

Návrh tepelného výměníku pomocí Peltierových článků

Bc. Aneta Matejíková

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Aneta Matejková**
Osobní číslo: **T12883**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Návrh tepelného výměníku pomocí Peltierových článků**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na dané téma
2. Navrhněte řešení tepelného výměníku s využitím Peltierových článků
3. Zkontrolujte činnost výměníku s využitím prostředků počítačové simulace
4. Zhodnoťte navržené řešení

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

JÍCHA M.;Přenos tepla a látky
ŠESTÁK J.,ŽITNÝ R.;Tepelné pochody II
FOIT J.,HUDEC L.;Základy elektroniky
BLAHOŽ V.;Základy sdílení tepla
PAVELEK M.;Termomechanika

další dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jaroslav Maloch, CSc.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

10. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Teoretická část diplomové práce se zabývá shrnutím dostupných informací o sdílení tepla, tepelných výměnících a Peltierových článcích. Praktická část obsahuje tři konstrukční návrhy vstupu a výstupu tekutiny v dutině výměníku a značné množství variant tvaru dutiny. Využitím přídatného programu k SolidWorks FlowSimulation bylo provedeno porovnání jednotlivých variant a byl vybrán nejvhodnější konstrukční návrh. Ten byl dále podroben kontrolnímu výpočtu činnosti výměníku.

Klíčová slova: Teplo, sdílení tepla, tepelný výměník, Peltierův článek

ABSTRACT

Theoretical part of Thesis occupy resume available informations about heat transfer, heat exchanger and Peltier's moduls. Practical part include free engineering designs input, fluid output in heat exchanger's cavity and large number of variants cavity. With the assistance of program SolidWorks Flow Simulation was conduct simulation individually variations and was select the best shape. The shape was calculated on efficiency.

Keywords: Heat, share heat, heat exchanger, Peltier's modul

Touto cestou bych chtěla poděkovat hlavně vedoucímu své práce Ing. Jaroslavu Malochovi, CSc. za jeho cenné rady, velkou dávku trpělivosti a ochotu. Dále děkuji své rodině za vytvoření podmínek vhodných ke studiu a své dceři za trpělivost.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TEPLO	12
1.1 TERMODYNAMICKÉ ZÁKONY	12
1.1.1 Nultý zákon termodynamiky	13
1.1.2 První zákon termodynamiky	13
1.1.3 Druhý zákon termodynamiky.....	14
1.1.4 Třetí zákon termodynamiky	16
1.2 VÝMĚNA TEPLA.....	17
1.2.1 Kondukce (vedení)	17
1.2.2 Konvekce (proudění).....	19
1.2.2.1 Přirozená (volná) konvekce	25
1.2.2.2 Nucená konvekce	26
1.2.2.3 Kombinovaná konvekce	27
1.2.3 Radiace (sálání).....	27
2 TEPELNÝ VÝMĚNÍK	29
2.1 TYPY TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ	30
2.2 ZÁKLADNÍ VÝPOČETNÍ VZTAHY VÝMĚNÍKŮ	35
2.2.1 Rovnice tepelné bilance	35
2.2.2 Součinitel prostupu tepla.....	36
2.2.3 Střední logaritmický teplotní spád	37
2.3 NÁVRH A VÝPOČET TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU	38
3 PELTIERŮV ČLÁNEK	43
3.1 SEEBECKŮV JEV.....	43
3.2 PELTIERŮV JEV	45
3.3 PELTIERŮV ČLÁNEK.....	46
3.3.1 Materiály pro výrobu Peltierových článků.....	47
3.3.2 Konstrukce Peltierových článků	48
3.3.3 Rozdělení Peltierových článků.....	50
3.4 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ.....	54
3.5 VÝHODY A NEVÝHODY PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ.....	55
4 CHLAZENÍ	56
4.1 KOMPRESOROVÉ CHLAZENÍ.....	56
4.2 ABSORPČNÍ CHLAZENÍ	57
5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI	59
II PRAKTICKÁ ČÁST	60
6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	61
7 NÁVRH TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU	62
7.1 PELTIERŮV ČLÁNEK.....	62
7.2 ZÁKLADNÍ GEOMETRIE VÝMĚNÍKU	63
7.3 NASTAVENÍ PROGRAMU FLOWSIMULATION	66
8 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU Č. 1	70

8.1	NÁVRH Č. 1 – VLOŽENÉ PRVKY	71
8.1.1	VARIANTA 1	72
8.1.2	VARIANTA 2	73
8.1.3	VARIANTA 3	74
8.1.4	VARIANTA 4	75
8.2	NÁVRH Č. 2 – POMOCNÉ KANÁLKY	76
8.2.1	VARIANTA 5	77
8.2.2	VARIANTA 6	78
8.2.3	VARIANTA 7	80
8.2.4	VARIANTA 8	82
8.2.5	VARIANTA 9	84
8.2.6	VARIANTA 10	86
8.2.7	VARIANTA 11	87
8.2.8	VARIANTA 12	89
9	KONSTRUKČNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU Č. 2.....	91
9.1	VARIANTA 1	91
10	KONSTRUKČNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU Č. 3.....	94
10.1	VARIANTA 1	95
10.2	VARIANTA 2	97
10.3	VARIANTA 3	99
11	KONTROLA ČINNOSTI VÝMĚNÍKU	101
12	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	106
	ZÁVĚR	107
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	108
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	112
	SEZNAM OBRÁZKŮ	114
	SEZNAM TABULEK.....	118
	SEZNAM PŘÍLOH.....	119

ÚVOD

Tepelné výměníky jsou velice složitá zařízení, která zjednodušeně slouží k přenosu energie všude tam, kde není možné použít přenos přímo ze zdroje do cíle. Návrhy, konstrukce a výpočty výměníků jsou velice náročné a ve většině případů na jejich správnosti závisí účinnost celého systému. Pro jejich návrh neexistuje přesný postup, jelikož každý výměník se navrhuje zvlášť pro konkrétní aplikaci a značně ho ovlivňují i podmínky provozu. O obtížnosti těchto návrhů vypovídá i to, že dosud neexistuje žádný software, který by dokázal vypočítat všechny dosud navrhnuté typy výměníků. Z tohoto důvodu bývají metody návrhu a výpočtu duševním vlastnictvím výrobců nebo konstruktérů. Tepelné výměníky mají nepřehledné množství aplikací a jsou využity převážně v průmyslovém odvětví. Jejich nejběžnější aplikace, se kterou se setkal každý z nás, je ústřední topení v činžovních domech. Výměník zde předává teplo z tlakového okruhu do prostředí bytu obsahující vzduch.

S vývojem nových materiálů a rozvojem technologií nacházejí Peltierovy články, pracující na principu inverzním k Seebeckovu jevu, stále širší uplatnění. Jsou využity v různých aplikacích od lékařství, kosmonautiky a chlazení elektronických součástek až po potravinářský průmysl.

Teoretická část této práce je zaměřená na shrnutí dostupných informací o sdílení tepla, tepelných výměnících a Peltierových člancích.

Praktická část se zabývá návrhem výměníku s využitím těchto článků. Principem je navrhnout takový tvar dutiny, vtoku a výtoku, aby docházelo k co nejrovnoměrnějšímu toku tekutiny po celé ploše dutiny výměníku. Práce obsahuje tři základní typy konstrukce vtoku a výtoku a velké množství variant tvaru dutiny. Simulace potřebné pro porovnávání výsledků variant jsou provedeny v programu SolidWorks Flow Simulation. Nejvhodnější varianta je podrobena kontrolnímu výpočtu činnosti výměníku.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEPLLO

Teplo je míra změny vnitřní energie, kterou systém přijme nebo odevzdá při styku s jiným systémem, aniž by přitom docházelo ke konání práce. O práci mluvíme, když způsobenou změnu energie můžeme vyjádřit jako součin veličin, obvykle síly a posunutí, či tlaku a změny objemu, nebo jako součin napětí, proudu a času. O teplo jde tehdy, když se změna energie jako součin jiných měřitelných veličin vyjádřit nedá.[1] Teplo tedy na rozdíl od vnitřní energie není spojeno se stavem látky, ale je to veličina spojená s termodynamickým procesem. Tepelná energie vzniká přeměnou různých druhů energií jako mechanické, chemické, elektrické, jaderné atd. Můžeme vlastně říci, že každá forma energie může degradovat na teplo.[2] Měřením tepla se zabývá kalorimetrie.

1.1 Termodynamické zákony

Termodynamika jako nauka o vzájemných přeměnách tepelné a mechanické energie se začala utvářet v souvislosti s vývojem parních strojů na přelomu 18. a 19. století. Od té doby prošla pozoruhodným vývojem a její zákony vešly v širší platnost a vztahují se vlastně na všechny přeměny energie. V dnešní době je tedy termodynamika chápána jako věda o energii a entropii.[3]

Entropie je slovo pocházející z řečtiny vyjadřující změnu formy. Tento pojem zavedl do termodynamiky v roce 1865 Rudolf Clausius. Entropie je stavovou veličinou a její změna závisí pouze na počátečním a koncovém stavu. Umožňuje sledovat míru nevratnosti děje. Často je prezentována jako míra neuspořádanosti zkoumaného systému. Popisuje degradaci tepla u nevratných dějů. Teplo nelze zcela převést v práci, dochází ke ztrátám a k postupnému ubývání schopnosti konat práci a tím pádem k nárůstu entropie. [4] V termodynamice lze entropii poměrně snadno vypočítat:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

S entropie [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$]

Q teplo [J]

T teplota [K]

Termodynamické děje můžeme chápat jako posloupnost stavů, při níž se termodynamická soustava mění v čase i prostoru. Jelikož jejich skutečná podoba je značně složitá a jejich popis obtížný, zavádíme tzv. modelové děje, které nám idealizují skutečnost. [4]

1.1.1 Nultý zákon termodynamiky

Nultý zákon termodynamiky stanovuje existenci teploty T jako termodynamické veličiny. [2] Tudíž chceme-li měřit teplotu, musíme si uvědomit zdánlivě samozřejmou skutečnost, že pokud jsou dvě či více těles v termodynamické rovnováze s tělesem dalším, pak jsou všechna tato tělesa v rovnováze. [5]

$$T_A = T_C T_B = T_C T_A = T_B \quad (2)$$

T teplota [$^{\circ}\text{C}$]

Toto zjištění má zásadní vliv na měření teploty. Můžeme tedy porovnávat teploty dvou různých látek pomocí látky třetí, nejčastěji rtuť či líh teploměru.

1.1.2 První zákon termodynamiky

V každé vědní disciplíně je základním zákonem zákon zachování energie. V roce 1847 byl formulován Helmholtzem a říká že:

Energie se neztrácí ani nevzniká, ale jeden druh energie se mění v jiný. Jinak řečeno, součet všech energií v izolované soustavě je konstantní. [4]

Pro potřeby termodynamiky využijeme citaci zákona od Roberta Mayera z roku 1842, která nám říká že:

Teplu lze měnit v práci a naopak a tyto přeměny se dějí podle určitého kvantitativního vztahu.

Uvedenou formulaci nazýváme jako první zákon termodynamiky. Nevztahuje se pouze na přeměny energie v samotné soustavě, ale zabývá se taktéž vztahem mezi vnitřní energií soustavy a veličinami, kterými soustava působí na své okolí a to formou tepla a práce. Matematicky můžeme první zákon termodynamiky formulovat více podobami.

Naruší-li se přivedením či odvedením tepla dQ rovnováha mezi soustavou a okolím dojde ke změně vnitřní energie soustavy dU a soustava bude konat nebo spotřebovávat práci dA dle vztahu: [4]

$$dQ = dU + dA \quad (3)$$

dQ teplo [J]

dU vnitřní energie soustavy [J]

dA práce [J]

Předpokladem pro danou rovnici je:

- $dQ > 0$ pro teplo do soustavy přiváděné
- $dQ < 0$ pro teplo ze soustavy odváděné
- $dU > 0$ pro zvyšování vnitřní energie soustavy
- $dU < 0$ pro snižování vnitřní energie soustavy
- $dA > 0$ pro soustavu práci konající
- $dA < 0$ pro soustavu práci spotřebovávající [4]

1.1.3 Druhý zákon termodynamiky

První termodynamický zákon říká, že všechny druhy energie jsou rovnocenné a lze je vzájemně transformovat (jeden druh energie lze přeměnit v jiný) např. mechanická energie může přecházet v teplo.

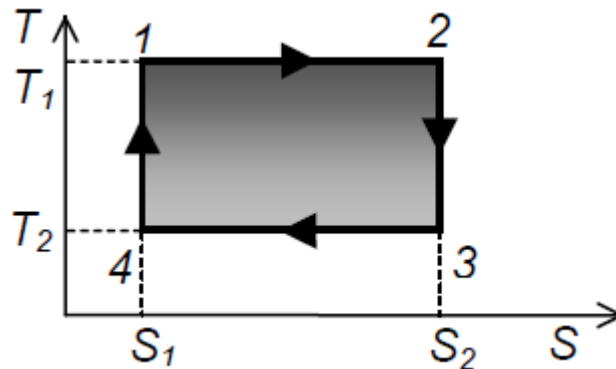
Druhý termodynamický zákon se zabývá tím, jak tyto tepelné děje probíhají v případě, že lze tepelnou energii přeměňovat s určitým omezením. Například kinetická energie střely se po dopadu na zem změní v energii tepelnou a místo dopadu i střela se zahřeje. Je však vyloučeno, aby po následném ochlazení místa dopadu a střely došlo k opětovnému získání kinetické energie, kterou by se střela zvedla zpět nad zem. [4]

Slovní formulace druhého zákona termodynamiky se liší svou formou vztahující se k určitým jevům v přírodě, mají však společnou podstatu.[4]

Teplo nemůže samovolně přecházet z tělesa o teplotě nižší na těleso o teplotě vyšší. Clausius[4]

Při přenosu tepla z teplejšího tělesa do okolního prostředí dochází ke snížení teploty a vnitřní energie tělesa a současně ke zvýšení teploty a vnitřní energie prostředí. Tento proces bude probíhat tak dlouho, dokud nedojde k vyrovnání teplot mezi tělesem a okolním prostředím. [4]

Grafické vyjádření množství přivedeného a odvedeného tepla tzv. Carnotův oběh.



Obr. 1. Diagram T-S

Z diagramu je patrné, že největší je teplo přiváděné za konstantní teploty (čára 1-2) a nejmenší je teplo izotermicky odváděné. Plocha uvnitř cyklu roste se zvětšujícím se rozdílem teplot a je úměrná teoreticky využitelné energii. Účinnost tohoto cyklu je dána vztahem:

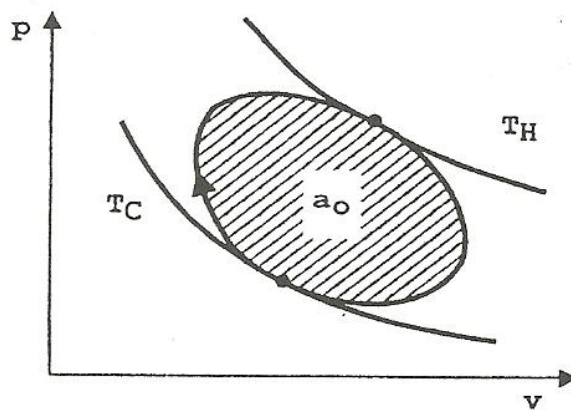
$$\eta = \frac{Q_p - Q_o}{Q_p} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (4)$$

- η účinnost
- Q_p teplo přivedené [J]
- Q_o teplo odvedené [J]
- T teplota [K]

Účinnost závisí pouze na teplotách (nikoliv na látce nebo konstrukci stroje). Pro zvýšení účinnosti se přivádí teplo v daném případě za co možná nejvyšší možné teploty. [3]

Není možné sestavit periodicky pracující stroj, který by nezpůsobil nic jiného, než že by odebíral teplo ze zásobníku a konal tomuto teplu ekvivalentní práci. Kelvin-Planck

Pro získání práce v motoru nelze využít jen jeden tepelný zdroj. Musí být k dispozici ještě další zdroj o rozdílné teplotě.



Obr. 2. Tepelný cyklus motoru

Práce motoru znázorněná plochou a_0 je nenulová, pouze tehdy jsou-li teploty T_H a T_C zásobníků různé. [4]

Nelze získávat ze soustavy neživých látek práci tím, že ji ochlazujeme pod teplotu nejchladnější látky v okolí. Kelvin

Pro získání práce v motoru se nemůže využít tepelného zdroje s nižší teplotou než je teplota okolí. Muselo by dojít k využití chladicího zařízení, které by mělo větší příkon než získaný výkon motoru.

1.1.4 Třetí zákon termodynamiky

Planck v roce 1912 vyslovil teorii, že změna entropie je možná jen tehdy, pokud absolutní hodnota entropie látek je při teplotě 0 K rovna nule. Pomocí řady experimentů se zjistilo, že tato teorie platí pro látky krystalické, ale nevztahuje se na látky chemicky čisté. Pro látky amorfnní a některé slitiny má naopak entropie při teplotě 0 K konečnou hodnotu. Pomocí těchto poznatků byl formulován třetí termodynamický zákon:

Entropie čistých krystalických látek při teplotě 0 K je nulová.

Matematické vyjádření zákona:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0 \quad (5)$$

S entropie [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$]

T teplota [K]

Ze zákona víme, že leží při teplotě $T = 0 \text{ K}$ počátek hodnot entropie dané látky v nule. Známe tedy integrační konstantu a můžeme vypočítat entropii dané látky při určité teplotě.[4]

1.2 Výměna tepla

Tepelná výměna je termodynamický děj, při kterém dochází k výměně tepla mezi dvěma tělesy s různou teplotou. Tepelná výměna vždy probíhá tak, že teplejší těleso předává část své vnitřní energie tělesu chladnějšímu.[6] Přenos energie je z hlediska termodynamiky možný dvěma způsoby a to vykonáním práce (např. stlačení pístem) nebo tepelnou výměnou. Základní mechanismy přenosu tepla jsou kondukce (vedení), konvekce (proudění) a radiace (sálání).

1.2.1 Kondukce (vedení)

Vedení tepla spočívá v pohybu strukturních částic hmoty. Jedná se v podstatě o přenos energie od více energetických k méně energetickým částicím. U kapalin a plynů jsou tyto částice molekuly, u pevných látek atomy. Za předpokladu teplotního gradientu dochází k přenosu tepla ve směru klesající teploty. U plynů a kapalin dochází k náhodnému pohybu molekul. U kapalin jsou molekuly více u sebe a jejich vzájemné vazby jsou silnější a častější než je tomu u plynů. U pevných látek nevodivých se uskutečňuje pohyb atomů formou vlnového pohybu krystalické mřížky, naopak u látek vodivých dochází ještě k postupnému pohybu volných elektronů. [7]

Základním zákonem vedení tepla je Fourierův zákon, udávající vztah mezi teplotním gradientem a hustotou tepelného toku:

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (6)$$

q_x měrný tepelný tok [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

$\frac{dT}{dx}$ teplotní gradient [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$]

Záporné znaménko značí, že tepelný tok a teplotní gradient mají jako vektor opačný smysl. Ve směru osy x teplota klesá. K šíření tepla dochází ve směru klesající teploty. [15]

Pro celkový tepelný tok přenášený plochou A platí:

$$d\dot{Q} = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \cdot dA \text{ [W]} \quad (7)$$

dA teplosměnná plocha [m^2]

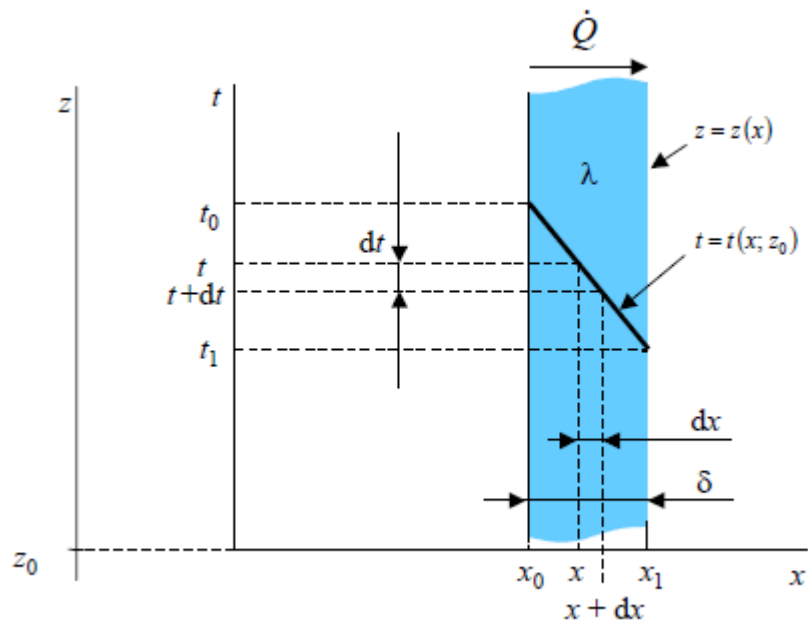
Po integraci rovinná stěna:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{t_0 - t_1}{\delta} \cdot A \text{ [W]} \quad (8)$$

\dot{Q} tepelný tok [W]

δ tloušťka [m]

t_0, t_1 teplota [K]



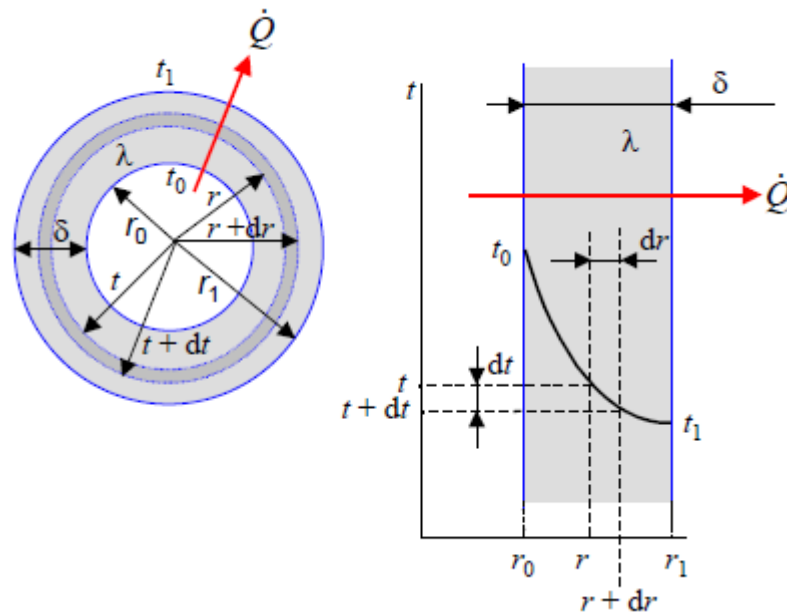
Obr. 3. Schéma rovinné stěny

Po integraci válcová stěna:[15]

$$\dot{Q} = 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda \cdot \frac{t_0 - t_1}{\ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right)} \text{ [W]} \quad (9)$$

l délka válcové plochy [m]

d_1, d_0 průměr válcové plochy [m]



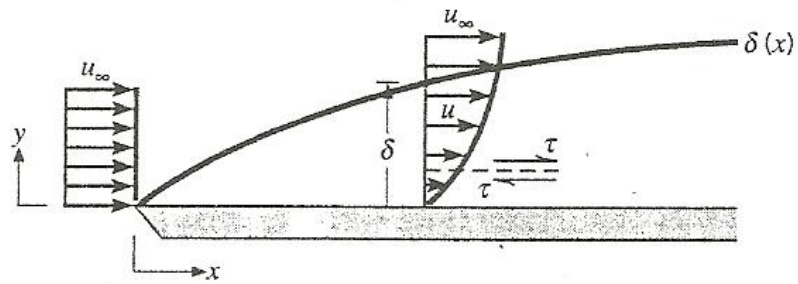
Obr. 4. Schéma válcové stěny[15]

1.2.2 Konvekce (proudění)

Proudění tepla konvekcí je složeno ze dvou mechanismů. Základním je – náhodný pohyb molekul – KONdukce. Druhým mechanismem je adVEKCE – objemový makroskopický pohyb tekutin. Velké množství molekul se v kterémkoliv okamžiku pohybuje kolektivně v objemech.

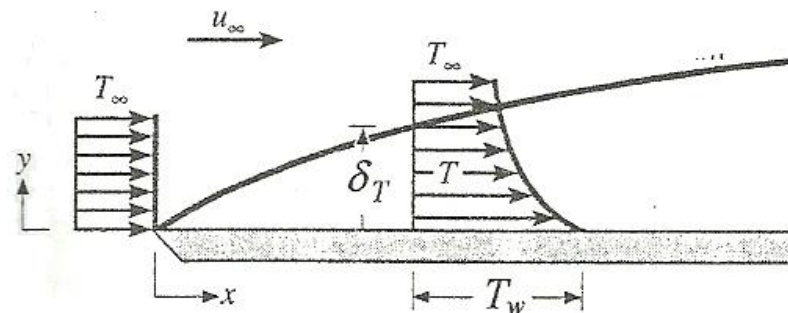
Konvekce je tedy přenos energie důsledkem superpozice daných mechanismů. První mechanismus převládá v blízkosti pevného povrchu, kde je rychlost tekutiny nízká, přímo na povrchu klesá až na nulu. Druhý mechanismus se uplatňuje tak, že tekutina je z volného proudu strhávána do mezní vrstvy, odkud je „smetena“ dolů po proudu.

S pojmem konvekce jsou spjaty i pojmy hydrodynamická a tepelná mezní vrstva. Dochází-li k přenosu tepla mezi proudící tekutinou a pevným povrchem mající různou teplotu, vytvoří se v blízkosti tohoto povrchu vrstva tekutiny, v níž se rychlost proudění mění od nuly až po rychlost volného proudu. Tuto vrstvu nazýváme hydrodynamická mezní vrstva. [7]



Obr. 5. Hydrodynamická mezní vrstva

Podobně vzniká i vrstva tepelná. Na povrchu pevného tělesa má ulpívající tekutina nulovou rychlost a teplotu rovnou teplotě povrchu. Částice tepla předávají svou energii dál, částicím sousedním a tento děj postupuje, až se dostanou do volného proudu. V tom okamžiku jsme dosáhli hranice tepelné mezní vrstvy.[7]



Obr. 6. Tepelná mezní vrstva

Pro určení přenášeného tepelného toku bez ohledu na povahu konvekce se využívá Newtonův ochlazovací zákon:

- Pro ohřev stěny (ochlazení tekutiny)

$$\dot{Q} = \alpha \cdot (t_f - t_s) \cdot S \quad (10)$$

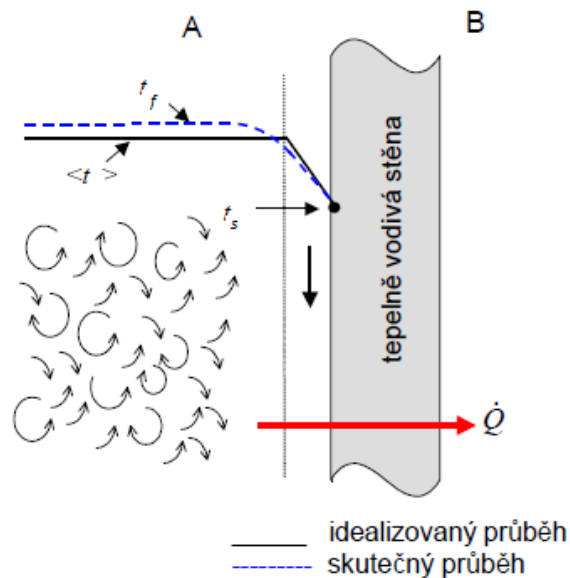
- α součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
- t_f teplota tekutiny [K]
- t_s teplota stěny [K]
- S teplosměnný povrch [m^2]

- Pro ohřev tekutiny (ochlazení stěny)

$$\dot{Q} = \alpha \cdot (t'_s - t'_f) \cdot S \quad (11)$$

t'_f teplota tekutiny [K]

t'_s teplota stěny [K] [8]



Obr. 7. Schéma sdílení tepla prouděním

I když je zákon vyjádřen jednoduchým vztahem, jde o velmi složitý proces. Součinitel přestupu tepla není totiž materiálovou konstantou, ale složitou funkcí mnoha dalších veličin. Udává nám tepelný tok přestupující z kapaliny do stěny. Jeho hodnota závisí především na způsobu realizace proudění tekutiny, na rychlosti proudění, na tvaru, rozměrech a délce obtékané stěny, na tepelné vodivosti, hustotě, tlaku, měrném teple a viskozitě tekutiny, na drsnosti stěny atd. Nelze ho tudíž vypočítat jednoduchým výpočtovým vztahem, a proto zavádíme bezrozměrová kritéria podobnosti.

Fourierovo kritérium – Fo

$$Fo = \frac{l^2}{a \cdot \tau} \quad (12)$$

l charakteristická délka

a teplotní vodivost

τ čas od zahájení procesu sdílení tepla

Uplatňuje se při popisu neustáleného sdílení tepla.[20]

Nusseltovo kritérium – Nu

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (13)$$

α koeficient přestupu tepla

l charakteristická délka (ekvivalentní průměr trubky, tloušťka filmu, průměr obtékané koule, atd.)

λ tepelná vodivost tekutiny

Hodnota Nu závisí na proměnných, které se liší podle konkrétního proudění tekutiny.[20]
Je-li hodnota Nu=10 sdílení tepla přestupem je 10x intenzivnější než sdílení tepla vedením.
[21]

Pécletovo kritérium – Pe

$$Pe = \frac{v \cdot l}{a} \quad (14)$$

v charakteristická rychlost proudění tekutiny

a teplotní vodivost

L charakteristický délkový rozměr, průměr d , nebo ekvivalentní průměr d_{ek} [20]

Pécletovo kritérium je vlastně podíl hodnoty toku tepla prouděním (konvekce) a hodnoty toku tepla vedením (kondukce) v tepelných procesech.[21] Pro výpočet nucené konvekce.[22]

Reynoldsovo kritérium – Re

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\eta} \quad (15)$$

ν kinematická viskozita tekutiny

η dynamická viskozita [20]

Reynoldsovo kritérium je bezrozměrové a vystihuje charakter toku. Vyjadřuje poměr setrvačných a viskózních sil působících v tekutině. Jeho pomocí je charakter toku vymezen do tří oblastí:

- Oblast laminární $Re < 2\,300$
- Oblast přechodová $2\,300 < Re < 10\,000$
- Oblast turbulentní $Re > 10\,000$ [23]

Uplatňuje se pro výpočet nucené konvekce. [22]

Prandtlovo kritérium – Pr

Kombinace Péceletova a Reynoldsova kritéria zahrnuje vlastnosti tekutiny důležité při molekulárním sdílení hybnosti a tepla. [20]

$$Pr = \frac{Pe}{Re} \quad (16)$$

Dosazením získáme:

$$Pr = c_p \cdot \frac{\eta}{\lambda} \quad (17)$$

c_p měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku

λ koeficient tepelné vodivosti tekutiny

Grashofovo kritérium – Gr

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t \quad (18)$$

g gravitační zrychlení

β koeficient teplotní objemové roztažnosti

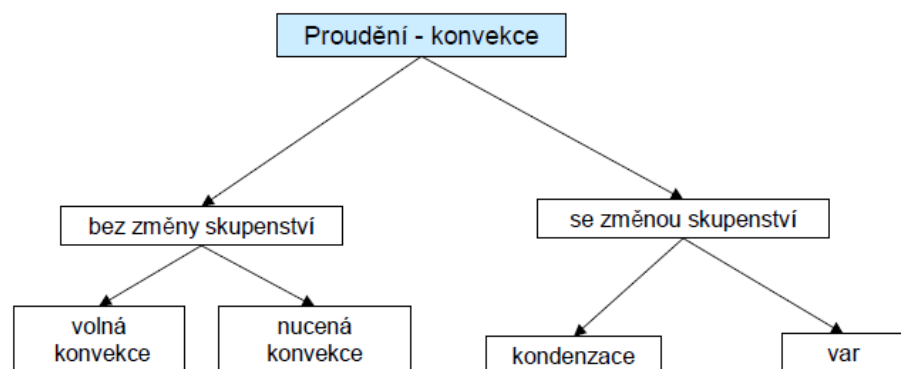
ν kinematická viskozita tekutiny

l charakteristická délka (výška teplosměnné plochy, která je ve styku s tekutinou)

Δt rozdíl teplot [9]

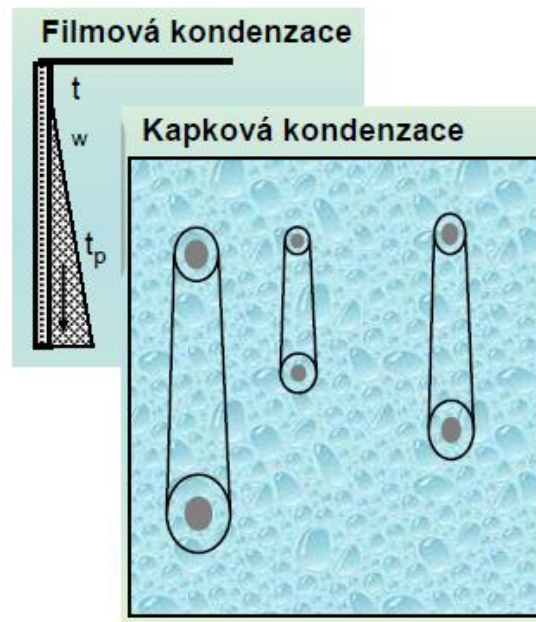
Slouží k vyjádření intenzity cirkulace při volném proudění tekutiny vlivem rozdílných teplot. [20] Určuje vliv gravitace a teplotní objemové roztažnosti na proudění a sdílení tepla. Platí, je-li tento vliv malý, přirozené proudění není významné a naopak. [21] Využívá se pro výpočet volné konvekce. [22]

Konvekce je tedy sdílení tepla mezi povrchem a prostředím z místa o vyšší teplotě na místo s nižší teplotou. Podle povahy proudění konvekci klasifikujeme na přirozenou, nucenou a kombinovanou.[7] Dále ji můžeme rozdělit na konvekci se změnou skupenství, kterou dělíme na kondenzaci a var.



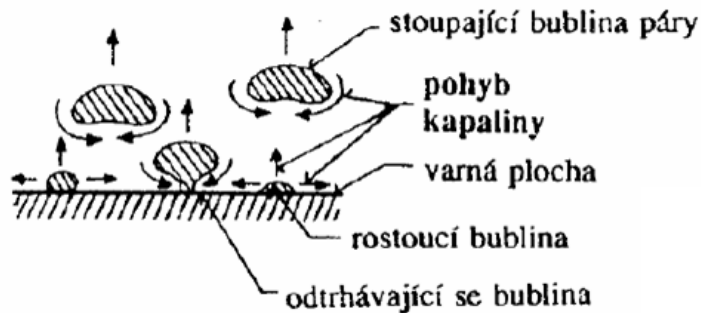
Obr. 8. Rozdělení konvekce

Kondenzace je děj, při kterém dochází ke skupenské přeměně plynu na kapalinu. Ke zkapalnění nasycené páry dochází snížením její teploty nebo zvýšením tlaku. Při kondenzaci se spotřebovává skupenské teplo kondenzační. Příkladem může být kondenzace vody. Molekula vody je složena ze dvou atomů vodíku a jednoho atomu kyslíku. Vodní molekuly se volně pohybují ve vzduchu a občas dochází k jejich srážkám. Když se dvě molekuly vody srazí, opět se odrazí, ale pokud začne klesat teplota, molekuly mají méně energie a začnou se tedy pohybovat pomaleji. Jakmile klesne teplota na teplotu rosného bodu, pohybují se molekuly natolik pomalu, že se spolu naváží. Vazba vzniká mezi atomy jednoho vodíku a atomem kyslíku. Vodní molekuly se spojují v krátké řady, což následuje přeměněním vodní páry v tekutinu. Při spojení dochází k vyzáření části tepla v podobě latentního tepla, což má za následek oteplení okolního prostředí. Pokud dojde k navázání dostatečného množství molekul, vzniká dešťová kapka, která se snáší na zemský povrch v podobě deště. [10]



Obr. 9. Filmová a kapková kondenzace[15]

Naopak **var** je skupenská přeměna, při které se kapalina mění na plyn v celém svém objemu (nejen z povrchu). K varu dochází, zahřejeme-li kapalinu na teplotu varu. Její velikost se liší dle druhu kapaliny a závisí na tlaku nad kapalinou (s rostoucím tlakem teplota varu stoupá). Teplo potřebné ke změně skupenství se nazývá skupenské teplo varu.[11]



Obr. 10. Fázová přeměna – var[15]

1.2.2.1 Přirozená (volná) konvekce

Volná konvekce nastává tehdy, když není tekutina nucena vnějším zásahem k proudění. Objemová síla působí na tekutinu, v níž jsou gradienty hustoty a výsledkem je vznik vztahové síly, která vyvolává volný konvektivní pohyb tekutiny. Ve většině případů je objemovou silou síla gravitační a gradienty hustoty vzniknou na základě existence gradientů teploty. Velmi typickým příkladem je způsob vytápění domácností pomocí

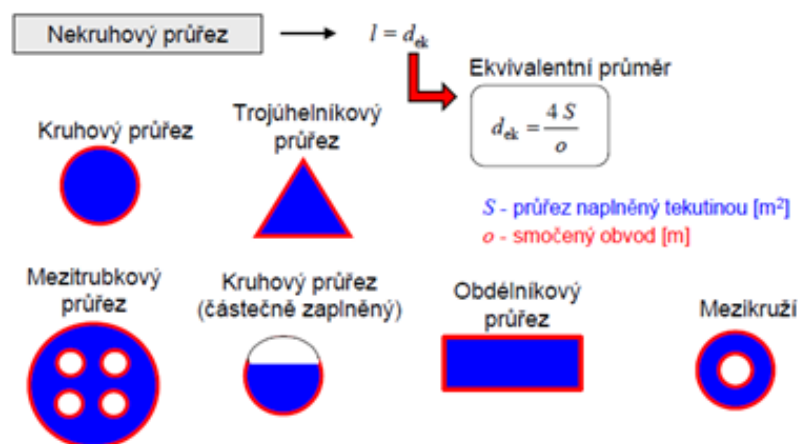
radiátorů. Vzduch ohřátý při styku s povrchem tělesa stoupá vzhůru, kde se střetává se studeným vzduchem, který klesá podél povrchu okna. Vzniknou tak dva proti sobě se pohybující víry a celý pohyb je výsledkem existence teplotních gradientů a vzniku vztlakové síly. [7]

1.2.2.2 Nucená konvekce

O nucené konvekci mluvíme tehdy, je-li pohyb vynucen vnějším působením například čerpadla, ventilátor, apod. Při nucené konvekci se dosahuje daleko vyšší intenzity přestupu tepla než při konvekci přirozené. Nejjednodušší rovnice pro přestup tepla nucenou konvekci získáme při proudění v trubce – podélné obtékání. Charakteristickým rozměrem je l . Nucenou konvekci dělíme dále na konvekci

- při vnějším proudění
- při vnitřním proudění.

