



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

REGENERACE ODPADNÍHO TEPLA POMOCÍ VÝMĚNÍKU TEPLA

HEAT EXCHANGER FOR WASTE HEAT UTILIZATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Šimon Švach

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Špiláček, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Šimon Švach**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Špiláček, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Regenerace odpadního tepla pomocí výměníku tepla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Využití nízkopotenciálního odpadního tepla je jedna z možností jak zlepšit ekologii a účinnost různých průmyslových i domácích aplikací. Problematická je ale ekonomická stránka věci, protože nízký rozdíl teplot mezi zúčastněnými médii má vliv na velikost zařízení a tím pádem na jeho umístění a cenu.

Cíle bakalářské práce:

- literární rešerše,
- výběr vhodné aplikace,
- návrh výměníku tepla,
- ekonomické posouzení.

Seznam doporučené literatury:

SRDEČNÝ, K. a J. TRUXA. Tepelná čerpadla. 2., aktualiz. vyd. Brno: ERA, 2007. 21. století. ISBN 978-80-7366-089-5.

BALÁŠ, M. Kotle a výměníky tepla. Vydání třetí. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno, 2019. ISBN 978-80-214-5769-0.

KUPPAN, T. Heat exchanger design handbook. Second edition. Boca Raton: CRC Press, [2013]. ISBN 978-143-9842-126.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá regenerací odpadního tepla pomocí tepelného výměníku. Cílem práce bylo navrhnout tepelný výměník pro využití teplé vody z chlazení koncentrátorového fotovoltaického panelu. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části byla zpracována literární rešerše týkající se regenerace tepla a fotovoltaiky. V praktické části byl navrhnout tepelný výměník pro konkrétní řešení.

Klíčová slova

Odpadní teplo, tepelný výměník, koncentrátorová fotovoltaika, ohřev vody

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with waste heat recovery using a heat exchanger. The aim of the thesis was to design a heat exchanger for the recovery of hot water from the cooling of a concentrator photovoltaic panel. The thesis is divided into theoretical and practical parts. In the theoretical part, a literature research on heat recovery and photovoltaics was carried out. In the practical part, a heat exchanger has been designed for a specific solution.

Key words

Waste heat, heat exchanger, concentrated photovoltaics, water heating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠVACH, Šimon. *Regenerace odpadního tepla pomocí výměníku tepla*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141642>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Michal Špiláček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Regenerace odpadního tepla pomocí výměníku tepla** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto mému vedoucímu Ing. Michalovi Špiláčkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále děkuji své rodině za podporu při studiu.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1. VÝBĚR APLIKACE.....	12
2. REGENERACE ODPADNÍHO TEPLA.....	15
2.1 Klasifikace odpadního tepla a zdrojů.....	15
2.2 Způsoby využití odpadního tepla.....	16
2.3 Faktory ovlivňující proveditelnost regenerace odpadního tepla.....	17
2.3.1 Množství tepla.....	17
2.3.2 Teplota odpadního tepla.....	17
2.3.3 Složení.....	18
2.3.4 Minimální povolená teplota.....	18
2.3.5 Cena, dostupnost a další faktory.....	19
2.4 Technologie využití odpadního tepla.....	19
3. TEPELNÉ VÝMĚNÍKY.....	20
3.1 Typy výměníků podle proudění médií:.....	20
3.2 Typy výměníků podle konstrukce:.....	21
3.3 Nároky při navrhování výměníku.....	21
3.3.1 Nároky na výměník.....	21
3.3.2 Nároky na pracovní média.....	21
3.4 Poruchy při provozu výměníku.....	22
3.5 Trubkové tepelné výměníky.....	23
3.5.1 Druhy trubkových výměníků.....	24
4. FOTOVOLTAIKA.....	27
4.1 Energie ze Slunce.....	27
4.1.1 Solární podmínky v ČR.....	28
4.2 Fotovoltaický článek.....	30
4.2.1 Princip článku.....	30
4.2.2 Druhy fotovoltaických článků.....	31
4.2.3 Vliv teploty na účinnost.....	33
4.3 Koncentrátorové systémy.....	33
4.3.1 Technologie koncentrace záření.....	34
4.3.2 Výhody a nevýhody koncentrátorové fotovoltaiky.....	35
5. NÁVRH A VÝPOČET VÝMĚNÍKU.....	36
5.1 Vstupní hodnoty.....	36
5.2 Rovnice tepelné bilance.....	36
5.3 Návrh geometrie výměníku.....	38
5.4 Střední teplota stěny trubek.....	40
5.5 Součinitele přestupu tepla.....	42
5.5.1 Součinitel přestupu tepla v TP.....	42
5.5.2 Součinitel přestupu tepla v MP.....	44
5.6 Tlakové ztráty.....	50

5.6.1	Tlakové ztráty v TP	50
5.6.2	Tlakové ztráty v MP	52
5.6.3	Tlakové ztráty třením při příčném obtékání trubek v neopřepážkovaném prostoru svazku	52
5.6.4	Tlakové ztráty třením při příčném obtékání trubek v neopřepážkovaném prostoru	54
5.6.5	Tlakové ztráty třením při podélném a příčném obtékání trubek v prostoru nad seříznutím přepážek	55
5.7	Skutečný výkon a parametry výměníku	56
ZÁVĚR	.....	57
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	.....	58
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	.....	62
SEZNAM OBRÁZKŮ	.....	65
SEZNAM TABULEK	.....	66
SEZNAM PŘÍLOH	.....	67

ÚVOD

Čím dál vyšší spotřeba energií a stoupající emise nás nutí snižovat podíl fosilních paliv mezi zdroji energie a více využívat obnovitelné zdroje. Fotovoltaika je velmi efektivním, bezúdržbovým a bezemisním zdrojem energie. Moderní fotovoltaické systémy mohou obsahovat optickou soustavu, která koncentruje sluneční záření na povrch panelu, čímž se docílí efektivnější výroby elektřiny, ale zároveň dochází k nežádoucímu zvýšení teploty panelu.

Tato práce je zaměřena na využití odpadního tepla odebraného chlazením koncentrátorového panelu. Získané teplo se pomocí výměníku přenese do vody v akumulační nádrži, odkud se bude dále využívat v domácnosti.

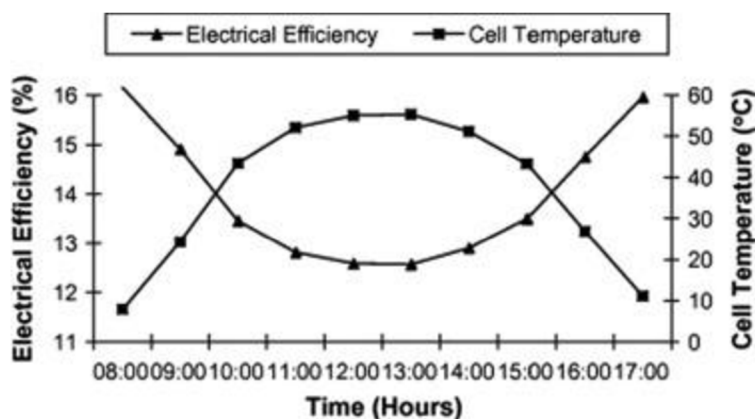
Cílem této práce bylo navrhnout výměník pro zvolenou aplikaci. Při návrhu výměníku je kladen důraz na minimální výsledné rozměry a maximalizaci součinitele prostupu tepla. V prvním kroku byl navrhnout svazek trubek, následně byl zvolen přepážkový systém, aby celé zařízení splňovalo požadovaný výkon a zároveň vyhovělo konstrukčním požadavkům.

1. VÝBĚR APLIKACE

Nízkopotenciální odpadní teplo se vyskytuje téměř všude kolem nás v mnoha různých procesech. Potenciálních zdrojů a možných využití je velké množství, záleží pouze na tom, zda má využití smysl především z ekonomického hlediska a je technicky proveditelné. V současné době je velký tlak na snižování emisí, snižování energetické náročnosti, a proto se technologie využití odpadního tepla stále vyvíjí a implementují do existujících systémů.

Jednu z možností využití odpadního tepla nabízí fotovoltaika. V současné době zažívají fotovoltaické systémy velkým „boom“ a firmy, které je u nás instalují, hlásí, že mají nasmlouváno na více než rok dopředu a nové zakázky nepřijímají. Narůstá i počet tzv. plovoucích fotovoltaických elektráren, které jsou chlazeny vodní plochou, což zvyšuje účinnost panelů a mají řadu dalších výhod. Český energetický gigant ČEZ v nedávné době otestoval pilotní instalaci první plovoucí elektrárny v ČR [37]. Aktuálně akceleruje poptávku po fotovoltaice také rostoucí cena energií a zajištění energetické bezpečnosti vzhledem k probíhajícímu válečnému konfliktu na Ukrajině. Investice do fotovoltaiky tedy bude do budoucna dávat větší smysl, například také díky rostoucí částce, kterou lze na panely získat prostřednictvím dotací, a jejich počet bude narůstat.

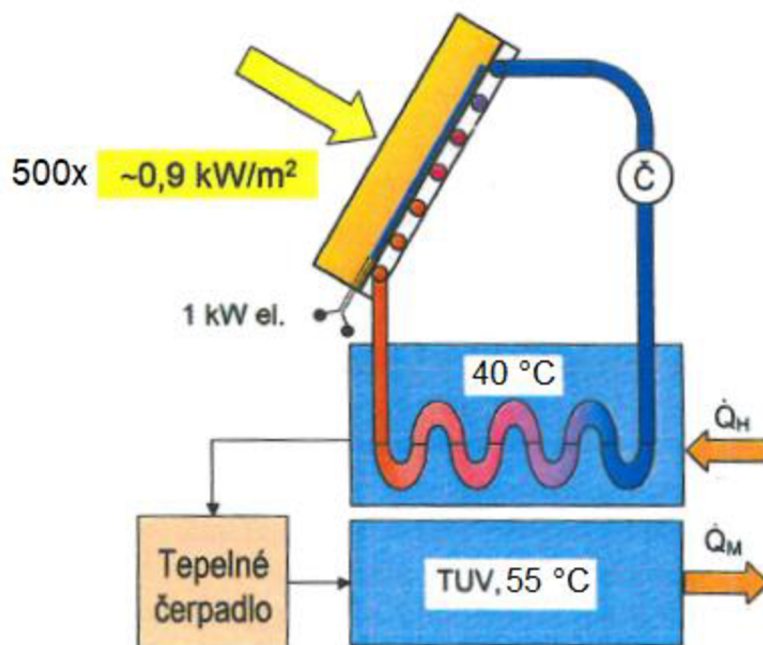
V následujících kapitolách je zmíněna nutnost chlazení fotovoltaiky kvůli klesajícímu výkonu a dlouhodobé životnosti s narůstající teplotou článku v provozu. Téměř 50 % dopadající solární energie se přemění na teplo a teplota článku může být až o 50 °C vyšší než teplota okolí [1]. U koncentrátorové fotovoltaiky je tento problém ještě větší z důvodu vysoké koncentrace záření. Proto je nutné zvolit vhodný systém chlazení. Získané teplo je možné dále využít pro různé aplikace, což zvyšuje celkovou efektivitu celého systému.



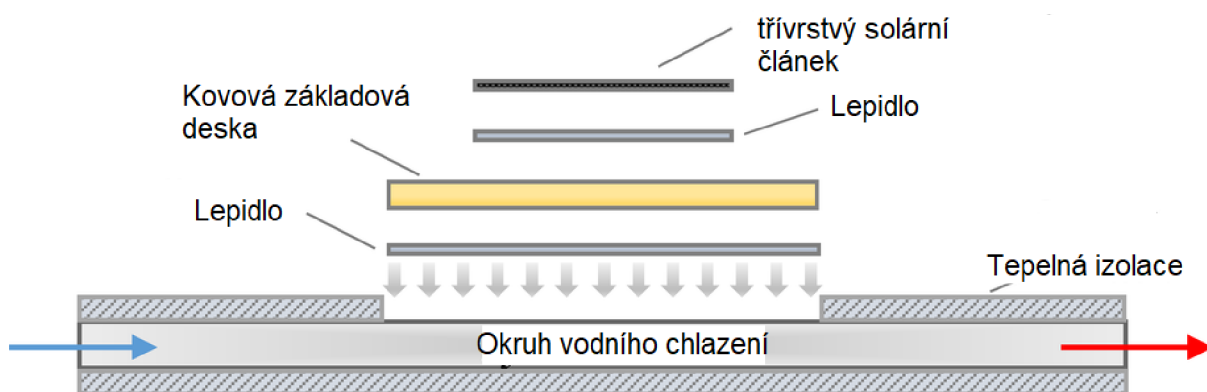
Obr. 1.1 Hodinový průběh teploty článku v letním dni [1]

Pro tuto práci byla zvolena jako aplikace využití odpadního tepla získané chlazením koncentrátorové fotovoltaiky (koncentrační poměr 500x) pro ohřev vody v domácnosti. Panely jsou chlazené ze zadní strany vodním okruhem, který pohání čerpadlo a protéká tepelným výměníkem. Výměník byl zvolen jednochodý trubkový výměník se segmentovými přepážkami. Teplo odebrané panelům se následně pomocí tepelného výměníku přeneseno do vody přitékající z vodovodního řadu, která má podle normy ČSN 06 0320 teplotu 10 °C a podle normy ČSN 75 5401 tlak do 0,6 MPa. Pro využití v domácnosti musí mít voda podle normy mít na výstupu 55 °C. Teplota panelu nesmí překročit 70 °C kvůli výraznému poklesu výkonu za touto hodnotou, výměník proto bude dimenzován na přenesení tepla při této teplotě chladicí vody. Voda, která přitéká z řadu se ohřeje ve výměníku na 35-40 °C, která dále poteče do tepelného čerpadla, kde se dohřeje na požadovanou teplotu 55 °C. Podle Solární asociace byl v roce 2020 průměrný výkon instalovaných solárních elektráren 8,3 kWp [2]. Tato hodnota pravděpodobně reflektuje legislativní omezení na výkon 10 kWp pro domácí solární elektrárny bez nutnosti potřebné licence k provozu. Modelový koncentrátorový fotovoltaický systém byl převzat ze studie [3] a bude zde uvažováno s jeho parametry. Jedná se o modul složený ze 20 třívrstevých (InGaP/InGaAs/Ge) článků s vysokou účinností, který dokáže dodávat elektrický výkon 500 W. Je chlazen měděnými trubkami o průměru 20 mm, které jsou umístěné pod panelem a protéká jimi voda o hmotnostním průtoku 0,055 kg/s, což odpovídá 200 l/h. Tato voda má na výstupu lehce přes 70 °C, což už je teplota vhodná pro vytěžení nízkopotenciálního tepla. Požadovaným cílem bude naplnění akumulární nádrže pro modelový dům se 4 osobami. Dle normy ČSN 06 0320 lze uvažovat potřebu teplé vody ve výši 82 litrů na osobu/den. Pro dům se 4 obyvateli se tedy jedná o potřebu teplé vody 328 litrů. Velikost akumulární nádrže bude 400 litrů, jelikož je třeba počítat s nějakou rezervou. Při instalovaném výkonu 1 kWp by byl potřebný průtok pro chlazení panelu 400 l/h, respektive 0,11 kg/s. Vzhledem k tomu, že se instalace pohybují kolem výkonu 8 kWp, nebylo by pro potřeby domácnosti nutné využívat teplo z celého systému pro ohřev vody, ale jen jeho část. Dále je potřeba zmínit, že dodávka sluneční energie a průběh provozních parametrů fotovoltaiky jsou přes den značně proměnlivé. Výkon panelů, a tedy i výroba teplé vody, po ránu narůstá s rostoucí intenzitou záření, okolo poledne dosahuje maximální hodnoty a odpoledne zase klesá. Většinu času tedy systém pracuje pod špičkovým výkonem a výměník dodává vodu o nižší teplotě a zbývající teplo dodá tepelné čerpadlo. Výměník je dimenzován na maximální výkon, aby byl schopný uchládit panely při maximálním záření a dokázal naplnit akumulární nádrž do jedné hodiny při špičkovém výkonu.

V ideálním případě by systém byl nastaven tak, aby se přes den naakumulovalo co nejvíce tepla pro potřebu domácnosti, která je typicky největší ve večerních hodinách (sprcha, umývání nádobí atd.), a systém by potřebné teplo na požadovanou teplotu dodal tepelným čerpadlem.



