VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

SNÍŽENÍ KOMÍNOVÉ ZTRÁTY KRBOVÝCH KAMEN

DRY FLUE GAS LOSS OF FIREPLACE STOVE REDUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Petr Vodvárka
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	**Petr Vodvárka**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Marek Baláš, 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:

Snížení komínové ztráty krbových kamen

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ztráta fyzickým teplem spalin, neboli komínová ztráta, je největší ztrátou kotlů. Teplota spaliny odcházejících ze spalovacího zařízení je vysoká a není dále využívána. Obsahem bakalářské práce je návrh tepelného výměníku pro využití zbytkové energie spalin z krbových kamen.

Cíle bakalářské práce:

– přehled typů výměníků tepla,
– přehled aplikací dodatkových výměníků na spalinovody kamen a krbů,
– návrh vhodné technologie pro konkrétní aplikaci,
– návrh teplosměnných ploch,
– výkresová dokumentace.

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

BUDAJ, Florian. Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet. 4. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992.

DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7.

KUPPAN, Thulukkanam. Heat exchanger design handbook. New York: Marcel Dekker, 2000. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.). ISBN 08-247-9787-6.

STEHLÍK, Petr, Josef KOHOUTEK a Jan NĚMČANSKÝ. Tepelné pochody: Výpočet výměníku tepla. Brno: VUT, 1991. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0363-2.

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 snížením komínové ztráty krbových kamen s využitím odpadního tepla. Cílem této práce je navrhnout funkční konstrukci a spočítat tepelný výkon výměníku tepla. Výměník je nutné navrhnout na konkrétní krbová kamna existující v reálném prostředí a s reálnými parametry. Součástí této práce je mimo jiné technická dokumentace krbových kamen a výkres výměníku tepla. V závěru je určeno o kolik se snížila komínová ztráta při instalaci výměníku na kouřovod kamen a jaké jsou výhody a nevýhody samotného používání výměníku.

Klíčová slova

Výměník tepla, komínové ztráty, odpadní teplo, krbová kamna

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the reduction of chimney heat loss of a fireplace stove with waste heat recovery. The results are the design of a functional heat exchanger and the calculation of the heat output. The heat exchanger must be designed for specific fireplace stove existing in a real living room and with realistic parameters. Technical documentation of the fireplace stove and a drawing of the heat exchanger are included in this thesis. Calculations of the reduction of chimney heat loss using the heat exchanger on a chimney are included in the conclusions. The advantages and disadvantages provided by using the heat exchanger are discussed.

Key words

Heat exchanger, chimney losses, waste heat, fireplace stoves

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VODVÁRKA, Petr. Snížení komínové ztráty krbových kamen. Brno, 2022. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139368. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Snížení komínové ztráty krbových kamen** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Petr Vodvárka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Markovi Balášovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD 11
1 Výměníky tepla 12
1.1 Obecný popis 12
1.2 Rozdělení výměníků 12
1.2.1 Rekuperační 12
1.2.2 Regenerační 14
1.2.3 Kontaktní 15
1.2.4 Směšovací 15
1.2.5 Další rozdělení výměníků tepla 15
1.3 Použití výměníků tepla 17
1.4 Požadavky na výměník tepla a teplonosné látky 17
1.4.1 Požadavky na výměník 17
1.4.2 Požadavky na teplonosné látky 17
1.5 Provoz výměníku tepla 18
1.5.1 Zanášení 18
1.5.2 Koroze 18
1.5.3 Abraze 19
1.6 Způsoby vytápění 19
1.7 Dodatečná instalace tepelných výměníků 21
1.7.1 Teplovodní výměník 21
1.7.2 Teplovzdušný výměník 22
2 Výpočet a návrh tepelného výměníku 24
2.1 Výpočet výměníku 25
2.2 Návrh rozměrů, geometrie a materiálu výměníku tepla 25
2.3 Vybrané fyzikální parametry vstupního chladného média (vzduch) 27
2.4 Vybrané fyzikální parametry spalin (vstupní teplé médium) 30
2.5 Sdílení tepla 32
2.6 Výkon pláště výměníku 34
2.7 Celkový výkon výměníku 34
2.8 Výkon pláště kouřovodu v místě určeném pro výměník tepla 34
2.9 Porovnání výkonů výměníku a kouřovodu 35
2.10 Porovnání výpočetních metod ε-NTU a LMTD 35
2.11 Konečné parametry navrženého výměníku tepla 35
2.12 Výhody a nevýhody instalace a použití výměníku 35
Závěr 37
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 38
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 41
SEZNAM PŘÍLOH 44

ÚVOD

Tato práce se zabývá využitím odpadního tepla k ohřátí prostoru, ve kterém se nacházejí krbová kamna s kouřovodem. Využití tohoto tepla se bude odehrávat v tepelném výměníku, který bude umístěn na kouřovod kamen. Téma pro svoji bakalářskou práci jsem si vybral proto, aby co nejvíce reflektovalo můj postoj ke zdrojům. Naše zdroje jsou omezené, a proto je velmi důležité s nimi šetrně hospodařit a neméně důležité je dokázat využít odpad. V tomto případě se jedná o odpadní teplo z krbových kamen.

První část bakalářské práce se zabývá obecnou definicí tepelného výměníku a jeho rozřazením. Je zde zahrnuto obecné pochopení problematiky. Tepelné výměníky jsou dnes nedílnou součástí naprosté většiny průmyslových odvětví (elektrárny, chemičky, teplárny, automobily, letadla atd.). Své místo mají i v domácnostech (radiátory). Při návrhu výměníku je kladen velký důraz, aby výměník byl co nejúčinnější, ale zároveň aby měl co nejmenší rozměry.

Druhá část je praktického charakteru zaměřena na konkrétní aplikaci tepelného výměníku, včetně provedených výpočtů s naměřenými a zadanými vstupními hodnotami. Při výpočtech výměníku jsou používány zejména dvě metody a to: metoda LMTD a metoda ε-NTU. Obě metody jsou rovnocenné. V této závěrečné práci je zpracována metoda ε-NTU. Metoda LMTD je součástí příloh. Obě metody jsou v závěru práce porovnány. V závěru práce se mimo jiné nachází datasheet výměníku, shrnutí výhod a nevýhod a naplnění hlavního cíle bakalářské práce – snížení komínové ztráty.

