622,02	1080,79	25,51
Ulaz ₆	745,25	28663,72	1082,31	25,55
Ulaz ₇	747,44	28747,86	1085,88	25,63
Ulaz ₈	744,18	28622,49	1079,24	25,47

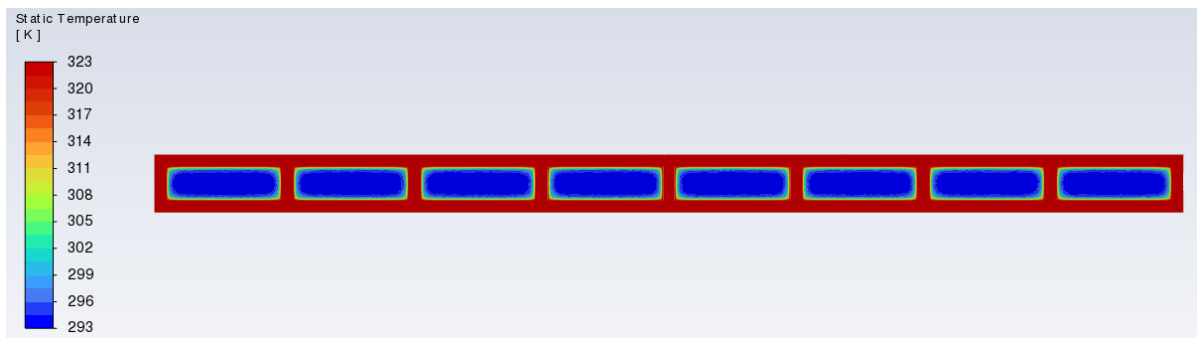
Tablicom 6.13 dane su očitane temperature, a Tablicom 6.14 izračunate vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za slučaj grijanja *coldplate-a* sa svih strana i protoka od 1.6 L/min.

6.3.2. Protok fluida $Q = 3.2 \text{ L/min}$

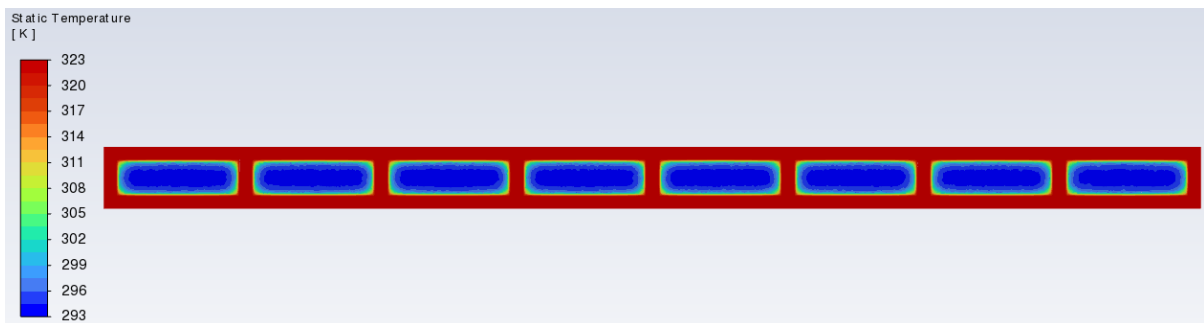
Slikom 6.26, 6.27, 6.28 prikazane su konture temperature na ulazu, sredini i izlazu u *coldplate* za slučaj grijanja sa svih strana i protok od 3.2 L/min.



Slika 6.26 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan sa svih strane za $Q = 3.2$ L/min



Slika 6.27 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 3.2$ L/min



Slika 6.28 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 3.2$ L/min

Tablica 6.15 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan sa svih strane i $Q = 3.2 \text{ L/min}$

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT_{avg} [K]
Ulaz ₁	298,96	5,96	322,74	295,52	27,21
Ulaz ₂	299,00	6,00	322,67	295,52	27,15
Ulaz ₃	298,98	5,98	322,68	295,52	27,15
Ulaz ₄	298,97	5,97	322,67	295,51	27,16
Ulaz ₅	298,95	5,95	322,67	295,51	27,16
Ulaz ₆	298,98	5,98	322,67	295,51	27,16
Ulaz ₇	298,99	5,99	322,67	295,51	27,15
Ulaz ₈	298,94	5,94	322,74	295,52	27,21

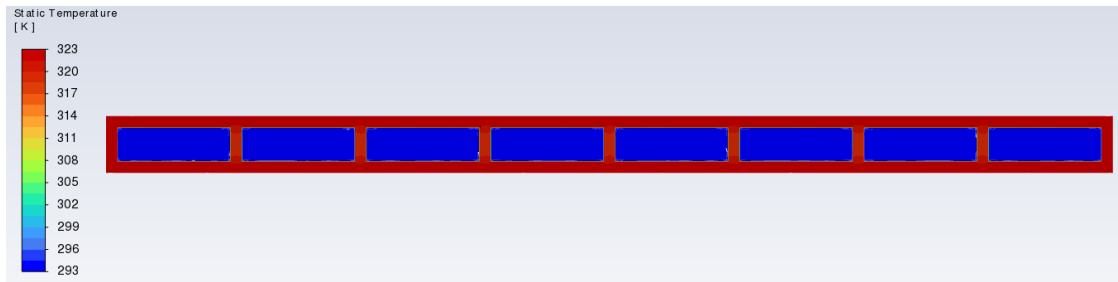
Tablicom 6.15 dane su očitane temperature, a Tablicom 6.16 izračunate su vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za slučaj grijanja sa svih strana i protok od 3.2 L/min

Tablica 6.16 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 3.2 \text{ L/min}$

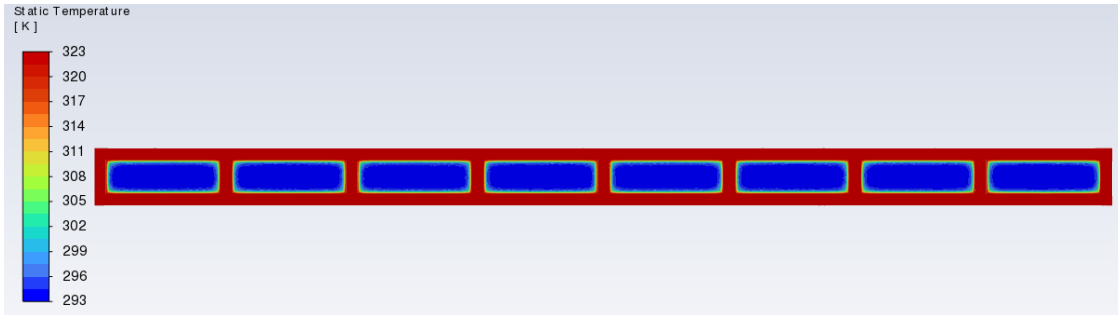
	F [W]	q [W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	1129,08	43426,48	1595,77	37,67
Ulaz ₂	1135,77	43683,56	1608,67	37,97
Ulaz ₃	1132,91	43573,51	1604,50	37,87
Ulaz ₄	1130,72	43489,52	1600,91	37,79
Ulaz ₅	1126,19	43315,05	1594,77	37,64
Ulaz ₆	1132,72	43566,45	1604,03	37,86
Ulaz ₇	1134,17	43621,99	1606,38	37,92
Ulaz ₈	1125,92	43304,93	1591,01	37,56

6.3.3. Protok fluida $Q = 4.8 \text{ L/min}$

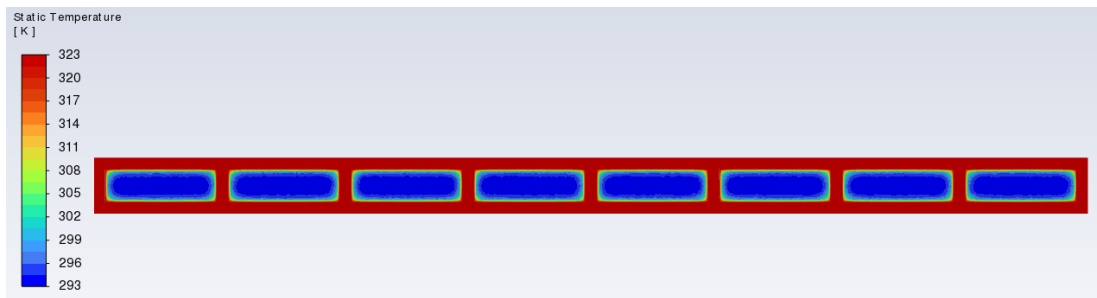
Slike 6.29, 6.30 i 6.31 prikazuju konture temperature na ulazu, sredini i izlazu, za slučaj grijanja sa svih strana i protok od 4.8 L/min.



Slika 6.29 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan sa svih strane za $Q = 4.8$ L/min



Slika 6.30 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 4.8$ L/min



Slika 6.31 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 4.8$ L/min

Tablica 6.17 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan sa svih strane i $Q = 4.8$ L/min

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT _{avg} [K]
Ulaz ₁	298,13	5,13	322,70	295,18	27,51
Ulaz ₂	298,19	5,19	322,62	295,17	27,45
Ulaz ₃	298,15	5,15	322,63	295,18	27,44
Ulaz ₄	298,17	5,17	322,63	295,17	27,46
Ulaz ₅	298,12	5,12	322,63	295,17	27,45
Ulaz ₆	298,14	5,14	322,62	295,17	27,45
Ulaz ₇	298,15	5,15	322,62	295,17	27,44
Ulaz ₈	298,12	5,12	322,70	295,17	27,52

Tablica 6.18 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 4.8 \text{ L/min}$

	Fl[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	756,93	29112,85	1099,69	25,96
Ulaz ₂	756,93	29112,85	1101,20	25,99
Ulaz ₃	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₄	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₅	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₆	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₇	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₈	756,06	29079,55	1098,43	25,93

Tablicom 6.17 prikazane su očitane temperature, a tablicom 6.18 izračunate su vrijednosti za slučaj grijanja sa svih strana i protok od 4.8 L/min.

6.4. Ravni cjevovod strukturirane mreže

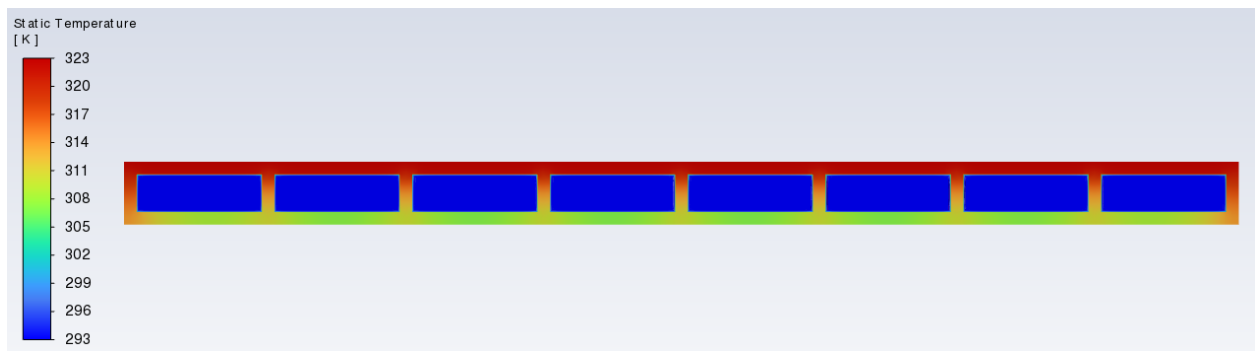
Za numeričke simulacije u kojima se koristila strukturirana mreža, koristio se jedan slučaj protoka:

$$Q = 1.6 \frac{L}{min}$$

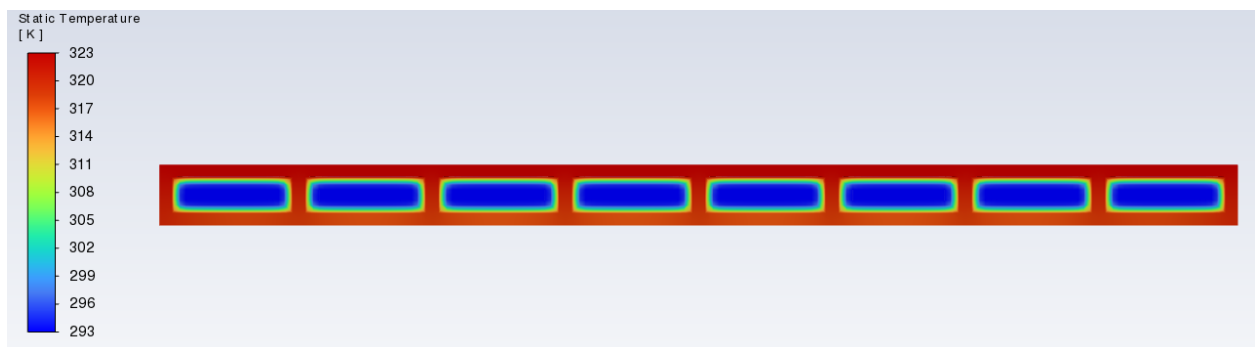
Također, simulacije su provedene za sva tri slučaja grijanja *coldplate-a*.