Obr. 1.2 Schéma systému [4]
(Upraveno pro uvažované řešení v této práci)



Obr. 1.3 Popis chladicího okruhu ve studii [3]

2. REGENERACE ODPADNÍHO TEPLA

Odpadní teplo se vyskytuje téměř ve všech tepelných a mechanických procesech. Je to teplo, které vzniká kvůli neefektivním zařízením a termodynamickým limitům a opouští technologické procesy bez dalšího využití. Největší podíl ve ztrátách zaujímá průmyslová a energetická výroba. Přesné množství nevyužitého tepla nelze kvantitativně vyjádřit, různé studie ale odhadují, že odpadní teplo představuje 20 až 50 % průmyslové spotřeby energie a 18 až 30 % tohoto tepla je možné znovu efektivně využít. Minimálně stejný význam má energie spotřebovaná při vytápění. V Evropské unii připadá více než polovina celkové spotřeby na vytápění a ohřev vody. Odpadní teplo tedy reprezentuje důležitý, nicméně v současné době málo využívaný zdroj energie. Regenerace odpadního tepla znamená zachycení a opětovné použití této energie pro vytápění, výrobu elektrické energie nebo konání mechanické práce. Technologie využití odpadního tepla pomáhají snížit náklady, spotřebu, zvýšit produktivitu a tím pozitivně ovlivňují i ekologickou stránku procesů. [5], [6]

2.1 Klasifikace odpadního tepla a zdrojů

Zdroje odpadního tepla (nazývané také sekundární zdroje, protože vznikly přeměnou energie ze zdrojů primárních) můžeme rozdělit podle různých charakteristik, jako například původ, forma nebo skupenství. Obecně dělíme zdroje odpadního tepla podle teplotního potenciálu na [6], [7]:

Vysokopotenciální

Teplota odpadního tepla je 650 °C a vyšší. Řadí se zde hutnictví, metalurgie, výroba oceli, sklářský průmysl a průmysl stavebních hmot, oblasti, kde se vyskytují pece a vysoké teploty potřebné pro zpracování surovin. Vysokopotenciální teplo má lepší možnosti využití než středně a nízkopotenciální, na druhou stranu vyžaduje použití kvalitnějších materiálů a jiných technologií regenerace. Nejčastěji se využívá ke předehřevu vzduchu do pece nebo k tvorbě páry. [6], [7]

Středněpotenciální

Teplota odpadního tepla se pohybuje v rozmezí od 232 °C do 650 °C. Typickými představiteli jsou chemický, potravinářský a jiný zpracovatelský průmysl ale i technická zařízení budov. Častou formou jsou výfukové plyny jako produkt přímého spalování. Využívá se například pro předehřev spalovacího vzduchu nebo výrobě elektrické energie. [6], [7]

Nízkopotenciální

Teplota odpadního tepla je 232 °C a nižší. Podle studie [6] tvoří nízkopotenciální teplo až 60 % celkového odpadního tepla, jedná se tak o všudypřítomný zdroj v obrovských množstvích. Nízkopotenciální teplo má menší tepelnou a ekonomickou hodnotu a jeho efektivní využití je často velmi obtížné. Typicky se využívá k vytápění budov nebo k ohřevu vody. [6], [7]

2.2 Způsoby využití odpadního tepla

V poslední době se zvyšují nároky na efektivitu a účinnost energetických procesů a hledání potenciálních aplikací regenerace odpadního tepla. Možnosti využití záleží na povaze konkrétního zdroje. energii získanou regenerací odpadního tepla můžeme využít několika způsoby [6]:

- **Výroba elektřiny** – Odpadní teplo může být využito pomocí ORC (Organického Rankinova cyklu) k výrobě elektrické energie. Systém využívá kapaliny s nízkým bodem varu a vysokotlakou páru, která expanduje na turbíně. Ukázalo se, že použití organické pracovní kapaliny umožňuje využít i nízkopotenciální teplo k výrobě elektrické energie. [8]
- **Výroba chladu** – Využívá se absorpčního cyklu, při kterém se rozpouští plyn v kapalině. Odpadní teplo se zde využívá k vypaření absorbátu, v tomto případě vody.
- **Výroba tepla** – Velmi často se odpadní teplo využívá k výrobě tepla. Konkrétně k přehřevu procesního vzduchu, vytápění podniků a budov nebo k ohřevu užitkové vody. Nízkopotenciální teplo se může také pomocí absorpčního tepelného čerpadla posunout na vyšší teplotní úroveň.
- **Trigenerace** – Tato technologie kombinuje výrobu tepla, chladu a elektřiny zároveň. Podstatou je spojení kogenerační jednotky s absorpční chladicí jednotkou. Výhodou je využití tepla i mimo topnou sezonu, čímž se prodlužuje doba chodu jednotky.

2.3 Faktory ovlivňující proveditelnost regenerace odpadního tepla

Vyhodnocení proveditelnosti regenerace odpadního tepla vyžaduje znalost parametrů zdroje tepla a příjemce, tedy jakého účinku chceme dosáhnout. Důležité faktory, které je třeba brát v potaz jsou:

1. Množství tepla
2. Teplota odpadního tepla
3. Složení
4. Minimální povolená teplota
5. Cena, dostupnost a další faktory

Tyto parametry umožňují analyzovat kvalitu a kvantitu odpadního tepla a také přiblížit možné konstrukční a materiálové omezení. Například koroze způsobená teplotním médiem může být rozhodující prvek v rozhodnutí, zda technologii instalovat či nikoliv. [6]

2.3.1 Množství tepla

Jde o kvantitativní parametr, vyjadřuje, kolik tepla ze zdroje je možné využít. Je možné ho určit pomocí rovnice tepelného toku:

$$\dot{Q} = S * v * \rho * c_p * \Delta T \quad (2.1)$$

kde

- \dot{Q} ...tepelný tok [W]
- S ...plocha průřezu [m²]
- v ...rychlost proudění [m/s]
- ρ ...hustota [kg/m³]
- c_p ...měrná tepelná kapacita [J/kg*K]
- ΔT ...rozdíl teplot médií [K]

Ačkoliv je množství využitelného tepla důležitým parametrem, není možné jen podle něj efektivně zhodnotit využitelnost odpadního tepla. Musíme posoudit i jeho kvalitu, která je stanovena jeho teplotou. [6]

2.3.2 Teplota odpadního tepla

Velice důležitým faktorem při posuzování využitelnosti odpadního tepla je jeho teplota. Teplota se může výrazně lišit podle zdroje od chladicí vody (40-90 °C) až po sklářské pece, kde se teplota pohybuje nad 1000 °C. Velkou roli hraje také rozdíl teplot mezi teplým a studeným médiem, který přímo ovlivňuje jak množství přeneseného tepla na jednotku plochy, tak maximální teoretickou účinnost konverze tepla na jinou formu energie (mechanickou nebo

elektrickou). Maximální účinnost, které je možno dosáhnout je Carnotova účinnost, podle vztahu:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (2.2)$$

kde

η_c ...Carnotova účinnost [-]

T_L ...teplota studeného média [K]

T_H ...teplota teplého média [K]

Rozdíl teplot také ovlivňuje plochu výměníku potřebnou pro přenesení určitého množství tepla, což se projeví v návrhu výměníku. V neposlední řadě má teplota odpadního tepla vliv na výběr materiálu. Korozí a oxidační reakce se akcelerují se zvyšující se teplotou. Pokud zdroj odpadního tepla obsahuje korodující látky, povrch tepelného výměníku může být poškozen. Například ocel začíná při 425 °C oxidovat, nerezová ocel při 650 °C. Vyšší teploty vyžadují použití odolnějších slitin nebo kompozitních materiálů, což se promítne do zvýšení ceny technologie. Alternativou může být ochlazení odpadního tepla do pásma, kdy jej snesou levnější materiály, avšak za cenu snížení kvality tepla. [6]

2.3.3 Složení

Složení pracovní látky přímo neovlivňuje kvantitu ani kvalitu tepla, je ale důležité z hlediska procesu regenerace a volby materiálu. Obsah látek se projeví v tepelné vodivosti a tepelné kapacitě, které mají vliv na efektivitu tepelného výměníku. Na skupenství a chemickém složení pracovní látky záleží množství přeneseného tepla. Hustější tekutiny mají větší součinitele přestupu tepla, což znamená více přeneseného tepla na jednotku plochy při stejném teplotním rozdílu. Do úvahy musíme zařadit také interakci složek pracovních médií a povrchu tepelného výměníku. Častým fenoménem je zanášení tepelného výměníku, které snižuje jeho efektivitu a ovlivňuje proudění. Možností, jak zmírnit následky zanášení je několik, například použití jiného materiálu, filtrace proudu látky odpadního tepla, zvětšení plochy výměníku nebo konstrukce výměníku se snadným přístupem a čištěním. Problému zanášení se ale nelze definitivně vyhnout a je třeba s ním počítat. [6]

2.3.4 Minimální povolená teplota

Minimální teplota je často spojená s korozí materiálu. Podle zdroje můžou výfuky obsahovat oxid uhličitý, vodní páru, sloučeniny dusíku a síry, minerální sloučeniny. Pokud teplota výfuků klesne pod rosný bod, zkondenzovaná tekutina vystaví povrch výměníku účinku

obsažených chemických látek, které mohou nepříznivě ovlivnit chod výměníku. Prevencí je návrh výměníku pro teploty vyšší, než je teplota kondenzace. [6]

2.3.5 Cena, dostupnost a další faktory

Proveditelnost určité aplikace ovlivňuje několik dalších faktorů. Malé projekty mají menší šanci na realizaci, protože nemusí být dostupný dostatečný kapitál. Konečným a v ekonomickém světě rozhodujícím faktorem je tedy cena. Zda bude technologie instalována, záleží na úspoře nákladů. Systémy regenerace většinou totiž nepřinášejí okamžitý zisk, jejich hodnota spočívá ve snížení energetické náročnosti, a tedy vložených financí do provozu. Regenerace zejména nízkopotenciálního odpadního tepla se začne vyplácet až po určité době, aplikace s návratností delší než 3 roky se pravděpodobně nedočkají realizace. Dalším faktorem může být doba, kdy je odpadní teplo dostupné a kdy je potřeba, které se nemusí překrývat. To může záviset na konkrétním podniku a pracovní době. Dále může rozhodovat fyzický přístup ke zdroji odpadního tepla. Instalaci může bránit povaha existujícího zařízení, která znemožňuje připojení systému regenerace odpadního tepla. Posledním zmíněným parametrem je možnost transportu, zatímco horké procesní kapaliny lze lehce přenášet potrubím, pevné zdroje odpadního tepla (ingoty, odlitky) nikoliv. Energie se z pevných materiálů špatně regeneruje, a proto se často nepoužívá, avšak vědcům z Univerzity v Hong Kongu se podařilo obejít Leidenfrostův jev [38], což může do budoucna otevřít nové možnosti. [6],[7]

2.4 Technologie využití odpadního tepla

Metody regenerace odpadního tepla zahrnují přenos energie mezi odpadními plyny nebo tekutinami, případně pevnými látkami, a pracovní látkou výměníku, který vrací energii zpátky do procesu (například předehřev vzduchu nebo vsázky do pecí), nebo se využije k výrobě elektrické energie, konání mechanické práce nebo vytápění. Existuje celá řada technologií zaměřených na regeneraci odpadního tepla. Každá technologie má své výhody i nevýhody, hodí se pro různé teploty a zdroje. [6]

Mezi často používané technologie se řadí například [8]:

- **Tepelné čerpadlo**
- **Tepelný výměník**
- **ORC (Organický Rankinův cyklus)**
- **Tepelná trubice**
- **Termoelektrický generátor**

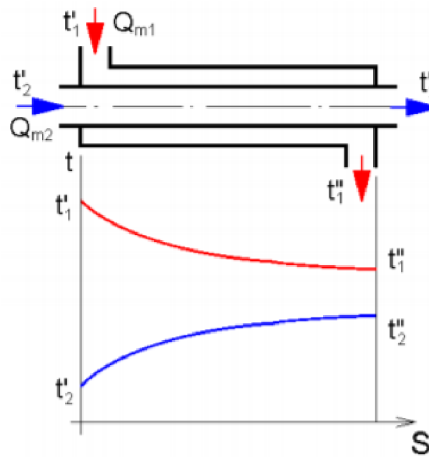
Tato práce je zaměřena na regeneraci odpadního tepla pomocí výměníku. Proto zde budou představeny základní typy a jejich rozdělení.

3. TEPELNÉ VÝMĚNÍKY

Tepelný výměník je zařízení umožňující výměnu tepla mezi dvěma látkami o různé teplotě. Energie je předávána na teplosměnných plochách, přenos probíhá z média teplejšího do média chladnějšího. Můžeme je nalézt v nejrůznějších aplikacích, např. v domácnostech (vytápění ústředním topením), v průmyslu (elektrárny, technologické ohřevy, energetika). Na tepelné výměníky jsou kladeny požadavky zejména nízkých nákladů, hmotnosti, rozměrů a co nejvyšší účinnosti a spolehlivosti v provozu. V kapitole jsou použity zdroje [9], [10].

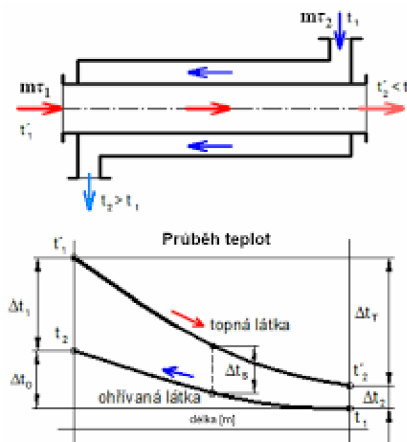
3.1 Typy výměníků podle proudění médií:

1. **Souproudý** – obě média proudí stejným směrem



Obr. 3.1 Souproudý výměník [11]

2. **Protiproudý** – média proudí vůči sobě opačným směrem, dosahuje lepší účinnosti než souproudý výměník



Obr. 3.2 Protiproudý výměník [12]

3.2 Typy výměníků podle konstrukce:

1. Trubkový výměník
2. Deskový výměník
3. Kotlový výměník
4. Žebrový výměník
5. Svazkový výměník
6. Šroubový výměník

3.3 Nároky při navrhování výměníku

Cílem konstrukčního návrhu výměníku je dosáhnout co nejlepšího přenosu tepla a zároveň co nejvíce snížit pořizovací a provozní náklady. Toho lze docílit výběrem vhodného materiálu, různými úpravami konstrukce a zvolením adekvátního teplotního média. Výsledek je potom přijatelným kompromisem těchto tří postupů. [9]

3.3.1 Nároky na výměník

Při konstrukčním návrhu výměníku je kladen důraz na několik, zpravidla protichůdných, nároků na výměník, jedná se o:

1. Minimalizace rozměrů, hmotnosti a výsledných nákladů
2. Minimalizace tlakových ztrát (snížení požadavků na čerpadla)
3. Zajištění vysoké spolehlivosti v provozu

Požadavky v bodech 1. a 2. si vzájemně odporují, výsledkem návrhu je více variant provedení, které jsou kompromisem obou požadavků. Konstrukteři následně zvolí nejlepší variantu pro konkrétní aplikaci. Dobrá spolehlivost je ovlivněna konstrukcí výměníku a jeho výrobou, dále potom záleží na pravidelných kontrolách a údržbách výměníku. Proto je potřeba, aby bylo možné výměník snadno vyčistit a opravit. [9]

3.3.2 Nároky na pracovní média

Podle zdroje [9] jsou hlavní požadavky na pracovní látky:

- Vysoká měrná tepelná kapacita látky
- Velký součinitel tepelné vodivosti a přestupu tepla
- Přijatelný poměr mezi teplotou varu a tlakem
- Nízká viskozita a tím snížené tlakové ztráty
- Nízká agresivita látky vůči materiálu způsobující korozi

- Nezávadnost z hlediska lidského zdraví
- Dostatečné množství látky v přírodě
- Nízká cena látky

Pro běžné aplikace jsou tyto požadavky splněny vodou a vodní párou. Najdeme u nich ale i negativní efekty, jako je koroze materiálu a zanášení teplosměnných ploch kvůli solím obsaženým ve vodě. V případě použití vody jako pracovní látky je nutné dbát na dostatečný tlak v systému, aby při provozních teplotách nevznikala vodní pára. V konečném důsledku o volbě média rozhoduje výše nákladů na zařízení a provoz. V této práci je jako pracovní médium zvolena voda. [9]

3.4 Poruchy při provozu výměníku

Při používání výměníku se téměř nelze vyhnout přirozeným způsobům vzniku poruch ve výměníku, můžeme je však ovlivnit například volbou materiálu a teplotnosného média nebo také kontrolami a pravidelným čištěním. Jedná se hlavně o:

- **Zanášení:** Podstatou je usazování látek, které jsou obsaženy v pracovních médiích, na povrchu ploch určených k přenosu tepla. Vzniklé nánosy mají zpravidla velmi nízký součinitel tepelné vodivosti, fungují tedy jako izolant a výrazně negativně ovlivňují přenos tepla. Přidruženým negativním efektem usazených látek je zmenšení průřezu průtoku, což má za následek nárůst tlakových ztrát a vyšší nároky na čerpací práci a výkon ventilátorů. Problémy způsobené zanášením mohou vyústit v nejhorším případě prasknutí výměníku a tím dojde k odstavení z provozu. Je tedy vhodné odstraňovat nánosy například mechanickým nebo chemickým čištěním. [9]
- **Koroze:** Dochází k ní vlivem pracovních látek a také je do značné míry ovlivněna kvalitou použitého materiálu při výrobě výměníku. Koroze se projevuje zmenšením stěny trubky a v kombinaci s nánosy, které u malých průměrů mohou podporovat produkty koroze, přispívá ke vzniku poruch ve výměníku. Voda způsobuje korozi zejména kvůli špatnému pH faktoru a nedostatečnému odplynění. [9]
- **Abraze:** K abrazi neboli otěru dochází, pokud teplotnosné médium obsahuje pevné částice, které se při proudění otírají o stěny výměníku a narušují povrch teplosměnných ploch. V největší míře se vyskytuje u spalinových výměníků, kde

vzniká tzv. popílkový otěr. V tomto případě je možné abrazi ovlivnit snížením rychlosti spalin nebo použitím trubek v zákrytu. [9]

V navrhnutém výměníku bude mít výraznější vliv zanášení a koroze. Jako prevence proti korozi byl zvolen materiál výměníku nerezová ocel. Zanášení lze omezit mechanickým čištěním v TP a chemickým čištěním v MP.