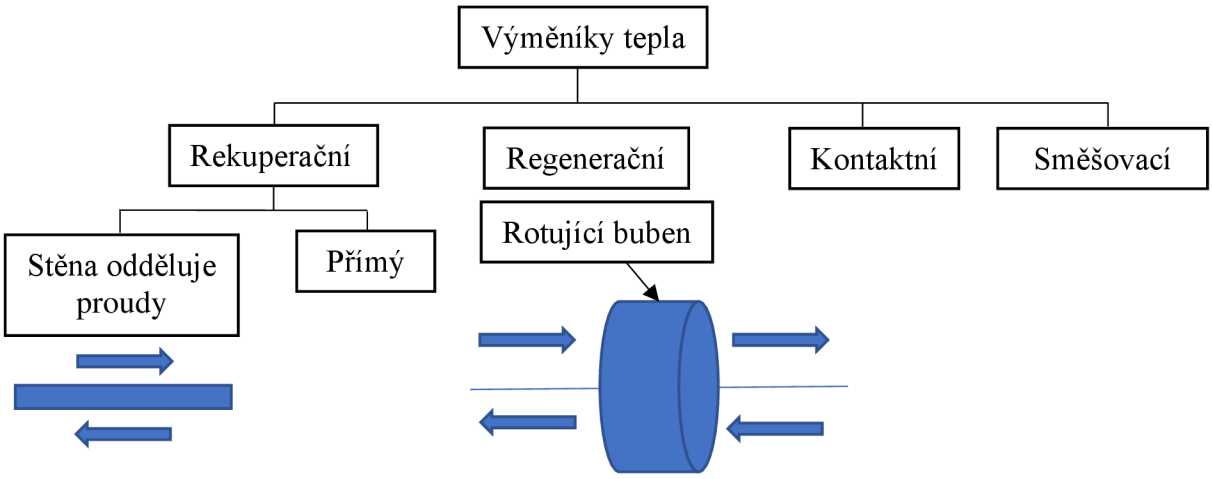
1 Výměníky tepla

1.1 Obecný popis

Přenos tepelné energie, (získané ve spalovacích zařízeních) na vytápění, technologický ohřev nebo na výrobu elektrické energie, se odehrává v tepelných systémech – výměnících tepla. Výměníky tepla jsou zařízení, která slouží k průběžnému nebo přerušovanému předání tepelné energie pomocí proudících teplonosných médií. Dochází zde k předávání tepla z tepelného (ohřívacího) média do média chladnějšího (ohřívaného) [1]. Přenos tepla ve výměnících je kombinací všech druhů mechanismů přenosu tepla, tj. přirozená a nucená konvekce[1], radiace[2] a kondukce[3] [2].

1.2 Rozdělení výměníků

Rozlišují se čtyři základní typy výměníků (podle pracovního pochodu). Další možné dělení je podle charakteru proudění, podle konstrukce a podle použití tepelných výměníků.



Obr. 1 Rozdělení výměníků [3]

1.2.1 Rekuperační

Rekuperace – obecně se jedná o zpětný zisk energie. Zpětně je možné získat elektrickou energii (využívají toho elektromobily) a tepelnou energii [3]. Tepelnou energii lze získat z odpadní vody, teplého vzduchu unikajícího při vaření nebo z vydýchaného vzduchu [4]. Ohřívající i ohřívaná média jsou tekutá a oddělena neprostupnou stěnou, tudíž teplonosné látky nejsou schopny přímého kontaktu. Přenos tepla je realizován prostupem tepla (vedení a proudění současně). Pevná stěna v rekuperačních výměnících tvoří výhřevnou plochu výměníku. Rekuperační výměníky rozlišíme podle změny skupenství na neměnné nebo se změnou jedné, či obou teplonosných látek. Dále pak podle proudění (omývání příčné a podélné) a uspořádání trubek (za sebou a přesazené). Nejvýhodnější rekuperační výměník pro přenos tepla konvekcí má tyto vlastnosti: protiproudé uspořádání, proudění vnější pracovní látky kolmo na výhřevnou plochu trubek a přesazené uspořádání. Trubkové výměníky jsou jedny

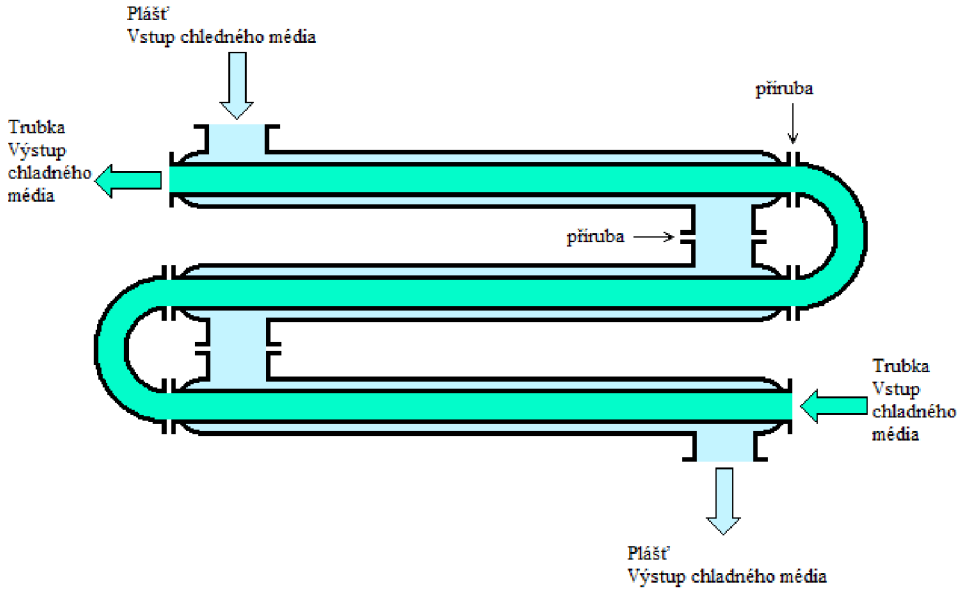
---

[1] Konvekce (proudění) – Pokud se přemístí molekula vlivem nuceného či přirozeného proudění, přenese tak i svoji tepelnou energii. *„Přenos tepla konvekcí probíhá tedy v tekutinách (difúze v pevných látkách)“*

[2] Radiace (sálání/záření) – Teplo se přenáší od zdroje, kterým je každý objekt T>0 K, pomocí elektromagnetických vln, které se šíří rychlostí světla. Nositelem tepelné energie jsou fotony [25], [26], [23].