6.4.1. Zagrijavanje *coldplate-a* sa gornje strane

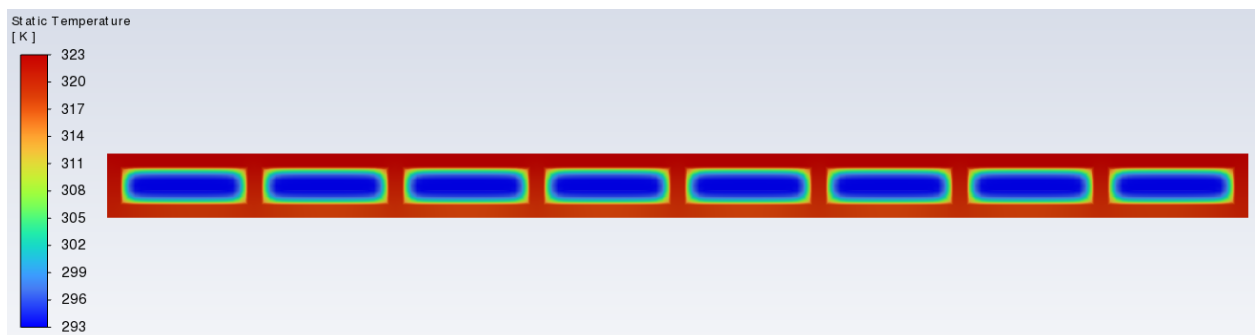
Slikama 6.32, 6.33 i 6.34 prikazane su konture temperature na ulazu, sredini i izlazu iz *coldplate* za strukturiranu numeričku mrežu i slučaj zagrijavanja s gornje strane.



Slika 6.32 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na ulazu u coldplate grijanog s gornje strane



Slika 6.33 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na sredini coldplate-a grijanog s gornje strane



Slika 6.34 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na izlazu, grijan s gornje strane

Tablica 6.19 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod (strukturirane mreže) grijan s gornje strane

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT_{avg} [K]
Ulaz ₁	300,42	7,42	320,29	296,06	24,22
Ulaz ₂	300,42	7,42	319,85	296,01	23,84
Ulaz ₃	300,29	7,29	319,77	296,00	23,77
Ulaz ₄	300,30	7,30	319,75	296,00	23,75
Ulaz ₅	300,30	7,30	319,75	296,00	23,75
Ulaz ₆	300,31	7,31	319,77	296,00	23,77
Ulaz ₇	300,31	7,31	319,85	296,01	23,84
Ulaz ₈	300,29	7,29	320,29	296,06	24,22

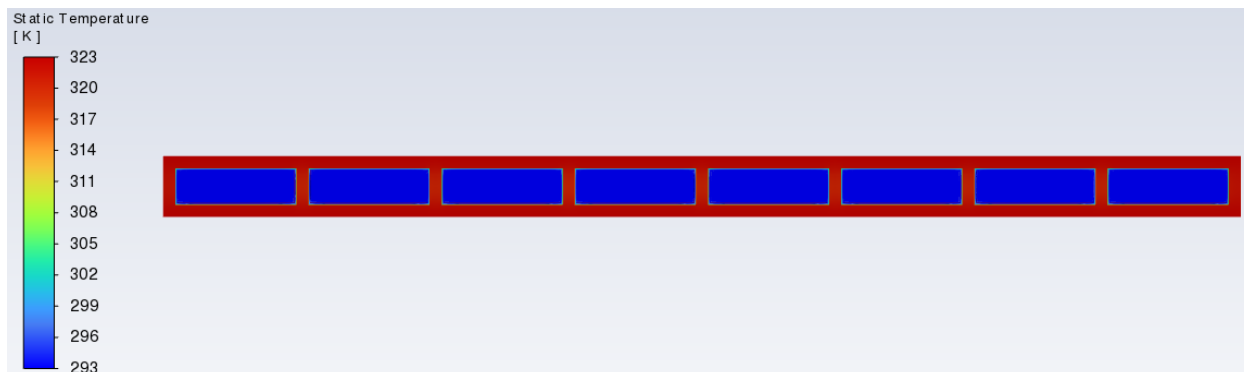
Tablica 6.20 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za coldplate grijan s gornje strane (strukturirana mreža)

	\dot{Q} [W]	q [W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	702,20	27007,95	1114,68	26,31
Ulaz ₂	702,20	27007,95	1132,85	26,74
Ulaz ₃	690,48	26557,19	1117,24	26,37
Ulaz ₄	690,81	26569,92	1118,36	26,40
Ulaz ₅	690,81	26569,92	1118,36	26,40
Ulaz ₆	692,62	26639,25	1120,69	26,45
Ulaz ₇	692,62	26639,25	1117,39	26,37
Ulaz ₈	690,48	26557,19	1096,08	25,87

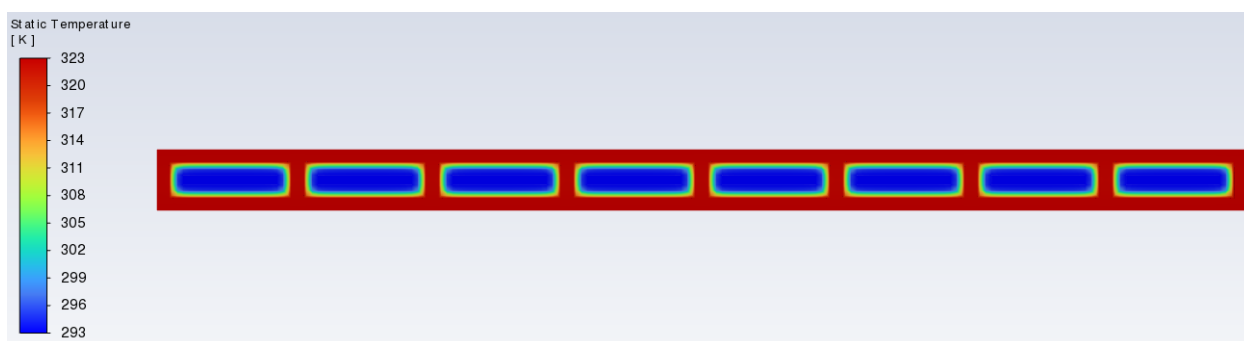
Tablicom 6.19 očitane su temperature kojima su izračunate vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za strukturiranu mrežu slučaja zagrijavanja s gornje strane.

6.4.2. Zagrijavanje *coldplate-a* sa gornje i donje strane

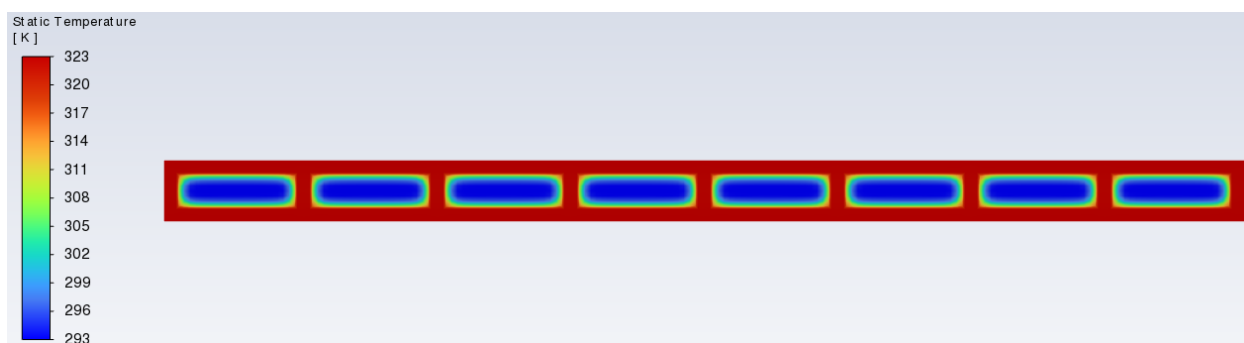
Slikama 6.35, 6.36 i 6.37 prikazane su konture temperature na ulazu, sredini i izlazu strukturirane mreže za slučaj grijanja s gornje i donje strane.



Slika 6.35 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i *coldplate-a* strukturirane numeričke mreže, na ulazu u *coldplate* grijanog s gornje i donje strane



Slika 6.36 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i *coldplate-a* strukturirane numeričke mreže, na sredini *coldplate-a* grijanog s gornje i donje strane



Slika 6.37 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i *coldplate-a* strukturirane numeričke mreže, na izlazu, grijan s gornje i donje strane

Tablica 6.21 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod (strukturirane mreže) grijan s gornje i donje strane

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT_{avg} [K]
Ulaz ₁	300,99	7,99	322,82	296,36	26,45
Ulaz ₂	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₃	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₄	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₅	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₆	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₇	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₈	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43

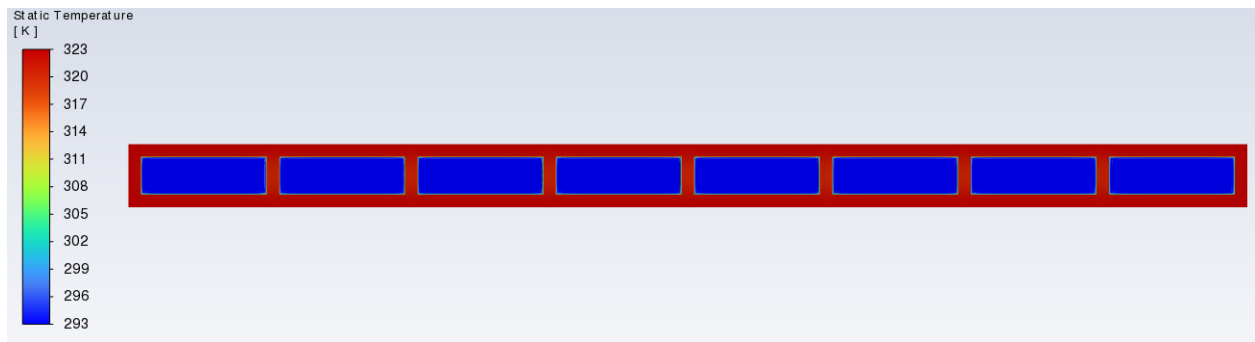
Tablica 6.22 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za coldplate grijan s gornje i donje strane (strukturirana mreža)

	F [W]	q [W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	756,49	29095,82	1099,82	25,96
Ulaz ₂	756,49	29095,82	1100,55	25,98
Ulaz ₃	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₄	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₅	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₆	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₇	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₈	756,06	29079,55	1099,83	25,96

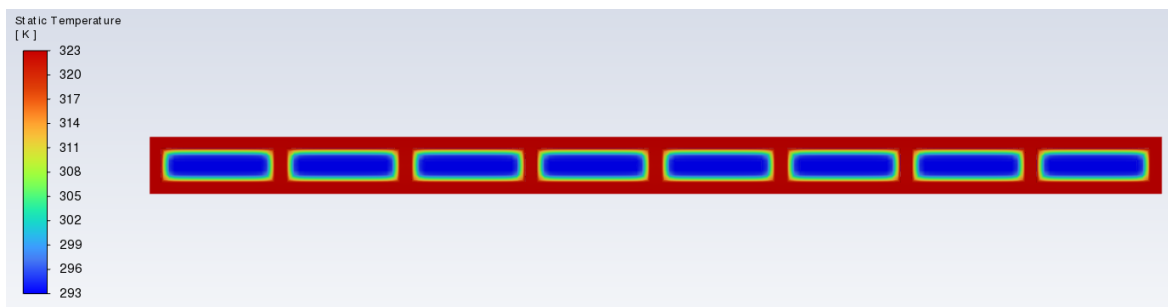
Tablicom 6.21 očitane su vrijednosti temperatura koje su se koristile za izračunavanje koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za slučaj strukturirane mreže gdje je grijanje bilo sa gornje i donje strane.

6.4.1. Zagrijavanje coldplate-a sa svih strana

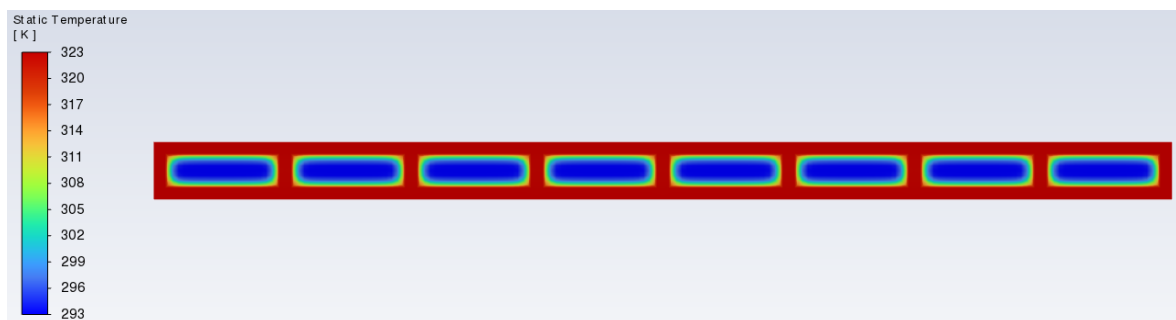
Slikama 6.38, 6.39 i 6.40 prikazuju se konture temperature strukturirane numeričke mreže za slučaj grijanja sa svih strana.