Při vnějším proudění je těleso z vnějšku obtékáno tekutinou např. turbínová lopatka obtékána parou nebo automobil obtékán proudem vzduchu. Charakteristickým rozměrem je v tomto případě ekvivalentní průměr $l=d_{ekv}$. Do druhého případu vnitřního proudění patří veškeré proudění uvnitř uzavřeného prostoru např. v trubkách a kanálech, ve válci spalovacího motoru atd. V tomto případě je charakteristickým rozměrem vnitřní průměr trubky $l=d$. Charakter nuceného proudění je obvykle vyjadřován buď Reynoldsovým nebo Péceletovým kritériem. [12]



Obr. 11. Druhy průřezů

1.2.2.3 Kombinovaná konvekce

V praxi se vyskytuje mnoho problémů, v nichž je současně přítomna volná i nucená konvekce. Pro zjištění, který z těchto mechanismů je dominující a který lze naopak zanedbat a výpočet tak zjednodušit, nám slouží následující:

Platí-li $\frac{Gr}{Re^2} \ll 1$ přirozenou konvekci můžeme zanedbat a součinitel přestupu tepla se určí podle případu nucené konvekce. $Nu_L = f(Re_L, Pr)$

Platí-li $\frac{Gr}{Re^2} \gg 1$ přirozená konvekce se nedá zanedbat naopak je dominující a zanedbáme konvekci nucenou. $Nu_L = f(Gr_L, Pr)$

Platí-li $\frac{Gr}{Re^2} \approx 1$ oba mechanismy jsou stejně důležité a nesmíme je tedy zanedbat. $Nu_L = f(Re_L, Gr_L, Pr)$ Musíme rozlišit, v jakém směru působí přirozená i nucená konvekce.

Pokud působí stejným směrem nebo obě konvekce působí kolmo na sebe, přirozená zintenzivňuje přenos tepla nucenou. Pokud působí opačně, tak přirozená konvekce nucenou zeslabuje. [7]

1.2.3 Radiace (sálání)

Z každého povrchu majícího nějakou teplotu je emitována energie. Tento proces nazýváme tepelným sáláním. [7] Sálání na rozdíl od předcházejících druhů nevyžaduje hmotné prostředí, může tedy probíhat i v absolutním vakuu. Přenos se uskutečňuje pomocí elektromagnetického vlnění, vznikajícího v důsledku tepelného stavu těles. Energie, kterou vyzařují tělesa, prudce vzrůstá s jejich teplotou.[8] Pro výpočet maximálního toku, který může být z povrchu tělesa emitován, využijeme Stefan-Boltzmannův zákon:

$$\dot{q} = E_o = \sigma \cdot \Delta T^4 [W \cdot m^{-2}] \quad (19)$$

σ Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$

T teplota povrchu tělesa [K]

Index „o“ značí, že vzorec je platný pro tzv. černé těleso, tj. ideální zářič vyzařující maximální možnou energii.

Pro reálný povrch platí:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \Delta T^4 [W \cdot m^{-2}] \quad (20)$$

ε poměrná zářivost, pohybující se v rozmezí $0 \leq \varepsilon \leq 1$

Porovnává jak je záření z povrchu efektivní vůči absolutně černému tělesu. [7] U pevných těles jako slitiny hliníku, zlata, stříbra, bronzu se pohybuje v rozmezí $\varepsilon = 0,02-0,06$ naopak dřevo, porcelán, sklo, smalty $\varepsilon = 0,82-0,96$. Kapaliny dosahují hodnot až $\varepsilon = 0,95-0,96$. [8]

Avšak záření dopadající na povrch může být z části i pohlceno – absorbováno. Veličin znázorňující jak moc, může být toto záření pohlceno, se nazývá poměrná pohltivost (absorptance) značí se a a pohybuje se v rozmezí $0 \leq a \leq 1$.

Přenos tepla sáláním je složitý proces, neboť všechny povrchy vzájemně vyzařují, odrážejí a pohlcují energii. [7]

Nejjednodušší rovnice, kterou lze využít v praxi je případ malého povrchu zcela obklopeného velkým povrchem. Pak lze výsledný tepelný tok vypočítat:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_w^4 - T_0^4) [W] \quad (21)$$

T_w teplota povrchu malého tělesa [K]

T_0 teplota povrchu velkého tělesa [K]

2 TEPELNÝ VÝMĚNÍK

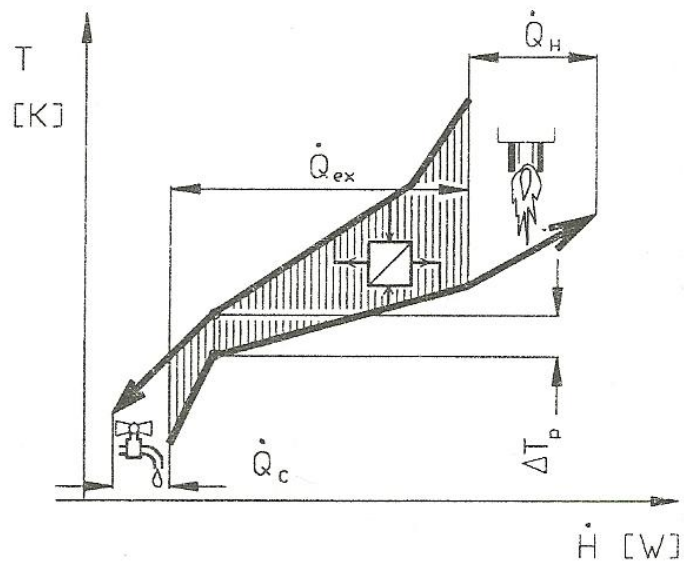
Výměník tepla je zařízení, které umožňuje proces přenosu tepla mezi dvěma tekutinami o nestejně teplotě většinou oddělených pevnou stěnou. S výměníky tepla se setkáváme velmi často např. v domácí chladničce, automobilu, kotli na ústřední topení, v elektrárnách, klimatizačních soustavách, v procesním inženýrství a v mnoha dalších aplikacích.[4] Výměníků tepla existuje mnoho druhů.

Dělí se například:

- podle způsobu použití (ohřívače, vařáky, kondenzátory, ...)
- podle počtu ploch zúčastňujících se přenosu tepla (směšovací, regenerační, ...)
- podle smyslu proudění pracovních látek podél ploch (soproudé, protiproudé, ...)
- podle konstrukčního provedení, atd.

Jelikož v žádném tepelném výměníku nelze dosáhnout 100% termické účinnosti - existuje vždy větší či menší teplotní rozdíl mezi vstupní topnou kapalinou a výstupní ohřivanou kapalinou. Návrh tepelného výměníku je v každém systému velice důležitý a většinou na něm závisí funkčnost a účinnost celého systému. Zahrnuje výpočty tepelné, hydrodynamické, pevnostní i ekonomické. [13]

Zjišťování toho, kde mají být výměníky ve schématu procesu umístěny, se zabývá integrace procesů. V procesním schématu existují horké a chladné proudy přičemž teploty těchto proudů a hmotnostní průtoky jsou dány technologickými požadavky. Ohřát nebo ochladit tyto proudy lze i z externích zdrojů tepla jako kotelna nebo chladicí voda, což ale maximalizuje nároky na tyto externí zdroje a zvyšuje spotřebu energie. Použitím výměníků tepla podstatně snížíme tyto nároky. Obecnými pravidly pro optimální lokalizaci výměníků se zabývá technologie *pinch*. Tato metoda je založena na kompozitních křivkách, což jsou vlastně závislosti teploty teplých a chladných proudů na entalpickém toku proudů. [14]



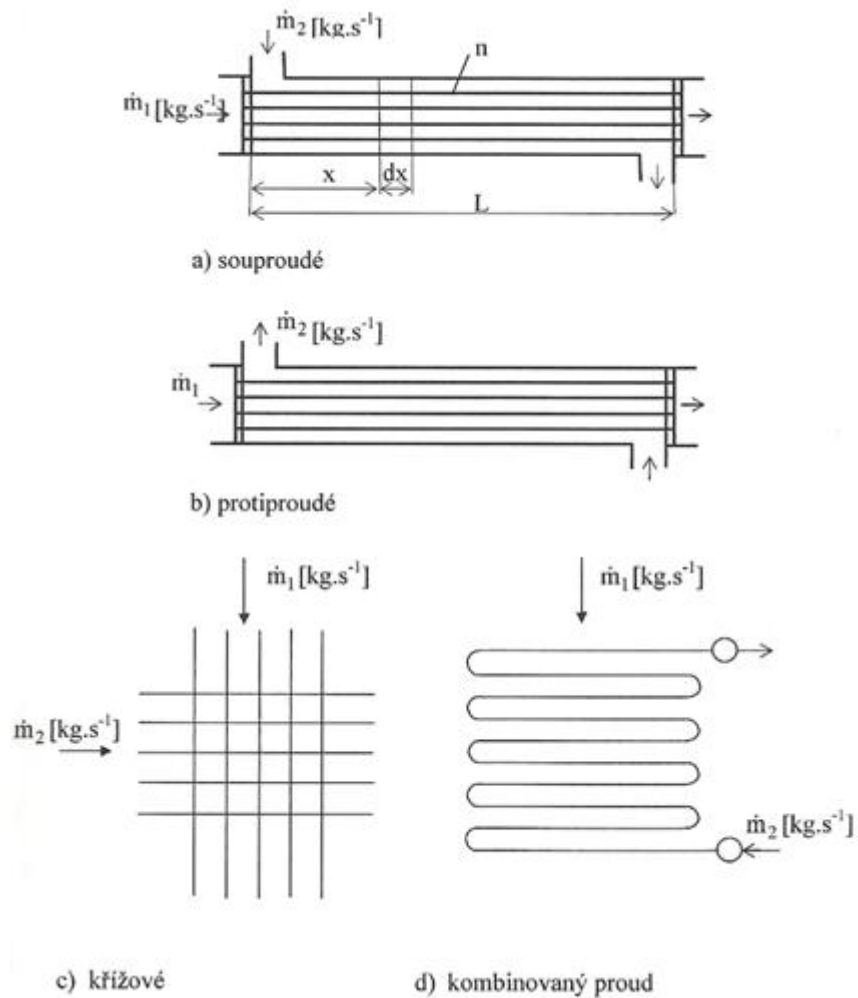
Obr. 12. Kompozitní křivky horkých a chladných proudů[14]

2.1 Typy tepelných výměníků

Z hlediska výskytu jsou nejrozšířenější výměníky:

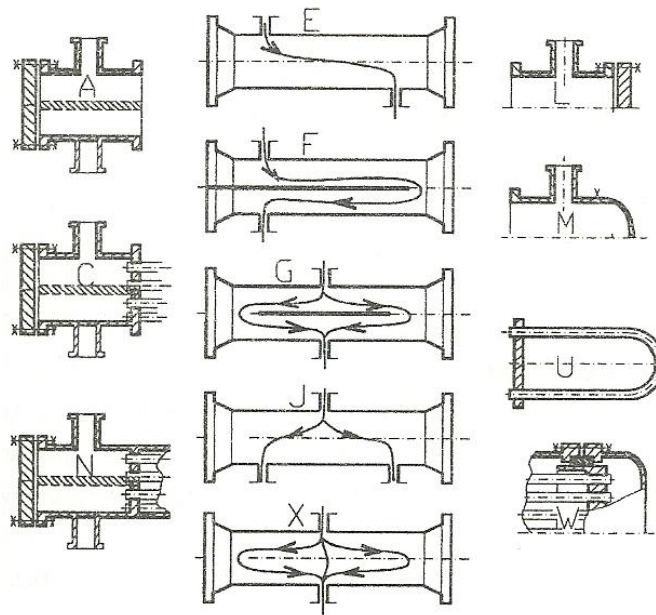
1. Rekuperační – u kterých jsou média od sebe oddělena teplosměnnou plochou. Teplo se sdílí přestupem z tekutiny o vyšší teplotě na povrch stěny k této tekutině přiléhající a dále vedením stěnou a přestupem tepla z povrchu stěny obtékané tekutinou o nižší teplotě. [23] Jsou to například výměníky tlakového systému parních a horkovodních kotlů, trubkové a deskové ohříváky vzduchu, kondenzátory, nízkotlaké ohříváky kondenzátu a vysokotlaké ohříváky napájecí vody v systému regenerace tepla v tepelném oběhu, parogenerátory jaderných elektráren a jiné. Uspořádání proudů u výměníků může být: [13]

- a) souproudé
- b) protiproudé
- c) křížové
- d) kombinované [13]



Obr. 13. Uspořádání proudů[13]

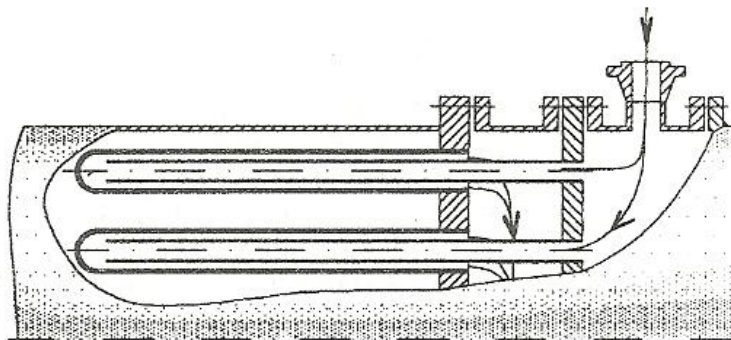
2. Regenerační – slouží k nepřímému sdílení tepla tekutin prostřednictvím teplosměnné plochy. Ta se střídavě ohřívá teplejším médiem a ochlazuje chladnějším médiem. Teplosměnná plocha musí mít velký povrch pro sdílení tepla a velkou tepelnou kapacitu. Je uplatněno nabíjení a vybíjení tepla při nestacionárním ději. Využití například ve sklářském průmyslu. [23]
3. Směšovací – ve výměníku dochází k přímému styku látky o vyšší teplotě s látkou o nižší teplotě za vzniku směsi těchto látek o teplotě ležící v rozmezí jejich teplot. Výsledná teplota se určuje entalpickou bilancí. Například ohřívání přímým stykem vodného roztoku látky s vodní parou. [23]



Obr. 16. Výměníky dle klasifikace TEMA[14]

Fieldův výměník

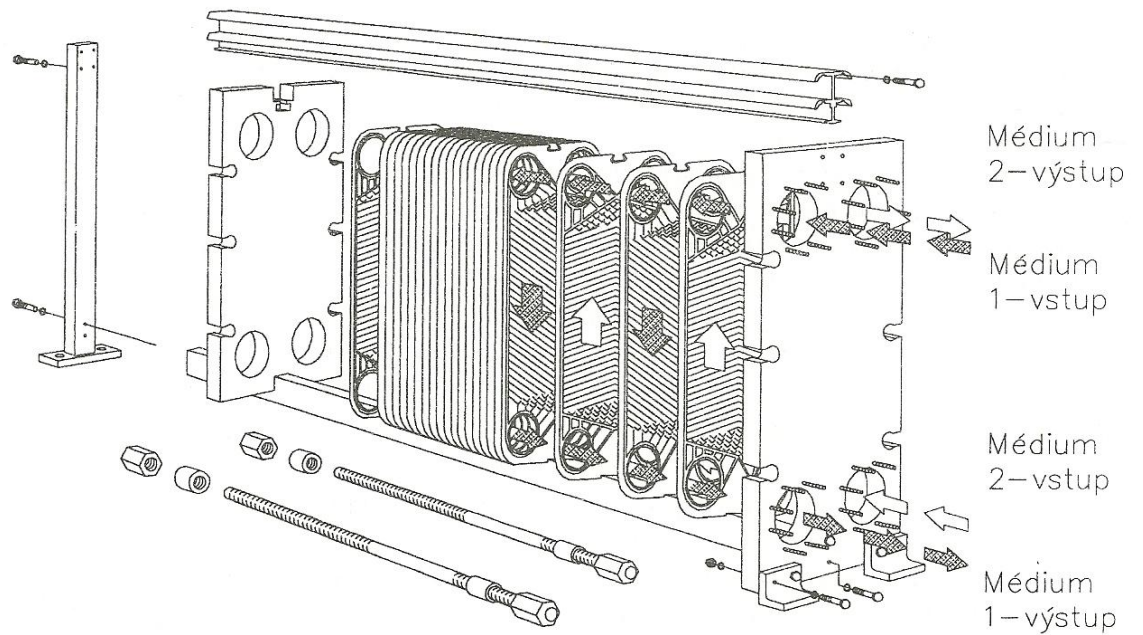
Princip spočívá v použití dvojtrubek. Vnější na konci zaslepené trubky jsou zaválcovány do jedné trubkovnice, do níž jsou zasunuté a na konci otevřené vnitřní trubky jsou připojené k druhé trubkovnici. Médium tedy protéká nejprve vnitřní trubkou, na konci se obrátí a zpět se vrací mezikružím. Tlakové ztráty jsou značně vysoké. [14]



Obr. 17. Fieldův výměník [14]

Výměníky deskové

Média (výhradně kapaliny) proudí ve štěrbinách mezi na sobě naskládanými deskami, tak aby přestup tepla byl co nejúčinnější a aby nedocházelo k nadměrnému zanášení. Typická deska výměníku je vylisovaná z nerezového plechu a má v rozích čtyři otvory. Dav otvory jsou funkční a dva oddělené od průtočného kanálu těsnící lištou. [14]



Obr. 18. Deskové výměníky[14]

Při výběru výměníku vhodného pro danou aplikaci je možné využít expertní systémy založené na již existujících instalacích nebo vycházet ze základních charakteristik výměníků viz tabulka 1. [14]

Tabulka 1. Typy výměníků

Typ výměníku	Tlaky [MPa]	Teploty [°C]	Kompaktnost	Fouling	Čistitelnost	Použití
trubkový	> 4	> 300	+	+	+	univerzální
spirálový	1.8	400	++	+++	+	univerzální (ne G-G)
deskový	2.5 těsn. 4 svařov.	100-200 300 svař.	+++	++	++ -	ne pro plyny (s výjimkou odpařování)
stíraný povrch	2	230		++++	+	vazké kapaliny, pasty

2.2 Základní výpočetní vztahy výměníků

Způsob výpočtu výměníku závisí především na tom, zda se projektuje výměník zcela nový což je nazýváno návrhový výpočet a jeho výsledkem je především stanovení teplosměnné plochy, nebo se zjišťuje, jak se bude daný výměník chovat v provozních podmínkách tzv. kontrolní výpočet, u kterého určujeme především tepelný výkon a výstupní teploty. [14]

2.2.1 Rovnice tepelné bilance

Základní rovnice pro návrh a kontrolní výpočet výměníků jsou odvozovány z tepelné bilance výměníku v ustáleném stavu.[13] Předpokládáme-li, že nedochází k tepelné ztrátě výměníku do okolí (tzn. výměník je dokonale tepelně izolován), zanedbáme-li změnu pohybové a potenciální energie tekutin, v žádné z tekutin nedochází k fázové přeměně a měrnou tepelnou kapacitu považujeme za konstantní, pak platí: [7]

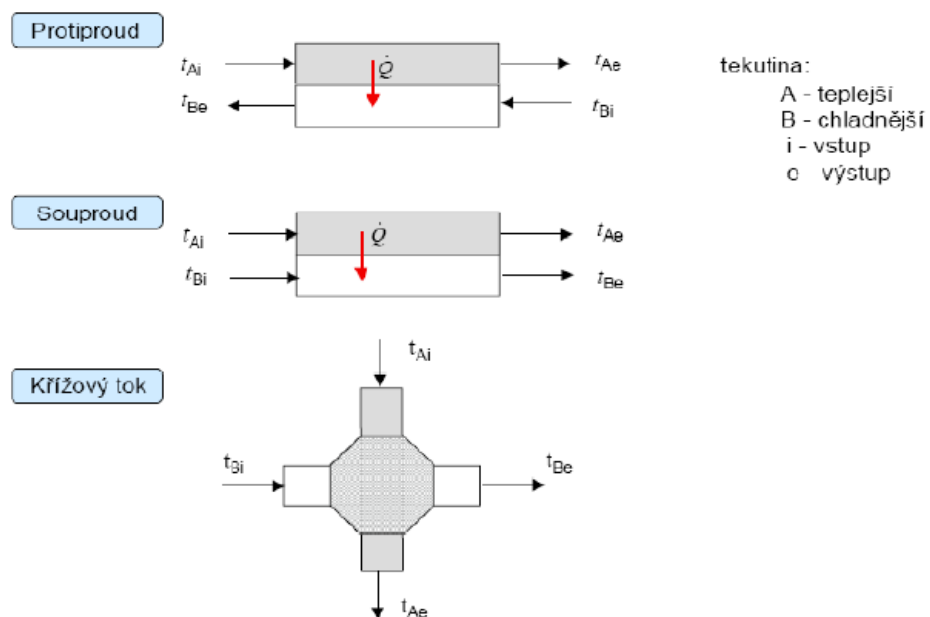
$$\dot{Q} = \dot{m}_A \cdot c_{pA} \cdot (t_{Ai} - t_{Ae}) \quad (22)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_B \cdot c_{pB} \cdot (t_{Be} - t_{Bi}) \quad (23)$$

\dot{Q} tepelný tok [W]

\dot{m} hmotnostní tok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

c_p měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]



Obr. 19. Tok tekutin[15]

Rovnice tepelné bilance platí nezávisle na charakteru proudění tekutin ve výměníku.

2.2.2 Součinitel prostupu tepla

O prostupu tepla hovoříme tehdy, dochází-li k přenosu tepla z jedné tekutiny do druhé přes pevnou přepážku. [7]

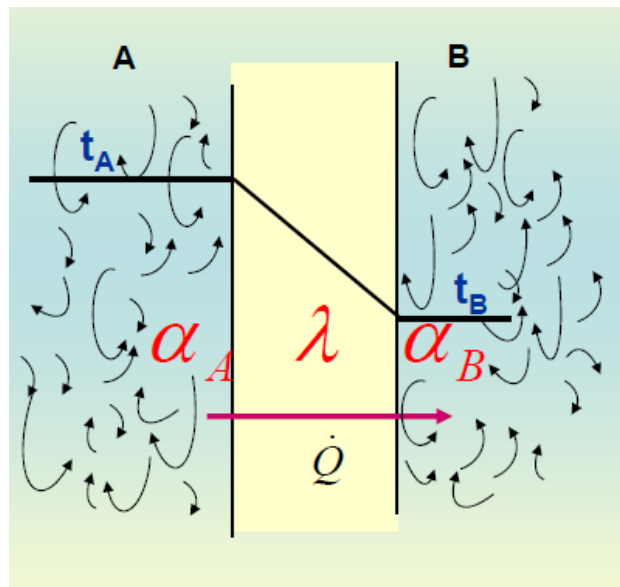
Součinitel prostupu tepla pro rovinnou desku:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_A} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_B} \quad (24)$$

k součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

α součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]



Obr. 20. Schéma prostupu tepla rovinná deska[15]

Součinitel prostupu tepla pro válcovou stěnu (trubka):

$$\frac{\pi}{k} = \frac{1}{\alpha_A \cdot d_A} + \frac{\ln \frac{d_B}{d_A}}{2 \cdot \lambda} + \frac{1}{\alpha_B \cdot d_B} \quad (25)$$

d_A, d_B průměr trubky [m]

Celkový přenášený tepelný tok pro rovinnou desku:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta t_{ls} \quad (26)$$

A plocha [m²]

Celkový přenášený tepelný tok pro válcovou stěnu (trubka):

$$\dot{Q} = k \cdot L \cdot \Delta t_{ls} \quad (27)$$

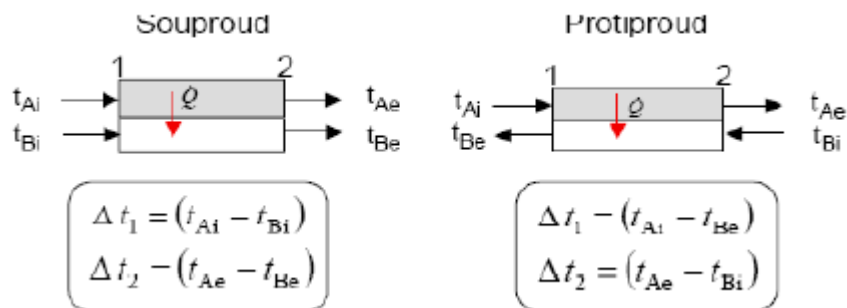
L délka válcové trubky [m] [15]

2.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

Pro určení celkového tepelného toku pro přenos tepla za podmínky konstantní teploty povrchu, kdy se teplota tekutiny mění ve směru proudění je potřeba střední teplotní difference, která zahrnuje právě změnu teploty tekutiny. Touto diferencí je logaritmický střed rozdílu teplot. Teplotní difference s indexem 1 se nachází vždy na levé straně výměníku naopak teplotní difference s indexem 2 na pravé straně. Toto uspořádání je neměnné bez ohledu na to zda jde o souproudé či protiproudé uspořádání.[7]

$$\Delta t_{ls} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (28)$$

Δt_{ls} logaritmický střed rozdílu teplot [K]



Obr. 21. Průběh teplot ve výměnících[15]

2.3 Návrh a výpočet tepelného výměníku

Rozhodujícím faktorem pro způsob výpočtu výměníku je, zda se jedná o výpočet návrhový (projektuje se zcela nový výměník), nebo výpočet kontrolní (zjištění chování výměníku při určitých provozních podmínkách). Uvažujeme-li o dvoulátkovém rekuperačním výměníku se sdílením tepla mezi dvěma proudy nejčastěji využíváme dvou metod výpočtu. [14]

Metoda LMTD (Logaritmický střední teplotní spád) používající střední logaritmický teplotní spád a metoda ϵ - NTU (Number of Transfer Unit) efektivnost výměníku. Obě tyto metody jsou z hlediska dosažených výsledků rovnocenné, liší se však postupem použití, který je rozlišován podle zadaných veličin.

1. Má-li se zvolit typ výměníku a spočítat jeho teplosměnná plocha, jsou-li známy všechny teploty, jedná se o výpočet konstrukčního návrhu výměníku s využitím metody LMTD.
2. Je-li znám typ výměníku, jeho velikost, vstupní teploty obou látek a hmotnostní toky těchto látek, jedná se o výpočet výkonnosti výměníku. Výstupní teploty obou látek se zjistí nejjednodušeji pomocí metody ϵ - NTU. [7]

Návrh výměníku nezahrnuje pouze tepelný výpočet, ale i mnoho dalších jako např. výpočet tlakových ztrát, dimenzování, kalkulaci nákladů, atd. Tyto výpočty lze zjednodušeně rozdělit do několika bodů:

1. Tepelný výpočet pro zvolenou variantu výměníku a odhadnuté rozměry s využitím znalosti termofyzikálních vlastností.
2. Výpočet tlakových ztrát.
3. Dimenzování teplosměnných ploch.
4. Posouzení výměníku z hlediska vibrací s využitím metody konečných prvků.
5. Dimenzování výměníku s ohledem na pravidla týkající se výpočtů tlakových nádob.
6. Výpočet optimálního řešení a jeho cenová kalkulace.

Pro navrhování výměníků doposud neexistují žádné univerzální programové systémy, které by zvládly vypočítat všechny tyto typy, a proto jsou metody výpočtu většinou duševním vlastnictvím výrobců tepelných výměníků. [14]

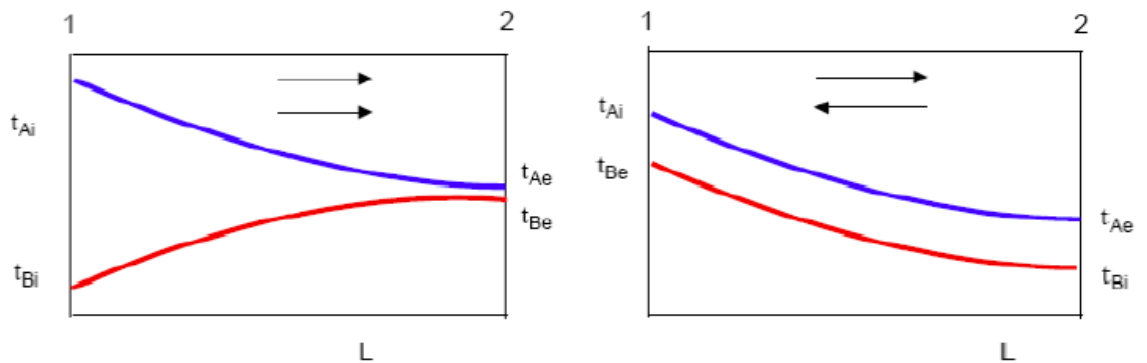
Schématický výpočet deskového výměníku:

Výpočet výměníku se pro zjednodušení rozdělí na několik fází

- Bilanční schéma výměníku
- Entalpická bilance a prostup tepla
- Konstrukční výpočet
- Kontrolní výpočet

Bilanční schéma:

- Typ výměníku (svazkový, deskový, ...)
- Tok tekutin (protiproud, sou proud, křížový tok)
- Rozdělení teplot v daném výměníku



Obr. 22. Rozdělení teplot ve výměnících tepla

Entalpická bilance a prostup tepla:

- Výpočtové rovnice pro entalpickou bilanci viz rovnice (22) a (23)
- Výpočtové rovnice pro prostup tepla viz rovnice (26)
- Rovnice pro výpočet součinitele prostupu tepla pro složenou rovinou desku

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_A} + \sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B} \quad (29)$$

- Rovnice pro výpočet logaritmického středu rozdílů teplot viz rovnice (28)

Konstrukční výpočet:

- Výpočet celkového toku tepla dosazením Δt_{ls} do rovnice (26)

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (30)$$

- Výpočet součinitele přestupu tepla, Reynoldsova a Nusseltova kritéria

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{ek}} d_{ek} = 2 \cdot h \quad (31)$$

$$Re = \frac{v \cdot d_{ek} \cdot \rho}{\eta} = \frac{v \cdot d_{ek}}{\nu} \quad v = \frac{\dot{V}}{n_k \cdot h \cdot b} \quad (32)$$

h střední vzdálenost mezi deskami [m]

b šířka kanálku [m]

n_k počet kanálků na straně tekutiny

$$(Re \geq 800, Pr > 1)$$

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^m \quad (33)$$

$$n = 0,33 \exp [3,4 / (Pr + 30)]$$

$$C = 0,19 \quad m = 0,76 \quad \text{protiproud}$$

$$C = 0,17 \quad m = 0,74 \quad \text{souproud}$$

- Výpočet výstupních teplot společným řešením soustavy rovnic (22), (23), (26) a (28)
- Výpočet počtu převodových jednotek

$$N_A = \frac{k \cdot A}{\dot{m}_A \cdot c_{pA}} \quad N_B = \frac{k \cdot A}{\dot{m}_B \cdot c_{pB}} \quad (34)$$

- Výpočet faktoru výměníku (poměr toků tepelných kapacit)

$$\xi_{AB} = \frac{\dot{m}_A \cdot c_{pA}}{\dot{m}_B \cdot c_{pB}} \quad \xi_{BA} = \frac{\dot{m}_B \cdot c_{pB}}{\dot{m}_A \cdot c_{pA}} \quad (35)$$

$$\xi_{BA} = \frac{1}{\xi_{AB}} \quad (36)$$

$$\xi_{AB} = \frac{\dot{m}_A \cdot c_{pA}}{\dot{m}_B \cdot c_{pB}} = \frac{(t_{Be} - t_{Bi})}{(t_{Ai} - t_{Ae})} \quad (37)$$

Kontrolní výpočet:

- Entalpické bilance a prostupu tepla

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \frac{t_{Ai} - t_{Be} - t_{Ae} + t_{Bi}}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \dot{m}_A \cdot c_{pA} \cdot (t_{Ai} - t_{Ae}) \quad (38)$$

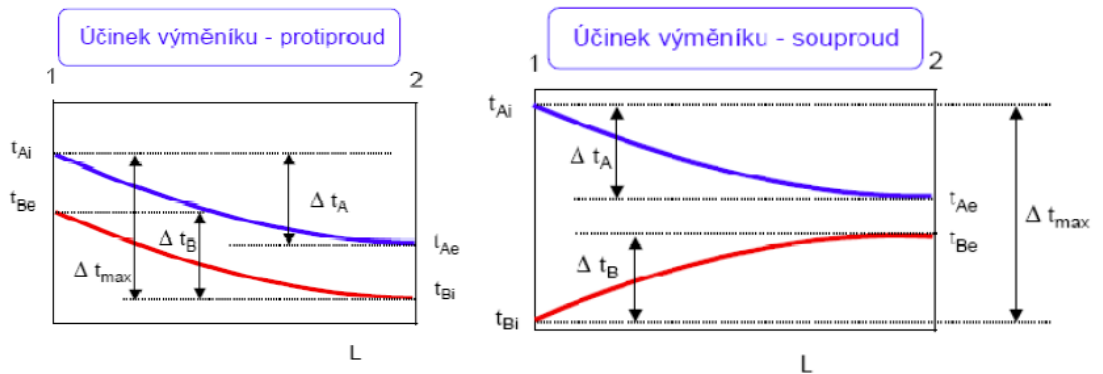
$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \exp \left[\frac{k \cdot A}{\dot{m}_A \cdot c_{pA}} \left(1 - \frac{\dot{m}_A \cdot c_{pA}}{\dot{m}_B \cdot c_{pB}} \right) \right] \quad (39)$$

- Účinku výměníku

$$\eta_A = \frac{\Delta t_A}{\Delta t_{max}} = \frac{t_{Ai} - t_{Ae}}{t_{Ai} - t_{Bi}} \quad \eta_B = \frac{\Delta t_B}{\Delta t_{max}} = \frac{t_{Be} - t_{Bi}}{t_{Ai} - t_{Bi}} \quad (40)$$

$$\eta_B = \xi_{AB} \cdot \eta_A = \frac{t_{Be} - t_{Bi}}{t_{Ai} - t_{Bi}} \quad (41)$$

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{1 - \xi_{AB} \cdot \eta_A}{1 - \eta_A} \quad (42)$$



Obr. 23. Účinek výměníku

- Teploty t_{Ae} , t_{Be}

$$N_A = \frac{k \cdot A}{\dot{m}_A \cdot c_{pA}} \xi_{AB} = \frac{\dot{m}_A \cdot c_{pA}}{\dot{m}_B \cdot c_{pB}} \Rightarrow \eta_A \quad (43)$$

$$\eta_A = \frac{t_{Ai} - t_{Ae}}{t_{Ai} - t_{Bi}} \Rightarrow t_{Ae} \quad (44)$$

$$\xi_{AB} = \frac{t_{Be} - t_{Bi}}{t_{Ai} - t_{Ae}} \Rightarrow t_{Be} \quad (45)$$

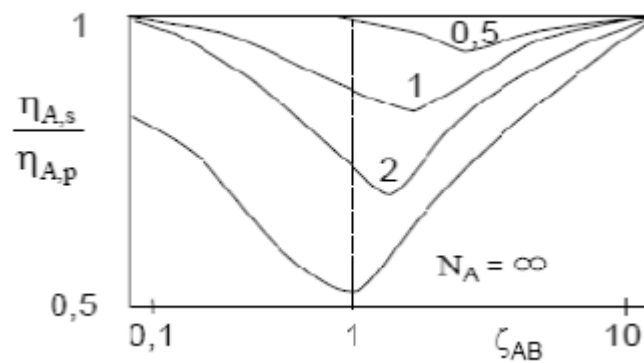
- Porovnání protiproudého a souprourdého výměníku tepla (stejně $k, A, \dot{m}_A, \dot{m}_B$)

Protiproud:

$$\eta_{A,p} = \frac{1 - \exp[N_A(1 - \xi_{AB})]}{\xi_{AB} - \exp[N_A(1 - \xi_{AB})]} \quad (46)$$

Souprourd:

$$\eta_{A,s} = \frac{1 - \exp[-N_A(1 + \xi_{AB})]}{1 + \xi_{AB}} \quad (47)$$



Obr. 24. Porovnání výměníku tepla

$$N_A = \frac{k \cdot A}{\dot{m}_A \cdot c_{pA}} \xi_{AB} = \frac{\dot{m}_A \cdot c_{pA}}{\dot{m}_B \cdot c_{pB}} \quad (48)$$

3 PELTIERŮV ČLÁNEK

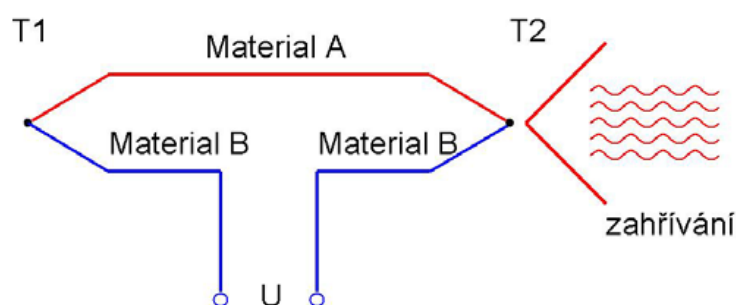
Peltierův článek je založen na principu Peltierova jevu a využívá se především k chlazení. Tyto články jsou napájeny stejnosměrným proudem a v podstatě jednou svou stranou teplo pohlcují a druhou ho vyzařují. V dnešní době představují zajímavou alternativu ke konvenčním způsobům chlazení a nacházejí stále širší uplatnění. Jedná se především o specializované oblasti jako je elektronika či optoelektronika, ve kterých je potřeba přesná regulace teploty, nebo získání teploty nižší než je teplota okolí. [16]

3.1 Seebeckův jev

V roce 1758 ruský vědec Epinus objevil termoelektrický jev, zjištěním, že v obvodě složeném ze dvou různých vodičů vznikne napětí, jestliže spoje těchto vodičů mají různou teplotu. Vzniklé napětí je nazýváno termoelektrické a jeho velikost je závislá na druhu použitých vodičů a rozdílu teplot jejich spojů. [17]

Seebeckův jev byl objeven o mnoho let později v roce 1821 německým fyzikem Thomasem Seebeckem. Mají-li styčná místa jednotlivých kovů v uzavřeném obvodě různou teplotu, je i jejich konstantní napětí různé a obvodem prochází nenulový výsledný proud. Tento obvod lze použít jako zdroj elektrického napětí. Vzniklé termoelektrické napětí závisí pouze na rozdílu teplot a na druhu materiálů. Nezávisí na rychlosti ohřevu ani způsobu vedení tepla. [18]

Prakticky se Seebeckův jev využívá např. k měření teploty pomocí termočlánků.[19]



Obr. 25. Seebeckův jev

Seebeck na základě mnoha pokusů sestavil v roce 1822 tzv. Seebeckovu řadu, která stále i v dnešní době a se současnými měřeními termoelektrických sil kovů souhlasí. [24]

Seebeckova řada 1822	Termoelek- trická řada
PbS	
Bi.....	Bi
amalgam	konstantan
Ni	Co
Co	Ni
Pd	K
Pt č. 1	Pd
U	Na
Au č. 1	Pt
Cu č. 1	Hg
mosaz	C
Pt č. 2	Al
Hg	Mg
Pb	Pb
Sn	Sn
Cr.....	Cs
Pt č. 3	manganin
Cu č. 2	Ir
Rh	Rh
Au č. 2	Zn
Ag	Ag
Zn	Au
C	Cu
Cu č. 3	W
Pt č. 4	Cd
Cd	Mo
ocel	Fe
Fe	Sb
As	Si
Sb	Te
SbZn (slitina)	Se
Te	

Obr. 26. Seebeckova řada

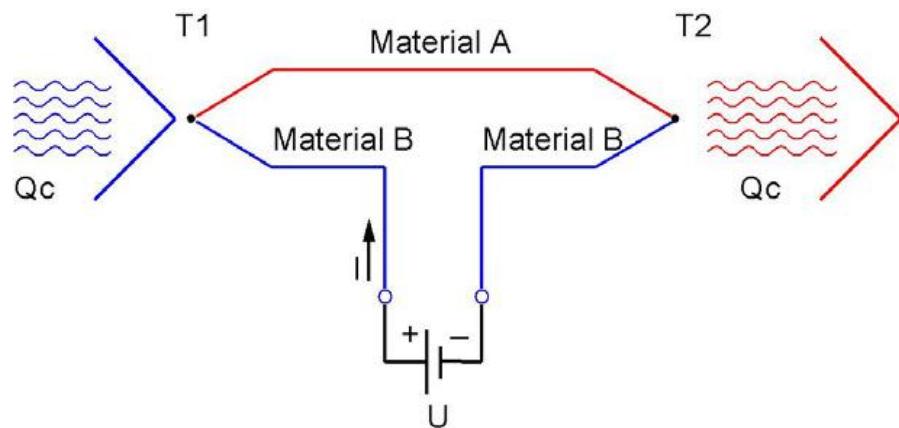
V obvodě prochází proud směrem ke kovu v řadě předcházejícímu. Rostoucí napětí se tedy zvětšuje s rostoucím odstupem kovů v Seebeckově řadě. Tento jev platí i pro polovodiče.