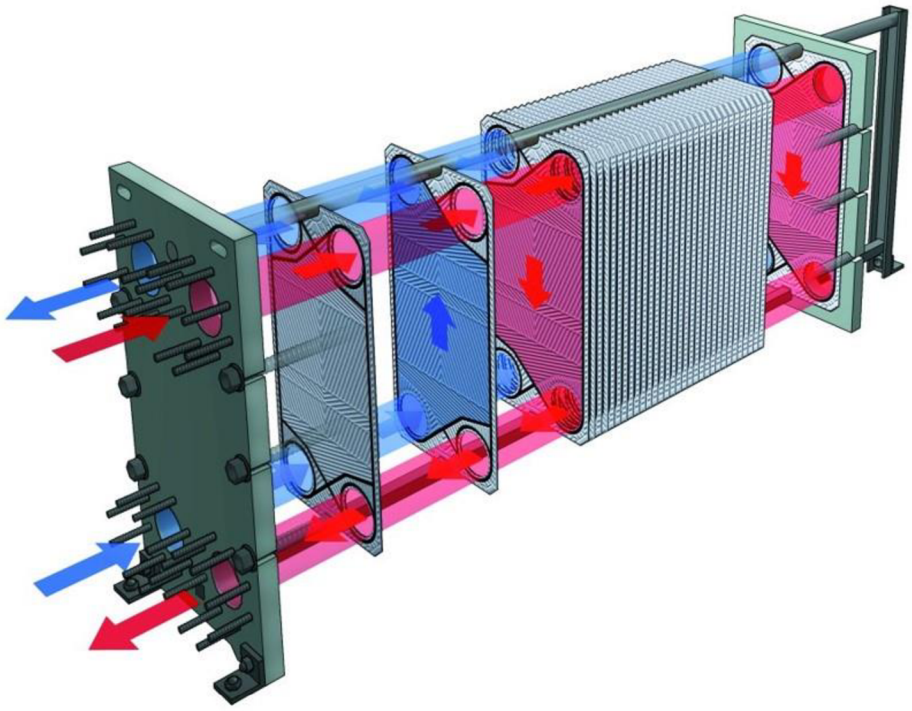
[3] Kondukce (vedení) – *„Kinetická energie neuspořádaného pohybu molekul se předává srážkami na sousední molekuly, a tak se přenáší tepelná energie“* [23].

z nejčastějších typů rekuperačních výměníků.



Obr. 2 Dvoutrubkový výměník [19]

V dnešní době však zaznamenávají zvýšený nárust instalací deskové výměníky [1]. Deskové výměníky mohou být s rovnými deskami, spirálovými deskami, lamelové a z desek a výplní [2].

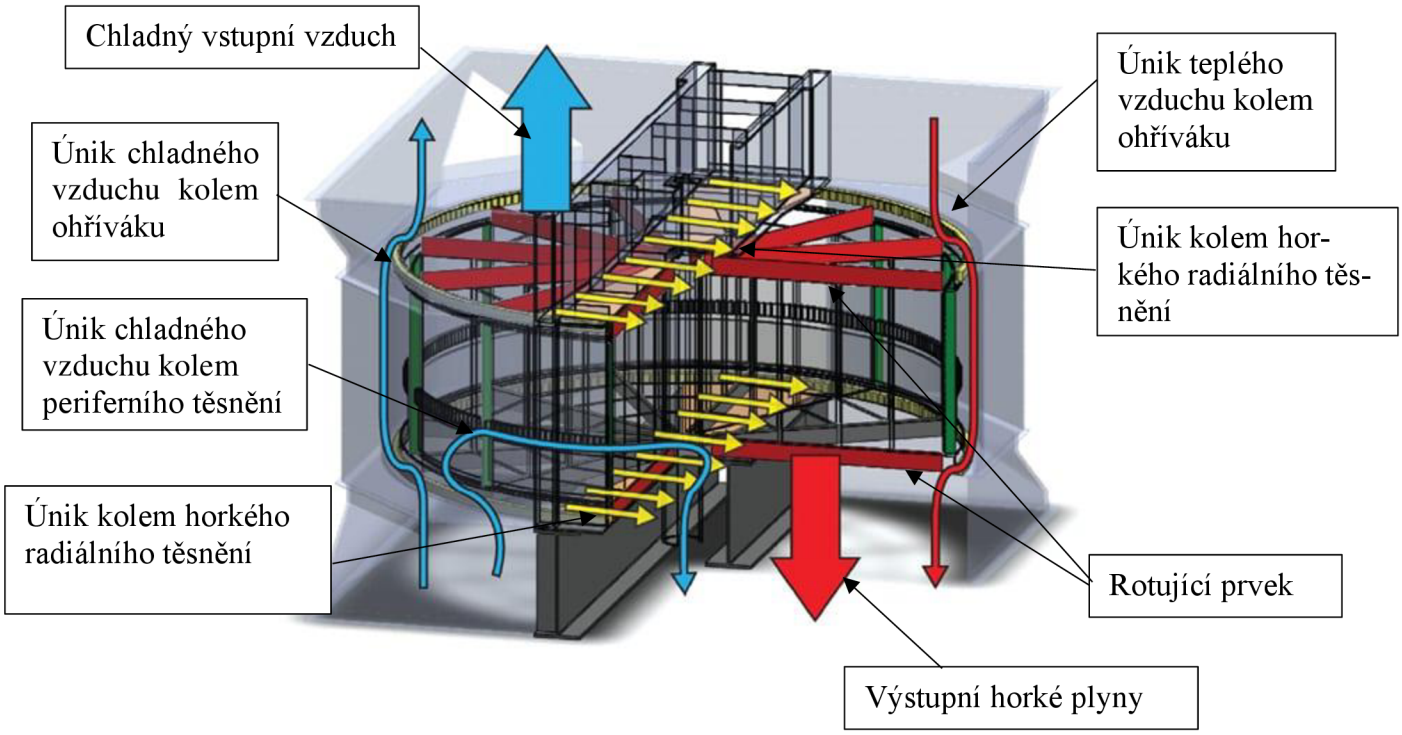


Obr. 3 Schéma proudění v deskovém výměníku [22]

1.2.2 Regenerační

Ohřívající médium vtéká do vymezeného prostoru, kde kontaktem předává svoje teplo pevnému elementu. S určitým časovým zpožděním vtéká ohřívané médium do stejného prostoru, kde přijímá naakumulované teplo přivedené ohřívajícím médiem. Může dojít k částečnému smíšení obou médií [1].

Nejrozšířenějším typem regeneračního výměníku je Ljungström. Jedná se o ohřívák vzduchu kotle, tj. výměník spaliny-vzduch. „Je poslední teplosměnnou plochou teplárenských kotlů [1]“. Jeho největší přednosti jsou možnosti vyššího ohřátí vzduchu, možnost volby nižších výstupních teplot a potřeba menšího obestavěného prostoru pro shodné výkony ohříváku.