Slika 6.38 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na ulazu u coldplate grijanog sa svih strana



Slika 6.39 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na sredini coldplate-a grijanog sa svih strana



Slika 6.40 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na izlazu, grijan sa svih strana

Tablica 6.23 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod (strukturirane mreže) grijanoh sa svih strana

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT_{avg} [K]
Ulaz ₁	300,99	7,99	322,84	296,36	26,47
Ulaz ₂	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₃	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₄	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₅	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₆	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₇	300,99	7,99	322,80	296,36	26,43
Ulaz ₈	300,99	7,99	322,84	296,36	26,47

Tablica 6.24 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za coldplate grijanog sa svih strana (strukturirana mreža)

	Fl [W]	q [W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	756,93	29112,85	1099,69	25,96
Ulaz ₂	756,93	29112,85	1101,20	25,99
Ulaz ₃	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₄	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₅	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₆	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₇	756,06	29079,55	1099,94	25,96
Ulaz ₈	756,06	29079,55	1098,43	25,93

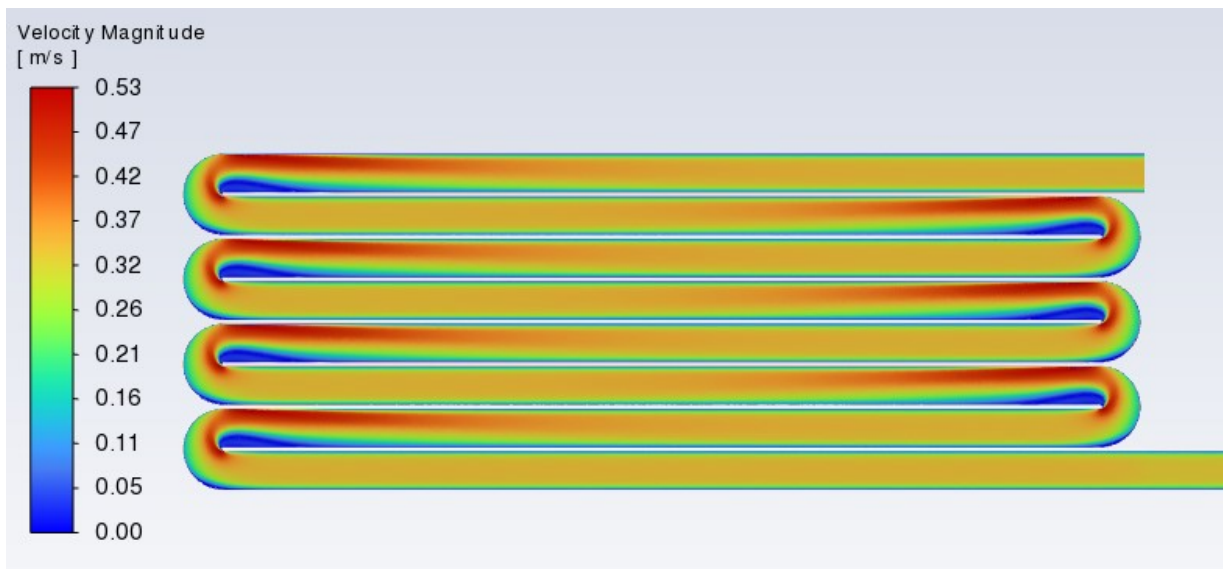
Tablicom 6.23 očitane su temperature pomoću kojih su se izračunali koeficijenti prijelaza topline i Nusseltov broj (Tablica 6.24)

6.6. Zmijoliki cjevovod

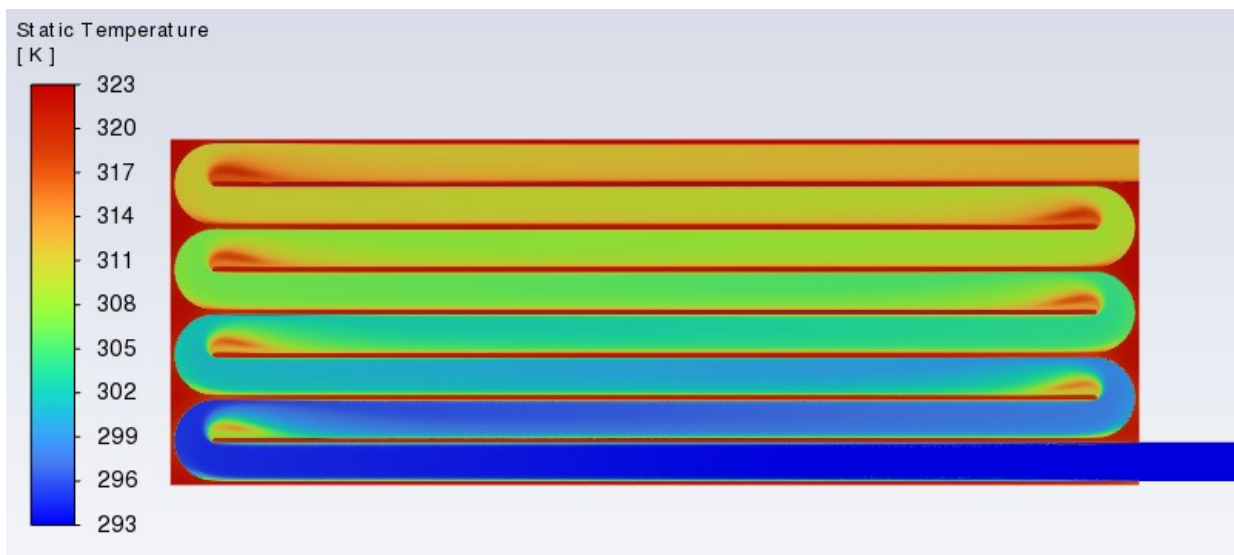
Prikazat će se rezultati zagrijavanja coldplate-a samo s gornje strane, s gornje i donje strane te ako se zagrijavaju gornja i donja te bočne strane *coldplate-a*.

6.6.1. Zmijoliki cjevovod za $Q = 1.6$ L/min

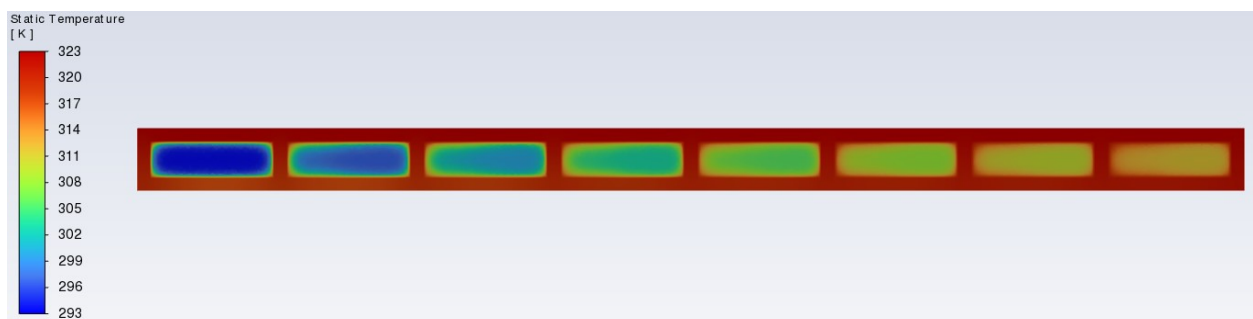
Slika 6.41 prikazuje konturu brzine, a Slika 6.42 konturu temperature na presjeku domene za zmijoliki cjevovod protoka 1.6 L/min.



Slika 6.41 Kontura brzine na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 1.6 \text{ L/min}$

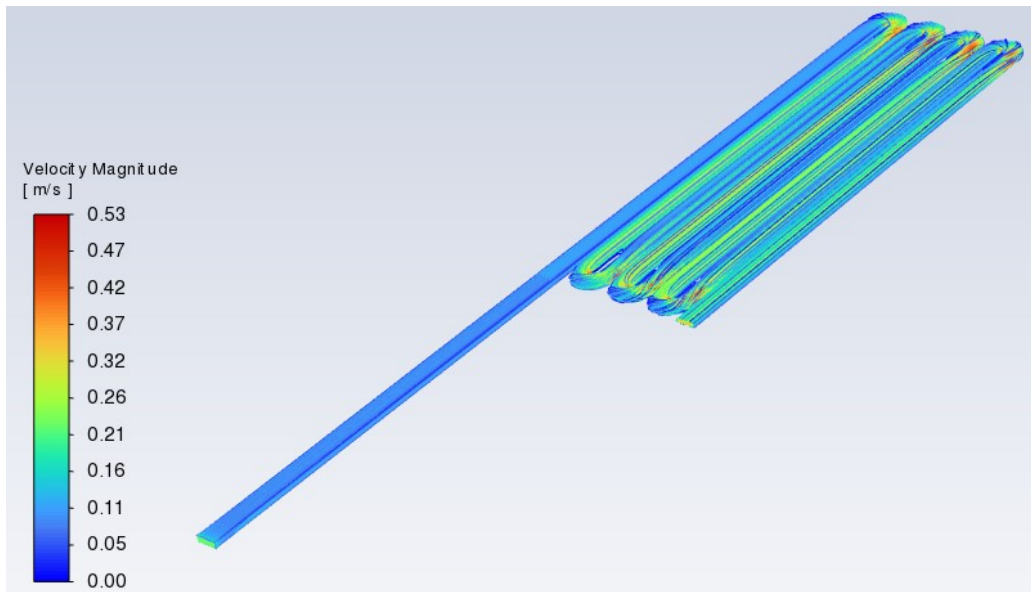


Slika 6.42 Kontura temperature na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 1.6 \text{ L/min}$

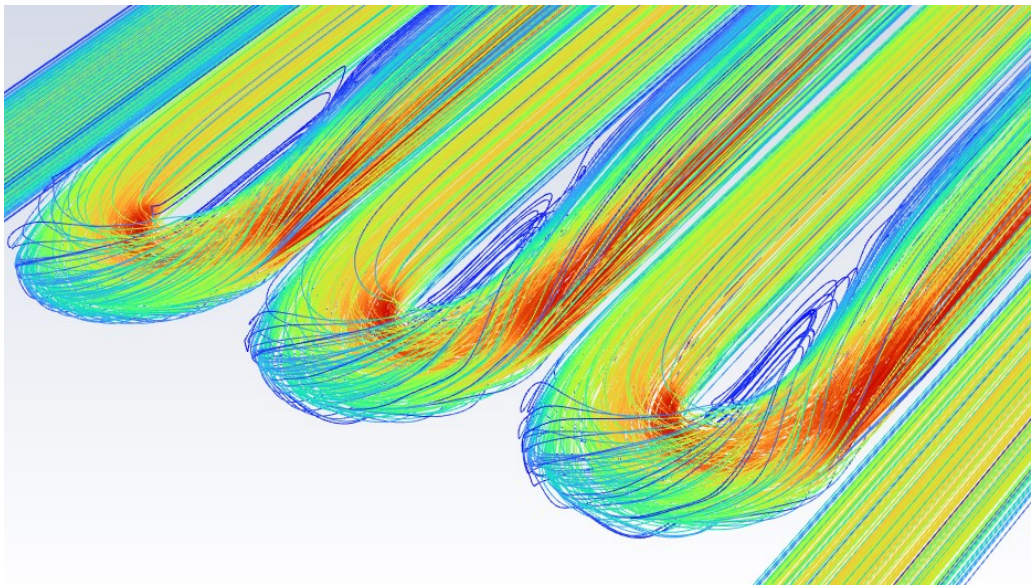


Slika 6.43 Kontura temperature na sredini domene za zmijoliki cjevovod i $Q = 1.6 \text{ L/min}$

Slikom 7.43 prikazuje se kontura temperature na sredini domene za zmijoliki cjevovod protoka 1.6 L/min.



Slika 6.44 Prikaz strujnica brzine zmijolikog cjevovoda za $Q = 1.6 \text{ L/min}$



Slika 6.45 Prikaz detalja strujnica brzine oko zakrivljenja zmijolikog cjevovoda za $Q = 1.6 \text{ L/min}$

Slikom 6.44 mogu se vidjeti strujnice brzine, a Slikom 6.45 detaljniji prikaz strujnica na području zakrivljenja za zmijoliki cjevovod protoka 1.6 L/min.