+Sb, Fe, Zn, Ag, Au, Sn, Pb, Hg, Cu, Pt, Bi-

Největší napětí má tedy dvojice Bi-Sb, která by mohla dosáhnout účinnosti až kolem 3%. [25] Seebeckův koeficient závisí na dané dvojici kovů a řádově se pro kovy pohybuje v rozmezí $(10^{-6}-10^{-5}) \text{ V.K}^{-1}$ a pro polovodiče $(10^{-5}-10^{-3}) \text{ V.K}^{-1}$. [18]

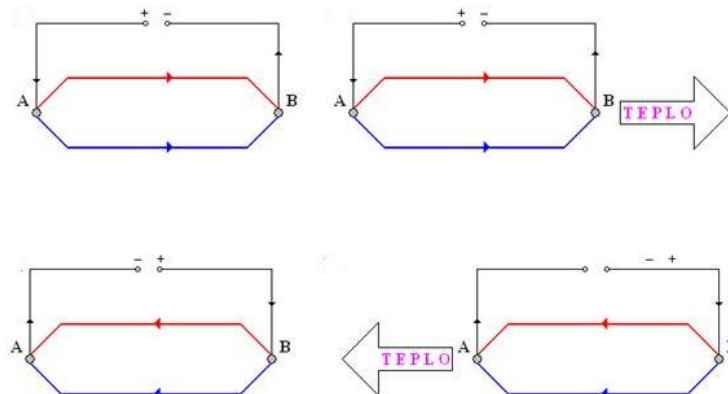
3.2 Peltierův jev

V roce 1834 francouzský fyzik Jean Charles Peltier objevil inverzní jev k jevu Seebeckovu. Zapojíme-li do obvodu složeného ze dvou kovů zdroj napětí, začne se jeden spoj kovů zahřívat a druhý ochlazovat. [25]



Obr. 27. Peltierův jev

Prochází-li proud mezi oběma kovy stejným směrem jako při Seebeckově jevu spoj A se bude ochlazovat a spoj B se bude naopak ohřívat. Při opačném směru tomu bude naopak. [18]



Obr. 28. Ohřev a chlazení při Peltierově jevu

V kovech a polovodičích se vlivem průchodu elektrického proudu přemísťují volně nabitě částice (elektrony) a tím dochází ke zvyšování nerovnováhy mezi spoji daných kovů, čímž roste termoelektrické napětí. Vlivem rostoucího napětí poroste i rozdíl teplot obou spojů a teplo se bude šířit ze spoje, jehož kontaktní napětí bude vyšší. V praxi se tento jev používá ke konstrukci Peltierových článků. [18]

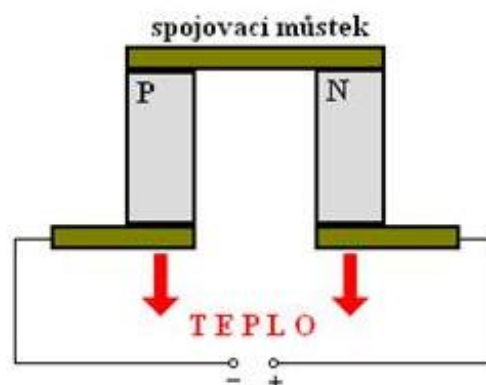
3.3 Peltierův článek

Peltierův článek je součástka složená ze dvou polovodičových tělísek (polovodič typu N a polovodič typu P) a spojovacího můstku.

Spojovací můstek slouží k přívodu elektrické energie do článku a zároveň z článku odvádí (absorbuje) teplo.

V polovodiči typu N jsou elektrony, které jsou v tomto polovodiči hlavními nosiči náboje, odváděny směrem ke zdroji napětí. Obdobně jsou také odváděny ke zdroji napětí z polovodiče typu P jeho hlavní nosiče náboje a to díry. Počet volných nosičů náboje klesá a tím i kontaktní napětí mezi polovodiči a spojovacím můstkem. Dochází k ochlazení můstku a u druhého spoje naopak dochází k ohřevu.

Mezi můstkem a polovodičem dochází ke vzniku nežádoucího přechodového odporu, který značně negativně ovlivňuje možný dosažitelný chladicí výkon a zároveň i teplotní rozdíl obou spojů. [18]



Obr. 29. Peltierův článek

3.3.1 Materiály pro výrobu Peltierových článků

Využití Peltierových článků k chlazení souvisí především s objevem nových materiálů vhodných k výrobě účinnějších polovodičů. Vlastnosti materiálů vhodných k výrobě těchto článků se řídí tzv. součinitelem efektivnosti Z , který je dán vztahem:

$$Z = \frac{(a^2 \cdot s)}{l} \quad \text{resp} \quad Z = \frac{a^2}{l \cdot r} [K^{-1}] \quad (49)$$

- a Seebeckův koeficient [$V \cdot K^{-1}$]
- s měrná elektrická vodivost [$S \cdot m^{-1}$]
- l měrná tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
- r měrný elektrický odpor [$W \cdot m$]

Ideální vlastnosti vhodného materiálu jsou velký Seebeckův koeficient, malá měrná tepelná vodivost, velká měrná elektrická vodivost a tím pádem malý měrný elektrický odpor. [26]Důležitým faktorem je také rozsah teplot, ve kterém bude daný článek pracovat.

Nejběžněji používaným materiálem pro výrobu polovodičů jsou bizmut-telluridy. Pro polovodič typu N se využívá Bi-Te-Se a pro výrobu polovodiče typu P Bi-Sb-Te.

Spojovací můstky jsou často vyráběny z mědi díky jejímu malému měrnému odporu a snadnému pájení případných dalších součástí. [18]

Účinnost (poměr příkonu a výkonu) Peltierových článků stále stoupá spolu s rozvojem nových materiálů. V dnešní době dosahuje přibližně 65%, na rozdíl od roku 1947 kdy byla dosahovaná účinnost jen kolem 3%. [27]

Od roku 2006 je v České republice platná direktiva RoHS (Restriction of the use of Hazardous Substances) zakazující používání nebezpečných látek k výrobě elektrického a elektronického zařízení s cílem ochrany životního prostředí a lidského zdraví.

Zakázané materiály jsou:

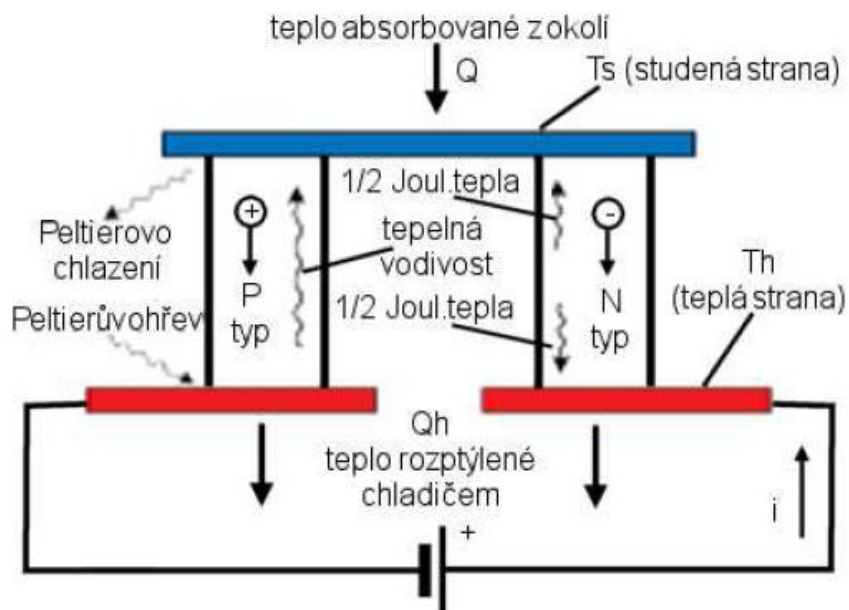
- Kadmium
- Rtuť

- Olovo
- Šestimocný chróm
- Polybromované bifenyly
- Polybromované difenyl ethery[28]
-

3.3.2 Konstrukce Peltierových článků

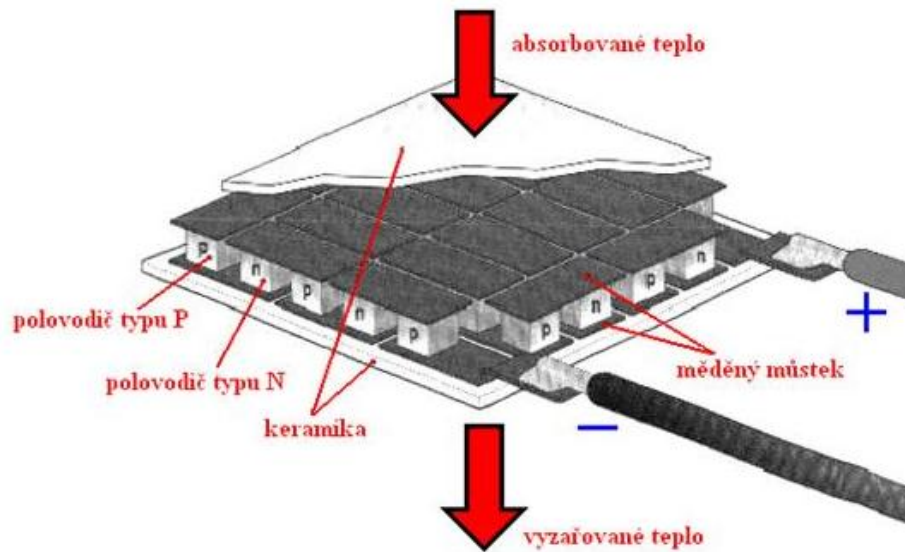
Konstrukce Peltierova článku je malých rozměrů a je tvořena nepohyblivými tuhými částmi. Základem jsou dva sloupky hranolovitého tvaru tvořené polovodiči typu P a N, které jsou vodivě spojeny na jedné straně tzv. spojovacím můstkem. Druhá strana je určena pro přívod elektrické energie. Pomocí spojovacího můstku a kontaktních plošek dochází k absorbování nebo vyzařování tepla. [26]

Při základním zapojení je Q teplo absorbované a Q_h teplo vyzařované.



Obr. 30. Konstrukce Peltierova článku

Peltierovy články se nejčastěji zapojují do série ve větší celky tzv. Peltierovy moduly. Jednotlivé polovodiče v modulu se nazývají elementy a pár elementů tvoří tzv. termočlánek. Jednotlivé termoelementy se pro dosažení vyšších rozdílů teplot spojují do kaskády a vznikají tak vícestupňové moduly. [26]

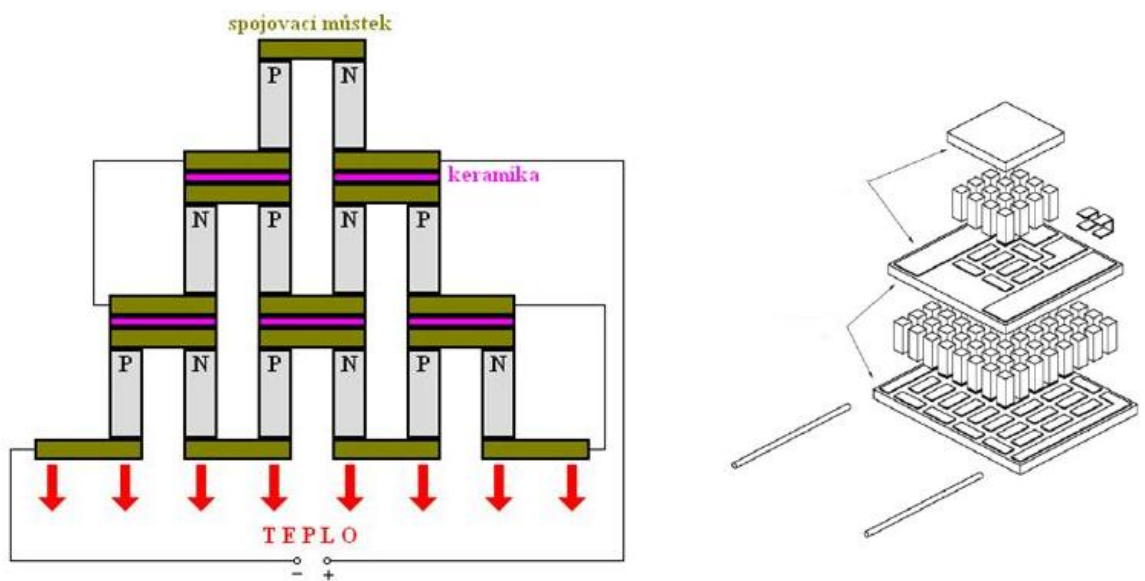


Obr. 31. Peltierův modul[18]

Mezi kaskádami se musí zajistit elektrická izolace. Nejčastěji se využívá keramika s dobrou tepelnou vodivostí, která zároveň zajišťuje potřebnou pevnost. Vhodný poměr cena/výkon splňují materiály na bázi oxidu hlinitého.

Řazení termoelementů do kaskád se provádí především s cílem zvýšit chladicí účinnost pro požadované velké teplotní rozdíly s cílem zachovat stávající chladicí výkon. [18]

Konstrukce kaskád svým vzhledem připomíná pyramidu. K chlazení slouží jen poslední vrchní vrstva, která je nejmenší. Spodní řady slouží k odvodu tepla.



Obr. 32. Konstrukce kaskád

Použití kaskádových konstrukcí je vhodné pouze tehdy kdy jednostupňová konstrukce nedosahuje potřebného výkonu, jelikož s rostoucím počtem kaskád značně rostou i náklady.[29]

Spojují-li se Peltierovy články do kaskád je potřeba slepit keramické destičky vhodným lepidlem s vysokým součinitelem tepelné vodivosti, aby se snížil tepelný odpor vznikající mezi bateriemi. [18]

3.3.3 Rozdělení Peltierových článků

Termoelektrické články rozdělujeme do několika skupin, které se liší zcela odlišnou technologií výroby a vytvářením spojů. [17]



Obr. 33. Rozdělení termočlánků

Peltierovy články využívané k chlazení se dělí nejčastěji podle několika kritérií a to výkonu, geometrie, použití a způsobu montáže.

Zjednodušeně můžeme Peltierovy články v praxi využít ve dvou variantách jako:

- Zařízení pro přenos tepelné energie: jedna část prostoru bude ochlazována druhá ohřívána, využívá se např. v chladicích boxech, v počítačích jako chladiče elektronických součástek, ...
- Zdroj elektrického napětí: přímá aplikace Seebeckova jevu, jedna část článku bude ochlazována druhá naopak ohřívána. [18]

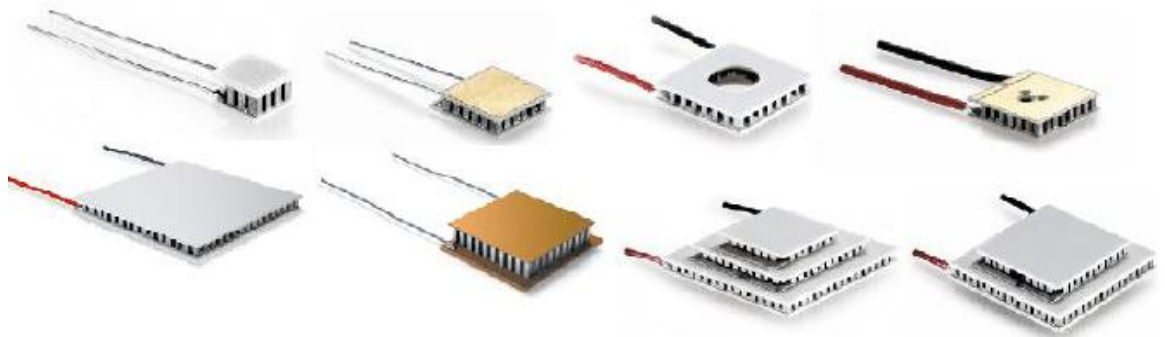
Dělení podle výkonu:

Komerčně dostupné Peltierovy články jsou vyráběny ve dvou typech TEC a TEG moduly. TEC jsou určeny pro chlazení, TEG pro přeměnu elektrické energie. Dosahují výkonu v rozmezí μW až stovek W . [30]

Zajímavým druhem jsou tzv. mikročlánky, které se vyrábí deponováním tenkých vrstev. Běžný Peltierův článek má na ploše $10 \times 10 \text{ mm}$ zhruba 8 samostatných termočlánků, u mikročlánku se jich nachází až 50x více a dosahují lepšího výkonu i rychlejší odezvy. V porovnání s běžnými články, které přenášejí $3\text{--}6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ mohou přenést $60\text{--}100 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. [31]

Dělení podle geometrie:

Geometrie článků je téměř vždy čtvercového nebo obdélníkového tvaru, ale mohou se vyskytnout i výjimky jako kruhový tvar nebo centrální výřez, který se uplatňuje především v optických aplikacích. [32]



Obr. 34. Typy článků

Dělení podle použití:

V dnešní době nacházejí Peltierovy články, kromě elektroniky uplatnění v mnoha dalších odvětvích

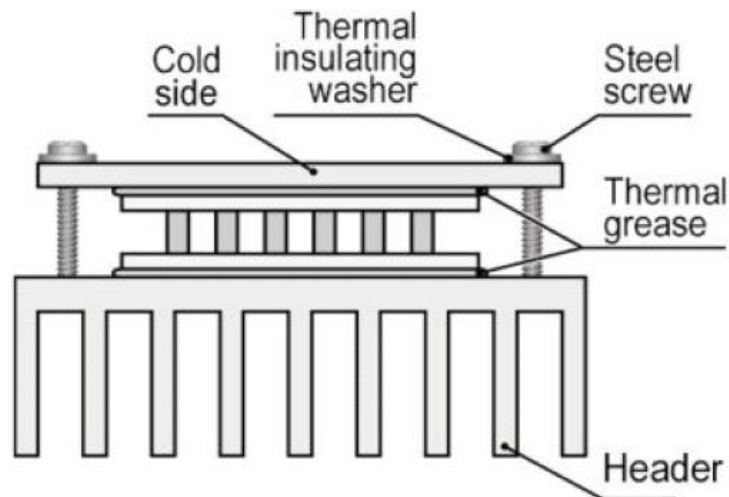
- Elektronika: chladiče pro mikroprocesory, zesilovače, výkonné generátory, pro zařízení k nočnímu vidění, ...
- Lékařství: chladiče pro přenosné kontejnery s biologickým materiálem, farmaceutické zařízení,...

- Vědecká a laboratorní činnost: chladicí laboratorní desky, termostaty, chladicí prostory k měření vzorků, ...
- Spotřební zboží: přenosné ledničky, chladicí boxy, vinotéky, ...
- Klimatizační zařízení: chladiče pro prostory k chovu zvířat (např. akvária), pro uskladňování knih, k udržení stálé teploty, ... [33]

Dělení podle způsobu montáže:

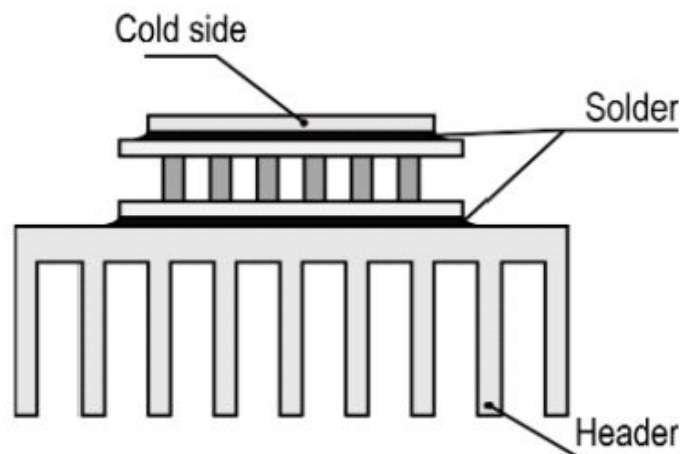
Způsob montáže a instalace značně ovlivňuje výkon a správnou funkčnost zařízení. Při jejím návrhu musí být brány v potaz, jak ohledy na prostředí ve kterém bude článek použit, tak na nepříznivé vlivy okolí, vibrace a případné nárazy. Velmi důležité je taktéž správné zajištění přenosu tepla mezi styčnými plochami a zabránění vzniku nežádoucího přechodového odporu. Mezi nejběžnější způsoby montáže patří mechanické spojení, spojení pájením a spojení lepením.

Mechanické spojení vyžaduje použití přídavných šroubů. Peltierův článek je mezi dvěma výměníky přichycen těmito šrouby a mezery mezi stěnami se zaplňují teplovodivými pastami. Toto spojení je výhodné hlavně díky snadnému rozebrání a tedy i možné údržbě. Využití nachází hlavně u spojů jednořadých Peltierových článků. U mikročlánků se tato montáž nedá použít z důvodu prostoru a výrazných tepelných ztrát. Mechanickému poškození článku např. prasknutí se zabráňuje dodržením rovinnosti, která by neměla přesahovat 0,02 mm. Před samotným spojením musí být plochy zbaveny nečistot a nerovností. Případné velké nerovnosti se řeší použitím teplovodivé směsi, která zároveň zlepšuje teplotní vodivost. Nevýhodou tohoto spojení je vznik tepelných mostů v místech šroubových spojů, kterému lze ale zabránit použitím těsnících podložek nebo šroubů z vhodných materiálů s nízkou vodivostí např. nerezová ocel. [34]



Obr. 35. Mechanické spojení[34]

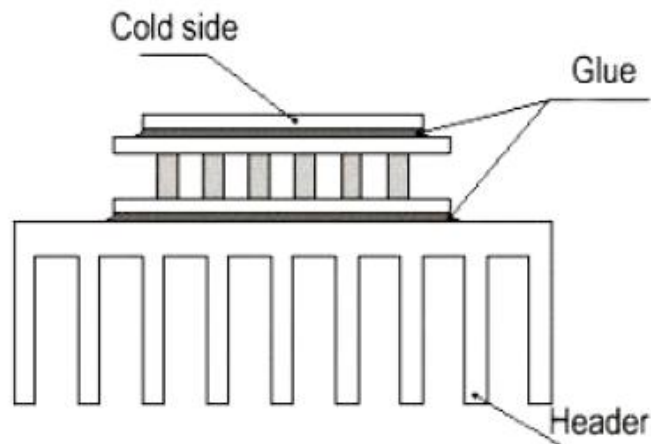
Spojení pájením se využívá pro jednořadé, ale i kaskádové mikročlánky. Principem je spojení chladiče a chladícího objektu měkkou pájkou při dodržení daných teplot. Pro zlepšení vodivosti se mohou plochy pokovovat tenkou vrstvou cínu nebo zlata. Výhodou je mechanická odolnost, využití pro aplikace pracující při podtlaku a tepelný kontakt mezi plochami spojů. [34]



Obr. 36. Spojení pomocí pájení

Montáž pomocí lepidel je spolehlivá a jednoduchá. Využívá se ji u mikročlánků i článků velkých rozměrů. Lepidlo musí mít dobrou tepelnou vodivost a mechanickou odolnost a jeho vrstva by neměla přesahovat 10-20 μm . Větší vrstva zhoršuje tepelnou vodivost. Nevýhodou tohoto způsobu spojení je obtížná demontáž, omezení provozní teploty, která

by neměla přesáhnout 150-160°C a taktéž se musí počítat s tím, že proces lepení je zdoluhavý. [34]



Obr. 37. Spojení pomocí lepení

3.4 Praktické využití Peltierových článků

Peltierovy články našly uplatnění v mnoha odvětvích a jsou v dnešní době zajímavou alternativou chlazení. Umožňují velmi přesnou regulaci teploty a změnou směru proudu dochází k přenosu tepla opačným směrem.

Lze je použít jako:

- Chladiče pro mikroprocesory, laserové diody, generátory, elektronická zařízení, ...
- Zařízení pro noční vidění
- Generátory elektrické energie
- Elektronické součástky CCD (snímání obrazové informace)
- V lékařství jako chladiče přenosných boxů na biologické materiály
- Přenosné lednice a chladicí boxy pro potraviny, nápoje, vína
- Klimatizační zařízení
- V kosmonautice jako zdroj energie
- Automobilové lednice
- V turistice na malé vařiče (zatopí se např. dřevěnými třískami a lze dobít mobilní telefon)
- Infračervené detektory
- Kalorimetry

- Laboratorní zařízení jako environmentální analyzátoři, odvlhčovače, chladicí desky, krevní analyzátoři, ... [33],[35]

3.5 Výhody a nevýhody Peltierových článků

Mezi hlavní výhody patří:

- Velmi dobrá životnost (teoreticky neomezená)
- Absolutně tichý provoz, neobsahují žádné pohyblivé části
- Provoz je prakticky bezúdržbový
- Konstrukce je několikrát lehčí i menší, než jiné chladicí zařízení se srovnatelnými parametry
- Vytápění i chlazení se provádí jedním článkem
- Přesná a snadná regulace výkonu podmíněna správnou montáží
- Vysoká spolehlivost celého systému díky pevné konstrukci
- Plochý tvar, díky tomu je chlazení rovnoměrné.
- Chlazení velmi malé plochy s minimální dobou odezvy
- Dosažení nízkých teplot až -100°C
- Provoz v jakékoli poloze
- Nedochází k mechanickému chvění, vibracím
- Pouze elektrické přívody

K nevýhodám patří:

- Nízká účinnost v porovnání s např. kompresorovým chlazením
- Přehřívání
- U vysokých výkonů neekonomické
- Vysoká spotřeba proudu[35]

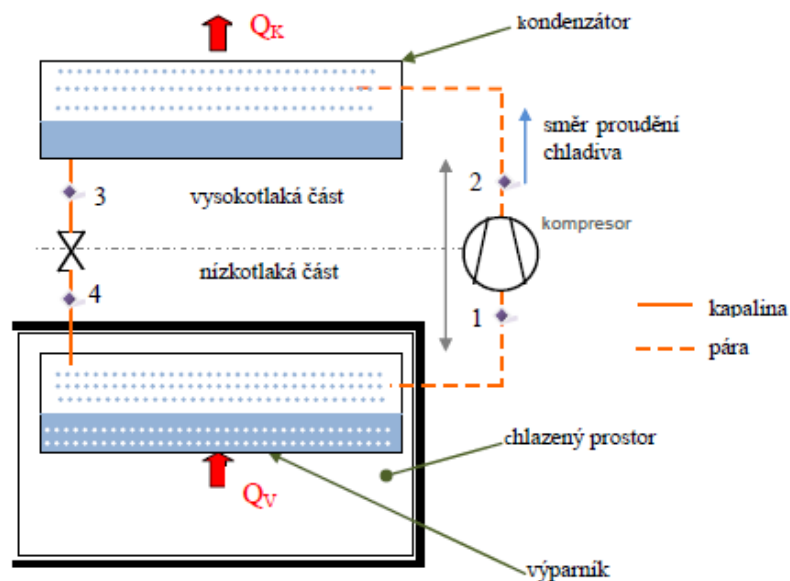
4 CHLAZENÍ

Chlazení jako takové vycházelo odnepaměti z potřeby uchovávat potraviny. Nejprve šlo pouze o sníh a led a, až mnohem později přidáním chemikálií se začalo s využitím v průmyslovém odvětví. Dusičnan draselný a dusičnan sodný za pomoci strojního chladicího zařízení, dali vzniknout tzv. umělému chladu. Tyto dusičnany při styku s vodou způsobí, že její teplota klesá. První patent si v roce 1834 podal fyzik angloamerického původu Jacob Perkins, jenž vytvořil zařízení, které pracovalo na principu etylenu a ručního pohonu později nahrazeného parním strojem. Strojní chlazení pracuje na základě výparného tepla kapalin za různých tlaků, kde jsou nejdůležitější děje kondenzace a vypařování. V dnešní době existuje nepřehledné množství principů a metod chlazení. Mezi nejznámější a nejrozšířenější chladicí zařízení patří kompresorové a absorpční.[36]

4.1 Kompresorové chlazení

Většina z nás se s tímto chlazením setkává každý den při otevření lednice nebo spuštění klimatizace v autě. V roce 1834 bylo sestrojeno první chladicí zařízení pracující s kompresí, které se ovšem příliš neosvědčilo díky použití éteru jako chladicí látky. Největší rozvoj kompresorového chlazení nastal po tom, co se stala elektřina běžně dostupnou. Principem je měnit tlak chladiva za různých teplot tak, aby docházelo ke změně jeho skupenství

Kompresorové chladicí zařízení je složeno ze čtyř hlavních komponentů a to kompresor, kondenzátor, výparník a škrťací ventil. Kompresor zajišťuje zvýšení tlaku plynného chladiva, stlačí sytou páru na přehřátou. V kondenzátoru tato stlačená přehřátá pára odevzdává do okolí skupenské teplo a mění se v kapalinu. Stlačená kapalina prochází dále regulačním (škrťacím) ventilem, kde dojde ke snížení tlaku chladiva a který spolu s kompresorem dělí okruh na dvě tlakové části. Ve výparníku dochází k přeměně skupenství z kapalného na plynné a pára proudí zpět do kompresoru, kde se cyklus znovu opakuje.[37]



Obr. 38. Kompresorové chlazení[38]

4.2 Absorpční chlazení

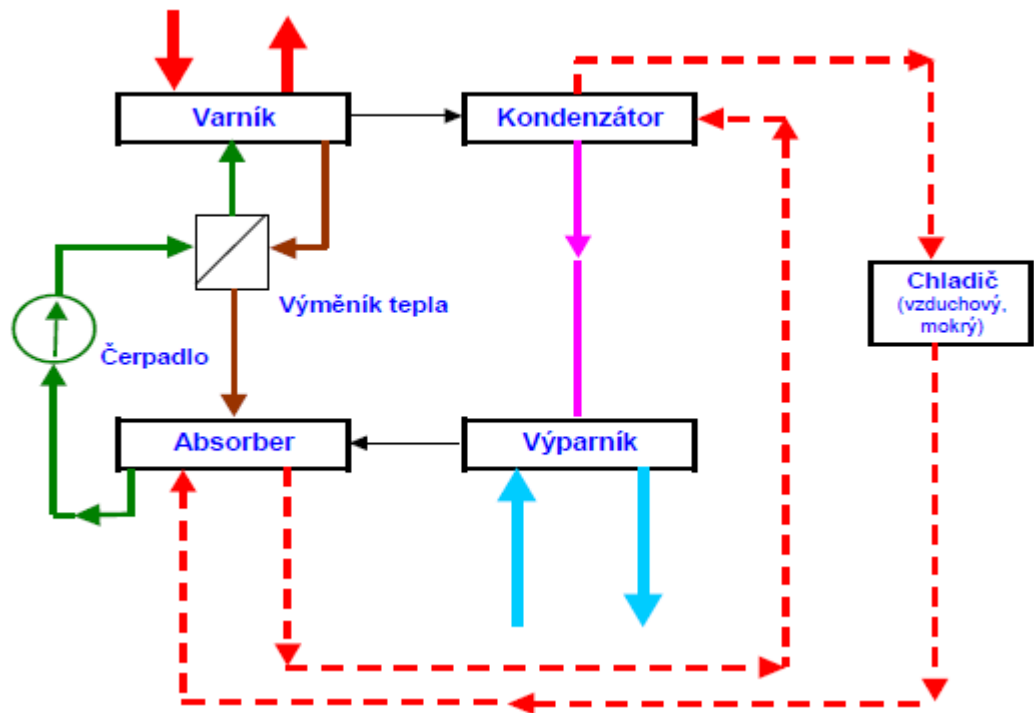
Rozdíl mezi absorpčním a kompresorovým chlazením je v dopravě chladiva z výparníku do kondenzátoru. U absorpčního chlazení se využívá tzv. tepelný kompresor což je teplo ve formě horké vody, nízkotlaké páry nebo horkého plynu. V roce 1860 Ferdinand Carré patentoval první absorpční chladničku pracující na principu čpavek voda. Absorpční chlazení bylo využíváno nejvíce v době, kdy elektřina nebyla běžně dostupnou a k jejímu znovuzrození nastalo během druhé světové války. [38]

Absorpční chlazení je založeno na principu vzájemné absorpce dvou látek (chladivo a absorbent) a na jejich fyzikálních vlastnostech. Vlivem odebrání tepla chlazené látky ve výparníku je odpařené chladivo pohlcováno roztokem absorbentu. Tzv. bohatý roztok což je absorbent s rozpuštěnými parami chladiva, je postupně přečerpáván do desorbéru (výparníku), kde jsou z něj pomocí přívodu tepla vypuzeny páry chladiva. Chudý roztok se přes výměník vrací zpět do absorbéru. Teplo horkého chudého roztoku se ve výměníku využívá k předehřátí roztoku bohatého. Do kondenzátoru přecházejí páry chladiva, kterým je pomocí chladicí kondenzační látky odebíráno teplo a dochází k jejich kondenzaci. Toto zkondenzované kapalně chladivo se vrací zpět do výparníku a cyklus se uzavírá. [39]

V praxi se nejvíce využívají kombinace látek:

- Roztok bromid lithný/voda vhodné pro chlazení nad 0°C , bromid lithný je absorbent a chladivo je voda

- Roztok čpavek/voda vhodné pro teploty pod 0°C , čpavek je chladivo a voda je absorbent [39]



Obr. 39. Absorpční chlazení

Absorpční chladiče jsou velmi tiché, konstrukčně spolehlivé a v podstatě bezúdržbové. Jejich nevýhodou je větší váha a rozměry zařízení. [40]

5 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Peltierovy články vzhledem ke svým zajímavým vlastnostem, jako jsou nulové vibrace při činnosti nebo velmi jednoduchá regulace přenášené tepelné energie od nuly až po jmenovitou hodnotu pomocí regulace proudu, se jeví jako ideální pro konstrukci laboratorních pomůcek.

Jednou z možných aplikací je vytvoření základny pro měření vzorků při snížené teplotě. V geografických podmínkách naší země může venkovní teplota běžně dosáhnout až -20°C . Při tak nízkých teplotách se mohou výrazně měnit vlastnosti konstrukčních materiálů, a proto je vhodné testovat tyto materiály i při snížených teplotách.

Aby mohlo dojít k ochlazení na jedné straně Peltierova článku, musí být jeho zahřívající se strana udržována pokud možno na konstantní teplotě. K tomuto účelu je nezbytné zkonstruovat vhodný tepelný výměník. Konstrukčním uspořádáním takového výměníku se zabývá praktická část předkládané diplomové práce.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Praktická část této diplomové práce se zabývá návrhem tepelného výměníku pomocí Peltierových článků.

Cílem bylo:

- Nalézt vhodný Peltierův článek odpovídajících parametrů
- Navrhnout konstrukci sestavy výměníku obsahující 6 Peltierových článků, tak aby splňovala zároveň požadavky jednoduché výroby
- Navrhnout konstrukční řešení dutiny výměníku odpovídající rovnoměrnému toku tekutiny v celém objemu dutiny
- Kontrola činnosti tepelného výměníku pomocí programů počítačové simulace
- Zhodnocení navrženého řešení

K návrhu konstrukčního řešení výměníku byl využit software SolidWorks 2012, který splňoval jak požadavky na návrh konstrukce, tak na další kontrolní výpočty. Přídavné moduly tohoto programu jsou schopny znázornit proudění nepřeberného množství fluid a zároveň i simulace sdílení tepla či výpočty tlaků v tekutinách.

Výchozí byla v tomto případě základní geometrie výměníku vyplývající z parametrů vybraného Peltierova článku. Cílem tedy bylo ovlivnit, pomocí konstrukčních změn vstupu a výstupu nebo tvaru dutiny, proudění tekutiny tak aby docházelo k jejímu co nejúčinnějšímu proudění po celé ploše povrchu tepelného výměníku.

Využitím přídavného modulu programu SolidWorks nazvaného Flow Simulation byly jednotlivé návrhy odzkoušely a mohlo dojít k jejich vzájemnému porovnání a kontrole správné činnosti výměníku.

7 NÁVRH TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU

Základní geometrie tepelného výměníku byla neměnná z důvodu daných rozměrů vybraného Peltierova článku a jejich celkového počtu. Zároveň musela celá sestava výměníku lícovat, a proto při konstrukčním návrhu docházelo pouze ke změnám vnitřní dutiny, ve které proudila tekutina.

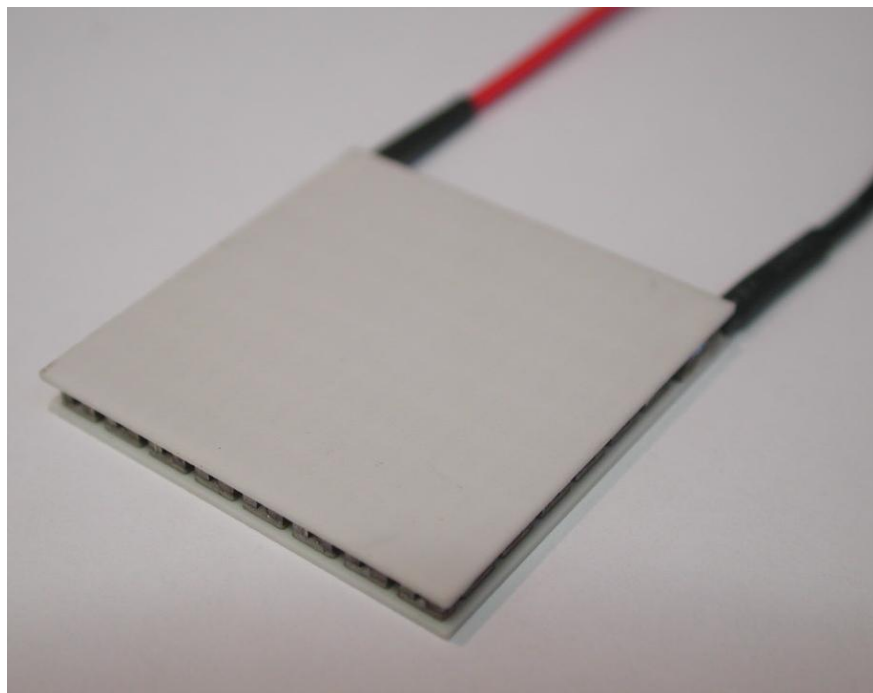
Navrhnutý tepelný výměník má jeden vstup a jeden výstup pro proudící tekutinu a dutinu, ve které dochází k proudění. Cílem této práce bylo navrhnout takový tvar vstupu, výstupu a dutiny, aby docházelo po celé ploše pokud možno k co nejrovnoměrnějšímu proudění tekutiny a nevznikaly žádná slepá místa či vodní víry.

Kontrolním programem pro navrhnutá řešení byl SolidWorks a jeho přídatný modul Flow Simulation.