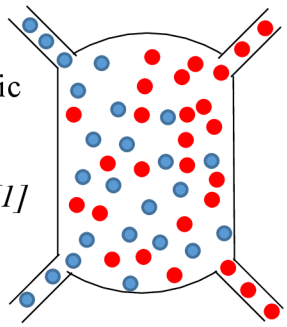
Obr. 4 ohřívák vzduchu Ljungström [4]

Ohříváky vzduchu jsou aplikovány buď s vertikální, nebo horizontální osou. „Ohříváky jsou typizovány a jsou stavěny do průměru rotoru až 20 m s počtem otáček 2−6 min^{-1} a výkonem poháněného elektromotoru do 40 kW [1]“. Jedná se o technicky náročné zařízení, na které se musí dbát zvýšené pozornosti i během svého provozu (například při najíždění a odstavení) a při údržbě (po odstavení kotle se musí nechat rotory ohříváku v chodu, dále pak celý ohřívák propláchnout vodou, *„po promytí je nutné výhřevné náplně vysušit horkým vzduchem nebo použít jiný způsob pasivace* [1] .“ Obvykle je asi 50 % až 60 % celkového tepelného obsahu výstupních plynů zachyceno a recyklováno, to má za následek asi 10 % zlepšení účinnosti kotle ve srovnání se stejnou jednotkou bez ohříváku [5]. Nevýhody těchto ohříváků jsou prolínání obou pracovních látek a menší těsnost[4].

[4] Je extrémně náročné utěsnit tyto dynamické struktury kvůli jejich velkému průměru a velkým teplotním rozdílům [5].

1.2.3 Kontaktní

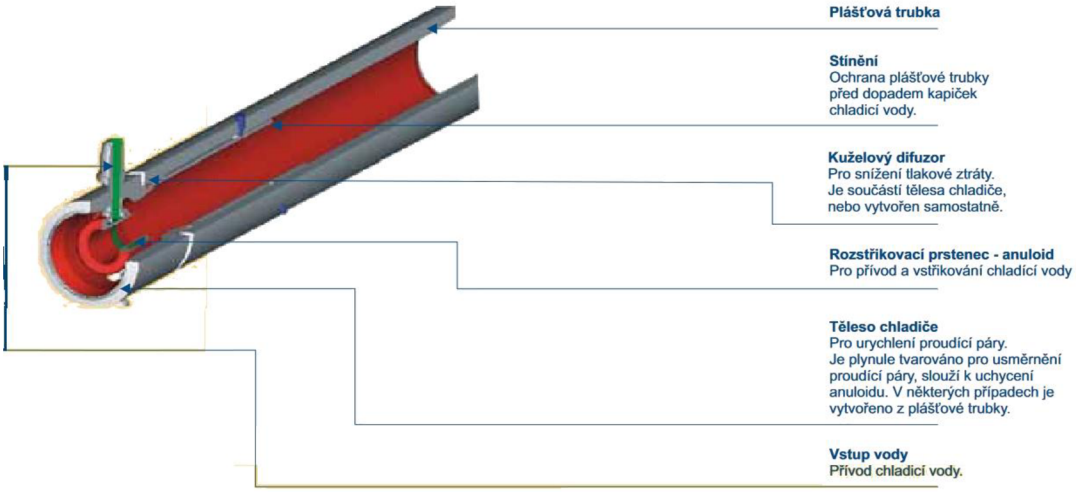
Teplá a studená média jsou rozdílných fází. V jednom místě se smíchají obě pracovní látky. Po vzájemné výměně tepla jsou od sebe znovu odděleny [6]. Teplosměnná plocha je dána povrchem částic pevné fáze.



Obr. 5 Kontaktní výměník [1]

1.2.4 Směšovací

Teplá a studená média přicházejí do přímého kontaktu, a vytvářejí tak homogenní směs. Směšovací výměník nemá teplosměnné plochy. *„Sdílení tepla zde probíhá přímým stykem obou pracovních látek* [1]*.“* V teplárenství se používají především při ohřevu napájecí vody a vstřiku vody do páry (voda musí být vždy chladnější). Tento vstřik se používá k regulaci teploty přehřáté páry u kotle (snižuje její teplotu). *„Množství vstřikované vody je automaticky regulováno* [1]*.“* Jejich hlavní výhodou je jednoduchá konstrukce a rychlá odezva na teplotu přihřáté páry [1].



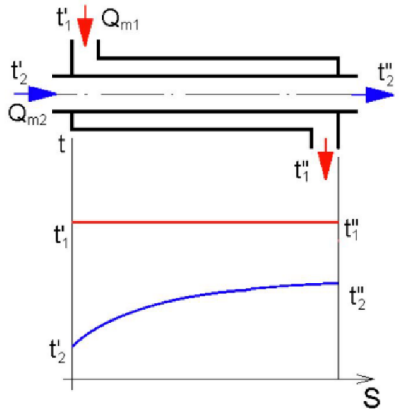
Obr. 6 Vstřikovací chladič páry od společnosti G-TEAM [25]

Další možná aplikace směšovacího výměníku je ohřev napájecí vody. Mísí se zde voda a nízkotlaká pára. Tento typ výměníku je označován jako odplyňovák[5].

1.2.5 Další rozdělení výměníků tepla

- Podle účelu a použití
  Ohříváky a chladiče – ohřívané, resp. ochlazované médium v nich zvyšuje, resp. snižuje svoji teplotu beze změny fáze.

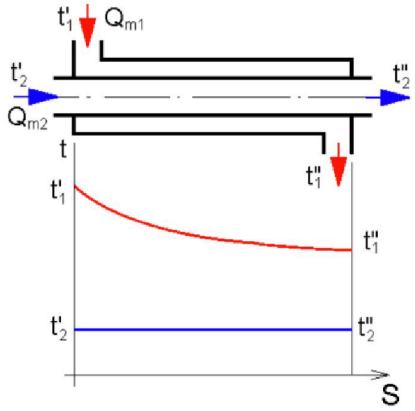
[5] Dochází zde nejen k výměně tepla, ale i ke změně chemického složení [1].



Kondenzátor – dochází zde ke zkapalnění syté nebo mokré páry za stálé teploty [7].

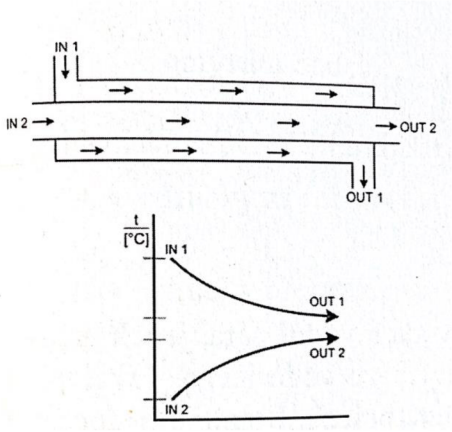
Obr. 7 Kondenzátor [7]

Výparník – dochází k vypaření syté vody v mokrou nebo sytou páru za stálé teploty [7].