Tablica 6.25 Očitane vrijednosti temperatura za zmijoliki cjevovod i $Q = 1.6 \text{ L/min}$

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT _{avg} [K]
Ulaz ₁	314,70	21,70	320,72	306,30	14,42

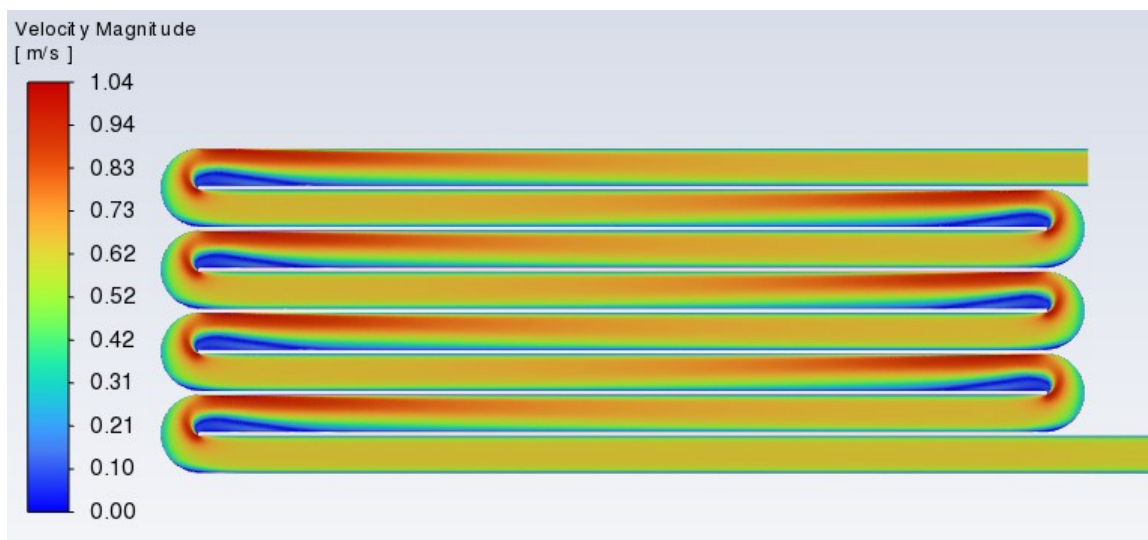
Tablica 6.26 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za zmijoliki cjevovod i $Q = 1.6 \text{ L/min}$

	F[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	2054,21	79008,45	5478,99	129,34

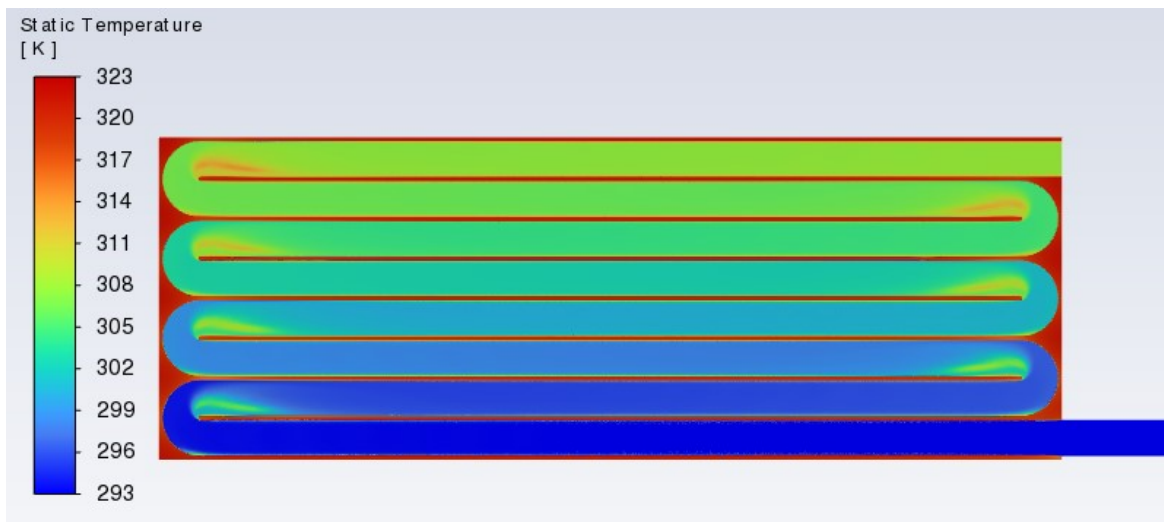
Tablicom 6.25 očitane su temperature pomoću kojih su se izračunali koeficijent prijelaza topline i Nusseltov broj.

6.6.2. Zmijoliki cjevovod za $Q = 3.2 \text{ L/min}$

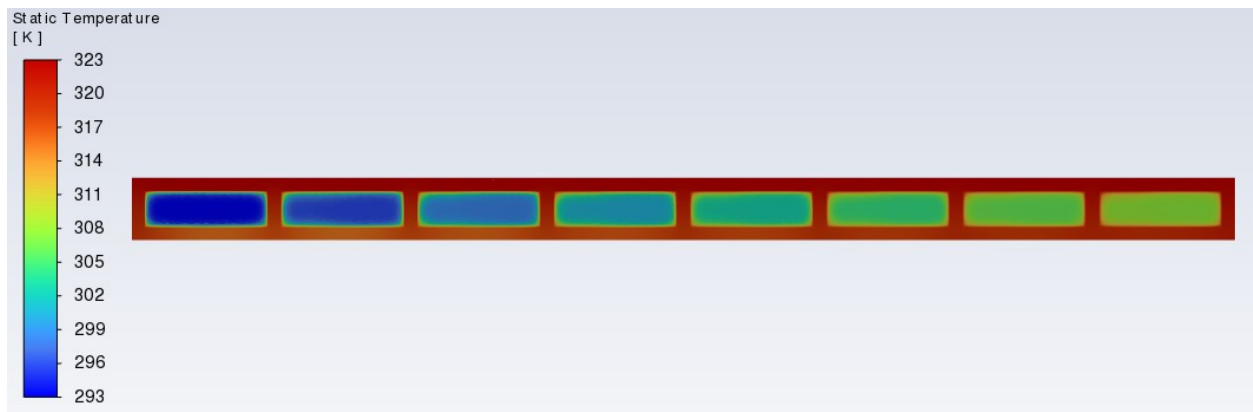
Slika 6.46 prikazuje konturu brzine, a slika 6.47 konturu temperature na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za protok 3.2 L/min .



Slika 6.46 Kontura brzine na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 3.2 \text{ L/min}$

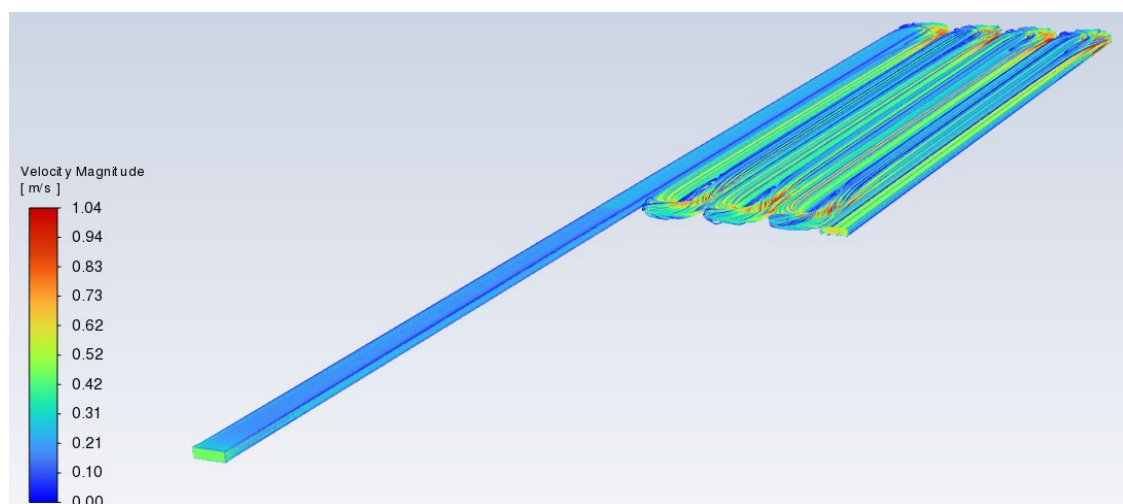


Slika 6.47 Kontura temperature na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 3.2 \text{ L/min}$

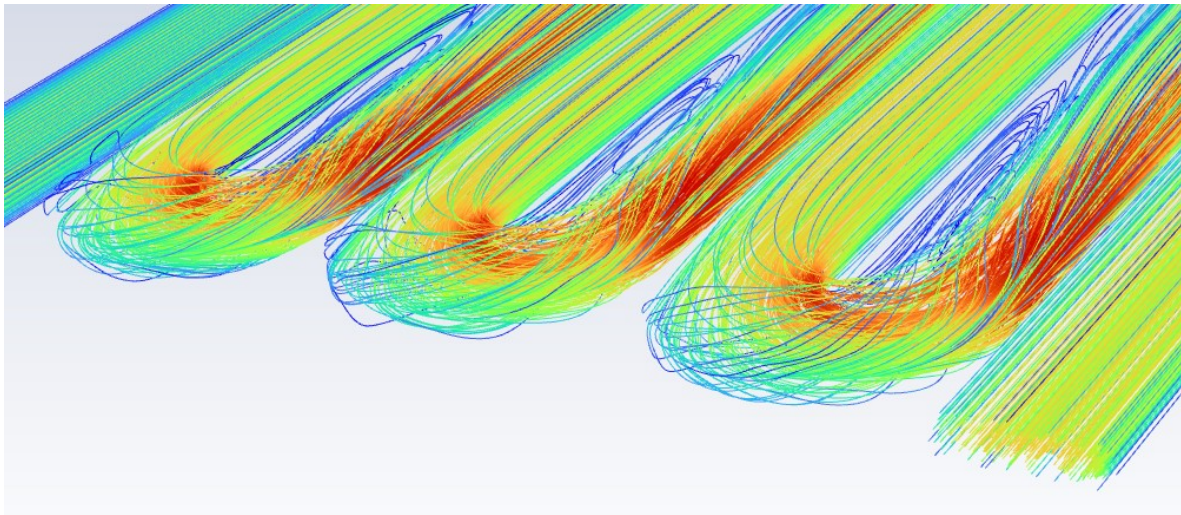


Slika 6.48 Kontura temperature na sredini domene za zmijoliki cjevovod i $Q = 3.2 \text{ L/min}$

Kontura temperature na sredini domene zmijolikog cjevovoda za protok 3.2 L/min prikazana je Slikom 6.48.



Slika 6.49 Prikaz strujnica brzine zmijolikog cjevovoda za $Q = 3.2 \text{ L/min}$



Slika 6.50 Prikaz detalja strujnica brzine oko zakrivljenja zmijolikog cjevovoda za $Q = 3.2 \text{ L/min}$

Strujnice brzine prikazan je Slikom 6.49, a Slikom 7.50 mogu se vidjeti strujnice brzine na zakrivljenjima.

Tablica 6.27 Očitane vrijednosti temperatura za zmijoliki cjevovod i $Q = 3.2 \text{ L/min}$

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT _{avg} [K]
Ulaz ₁	310,41	17,41	319,67	303,10	16,56

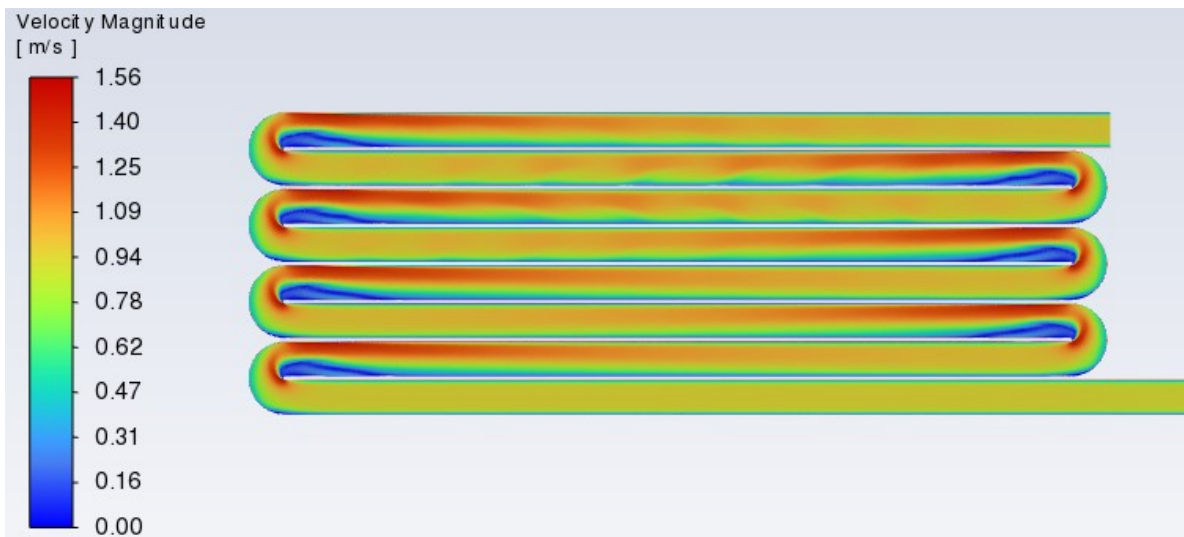
Tablica 6.28 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za zmijoliki cjevovod i $Q = 3.2 \text{ L/min}$

	F[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	3296,33	126782,09	7651,72	180,64

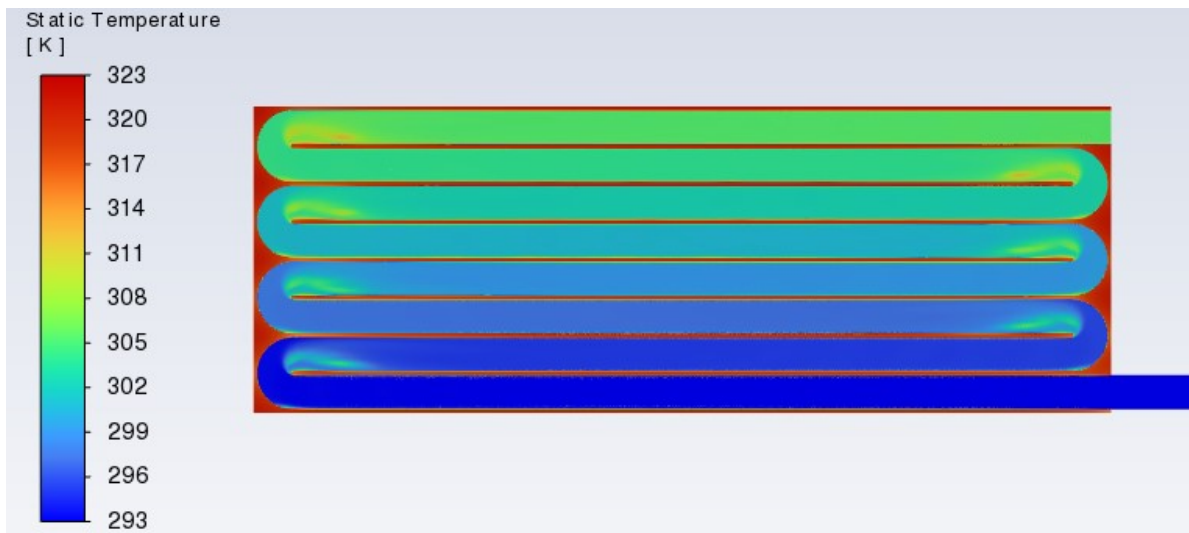
Tablicom 6.27 očitane su vrijednosti temperature, a Tablicom 6.28 su izračunati koeficijent prijelaza topline i Nusseltovog broja.