3.5 Trubkové tepelné výměníky

Plášťový výměník s rovnými trubkami je nejstarším a nejoblíbenějším typem výměníku díky flexibilitě, kterou má konstruktér k dispozici pro široký rozsah tlaků a teplot. Používají se petrochemickém a potravinářském průmyslu nebo v energetice jako ohřivače napájecí vody a kondenzátory v elektrárnách. Plášťový trubkový výměník se skládá z řady trubek umístěných uvnitř válcového pláště, na kterém jsou přivařeny dvě trubkovnice, do nichž jsou trubky zaválcovány. Pro výrobu trubek se nejčastěji volí ocel nebo mosaz a tloušťka jejich stěn se pohybuje mezi 1,5 a 2,5 mm. Teplejší médium zpravidla proudí rovnými trubkami a chladnější médium proudí v mezitrubkovém prostoru a proudí kolem trubek podélně nebo příčně. Pro lepší přenos tepla se do mezitrubkového prostoru instalují segmentové nebo koncentrické přepážky, které prodlužují dráhu a zpomalují pohyb chladnějšího média a dochází k efektivnějšímu přenosu tepla, na druhou stranu zvyšují tlakové ztráty. Kvůli teplotním vlivům může být výměník vybaven kompenzátorem dilatace délky trubek. [9][10][13]



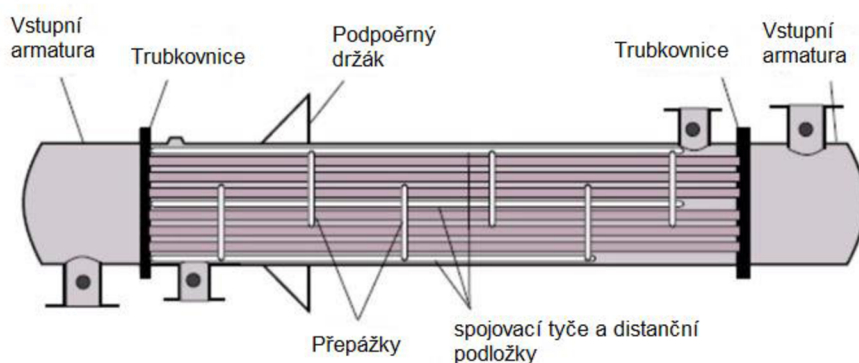
Obr. 3.3 Trubkový výměník [34]

3.5.1 Druhy trubkových výměníků

Trubkové výměníky můžeme rozdělit na několik druhů [9]:

- **Plášťový trubkový výměník s rovnými trubkami**

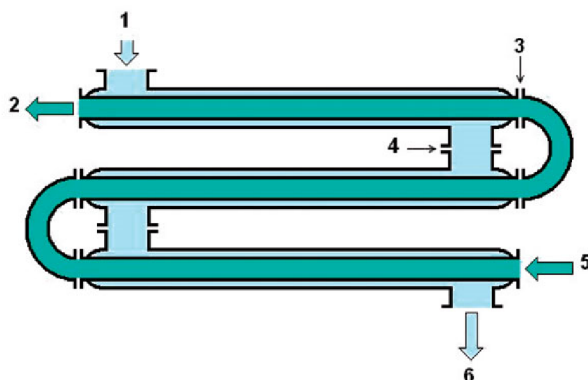
Trubkový výměník s rovnými trubkami je nejběžnějším typem výměníku tepla ve všech průmyslových odvětvích. Většinou se používá v aplikacích s vyšším tlakem a vyšší teplotou. Nevýhodou této konstrukce je, že vzhledem k tomu, že svazek je fixován k plášti a nelze jej sejmout, nelze vnější strany trubek mechanicky čistit. Vodní kámen v prostoru pláště je možné odstraňovat chemickým čištěním. [14]



Obr. 3.4 Výměník s rovnými trubkami [15]

- **Článekový výměník**

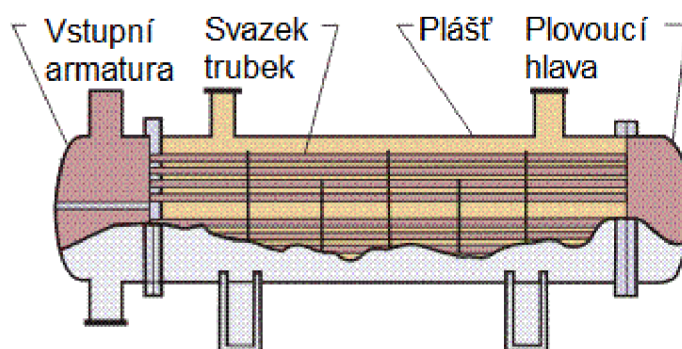
Tento typ výměníku, označovaný také jako dvoutrubkový (trubka v trubce), pracuje v protiproudu a médium obtéká teplosměnné plochy podélně. Jeho výhodami jsou snadná výroba, možnost aplikace tenkostěnných trubek, jednoduché čištění a oprava. Nehodí se ale pro velké rozdíly teplot a tlaků pracovních látek z důvodu problémů spojených s teplotní dilatací trubek. [9]



Obr. 3.5 Článekový výměník [16]

- **Plášťový trubkový výměník s plovoucí hlavou**

Oproti článkovému výměníku se hodí pro větší teplotní spády, jelikož se dobře vyrovnává s teplotními dilatacemi trubek, například použitím pružného zvlnění pláště. Tyto výměníky se rovněž díky dobrému přístupu ke svazku trubek snadno čistí a opravují. [9]



Obr. 3.6 Výměník s plovoucí hlavou [17]

- **Vlásokový výměník**

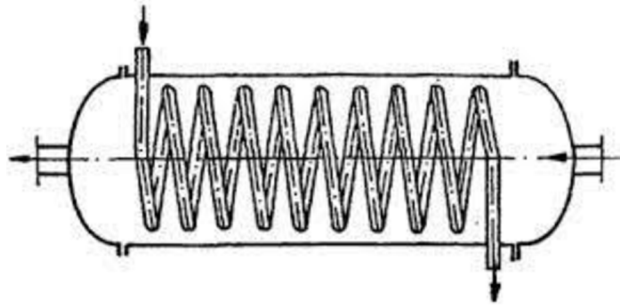
Výměníky s U trubkami se hojně používají díky svým dobrým vlastnostem například v energetickém průmyslu. Jejich předností je nízká hmotnost a efektivní využití vnitřního prostoru svazkem malých tenkostěnných trubek, které se mohou roztahovat a tím kompenzovat teplotní vlivy. Na druhou stranu toto konstrukční provedení ze své podstaty neumožňuje čištění nebo výměnu poškozené trubice. [9]



Obr. 3.7 Výměník s U-trubkami [18]

- **Výměník se šroubovitě vinutou trubkou**

U tohoto typu může být spirálovitá trubka instalována i ve více řadách, přičemž pracovní médium proudí kolem trubky příčně, což pozitivně ovlivňuje velikost potřebné teplosměnné plochy a přenos tepla. Nevýhodou je skutečnost, že trubka je vytvořena z jednoho dílu, a proto je nutné při poruše vyměnit celou trubku.



Obr. 3.8 Výměník se šroubovitě vinutou trubkou [19]

4. FOTOVOLTAIKA

Fotovoltaika je technologie, která zprostředkovává přímou přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. Záření, které dopadá na povrch Země má výkon okolo 1000 W/m^2 . Z tohoto záření jsou fotovoltaické solární články vyrábět s typickou účinností 15 % stejnosměrný elektrický proud, který je dále využit pro přímou spotřebu nebo nabíjení akumulátorů. Touto velmi ekologickou cestou lze elektrinu vyrábět v téměř neomezeném množství, jelikož energie je získávána ze slunečního svitu. Solární panely jsou výhodnou alternativou, která je spolehlivá, jednoduchá a obstarává dodávku elektrické energie v oblastech, kde není dostupná elektrická síť. Díky téměř nulovým nákladům na údržbu a velmi nízkým provozním nákladům jsou hojně využívány pro elektrifikaci chat, karavanů, jachet, rekreačních objektů, čerpání vody nebo nabíjení akumulátorů. V průmyslu najdou uplatnění například při napájení řídicích, měřicích, zabezpečovacích a komunikačních systémech, ať už stacionárních nebo mobilních. V rozsahu potřebného výkonu v řádu jednotek až stovek wattů jsou náklady na pořízení fotovoltaických systémů při větších vzdálenostech od elektrické sítě výrazně nižší než při výstavbě nové síťové přípojky. Velkou devizou fotovoltaických systémů je absence emisí, odpadu a hluku při jejich provozu. Nevyžadují téměř žádnou obsluhu a údržbu. [20]

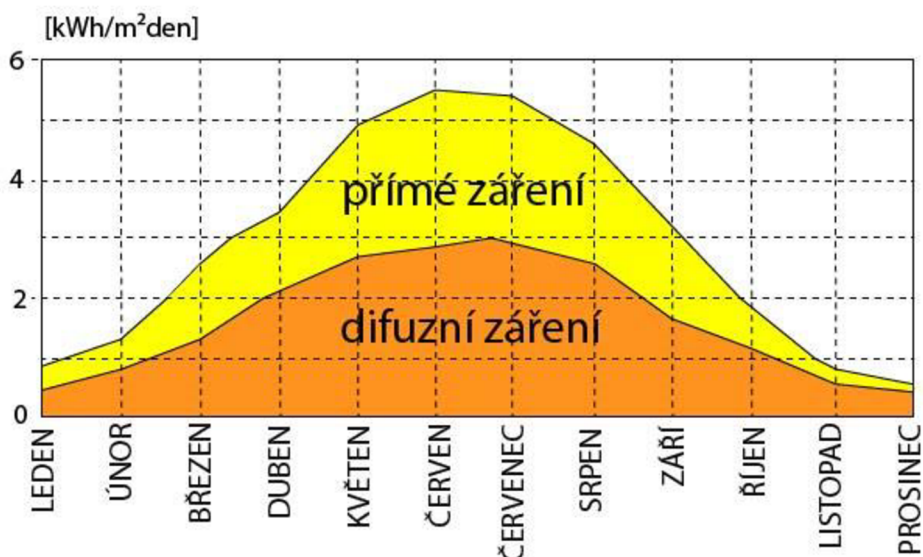


Obr. 4.1 Ukázka fotovoltaické elektrárny [21]

4.1 Energie ze Slunce

Sluneční záření je velmi spolehlivým zdrojem energie v téměř neomezeném množství. Energie se ve Slunci uvolňuje při termojaderné fúzi, kdy se slučují jádra atomů vodíku a hélia

za vysokých teplot. Celkový zářivý výkon dopadající na povrch atmosféry Země je 172 000 TW, z čehož se: **31 %** odrazí od vyšších vrstev atmosféry, **17,5 %** je atmosférou pohlceno, **32,7 %** dopadne na oceány, **4,3 %** se od zemského povrchu odrazí a **14,4 %** zemský povrch přijme ve formě tepla. Zbylých **0,1 %** spotřebuje biosféra při fotosyntéze. Energie je ze Slunce vyzařována v celém spektru vlnových délek, avšak atmosféra propustí jen viditelné světlo a malé množství ultrafialového záření, zbytek záření je buď pohlcen nebo odražen. Dopadající záření se skládá z přímého a difuzního záření. *Přímé záření* není atmosférou nijak ovlivňováno. *Difuzní záření* představuje záření, které se při průchodu atmosférou odráží od mraků, prachových, vodních a jiných částic obsažených v atmosféře. Vlnová délka difuzního záření se po odrazu nemění. Celkové množství sluneční energie ovlivňuje také sklon zemské osy a roční období, respektive poloha Země vůči Slunci. [20],[22]



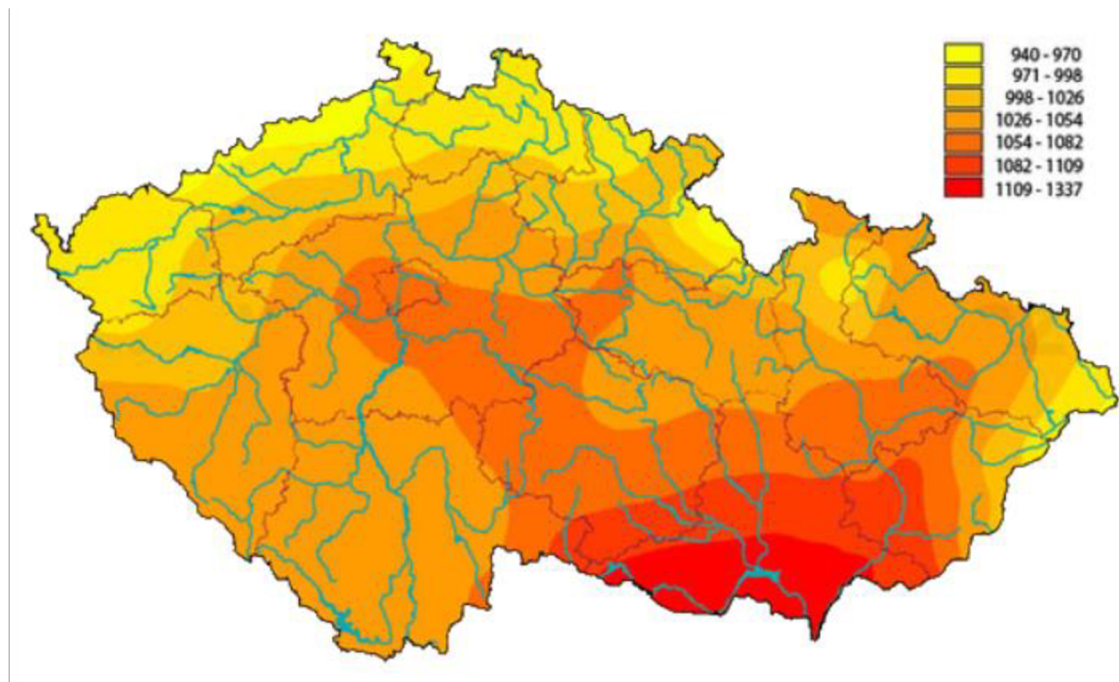
Obr. 4.2 Přímé a difuzní záření v průběhu roku [23]

Z Obr. 4.2 je patrná velká proměnlivost dostupné solární energie, která je pravděpodobně největší nevýhodou, která brání většímu rozšíření solárních systémů. Proto se spolu s panely instalují i různá řešení akumulace energie, protože solární energie je často dostatek v době, kdy není zrovna potřeba v takovém množství.

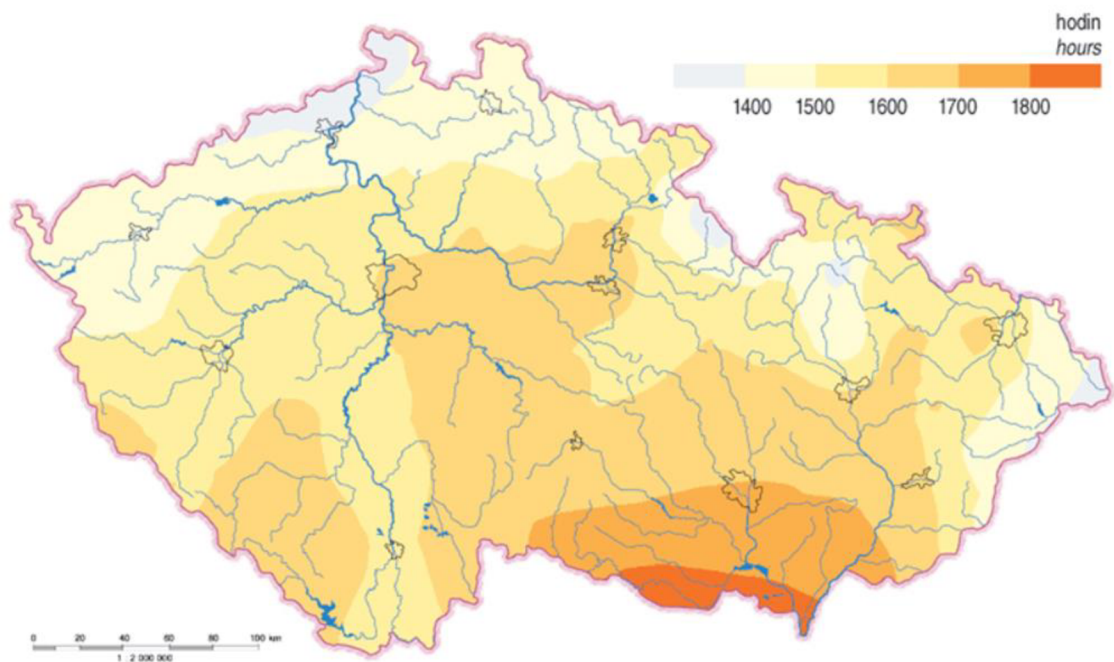
4.1.1 Solární podmínky v ČR

Nejdůležitějším kritériem využití je intenzita slunečního záření a dále počet hodin slunečního svitu v průběhu roku. Hodnota intenzity při dopadu na zemskou atmosféru se nazývá solární konstanta a její hodnota je 1360 W/m^2 . Po průchodu atmosférou zůstane v našich podmínkách zhruba $800\text{--}1100 \text{ W/m}^2$ globálního záření (součet přímého a difuzního záření). Ročně u nás dosahuje množství dopadající energie zhruba 1 MWh na 1 metr čtvereční plochy.

Optimální nastavení instalace v ČR pro maximální využití záření je sklon panelů 35° a orientace na jih. [24]



Obr. 4.3 Roční úhrn globálního záření (kWh/m^2) [25]



Obr. 4.4 Mapa trvání slunečního svitu v ČR [25]

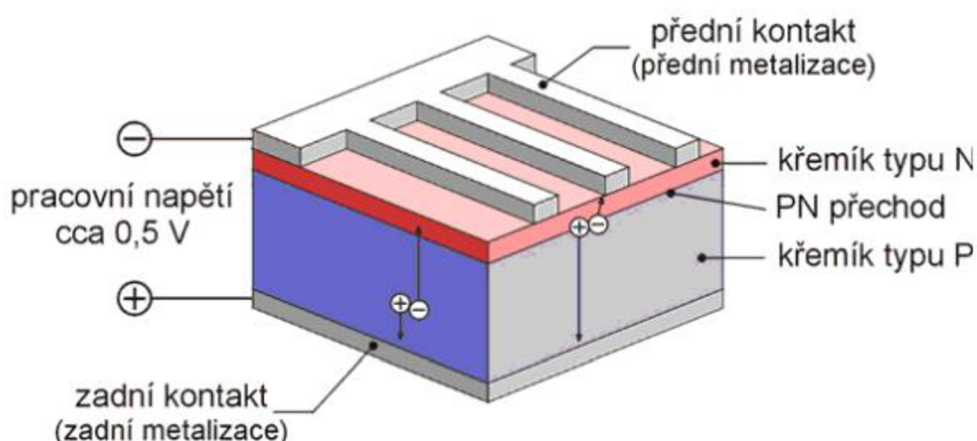
Z map na Obr. 4.3 s 4.4 vyplývá, že instalace fotovoltaických systémů dává největší smysl v oblasti Jihomoravského kraje.