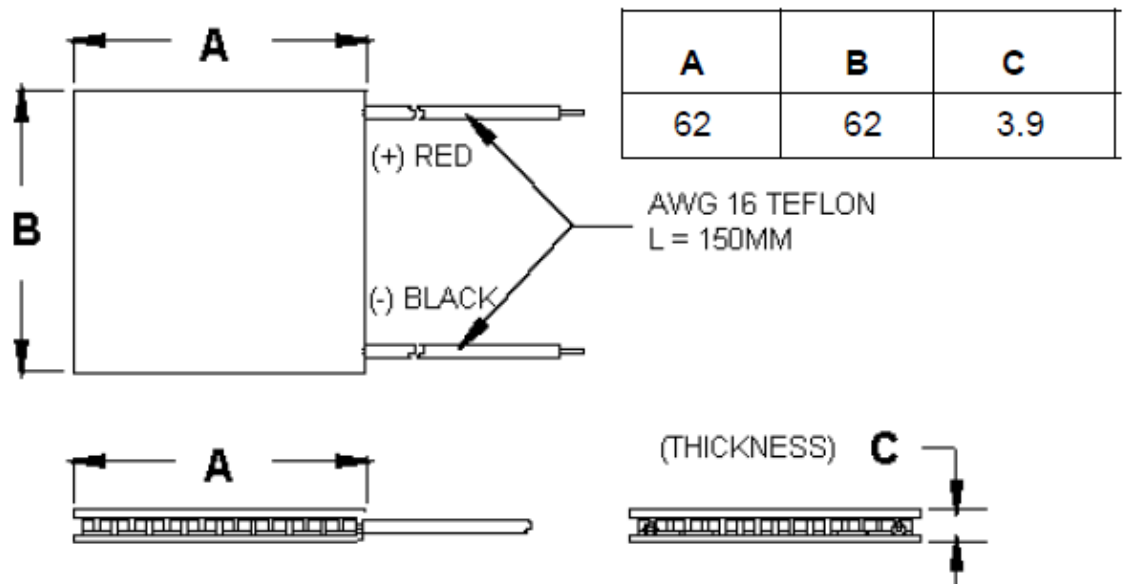
Pro co nejjednodušší provoz výměníku byla jako proudící tekutina vybrána voda.

7.1 Peltierův článek

Pro danou aplikaci byl vybrán Peltierův článek TEC1-12730 s technickými parametry viz Tabulka 2. Jeho maximální provozní teplota je 138°C , průměrná životnost 200 tis hodin a míra selhání 0,2%.



Obr. 40. Peltierův článek TEC1-12730



Obr. 41. Geometrie Peltierova článku

Tabulka 2. Technické parametry Peltierova článku TEC1-12730

Hot Side Temperature (° C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	257	282
Delta Tmax (° C)	68	79
I _{max} (Amps)	30.5	30.5
V _{max} (Volts)	15.6	17.8
Module Resistance (Ohms)	0.27	0.31

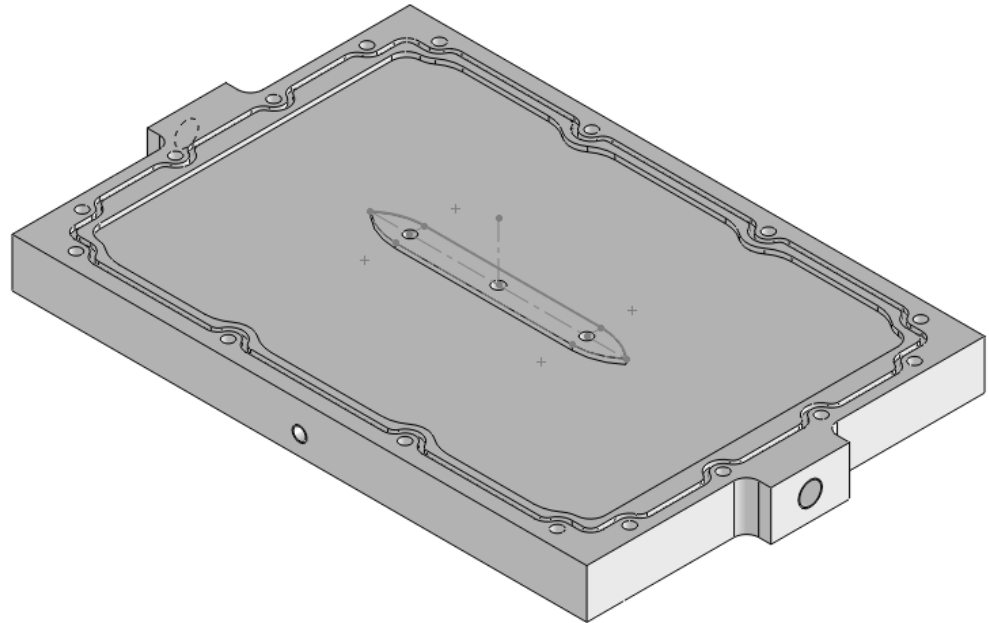
Keramický materiál: oxid hlinitý Al_2O_3

Pájená konstrukce: 138°C, Bi-Sn [42]

7.2 Základní geometrie výměníku

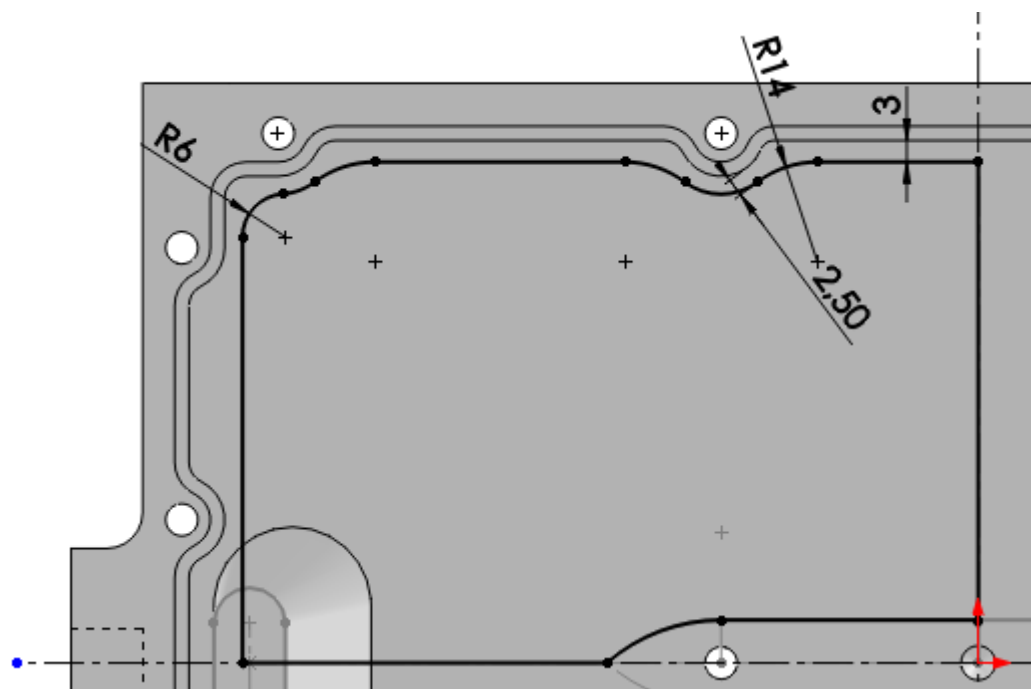
Pro daný tepelný výměník byl použit materiál PMMA, který vykazuje dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, je odolný proti vodě i zředěným kyselinám a alkáliím. Je dobře mechanicky obrobitelný a jeho tepelná odolnost bez zatížení je okolo 80°C. Jeho výhodou je snadné spojování lepením a zdravotní nezávadnost. [41]

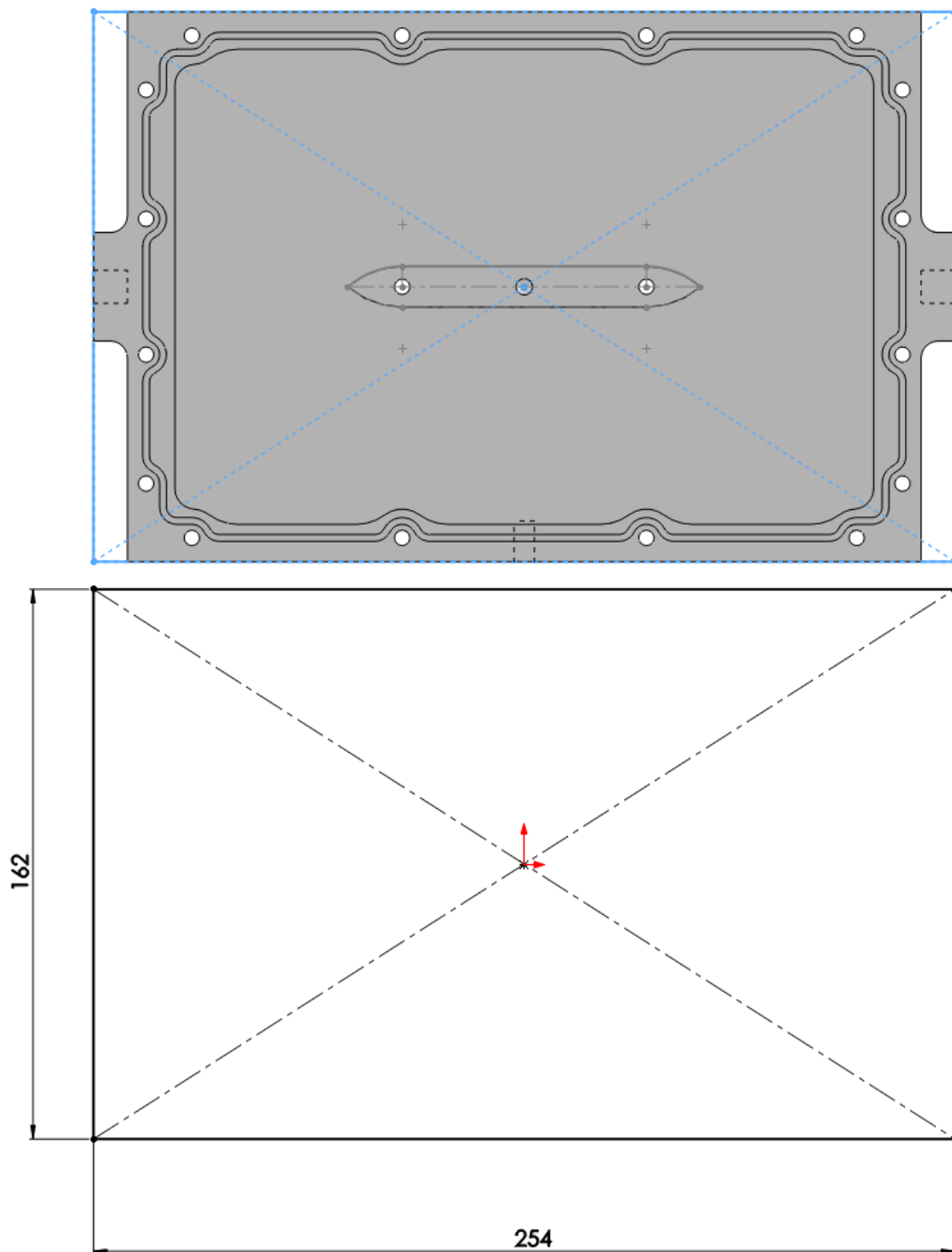
Výměník má na levé straně vstup pro tekutinu a na pravé straně výstup. Po celém obvodu je zahloubení pro šrouby M4 s válcovou hlavou a drážka pro těsnění. Uprostřed výměníku je středový ostrůvek.



Obr. 42. Izometrický pohled na výměník

Tvar dutiny je symetrický podle středové osy výměníku x a y.





Obr. 43. Základní geometrie výměníku

Přesný tvar a rozměry výměníku viz příloha 1.

7.3 Nastavení programu Flow Simulation

Pro možnost srovnání navržených řešení je nutné zachovat u všech variant stejné podmínky simulace.

Wizard – Project Configuration:

Zde dojde k základnímu nastavení vlastností simulace, ostatní parametry budou ponechány ve výchozích hodnotách.

Configuration

Create new

Use current

Configuration name:

Current configuration:

Obr. 44. Tvorba a pojmenování nové simulace

Nastavení jednotek SI a změna teploty z K na °C.

Unit system:

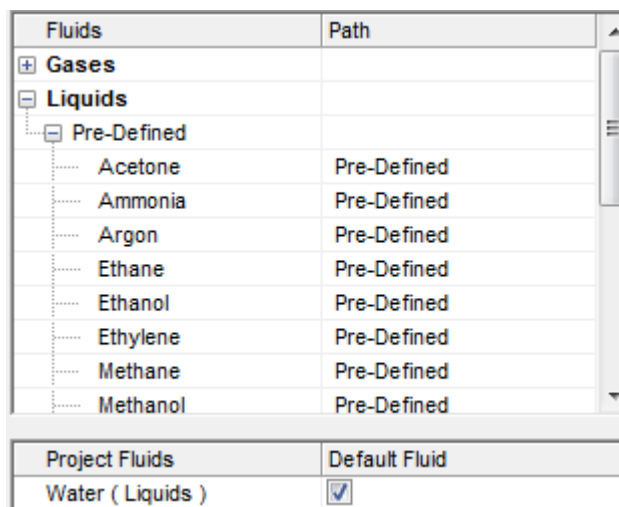
System	Path	Comment
CGS (cm-g-s)	Pre-Defined	CGS (cm-g-s)
FPS (ft-lb-s)	Pre-Defined	FPS (ft-lb-s)
IPS (in-lb-s)	Pre-Defined	IPS (in-lb-s)
NMM (mm-g-s)	Pre-Defined	NMM (mm-g-s)
SI (m-kg-s)	Pre-Defined	SI (m-kg-s)
USA	Pre-Defined	USA

Create new Name:

Parameter	Unit	Decimals in results display	1 SI unit equals to
Main			
Pressure & stress	Pa	.12	1
Velocity	m/s	.123	1
Mass	kg	.123	1
Length	m	.123	1
Temperature	°C	.12	-273.15
Physical time	s	.123	1
HVAC			
Geometrical Characteristic			

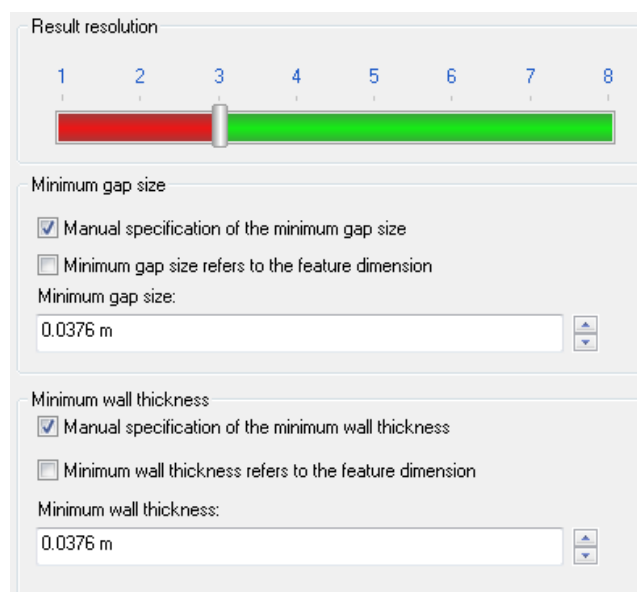
Obr. 45. Nastavení jednotek

Výběr fluida vhodného k simulaci – Liquids water.



Obr. 46. Výběr tekutiny

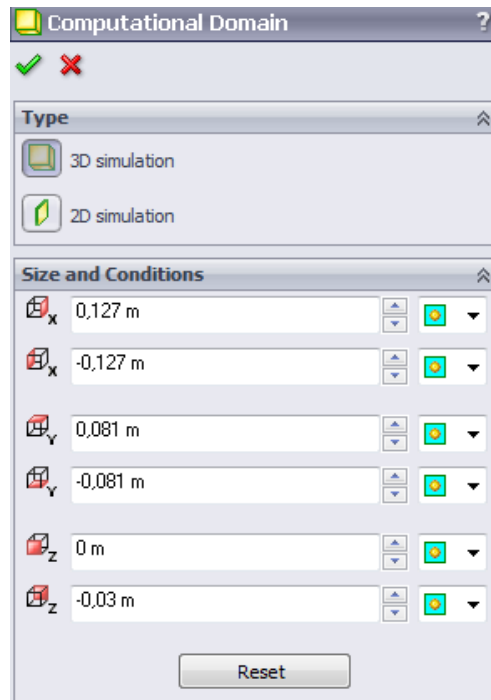
Nastavení přesnosti výpočtu, minimální velikosti mezery a minimální tloušťky stěny. Stupeň přesnosti se nastavuje s ohledem na vybavení výpočetní techniky a měl by být pokud možno co nejvyšší. V tomto případě nastavení přesnosti vyšší jak 3 nebylo možno použít s ohledem na nedostatečný výkon dostupné výpočetní techniky.



Obr. 47. Nastavení přesnosti výpočtu

Computational Domain

Zde dochází k nastavení výpočetní oblasti, ve které bude docházet k simulaci.

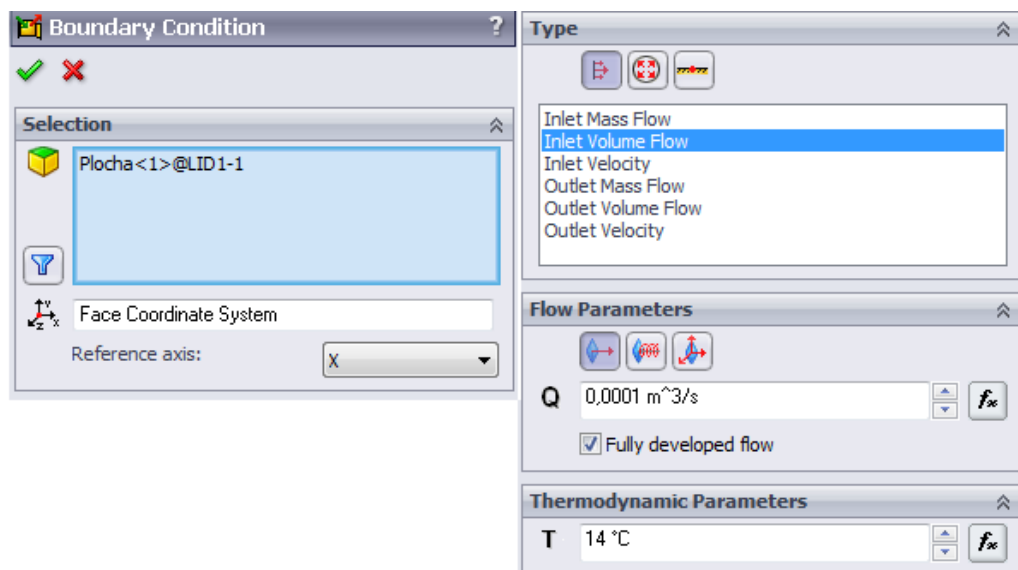


Obr. 48. Nastavení výpočetní oblasti

Boundary Conditions

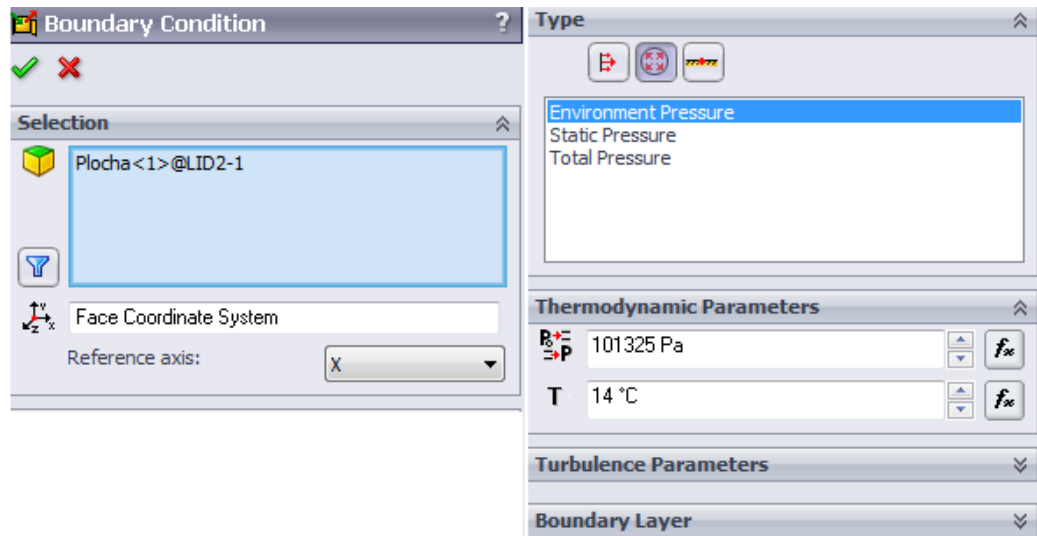
Nastavení okrajových podmínek. Zde je důležité správné nastavení podmínek vtoku a výtoku, nesmí dojít k jejich záměně.

U vtoku musí být označen otvor na levé straně výměníku jako Inlet volume flow. Z důvodu co nejjednodušších provozních podmínek se nastaví průtok vody na 1 - 2 dcl/s (přepočten na 0,0001 - 0,0002 m³/s) a v záložce termodynamické vlastnosti se nastaví teplota vody na 14°C. Tyto hodnoty odpovídají studené vodě dodávané z běžných rozvodů vody.



Obr. 49. Nastavení okrajových podmínek vtoku

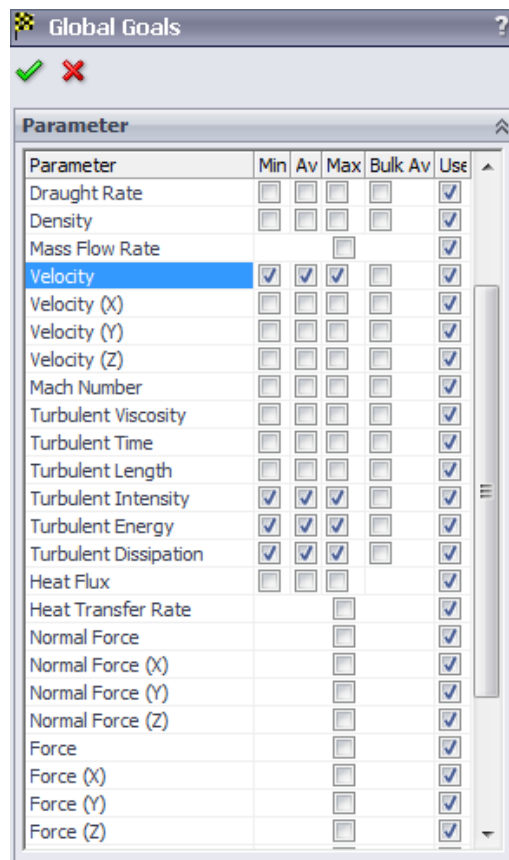
Naopak u výtoku se označí otvor na pravé straně výměníku jako Environment pressure.



Obr. 50. Nastavení okrajových podmínek výtoku

Global goals

Zde dochází k nastavení cílů výpočtu. Jaké parametry a v jakých osách se budou počítat. V tomto příkladu viz obr. 51. jde o min., max. a střední rychlost a turbulence.



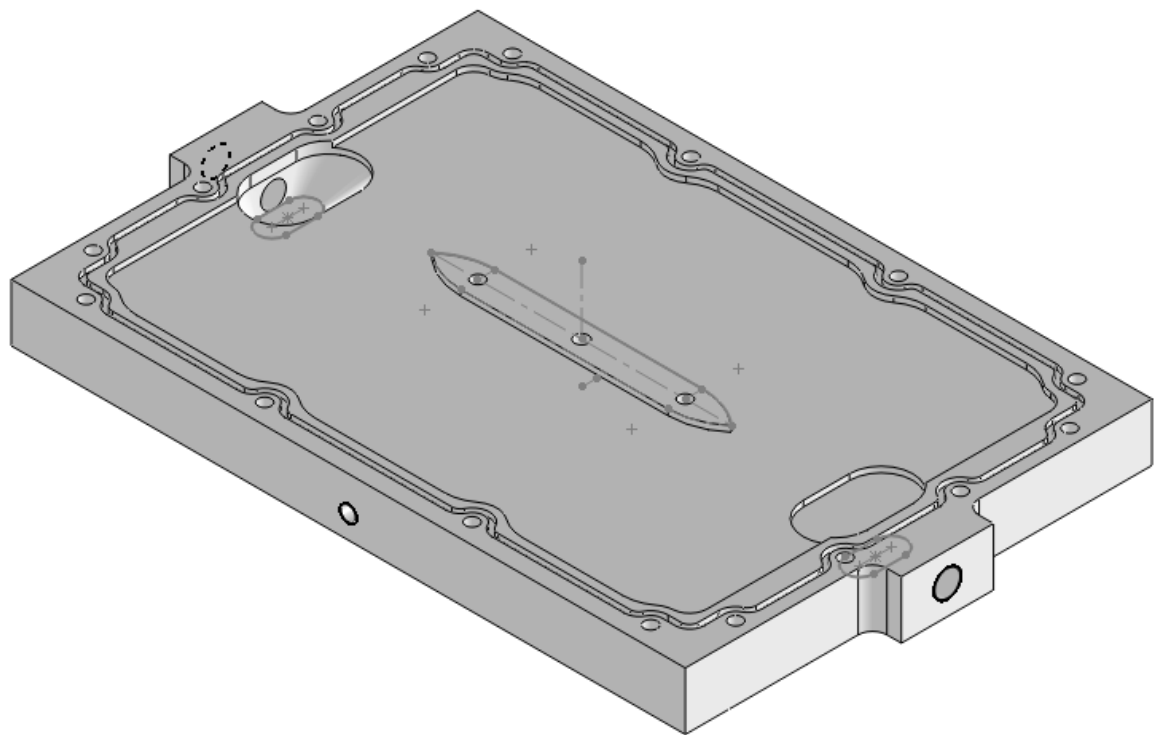
Obr. 51. Nastavení cílů výpočtu

8 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU Č. 1

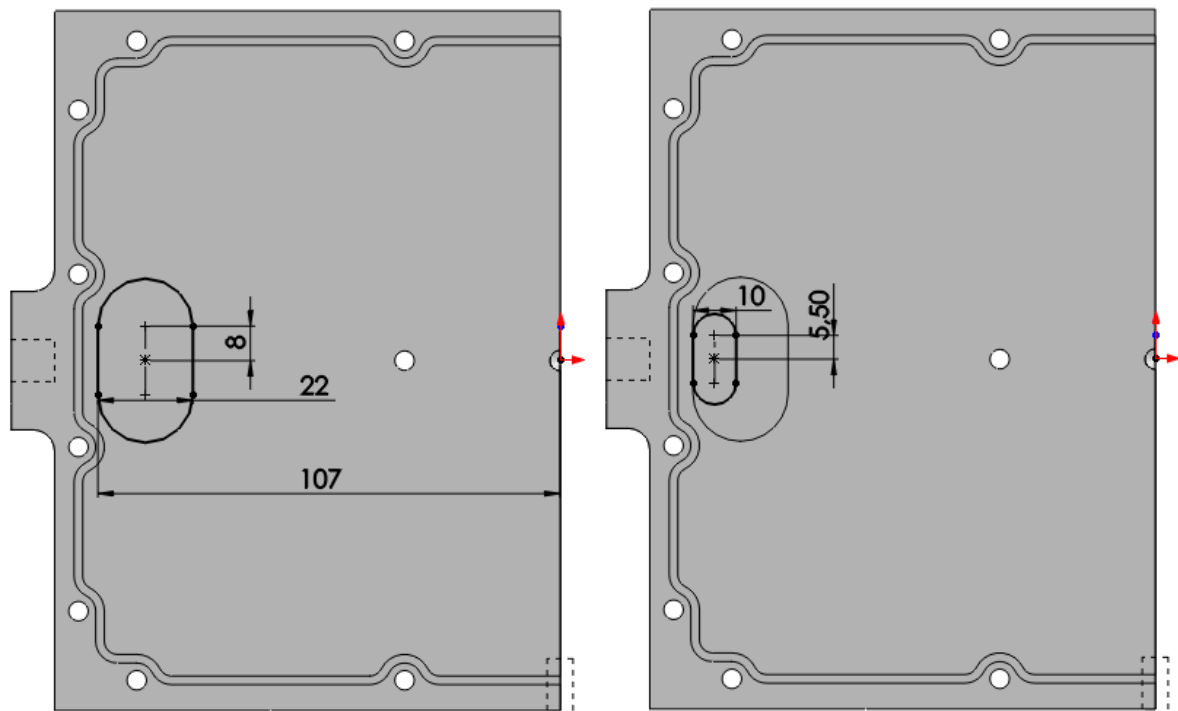
U daného výměníku je jeden vstup na levé straně a jeden výstup na pravé straně.

Cílem je navrhnout takový tvar vyústění, aby došlo k co nejrovnoměrnějšímu výtoku tekutiny do celého objemu dutiny.

První návrh vyústění vtoku do dutiny je symetrický podle středové osy výměníku y . Tvar vyústění vtoku je tedy stejný jako tvar výtoku.

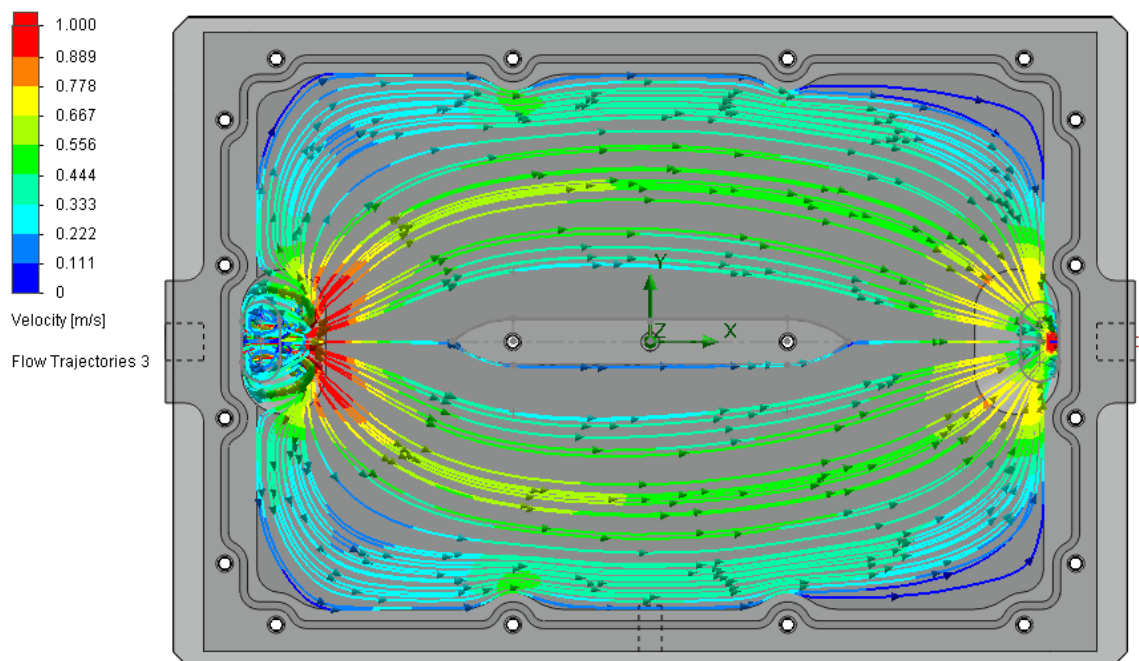


Obr. 52. Návrh č. 1 symetrický vtok a výtok



Obr. 53. Geometrie návrhu č. 1

8.1 Návrh č. 1 – vložené prvky

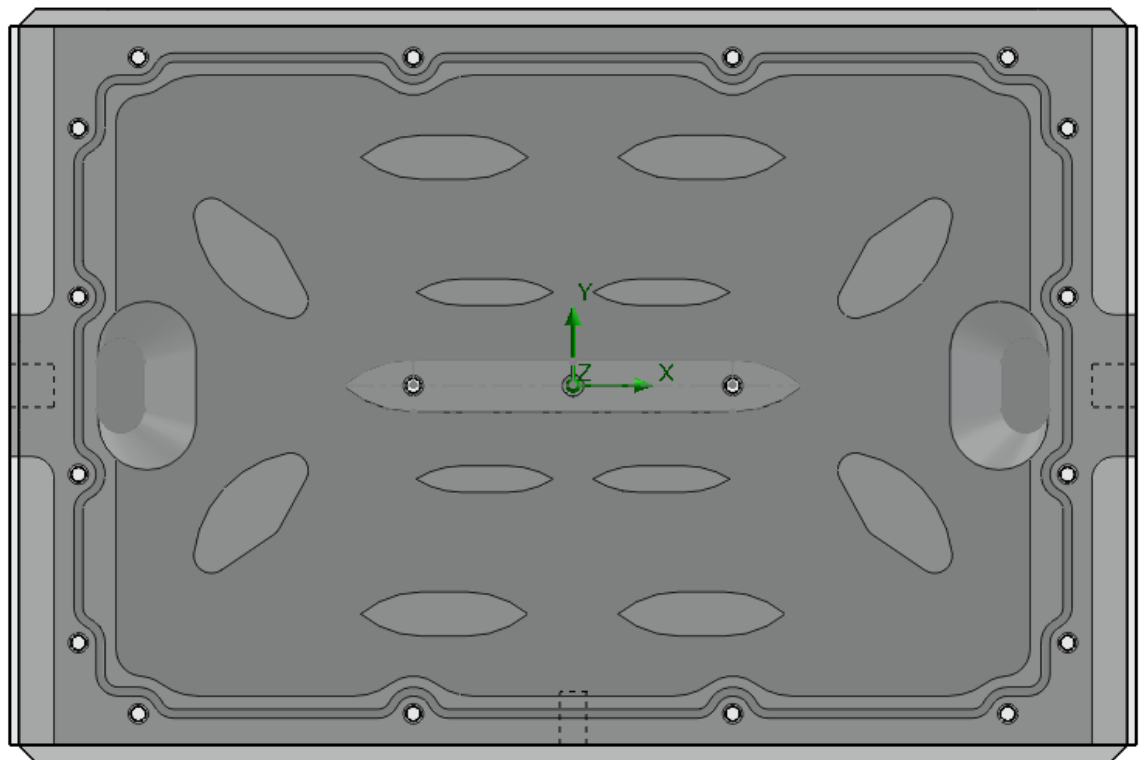


Obr. 54. Simulace návrhu č. 1

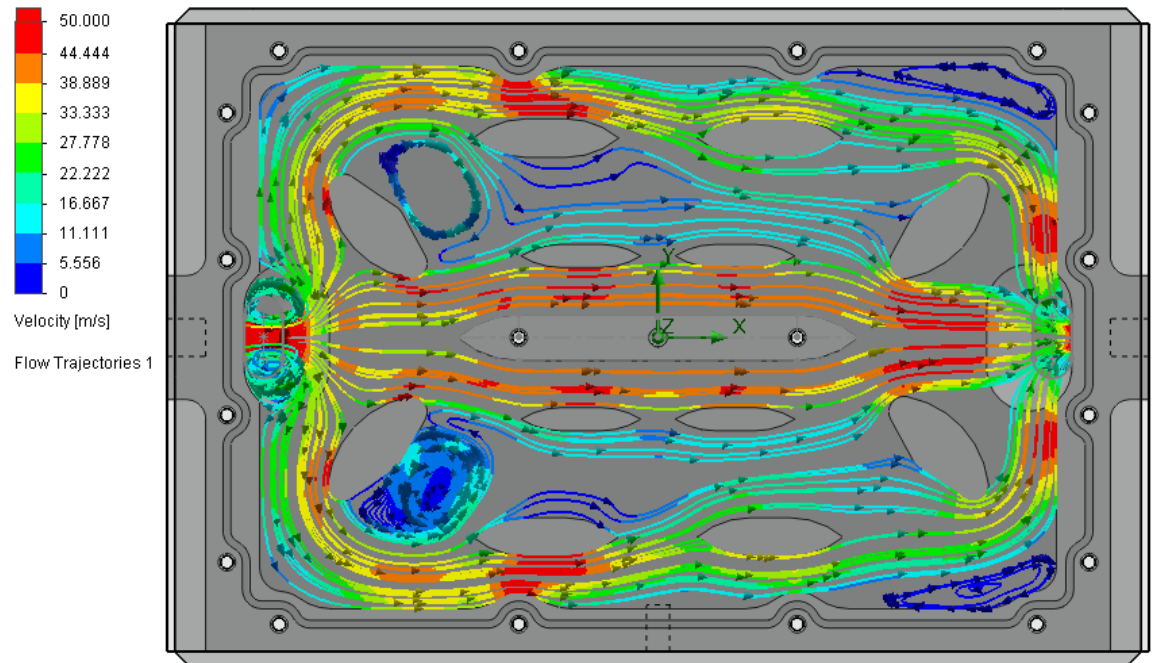
Z vypočtených trajektorií je patrné, že u tohoto tvaru nedochází k dostatečnému ochlazení rohů a středového ostrůvku. V oblasti vtoku navíc dochází ke vzniku vodních vírů.

Vložením přídatných prvků do dutiny dojde k nasměrování přiváděné tekutiny. Pomocí trajektorií rychlosti se odzkouší jejich vliv na tok tekutiny a tím správné chlazení. Vložené prvky jsou souměrné podle středové osy výměníku y .

8.1.1 VARIANTA 1



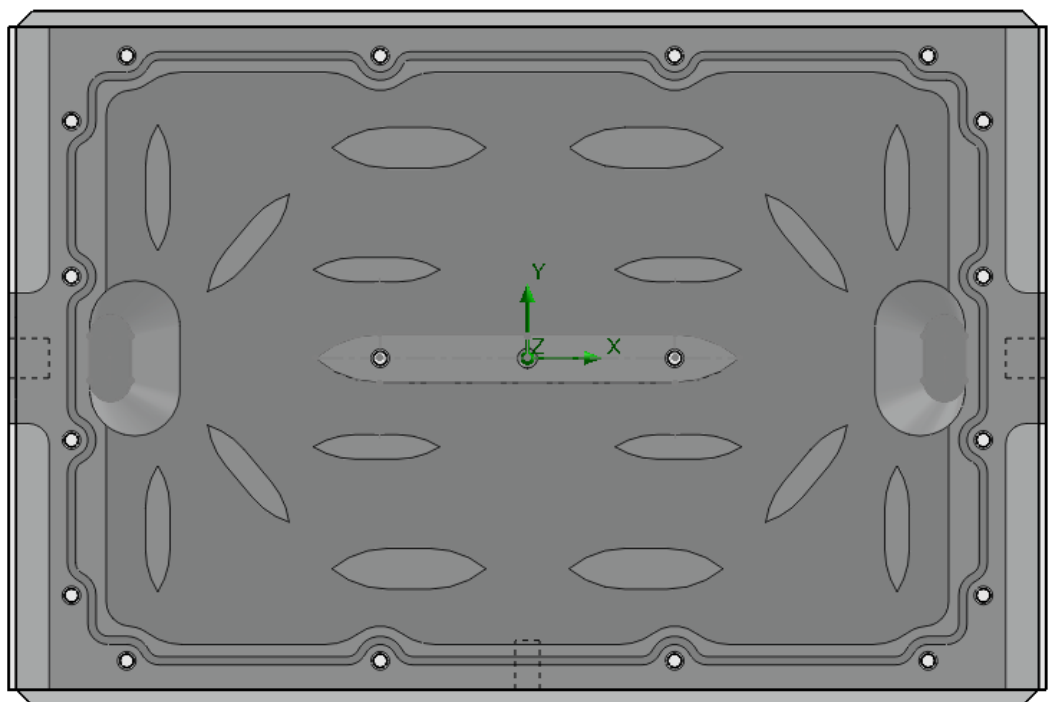
Obr. 55. Varianta 1



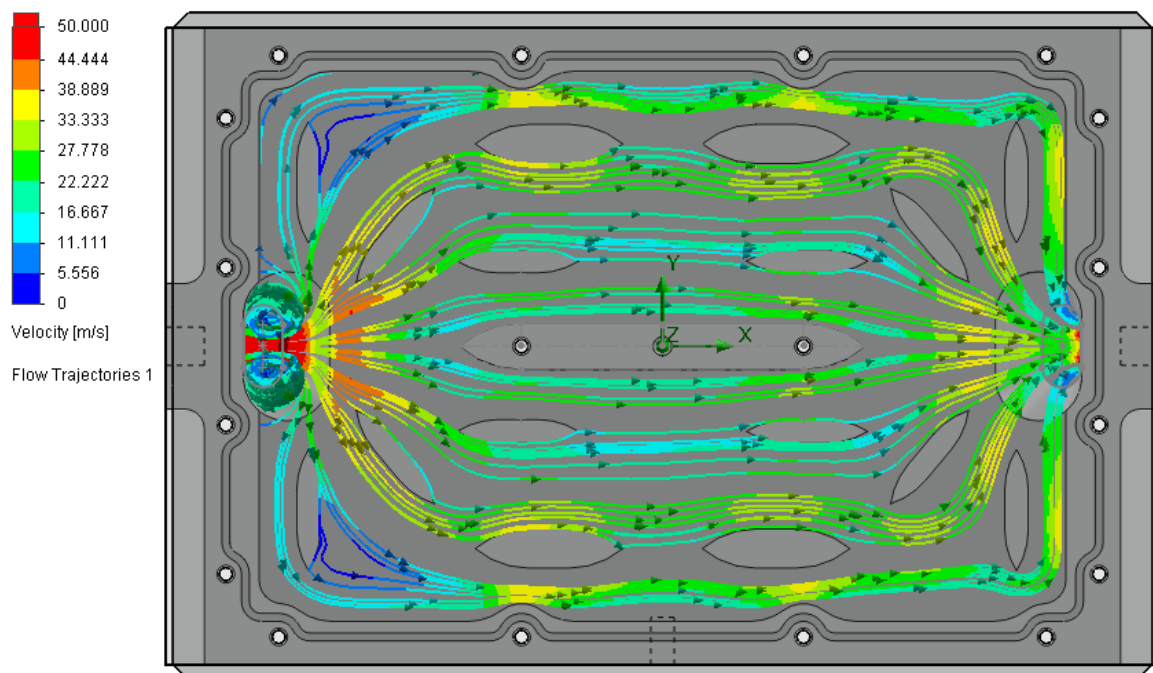
Obr. 56. Simulace varianty 1

U této varianty se výrazně zlepšilo chlazení v oblasti levých rohů a středového ostrůvku. Za prvním vloženým tvarem ovšem vznikají víry, které dále negativně ovlivňují tok ve střední části výměníku. Pravé rohy nejsou chlazené téměř vůbec.