6.6.3. Zmijoliki cjevovod za $Q = 4.8 \text{ L/min}$

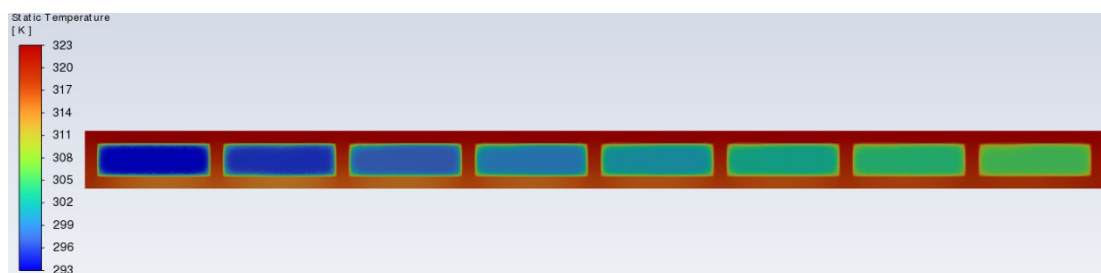
Slikom 6.51 prikazana je kontura brzine, a Slikom 6.52 kontura temperature na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za protok 4.8 L/min .



Slika 6.51 Kontura brzine na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 4.8 \text{ L/min}$

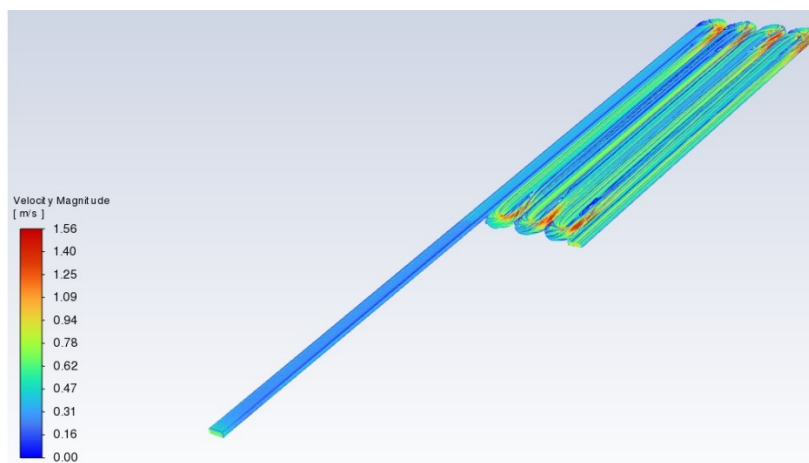


Slika 6.52 Kontura temperature na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 4.8 \text{ L/min}$

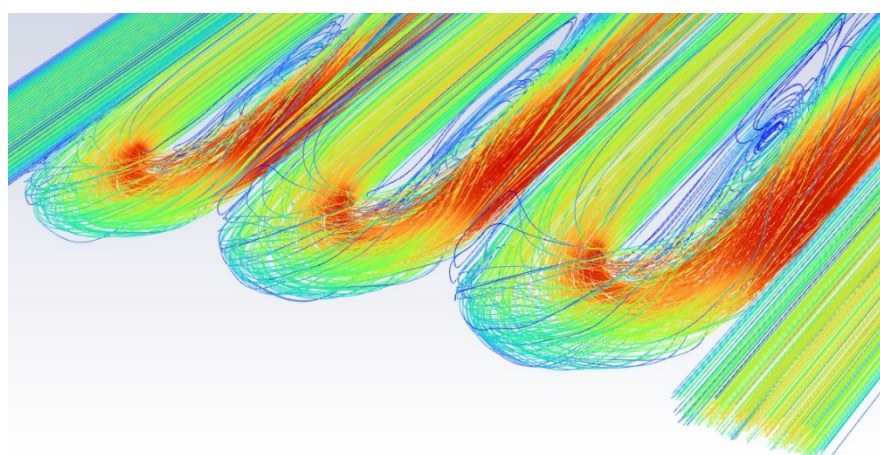


Slika 6.53 Kontura temperature na sredini domene za zmijoliki cjevovod i $Q = 4.8 \text{ L/min}$

Kontura temperature na sredini *coldplate-a* zmijolikog cjevovoda dana je Slikom 7.53.



Slika 6.54 Prikaz strujnica brzine zmijolikog cjevovoda za $Q = 4.8 \text{ L/min}$



Slika 6.55 Prikaz detalja strujnica brzine oko zakrivljenja zmijolikog cjevovoda za $Q = 4.8 \text{ L/min}$

Strujnice brzine za zmijoliki cjevovod protoka 4.8 L/min dana je Slikom 6.54, a detaljan prikaz strujnica brzine na području zakrivljenja dana je Slikom 6.55.

Tablica 6.29 Očitane vrijednosti temperatura za zmijoliki cjevovod i $Q = 4.8 \text{ L/min}$

	$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	d T_{avg} [K]
Ulaz ₁	310,41	17,41	319,67	303,10	16,56

Tablica 6.30 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za zmijoliki cjevovod i $Q = 4.8 \text{ L/min}$

	FI[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
Ulaz ₁	4944,50	190173,13	11477,58	270,96

Tablicom 6.29 očitane su temperature za računanje koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja danih u Tablici 6.30.

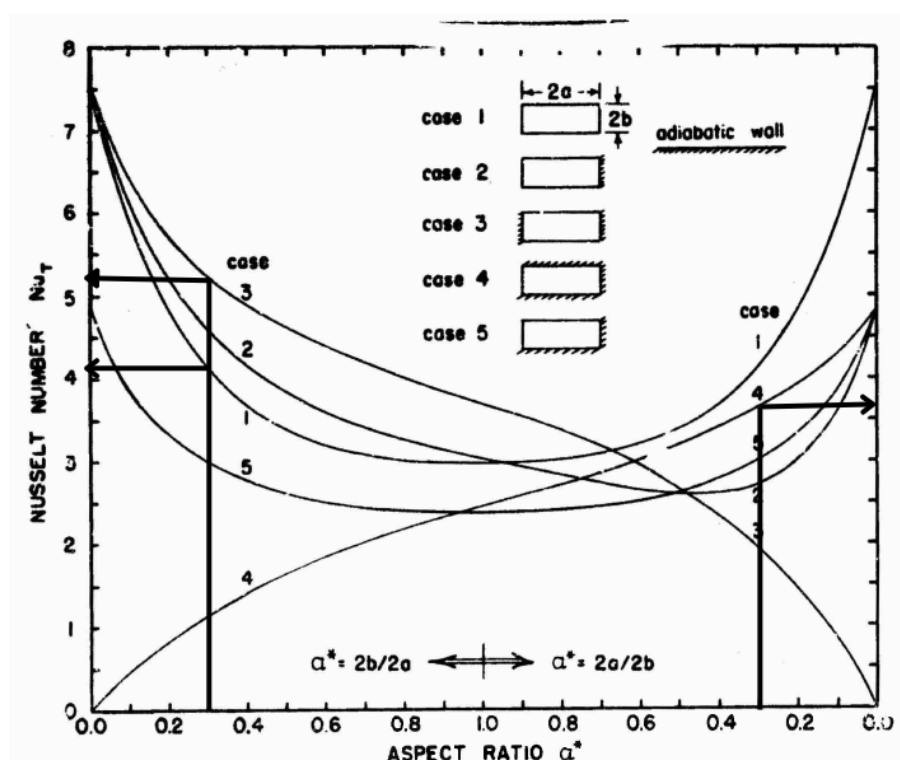
Iz prikazanih slika moguće je vidjeti kako u svim slučajevima zmijolikog cjevovoda na područjima zakrivljenja cjevovoda dolazi do gubljenja laminarnog strujanja radi mješanja fluida.

7. USPOREDBA REZULTATA

U sklopu ovog rada također su izvršena ispitivanja koja su opisana u literaturi: „Laminar Flow Forced Convection Heat Transfer and Flow Friction in Straight and Curved Ducts – A Summary of Analytical Solutions“, autora : R. K. Shah i A.L. London. Prema literaturi te prema geometriji kojom se definira fluid, bilo je potrebno prikazati koliko se rješenja iz literature podudaraju s rješenjima provedenih simulacija. Usporedba će se provesti za slučajeve ravnih cjevovoda te za slučaj zmijolikog cjevovoda.

7.1. Usporedba jednog kanala ravnog cjevovoda s literaturom

Prema njihovoj teoriji Nusseltova značajka može se dobiti omjerom stranica cijevi te ovisi o području cijevi koje se zagrijava.



Slika 7.1 Nusseltova značajka za potpuno razvijeno laminarno strujanje kada jedan ili više zidova prenosi toplinu [1]

Iz slike 7.1 promatrat će se „Case 1, Case 3 i Case 4“. Ranije je već zadano kako omjer stranica pravokutnog cjevovoda iznosi $\alpha^* = 0.3$. Prema tome slijedi:

$$Nu_{T1} \approx 4.2$$

$$Nu_{T3} \approx 5.25$$

$$Nu_{T_4} \approx 3.65$$

Gdje je:

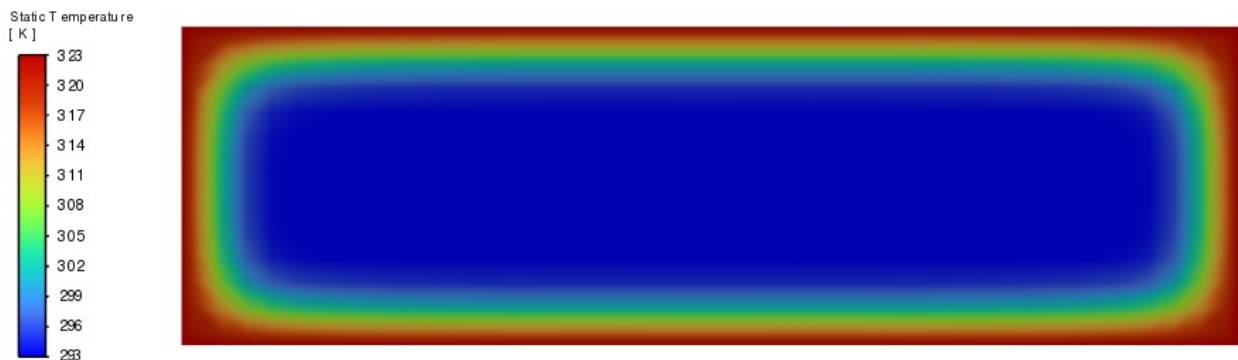
Nu_{T_1} - Nusseltova značajka za slučaj zagrijavanja fluida sa svih strana

Nu_{T_3} - Nusseltova značajka za slučaj zagrijavanja fluida sa gornje i donje strane

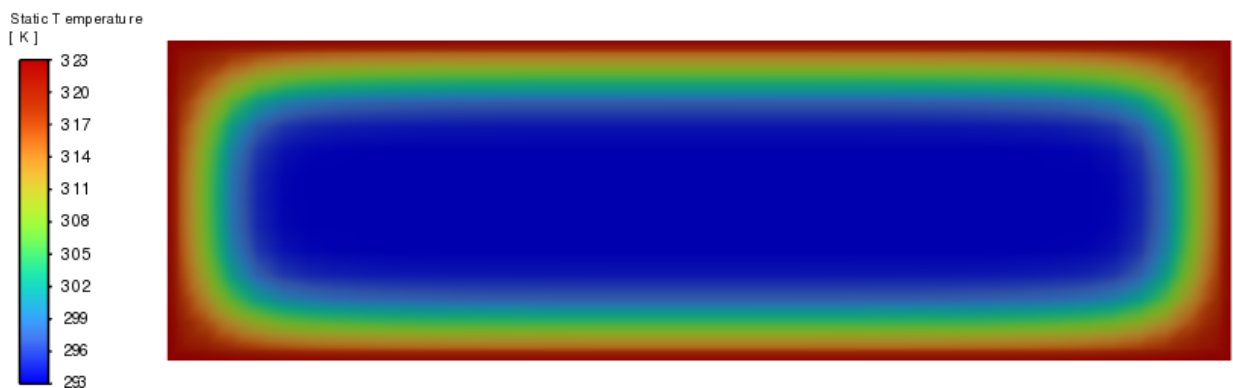
Nu_{T_4} - Nusseltova značajka za slučaj zagrijavanja fluida sa gornje strane

7.1.1. Zagrijavanje jednog kanala cjevovoda sa svih strana

Slikom 7.2 prikazana je kontura temperature jednog kanala fluida na sredini domene, a Slikom 7.3 na izlazu domene.