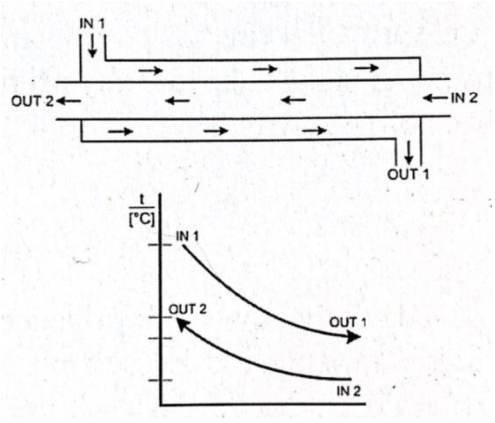


Obr. 8 Výparník [7]

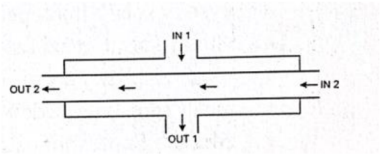
- Podle způsobu přenosu tepla (konvekční, sálavé a kombinované).
- Podle vzájemného směru a smyslu proudění obou médií (souproudé, protiproudé, křížové atd…) [1].



Obr. 10 Souproudý výměník [1]



Obr. 9 Protiproudý výměník [1]



Obr. 11 Křížový proud [1]

- Podle konstrukce se dělí na výměníky plášťové (svazky trubek uvnitř pláště), kompaktní (žebrované pro kapalina-plyn, plyn-plyn) a jiné.

1.3 Použití výměníků tepla

Tepelné výměníky jsou dnes nedílnou součástí naprosté většiny průmyslových odvětví. Lze je najít v elektrárnách, chemičkách, v oblastech vytápění (radiátory v domácnostech), v oblasti chlazení – klimatizace, ledničky (výparníky a kondenzátory). Dále pak v dopravním průmyslu např.: automobily, letecká doprava atd. Do aut se montují zejména kompaktní výměníky, kde je naprosto nezbytné, aby měly co možná nejmenší rozměry jedná se o chladiče oleje, vzduchu, vody, výparníky a kondenzátory [7].

1.4 Požadavky na výměník tepla a teplonosné látky

Je nutné zajistit co nejintenzivnější předání tepla s nejnižšími možnými náklady. Toho je možné dosáhnout volbou vhodného materiálu, konstrukčními úpravami a volbou vhodného pracovního média [1].

1.4.1 Požadavky na výměník

- Malé rozměry, hmotnost a nízké cena výměníku
- Minimální tlakové ztráty (čerpací práce)
- Vysoká spolehlivost v provozu

Na první dva požadavky je kladen důraz především při konstrukčním návrhu, popřípadě výběru vhodného typu výměníku. Na třetí požadavek má vliv nejen návrh, ale také je velmi ovlivněn správnou, kvalitní a pravidelnou údržbou [1].

1.4.2 Požadavky na teplonosné látky

Vhodná volba média dokáže výrazně ovlivnit funkci výměníku. V řadě případů není možné si vhodně vybrat konkrétní médium, protože je předem určeno systémem, ve kterým výměník pracuje. Pokud existuje možnost výběru média, volíme s přihlédnutím na tyto faktory:

- Velká měrná kapacita, popř. měrné výparné teplo[6]
- Vysoký součinitel tepelné vodivosti a přestupu tepla
- Vhodný vztah mezi teplotou varu a tlakem
- Nízká viskozita a s ní související nízké tlakové ztráty při proudění
- Nízká agresivita vedoucí ke korozi zařízení
- Zdravotní nezávadnost
- Dostatečný výskyt v biosféře
- Relativně nízká cena

[6] Měrné skupenské teplo varu je teplo, které přijme 1 kilogram kapaliny, jestliže se za teploty varu celý přemění na plyn téže teploty [27]

Obecně tyto předpoklady nejlépe splňují voda a vodní pára, mají však určité nedostatky (koroze materiálu, vznik nánosů solí obsažených ve vodě) [1].

1.5 Provoz výměníku tepla

Nejčastější mechanismy poruch:

- Zanášení
- Koroze[7]
- Abraze

Další možné poruchy: špatné svary, netěsnosti v zaválcování, trhliny v důsledku vibrací svazků trubek, kavitační poškození [1].

1.5.1 Zanášení

„Zanášení je usazování různých materiálů (zejména solí, korozních produktů a pevných částic) z teplonosných látek na teplosměnných plochách. Usazeniny zde vytvářejí zvýšený tepelný odpor, a tím snižují přenos tepla [1].“ Dalšími negativními dopady jsou: zúžení průtočného průřezu, a tím se zvyšuje rychlost proudění média a možnost vzniku korozivního prostředí.

Opatření:

- Konstrukční řešení
- Snížení koncentrace solí v pracovních médiích
- Snížení koncentrace popílku ve spalinách

1.5.2 Koroze

Při korozi se zeslabuje trubka. Vznik koroze je způsoben teplonosnými médii a kvalitou materiálu teplosměnných trubek. Koroze nejrychleji postupuje při odstávkách výměníku tepla a je doporučeno výměník konzervovat. Pokud je teplonosným médiem voda, tak ke korozi může dojít například špatným odplyněním vody nebo pokud má voda špatný pH faktor [1].

Opatření:

- Konstrukční řešení
- Úprava korozního prostředí – odplyněním, vysušením, změna pH
- Použití povlaků k ochraně materiálu [1]

[7] Koroze je samovolné, postupné rozrušení kovů či nekovových organických i anorganických materiálů vlivem chemické nebo elektrochemické reakce s okolním prostředím. [28]

Obr. 12 Poškozený výměník korozí a usazeninami [8]

1.5.3 Abraze

K abrazi neboli otěru dochází především tam, kde teplonosné látky obsahují tuhé částice většinou ze spalování. Tyto částice spalin způsobují úbytek materiálu tzv. popílkovým otěrem. S abrazí se nejčastěji setkáme u ohříváku vzduchu kotle, ohříváku vody, lopatkách spalinových ventilátorů a mlýnských okruzích.