8.1.2 VARIANTA 2



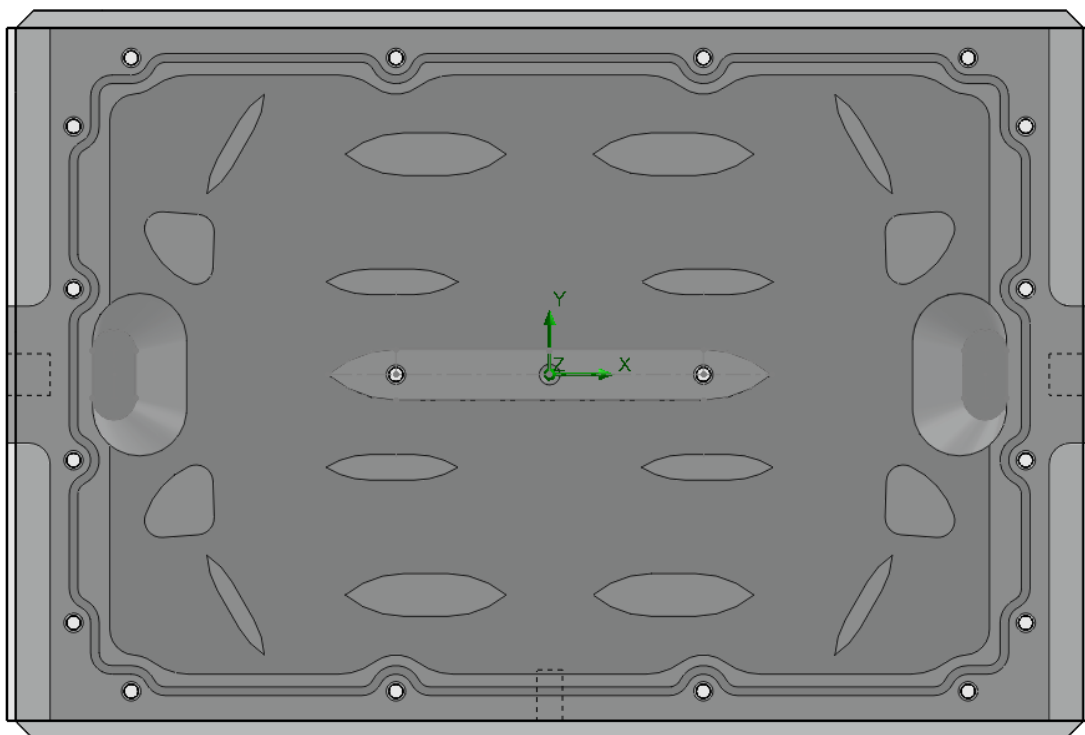
Obr. 57. Varianta 2



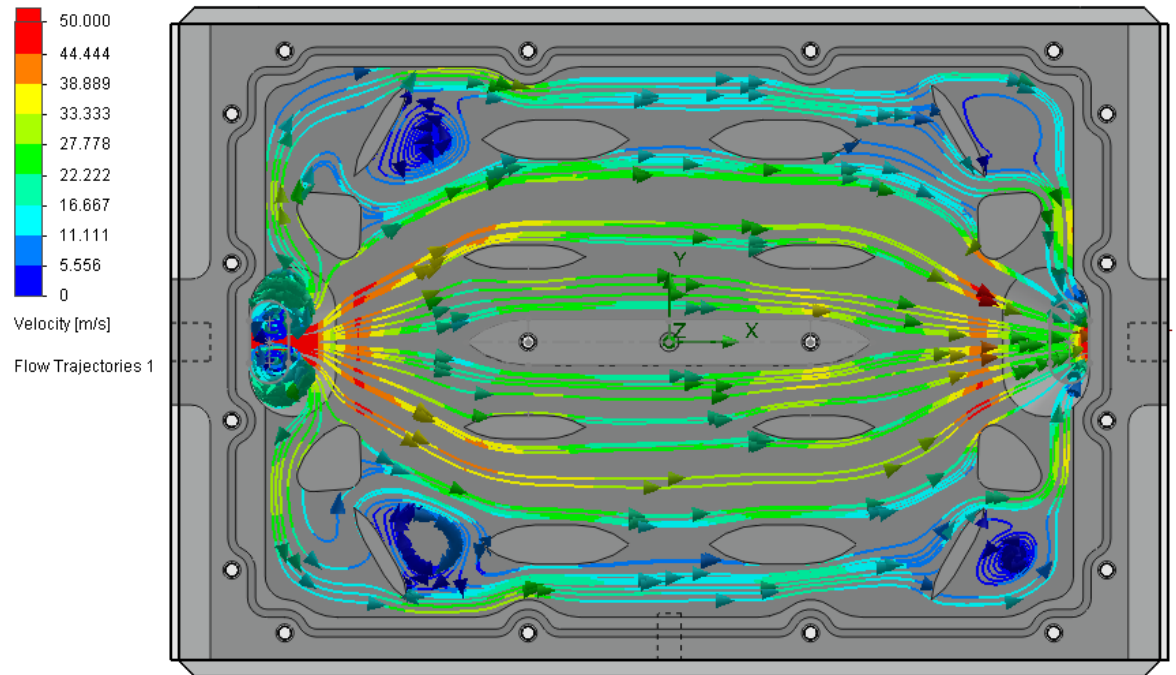
Obr. 58. Simulace varianty 2

Zde dochází k rovnoměrnějšímu proudění po povrchu střední části a k ochlazování pravých rohů. Levé rohy jsou však ochlazeny nedostatečně a dochází zde ke vzniku slepých míst, kde tekutina neproudí vůbec.

8.1.3 VARIANTA 3



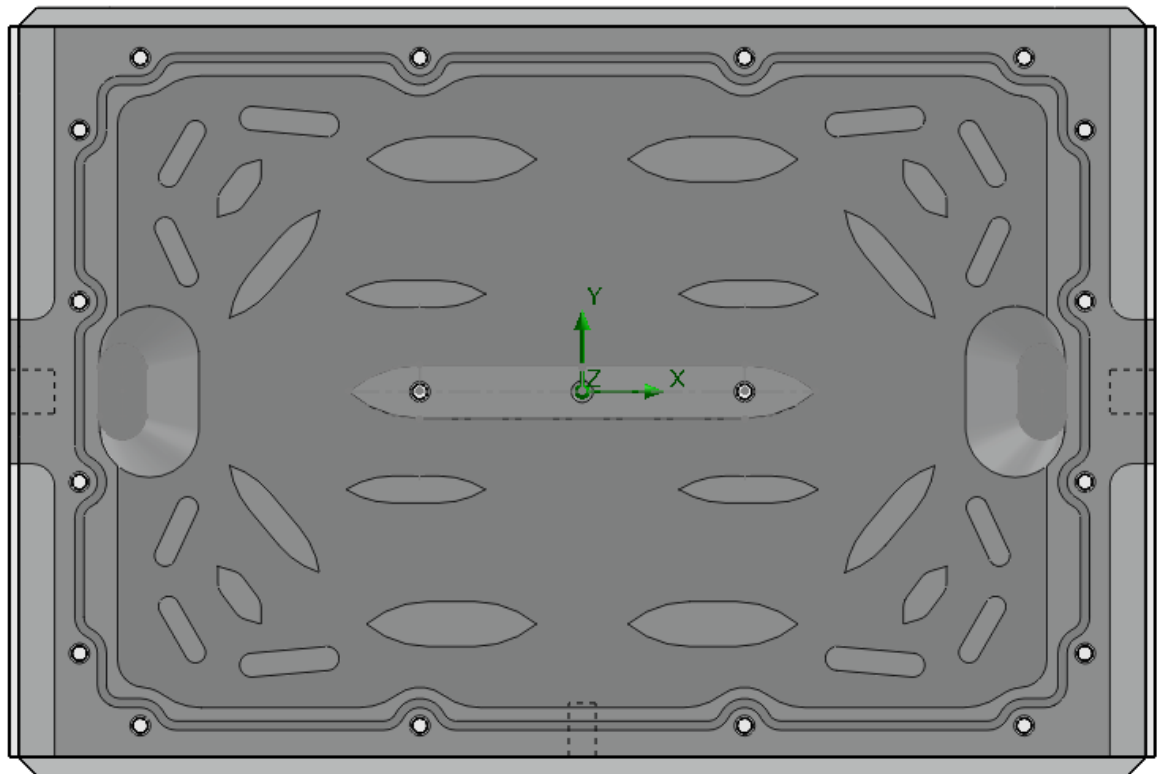
Obr. 59. Varianta 3



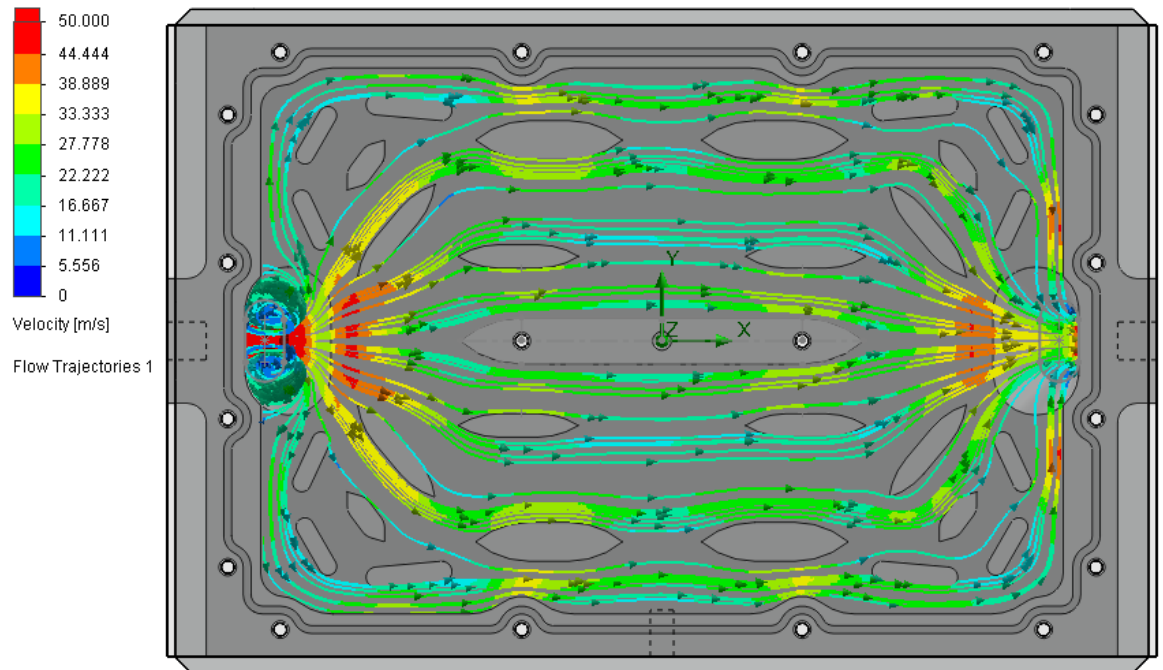
Obr. 60. Simulace varianty 3

U varianty číslo 3 vznikají velké víry v levé části výměníku a rohy nejsou dostatečně ochlazeny.

8.1.4 VARIANTA 4



Obr. 61. Varianta 4



Obr. 62. Simulace varianty 4

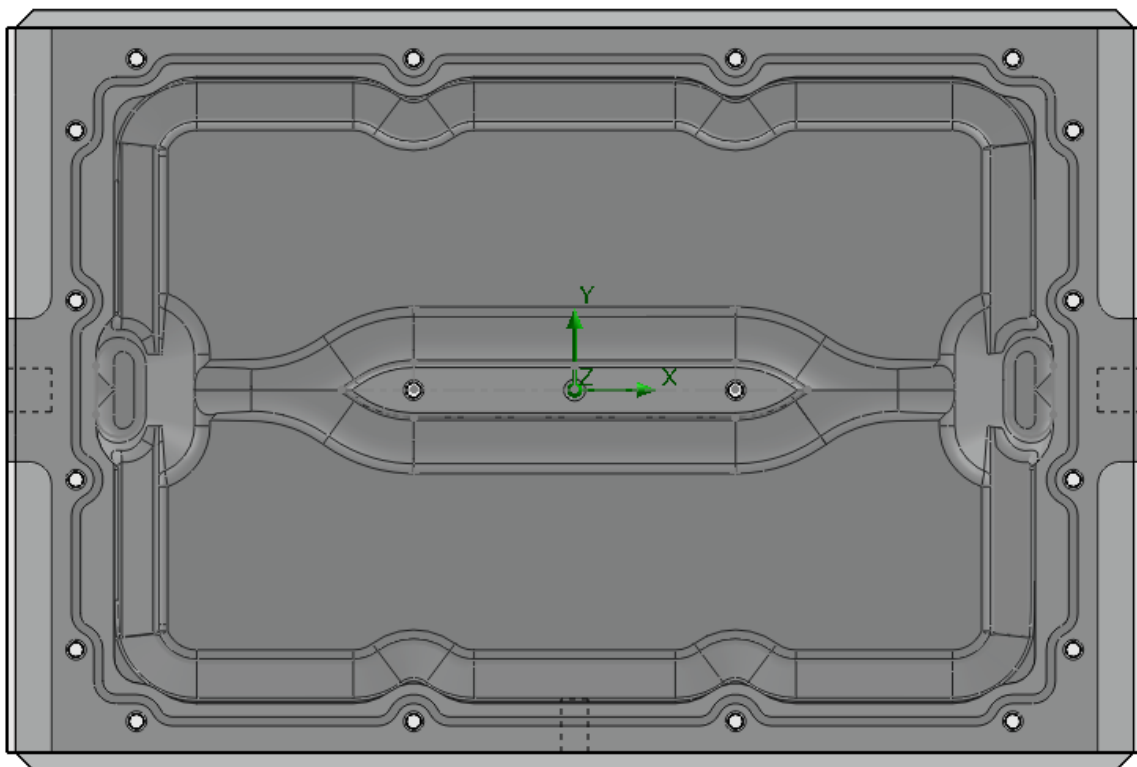
Varianta číslo 4 splňuje požadavky na rovnoměrný tok po ploše výměníku, ale dochází zde ke vzniku míst, kam se tekutina téměř nedostane. V rozích výměníku mezi vloženými prvky se tekutina téměř nevyskytuje, tudíž zde nedochází k chlazení.

Z variant 1 až 4 je jasné, že problém rovnoměrného toku se pomocí vložených prvků vyřešit nedá. Nejen že dochází u všech variant k velkým vírům v oblasti vtoku, ale navíc dochází ke vzniku slepých míst nebo naopak vírů v oblasti plochy dutiny. Vložené prvky svou plochou navíc snižují celkovou plochu chlazení.

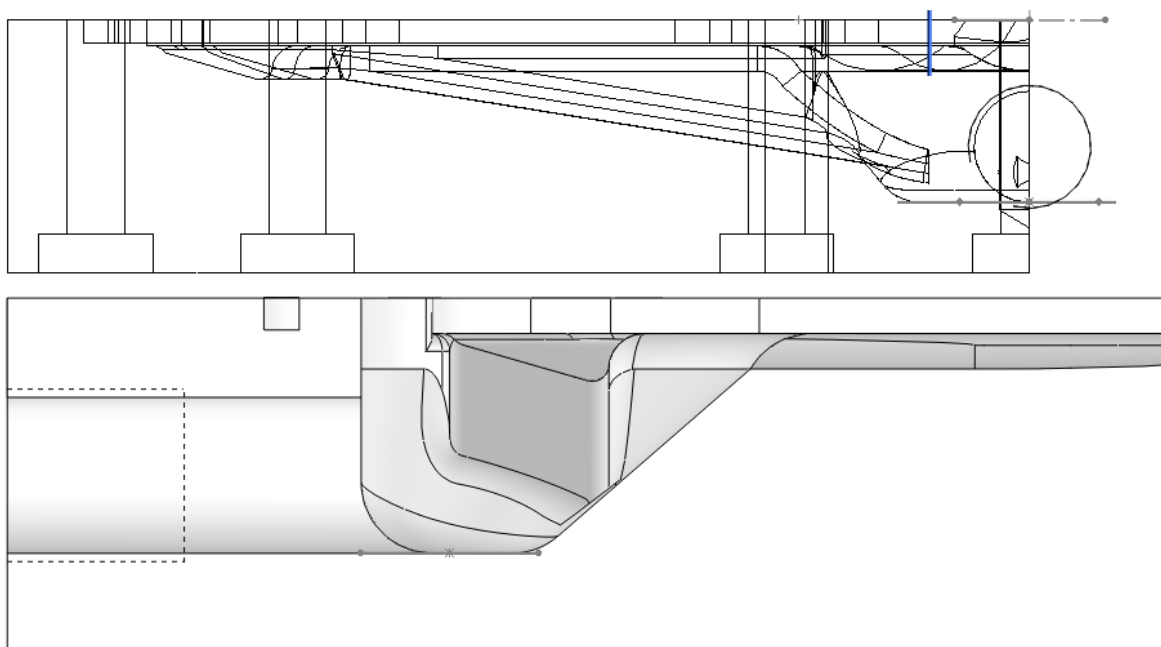
8.2 Návrh č. 2 – pomocné kanálky

Další možností jak ovlivnit rovnoměrnost toku v dutině je vytvořit tekutině překážky, ale pomocí kanálků a drážek ji navádět. Kanálky jsou zkoseny v místech vstupu a výstupu pro lepší přívod a odvod tekutiny. Středový ostrůvek se vyřeší podélnou drážkou kopírující jeho tvar. Přesná geometrie drážek a kanálků je z důvodu omezené kapacity diplomové práce přiložena na DVD.

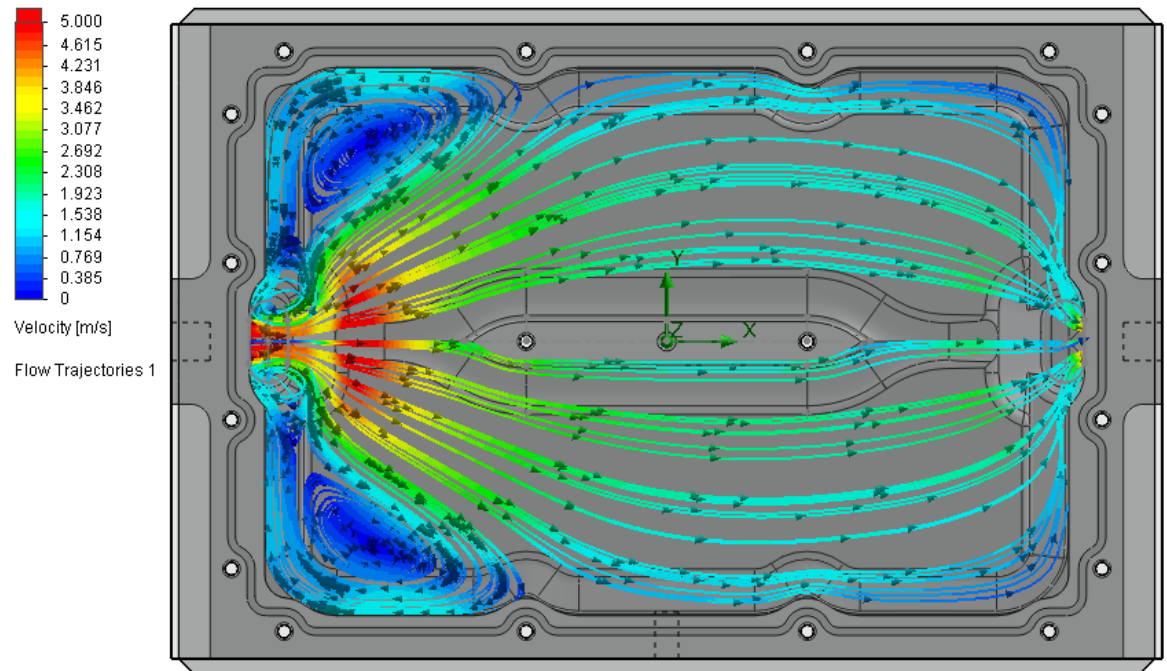
8.2.1 VARIANTA 5



Obr. 63. Varianta 5



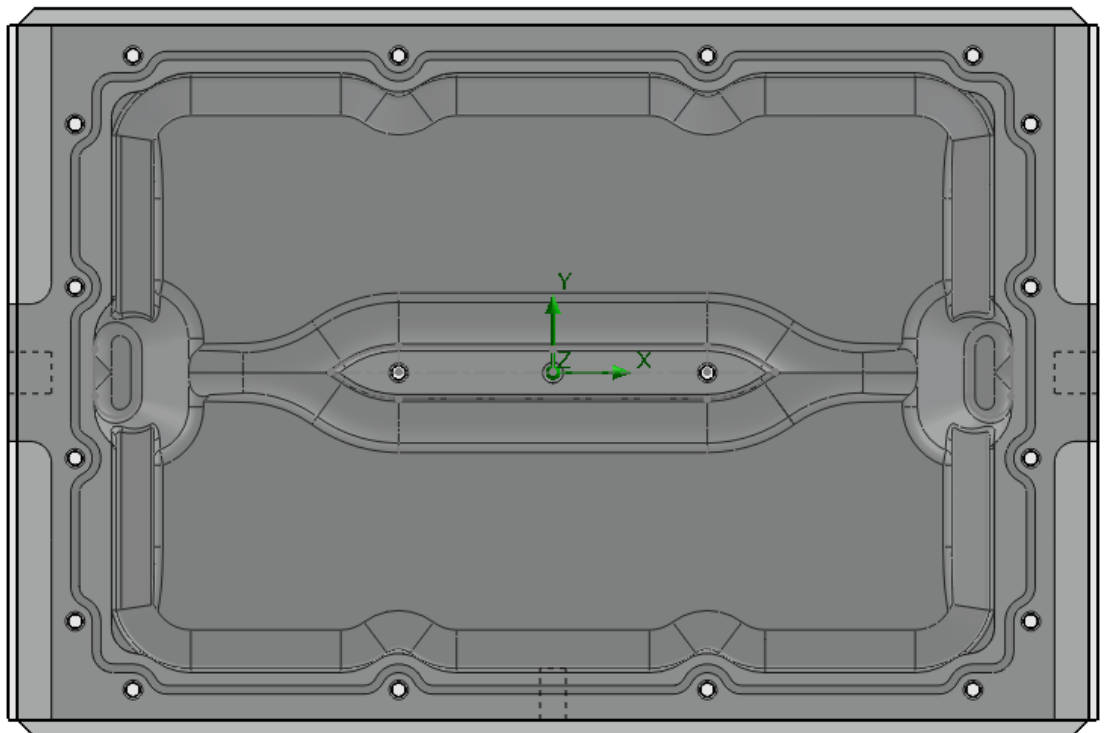
Obr. 64. Geometrie varianty 5



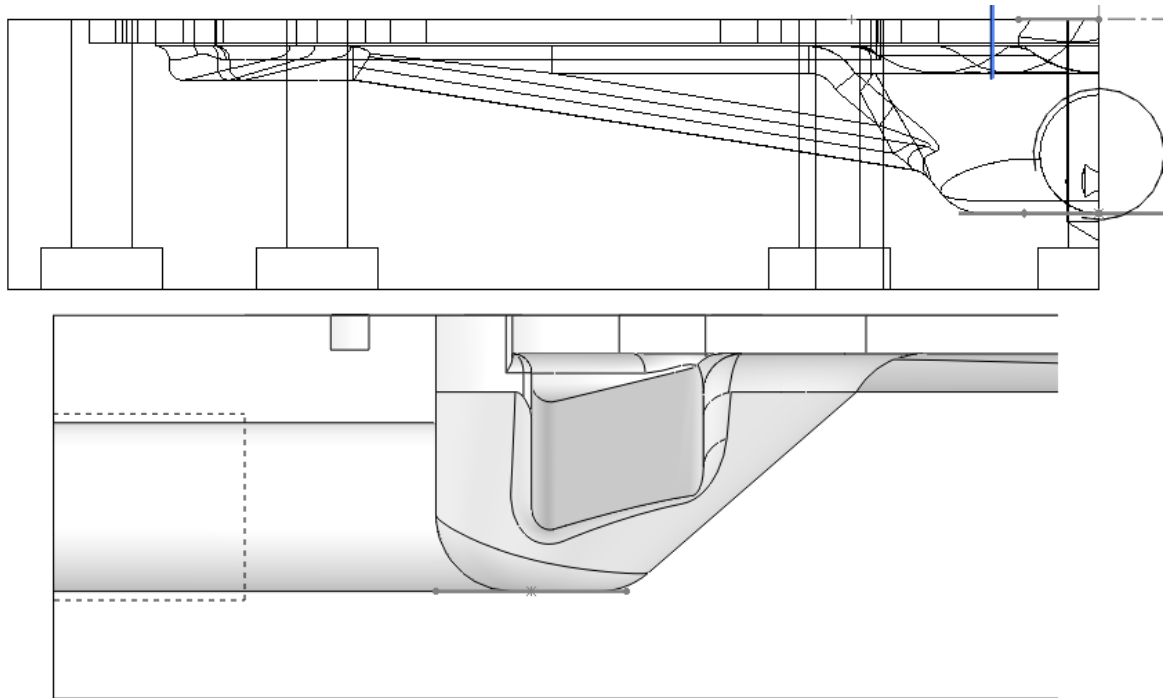
Obr. 65. Simulace varianty 5

U této simulace vzniká obrovský vír v oblasti vstupu a přitékající tekutina se v levých rozích výměníku točí, čímž v této oblasti nedochází k dostatečnému chlazení. Proudění ve středové části je vyhovující.

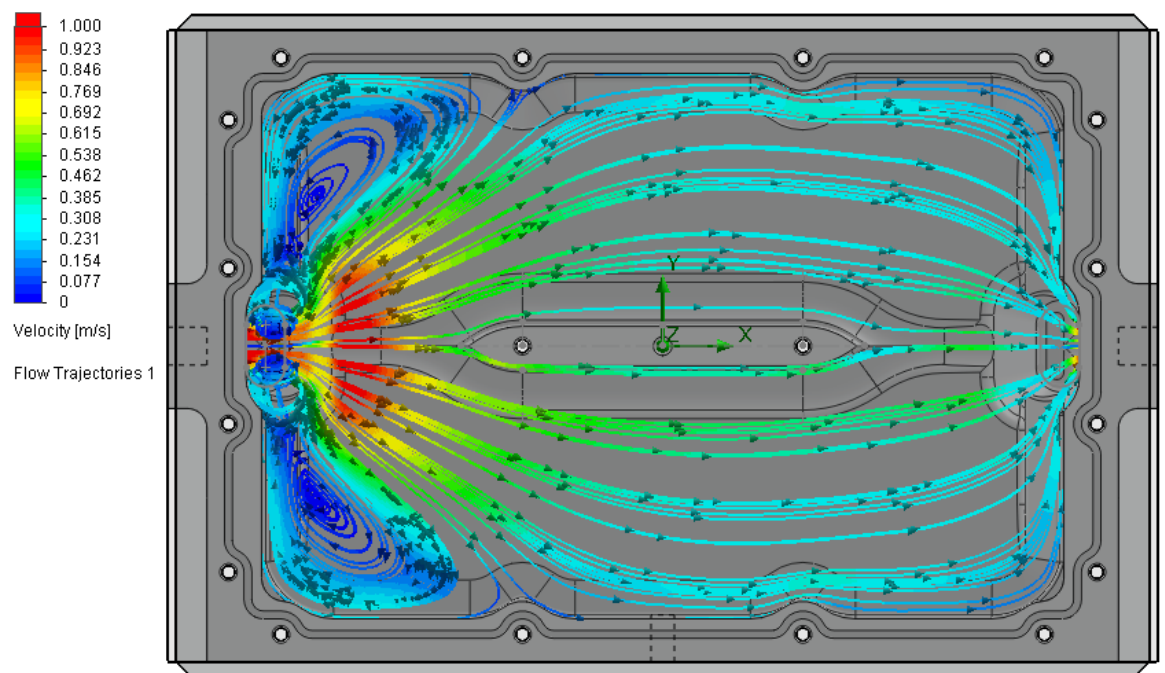
8.2.2 VARIANTA 6



Obr. 66. Varianta 6



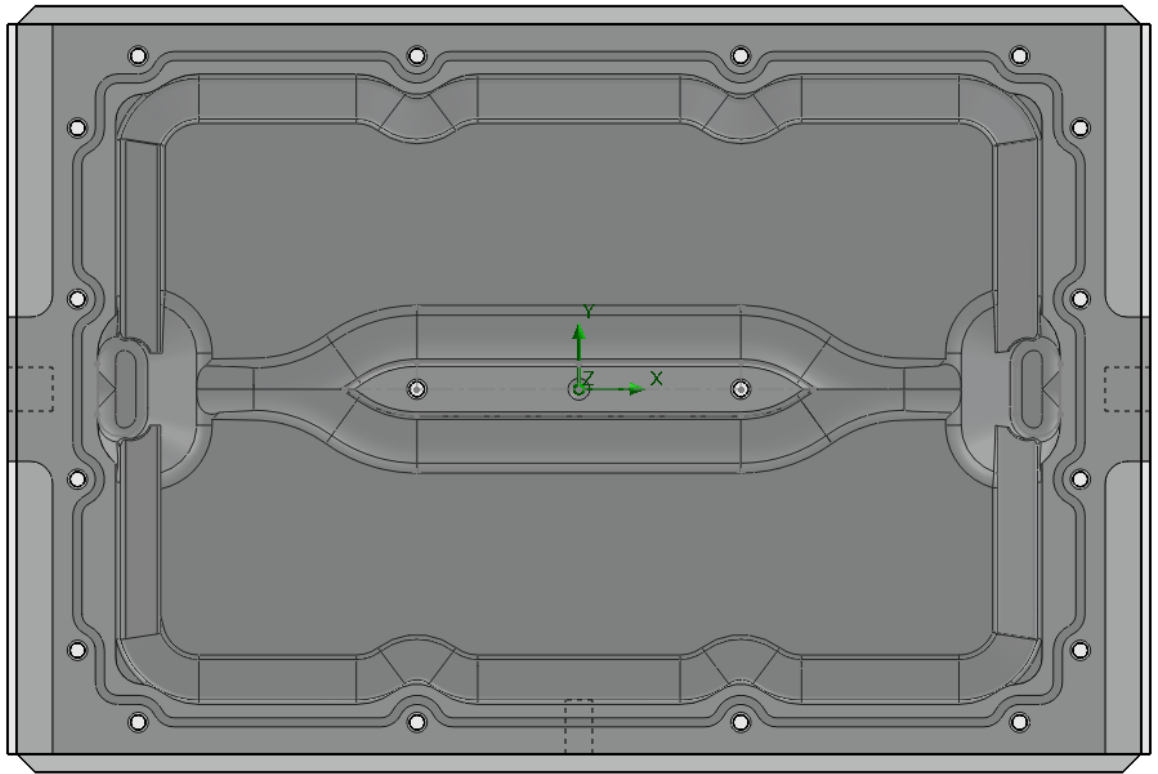
Obr. 67. Geometrie varianty 6



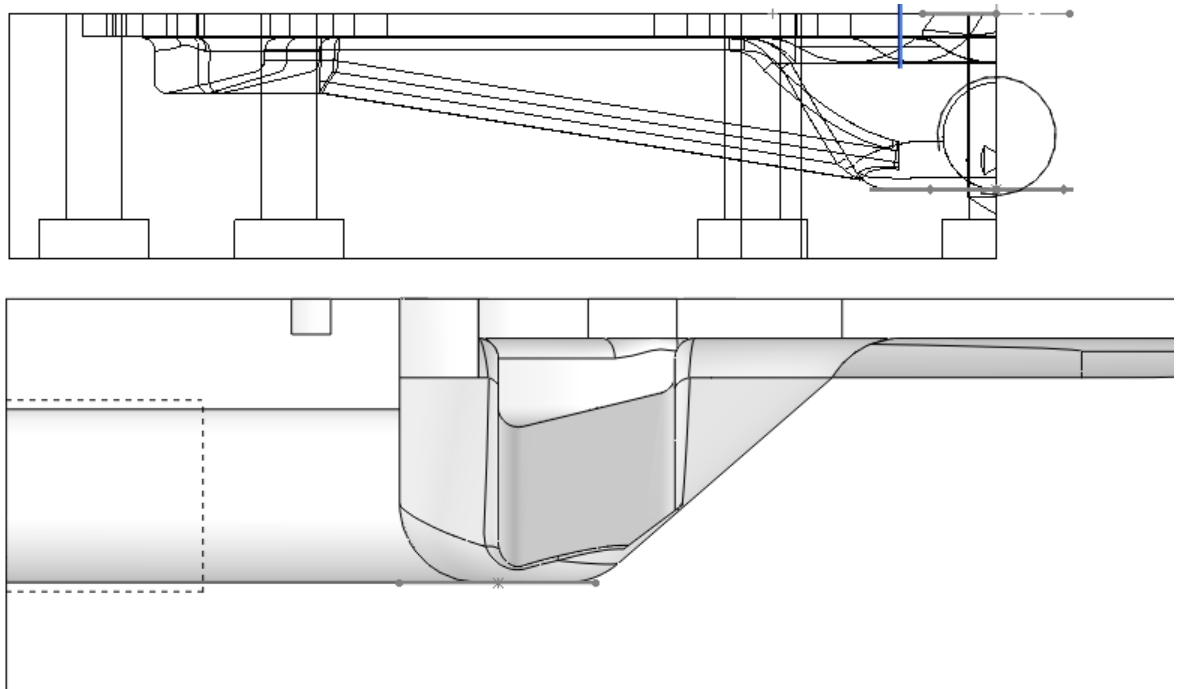
Obr. 68. Simulace varianty 6

Simulace varianty 6 v oblasti přímého styku s levým rohem výměníku dosahuje lepších výsledků než varianta 5, ale stále dochází ke vzniku vířů v levé části výměníku u vstupu. Pravé rohy jsou obtékány vyhovujícím stylem.