Slika 7.2 Konture temperature jednog kanala fluida na sredini domene



Slika 7.3 Konture temperature jednog kanala fluida na izlazu domene

Tablicom 7.1 dani su očitani rezultati putem *Ansys Reports* o prosječnoj temperaturi na ulazu i izlazu iz domene te prosječna temperatura na stijenci zagrijavanja kao i prosječna temperatura fluida.

Tablica 7.1 Očitani rezultati temperatura za jedan kanal grijan sa svih strana

$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT _{avg} [K]
301,75	8,60	323,15	299,52	23,62

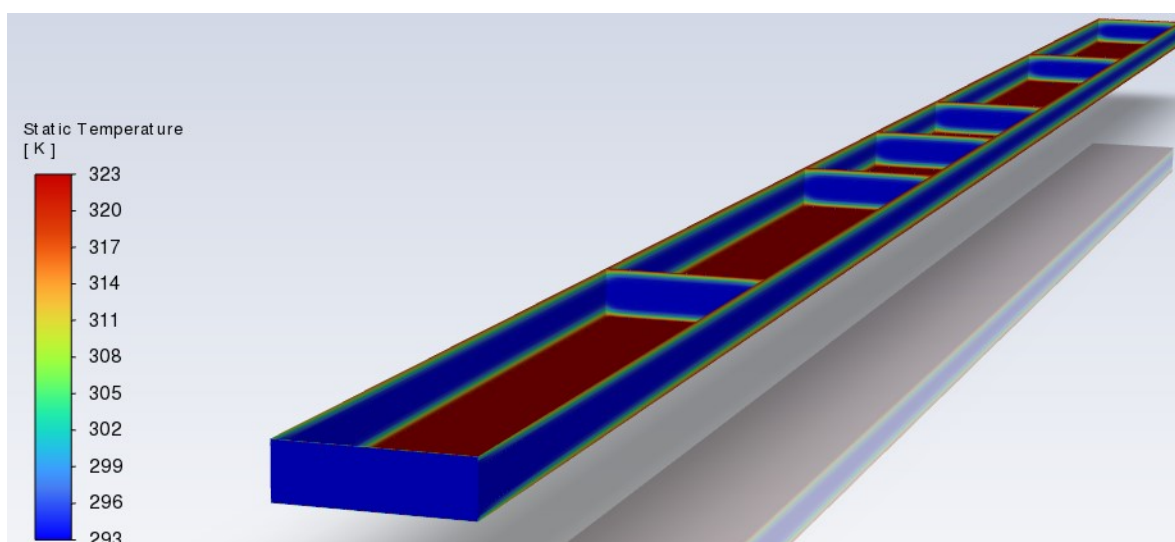
Na temelju toga moguće je izračunati koeficijent prijelaza topline (α) i Nusseltovu značajku (Tablica 7.2).

Tablica 7.2 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja jedan kanal grijan sa svih strana

F[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
814,48	31326,38	1326,20	31,30

7.1.2. Zagrijavanje jednog kanala cjevovoda sa gornje i donje strane

Slika 7.4 prikazuje konturu promjene temperature od ulaza prema izlazu za jedan kanal grijan s gornje i donje strane.



Slika 7.4 Kontura promjene temperature od ulaza prema izlazu za jedan kanal fluida grijanog s gornje i donje strane

Tablicom 7.3 dane su očitane vrijednosti temperaturi te razlika temperatura na izlazu i ulazu kao i razlika prosječne temperature na stijenci fluida i prosječna temperatura fluida

Tablica 7.3 Očitani rezultati temperatura za jedan kanal grijan s gornje i donje strane

$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT _{avg} [K]
300,24	7,09	323,15	298,30	24,84

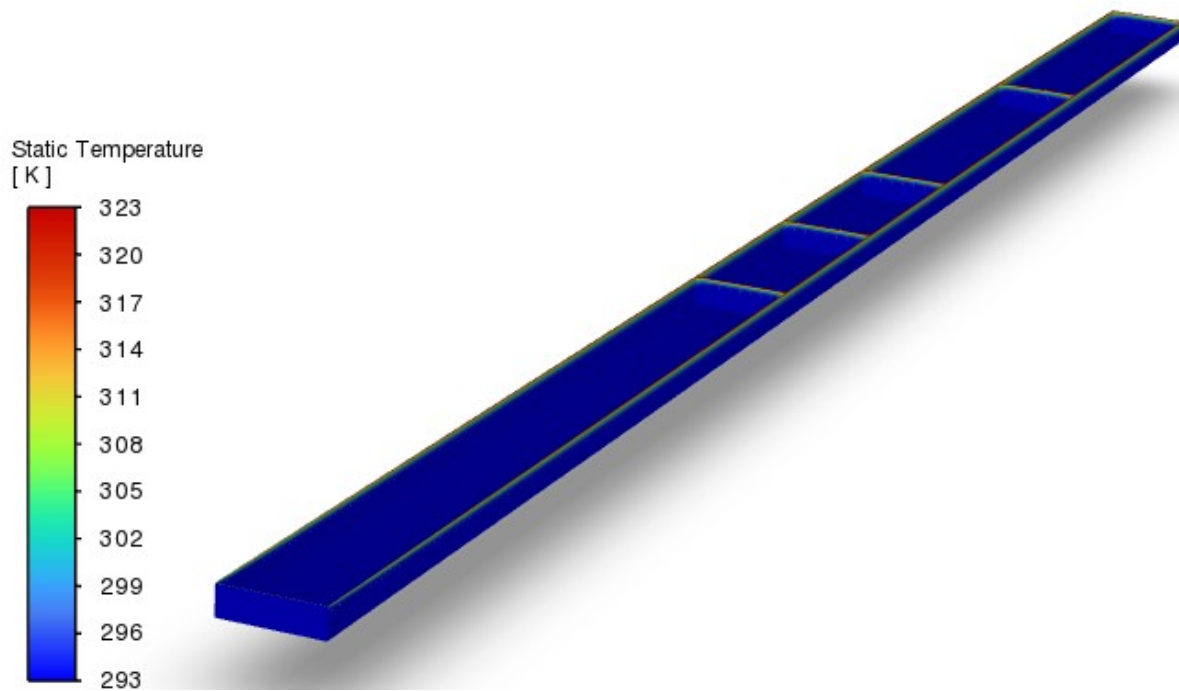
Nakon toga Tablicom 7.4 dane su izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka te koeficijenta prijelaza topline i Nusseltove značajke.

Tablica 7.4 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za jedan kanal grijan s gornje i donje strane

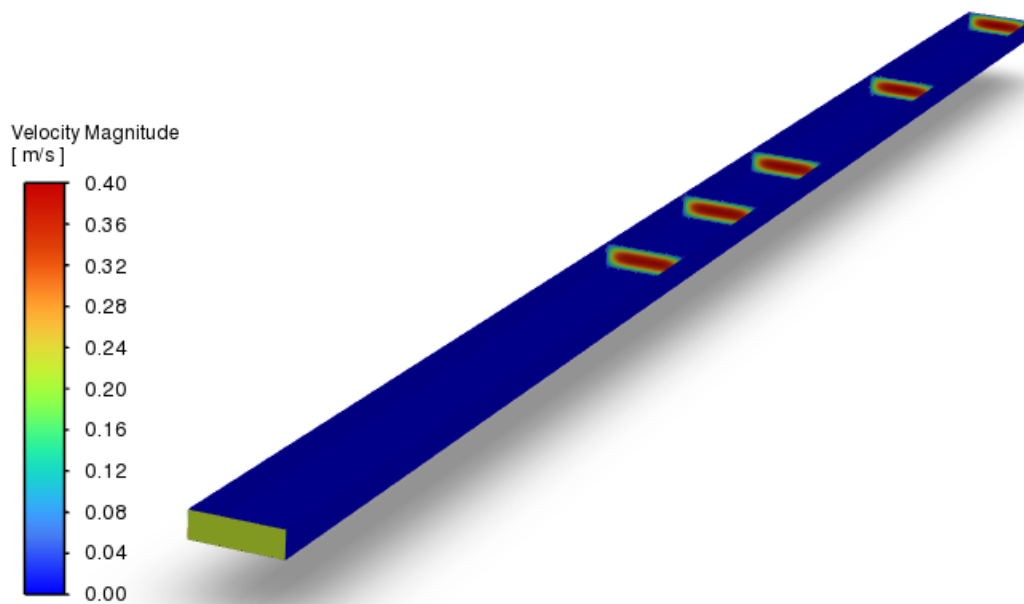
Fl[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
670,96	33548,18	1350,51	31,88

7.1.3. Zagrijavanje jednog kanala cjevovoda sa gornje strane

Slikom 7.5 prikazane su konture temperature, a Slikom 7.6 konture brzine jednog kanala grijanog s gornje i donje strane



Slika 7.5 Kontoura temperature jednog kanala za fluid grijan sa gornje strane



Slika 7.6 Kontura brzine jednog kanala fluida grijanog sa gornje strane

Tablicom 7.5 dane su očitane vrijednosti temperatura za fluid koji je grijan sa gornje strane.

Tablica 7.5 Očitani rezultati temperatura za jedan kanal grijan s gornje strane

$T_{f\text{outlet}}$ [K]	dT [K]	$T_{w\text{avg}}$ [K]	$T_{f\text{avg}}$ [K]	dT _{avg} [K]
296,69	3,69	323,15	295,72	27,42

Tablica 7.6 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za jedan kanal grijan s gornje strane

Fl[W]	q[W/m ²]	α [W/m ² K]	Nu
349,62	34962,77	1275,03	30,10

Tablicom 7.6 izračunate su vrijednosti koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja.

7.2. Usporedba eksperimentalnih i simulacijskih rješenja za jedan kanal

Tablicom 7.7 prikazana je usporedba rješenja između eksperimentalno određenih Nusseltovih brojeva i korištenjem računalne dinamike fluida za dobivanje Nusseltovih brojeva

Tablica 7.7 Usporedba teorijskih i simulacijskih rješenja Nusseltovog broja

	Nu_{eksp}	Nu_{sim}
Slučaj 1	4,5	30,10
Slučaj 3	5,75	31,88
Slučaj 4	3,7	31,30

7.3. Usporedba rezultata ravnog cjevovoda

7.3.1. Usporedba rezultata između Slučaja

U prethodnom poglavlju izračunale su se vrijednosti Nusseltovog broja za tri slučaja zagrijavanja te za 3 različita protoka. U tablici 7.8 dane su prosječne vrijednosti svakog slučaja polihedralne mreže, a tablicom 7.9 prosječne vrijednosti strukturirane mreže.

Tablica 7.8 Usporedba rezultata Nusseltovog broja polihedralne mreže

	Polihedralna mreža		
Q [L/min]	Slučaj 1	Slučaj 3	Slučaj 4
1,6	25,97	25,57	25,56
3,2	38,47	37,80	37,79
4,8	49,52	48,46	48,35

Tablica 7.9 Usporedba rezultata Nusseltovog broja strukturirane mreže

	Strukturirana mreža		
Q [L/min]	Slučaj 1	Slučaj 3	Slučaj 4
1,6	26,36	25,96	25,96

Iz tablica je vidljivo kako postoji odstupanje od 2% između rezultata kada je riječ o različitim slučajevima zagrijavanja *coldplate-a*. Također, iz rezultata se može vidjeti kako slučaj zagrijavanja *coldplate-a* nema toliki utjecaj na rezultate radi dobre konduktivnosti aluminija dok, brzina ima značajne utjecaje na rezultate Nusseltovog broja. To je neočekivano budući da i teorija i eksperiment ukazuju na to da se s povećanjem protoka u laminarnom području koeficijent prijelaza topline (α) ne mijenja.