Opatření:

- Snížení rychlosti spalin (úbytek materiálu je úměrný rychlosti spalin)
- Pasivní ochrana (trubky v zákrytu, plechy v první řadě trubek)
- Snížení koncentrace prachových částic v plynu [1]

1.6 Způsoby vytápění

Vytápění lidských obydlí můžeme rozdělit do skupin: ústřední vytápění, etážové[8], dálkové[9], lokální vytápění atd. [9]. Pokud zdroj tepla (kotel, tepelné čerpadlo) rozvádí teplo prostřednictvím ohřívané vody a otopných těles (radiátorů) do ostatních vytápěných místností – jedná se o ústřední vytápění. Vytápět můžeme i lokálně (například jen jednu místnost) pomocí kamen, krbů (krbových vložek) a krbových kamen. Kamna mají uzavřené topeniště a schopnost akumulovat teplo, oproti tomu krby mají otevřené topeniště nebo se skleněným průhledem tak, aby bylo možné pozorovat šlehající plameny. Pokud mají krby otevřené topeniště není možné v nich dobře akumulovat teplo [10]. Krbová kamna spojují výhody obou zmíněných zdrojů tepla tzn. akumulují teplo a zároveň je možné pozorovat šlehající plameny [9]. Lokální vytápění dřevem v krbech a krbových kamnech je stále velice oblíbené. Rozdíl mezi krbem a krbovými kamny je patrný z obrázku 13 a 14. *„Krby jako zdroj tepla mají dlouhou historii a tradici. Vytvářejí příjemnou atmosféru tím, že lze pozorovat plameny, létající jiskry a poslouchat praskání dřeva“* [11].

[8] Pokud se vytápí rodinný dům, byt nebo patro budovy jedná se o etážové vytápění ležící v jedné rovině se zdrojem tepla

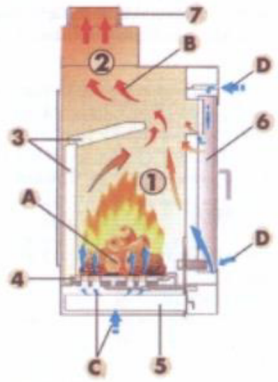
[9] Při dálkovém vytápění se z velké dálky vytápí celá řada budov

Obr. 13 Krb [17]

Tradiční krby mají však velmi nízkou účinnost. U otevřených krbů uniká bez užitku zhruba 90 % tepelné energie komínem. V současné době jsme schopni díky lepším technickým možnostem uzavřít ohniště sklem a regulovat pak množství spáleného vzduchu. A tak mají současné krby a krbová kamna vynikající účinnost (až 80 %; pouze 20 % se nevyužije na vytápění) [11].

Z krbových kamen odchází spaliny o teplotě 130 – 300 °C, záleží na konkrétním typu kamen [12].

Obr. 14 Krbová kamna [29]



Hlavní části kamen

1 Spalovací komora (topeniště)
2 Kouřová komora
3 Vyměnitelná šamotová vyzdívka
4 Vyměnitelný litinový rošt
5 Popelník
6 Prosklená přikládací dvířka
7 Odvod spalin

Spalování

A Hořící palivo
B Spaliny
C Primární vzduch pro spalování
D Sekundární vzduch pro odhoření plynných spalitelných složek (CO apod.) ve spalinách. Zároveň zabraňuje zašpinění skla.

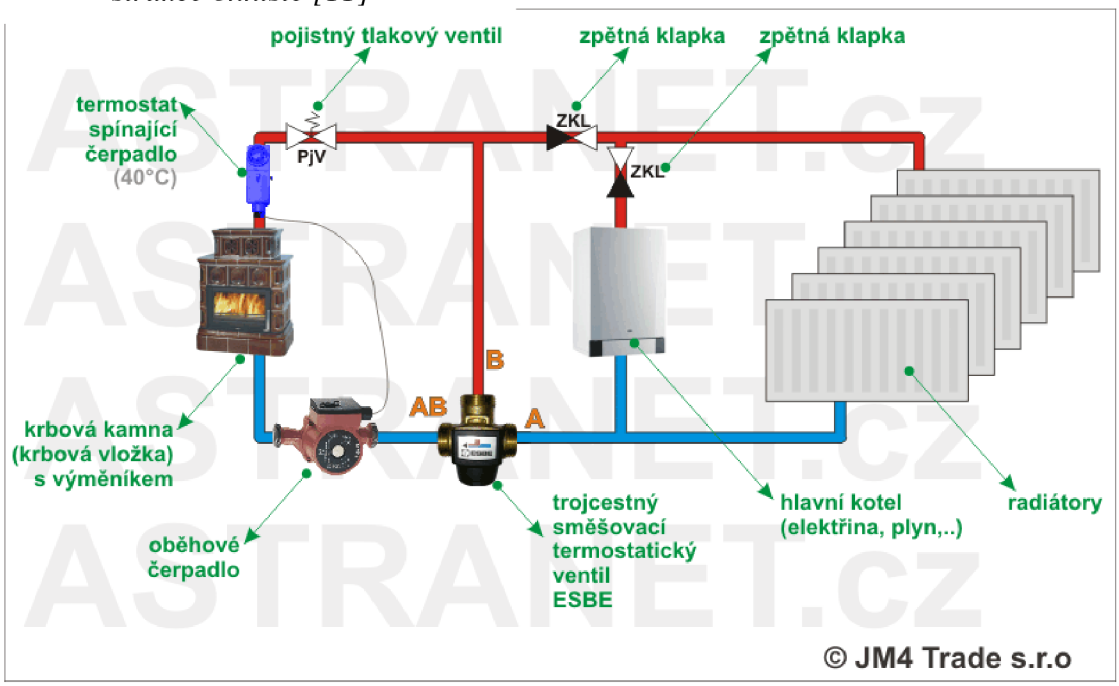
Obr. 15 Moderní krbová kamna, konstrukce ohniště [11]

1.7 Dodatečná instalace tepelných výměníků

Ke krbovým kamnům a krbovým vložkám je možné přidat **teplovodní výměník** a **teplovzdušný výměník**.

1.7.1 Teplovodní výměník

Vytápění rodinných domů krbovými kamny s teplovodním výměníkem tepla má dlouholetou tradici [10]. Teplovodní výměník se zapojuje paralelně s již existujícím kotlem do otopné soustavy (ústřední topení) [13], [14]. Na obr. 9 jsou krbová kamna napojena na krátký okruh („bypass“), který je jenom kolem výměníku. Okruh je osazen termostatickým třícestným ventilem[10]. Ten má za úkol ošetřit, aby nebyla příliš studená voda ve výměníku. Studená voda ve výměníku s sebou při-



Obr. 16 Schéma zapojení teplovodního výměníku do otopné soustavy [13]

[10] *„Dokud se vrací chladná voda, tak je otevřen ventil ve směru B→AB (oranžová písmenka u ventilu), tzn. je otevřen bypass a kamna si nahřívají jenom malý okruh, aniž by šla voda do radiátorů. Jakmile teplota vracející se vody začne stoupat, tak se plynule otvírá i směr A→AB, takže voda do kamen je ředěna z části z horké vody z bypassu a zčásti ze studené vody od radiátorů. Jakmile je teplota vody dostatečná, tak se úplně zavře bypass a je plně otevřený jenom směr A→AB od radiátorů“* [13].