4.2 Fotovoltaický článek

Sluneční energie se prostřednictvím fotovoltického článku přeměňuje na stejnosměrný elektrický proud díky fotovoltickému jevu. V této kapitole bude stručný popis článku a jeho parametrů.

4.2.1 Princip článku

Fotovoltický článek můžeme zjednodušeně popsat jako polovodičovou diodu. Je tvořen vrstvou křemíku s vodivostí typu P na který se nanese tenká vrstva křemíku s vodivostí typu N. Mezi nimi je PN přechod nebo tzv. hradlová vrstva, což je oblast styku dvou polovodičů s opačnými typy vodivosti. Tyto vrstvy jsou z obou stran opatřeny sběrnými kontakty pro připojení. Vodivosti typu N se dosahuje přidáním pětimocného prvku do krystalové mřížky křemíku, např. fosforu nebo arsenu. Čtyři elektrony tohoto prvku se vážou s křemíkem, pátý elektron je nevyužitý a velmi slabě vázaný, což umožňuje vedení elektrického proudu. Jedná se o elektronovou vodivost. Vodivost typu P naopak tvoří tzv. díry. Do křemíku se v tomto případě přidává trojmocný prvek, např. indium, které má 3 elektrony využitelné pro vazbu. Čtvrtá nenasycená vazba má kladný náboj a může ji zaplnit elektron z jiné vazby, což je způsob přesunu díry v krystalu. Jedná se o děrovou vodivost. Při dopadu slunečního záření na článek dochází k vnitřnímu fotoelektrickému jevu a na PN přechodu vznikne napětí, které u křemíkových článků dosahuje 0,5 V. Pro větší napětí či proudy se články spojují sériově nebo paralelně do modulů a panelů. [20],[26]



Obr. 4.5 Schéma solárního článku [20]

4.2.2 Druhy fotovoltaických článků

Druhy článků podle materiálu:

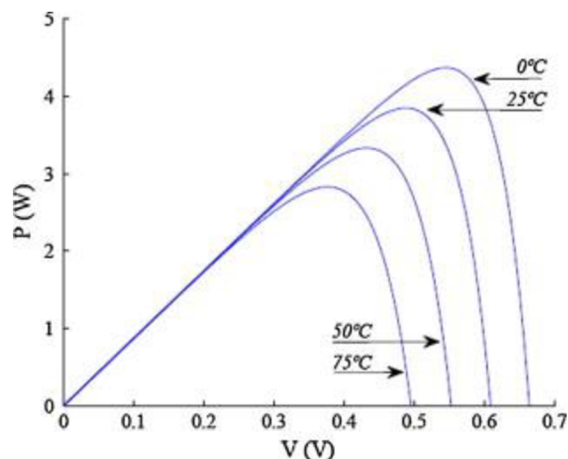
- **Články z monokrystalického křemíku** – Krystalický křemík má největší zastoupení ve výrobě solárních článků. Je velmi dostupný, jelikož ho zemská kůra obsahuje 30 %. Technologický postup výroby je na vysoké úrovni díky polovodičové výrobě v elektronice, avšak je poměrně nákladná, proto se u monokrystalických článků podílí materiál na konečné ceně až z 50 %. Vyrábí se z ingotu taženého Czochralského metodou, jedná se o jeden velký krystal s pravidelnou mřížkou, který se následně nařeže pomocí drátové pily na plátky o tloušťce 200 až 360 μm . Dochází při tom v velkém úbytku materiálu. Články z monokrystalického křemíku dosahují vysoké účinnosti, v laboratořích dosahuje až 24 %, a v provozu jsou velmi stabilní, jejich výkon s časem klesá pomalu. [20]
- **Články z polykrystalického křemíku** – Při výrobě polykrystalických článků se užívá Siemensova metoda. Můžeme je popsat jako paralelní spojení vzájemně různě orientovaných monokrystalů křemíku. Oproti monokrystalickým článkům jsou výrazně levnější, ale zároveň mají menší účinnost, která se pohybuje mezi 10 a 14 % a jejich výkon klesá rychleji (Výrobci garantují po 15 letech 85 % původního výkonu). [20]
- **Články z amorfního křemíku** – Jedná se o nekystalický křemík (atomy nemají pravidelnou mřížku) vyráběný napařováním na substrát ze skla. Využití najdou v oblastech, kde jsou potřeba malé výkony (osobní kalkulačky) nebo také ve fasádách budov. Jejich nevýhodou je malá účinnost v praxi, která dosahuje 2-7 % a ještě větší pokles výkonu oproti jiným druhům článků.
- **CIS (CuInSe₂)** – Z diselenidu mědi a india se vyrábí tenkovrstvé články, které disponují vysokou účinností až 17,7 %. Jejich tloušťka je několik μm , což způsobuje nestabilitu parametrů. [20]
- **GaliumArsenid (GaAs)** – Jde o slitinu vyrobenou z polovodičů typu A_{III}B_V, ze které je možné vyrobit články s vysokou účinností a odolností. Uplatňují se například v kosmických aplikacích a koncentrátorové fotovoltaice. Vyšší účinnosti lze dosáhnout vytvořením vícepřechodových struktur na bázi GaAs s různými příměsemi materiálů typu A_{III}B_V. [20]
- **KadmiumTelurid (CdTe)** – Velkým příslibem levných článků tenkovrstvý polykrystalický článek, pro jehož výrobu se používá elektrodepozice nebo

vysokorychlostní napařování. V praxi je zaznamenaná účinnost 8,4 %, avšak Evropská unie zakazuje použití kadmia ve výrobcích, tyto články mají doposud výjimku. [20]

- **Perovskitové články** – Perovskity byly objeveny v roce 2009 ruským mineralogem Lev A. Perovským, podle nějž jsou pojmenovány. Jedná se o skupinu velmi tvrdých minerálů. Perovskitové solární články jsou tenkovrstvé články, které jsou tvořeny vrstvami materiálů natištěných, potažených nebo vakuově nanesených na základní nosnou vrstvu. Jejich předností je možnost ovlivnit velikost zakázaného pásma, která závisí na tom, jak moc plochá je mřížka, a vytvořit tak požadovanou šířku pásma stejně jako u polovodičů III-V. Oproti nim jsou ale perovskity výrazně levnější. V současné době probíhá výzkum těchto článků a perovskity jsou považovány za možnou budoucnost fotovoltaiky. [27]
- **Organické články** – Organické fotovoltaické články se skládají ze sloučenin bohatých na uhlík (organických) a mohou být upraveny tak, aby zlepšily konkrétní funkci fotovoltaického článku, například pásmovou propustnost, průhlednost nebo barvu. Tyto články mají v současné době jen asi poloviční účinnost než články z krystalického křemíku a kratší provozní životnost, ale jejich výroba ve velkých objemech by mohla být levnější. Problémem je i nižší pohyblivost nábojů oproti polovodičům, organické články jsou předmětem výzkum a v současnosti nejsou konkurenceschopné vůči křemíkovým článkům. [27],[35]
- **Vícevrstvé články** – Tyto články obsahují více přechodů založených na materiálech III-V (arsenid galia (GaAs), fosfid hliníku a india (AlInP), fosfid hliníku, galia a india (AlGaInP), fosfid galia a india (GaInP), fosfid india (InP) atd.). Smyslem vrstev je zlepšení využití slunečního spektra, kdy každá vrstva absorbuje záření o jiné vlnové délce, dále zlepšení stability článku. Vykazují vysokou účinnost přesahující 35 %, avšak jejich výrobní náklady jsou vysoké a problém představuje i dostupnost jednotlivých složek. Z těchto důvodů se výrazněji neuplatňují v pozemních aplikacích, ale zejména se používají v kosmu. [39]

4.2.3 Vliv teploty na účinnost

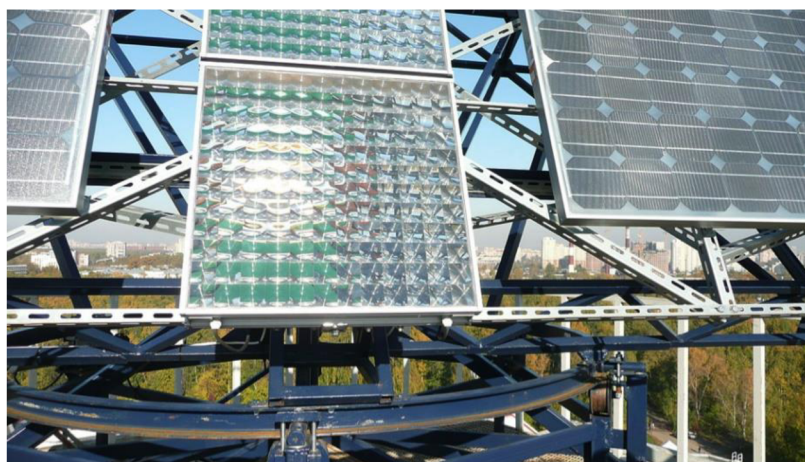
Jednou z hlavních překážek provozu fotovoltaických panelů je přehřívání v důsledku nadměrného slunečního záření a vysokých okolních teplot. Nárůst teploty o 1 °C způsobí pokles účinnosti panelu o zhruba 0,5 %. Ideální pracovní interval článku je mezi 0 a 75 °C. [28]



Obr. 4.6 Vliv teploty na výkon [28]

4.3 Koncentrátorové systémy

Princip koncentrátorové fotovoltaiky spočívá v soustředění slunečního záření na solární články s extrémně vysokou účinností, který by jinak byl příliš drahý na přímé použití. Tyto výjimečně robustní solární články, které se obvykle vyrábějí pro vesmírné nebo vojenské aplikace, jsou schopné koncentrovat záření více než tisícinásobně, a přesto jsou téměř třikrát účinnější než tradiční fotovoltaické články z křemíku (Si-Pv). [29]



Obr. 4.7 Ukázka koncentrátorového systému [31]

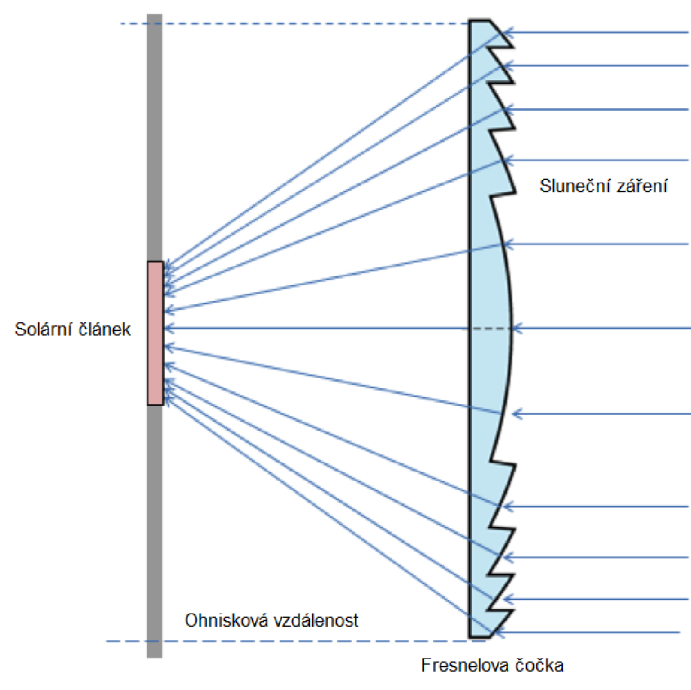
	Nízká koncentrace	Střední koncentrace	Vysoká koncentrace
Koncentrační poměr	2-10	10-100	100 a více (až 2000x)
Materiál článku	Krystalický křemík	Krystalický křemík, CdTe (Telurid kadmia)	Vícevrstvé články
Chlazení	Nevyžadováno	Pasivní chlazení	Aktivní chlazení
Sledovací systém	Nevyžadováno	1-osé sledování	2-osé sledování

Tab. 4.1 Rozdělení podle stupně koncentrace záření [30]

4.3.1 Technologie koncentrace záření

Ke koncentraci záření se používají Fresnelovy čočky nebo soustava zrcadel. Pro efektivní využití Fresnelových čoček je nutné, aby byl panel vybaven sledovacím systémem, který zajišťuje kolmý dopad slunečních paprsků na čočku. [29]

Zajímavou alternativu k čočkám a zrcadlům představuje luminiscenční koncentrátor. V luminiscenčním koncentrátoru se světlo láme v luminiscenční vrstvě a následně je vedeno k fotovoltaickému panelu. Jedná se o velmi slibnou technologii, protože nevyžaduje optické čočky ani zrcadla. Výhodou je také, že dokáže pracovat i s difúzním zářením. Kromě toho tento koncentrátor nepotřebuje žádné chlazení, protože fólie by mohla být konstruována tak, aby vlnové délky, které solární článek nedokáže přeměnit, prošly skrz bez přeměny na teplo. [31]



Obr. 4.8 Koncentrace pomocí Fresnelovy čočky [32]

4.3.2 Výhody a nevýhody koncentrátorové fotovoltaiky

Přednosti koncentrátorových systémů [29], [32], [33]:

- **Vysoká účinnost**

Díky vysoké koncentraci intenzity záření dosahují vícevrstvé solární články účinnosti až 46 % ve srovnání s klasickými fotovoltaickými články, které v případě použití monokrystalického křemíku disponují účinností maximálně 21 %.

- **Úspora materiálu pro výrobu článků**

Sluneční záření je koncentrováno na malou plochu oproti standardním fotovoltaickým panelům, což umožňuje použít mnohem menší vícevrstvé články a snížit náklady. Optická soustava je rovněž levnější a jednodušší z hlediska výroby v porovnání s fotovoltaickými články.

Hlavní nevýhody, které je nutné řešit jsou [29], [31] [32]:

- **Nutnost použít sledovací zařízení a provozní nároky**

Systémy koncentrátorové fotovoltaiky jsou schopné pracovat výhradně s přímým slunečním zářením. Difúzní záření a zastínění mraky významně snižuje efektivitu celého zařízení. Pro vysoké koncentrace se aplikují sledovače slunečního záření s úhlovou přesností 0,1 °. Sofistikované sledovací zařízení jsou drahé a zvyšují celkové náklady na provoz a údržbu.

- **Potřeba chlazení článku**

Vysoká intenzita záření způsobuje u systémů s vysokou koncentrací nezanedbatelný nárůst teploty článku, což se negativně projevuje v účinnosti výroby elektrické energie. U článků s nízkými a středními koncentračními poměry není aktivní chlazení nutné, protože dosahované teploty jsou mírné. Chlazení může být jak pasivní, například žebrované chladiče, tak aktivní, kde se jako chladicí médium používá vzduch, voda nebo například tekuté kovy, které jsou schopné velmi efektivně chladit články.

5. NÁVRH A VÝPOČET VÝMĚNÍKU

Při výpočtu tepelného výměníku bylo postupováno dle zdrojů [9],[10],[34].

5.1 Vstupní hodnoty

Pro zvolenou aplikaci byl vybrán jednoduchý trubkový výměník v konfiguraci voda-voda se segmentovými přepážkami, které zvyšují efektivitu přestupu tepla mezi médii. Při výpočtu byly použity tyto vstupní a požadované parametry:

- Teplota vody na výstupu ze sol. panelu: $T_{11} = 348,16 \text{ K} = 75^\circ\text{C}$
- Požadovaná teplota vody vycházející z výměníku: $T_{12} = 313,16 \text{ K} = 40^\circ\text{C}$
- Hmotnostní tok vody v chladicím okruhu sol. panelu: $\dot{m}_1 = 0,11 \text{ kg/s}$
- Teplota vody vstupující z vodního řadu: $T_{21} = 283,16 \text{ K} = 10^\circ\text{C}$
- Požadovaná teplota vody z řadu na výstupu: $T_{22} = 308,16 \text{ K} = 35^\circ\text{C}$

Pro obě média je počítáno s tlakem 0,2 MPa. Výměník pracuje v protiproudu, v trubkovém prostoru proudí voda z chladicího okruhu solárních panelů, v mezitrubkovém prostoru proudí voda z vodovodního řadu.

5.2 Rovnice tepelné bilance

Na začátku výpočtu výměníku je třeba pomocí rovnice tepelné bilance zjistit požadovaný výkon. Rovnice má při použití entalpií tvar:

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_1 \cdot (i_{11} - i_{12}) = \dot{m}_2 \cdot (i_{22} - i_{21}) \quad (5.1)$$

K určení výkonu potřebujeme znát hodnoty entalpie vody pro jednotlivé teploty při zadaném tlaku. Hodnoty měrné entalpie byly zjištěny pomocí programu SteamTab [36]. Tyto hodnoty jsou v Tab. 5.1.