7.3.2. Usporedba rezultata između eksperimenta i simulacije

Prema literaturi [1] očitani rezultati Nusseltovog broja za pojedini slučaj je:

$$Nu_{T1} \approx 4.2$$

$$\text{Nu}_{T3} \approx 5.25$$

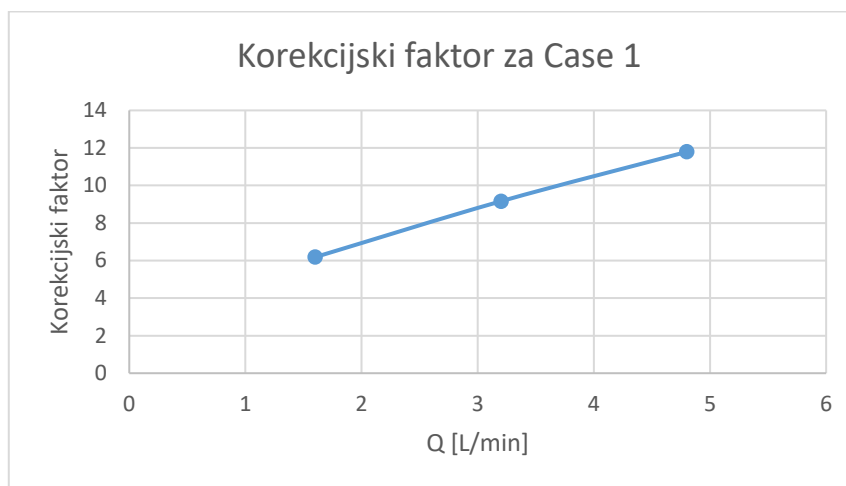
$$\text{Nu}_{T4} \approx 3.65$$

Kako dolazi do velikih odstupanja između rezultata dobivenih simulacijama i rezultata iz literature, potrebno je uvesti korekcijske faktore. Korekcijske faktore moguće je izračunati omjerom dobivenih Nusseltovih brojeva iz simulacija i očitanih Nusseltovih brojeva iz literature [1]. Za Slučaj 1 glasi:

$$K_{f1.1.6} = \frac{\text{Nu}_{1.1.6}}{\text{Nu}_{T1}} = \frac{26.97}{4.2} = 6.42$$

$$K_{f1.3.2} = \frac{\text{Nu}_{1.3.2}}{\text{Nu}_{T1}} = \frac{38.47}{4.2} = 9.16$$

$$K_{f1.4.8} = \frac{\text{Nu}_{1.4.8}}{\text{Nu}_{T1}} = \frac{49.53}{4.2} = 11.79$$



Graf 7.1 Korekcijski faktor za Slučaj 3

Iz toga slijedi jednačba korekcijskog faktora za Slučaj 1:

$$y = 1.7525 \cdot x + 3.4372 \quad (8.6)$$

Gdje je:

y – Korekcijski faktor

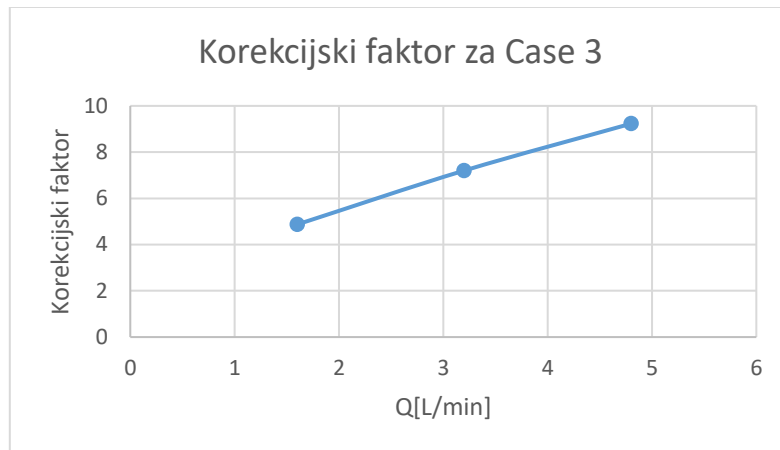
x – Protok [L/min]

Za Slučaj 3 slijedi:

$$K_{f3_{1.6}} = \frac{Nu_{3_{1.6}}}{Nu_{T3}} = \frac{25.58}{5.25} = 4.87$$

$$K_{f3_{3.2}} = \frac{Nu_{3_{3.2}}}{Nu_{T3}} = \frac{37.81}{5.25} = 7.20$$

$$K_{f3_{4.8}} = \frac{Nu_{3_{4.8}}}{Nu_{T3}} = \frac{48.47}{5.25} = 9.23$$



Graf 7.2 Korekcijski faktor za Slučaj 3

Jednadžba korekcijskog faktora za Slučaj 3 glasi:

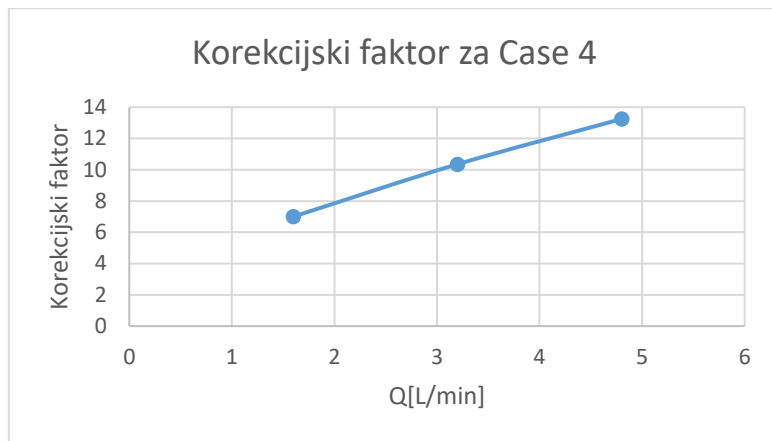
$$y = 1.3624 \cdot x + 2.742 \quad (8.7)$$

Za Slučaj 4 slijedi:

$$K_{f4_{1.6}} = \frac{Nu_{4_{1.6}}}{Nu_{T4}} = \frac{25.56}{3.65} = 7.00$$

$$K_{f4_{3.2}} = \frac{Nu_{4_{3.2}}}{Nu_{T4}} = \frac{37.79}{3.65} = 10.35$$

$$K_{f4_{4.8}} = \frac{Nu_{4_{4.8}}}{Nu_{T4}} = \frac{48.35}{3.65} = 13.25$$



Graf 7.3 Korekcijski faktor za Slučaj 4

Jednadžba korekcijskog faktora za Slučaj 4 glasi:

$$y = 1.9509 \cdot x + 3.9586 \quad (8.8)$$

7.4. Usporedba rezultata zmijolikog cjevovoda s literaturom

Prema literaturi [1] očekivani rezultati Nusseltovog broja su:

$$Nu_{fc_{1.6}} \approx 12.07$$

$$Nu_{fc_{3.2}} \approx 27.95$$

$$Nu_{fc_{4.8}} \approx 24.50$$

Tablicom 7.10. prikazani su rezultati Nusseltovog broja za slučaj zagrijavanja *coldplate-a* sa gornje strane:

Tablica 7.10 Rezultati Nusseltovog broja za zmijoliki cjevovod grijan sa gornje strane

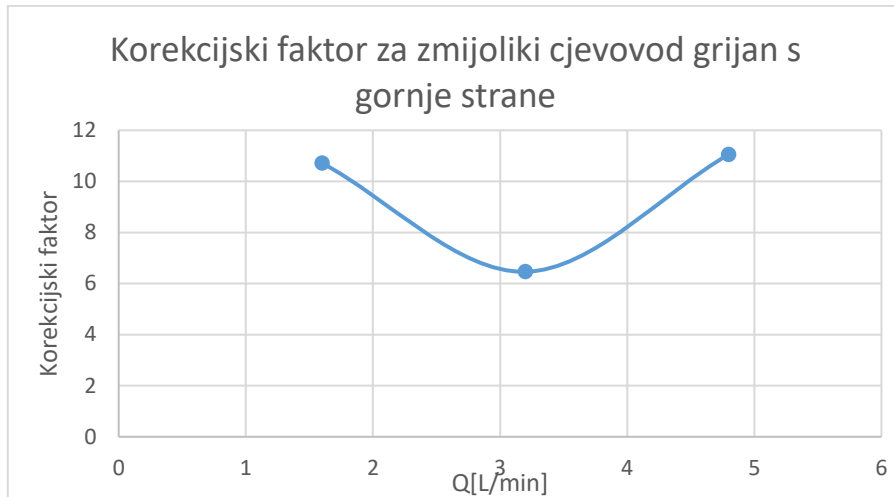
Q [L/min]	Nu
1,6	129,35
3,2	180,64
4,8	270,96

Vidljivo je kako su odstupanja od teorijskog rješenja velika te je potrebno izračunati korekcijske faktore. Kao i u prethodnom slučaju za ravni cjevovod, korekcijski faktor moguće je dobiti omjerom Nusseltovih brojeva dobivenih putem simulacija i Nusseltovih brojeva prema literaturi [1]. Prema tome slijedi:

$$K_{fc_{1.6}} = \frac{Nu_{c_{1.6}}}{Nu_{Tc}} = \frac{129.35}{12.07} = 10.72$$

$$K_{fc_{3.2}} = \frac{Nu_{c_{3.2}}}{Nu_{Tc}} = \frac{180.64}{27.95} = 6.46$$

$$K_{fc_{4.8}} = \frac{Nu_{c_{4.8}}}{Nu_{Tc}} = \frac{270.96}{24.50} = 11.06$$



Graf 7.4 Korekcijski faktor zmirolikog cjevovoda grijanog s gornje strane

Jednadžba korekcijskog faktora glasi:

$$y = 0.1073 \cdot x + 9.0699$$

9. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu izrađene su numeričke simulacije koje su prikazivale prijenos topline unutar *coldplate-a* dimenzija 178x500 mm koji se koristi za hlađenje električne baterije u automobilima. Napravljene su četiri numeričke mreže za ravni cjevovod te jedna numerička mreža za zmijoliki cjevovod. Nakon izrađenih numeričkih mreža bilo je potrebno provesti simulacije za tri različita protoka (1.6 L/min, 3.2 L/min i 4.8 L/min) te tri različita načina zagrijavanja *coldplate-a* (Zagrijavanje s gornje strane, zagrijavanje s gornje i donje strane i zagrijavanje sa svih strana). Rješenja simulacija za svaki slučaj predočila su se tablicama te su uz njih prikazane konture brzina i temperatura. Rezultati simulacija usporedili su se sa literaturom prema kojoj su cjevovodi napravljeni. Prvo su se usporedili rezultati Nusseltovog broja za slučaj jednog kanala. Iz rješenja se pokazalo kako dolazi do velikih odstupanja Nusseltovog broja eksperimenta i simulacija dok, prilikom usporedbe slučaja simulacijskih rješenja odstupanja iznose oko 2%. Nakon toga, uspoređivala su se rješenja ravnog cjevovoda s *coldplateom*. Pokazalo se da slučaj zagrijavanja ne stvara značajno povećanje Nusseltovog broja dok, brzina protoka rezultira značajnim povećanjem. Razlog tomu su dobra konduktivnost aluminijske cijevi. Usporedbom eksperimentalnih i simulacijskih rješenja odstupanja su bila značajna te su uvedeni korekcijski faktori na simulacijska rješenja. Korekcijski faktori dobiveni su omjerom simulacijskih i eksperimentalnih vrijednosti Nusseltovog broja te je na temelju toga napravljena funkcija koja je ovisila o omjeru i brzini protoka fluida. Za slučaj zmijolikog cjevovoda pokazalo se kako u područjima zakrivljenosti kanala dolazi do gubitka laminarnog strujanja zbog mješanja fluida. Radi velikog odstupanja s eksperimentalnim vrijednostima također je bilo potrebno uvesti korekcijske faktore za zmijoliki cjevovod.

LITERATURA

- [1] Shah, R. K.; London, A. L.: "Laminar Flow Forced Convection Heat Transfer and Flow Friction in Straight and Curved Ducts – A Summary of Analytical Solutions", Stanford University, Stanford, 1971.
- [2] Amano, R. S.; Sunden, B.: "Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer", WIT Press, Southampton, 2011.
- [3] Woodward, W.: "Airway Resistance", s Interneta, <https://teachmephysiology.com/respiratory-system/ventilation/airway-resistance/>, 15.6.2024.
- [4] Blazek, J.: "Computational Fluid Dynamics – Principles and Applications", Elsevier, Oxford, 2015
- [5] Anderson, D. A. i dr.: "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", CRC Press, Boca Raton, 2021.
- [6] Ivankovic, A.: "Finite volume method for large deformation with linear hypoelastic materials", s Interneta, https://www.researchgate.net/figure/Different-arrangements-of-the-finite-volume-grids-a-cell-centred-b-vertex-centred_fig2_268995033, 15.6.2024.
- [7] Guerrero, J.: "Introduction to Computational Fluid Dynamics: Governing Equations, Turbulence Modeling Introduction and Finite Volume Discretization Basics", University of Genova, Genova, 2015.