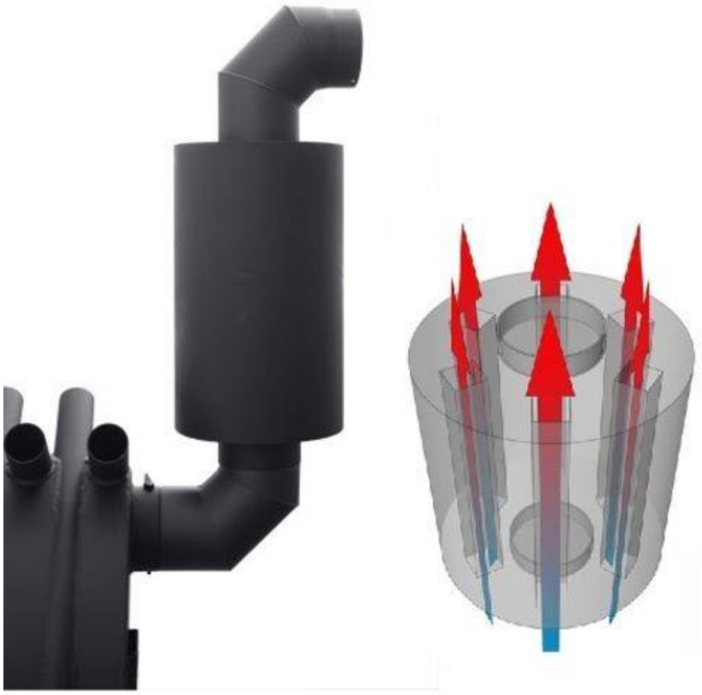
náší úskalí v podobě provozních poruch výměníku zmíněných výše. Především by se v chladných stěnách výměníku srážely spaliny, které na výměníku způsobí dehtový povlak, ten je příčinou koroze, usazování a tvorby izolační vrstvy. Správná teplota vracející se vody by se měla pohybovat v rozmezí 55 °C – 65 °C (rosný bod spalin) [14].

Obr. 17 Teplovodní vyměnitelný výměník [14]

1.7.2 Teplovzdušný výměník

Teplovzdušné výměníky využívají teplotu spalin jdoucích kouřovodem, aplikují se tedy na kouřovod (komín). Odebírají zbytkové teplo spalin a předávají jej do zvoleného vytápěného interiéru. Sníží se tak náklady na vytápění a zvýší se účinnost, topná plocha a výkon kamen.

Fungují na principu konvekce, jejich teplonosným médiem je vzduch. Vzduch v nich proudí pouze na základě fyzikálních principů (rozdílu hustot), bez vnějšího mechanického pohonu tzn.: přirozené konvekce. Tento typ se nejčastěji využívá u lokálního vytápění krbovými kamny. Bylo by možné jej instalovat například i na kouřovod kotle, ale kotle se většinou umísťují do kotelny, popřípadě jiné trvale neobývatelné místnosti, ve které by zvýšení teploty nemělo smysl.



Obr. 18 Schéma proudění vzduchu v teplovzdušném výměníku [31]

Tyto výměníky můžeme rozdělit na **silnostěnné a slabostěnné** [15]**.**

Obr. 19 Silnostěnný teplo-vzdušný výměník s průměrem hrdla 150 mm [30]

Obr. 20 Slabostěnný teplovzdušný výměník s průměrem hrdla 120 mm [16]

Obr. 21 Kouřovod krbových kamen

Obr. 22 Krbová kamna Haas+Sohn Orsted

2 Výpočet a návrh tepelného výměníku

Vhodný typ a celá technologie výměníku na kouřovod byla použita jako je na obr. 13. Výměník bude instalován na kouřovod krbových kamen (obr.15 a obr. 16). Jedná se tedy o plášťový rekuperační souproudý výměník se svazky trubek, ve kterém obě média proudí beze změny fáze.

Obr. 23 Měření multimetrem

Měření vstupních parametrů:

Popis prvního měření uvnitř kouřovodu: Multimetrem Pro'skit MT-1280 byla změřena teplota spalin uvnitř kouřovodu. Multimetr je vybaven mimo jiné termočlánkem[11]. Rozsah měřících teplot je od -20 °C do 1000 °C a přesnost udávaná výrobcem je při teplotách do 400 °C ± 1 °C.

Postup měření: V horní části kouřovodu je umístěno koleno, ve kterém je vymetací otvor[12]. Tento otvor je zakryt plechem přišroubovaným maticí. Za provozu kamen byl sundán plech. Do otvoru byl zaveden termočlánek v místě, kde by měl být podle návrhu umístěn výměník, bylo změřeno 13 hodnot.

[11] Termočlánky využívají termoelektrického tzn. pokud jsou spojeny dva vodiče z různých kovů v uzavřený obvod a spoje těchto vodičů mají rozdílnou teplotu obvodem začne protékat elektrický proud [33]

[12] Otvor určený k vymetání, čištění a kontrole komínového průduchu spotřebičů na tuhá paliva [34]

Tab. 1 Naměřené hodnoty uvnitř kouřovodu

Teplota [°C]	261	274	278	276	280	304	312	316	318	318	322	323	324

Aritmetický průměr naměřených hodnot: **300,5 °C**.

Popis druhého měření teploty na povrchu kouřovodu: měření proběhlo pomocí magnetického krbového teploměru spalin. Hlavním prvkem tohoto kontaktního teploměru je bimetalový pásek, který se díky své tepelné roztažnosti natáhne a ručička ukáže teplotu na povrchu kouřovodu.

Obr. 24 Magnetický krbový teploměr spalin

Postup měření: na místě určeném pro tepelný výměník byl přiložen magnetický teploměr. Teplota povrchu kouřovodu na tomto místě byla **120 °C**. Přesnost tohoto teploměru byla ověřena pomocí multimtru Pro'skit MT-1280.

2.1 Výpočet výměníku

Výpočty byly proveden podle literatury [1], [17]. Spočítat výkon a příslušné teploty výměníku je možno obecně dvěma způsoby: 1. metodou „efektivnost" ε – NTU (Number of Transfer Unit) a 2. metodou středního logaritmického teplotního spádu (LMTD – Logarithmic Mean Temperature Difference). V následujících výpočtech byla použita metoda efektivnosti NTU[13]. Princip metody ε – NTU spočívá v určení efektivnosti ε tepelného výměníku z grafu či rovnice. Pro toto určení je nutné správně vymezit daný typ výměníku. V tomto případě jde o souproudý výměník.
Metoda LMTD[14] je součástí příloh. Obě metody jsou rovnocenné [17], porovnání jejich výsledků viz tab. 3. Výpočetní operace obou metod byly provedeny v programu SMath Studio Desktop.