$p = 0,2 \text{ MPa}$	Teplota	Měrná entalpie
Vstup 11	$T_{11} = 75^\circ\text{C}$	$i_{11} = 314,160 \text{ kJ/kg}$
Výstup 12	$T_{12} = 40^\circ\text{C}$	$i_{12} = 167,704 \text{ kJ/kg}$
Vstup 21	$T_{21} = 10^\circ\text{C}$	$i_{21} = 42,215 \text{ kJ/kg}$
Výstup 22	$T_{22} = 35^\circ\text{C}$	$i_{22} = 146,809 \text{ kJ/kg}$

Tab. 5.1 Hodnoty měrné entalpie vody

Dosazením hodnot z Tab. 5.1 do rov. (5.1) vypočítáme požadovaný výkon \dot{Q}_p .

$$\dot{Q}_p = 0,11 \cdot (314\,160 - 167\,704) = 16,11 \text{ kW}$$

Z rovnice (5.1) úpravou vyjádříme potřebný hmotnostní tok druhého média a dosadíme hodnoty.

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{Q}_p}{(i_{22} - i_{21})} \quad (5.2)$$

$$\dot{m}_2 = \frac{16\,110}{146\,809 - 42\,215} = 0,154 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Pro další postup ve výpočtu je potřeba znát termofyzikální vlastnosti pracovních látek, v tomto případě vody, při podmínkách v provozu. Tyto vlastnosti se určují ke střední teplotě proudu. Střední teplotu v trubkovém prostoru získáme podle vztahu:

$$\bar{T}_1 = \frac{T_{11} + T_{12}}{2} \quad (5.3)$$

$$\bar{T}_1 = \frac{75 + 40}{2} = 57,51 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Střední teplotu v mezitrubkovém prostoru získáme podle vztahu:

$$\bar{T}_2 = \frac{T_{21} + T_{12}}{2} \quad (5.4)$$

$$\bar{T}_2 = \frac{10 + 35}{2} = 22,51 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vlastnosti vody pro střední teploty v TP a MP při tlaku 0,2 MPa byly získány pomocí programu SteamTab [36].

H ₂ O	Hustota	Tepelná vodivost	Dynamická viskozita	Měrná tepelná kapacita	Kinematická viskozita
$p = 0,2 \text{ MPa}$	ρ_1	λ_1	η_1	c_{p1}	ν_1
	[kg/m ³]	[W/m · K]	[μPa · s]	[J/kg · K]	[m ² /s]
$\bar{T}_1 = 57,51 \text{ } ^\circ\text{C}$	984,5	0,6519	484,528	4183	$0,5404 \cdot 10^{-6}$
$p = 0,2 \text{ MPa}$	ρ_2	λ_2	η_2	c_{p2}	ν_2
	[kg/m ³]	[W/m · K]	[μPa · s]	[J/kg · K]	[m ² /s]
$\bar{T}_2 = 22,51 \text{ } ^\circ\text{C}$	997,7	0,6029	942,932	4182,2	$0,9453 \cdot 10^{-6}$

Tab. 5.2 Vlastnosti vody v TP a MP

5.3 Návrh geometrie výměníku

Vzhledem k velikosti solárního systému bylo potřeba vybrat nejmenší možné trubky, podle [9] je minimální průměr trubek s ohledem na čištění 12 mm. Pro výměník byly zvoleny bezešvé hladké trubky DIN 17458 z nerezové oceli 1.4404 o rozměrech 14x1. Délka trubek byla určena $l_t = 1800 \text{ mm}$. Rychlost proudění v trubkách byla zvolena $u_1 = 0,027 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Uspořádání svazku trubek bylo zvoleno s úhlem $\alpha = 30^\circ$ vůči směru toku při příčném obtékání trubek. Podle zdroje [9] se rozteč volí obvykle jako 1,25-1,5násobek vnějšího průměru trubky, ne však menší než $d_2 + 6 \text{ mm}$. Byla zvolena nejmenší možná rozteč $s = 20 \text{ mm}$. Velikosti rozteče v příčném a podélném směru vůči toku určíme pomocí koeficientů pro zvolené uspořádání $c_1 = 1$ a $c_2 = 0,866$.

Rozteč v příčném směru je dána vztahem:

$$t_{t1} = c_1 \cdot s \quad (5.5)$$

$$t_{t1} = 1 \cdot 20 = 20 \text{ mm}$$

Rozteč v podélném směru je dána vztahem:

$$t_{t2} = c_2 \cdot s \quad (5.6)$$

$$t_{t2} = 0,866 \cdot 20 = 17,32 \text{ mm}$$

Pro určení celkového potřebného počtu trubek lze využít rovnici kontinuity, její úpravou získáme vztah pro počet trubek:

$$n_t = \frac{4 \cdot m_1}{\pi \cdot u_1 \cdot \rho_1 \cdot d_1^2} \quad (5.7)$$

$$n_t = \frac{4 \cdot 0,11}{\pi \cdot 0,027 \cdot 984,5 \cdot 0,012^2} = 37$$

Průměr obalové kružnice procházející osami krajních trubek lze podle [9] pro počet trubek 37 s úhlem uspořádání svazku 30° vypočítat podle poměru k rozteči. Můžeme ho vyjádřit vztahem:

$$D' = 6 \cdot s \quad (5.8)$$

$$D' = 6 \cdot 20 = 120 \text{ mm}$$

Průměr obalové kružnice svazku následně bude:

$$D_s = D' + d_2 \quad (5.9)$$

$$D_s = 120 + 14 = 134 \text{ mm}$$

Pro plášť výměníku byla zvolena s ohledem na doporučenou vůli mezi pláštěm a svazkem trubek bezešvá hladká trubka EN 10210 z nerezové oceli o rozměrech 168x8. Vnitřní průměr pláště bude:

$$D_1 = D_2 - 2 \cdot \delta \quad (5.10)$$

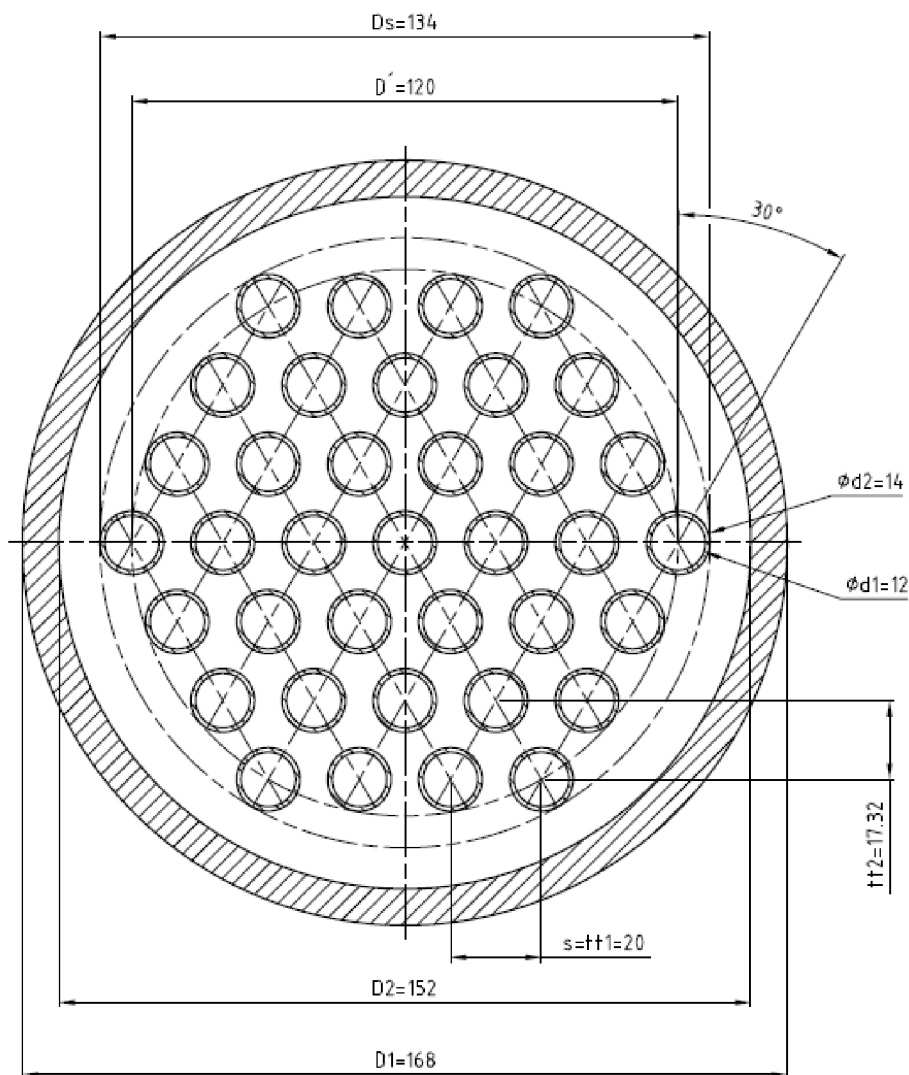
kde δ je tloušťka stěny trubky. Po dosazení:

$$D_1 = 168 - 2 \cdot 8 = 152 \text{ mm}$$

Vůle mezi pláštěm a svazkem trubek následně určíme pomocí:

$$k_i = \frac{D_1 - D_s}{2} \quad (5.11)$$

$$k_i = \frac{152 - 134}{2} = 9 \text{ mm}$$



Obr. 5.1 Rozměry svazku trubek a pláště

5.4 Střední teplota stěny trubek

Pro výpočet součinitelů přestupu tepla je nutné znát střední teploty na stěně trubek v TP a MP, které potřebujeme při zohlednění změny látkových vlastností v mezní vrstvě. Při výpočtu bylo postupováno iterativně dokud nebyla splněna podmínka výsledného výkonu $Q \in (Q_p, 1,05 \cdot Q_p)$ a pro střední teploty stěn trubek $T_{Sn} - T_{Sn+1} < 0,001 \text{ } ^\circ\text{C}$. Podle doporučených hodnot byl proveden odhad součinitele přestupu tepla v TP $\alpha_1 = 239,42 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Pro výpočet je potřeba znát střední logaritmický teplotní rozdíl, který je dán vztahem:

$$T_{ln} = \frac{(T_{11} - T_{22}) - (T_{12} - T_{21})}{\ln\left(\frac{T_{11} - T_{22}}{T_{12} - T_{21}}\right)} \quad (5.12)$$

Po dosazení vstupních hodnot:

$$T_{ln} = \frac{(75 - 35) - (40 - 10)}{\ln\left(\frac{75 - 35}{40 - 10}\right)} = 34,77 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Rovnice prostupu tepla má tvar:

$$Q = k \cdot T_{ln} \cdot n_t \cdot l_t \quad (5.13)$$

Vyjádříme součinitel prostupu tepla, který bude (Q_s z rov. (5.83), T_{ln} z rov. (5.12):

$$k = \frac{Q_s}{T_{ln} \cdot n_t \cdot l_t} \quad (5.14)$$

$$k = \frac{16\,821,85}{34,77 \cdot 37 \cdot 1,8} = 7,266 \frac{W}{m \cdot K}$$

Součinitel prostupu tepla je definován vztahem:

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_t} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \quad (5.15)$$

Z rov. (5.15) vyjádříme součinitel přestupu tepla v MP:

$$\alpha_2 = \frac{1}{\left[\frac{\pi}{k} - \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} - \frac{1}{2 \cdot \lambda_t} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)\right]} \cdot d_2 \quad (5.16)$$

Kde λ_t je tepelná vodivost trubky, která dosahuje u nerezové oceli $15 \frac{W}{m \cdot K}$. Dosazením k z rov. (5.14), d_1 a d_2 z Obr. 5.1 získáme:

$$\alpha_2 = \frac{1}{\left[\frac{\pi}{7,266} - \frac{1}{239,42 \cdot 0,012} - \frac{1}{2 \cdot 15} \cdot \ln\left(\frac{0,014}{0,012}\right)\right]} \cdot 0,014 = 901,91 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Pro výpočet střední teploty na stěně trubky je nutné znát velikost teplosměnných ploch v TP a MP. Tuto plochu můžeme určit podle vztahu:

Pro TP (d_1 z Obr. 5.1):

$$S_1 = \pi \cdot d_1 \cdot l_t \cdot n_t \quad (5.17)$$

$$S_1 = \pi \cdot 0,012 \cdot 1,8 \cdot 37 = 2,511 \text{ m}^2$$

Pro MP (d_2 z Obr. 5.1):

$$S_2 = \pi \cdot d_2 \cdot l_t \cdot n_t \quad (5.18)$$

$$S_2 = \pi \cdot 0,014 \cdot 1,8 \cdot 37 = 2,929 \text{ m}^2$$

Nyní můžeme určit střední teploty na stěnách v TP a MP podle vztahu [10]:

$$Q_p = S_1 \cdot \alpha_1 \cdot (\bar{T}_1 - \bar{T}_{1S}) = S_2 \cdot \alpha_2 \cdot (\bar{T}_{2S} - \bar{T}_2) \quad (5.19)$$

Vyjádříme z rov. (5.19) střední teplotu na stěně trubky pro TP (Q_S z rov. (5.83), S_1 z rov. (5.17), \bar{T}_1 z rov. (5.3):

$$\bar{T}_{1S} = \bar{T}_1 - \frac{Q_S}{S_1 \cdot \alpha_1} \quad (5.20)$$

$$\bar{T}_{1S} = 57,51 - \frac{16\,821,85}{2,511 \cdot 239,42} = 30,71 \text{ }^\circ\text{C}$$

Vyjádříme z rov. (5.19) střední teplotu na stěně trubky pro MP (Q_S z rov. (5.83), S_2 z rov. (5.18), \bar{T}_2 z rov. (5.4), α_2 z rov. (5.16)):

$$\bar{T}_{2S} = \bar{T}_2 + \frac{Q_S}{S_2 \cdot \alpha_2} \quad (5.21)$$

$$\bar{T}_{2S} = 22,51 + \frac{16\,821,85}{2,929 \cdot 901,91} = 28,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Vlastnosti vody pro střední teploty na stěně trubek byly určeny pomocí programu SteamTab [36].

H ₂ O	Tepelná vodivost	Dynamická viskozita	Měrná tepelná kapacita
$p = 0,2 \text{ MPa}$	$\lambda_{1S} [W/m \cdot K]$	$\eta_{1S} [Pa \cdot s]$	$c_{p1S} [J/kg \cdot K]$
$T_{1S} = 30,71^\circ\text{C}$	0,6167	$785,375 \cdot 10^{-6}$	4179,42
$p = 0,2 \text{ MPa}$	$\lambda_{2S} [W/m \cdot K]$	$\eta_{2S} [Pa \cdot s]$	$c_{p2S} [J/kg \cdot K]$
$T_{2S} = 28,6^\circ\text{C}$	0,613	$821,522 \cdot 10^{-6}$	4179,86

Tab. 5.3 Vlastnosti vody při středních teplotách na stěně trubek v TP a MP

5.5 Součinitele přestupu tepla

Při výpočtu součinitelů přestupu tepla bylo postupováno podle zdroje [10].

5.5.1 Součinitel přestupu tepla v TP

V trubkovém prostoru proudí teplejší médium, voda z chladicího okruhu solárního panelu. Pro určení součinitele přestupu tepla potřebujeme znát charakter proudění, který rozhodneme podle velikosti Reynoldsova čísla. Nejprve zjistíme celkový průtočný průřez podle vztahu pro jednoduchý výměník (d_1 z Obr. 5.1):

$$S_{1p} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot n_t \quad (5.22)$$

$$S_{1p} = \frac{\pi \cdot 0,012^2}{4} \cdot 37 = 0,004 \text{ m}^2$$

Reynoldsovo číslo v TP lze následně určit pomocí (v_1 z Tab. 5.2, d_1 z Obr. 5.1):

$$Re_1 = \frac{u_1 \cdot d_1}{\nu_1} \quad (5.23)$$

$$Re_1 = \frac{0,027 \cdot 0,012}{0,5404 \cdot 10^{-6}} = 592,9$$

Proudění v TP je podle rov. (5.23) laminární. Pro lepší přenos tepla je vhodnější turbulentní proudění, nicméně v tomto případě by bylo dosaženo pouze použitím trubek s menším vnitřním průměrem, než je podle [9] dovoleno.

Dále je nutné určit hodnotu Prandtlova čísla vztaženého ke střední teplotě proudu a na stěně v TP podle následujících vztahů:

Pro střední teplotu proudu v TP (hodnoty z Tab. 5.2):

$$Pr_1 = \frac{c_{p1} \cdot \eta_1}{\lambda_1} \quad (5.24)$$

$$Pr_1 = \frac{4183 \cdot 484,528 \cdot 10^{-6}}{0,6519} = 3,109$$

Pro střední teplotu stěny trubky v TP (dosaženy hodnoty z Tab. 5.3):

$$Pr_{1s} = \frac{c_{p1s} \cdot \eta_{1s}}{\lambda_{1s}} \quad (5.25)$$

$$Pr_{1s} = \frac{4179,42 \cdot 785,375 \cdot 10^{-6}}{0,6167} = 5,322$$

Nyní je potřeba vypočítat korekční faktory, které potřebujeme při výpočtu Nusseltova čísla.