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Laminarno strujanje u cijevi [3].....	3
Slika 2.2 Turbulentno strujanje u cijevi [3].....	4
Slika 2.3 Cell-vertex [6].....	7
Slika 2.4 Vertex centered grid [6].....	7
Slika 2.5 Polihedralni kontrolni volumen [7].....	8
Slika 3.1 Omjer stranica [1].....	11
Slika 3.2 Prikaz geometrije ravnog cjevovoda.....	13
Slika 3.3 Prikaz poprečnog presjeka ravnog cjevovoda.....	14
Slika 3.4 Prikaz geometrije zmijolikog cjevovoda.....	14
Slika 3.5 Prikaz poprečnog presjeka zmijolikog cjevovoda.....	14
Slika 3.6 Zagrijavanje sa gornje strane.....	15
Slika 3.7 Zagrijavanje sa gornje i donje strane.....	15
Slika 3.8 Zagrijavanje sa svih strana.....	15
Slika 4.1 Postavke za "Surface mesh".....	16
Slika 4.2 Surface mesh ravnog cjevovoda.....	17
Slika 4.3 Definiranje rubnih uvjeta.....	17
Slika 4.4 Definiranje Regija modela.....	17
Slika 4.5 Definiranje graničnog sloja.....	18
Slika 4.6 Definiranje vrste elementa.....	18
Slika 4.7 Numerička mreža za ravni cjevovod.....	19
Slika 4.8 Detalj prikaza na ulazu u cjevovod.....	19
Slika 4.9 Polihedralna mreža u presjeku.....	19
Slika 4.10 Ukupan broj elemenata.....	20
Slika 4.11 Definirana strukturirana mreža ravnog cjevovoda.....	21
Slika 4.12 Detalj prikaza mreže na ulazu u cjevovod.....	21
Slika 4.13 Strukturirana mreža u presjeku.....	22
Slika 4.14 Ukupan broj elemenata strukturirane mreže.....	22
Slika 4.15 Prikaz ulaza za zmijoliki cjevovod.....	23
Slika 4.16 Prikaz numeričke mreže zmijolikog cjevovoda u presjeku yz.....	23
Slika 4.17 Tlocrtni prikaz numeričke mreže zmijolikog cjevovoda.....	23
Slika 4.18 Detaljan prikaz numeričke mreže koljena zmijolikog cjevovoda.....	24

Slika 4.19 Ukupan broj elemenata zmijolikog cjevovoda.....	24
Slika 4.20 Graf konvergiranja rješenja Nusseltove značajke u odnosu na finoću numeričke mreže	30
Slika 5.1 Postavljanje lamianrnog modela strujanja	32
Slika 5.2 Uključivanje jednadžbe energije	32
Slika 5.3 Definiranje masenog protoka za prvi slučaj.....	34
Slika 6.1 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	35
Slika 6.2 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	35
Slika 6.3 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	36
Slika 6.4 Prikaz strujnica brzine kroz cjevovod za coldplate grijan s gornje strane i $Q = 1.6 \text{ L/min}$	36
Slika 6.5 Prikaz detalja strujnica brzine na ulazu u cjevovod za coldplate grijan s gornje strane i $Q = 1.6 \text{ L/min}$	36
Slika 6.6 Prikaz detalja strujnica brzine na izlazu iz cjevovoda za coldplate grijan s gornje strane i $Q = 1.6 \text{ L/min}$	37
Slika 6. 7 Kontura brzine na presjeku s detaljima ulaza (A) i izlaza (B)	37
Slika 6.8 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	39
Slika 6.9 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	39
Slika 6.10 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	39
Slika 6.11 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	41
Slika 6.12 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	41
Slika 6.13 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	41

Slika 6.14 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje i donje strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	43
Slika 6.15 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	43
Slika 6.16 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	43
Slika 6.17 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje i donje strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	45
Slika 6.18 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	45
Slika 6.19 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	45
Slika 6.20 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan s gornje i donje strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	47
Slika 6.21 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	47
Slika 6.22 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan s gornje i donje strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	47
Slika 6.23 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan sa svih strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	49
Slika 6.24 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	49
Slika 6.25 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	49
Slika 6.26 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan sa svih strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	51
Slika 6.27 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	51
Slika 6.28 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	51
Slika 6.29 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na ulazu u coldplate grijan sa svih strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	53
Slika 6.30 Kontura temperatura fluida stijenke cjevovoda i coldplate-a na sredini coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	53

Slika 6.31 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a na izlazu coldplate-a grijan sa svih strane za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	53
Slika 6.32 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na ulazu u coldplate grijanog s gornje strane	55
Slika 6.33 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na sredini coldplate-a grijanog s gornje strane	55
Slika 6.34 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na izlazu, grijan s gornje strane	55
Slika 6.35 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na ulazu u coldplate grijanog s gornje i donje strane	57
Slika 6.36 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na sredini coldplate-a grijanog s gornje i donje strane	57
Slika 6.37 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na izlazu, grijan s gornje i donje strane	57
Slika 6.38 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na ulazu u coldplate grijanog sa svih strana	59
Slika 6.39 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na sredini coldplate-a grijanog sa svih strana.....	59
Slika 6.40 Kontura temperatura fluida stijenske cjevovoda i coldplate-a strukturirane numeričke mreže, na izlazu, grijan sa svih strana.....	59
Slika 6.41 Kontura brzine na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	61
Slika 6.42 Kontura temperature na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 1.6 \text{ L/min}$...	61
Slika 6.43 Kontura temperature na sredini domene za zmijoliki cjevovod i $Q = 1.6 \text{ L/min}$	61
Slika 6.44 Prikaz strujnica brzine zmijolikog cjevovoda za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	62
Slika 6.45 Prikaz detalja strujnica brzine oko zakrivljenja zmijolikog cjevovoda za $Q = 1.6 \text{ L/min}$	62
Slika 6.46 Kontura brzine na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	63
Slika 6.47 Kontura temperature na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 3.2 \text{ L/min}$...	64
Slika 6.48 Kontura temperature na sredini domene za zmijoliki cjevovod i $Q = 3.2 \text{ L/min}$	64
Slika 6.49 Prikaz strujnica brzine zmijolikog cjevovoda za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	64
Slika 6.50 Prikaz detalja strujnica brzine oko zakrivljenja zmijolikog cjevovoda za $Q = 3.2 \text{ L/min}$	65
Slika 6.51 Kontura brzine na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	66
Slika 6.52 Kontura temperature na presjeku domene zmijolikog cjevovoda za $Q = 4.8 \text{ L/min}$...	66
Slika 6.53 Kontura temperature na sredini domene za zmijoliki cjevovod i $Q = 4.8 \text{ L/min}$	66

Slika 6.54 Prikaz strujnica brzine zmijolikog cjevovoda za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	67
Slika 6.55 Prikaz detalja strujnica brzine oko zakrivljenja zmijolikog cjevovoda za $Q = 4.8 \text{ L/min}$	67
Slika 7.1 Nusseltova značajka za potpuno razvijeno laminarno strujanje kada jedan ili više zidova prenosi toplinu [1]	69
Slika 7.2 Konture temperature jednog kanala fluida na sredini domene	70
Slika 7.3 Konture temperature jednog kanala fluida na izlazu domene	70
Slika 7.4 Kontura promjene temperature od ulaza prema izlazu za jedan kanal fluida grijanog s gornje i donje strane	71
Slika 7.5 Kontura temperature jednog kanala za fluid grijan sa gornje strane	72
Slika 7.6 Kontura brzine jednog kanala fluida grijanog sa gornje strane	73

POPIS TABLICA

Tablica 4.1 Definiranje grube, srednje i fine numeričke mreže	25
Tablica 4.2 Očitane vrijednosti temperatura za grubu numeričku mrežu	27
Tablica 4.3 Očitane vrijednosti temperatura za srednju numeričku mrežu	28
Tablica 4.4 Očitane vrijednosti temperatura za finu numeričku mrežu	28
Tablica 4.5 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za grubu numeričku mrežu	29
Tablica 4.6 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za srednju numeričku mrežu	29
Tablica 4.7 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za finu numeričku mrežu	30
Tablica 5.1 Karakteristike antifrizna na 20°C	32
Tablica 5.2 Karakteristike aluminijske	33
Tablica 6.1 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje strane za $Q = 1.6$ L/min	38
Tablica 6.2 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za coldplate grijan s gornje strane i $Q = 1.6$ L/min	38
Tablica 6.3 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje strane i $Q = 3.2$ L/min	40
Tablica 6.4 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 3.2$ L/min	40
Tablica 6.5 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje strane i $Q = 4.8$ L/min	41
Tablica 6.6 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 4.8$ L/min	42
Tablica 6.7 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje i donje strane i $Q = 1.6$ L/min	44
Tablica 6.8 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 1.6$ L/min	44
Tablica 6.9 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje i donje strane i $Q = 3.2$ L/min	46

Tablica 6.10 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 3.2$ L/min	46
Tablica 6.11 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan s gornje i donje strane i $Q = 4.8$ L/min.....	48
Tablica 6.12 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 4.8$ L/min	48
Tablica 6.13 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan sa svih strane i $Q = 1.6$ L/min	50
Tablica 6.14 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 1.6$ L/min	50
Tablica 6.15 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan sa svih strane i $Q = 3.2$ L/min	52
Tablica 6.16 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 3.2$ L/min	52
Tablica 6.17 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod grijan sa svih strane i $Q = 4.8$ L/min	53
Tablica 6.18 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za $Q = 4.8$ L/min	54
Tablica 6.19 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod (strukturirane mreže) grijan s gornje strane	56
Tablica 6.20 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za coldplate grijan s gornje strane (strukturirana mreža)...	56
Tablica 6.21 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod (strukturirane mreže) grijan s gornje i donje strane	58
Tablica 6.22 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za coldplate grijan s gornje i donje strane (strukturirana mreža).....	58
Tablica 6.23 Očitane vrijednosti temperatura za ravni cjevovod (strukturirane mreže) grijanoh sa svih strana.....	60
Tablica 6.24 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za coldplate grijanog sa svih strana (strukturirana mreža) .	60
Tablica 6.25 Očitane vrijednosti temperatura za zmijoliki cjevovod i $Q = 1.6$ L/min.....	62
Tablica 6.26 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za zmijoliki cjevovod i $Q = 1.6$ L/min	63
Tablica 6.27 Očitane vrijednosti temperatura za zmijoliki cjevovod i $Q = 3.2$ L/min.....	65

Tablica 6.28 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za zmijoliki cjevovod i $Q = 3.2 \text{ L/min}$	65
Tablica 6.29 Očitane vrijednosti temperatura za zmijoliki cjevovod i $Q = 4.8 \text{ L/min}$	67
Tablica 6.30 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za zmijoliki cjevovod i $Q = 4.8 \text{ L/min}$	67
Tablica 7.1 Očitani rezultati temperatura za jedan kanal grijan sa svih strana	71
Tablica 7.2 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja jedan kanal grijan sa svih strana	71
Tablica 7.3 Očitani rezultati temperatura za jedan kanal grijan s gornje i donje strane	71
Tablica 7.4 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za jedan kanal grijan s gornje i donje strane	72
Tablica 7.5 Očitani rezultati temperatura za jedan kanal grijan s gornje strane	73
Tablica 7.6 Izračunate vrijednosti toplinskog toka, gustoće toplinskog toka, koeficijenta prijelaza topline i Nusseltovog broja za jedan kanal grijan s gornje strane	73
Tablica 7.7 Usporedba teorijskih i simulacijskih rješenja Nusseltovog broja	73
Tablica 7.8 Usporedba rezultata Nusseltovog broja polihedralne mreže.....	74
Tablica 7.9 Usporedba rezultata Nusseltovog broja strukturirane mreže	74
Tablica 7.10 Rezultati Nusseltovog broja za zmijoliki cjevovod grijan sa gornje strane	77

POPIS GRAFOVA

Graf 7.1 Korekcijski faktor za Slučaj 3	75
Graf 7.2 Korekcijski faktor za Slučaj 3	76
Graf 7.3 Korekcijski faktor za Slučaj 4	77
Graf 7.4 Korekcijski faktor zmijolikog cjevovoda grijanog s gornje strane	78

SAŽETAK

Coldplate je jedan od ključnih komponenti za hlađenje električne baterije automobila. U ovom diplomskom radu provedene su numeričke simulacije za dva različita izvoda geometrije cjevovoda *coldplate-a*. Izrađene su četiri numeričke simulacije za ravni cjevovod te jedna numerička simulacija za zmijoliki cjevovod. Dobivena rješenja numeričkih simulacija uspoređene su s podacima iz literature. Na kraju su uspoređeni rezultati dobiveni simulacijama sa eksperimentalnim rezultatima za sve izvode cjevovoda. Na temelju tih usporedbi su napravljeni korekcijski faktori.

Ključne riječi: *coldplate, hlađenje, električna baterija automobila, CFD, Ansys*

ABSTRACT

The coldplate is one of the critical components in thermal management system of electric vehicles. In this Master's thesis, two different geometries were analysed using numerical methods. Four numerical simulations were carried out for straight duct and one for snake duct. The solutions for this numerical simulations are compared with the literature: Shah, R. K.; London, A. L.: "Laminar Flow Forced Convection Heat Transfer and Flow Friction in Straight and Curved Ducts – A Summary of Analytical Solutions". In the end, experimental and numerical simulation results are compared between all ducts. Correction factors are applied on simulation results.

Key words: *coldplate, cooling, electric car battery, CFD, Ansys*