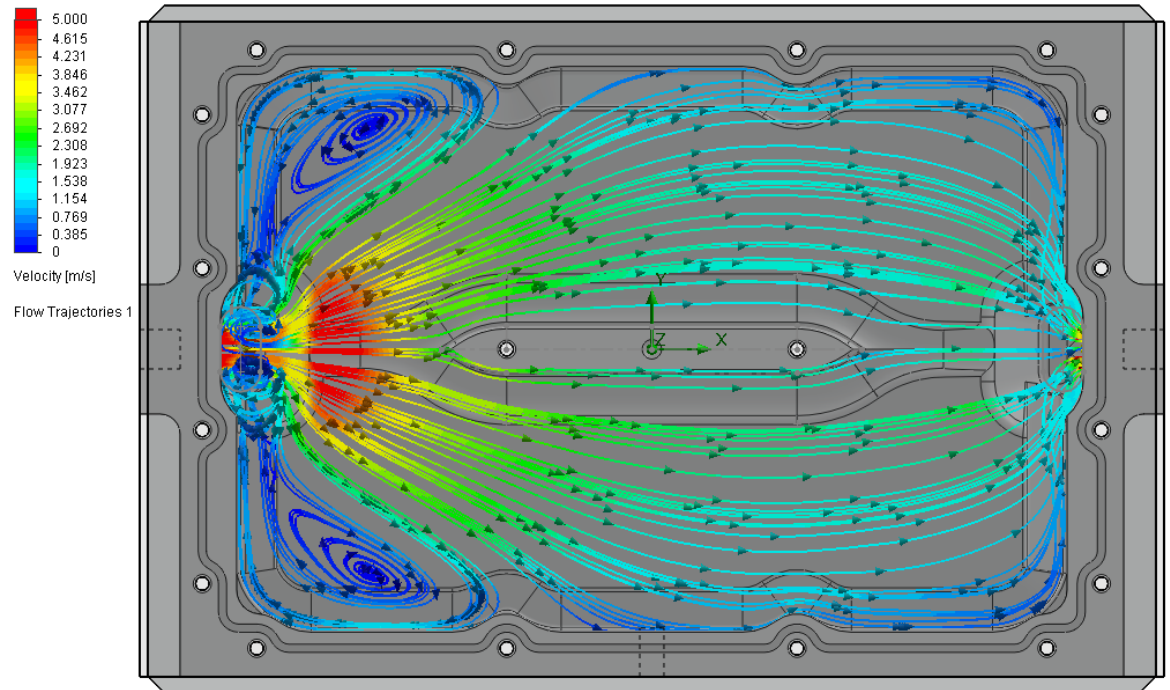
8.2.3 VARIANTA 7



Obr. 69. Varianta 7



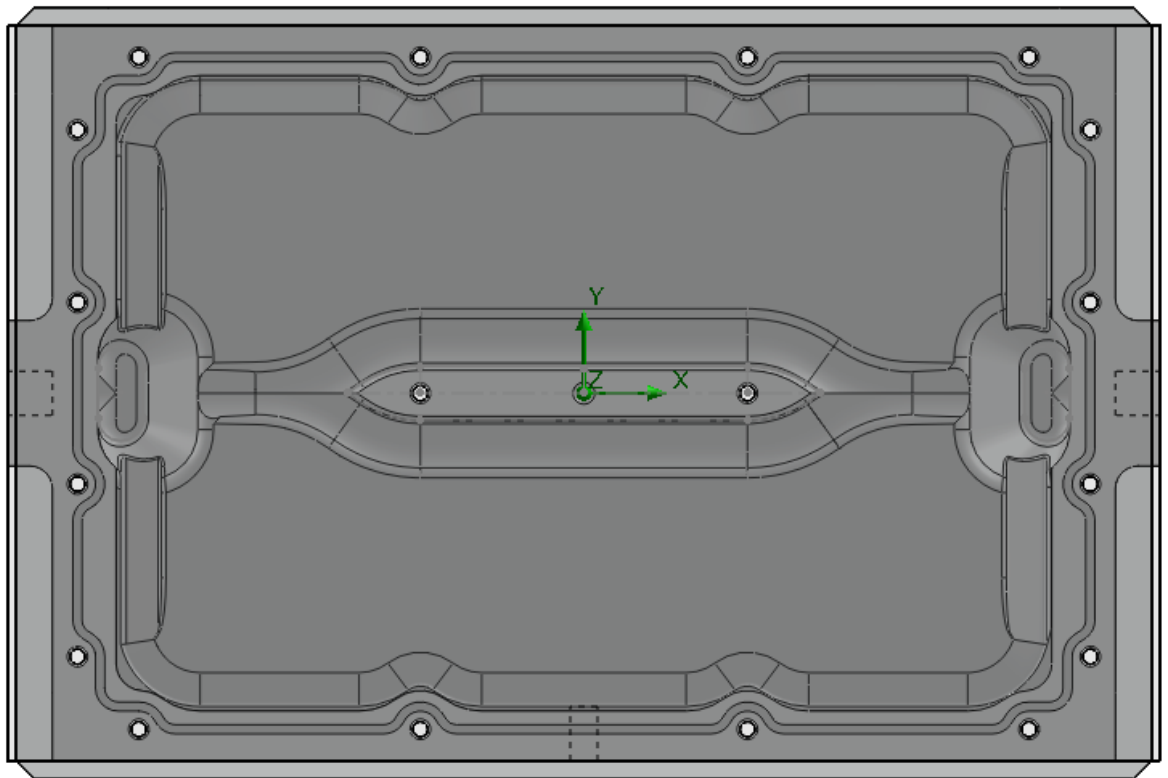
Obr. 70. Geometrie varianty 7



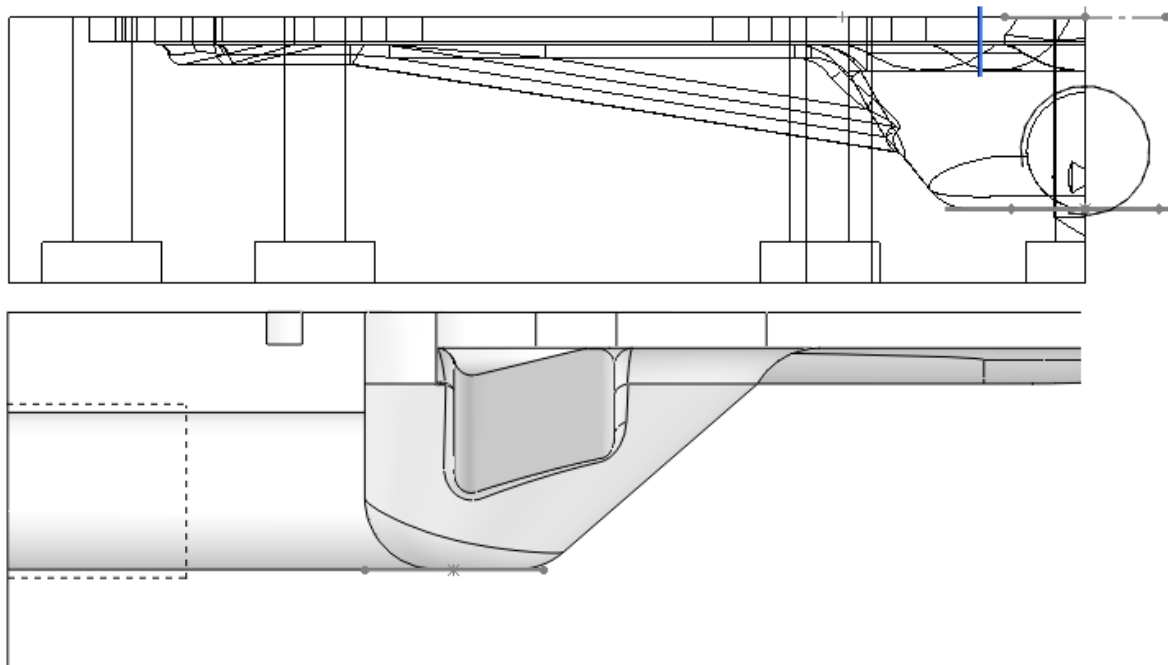
Obr. 71. Simulace varianty 7

Varianta 7 vykazuje lepší rozptyl tekutiny ve střední části po ploše výměníku. Pravé rohy jsou naopak hůře obtékány než u předešlé varianty číslo 6. Vstup a levá část výměníku je zcela pokryta vírem.

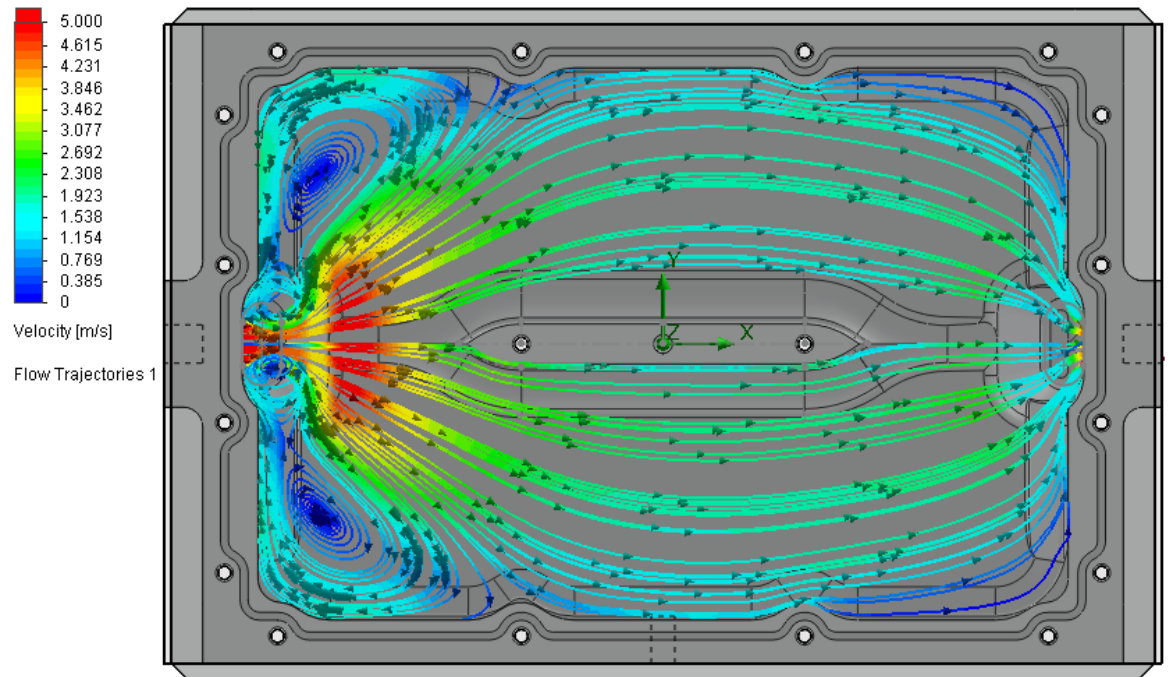
8.2.4 VARIANTA 8



Obr. 72. Varianta 8



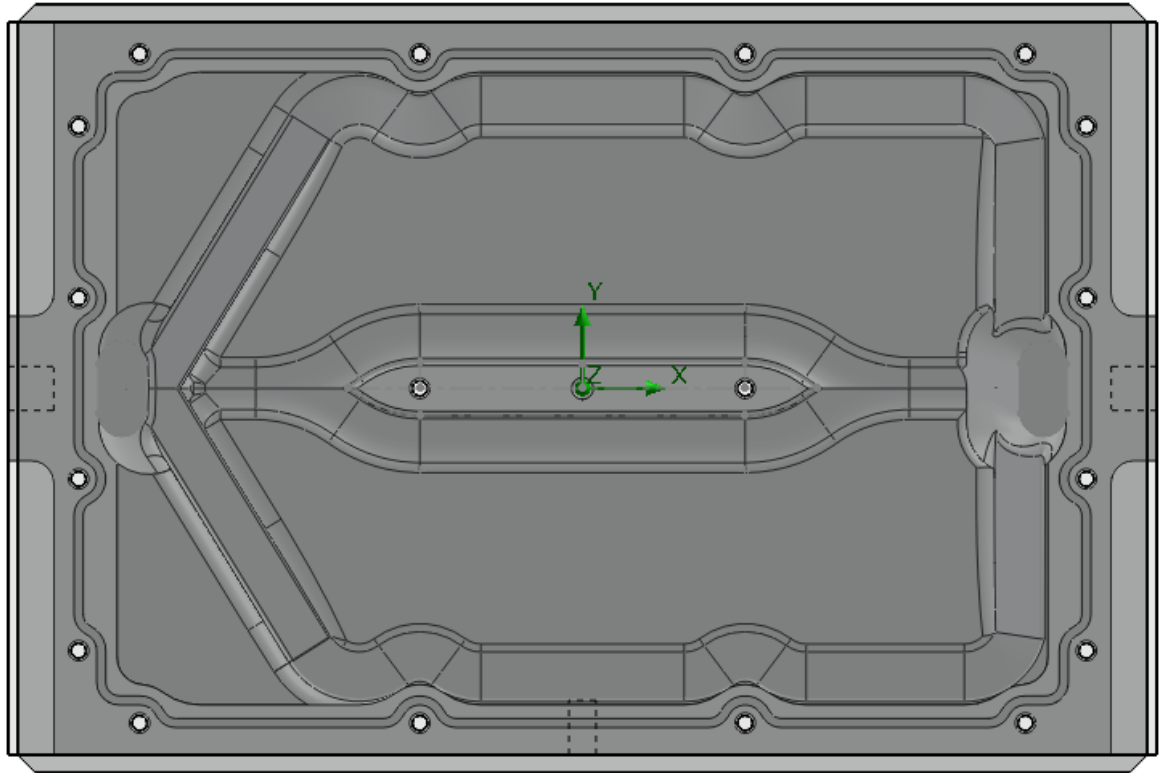
Obr. 73. Geometrie varianty 8



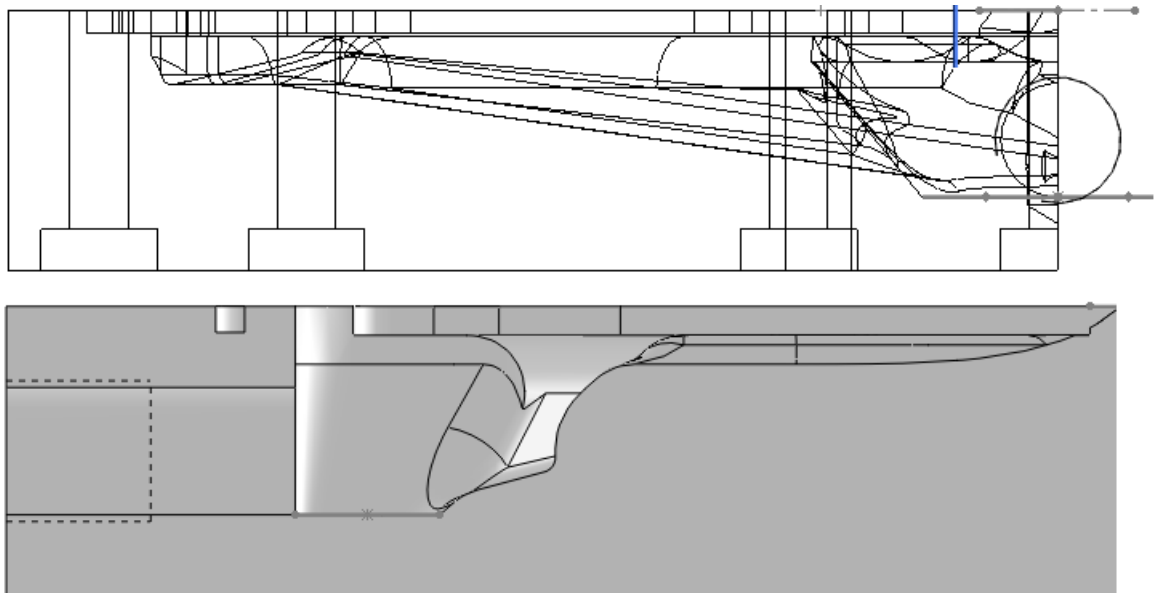
Obr. 74. Simulace varianty 8

Tato varianta se zatím jeví jako nejlepší. Ve vstupní části sice dochází ke vzniku víru, ale chlazení levých rohů dosahuje z předešlých variant nejlepších výsledků. Chlazení ve střední části je dostačující, ale pravé rohy a vznik vírů v levé části vylučuje tuto variantu jako výrobní.

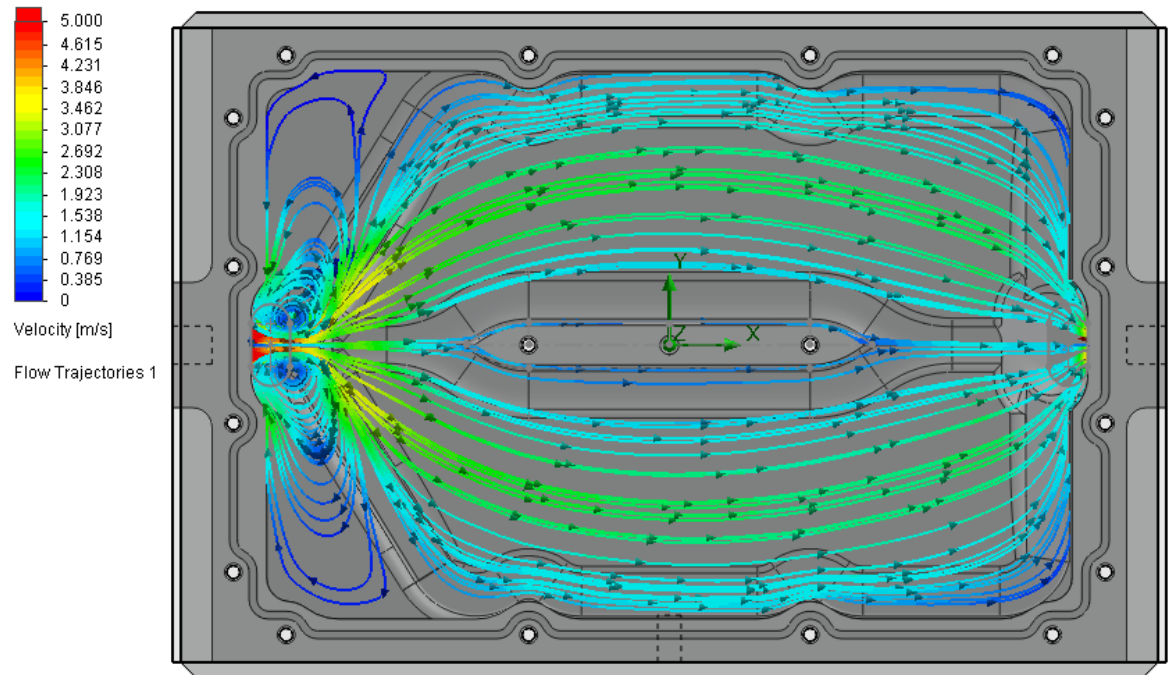
8.2.5 VARIANTA 9



Obr. 75. Varianta 9



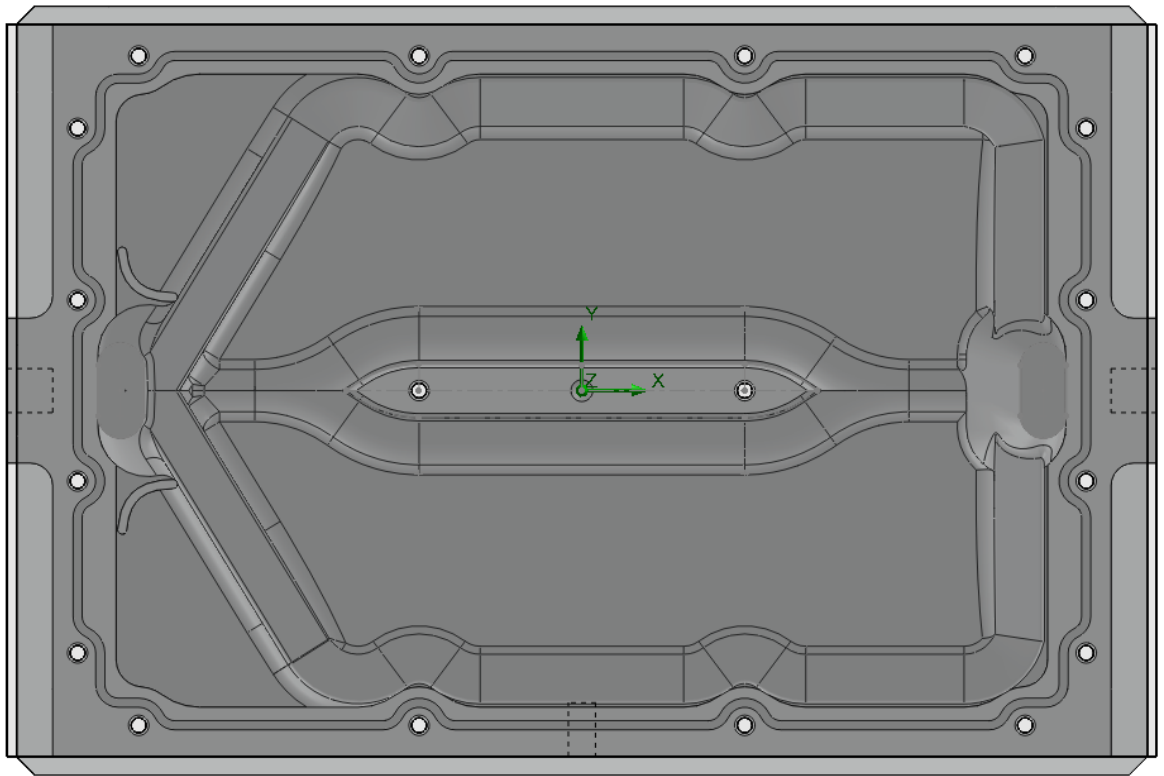
Obr. 76. Geometrie varianty 9



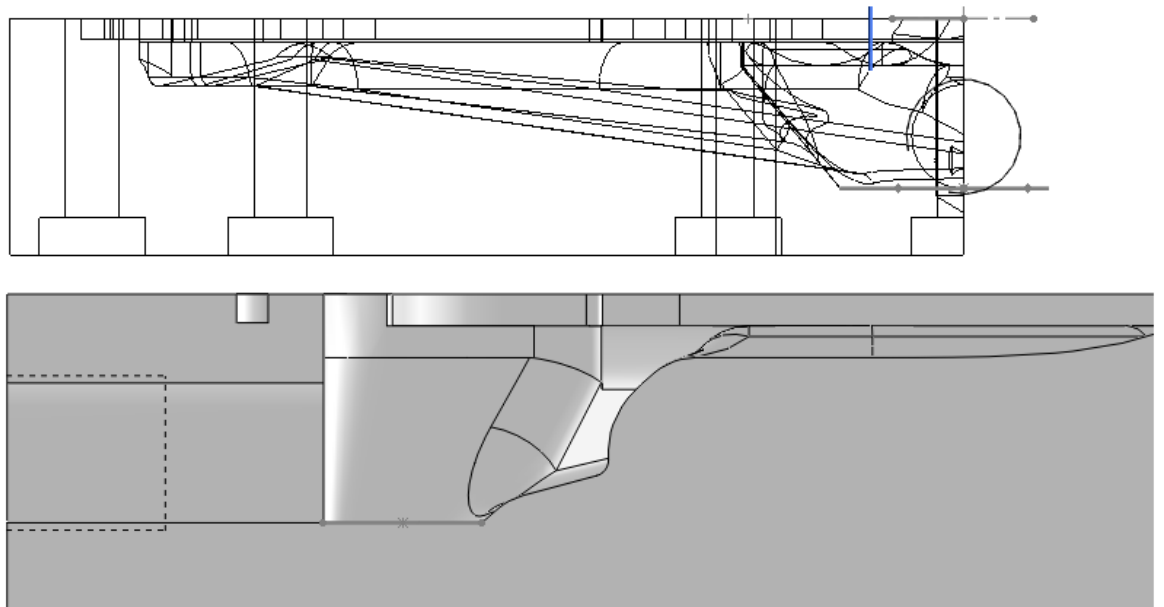
Obr. 77. Simulace varianty 9

V tomto případě byla drážka zkonstruována jako asymetrická podle středové osy výměníku y. Proudění ve střední části a v pravých rohách je dostačující. Levé rohy však nejsou v této variantě chlazené téměř vůbec, jelikož ve vstupu je velký vír, který tekutinu zcela strhává zpět do vstupní části tekutiny.

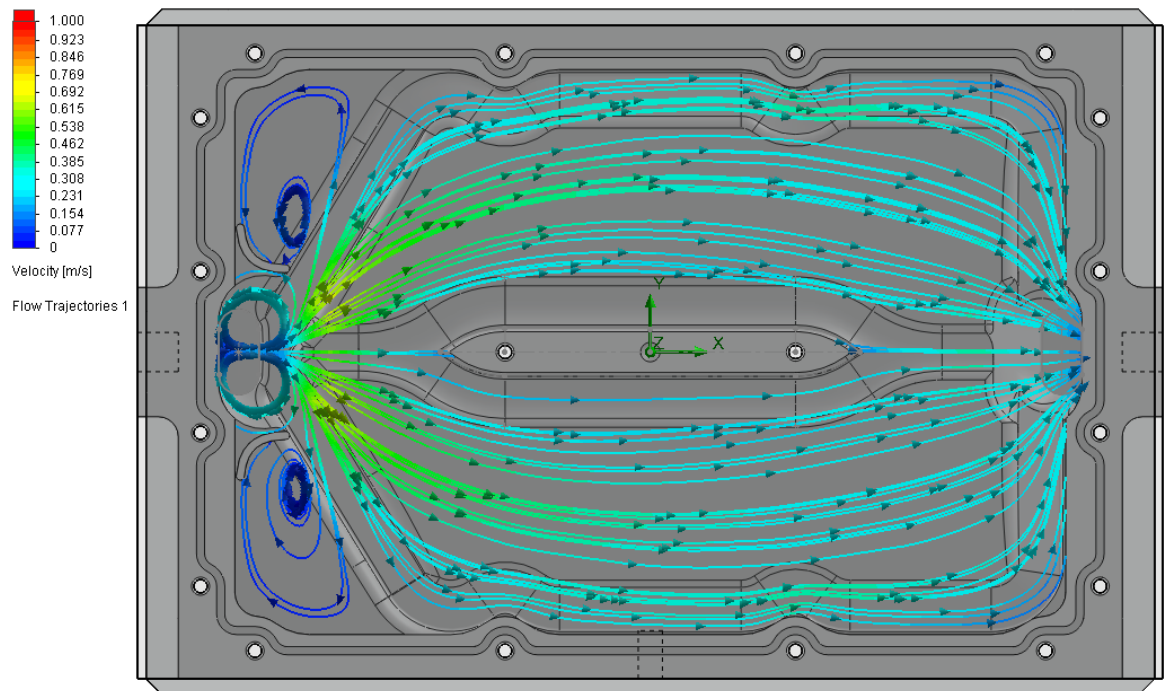
8.2.6 VARIANTA 10



Obr. 78. Varianta 10



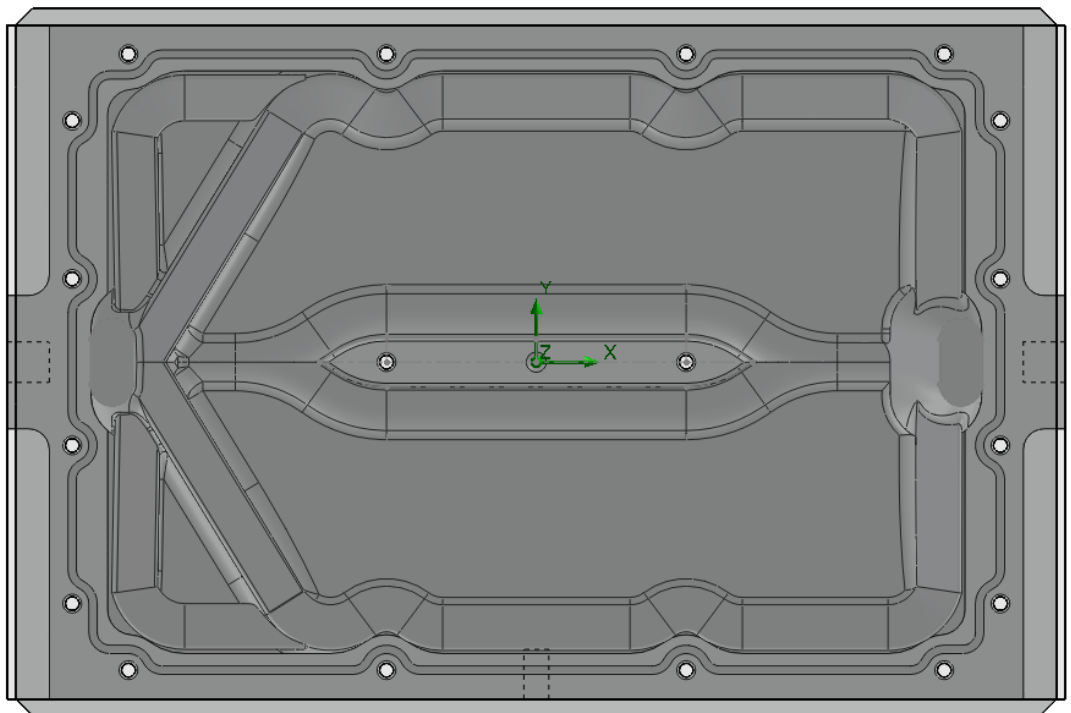
Obr. 79. Geometrie varianty 10



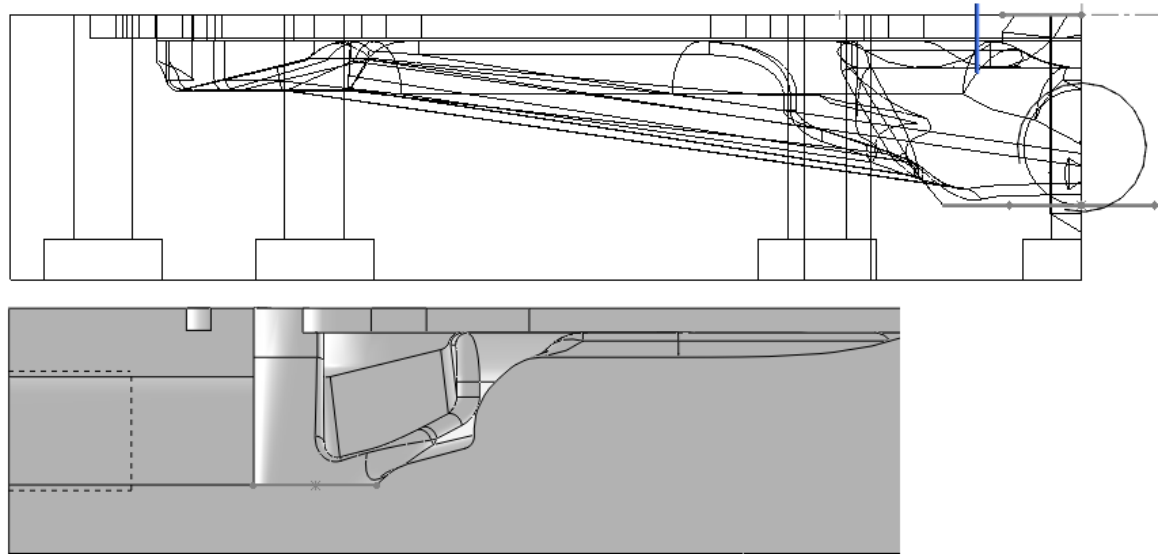
Obr. 80. Simulace varianty 10

Varianta 10 zcela splňuje požadavky na chlazení v oblastech pravých rohů a střední části. V levých rozích jsou ovšem slepá místa, která nejsou chlazená a ani průměrná rychlost chlazení u této varianty nespĺňuje potřebné požadavky

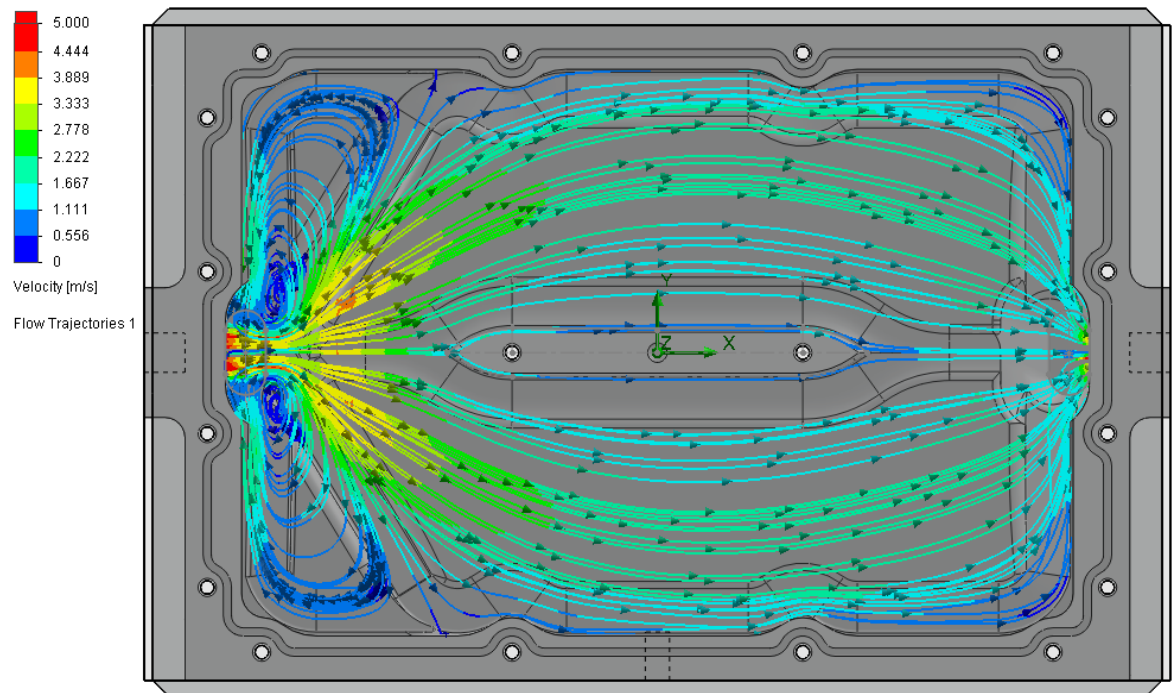
8.2.7 VARIANTA 11



Obr. 81. Varianta 11



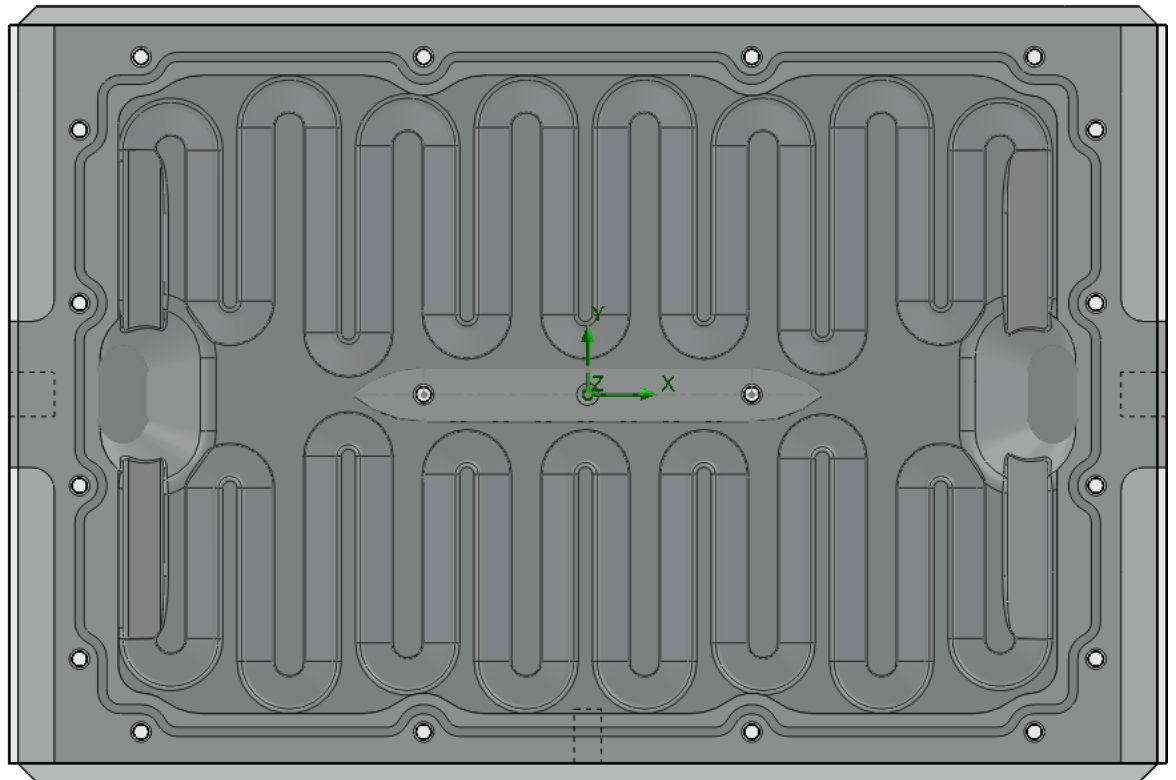
Obr. 82. Geometrie varianty 11



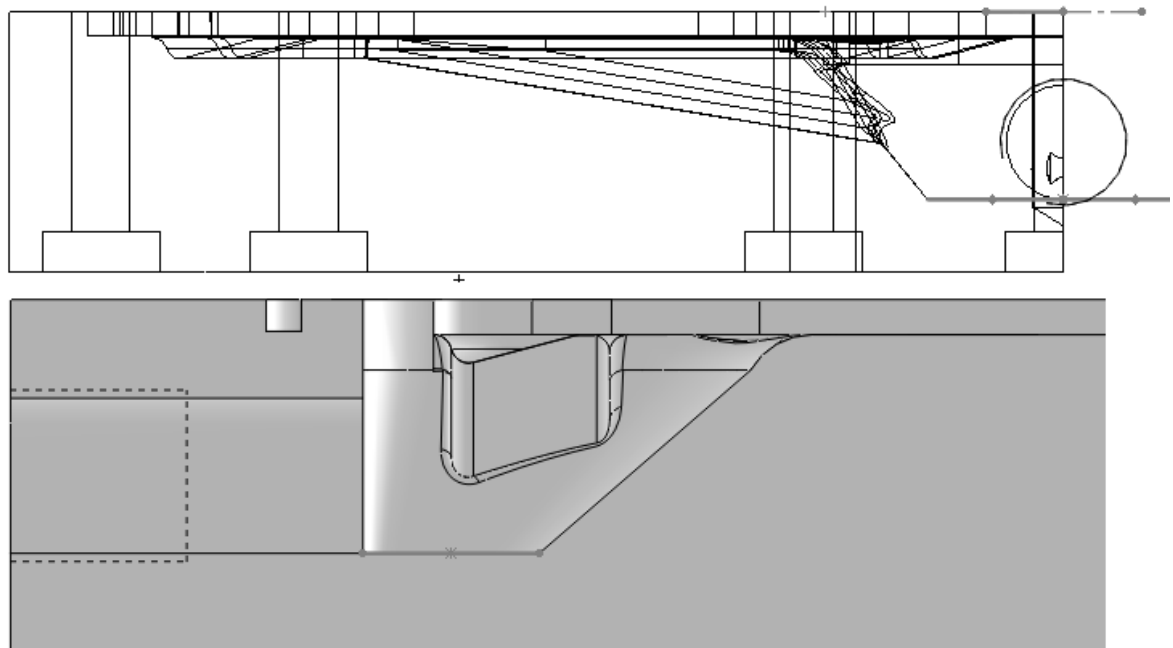
Obr. 83. Simulace varianty 11

V této simulaci je lépe vyřešeno chlazení v levé části než u simulace 10, ale i tak není vyhovující. Levé i pravé rohy výměníku nejsou chlazeny dostačujícím způsobem a ani chlazení středového ostrůvku není vhodné.

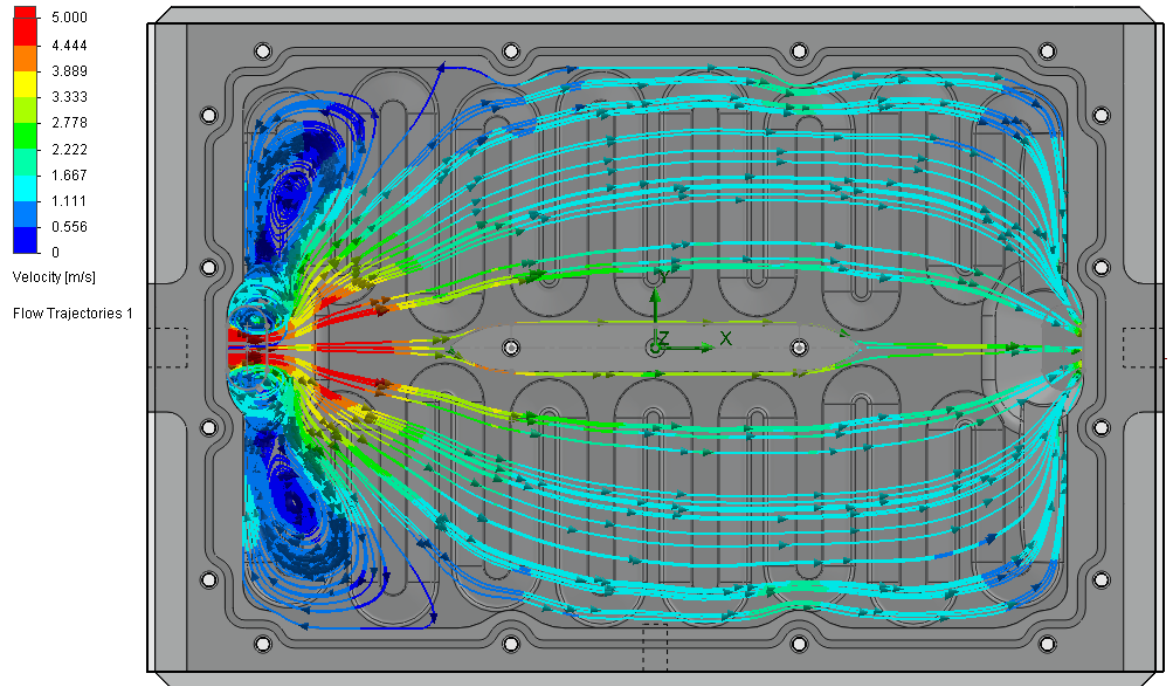
8.2.8 VARIANTA 12



Obr. 84. Varianta 12



Obr. 85. Geometrie varianty 12



Obr. 86. Simulace varianty 12

Tento návrh se zcela liší od předešlých variant svým konstrukčním provedením. Tvar drážky je symetrický podle středové osy výměníku x a má esovitý tvar. Chlazení ve střední části a v pravých rohách výměníku je vyhovující. Vstupní část je zcela zahlcena tekutinou, která se zde točí ve víru, a levé rohy výměníku nejsou téměř vůbec chlazeny.