Korekční faktor y_1 – zohledňuje vliv nátoky pracovní látky do trubkového svazku a je definován:

$$y_1 = \frac{d_1}{l_t} \quad (5.26)$$

$$y_1 = \frac{0,012}{1,8} = 0,007$$

Korekční faktor y_2 – zohledňuje vliv změny látkových vlastností v mezní vrstvě a je dán vztahem (Pr_1 z rov. (5.24), Pr_{1S} z rov. (5.25)):

$$y_2 = \left(\frac{Pr_1}{Pr_{1S}} \right)^{0,11} \quad (5.27)$$

$$y_2 = \left(\frac{3,109}{5,322} \right)^{0,11} = 0,943$$

Následně můžeme určit Nusseltovo číslo, které pro laminární proudění lze vypočítat pomocí Hausenova vztahu, který má tvar (Re_1 z rov. (5.23), Pr_1 z rov. (5.24), y_1 z rov. (5.26), y_2 z rov. (5.27)):

$$Nu_1 = \left[\frac{0,19 \cdot (Re_1 \cdot Pr_1 \cdot y_1)^{0,8}}{1 + 0,117 \cdot (Re_1 \cdot Pr_1 \cdot y_1)^{0,467}} + 3,65 \right] \cdot y_2 \quad (5.28)$$

$$Nu_1 = \left[\frac{0,19 \cdot (592,9 \cdot 3,109 \cdot 0,007)^{0,8}}{1 + 0,117 \cdot (592,9 \cdot 3,109 \cdot 0,007)^{0,467}} + 3,65 \right] \cdot 0,943 = 4,408$$

Součinitel přestupu tepla v TP potom lze určit podle vztahu (Nu_1 z rov. (5.28), λ_1 z Tab. 5.2, d_1 z Obr. 5.1):

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_1} \quad (5.29)$$

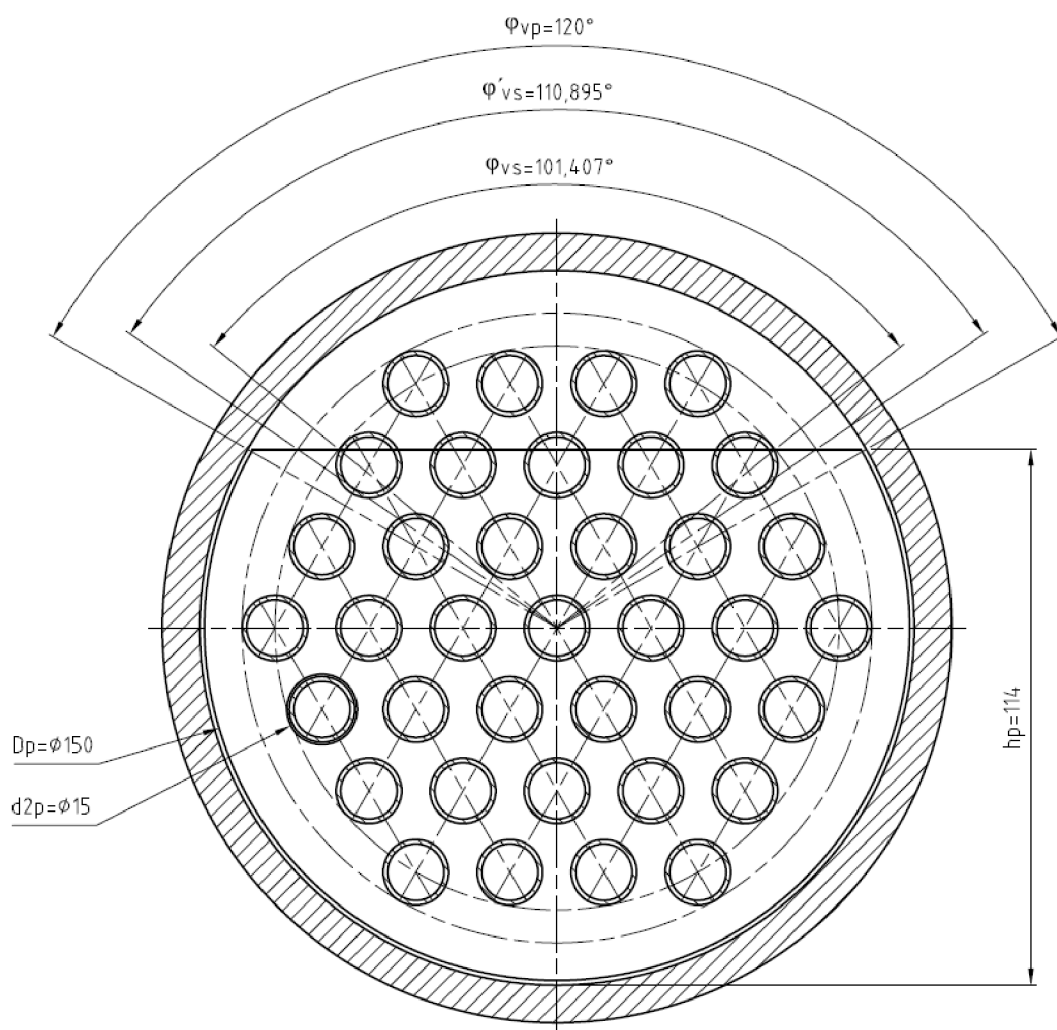
$$\alpha_1 = \frac{4,408 \cdot 0,6519}{0,012} = 239,452 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

5.5.2 Součinitel přestupu tepla v MP

V mezitrubkovém prostoru proudí chladnější médium, konkrétně voda z vodovodního řadu. Pro zvýšení intenzity přestupu tepla byly zvoleny segmentové přepážky o těchto parametrech:

Počet přepážek	Rozteč přepážek	Šířka přepážky	Výška přepážky	Průměr přepážky	Průměr otvoru pro trubku
n_p	t_p	s_p	h_p	D_p	d_{2p}
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
16	103	5	114	150	15

Tab. 5.4 Parametry přepážek



Obr. 5.2 Příčný průřez v MP

Základem výpočtu součinitele přestupu tepla v MP je výpočet Nusseltova čísla. Pro výpočet Reynoldsova čísla v MP je potřeba vypočítat velikost nezaplňného průřezu mezi jednou roztečí přepážek, podle vztahu (D_1 z Obr. 5.1, t_p , s_p z Tab. 5.4):

$$S_{2N} = (t_p - s_p) \cdot D_1 \quad (5.30)$$

$$S_{2N} = (103 - 5) \cdot 152 = 0,015 \text{ m}^2$$

Mezerovitost svazku se určí pro $t_{t2}/d_2 > 1$ pomocí vztahu (t_{t1} z rov. (5.5), d_2 z Obr. 5.1):

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot \frac{t_{t1}}{d_2}} \quad (5.31)$$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot \frac{20}{14}} = 0,45$$

Nyní můžeme určit rychlost proudění v MP (m_2 z rov. (5.2), S_{2N} z rov. (5.30), ψ z rov. (5.31), ρ_2 z Tab. 5.2):

$$u_2 = \frac{m_2}{S_{2N} \cdot \psi \cdot \rho_2} \quad (5.32)$$

$$u_2 = \frac{0,154}{0,015 \cdot 0,45 \cdot 997,7} = 0,023 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Charakteristický rozměr délka proudnice je definována jako (d_2 z Obr. 5:1):

$$l = \frac{\pi \cdot d_2}{2} \quad (5.33)$$

$$l = \frac{\pi \cdot 0,014}{2} = 0,021991 \text{ m}$$

S výše zjištěnými hodnotami můžeme určit Reynoldsovo číslo a charakter proudění v MP pomocí vztahu (u_2 z rov. (5.32), l z rov. (5.33), ν_2 z Tab. 5.2):

$$Re_2 = \frac{u_2 \cdot l}{\nu_2} \quad (5.34)$$

$$Re_2 = \frac{0,023 \cdot 0,021991}{0,9453 \cdot 10^{-6}} = 535,52$$

Proudění v MP je turbulentní což dále ovlivňuje výběr vztahů a koeficientů pro výpočet. Dále určíme Prandtlovo číslo pro střední teploty proudu a stěny v MP dané následujícími rovnicemi:

Pro střední teplotu proudu v MP (hodnoty dosazeny z Tab. 5.2):

$$Pr_2 = \frac{c_{p2} \cdot \eta_2}{\lambda_2} \quad (5.35)$$

$$Pr_2 = \frac{4182,2 \cdot 942,932}{0,6029} = 6,541$$

Pro střední teplotu na stěně trubky v MP (hodnoty dosazeny z Tab. 5.3):

$$Pr_{2S} = \frac{c_{p2S} \cdot \eta_{2S}}{\lambda_{2S}} \quad (5.36)$$

$$Pr_{2S} = \frac{4179,86 \cdot 821,522 \cdot 10^{-6}}{0,613} = 7,751$$

Posledním krokem při výpočtu Nusseltova čísla jsou korekční faktory.

Výpočet korekčních faktorů:

Korekční faktor y_2 – zohledňuje změny látkových vlastností kapalin v mezní vrstvě, pro směr tepelného toku do MP je koeficient $a = 0,25$, faktor je určen pomocí (Pr_2 z rov. (5.35), Pr_{2S} z rov. (5.36)):

$$y_2 = \left(\frac{Pr_2}{Pr_{2S}} \right)^a \quad (5.37)$$

$$y_2 = \left(\frac{6,541}{7,751} \right)^a = 0,958$$

Korekční faktor y_3 – zohledňuje převod součinitele přestupu tepla z řady trubek na svazek trubek, pro uspořádání s úhlem vůči směru toku 30° má tvar (t_{t2} z rov. (5.6), d_2 z Obr. 5.1):

$$y_3 = 1 + \frac{2}{3 \cdot \frac{t_{t2}}{d_2}} \quad (5.38)$$

$$y_3 = 1 + \frac{2}{3 \cdot \frac{17,32}{0,014}} = 1,539$$

Korekční faktor y_4 – zohledňuje nepříznivý tvar teplotního profilu při laminárním proudění. Pro $Re_2 > 100$ má hodnotu:

$$y_4 = 1 \quad (5.39)$$

Korekční faktor y_5 – vyjadřuje podíl podélně obtékaných trubek na příčném proudění ve výřezu přepážek. Pro jeho výpočet potřebujeme znát výšku přepážky, která se obvykle volí jako 0,75násobek vnitřního průměru pláště a dále úhel výřezu svazku, který je definován pomocí vztahu (D' z rov. (5.8), D_1 z Obr. 5.1, h_p z Tab. 5.4):

$$\varphi'_{vS} = 2 \cdot \arccos \left[\frac{2}{D'} \cdot \left(h_p \cdot \frac{D_1}{2} \right) \right] \quad (5.40)$$

$$\varphi'_{vS} = 2 \cdot \arccos \left[\frac{2}{0,12} \cdot \left(0,114 \cdot \frac{0,152}{2} \right) \right] = 110,895^\circ$$

Tento úhel je potřebný pro výpočet počtu trubek ve výřezu přepážky, který je dán (D_s z rov. (5.9), φ'_{vS} z rov. (5.40), d_2 z Obr. 5.1):

$$n_{tv} = \frac{(D_s - d_2)^2}{8 \cdot s^2 \cdot c_1} \cdot \left(\varphi'_{vS} \cdot \frac{\pi}{180} - \sin(\varphi'_{vS}) \right) \quad (5.41)$$

$$\begin{aligned} n_{tv} &= \frac{(0,134 - 0,014)^2}{8 \cdot 0,02^2 \cdot 0,866} \cdot \left(110,895 \cdot \frac{\pi}{180} - \sin(110,895) \right) \\ &= 4,103 \end{aligned}$$

Nyní určíme koeficient x_8 (n_{tv} z rov. (5.41), n_t z rov. (5.7)):

$$x_8 = \frac{n_{tv}}{n_t} \quad (5.42)$$

$$x_8 = \frac{4,103}{37} = 0,126$$

Korekční faktor můžeme následně s výše uvedenými hodnotami (vztahy platí za předpokladu $x_8 < 0,8$) spočítat pomocí (x_8 z rov. (5.42)):

$$y_5 = 1 - x_8 + 0,524 \cdot x_8^{0,32} \quad (5.43)$$

$$y_5 = 1 - 0,126 + 0,524 \cdot 0,126^{0,32} = 1,144$$

Korekční faktor y_6 – zohledňuje vliv zkratových proudů mezi přepážkou a pláštěm a mezi trubkami svazku a otvory v přepážkách. Pro jeho výpočet jsou použity následující vztahy:

Průtočný průřez v přepážce (mezi trubkami svazku a otvory v přepážce) je dán (n_{tv} z rov. (5.41), n_t z rov. (5.7), d_{2p} z Tab. 5.4, d_2 z Obr. 5.1):

$$S_{tp} = \left(n_t - \frac{n_{tv}}{2} \right) \cdot \frac{\pi \cdot (d_{2p}^2 - d_2^2)}{4} \quad (5.44)$$

$$S_{tp} = \left(37 - \frac{4,103}{2} \right) \cdot \frac{\pi \cdot (0,015^2 - 0,014^2)}{4} = 3,16 \text{ cm}^2$$

Průtočný průřez mezi přepážkou a pláštěm určíme podle (D_1 z Obr. 5.1, φ_{vp} z Obr. 5.2, D_p z Tab. 5.4):

$$S_{ps} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_p^2) \cdot \frac{360 - \varphi_{vp}}{360} \quad (5.45)$$

$$S_{ps} = \frac{\pi}{4} \cdot (0,152^2 - 0,15^2) \cdot \frac{360 - 120}{360} = 6,97 \text{ cm}^2$$

Pro výpočet průtočného průřezu zaplněného prostoru mezi jednou roztečí přepážek v ose výměníku je potřeba znát mezeru mezi trubkami a mezeru mezi svazkem a pláštěm, určíme je pomocí:

Mezera mezi trubkami (d_2 z Obr. 5.1):

$$s_{tt} = s - d_2 \quad (5.46)$$

$$s_{tt} = 0,02 - 0,014 = 0,006 \text{ m}$$

Součet mezer je dán pro uhel uspořádání svazku 30° (D_s z rov. (5.9), s_{tt} z rov. (5.46), t_{t1} z rov. (5.5), d_2 z Obr. 5.1):

$$\Sigma s_{tt} = \frac{D_s - d_2}{t_{t1}} \cdot s_{tt} \quad (5.47)$$

$$\Sigma s_{tt} = \frac{0,134 - 0,014}{0,02} \cdot 0,006 = 0,036 \text{ m}$$

Mezera mezi svazkem a pláštěm je dána (hodnoty z Obr. 5.1):

$$s_{ts} = D_1 - D_s \quad (5.48)$$

$$s_{ts} = 0,152 - 0,134 = 0,018 \text{ m}$$

Nyní můžeme určit průtočný průřez zaplněného prostoru mezi jednou roztečí přepážek, který je definován vztahem (dosadíme hodnoty z rovnic (5.46) až (5.48), t_p a s_p z Tab. 5.4):

$$S_{2Z} = (s_{ts} + \Sigma s_{tt}) \cdot (t_p - s_p) \quad (5.49)$$

$$S_{2Z} = (0,018 + 0,036) \cdot (0,103 - 0,005) = 0,002 \text{ m}^2$$

V dalším kroku vypočítáme hodnotu korekčního faktoru dosazením rovnic (5.44) až (5.48) do vztahu:

$$y_6 = 0,4 \cdot \frac{S_{tp}}{S_{tp} + S_{ps}} + \left(1 - 0,4 \cdot \frac{S_{tp}}{S_{tp} + S_{ps}}\right) \cdot e^{\left(-1,5 \cdot \frac{S_{tp} + S_{ps}}{S_{2Z}}\right)} \quad (5.50)$$

$$y_6 = 0,4 \cdot \frac{3,16 \cdot 10^{-4}}{(3,16 + 6,97) \cdot 10^{-4}} + \left(1 - 0,4 \cdot \frac{3,16 \cdot 10^{-4}}{(3,16 + 6,97) \cdot 10^{-4}}\right) \cdot e^{\left(-1,5 \cdot \frac{(3,16 + 6,97) \cdot 10^{-4}}{0,002}\right)} = 0,655$$

Korekční faktor y_7 – tento faktor zohledňuje vliv obtokových proudů mezi trubkovým svazkem a pláštěm výměníku. Pro jeho určení nejprve zjistíme průtočný průřez obtokového proudu mezi jednou roztečí, který je dán vztahem (D_1 a D_s z Obr. 5.1, t_p a s_p z Tab. 5.4, s_{tt} z rov. (5.46)):

$$S_{ss} = (D_1 - D_s - s_{tt}) \cdot (t_p - s_p) \quad (5.51)$$

$$S_{ss} = (0,152 - 0,132 - 0,006) \cdot (0,103 - 0,005) = 11,76 \text{ cm}^2$$

Dále potřebujeme znát počet příčně obtékaných řad trubek mezi hranami seříznutí přepážek, který určíme pomocí (D_1 z Obr. 5.1, t_{t2} z rov. (5.6), h_p z Tab. 5.4):

$$n_{rp} = \frac{2 \cdot h_p - D_1}{t_{t2}} \quad (5.52)$$

$$n_{rp} = \frac{2 \cdot 0,114 - 0,152}{0,01732} = 4,388$$

V následujícím kroku můžeme vypočítat korekční faktor, který je podle vztahu (S_{SS} z rov. (5.51), S_{ZZ} z rov. (5.49), n_{rp} z rov. (5.52)):

$$y_7 = e^{\left[-c_1 \frac{S_{SS}}{S_{ZZ}} \left(1 - \sqrt[3]{\frac{2 \cdot n_{PT}}{n_{rp}}} \right) \right]} \quad (5.53)$$

Kde koeficient pro $Re_2 > 100$ má hodnotu $c_1 = 1,35$ a počet těsnících lišt byl zvolen $n_{PT} = 2$. Po dosazení dostaneme:

$$y_7 = e^{\left[-1,35 \cdot \frac{11,76 \cdot 10^{-4}}{0,002} \left(1 - \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2}{4,338}} \right) \right]} = 0,98$$

Korekční faktor y_8 – zohledňuje vliv neopřepázkovaných prostorů pod vstupními hrdly v MP. Pro jeho výpočet nejprve zjistíme délku neopřepázkované části, která je dána (parametry přepážek dosazeny z Tab. 5.4):

$$l_{tn} = l_t - 2 \cdot l_{ts} - (n_p - 1) \cdot t_p - s_p \quad (5.54)$$

Kde l_{ts} je šířka trubkovnice, která je obvykle určena jako desetina vnitřního průměru pláště, nejméně však 25 mm. Po dosazení dostaneme:

$$l_{tn} = 1,8 - 2 \cdot 0,025 - (16 - 1) \cdot 0,103 - 0,005 = 0,2 \text{ m}$$

V dalším kroku vypočteme hodnotu korekčního faktoru (l_{tn} z rov. (5.54), parametry přepážek dosazeny z Tab. 5.4):

$$y_8 = \frac{(n_p - 1) + 2 \cdot \left(\frac{l_{tn}}{2 \cdot t_p} \right)^{1-a}}{(n_p - 1) + \frac{l_{tn}}{t_p}} \quad (5.55)$$