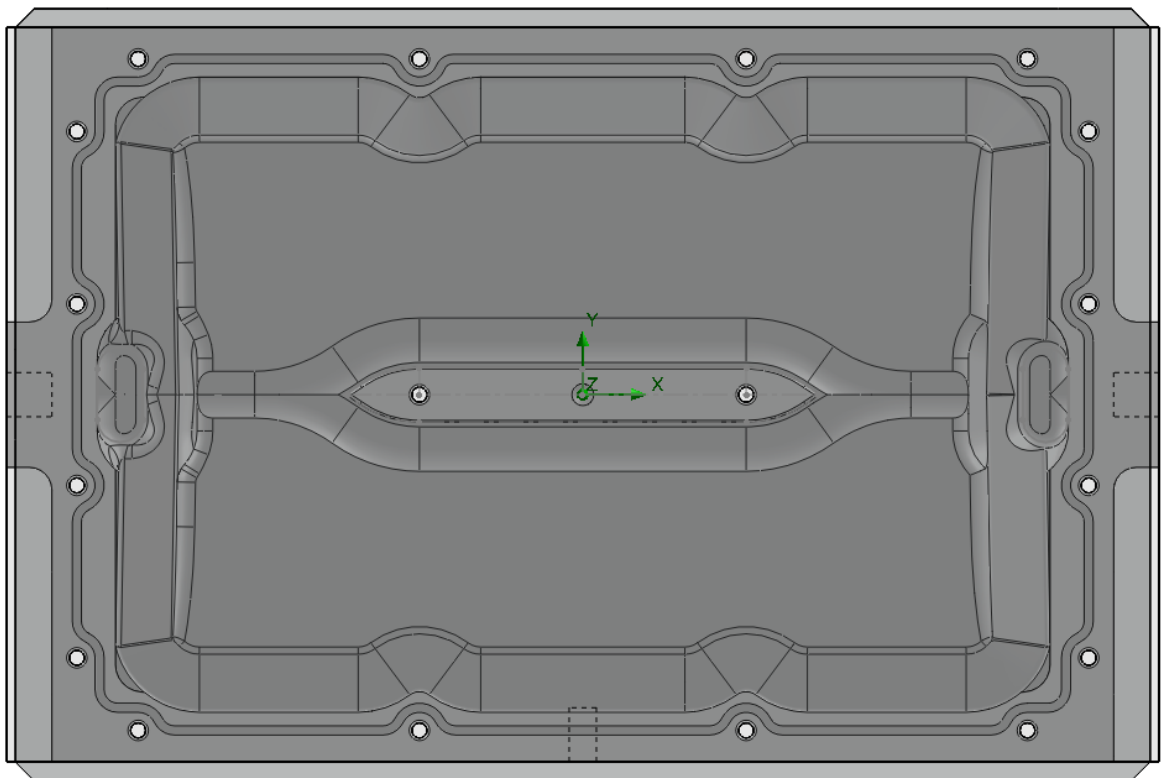
Ze všech vypočtených simulací je jasné, že ani pomocí drážek a kanálků nedosáhneme požadovaného rovnoměrného toku tekutiny po celé ploše výměníku. Ze simulací 5-12 je ale jasně patrné, že problém rovnoměrnosti vtoku závisí na konstrukčním návrhu vtokové části. I když se podařilo zlepšit tok tekutiny ve středové části a v pravých rozích výměníku, ve vtokové části byl vždy mohutný vír.

9 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU Č. 2

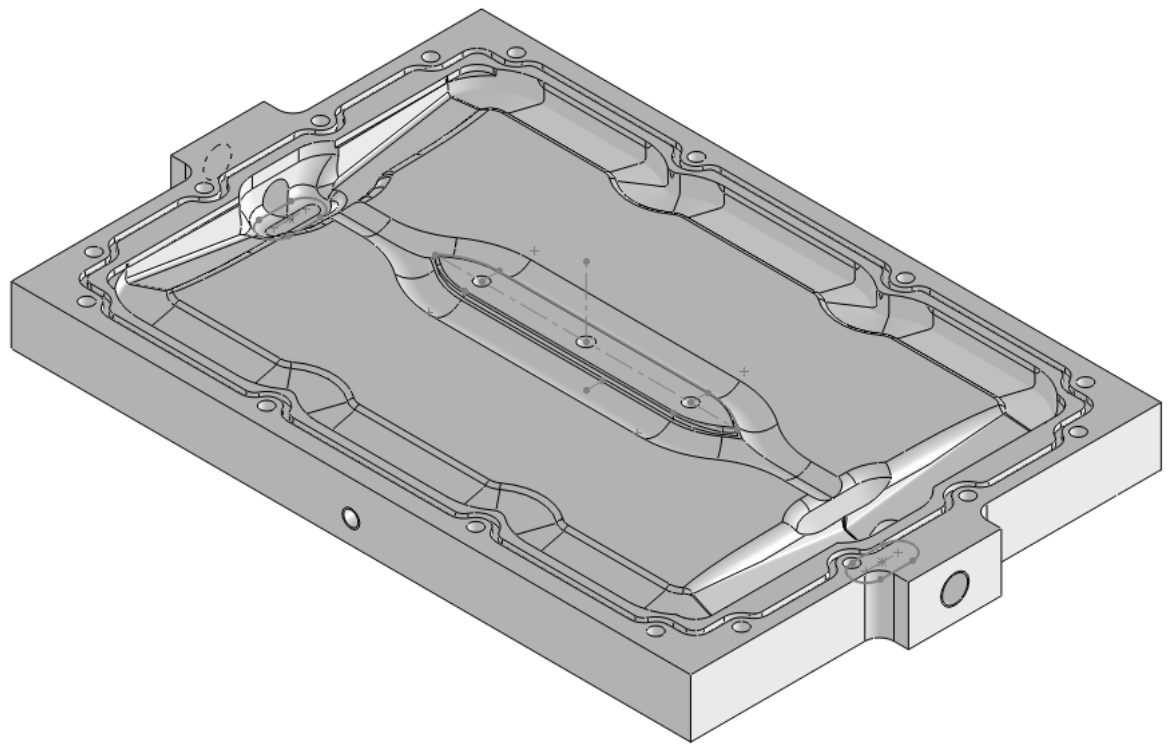
Předešlé varianty a simulace ukazují, že vstupní část výměníku u konstrukčního návrhu č. 1 není vhodně zkonstruována a její tvar má hlavní podíl na rovnoměrnosti toku tekutiny.

Konstrukční návrh číslo 2 je taktéž symetrický podle středové osy výměníku y . Pro rovnoměrnější tok v oblasti středového ostrůvku je využit offsetový kanál kopírující jeho tvar, který v předešlých variantách úspěšně zlepšil vtok ve střední části. Drážka kopírující obrysový tvar dutiny je symetrická podle středové osy výměníku x a je zkosená pod úhlem v oblasti vtoku a výtoku.

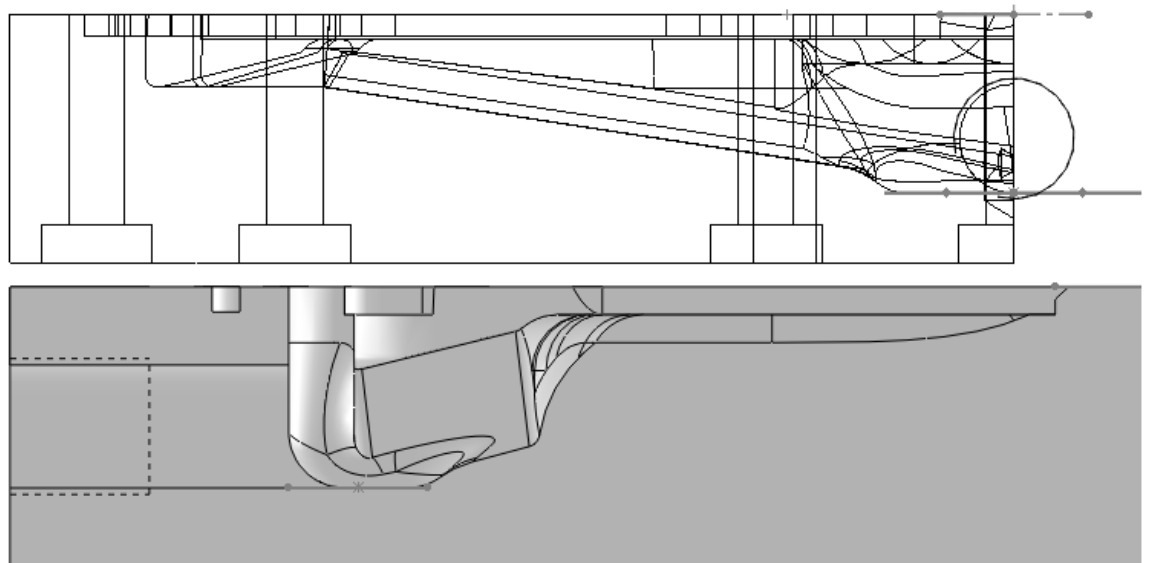
9.1 Varianta 1



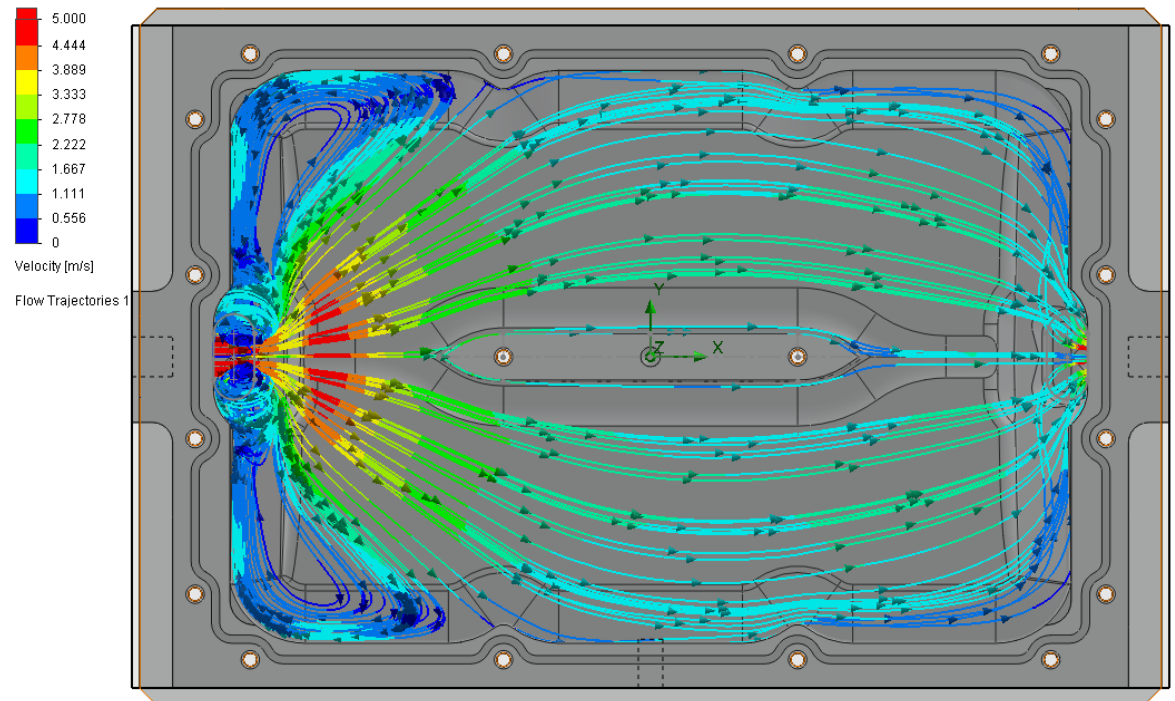
Obr. 87. Varianta 1



Obr. 88. Varianta 1 izometrický pohled



Obr. 89. Geometrie varianty 1



Obr. 90. Simulace varianty 1

Ve vtoku stále vzniká vír, který vrací tekutinu zpět do vtokové části, a tudíž nedochází k chlazení levých rohů výměníku. Proudění ve středové části je optimální. Pravé rohy jsou taktéž chlazeny nedostačujícím způsobem.

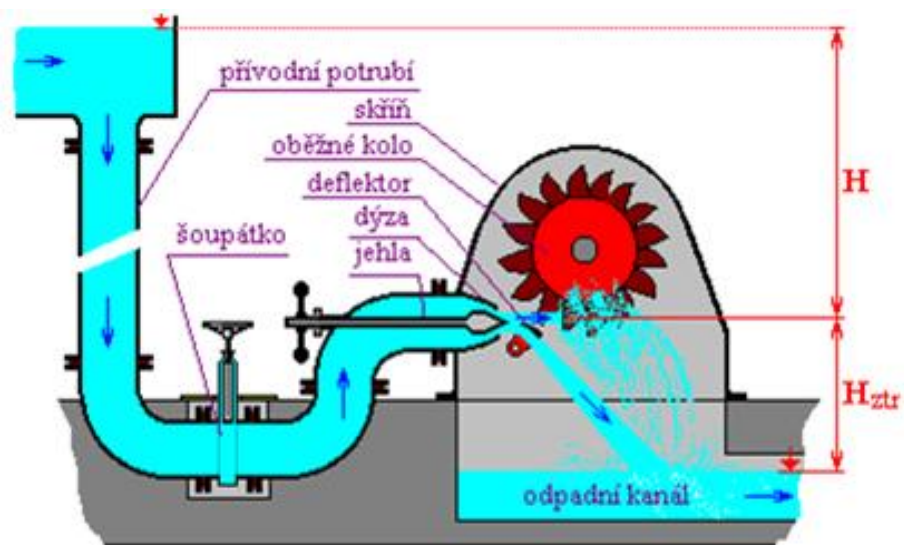
10 KONSTRUKČNÍ NÁVRH VÝMĚNÍKU Č. 3

U návrhu č. 1 a č. 2 je využita symetrie vtoku a výtoku podle středové osy výměníku y. Z předešlých variant je jasné, že návrh vtoku byl nevhodný a ovlivňuje celý průběh toku tekutiny. Naopak na tvaru výtoku až tolik nezáleží.

Návrh číslo 3 je tedy asymetrický. Vtoková část je zkonstruována podobně jako lopatka Peltonovy turbíny. Výtokové části byl ponechán konstrukční tvar z návrhu č. 1, který dobře odváděl tekutinu z plochy dutiny výměníku do výtoku.

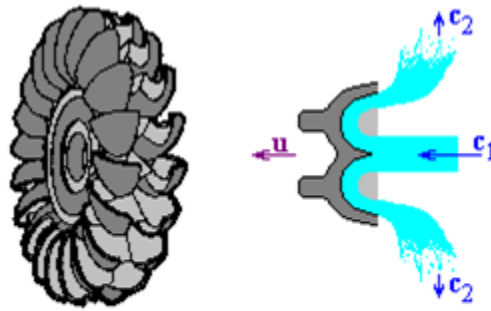
Peltonova turbína:

Pracuje na principu vody vstupující tangenciálně do oběžného kola, které je osazeno lopatkami lžícovitého tvaru. Břit uprostřed těchto lopatek rozděljuje paprsek vody na dvě poloviny a tvar lopatky se snaží otočit směr proudící vody nazpět. Tato změna směru způsobuje přenos energie oběžnému kolu. Vzájemným působením rychlosti vody tekoucí po lopatce a otáčením oběžného kola dochází k ději, kdy voda opouští lopatky na vnější straně s minimální rychlostí a odchází do obou stran, kde padá pod turbínu. [43]



- H ...činný spád [metry]
- H_{ztr} ...výška nad spod.vodou [metry]

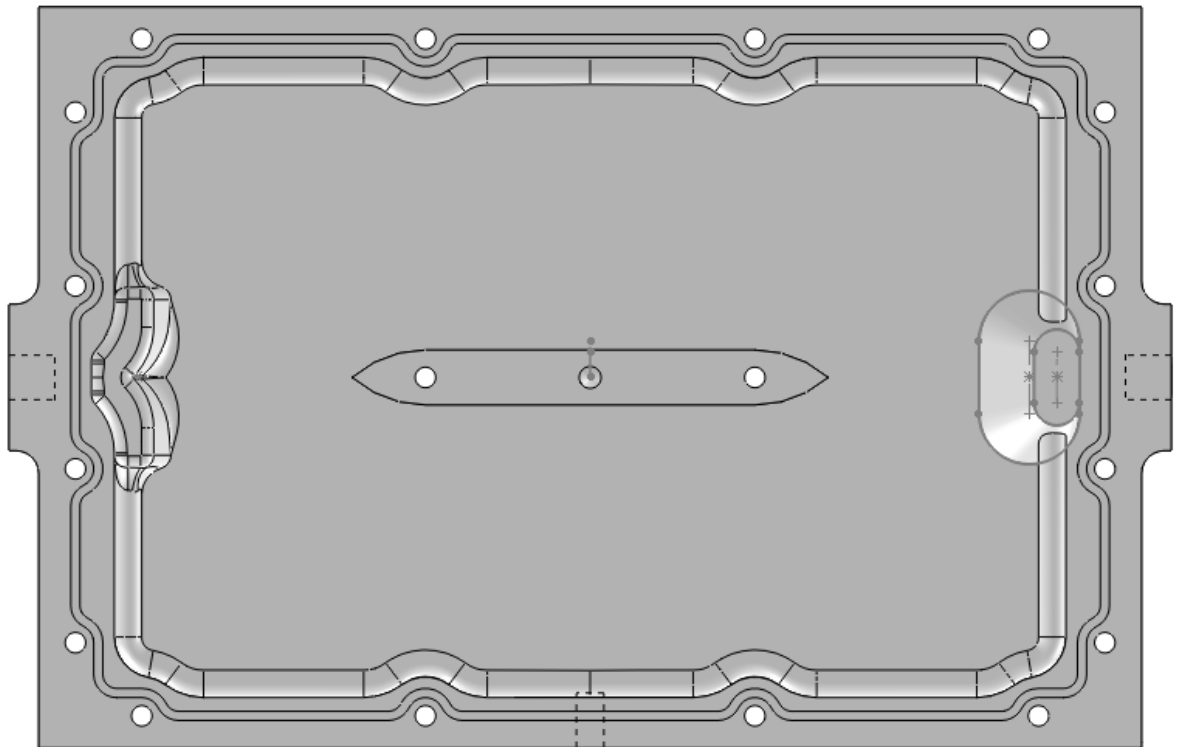
Obr. 91. Princip Peltonovy turbíny



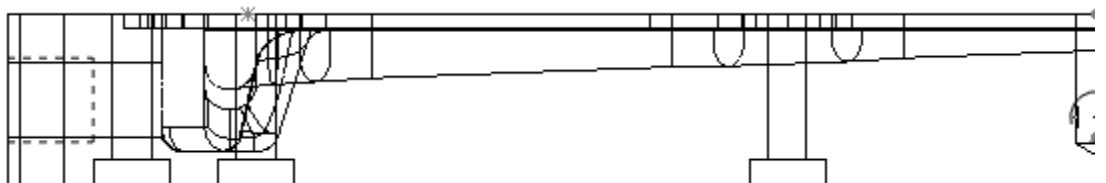
- c_1 ...vstupní rychlost vody do lopatek [m/sec.]
- c_2 ...výstupní rychlost vody z lopatek [m/sec.]

Obr. 92. Tvar lopatek Peltonovy turbíny

10.1 Varianta 1



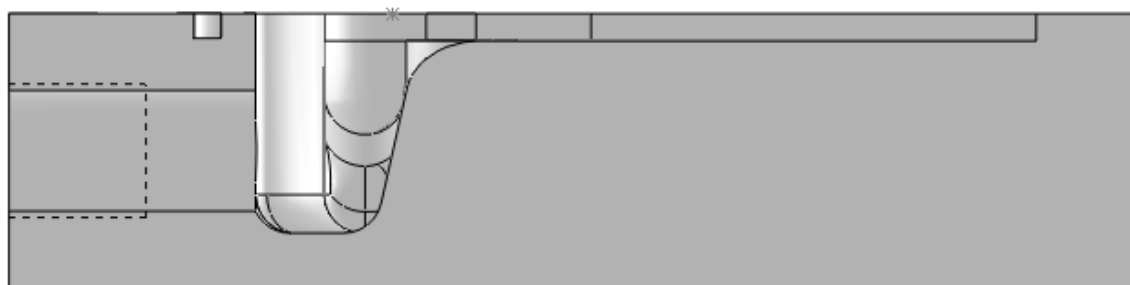
Obr. 93. Varianta 1



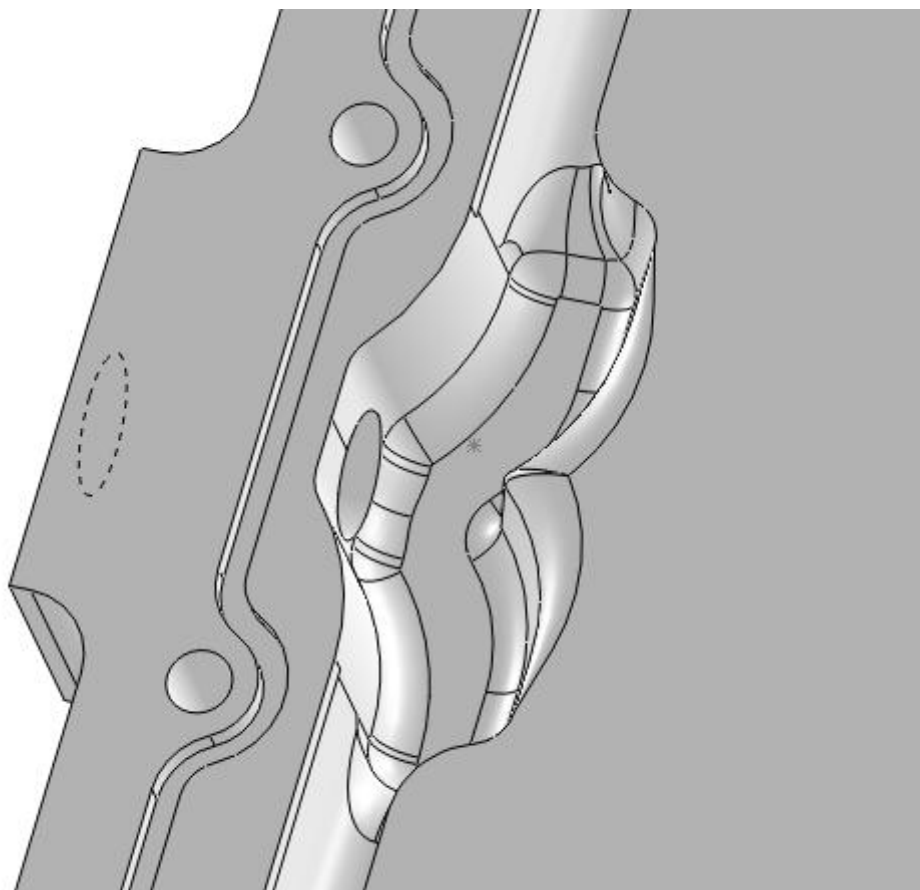
Obr. 94. Řez předním pohledem – zkosení drážky podél obrysu dutiny



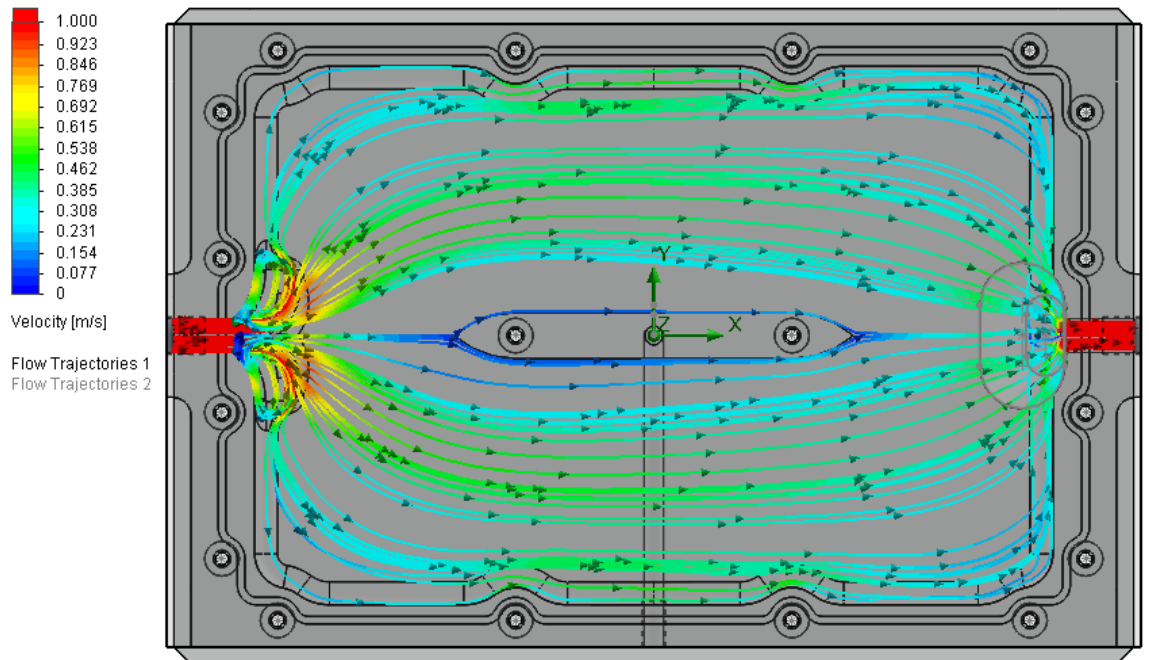
Obr. 95. Řez pohledem z leva – zkosení drážky směrem z vtoku



Obr. 96. Řez předním pohledem – detail vtoku 3D



Obr. 97. Detail vtoku

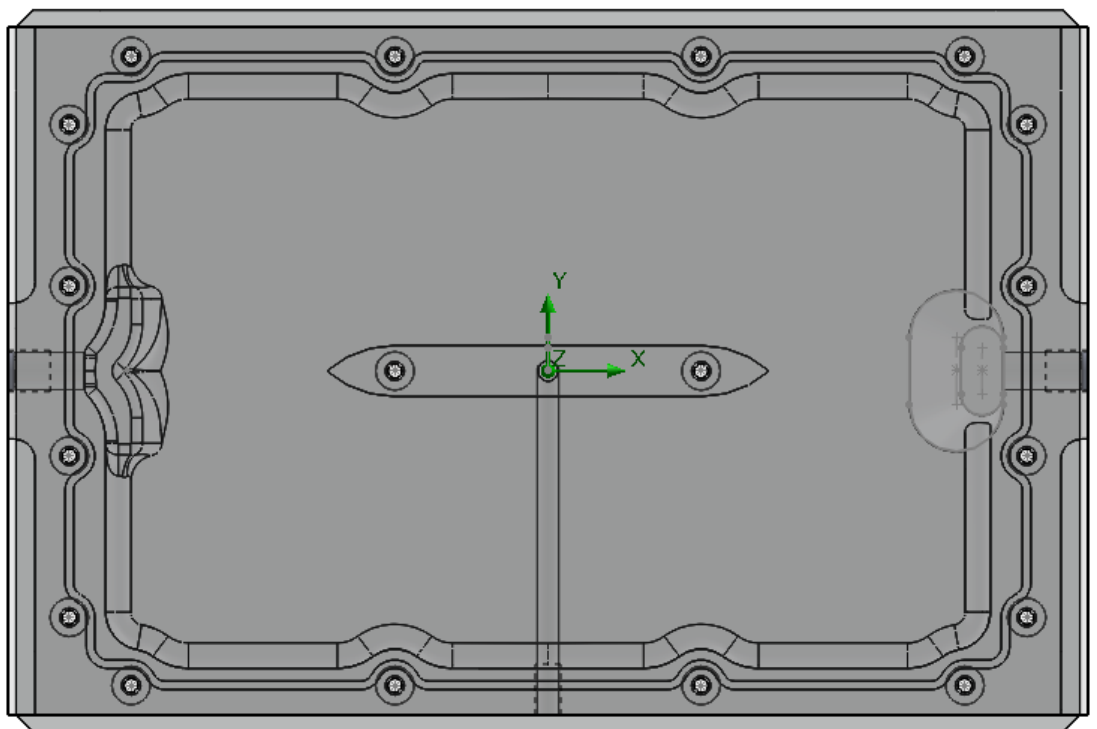


Obr. 98. Simulace varianty 1

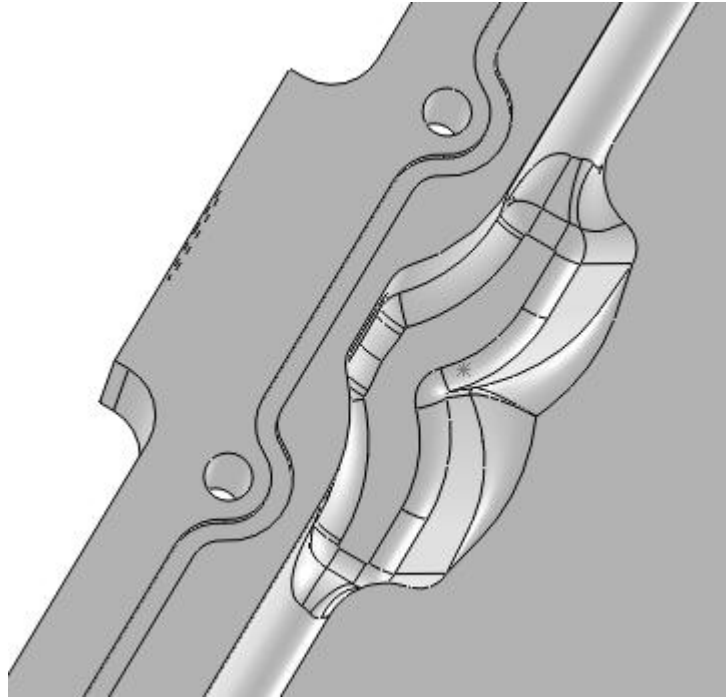
Proudění tekutiny je po celé ploše výměníku souměrné a vír ve vstupní části je oproti předchozím variantám téměř nulový. Obtékání středového ostrůvku je dostačující.

10.2 Varianta 2

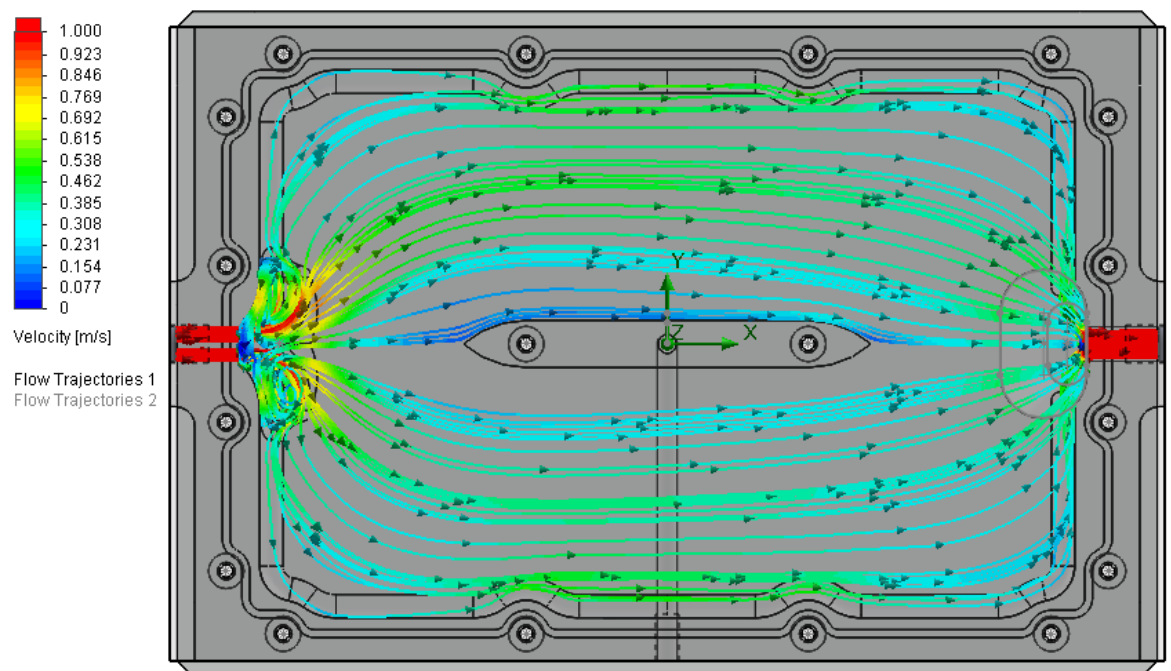
Oproti variantě číslo 1 byl zvětšen sklon vtokové části a poloměr zaoblení.



Obr. 99. Varianta 2



Obr. 100. Detail vtoku varianty 2

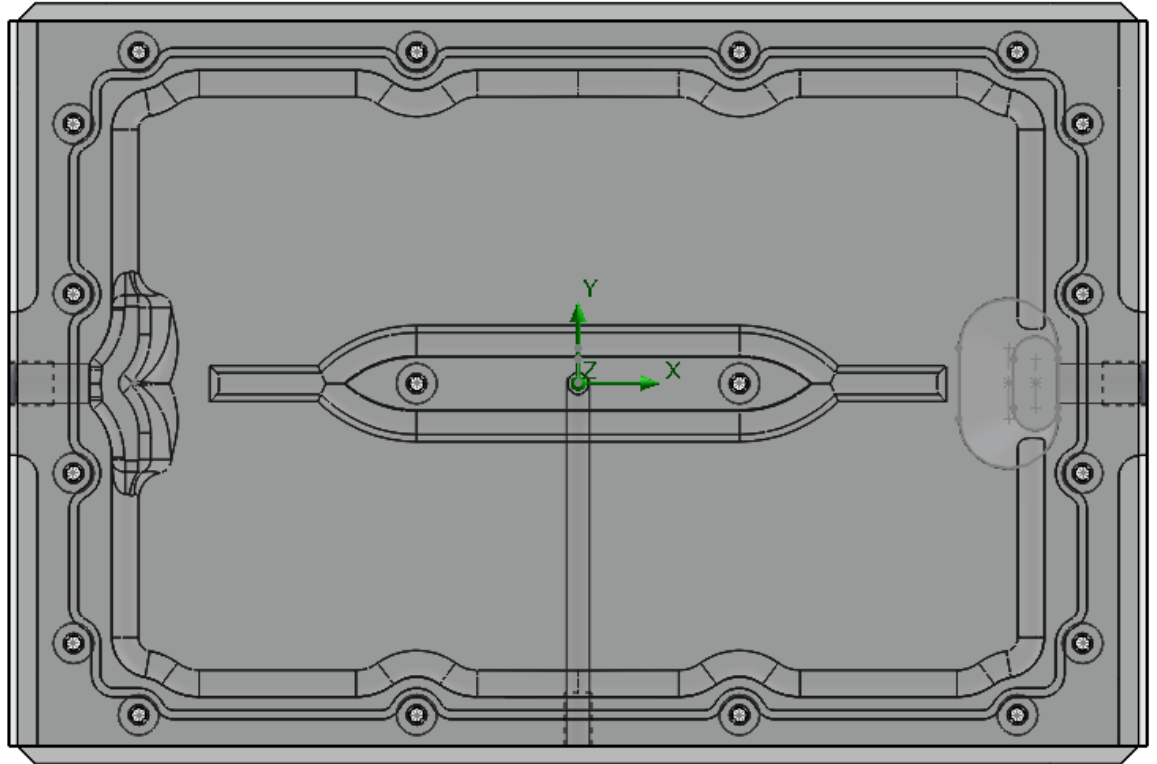


Obr. 101. Simulace varianty 2

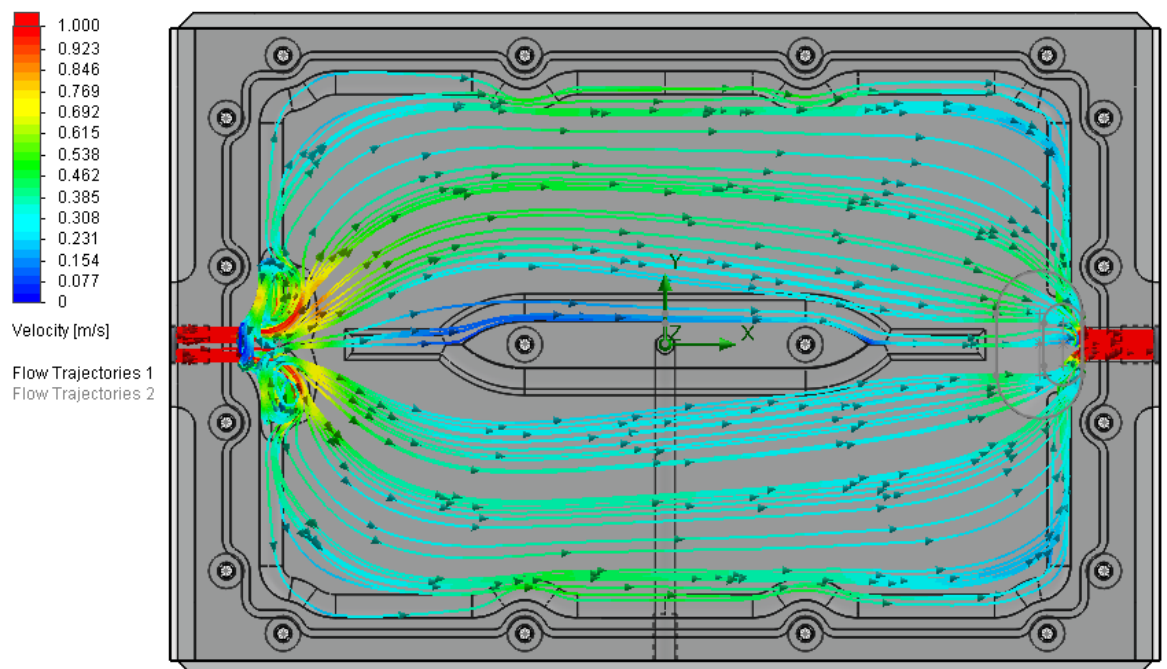
Ze simulace je patrné, že zvětšení sklonu a zároveň poloměru zaoblení má nepatrný vliv na rovnoměrnost toku ve střední části a zlepšuje tok kolem středového ostrůvku.

10.3 Varianta 3

Vytvoření offsetového vybrání středového ostrůvku a ponechání změn ve vtoku viz varianta 2.



Obr. 102. Varianta 3



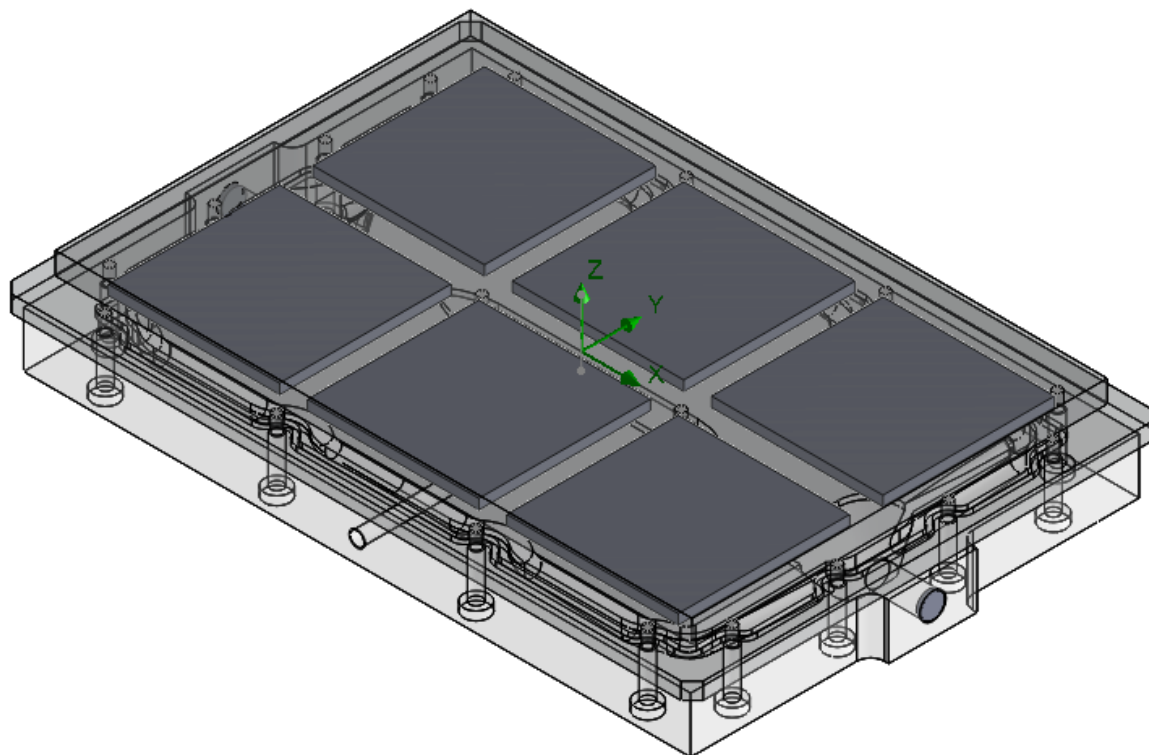
Obr. 103. Simulace varianty 3

Rovnoměrnost toku je obdobná jako u varianty 2 a vliv offsetového vybrání středového ostrůvku je zanedbatelný.