Kde koeficient pro $Re_2 > 100$ má hodnotu $a = 0,6$.

$$y_8 = \frac{(16 - 1) + 2 \cdot \left(\frac{0,2}{2 \cdot 0,103} \right)^{1-0,6}}{(16 - 1) + \frac{0,2}{0,103}} = 1,002$$

Nyní můžeme pomocí výše získaných hodnot zjistit Nusseltovo číslo které je definováno pomocí vztahů:

Laminární složka Nusseltova čísla (Re_2 z rov. (5.34), Pr_2 z rov. (5.35)):

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot \sqrt{Re_2} \cdot \sqrt[3]{Pr_2} \quad (5.56)$$

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot \sqrt{535,52} \cdot \sqrt[3]{6,541} = 28,736$$

Turbulentní složka Nusseltova čísla (Re_2 z rov. (5.34), Pr_2 z rov. (5.35)):

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot Re_2^{0,8} \cdot Pr_2}{1 + 2,443 \cdot Re_2^{-0,1} \cdot \left(\sqrt[3]{Pr_2^2} - 1\right)} \quad (5.57)$$

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot 535,52^{0,8} \cdot 6,541}{1 + 2,443 \cdot 535,52^{-0,1} \cdot \left(\sqrt[3]{6,541^2} - 1\right)} = 8,669$$

V dalším kroku lze vypočítat celkové Nusseltovo číslo podle vztahu:

$$Nu_2 = \left[0,3 + \left(\sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2}\right)\right] \cdot y_2 \cdot y_3 \cdot y_4 \cdot y_5 \cdot y_6 \cdot y_7 \cdot y_8 \quad (5.58)$$

Po dosazení složek z rovnic (5.56) a (5.57) a korekčních faktorů y_2 až y_8 dostaneme:

$$\begin{aligned} Nu_2 &= \left[0,3 + \left(\sqrt{28,736^2 + 8,669^2}\right)\right] \cdot 0,958 \cdot 1,539 \cdot 1 \cdot 1,144 \cdot 0,655 \cdot 0,98 \cdot 1,002 \\ &= 32,896 \end{aligned}$$

Nyní lze určit celkový součinitel přestupu tepla v MP, který můžeme vyjádřit pomocí vztahu (Nu_2 z rov. (5.58), l z rov. (5.33), λ_2 z Tab. 5.2):

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{l} \quad (5.59) \\ \alpha_2 &= \frac{32,896 \cdot 0,6029}{0,021991} = 901,91 \frac{W}{m^2 \cdot K} \end{aligned}$$

5.6 Tlakové ztráty

Při výpočtu tlakových ztrát bylo postupováno podle zdroje [10].

5.6.1 Tlakové ztráty v TP

Tlakové ztráty v TP můžeme rozdělit na ztráty vyvolané třením a ztráty vyvolané místními odpory.

Tlakové ztráty třením

V trubkách kruhového průřezu s jedním chodem lze určit tlakové ztráty pomocí rovnice:

$$p_{t1} = \lambda_{11} \cdot \frac{\rho_1 \cdot u_1^2}{2} \cdot z_1 \cdot z_2 \quad (5.60)$$

Kde λ_{11} je ztrátový součinitel, který má pro $Re_1 < 2320$ tvar (Re_1 z rov. (5.23)):

$$\lambda_{11} = \frac{64}{Re_1} \quad (5.61)$$

$$\lambda_{11} = \frac{64}{592,9} = 0,108$$

Součinitel z_1 je dán vztahem:

$$z_1 = \frac{l_t}{d_1} \quad (5.62)$$

$$z_1 = \frac{1,8}{0,012} = 150$$

Součinitel z_2 zohledňuje změnu dynamické viskozity v mezní vrstvě a pro směr tepelného toku z TP a $Re_1 < 2320$ má koeficient hodnotu $a = 0,5$. Je dán vztahem (η_{1S} z Tab. 5.3, η_1 z Tab. 5.2):

$$z_2 = \left(\frac{\eta_{1S}}{\eta_1}\right)^a \quad (5.63)$$

$$z_2 = \left(\frac{821,522 \cdot 10^{-6}}{484,528 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,5} = 1,273$$

Dosazením rovnic (5.61-63) do rov. (5.60) dostaneme (ρ_1 z Tab. 5.2):

$$p_{t1} = 0,108 \cdot \frac{984,5 \cdot 0,027^2}{2} \cdot 150 \cdot 1,273 = 7,2 \text{ Pa}$$

Tlakové ztráty místní

Tyto ztráty zahrnují ztráty na vstupu a výstupu pracovní látky ze svazku. Jejich výpočet lze provést podle vztahu:

$$p_{m1} = [\xi_{11} + \xi_{12}(n_{CH1} - 1)] \cdot \frac{\rho_1 \cdot u_1^2}{2} \quad (5.64)$$

Kde $n_{CH1} = 1$ je počet chodů. $\xi_{11} = 0,7$ je ztrátový součinitel místního odporu pro vstup a výstup z trubek, $\xi_{12} = 0,4$ je ztrátový součinitel pro ohyb proudu v komoře.

Dosazením získáme (ρ_1 z Tab. 5.2):

$$p_{m1} = [0,7 + 0,4 \cdot (1 - 1)] \cdot \frac{984,5 \cdot 0,027^2}{2} = 0,24 \text{ Pa}$$

Celkové ztráty v TP jsou dány součtem ztrát vyvolaných třením a místními ztrátami.

$$p_{z1} = p_{t1} + p_{m1} \quad (5.65)$$

$$p_{z1} = 7,2 + 0,24 = 7,44 \text{ Pa}$$

5.6.2 Tlakové ztráty v MP

V MP jsou tlakové ztráty vyvolány třením při obtékání trubek a segmentových přepážek, lze je rozepsat ve tvaru:

$$p_{z2} = p_{t2} = p_{to} + p_{tn} + p_{tv} \quad (5.66)$$

Jednotlivé členy ztrát budou vypočteny v následujících kapitolách.

5.6.3 Tlakové ztráty třením při příčném obtékání trubek v neopřepážkovaném prostoru svazku

Tyto ztráty jsou definovány vztahem:

$$p_{to} = 2 \cdot \lambda_{22} \cdot n_{rp} \cdot (n_p - 1) \cdot \rho_2 \cdot u_{2p}^2 \cdot z_2 \cdot z_3 \cdot z_4 \quad (5.67)$$

Kde λ_{22} je ztrátový součinitel, pro který platí:

$$\lambda_{22} = c_1 \cdot \left(\frac{1,33}{\frac{s}{d_2}} \right)^a \cdot Re_2^{a_1} \quad (5.68)$$

Koeficient a se vypočte pomocí vztahu:

$$a = \frac{c_2}{1 + 0,14 \cdot Re_2^{a_2}} \quad (5.69)$$

Pro $1000 > Re_2 > 100$ mají koeficienty hodnoty:

$$c_1 = 0,57$$

$$c_2 = 7$$

$$a_1 = -0,476$$

$$a_2 = 0,5$$

Po dosazení do rov. (5.69) získáme (Re_2 z rov. (5.34)):

$$a = \frac{7}{1 + 0,14 \cdot 535,52^{0,5}} = 1,651$$

Veškeré hodnoty dosadíme do rov. (5.68) a dostaneme hodnotu ztrátového součinitele:

$$\lambda_{22} = 0,57 \cdot \left(\frac{1,33}{\frac{0,02}{0,014}} \right)^{1,651} \cdot 535,52^{-0,476} = 0,025$$

Dále je nutné zjistit rychlost v nejužším průtočném průřezu zaplněného prostoru mezi jednou roztečí přepážek, pro kterou platí vztah (m_2 z rov. (5.2), S_{2Z} z rov. (5.49), ρ_2 z Tab. 5.2):

$$u_{2p} = \frac{m_2}{S_{2Z} \cdot \rho_2} \quad (5.70)$$

$$u_{2p} = \frac{0,154}{0,002 \cdot 997,7} = 0,066 \frac{m}{s}$$

Korekční faktory jsou vypočteny pomocí následujících vztahů:

Korekční faktor z2 – zohledňuje změnu látkových vlastností v mezní vrstvě, pro kapaliny bez ohledu na směr tepelného toku pro něj platí (η_{2S} z Tab. 5.3, η_2 z Tab. 5.2):

$$z_2 = \left(\frac{\eta_{2S}}{\eta_2} \right)^{0,14} \quad (5.71)$$

$$z_2 = \left(\frac{821,522 \cdot 10^{-6}}{942,932 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = 1,021$$

Korekční faktor z3 – tento faktor charakterizuje vliv obtokových proudů mezi trubkovým svazkem a pláštěm výměníku. Má stejnou podobu jako korekční faktor y7 použitý při výpočtu součinitele přestupu tepla v MP, pouze s rozdílnou hodnotou koeficientu, který má pro $Re_2 > 100$ hodnotu $c_1 = 3,7$. Platí pro něj tedy (S_{SS} z rov. (5.51), S_{2Z} z rov. (5.49), n_{rp} z rov. (5.52)):

$$z_3 = e \left[-c_1 \frac{S_{SS}}{S_{2Z}} \left(1 - \sqrt[3]{\frac{2 \cdot n_{PT}}{n_{rp}}} \right) \right] \quad (5.72)$$

$$z_3 = e \left[-3,7 \cdot \frac{11,76 \cdot 10^{-4}}{0,002} \left(1 - \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2}{4,338}} \right) \right] = 0,945$$

Korekční faktor z4 – vyjadřuje vliv zkratových proudů mezi přepážkou a pláštěm a mezi trubkami svazku a otvory v přepážkách. Pro jeho zjištění je potřeba spočítat koeficient, který je dán vztahem (S_{ps} z rov. (5.45), S_{tp} z rov. (5.44)):

$$x_{13} = -0,15 \left(1 + \frac{S_{ps}}{S_{tp} + S_{ps}} \right) + 0,8 \quad (5.73)$$

$$x_{13} = -0,15 \left(1 + \frac{3,16 \cdot 10^{-4}}{(3,16 + 6,97) \cdot 10^{-4}} \right) + 0,8 = 0,603$$

Korekční faktor bude potom (S_{ps} z rov. (5.45), S_{tp} z rov. (5.44), S_{2Z} z rov. (5.49)):

$$z_4 = e \left[-1,33 \cdot \left(1 + \frac{S_{ps}}{S_{tp} + S_{ps}} \right) \cdot \left(\frac{S_{tp} + S_{ps}}{S_{2Z}} \right)^{x_{13}} \right] \quad (5.74)$$

$$z_4 = e \left[-1,33 \cdot \left(1 + \frac{3,16 \cdot 10^{-4}}{(3,16 + 6,97) \cdot 10^{-4}} \right) \cdot \left(\frac{(3,16 + 6,97) \cdot 10^{-4}}{0,002} \right)^{0,603} \right] = 0,35$$

Nyní je možné určit tlakové ztráty dosazením rovnic (5.68-74) do rov. (5.67), (n_{rp} z rov. (5.52), n_p z Tab. 5.4). Dostaneme:

$$p_{to} = 2 \cdot 0,025 \cdot 4,338 \cdot (16 - 1) \cdot 997,7 \cdot 0,066^2 \cdot 1,021 \cdot 0,945 \cdot 0,35 = 4,865 \text{ Pa}$$

5.6.4 Tlakové ztráty třením při příčném obtékání trubek v neopřepážkovaném prostoru

Pro tyto ztráty platí vztah:

$$p_{tn} = 2 \cdot \lambda_{22} \cdot (n_{rp} + n_{rv}) \cdot \rho_2 \cdot u_{2p}^2 \cdot z_2 \cdot z_3 \cdot z_5 \quad (5.75)$$

Kde n_{rv} je počet příčně obtékaných řad trubek ve výřezu nad přepážkou, pro který je potřeba zjistit výšku svazku ve výřezu ovlivněnou příčným prouděním pracovní látky, pro niž platí vztah (h_p z Tab. 5.4., D_1 a D' z Obr. 5.1):

$$h_{vs} = 0,4 \cdot \left(\frac{D_1 + D'}{2} - h_p \right) \quad (5.76)$$

$$h_{vs} = 0,4 \cdot \left(\frac{0,152 + 0,12}{2} - 0,114 \right) = 0,0088 \text{ m}$$

Následně určíme počet příčně obtékaných řad podle vztahu (h_{vs} z rov. (5.76), t_{t2} z rov. (5.6)):

$$n_{rv} = 2 \cdot \frac{h_{vs}}{t_{t2}} \quad (5.77)$$

$$n_{rv} = 2 \cdot \frac{0,0088}{0,01732} = 1,016$$

Korekční faktor z_5 – zohledňuje vliv velikostí neopřepážkovaných prostorů podle vztahu:

$$z_5 = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot t_p}{l_{tn}} \right)^{2-a} \quad (5.78)$$

Kde koeficient má pro $Re_2 > 100$ hodnotu $a = 0,2$. Po dosazení dostaneme (t_p z Tab. 5.4, l_{tn} z rov. (5.54)):

$$z_5 = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,103}{0,2} \right)^{2-0,2} = 2,109$$

Nyní můžeme vypočítat ztráty dosazením rovnic (5.77-78) do rov. (5.75), (n_{rp} z rov. (5.52), ρ_2 z Tab. 5.2, u_{2p} z rov. (5.70), λ_{22} z rov. (5.68), z_2 a z_3 z rovnic (5.71-2)), dostaneme:

$$p_{tn} = 2 \cdot 0,025 \cdot (4,388 + 1016) \cdot 997,7 \cdot 0,066^2 \cdot 1,021 \cdot 0,945 \cdot 2,109 = 2,4 \text{ Pa}$$

5.6.5 Tlakové ztráty třením při podélném a příčném obtékání trubek v prostoru nad seříznutím přepážek

Pro tyto ztráty platí při $Re_2 > 100$ vztah:

$$p_{tv} = n_p \cdot \left((2 + 0,6 \cdot n_{rv}) \cdot \frac{\rho_2 \cdot u_{2v}^2}{2} \right) \cdot z_4 \quad (5.79)$$

Kde u_{2v} je rychlost pracovní látky vztažená ke střednímu geometrickému průměru průtočných průřezů, pro niž platí vztah:

$$u_{2v} = \frac{m_2}{\sqrt{S_{2Z} \cdot S_{vZ} \cdot \rho_2}} \quad (5.80)$$

Kde S_{vZ} je průtočný průřez zaplněného prostoru ve výřezu nad přepážkou. Pro jeho určení je potřeba nejprve zjistit velikost nezaplňného průřezu ve výřezu nad přepážkou, který je dán vztahem (D_1 z Obr. 5.1, φ_{vS} z Obr. 5.2):

$$S_{vN} = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot \left(\frac{\varphi_{vS}}{360} - \frac{\sin(\varphi_{vS})}{2 \cdot \pi} \right) \quad (5.81)$$

$$S_{vN} = \frac{\pi \cdot 0,152^2}{4} \cdot \left(\frac{120}{360} - \frac{\sin(120)}{2 \cdot \pi} \right) = 0,004 \text{ m}^2$$

Průtočný průřez je následně podle vztahu (S_{vN} z rov. (5.81), n_{tv} z rov. (5.41), d_2 z Obr. 5.1):

$$S_{vZ} = S_{vN} - n_{tv} \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \quad (5.82)$$

$$S_{vZ} = 0,004 - 4,103 \cdot \frac{\pi \cdot 0,014^2}{4} = 0,003 \text{ m}^2$$

Dosazením (S_{vZ} z rov. (5.81), ρ_2 z Tab. 5.2, m_2 z rov. (5.2), S_{2Z} z rov. (5.49)) do rov. (5.80) získáme rychlost u_{2v} :

$$u_{2v} = \frac{0,154}{\sqrt{0,002 \cdot 0,003 \cdot 997,7}} = 0,059 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dosadíme do rov. (5.79) a získáme velikost tlakových ztrát (ρ_2 z Tab. 5.2, u_{2v} z rov. (5.80), n_p z Tab. 5.4, n_{rv} z rov. (5.77), z_4 z rov. (5.74)):

$$p_{tv} = 16 \cdot \left((2 + 0,6 \cdot 1,016) \cdot \frac{997,7 \cdot 0,059^2}{2} \right) \cdot 0,35 = 25,33 \text{ Pa}$$

Celkové ztráty v MP jsou dány součtem jednotlivých ztrát, jejich velikost je:

$$p_{z2} = p_{t2} = 4,865 + 2,4 + 25,33 = 32,6 \text{ Pa}$$

Výsledné tlakové ztráty jsou nízké zejména kvůli malému hmotnostnímu průtoku a z toho plynoucí rychlosti, se kterou ztráty rostou exponenciálně.

5.7 Skutečný výkon a parametry výměníku

Skutečný výkon můžeme určit pomocí rovnice prostupu tepla ve tvaru (T_{ln} z rov. (5.12), k z rov. (5.14), n_t z rov. (5.7)):

$$Q_S = k \cdot T_{ln} \cdot n_t \cdot l_t \quad (5.83)$$

$$Q_S = 7,266 \cdot 34,77 \cdot 37 \cdot 1,8 = 16\,821,85 \text{ W}$$

Výsledný skutečný výkon je o 812 W (4,4 %) větší než požadovaný, čímž je splněna podmínka $Q_S \in (Q_p, 1,05 \cdot Q_p)$.