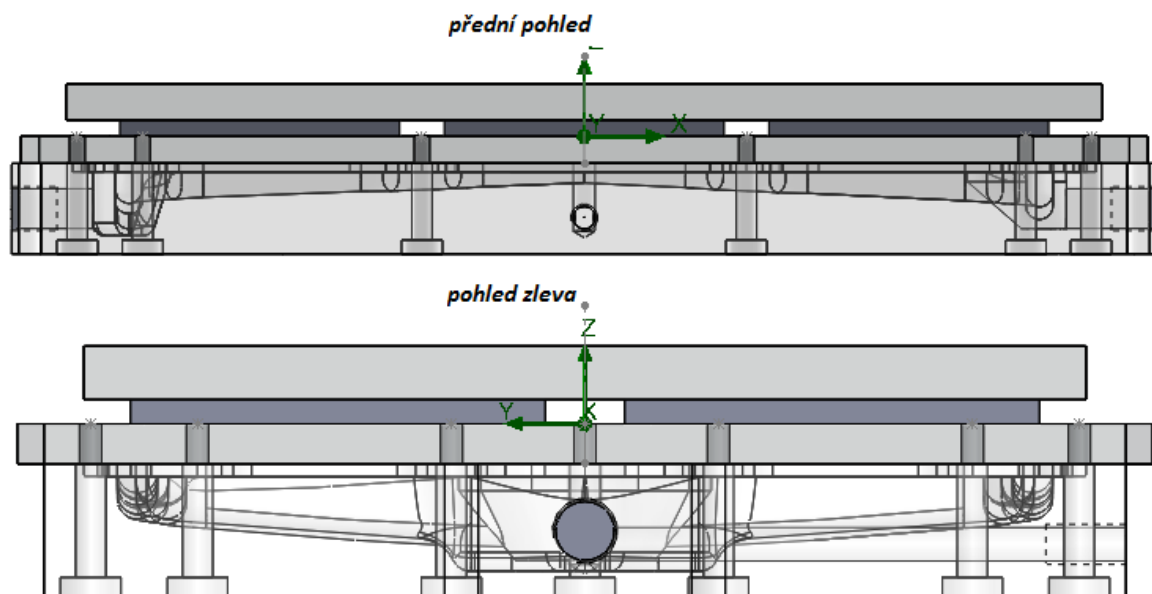
U konstrukčního návrhu výměníku č. 3 s asymetrickým vtokem a výtokem se jeví jako nejlepší varianta 2, která dosahuje optimálního rovnoměrného toku po celém objemu dutiny výměníku. Tato varianta je ze všech zde uvedených simulací nejvhodnější k výrobě.

11 KONTROLA ČINNOSTI VÝMĚNÍKU

Po zkompletování celé sestavy výměníku, nastavení kontrolního výpočtu s přesností 3 a nadefinování jednotlivých Peltierových článků při proudu 12A bylo dosaženo těchto výsledků:

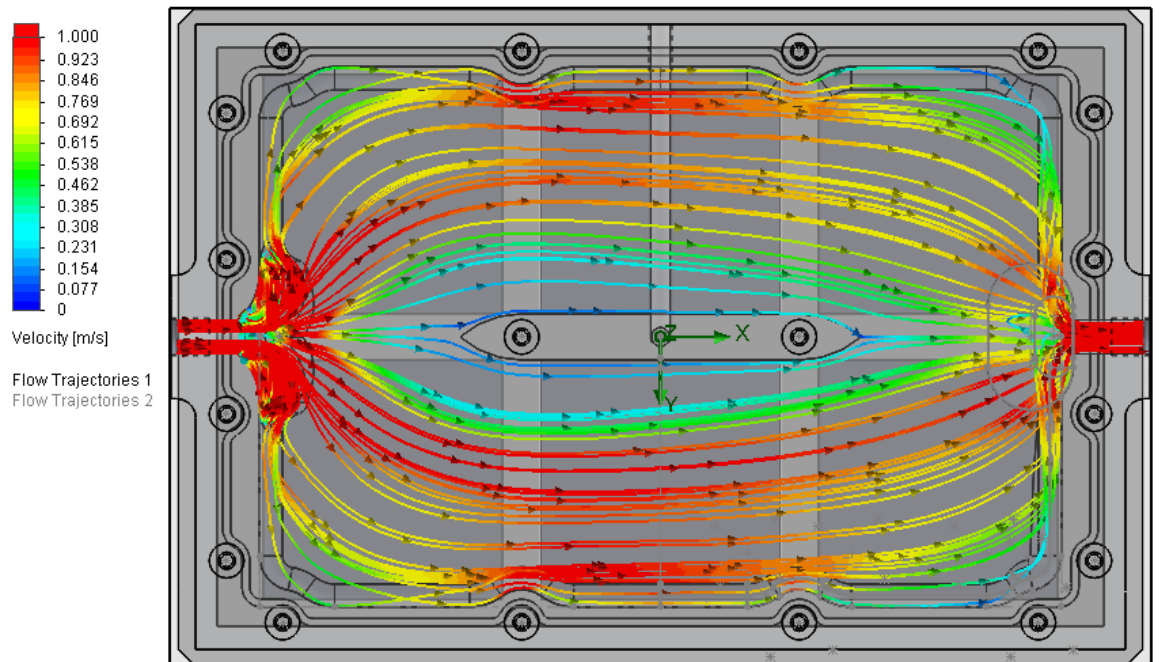


Obr. 104. Sestava výměníku



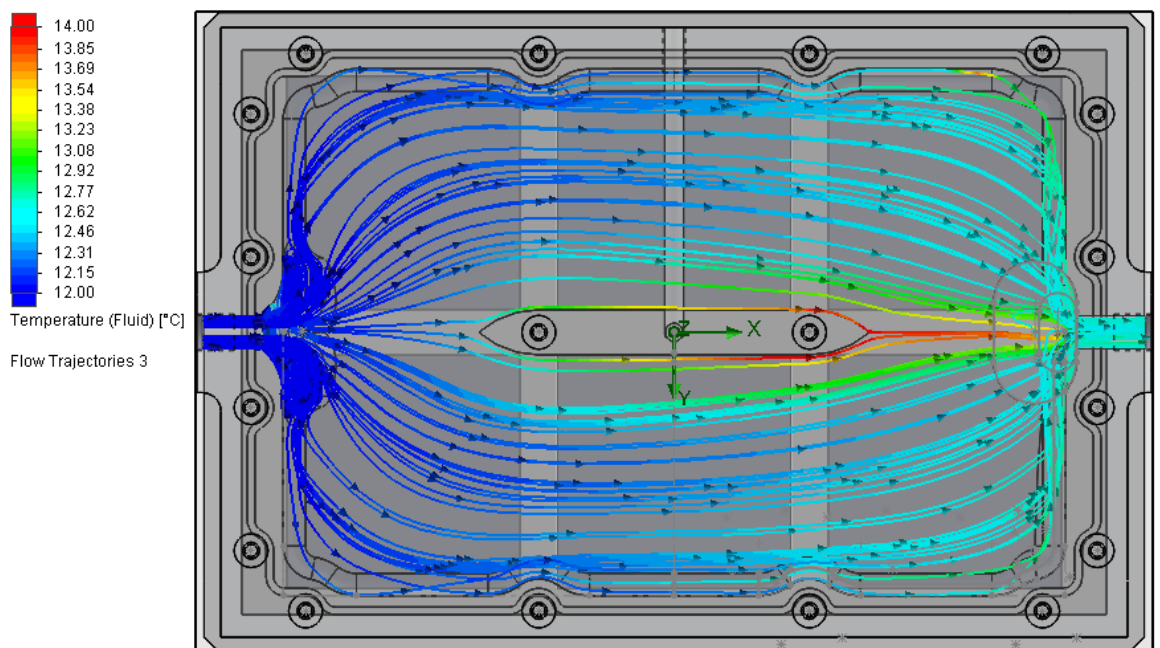
Obr. 105. Přední a levý pohled na sestavu výměníku

Při průtoku $0,0002 \text{ m}^3/\text{s}$ jsou trajektorie rozprostřeny po celé ploše výměníku a dochází tedy k rovnoměrnému odvodu tepla. Zobrazená maximální rychlost proudění je 1 m/s .



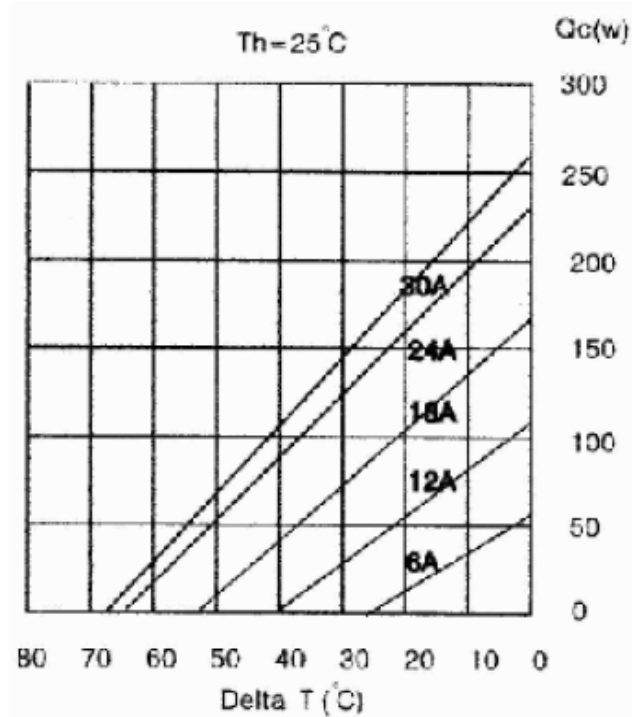
Obr. 106. Rozložení rychlostí proudění při průtoku $0,0002 \text{ m}^3/\text{s}$

Teplota vody má na vstupu 12°C a na výstupu $12,6^\circ\text{C}$. V maximech dochází k ohřevu na 14°C . Dochází tedy k ohřátí v průběhu toku dutinou výměníku v průměru o $0,6^\circ\text{C}$, viz obr. 107.



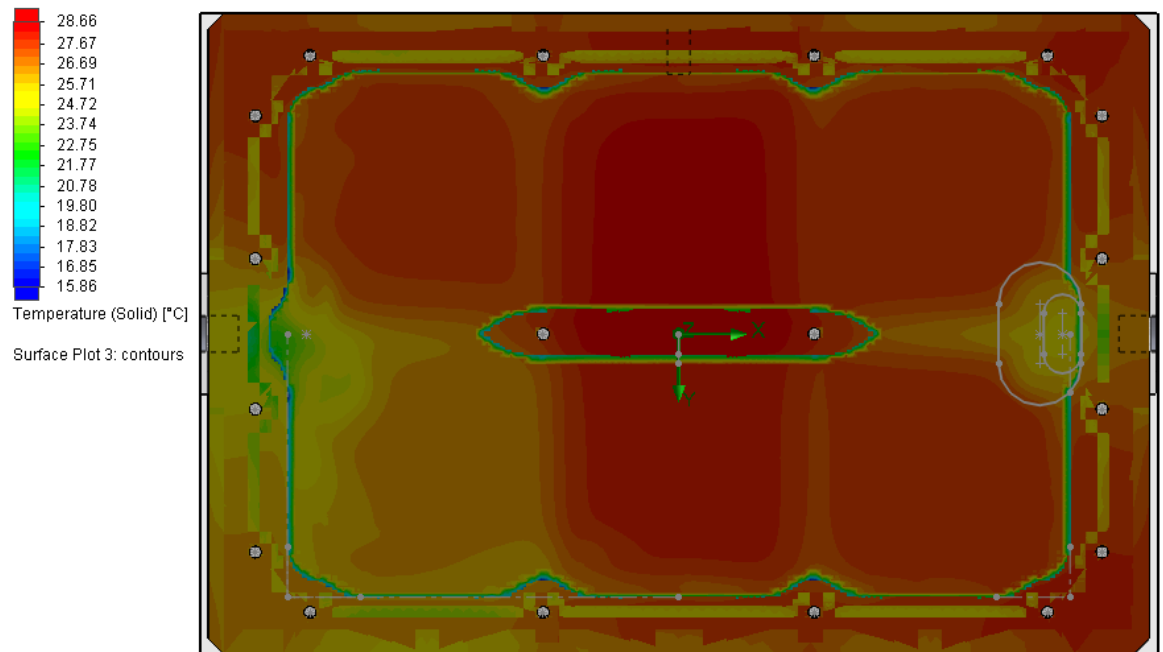
Obr. 107. Rozložení teploty vody

Z příložené dokumentace technických parametrů Peltierova článku vyplývá, že pokud udržíme pracovní teplotu na 25°C při proudu 12A, pohybuje se ΔT při nulovém přenášeném výkonu okolo 40°C viz obr.

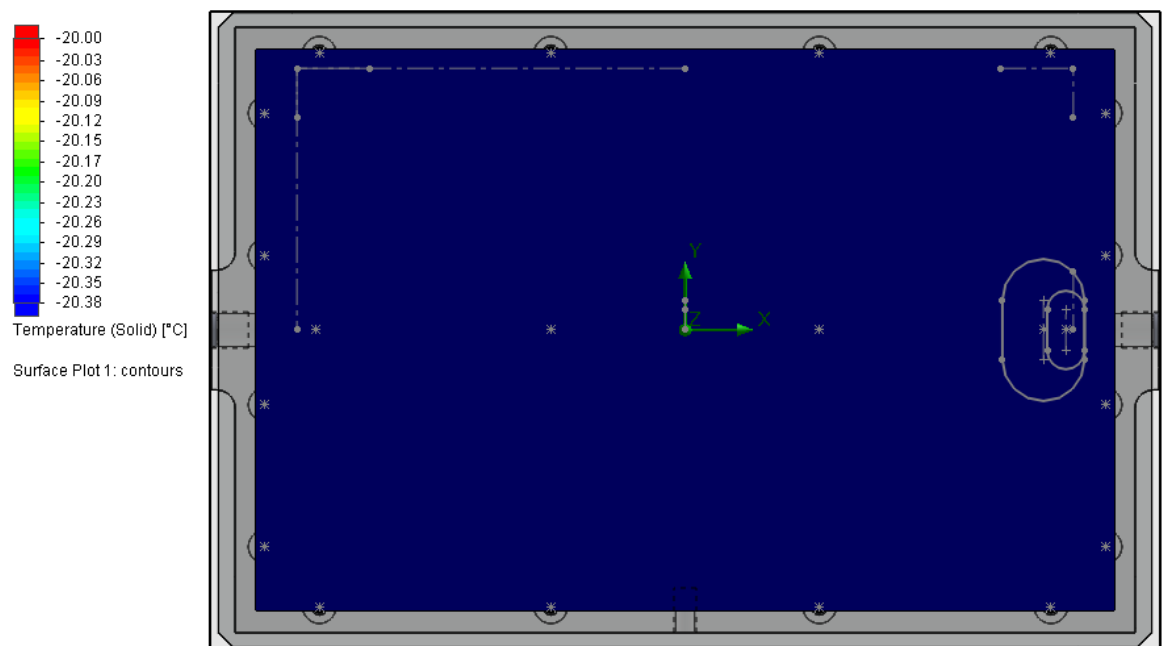


Obr. 108. Graf teplot Peltierova článku

V tomto případě bylo při proudu 12A dosaženo na teplejší straně teploty okolo 28°C viz obr. 109. a na straně chladnější -20°C viz obr. 110. při pracovní teplotě tekutiny 12°C což zhruba odpovídá hodnotám uvedených výrobcem s ohledem na poznatek, že příložené grafy vytvořené výrobcem jsou pro pracovní teplotu 25°C.

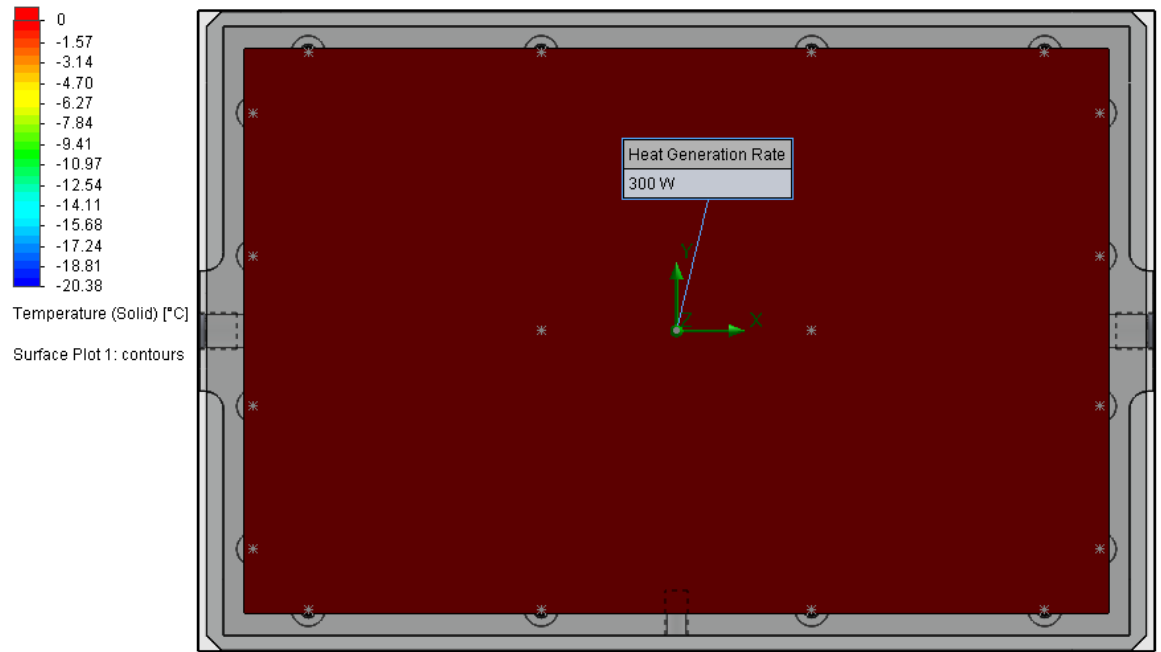


Obr. 109. Rozložení teplot na teplejší straně



Obr. 110. Rozložení teplot na chladnější straně

Z grafu viz obr. 108. vyplývá, že při nastavení zatížení tepelným výkonem 300W, je na jednom článku zatížení 50W a teplota dosahuje 0°C na ochlazované straně viz obr. 111.



Obr. 111. Rozložení teploty při zatížení 300W

12 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Konstrukční návrh výměníku číslo 1 byl zkonstruován na principu symetrického vtoku a výtoku. Při samotné simulaci se ukázalo, že nejsou dostatečně obtékány rohy výměníku ani středový ostrůvek. Bylo navrženo několik variant řešení. První čtyři varianty využívají tzv. vložených prvků do dutiny výměníku, s jejíž pomocí došlo k ovlivnění rovnoměrnosti toku tekutiny. Ani jedna z vypočtených simulací ovšem nebyla optimální, jelikož zde vznikala slepá místa, kam tekutina nezatékala téměř vůbec, nebo vznikaly víry v oblastech obtékání vložených prvků. Největším problémem je ovšem plocha vložených prvků, která zmenšuje velikost celkové teplosměnné plochy. Z těchto důvodů bylo v dalších variantách využito vodících kanálků a drážek, které netvoří tekutině překážky jako v předešlých variantách, ale spíše ji navádí do míst, kde dochází k nedostatečnému toku. Tyto varianty dosáhly dobrých výsledků v oblasti rovnoměrnosti toku ve střední části a v pravých rozích. Ve vstupní části, ale u všech variant vzniká mohutný vír, který vrací tekutinu zpět do vtoku a zcela ovlivňuje proudění v levé části výměníku.

U návrhu číslo 2 byly využity poznatky z předešlých variant a byl konstrukčně pozměněn tvar vtoku a výtoku, který je opět jako u návrhu číslo 1 symetrický. Z výsledků simulací u této varianty je jasně patrné, že hlavní vliv na rovnoměrnost toku v dutině výměníku má tvar vtokové části.

Konstrukční návrh číslo 3 byl tedy navrhnout jako asymetrický. Na základě výsledků z návrhu číslo 1 a 2 byl tvar vtokové části zkonstruován na podobném principu, jako fungují lopatky u Peltonovy turbíny. Tvar výtoku byl ponechán stejný jako v návrhu číslo 1. U tohoto typu byly provedeny 3 varianty a ze simulací vyplývá, že nejvhodnějším tvarem je varianta číslo 2. Obtékání středového ostrůvku pomocí offsetového kanálku výrazně nezlepšuje proudění v této oblasti, a proto je zbytečné jej tam konstrukčně přidávat.

Varianta 2 u konstrukčního návrhu číslo 3 dosahuje optimálního rovnoměrného toku po celé ploše výměníku a byla proto vybrána jako nejvhodnější ke kontrole činnosti výměníku.

ZÁVĚR

V teoretické části této práce jsou shrnuty dostupné informace o sdílení tepla a Peltierových článcích a základní informace o tepelných výměnících. Návrh, konstrukce a výpočty výměníků je velice obsáhlé téma, které by tato diplomová práce nebyla schopna pojmout, proto jsou zde uvedeny jen základní informace, rozdělení výměníků a schematické znázornění výpočtu.

Praktickou část lze rozdělit do několika částí. Prvním krokem bylo nalézt takový Peltierův článek, aby splňoval požadavky snadné dostupnosti, výhodné ceny a potřebného výkonu. Dle parametrů vybraného Peltierova článku bylo dalším krokem navrhnout a zkonstruovat celou sestavu obsahující výměník, Peltierovy články a vodící desky tak, aby bylo pokud možno vše vyrobitelné v prostorách dílen Univerzity Tomáše Bati.

Nejobsáhlejší a zároveň časově nejnáročnější částí bylo navrhnout dutinu tepelného výměníku tak, aby docházelo k rovnoměrnému toku tekutiny po celém objemu dutiny a tím pádem ke správné funkčnosti navazujících Peltierových článků. Kompletní dokumentace všech testovaných konstrukčních variant je archivována na přiloženém DVD.

Z navržených variant a vypočtených simulací bylo zjištěno, že největší vliv na rovnoměrnost toku tekutiny má vliv geometrie vtoku. Nejvhodnějším řešením vyplývajícím z této diplomové práce je konstrukční návrh dutiny číslo 3, který využívá principu asymetrického vtoku a výtoku. Tvar vtoku byl navrhnout a zkonstruován s využitím znalostí o tvaru lopatek Peltonových turbín. Poté co bylo z provedených simulací patrné, že tvar výtoku má minimální vliv na rovnoměrnost toku, byla jeho geometrie ponechána stejná jako u návrhu číslo 1.

Posledním krokem byl kontrolní výpočet celé sestavy výměníku, ze kterého je patrné, že při daném průtoku $0,0002 \text{ m}^3/\text{s}$ dochází k rovnoměrnému odvodu tepla z povrchu Peltierových článků. Výsledný chladicí účinek je v souladu s grafickými závislostmi uvedenými v technické dokumentaci Peltierova článku TEC1-12730.

Pro kontrolu dat a jejich zpřesnění před samotnou výrobou by bylo vhodné zvýšit přesnost výpočtu minimálně na 5 nebo zkontrolovat data pomocí jiného softwaru.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HEJZLAR, R.; Termodynamika. 5. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, 166s. ISBN 978-80-01-0450-4
- [2] CIBULKA, I.; HNĚDKOVSKÝ, L.; HYNEK, V. Základní fyzikálně-chemické veličiny a jejich měření. [online], 2006. vyd., [cit. 15. 1. 2014]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/fch/cz/pomucky/FCHV_all_7.pdf>
- [3] GRUBER, J.; Základní zákony termodynamiky. [online], 1999. vyd. [cit. 5. 11. 2013]. Dostupné z: <http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/td/td_teach.pdf>
- [4] PAVELEK, M.; Termomechanika. 3. vyd. přeprac. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 284s. ISBN 80-214-2409-5
- [5] SSPU-Slovenská spoločnosť pre povrchové úpravy: Termodynamické viety. [online], [cit. 15. 10. 2013]. Dostupné z: <http://www.sspu.sk/attf/02_03_ATTf.pdf>
- [6] WIKIPEDIA the free encyclopedia: Tepelná výměna. [online]. [cit. 10. 2. 2014]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1_v%C3%BDm%C4%9Bna>
- [7] JÍCHA, M.; Přenos tepla a látky. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 160s. ISBN 80-214-2029-4
- [8] BLAHOŽ, V.; Základy sdílení tepla. 2. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2000, 109s. ISBN 80-902001-1-7
- [9] HOLEČEK, O.; ŠNITA, D.; Sdílení tepla. [online], 2005. vyd. [cit. 20. 1. 2014]. Dostupné z: <<http://www.vscht.cz/uchi/ped/bc05/07.sdileni.tepla.pdf>>
- [20] WIKIPEDIA the free encyclopedia: Kapalnění. [online]. [cit. 10. 2. 2014]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Var>>
- [31] WIKIPEDIA the free encyclopedia: Var. [online]. [cit. 10. 2. 2014]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Kapaln%C4%9Bn%C3%AD>>
- [42] HASAL, P.; SCHREIBER, L.; ŠNITA, D.; Chemické inženýrství I. 2. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2007, 350S. ISBN 978-80-7080-002-7
- [53] JIROUŠ, F.; Aplikovaný přenos tepla a hmoty. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, 207s. ISBN 978-80-01-04514-5

- [64] ŠESTÁK, J.; ŽITNÝ, R. Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev. 2. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006, 165s. ISBN 80-01-03475-5
- [75] JANÁČOVÁ, D.; Sdílení tepla. Studijní materiály UTB Zlín k předmětu Procesní inženýrství I
- [86] ŠVARNÝ, J.; Vliv zvlnění napájecího proudu na účinnost termoelektrické baterie. [online] Plzeň: Západočeská univerzita, 2007. 192-195s. [cit. 30. 10. 2013] ISBN 978-80-7043-557-1 Dostupné z: <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/16.pdf>>
- [97] MIKYŠKA, L.; Termoelektrické články. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. 154s. ISBN 301-05-35
- [108] REICHL, J.; VŠETIČKA, M.; Peltierův jev. [online]. [cit. 2. 11. 2013]. Dostupné z: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>>
- [119] BUREŠ, J.; Seebeckův jev. [online]. [cit. 5. 12. 2013]. Dostupné z: <<http://www.converter.cz/tabulky/seebeck.htm>>
- [20] NEUŽIL, L.; MÍKA, V. Chemické inženýrství I. 2. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1998, 464s. ISBN 80-7080-312-6
- [21] ŠNITA, D.; Chemické inženýrství I. 1. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005, 318s. ISBN 80-7080-589-7
- [22] NOŽIČKA, J.; Základy termomechaniky. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 187s. ISBN 80-01-02409-1
- [23] SCHREIBEROVA, L.; Chemické inženýrství I. 3. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2001, 294s. ISBN 978-80-7080-778-1
- [24] IOFFE, A. F.; Fysika polovodičů. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. 474s. ISBN 537-311-33
- [25] EDUTORIUM: Termoelektrické jevy. [online]. [cit. 2. 11. 2013]. Dostupné z: <http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b747269636bfd2070726f7564h&key=401>
- [26] AUTOMA Časopis pro automatizační techniku: Regulace teploty pomocí Peltierových termoelektrických modulů. [online]. 2005. vyd. [cit. 12. 10. 2013]. Dostupné z: <<http://www.odbornecasopisy.cz/automa-36107.html>>

- [27] BRÁZDIL, M.; Peltierův článek pro chlazení malých výkonů. [online]. 2009. vyd. Brno. [cit. 3. 1. 2014]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/9794/BP_Brazdil_Marian.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [28] ROHS: Co je ROHS ?. [online]. [cit. 12. 12. 2013]. Dostupné z: <<http://www.rohs.cz/>>
- [29] RMT: Thermoelectric cooling modules. [online]. [cit. 2. 1. 2014]. Dostupné z: <<http://www.rmtltd.ru/products/temodules/>>
- [30] COPTEL Elektrotechnika: Využití Peltierova jevu. [online]. [cit. 3. 2. 2014]. Dostupné z: <<http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=7972>>
- [31] MICROPELT: Thermo Harvesting Module. [online]. [cit. 13. 1. 2014]. Dostupné z: <http://www.micropelt.com/te_core.php>
- [32] ROWE, D. M.; CRC Handbook of Thermoelectrics. BocaRaton, FL: CRC Press, 1995, 701s. ISBN 08-493-0146-7
- [33] HW: Peltierovy termobaterie 4. [online]. [cit. 13. 2. 2014]. Dostupné z: <<http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie-4.html>>
- [34] RMT: Series of single and multistage temodules . [online]. [cit. 5. 10. 2013]. Dostupné z: <<http://www.rmtltd.ru/products/temodules/md/04/>>
- [35] WIKIPEDIA the free encyclopedia: Peltierův článek. [online]. [cit. 10. 2. 2014]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Peltier%C5%AFv_%C4%8DI%C3%A1nek>
- [36] BACKSTROM, M.; Technika chlazení. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959, 680s.
- [37] TZB-INFO: Chladicí oběhy, trigenerace, dálkové chlazení. [online]. 2011. vyd. [cit. 10. 3. 2014]. Dostupné z: <<http://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/7910-chladici-obehy-trigenerace-dalkove-chlazení>>
- [38] SULTRADE: Kompresorové chladicí jednotky. [online]. [cit. 10. 1. 2014]. Dostupné z: <<http://www.sultrade.cz/prumyslove-chlazení-a-klimatizace/kompresorove-chladici-jednotky-se-sroubovymi-kompresory-bitzer/>>
- [39] PLTEP Plzeňská teplárenská: Kniha o systému centralizovaného zásobování teplem. [online]. [cit. 5. 3. 2014]. Dostupné z: <http://www.pltep.cz/upload/File/kniha_o_sczt.pdf>

- [40] GB Consulting: Co je absorpční chlazení. [online]. [cit. 10. 4. 2014]. Dostupné z:
<<http://www.gbconsulting.cz/chlazení-prednosti.html>>
- [41] POLYKARBONATY: Plexisklo (PMMA) desky. [online]. [cit. 8. 3. 2014].
Dostupné z: <<http://www.polykarbonaty.cz/produkty-ceniky/plexisklo>>
- [42] HB: Thermoelectric Cooler TEC1-12730. [online]. [cit. 22. 3. 2014]. Dostupné z:
<<http://www.hebeiltd.com.cn/peltier.datasheet/TEC1-12730.pdf>>
- [43] MVE: Peltonova turbína. [online]. [cit. 10. 4. 2014]. Dostupné z:
<<http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/pelton.htm>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

S	entropie
Q	teplo
T	teplota
dU	vnitřní energie soustavy
dA	práce
η	účinnost
q_x	měrný tepelný tok
λ	součinitel tepelné vodivosti
\dot{Q}	tepelný tok
δ	tloušťka
l	délka
d	průměr
α	součinitel přestupu tepla
a	teplotní vodivost
τ	čas
ν	kinematická viskozita
η	dynamická viskozita
c	měrná tepelná kapacita
g	gravitační zrychlení
β	koeficient teplotní objemové roztažnosti
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta
ε	poměrná zářivost
r	měrný elektrický odpor
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances
TEC	Thermoelectric Cooler

TEG	Thermoelectric Generator
CCD	Charge-Coupled Device
TEMA	Tubular Exchanger Manufacturers Association
LMTD	Logarithmic Mean Temperature Difference
NTU	Number of Transfer Unit
PMMA	Polymethylmetakrylát

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Diagram T-S</i>	15
<i>Obr. 2. Tepelný cyklus motoru</i>	16
<i>Obr. 3. Schéma rovinné stěny</i>	18
<i>Obr. 4. Schéma válcové stěny[15]</i>	19
<i>Obr. 5. Hydrodynamická mezní vrstva</i>	20
<i>Obr. 6. Tepelná mezní vrstva</i>	20
<i>Obr. 7. Schéma sdílení tepla prouděním</i>	21
<i>Obr. 8. Rozdělení konvekce</i>	24
<i>Obr. 9. Filmová a kapková kondenzace[15]</i>	25
<i>Obr. 10. Fázová přeměna – var[15]</i>	25
<i>Obr. 11. Druhy průřezů</i>	26
<i>Obr. 12. Kompozitní křivky horkých a chladných proudů[14]</i>	30
<i>Obr. 13. Uspořádání proudů[13]</i>	31
<i>Obr. 14. Výměníky typu trubka v trubce[14]</i>	32
<i>Obr. 15. Výměník shell and tube[14]</i>	32
<i>Obr. 16. Výměníky dle klasifikace TEMA[14]</i>	33
<i>Obr. 17. Fieldův výměník [14]</i>	33
<i>Obr. 18. Deskové výměníky[14]</i>	34
<i>Obr. 19. Tok tekutin[15]</i>	35
<i>Obr. 20. Schéma prostupu tepla rovinná deska[15]</i>	36
<i>Obr. 21. Průběh teplot ve výměnících[15]</i>	37
<i>Obr. 22. Rozdělení teplot ve výměnících tepla</i>	39
<i>Obr. 23. Účinek výměníku</i>	41
<i>Obr. 24. Porovnání výměníku tepla</i>	42
<i>Obr. 25. Seebeckův jev</i>	43
<i>Obr. 26. Seebeckova řada</i>	44
<i>Obr. 27. Peltierův jev</i>	45
<i>Obr. 28. Ohřev a chlazení při Peltierově jevu</i>	45
<i>Obr. 29. Peltierův článek</i>	46
<i>Obr. 30. Konstrukce Peltierova článku</i>	48
<i>Obr. 31. Peltierův modul[18]</i>	49
<i>Obr. 32. Konstrukce kaskád</i>	49

<i>Obr. 33. Rozdělení termočlánků</i>	50
<i>Obr. 34. Typy článků.....</i>	51
<i>Obr. 35. Mechanické spojení[34]</i>	53
<i>Obr. 36. Spojení pomocí pájení</i>	53
<i>Obr. 37. Spojení pomocí lepení</i>	54
<i>Obr. 38. Kompresorové chlazení[38]</i>	57
<i>Obr. 39. Absorpční chlazení</i>	58
<i>Obr. 40. Peltierův článek TEC1-12730</i>	62
<i>Obr. 41. Geometrie Peltierova článku</i>	63
<i>Obr. 42. Izometrický pohled na výměník</i>	64
<i>Obr. 43. Základní geometrie výměníku.....</i>	65
<i>Obr. 44. Tvorba a pojmenování nové simulace</i>	66
<i>Obr. 45. Nastavení jednotek</i>	66
<i>Obr. 46. Výběr tekutiny.....</i>	67
<i>Obr. 47. Nastavení přesnosti výpočtu</i>	67
<i>Obr. 48. Nastavení výpočetní oblasti.....</i>	68
<i>Obr. 49. Nastavení okrajových podmínek vtoku</i>	68
<i>Obr. 50. Nastavení okrajových podmínek výtoku</i>	69
<i>Obr. 51. Nastavení cílů výpočtu.....</i>	69
<i>Obr. 52. Návrh č. 1 symetrický vtok a výtok</i>	70
<i>Obr. 53. Geometrie návrhu č. 1</i>	71
<i>Obr. 54. Simulace návrhu č. 1</i>	71
<i>Obr. 55. Varianta 1</i>	72
<i>Obr. 56. Simulace varianty 1</i>	73
<i>Obr. 57. Varianta 2.....</i>	73
<i>Obr. 58. Simulace varianty 2</i>	74
<i>Obr. 59. Varianta 3.....</i>	74
<i>Obr. 60. Simulace varianty 3</i>	75
<i>Obr. 61. Varianta 4.....</i>	75
<i>Obr. 62. Simulace varianty 4</i>	76
<i>Obr. 63. Varianta 5.....</i>	77
<i>Obr. 64. Geometrie varianty 5.....</i>	77
<i>Obr. 65. Simulace varianty 5.....</i>	78

<i>Obr. 66. Varianta 6</i>	78
<i>Obr. 67. Geometrie varianty 6</i>	79
<i>Obr. 68. Simulace varianty 6</i>	79
<i>Obr. 69. Varianta 7</i>	80
<i>Obr. 70. Geometrie varianty 7</i>	80
<i>Obr. 71. Simulace varianty 7</i>	81
<i>Obr. 72. Varianta 8</i>	82
<i>Obr. 73. Geometrie varianty 8</i>	82
<i>Obr. 74. Simulace varianty 8</i>	83
<i>Obr. 75. Varianta 9</i>	84
<i>Obr. 76. Geometrie varianty 9</i>	84
<i>Obr. 77. Simulace varianty 9</i>	85
<i>Obr. 78. Varianta 10</i>	86
<i>Obr. 79. Geometrie varianty 10</i>	86
<i>Obr. 80. Simulace varianty 10</i>	87
<i>Obr. 81. Varianta 11</i>	87
<i>Obr. 82. Geometrie varianty 11</i>	88
<i>Obr. 83. Simulace varianty 11</i>	88
<i>Obr. 84. Varianta 12</i>	89
<i>Obr. 85. Geometrie varianty 12</i>	89
<i>Obr. 86. Simulace varianty 12</i>	90
<i>Obr. 87. Varianta 1</i>	91
<i>Obr. 88. Varianta 1 izometrický pohled</i>	92
<i>Obr. 89. Geometrie varianty 1</i>	92
<i>Obr. 90. Simulace varianty 1</i>	93
<i>Obr. 91. Princip Peltonovy turbíny</i>	94
<i>Obr. 92. Tvar lopatek Peltonovy turbíny</i>	95
<i>Obr. 93. Varianta 1</i>	95
<i>Obr. 94. Řez předním pohledem – zkosení drážky podél obrysu dutiny</i>	95
<i>Obr. 95. Řez pohledem z leva – zkosení drážky směrem z vtoku</i>	96
<i>Obr. 96. Řez předním pohledem – detail vtoku 3D</i>	96
<i>Obr. 97. Detail vtoku</i>	96
<i>Obr. 98. Simulace varianty 1</i>	97

<i>Obr. 99. Varianta 2</i>	97
<i>Obr. 100. Detail vtoku varianty 2</i>	98
<i>Obr. 101. Simulace varianty 2</i>	98
<i>Obr. 102. Varianta 3</i>	99
<i>Obr. 103. Simulace varianty 3</i>	99
<i>Obr. 104. Sestava výměníku</i>	101
<i>Obr. 105. Přední a levý pohled na sestavu výměníku</i>	101
<i>Obr. 106. Rozložení rychlostí proudění při průtoku $0,0002 \text{ m}^3/\text{s}$</i>	102
<i>Obr. 107. Rozložení teploty vody</i>	102
<i>Obr. 108. Graf teplot Peltierova článku</i>	103
<i>Obr. 109. Rozložení teplot na teplejší straně</i>	104
<i>Obr. 110. Rozložení teplot na chladnější straně</i>	104
<i>Obr. 111. Rozložení teploty při zatížení 300W</i>	105

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Typy výměníků	2
Tabulka 2. Technické parametry Peltierova článku.....	62

SEZNAM PŘÍLOH

VIZ PŘILOŽENÝ DVD DISK