Název	Veličina	Hodnota	Jednotka
Skutečný výkon	Q_S	16 822	W
Vnější průměr pláště	D_1	152	mm
Vnitřní průměr pláště	D_2	168	mm
Počet trubek ve svazku	n_t	37	ks
Délka trubek	l_t	1800	mm
Vnější průměr trubek	d_2	14	mm
Vnitřní průměr trubek	d_1	12	mm
Rozteč trubek	s	20	mm
Počet přepážek	n_p	16	ks
Rozteč přepážek	t_p	103	mm
Hmotnostní tok vody z panelu	m_1	0,11	kg/s
Hmotnostní tok vody z řadu	m_2	0,154	kg/s
Teplota vody z panelu vstup	T_{11}	75	°C
Teplota vody z panelu výstup	T_{12}	40	°C
Teplota vody z řadu vstup	T_{21}	10	°C
Teplota vody z řadu výstup	T_{22}	35	°C
Rychlost proudu v TP	u_1	0,027	m/s
Rychlost proudu v MP	u_2	0,023	m/s
Součinitel přestupu tepla v TP	α_1	239,45	W/m ² · K
Součinitel přestupu tepla v MP	α_2	901,91	W/m ² · K
Součinitel prostupu tepla	k	7,266	W/m · K
Tlaková ztráta v TP	p_{z1}	7,44	Pa
Tlaková ztráta v MP	p_{z2}	32,6	Pa

Tab. 5.5 Parametry výměníku

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem tepelného výměníku pro využití nízkopotenciálního odpadního tepla. Zdrojem tohoto tepla je koncentrátorový fotovoltaický systém.

V první kapitole je popsána vybraná aplikace se zvolenými a požadovanými parametry. Následuje řešerše, která se zabývá regenerací odpadního tepla, dále stručně popsána technologie tepelného výměníku, jeho rozdělení a druhy. Poslední kapitola řešerše se zaměřuje na fotovoltaiku, solární podmínky v ČR a technologii koncentrace slunečního záření. V praktické části je uveden návrh výměníku a jeho tepelný a hydraulický výpočet.

Na začátku výpočtu byl podle vstupních hodnot určen potřebný výkon, který musí výměník dosáhnout a hmotnostní tok chladnějšího média. Při výpočtu součinitelů byl odhadnut součinitel přestupu tepla v TP a následně vypočten součinitel v MP a výsledný výkon. Pro tuto aplikaci byl zvolen jednochodý trubkový tepelný výměník v protiproudém uspořádání. Svazek trubek sestává ze 37 trubek 14x1 z nerezové oceli o délce 1800 mm. Vzhledem k nízkému průtoku vody v chladicím okruhu solárních panelů byly zvoleny nejmenší možné rozměry trubek. Tato voda proudí v trubkovém prostoru. V mezitrubkovém prostoru proudí voda z řady, pro její efektivnější ohřev je zde umístěno 16 segmentových přepážek s roztečí 103 mm. Výsledné tlakové ztráty jsou poměrně zanedbatelné z důvodu malých hmotnostních průtoků a celkové velikosti výměníku.

Ekonomický přínos instalace tohoto zařízení do domácnosti lze obtížně odhadnout kvůli velmi proměnlivému zdroji energie, který závisí především na počasí a ročním období. Pořizovací náklady na tento výměník by pravděpodobně převážily úsporu při ohřevu TUV, nicméně efektivním chlazením by se zvýšila produkce elektřiny. Konečná podoba výměníku je vzhledem k velikosti systému do určité míry neefektivní, co se týče přenosu tepla, tuto skutečnost můžeme zohlednit výběrem jiného typu výměníku, např. deskového.

Příloha obsahuje výkresovou dokumentaci výměníku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GHARZI, Mostafa, ARABHOSSEINI, Akbar, GHOLAMI, Zakieh, RAHMATI, Mohadam H., Progressive cooling technologies of photovoltaic and concentrated photovoltaic modules: A review of fundamentals, thermal aspects, nanotechnology utilization and enhancing performance [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20310008?fbclid=IwAR094PdLlnrhMljAuPNAkzv8okHNN7gndMYS5XYUCW9imvSroBSLiHLfcdw>
- [2] Asociace: Trh se soláry loni v ČR dál rostil, za Evropou zaostává, 2021 [online]. [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energetika-v-cr/asociace-trh-se-solary-loni-v-cr-dal-rostl-za-evropou-zaostava>
- [3] RENNO, Carlo a Michele DE GIACOMO. Dynamic Simulation of a CPV/T System Using the Finite Element Method. *Energies* [online]. 2014, 7(11), 7395-7414 [cit. 2022-05-03]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en7117395>
- [4] MARŠÍK, F., ZIMA, P., KLOMFAR, J, Možnosti kominovaného solárního chlazení a topení v podmínkách ČR s vazbou na FV, *Sborník příspěvků z odborného semináře* [online]. 2007 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6811134-Solarni-systemy-s-fv-ft-panely-a-jejich-vyuziti.html>
- [5] About waste heat [online]. [cit. 2022-04-3]. Dostupné z: <https://www.waste-heat.eu/about-waste-heat>.
- [6] I. Johnson, W. T. Choate and A. Davidson, “Waste Heat Recovery. Technology and Opportunities in U.S. Industry” BCS, Inc., Washington, D.C., 2008. [cit. 2022-03-18] Dostupné z: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf
- [7] THERMOPEDIA™, Waste heat recovery [online]. [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: http://www.thermopedia.com/content/1250/?fbclid=IwAR3KkSWSLXHOZK_kUbcHyf4Kq0qW_dbGr9q6tg8eNEntexzDQQ0Xd48UaHQ
- [8] Waste heat recovery technologies and applications [online]. [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904918300015#s0010>
- [9] BALÁŠ, M. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3955-9.

- [10] STEHLÍK, Petr, Josef KOHOUTEK a Jan NĚMČANSKÝ, 1991. Tepelné pochody: Výpočet výměníku tepla. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně. ISBN 80-214-0363-2.
- [11] Termomechanika [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: http://www.sps-ko.cz/!podklady/MEC_kratochvil/TERMOMECHANIKA_INTERNET_DOC/19_Souproudy_vymenik_tepla.pdf
- [12] Termomechanika – Protiproudý výměník tepla [online]. [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <http://www.hb73.kvalitne.cz/Dokumenty/mechanika/ICT-2-58.pdf>
- [13] SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERS, Thermopedia [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.thermopedia.com/content/1121/>
- [14] Fixed Tube Sheet Heat Exchangers, United cooling systems Ltd. [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://unitedcoolingtower.com/fixed-tube-sheet-heat-exchangers/>
- [15] FILSON Shell and Tube Heat Exchanger, Filson filters [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.filsonfilters.com/shell-and-tube-heat-exchangers>
- [16] Výměníky rekuperace tepla z kanalizačních systémů, ASB [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/zdravotni-technika/vymeniky-rekuperace-tepla-z-kanalizacnich-systemu>
- [17] SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERS, Thermopedia [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.thermopedia.com/content/1121/>
- [18] U TUBE HEAT EXCHANGER, Comp air treatment system P. Ltd. [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.compairindia.com/u-tube-heat-exchanger.html>
- [19] VÝMĚNÍKY TEPLA V ENERGETICE [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/PRO1-n%C3%A1vrh-v%C3%BDm%C4%9Bn%C3%ADku.pdf>
- [20] STAŇKOVÁ, Mária, FOTOVOLTAICKÉ SOLÁRNÍ SYSTÉMY [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://adoc.pub/4-fotovoltaicke-solarni-systemy-as-ke-studiu-2-hodiny-cil-po.html>
- [21] CRITCHLEY, Liam, How is Photovoltaic Energy Produced? [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=980>
- [22] BENEDIKT, Jaroslav, SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ JAKO ZDROJ ENERGIE [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/18_Zaklady-ekologie_48-49/48_IUT/113_Slunecni-energie---Benedikt---P0.pdf

- [23] CHMEL Ladislav, HAMERNÍK, Ivo, *Fotovoltaika, fototermika* [online]. [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/91/Impresum.html>
- [24] Fotovoltaické systémy pro výrobu elektřiny, [online]. [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: https://www.cne.cz/fotovoltaicke-systemy/uvod-do-fv-systemu/?fbclid=IwAR3qgeWLZ-K_aZ6kvy6IEu0lAvjcd4KoOhM1RLk_EvjDr-mQUdPzJnwbukE
- [25] Fotovoltaika v podmínkách České republiky, Isofenenergy [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [26] KOSMÁK, František, Princip fotovoltaického článku [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/princip-fotovoltaickeho-clanku?fbclid=IwAR0DcIftKFm0a6MWTiFdY8r8DP4q4B1D0FdYdj56MFuzMuWvsVoZtRreoYE>
- [27] An Overview of the Materials Used for Solar Cells, G2V Optics [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://g2voptics.com/photovoltaics-solar-cells/solar-cell-materials/>
- [28] MOHARRAM, K.A., ABD-ELHADY, M.S., KANDIL, H.A., EL-SHERIF, H., Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447913000403#f0005>
- [29] HONRUBIA, Mario, The Future of Solar Energy: High Concentrated Photovoltaic (CPV) Cells [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.ennomotive.com/future-of-solar-energy/>
- [30] Concentrating Photovoltaics (CPV), Green Rhino Energy [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_concentration.php
- [31] What are concentrating photovoltaics? [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/eme812/node/537>
- [32] HCPV Solar Parabolic Solar Concentrator Technology [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.solartronenergy.com/hcpv-solar/?fbclid=IwAR0NF2dzKrPPbt4Xl6bGwKlpvBoKQMXxyVTf6avD9Ds2cuLWvG2oKL1ZgOQ>
- [33] SHELL & TUBE HEAT EXCHANGERS, WCR [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://wcrhx.com/heat-exchangers/shell-and-tube-heat-exchangers/>
- [34] THULUKKANAM, Kuppan, 2013. Heat Exchanger Design Handbook. Druhé. New York: Taylor and Francis Group. ISBN 978-1-4398-4212-b.

- [35] Solar Photovoltaic Cell Basics [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics?fbclid=IwAR1ff5CwbM6Og47EKY5Rr7NG9lr_dyImLqXmadtT6EeF8o4veo9RgeQyx3g
- [36] SteamTab™ Companion, *ChemicalLogic Corporation*, 2003 [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <http://www.chemicallogic.com/Pages/DownloadSteamTabCompanion.html>
- SteamTab™ Companion, *ChemicalLogic Corporation*, 2003 [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <http://www.chemicallogic.com/Pages/DownloadSteamTabCompanion.html>
- [37] Čez testuje první plovoucí fotovoltaickou elektrárnu v ČR, *Skupina ČEZ*, 2022 [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/multimedia/cez-testuje-prvni-plovouci-fotovoltaickou-elektrarnu-v-cr-154511>
- [38] A new structured thermal armour achieves liquid cooling above 1,000°C, overcoming challenge of Leidenfrost effect, *City University of Hong Kong*, 2022 [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.cityu.edu.hk/research/stories/2022/01/27/new-structured-thermal-armour-achieves-liquid-cooling-above-1000degc-overcoming-challenge-leidenfrost-effect>
- [39] SUNDARAM, Senthilarasu, BENSON, David, MALLICK Tapas Kumar, *Solar Photovoltaic Technology Production*, 2016 [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802953-4.00003-2>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
TP	Trubkový prostor	
MP	Mezitrubkový prostor	
a_i	Koeficient	–
c_i	Koeficient	–
c_{pi}	Měrná tepelná kapacita	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
c_{piS}	Měrná tepelná kapacita vody na stěně trubek	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
d_1	Vnitřní průměr trubky	m
d_2	Vnější průměr trubky	m
d_{2p}	Průměr otvoru pro trubku v přepážce	m
D_i	Průměr pláště	m
D_s	Průměr obalové kružnice svazku	m
D_p	Průměr přepážky	m
D'	Průměr kružnice procházející osami trubek	m
h_p	Výška přepážky	m
h_{vS}	Výška svazku ve výřezu	m
i_{ii}	Měrná entalpie vody	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
k	Součinitel prostupu tepla	$\text{W/m} \cdot \text{K}$
k_i	Vůle mezi svazkem a pláštěm	m
l	Délka proudnice	m
l_t	Délka trubek	m
l_{tn}	Délka neopřepážkované části	m
m_i	Hmotnostní tok	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
n_{rp}	Počet příčně obtékaných řad trubek mezi přep.	–
n_t	Počet trubek	–
n_{rv}	Počet příčně obtékaných řad	–
n_{tv}	Počet trubek ve výřezu přepážky	–
Nu_i	Nusseltovo číslo	–
p_{t1}	Tlakové ztráty třením v TP	Pa
p_{to}	Tlakové ztráty při obtékání trubek v neop. prostoru	Pa
p_{tn}	Tlakové ztráty při obtékání trubek v neop. prostoru	Pa
p_{tv}	Tlakové ztráty při obtékání trubek v prostoru and přepážkou	Pa
p_{m1}	Tlakové ztráty místní v TP	Pa

p_{zi}	Tlakové ztráty	Pa
Pr_i	Prandtlovo číslo	—
Pr_{iS}	Prandtlovo číslo na stěnách trubek	—
\dot{Q}_p	Potřebný výkon	W
Q_S	Skutečný výkon	W
Re_i	Reynoldsovo číslo	—
s_p	Šířka přepážky	m
s_{tt}	Mezera mezi trubkami	m
Σs_{tt}	Součet mezer	m
S_i	Teplosměnná plocha	m^2
S_{1p}	Průtočný průřez v TP	m^2
S_{2N}	Nezaplňený průřez mezi jednou roztečí přepážek	m^2
S_{2Z}	Průtočný průřez zapl. prostoru mezi jednou roztečí přep.	m^2
S_{ps}	Průtočný průřez mezi přepážkou a pláštěm	m^2
S_{sS}	Průtočný průřez obtokového proudu mezi jednou rozt. přep.	m^2
S_{tp}	Průtočný průřez v přepážce	m^2
s_{tS}	Mezera mezi svazkem a pláštěm	m
S_{vN}	Nezaplňený průřez ve výřezu and přepážkou	m^2
S_{vZ}	Průtočný průřez zapl. prostoru ve výřezu and přep.	m^2
t_{ti}	Rozteč vůči směru toku	m
t_p	Rozteč přepážek	m
T	Teplota pracovních látek	°C
T_{iS}	Teplota na stěně trubek	°C
T_{ln}	Střední logaritmičkový teplotní rozdíl	°C
u_1	Rychlost proudění v TP	$m \cdot s^{-1}$
u_2	Rychlost proudění v MP	$m \cdot s^{-1}$
u_{2p}	Rychlost v nejužším průt. průřezu zapl. prostoru mezi přep.	$m \cdot s^{-1}$
u_{2v}	Rychlost látky vztažená ke střednímu geom. průměru	$m \cdot s^{-1}$
x_i	Koeficient	—
y_i	Korekční faktory součinitele přestupu tepla v MP	—
z_i	Korekční faktory tlakových ztrát	—
α_i	Součinitel přestupu tepla	$W/m^2 \cdot K$
λ_i	Měrná tepelná vodivost vody	$W/m \cdot K$
λ_{iS}	Měrná tepelná vodivost vody na stěně trubek	$W/m \cdot K$
λ_{11}	Ztrátový součinitel v TP	—
λ_{22}	Ztrátový součinitel v MP	—
ξ_{11}	Ztrátový součinitel místních odporů	—

ξ_{12}	Ztrátový součinitel pro ohyb proudu v komoře	—
η_i	Dynamická viskozita vody	Pa · s
η_{iS}	Dynamická viskozita vody na stěně trubek	Pa · s
φ_{vp}	Úhel výřezu přepážky	°
φ_{vS}	Úhel výřezu os krajních trubek	°
φ'_{vS}	Úhel výřezu svazku	°
ρ_i	Hustota vody	kg · m ⁻³
ν_i	Kinematická viskozita vody	m ² · s ⁻¹
ψ	Mezerovitost	—

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Hodinový průběh teploty článku v letním dni [1].....	12
Obr. 1.2	Schéma systému [4]	14
Obr. 1.3	Popis chladicího okruhu ve studii [3]	14
Obr. 3.1	Souproudý výměník [11]	20
Obr. 3.2	Protiproudý výměník [12].....	20
Obr. 3.3	Trubkový výměník [34]	23
Obr. 3.4	Výměník s rovnými trubkami [15]	24
Obr. 3.5	Článekový výměník [16]	25
Obr. 3.6	Výměník s plovoucí hlavou [17].....	25
Obr. 3.7	Výměník s U-trubkami [18].....	26
Obr. 3.8	Výměník se šroubovitě vinutou trubkou [19]	26
Obr. 4.1	Ukázka fotovoltaické elektrárny [21]	27
Obr. 4.2	Přímé a difuzní záření v průběhu roku [23]	28
Obr. 4.3	Roční úhrn globálního záření [25]	29
Obr. 4.4	Mapa trvání slunečního svitu v ČR [25]	29
Obr. 4.5	Schéma solárního článku [20].....	30
Obr. 4.6	Vliv teploty na výkon [28].....	33
Obr. 4.7	Ukázka koncentrátorového systému [30]	33
Obr. 4.8	Koncentrace pomocí Fresnelovy čočky [32]	34
Obr. 5.1	Rozměry svazku trubek a pláště	39
Obr. 5.2	Příčný průřez v MP	44

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 Rozdělení podle stupně koncentrace záření [30].....	34
Tab. 5.1 Hodnoty měrné entalpie vody	36
Tab. 5.2 Vlastnosti vody v TP a MP.....	37
Tab. 5.3 Vlastnosti vody při středních teplotách na stěně trubek v TP a MP.....	41
Tab. 5.4 Parametry přepážek	44
Tab. 5.5 Parametry výměníku.....	56

SEZNAM PŘÍLOH

- 1 Výkres sestavení výměníku tepla