2.2 Návrh rozměrů, geometrie a materiálu výměníku tepla

- Poloměr výměníku tepla – $R_v = 150\ mm$
- Průměr výměníku tepla – $D_v = 300\ mm$
- Poloměr kouřovodu – $r_k = 75\ mm$
- Průměr kouřovodu – $d_k = 150\ mm$
- Poloměr teplovzdušného kanálu – $r_{tk} = 22{,}5\ mm$
- Průměr teplovzdušného kanálu – $d_{tk} = 45\ mm$
- Průměr roztečné kružnice teplovzdušných kanálů – $D_{rtk} = 228\ mm$
- Poloměr díry v kanálu – $r_d = 21\ mm$
- Průměr díry v kanálu – $d_d = 42\ mm$
- Délka výměníku (bez límců) – $l = 350\ mm$

[13] Metoda ε – NTU se používá, pokud známe velikost a konstrukci výměníku a chceme spočítat výkon a výstupní teploty. Pokud bude metoda použita obráceně je nutné iterovat [17].

[14] Metoda LMTD se hodí, pokud máme zadané výstupní teploty a požadovaný výkon a chceme podle těchto parametrů spočítat velikost výměníku. Je možné ji použít i obráceně, ale při tomto postupu je nutno iterovat [17].

- Šířka stěny – $\delta_{oc} = 1{,}5\ mm$
- Povrch pláště 1 z 8 teplovzdušných kanálů ve výměníku
- Materiálem pro zhotovení výměníku bude ocel 1.4404 (komínová ocel)

$$S_{tk} = 2 \cdot \pi \cdot r_{tr} \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot ({r_{tr}}^2 - {r_d}^2) \qquad (2.1)$$

$$S_{tk} = 2 \cdot \pi \cdot 0{,}0225 \cdot 0{,}35 + 2 \cdot \pi \cdot (0{,}0225^2 - 0{,}021^2)$$

$$S_{tk} = 0{,}05\ m^2$$

- Povrch výměníku tepla

$$S_v = 2 \cdot \pi \cdot ({R_v}^2 - {r_k}^2) + \pi \cdot D_v \cdot l - 8 \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r_d)^2 \qquad (2.2)$$

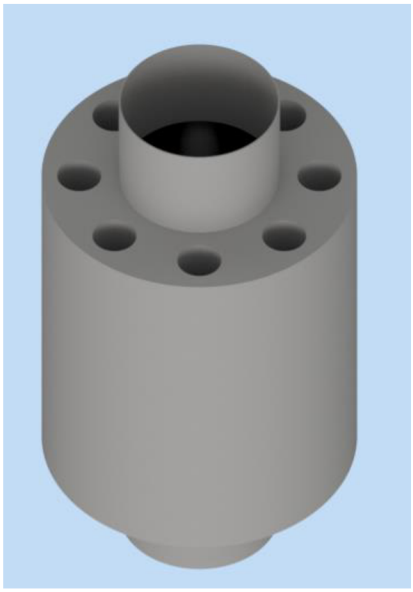
$$S_v = 2 \cdot \pi \cdot (0{,}150^2 - 0{,}075^2) + \pi \cdot 0{,}300 \cdot 0{,}35 - 8 \cdot 2 \cdot \cdot \pi \cdot 0{,}021^2$$

$$S_v = 0{,}41\ m^2$$

- Gravitační zrychlení – $g = 9{,}81 \frac{m}{s^2}$

Vybrané fyzikální vlastnosti ocele [18]

- $\lambda_{oc} = 47\ \frac{W}{m \cdot K}$
- $c_{oc} = 461 \frac{J}{kg \cdot K}$
- $\rho_{oc} = 7850\ \frac{kg}{m^3}$



Obr. 25 Řez výměníkem

Obr. 26 Vymodelovaný výměník v programu Inventor

2.3 Vybrané fyzikální parametry vstupního chladného média (vzduch)

Vstupní parametry vzduchu o teplotě 20 °C při normálních podmínkách.

- $t_{20} = 20\,°C$
- $\lambda_{20} = 2{,}52 \cdot 10^{-2}\,\frac{W}{m \cdot K}$
- $c_{20} = 1010\,\frac{J}{kg \cdot K}$
- $\rho_{20} = 1{,}188\,\frac{kg}{m^3}$
- $Pr_{20} = 0{,}727\,[-]$
- $\beta_{20} = 3{,}42 \cdot 10^{-3}\,K^{-1}$
- $\nu_{20} = 15{,}11 \cdot 10^{-6}\,\frac{m^2}{s}$
- $T_{20} = 293{,}15\,K$

Vybráno dle tabulky [19].

$$a_{20} = \frac{\lambda_{20}}{c_{20} \cdot \rho_{20}} \tag{2.3}$$

$$a_{20} = \frac{2{,}52 \cdot 10^{-2}}{1010 \cdot 1{,}188}$$

$$a_{20} = 2{,}1 \cdot 10^{-5}\,\frac{m^2}{s}$$

kde a_{20} je součinitel teplotní vodivost, $\lambda_{20}\,\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ je součinitel tepelné vodivosti vzduchu o teplotě 20 °C, $c_{20}\,\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ je měrná tepelná kapacita vzduchu při teplotě 20 °C a $\rho_{20}\,\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ je hustota vzduchu při teplotě 20 °C.

Vybrané fyzikální vlastnosti vzduchu o teplotě 80 °C. Tato hodnota byla získána iteračně a jedná se výstupní teplotu jedné z 8 trubek při atmosférickém tlaku.

- $t_{80} = 80\,°C$
- $\lambda_{80} = 2{,}93 \cdot 10^{-2}\,\frac{W}{m \cdot K}$
- $c_{80} = 1013\,\frac{J}{kg \cdot K}$
- $\rho_{80} = 0{,}986\,\frac{kg}{m^3}$
- $Pr_{80} = 0{,}727\,[-]$
- $\beta_{80} = 2{,}84 \cdot 10^{-3}\,K^{-1}$
- $\nu_{80} = 17{,}27 \cdot 10^{-6}\,\frac{m^2}{s}$
- $T_{80} = 353{,}15\,K$

Vybráno dle tabulky [19].

$$a_{80} = \frac{\lambda_{80}}{c_{80} \cdot \rho_{80}} \tag{2.4}$$

$$a_{80} = \frac{2{,}93 \cdot 10^{-2}}{1020 \cdot 0.986}$$

$$a_{80} = 2{,}91 \cdot 10^{-5}\ \frac{m^2}{s}$$

veličiny a jednotky stejné jako v rovnici (2.3).
Výpočet středních hodnot pro studené médium, tj. vzduch.

$$\lambda_{vz} = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{80}}{2} \tag{2.5}$$

$$\lambda_{vz} = \frac{2{,}52 \cdot 10^{-2} + 2{,}93 \cdot 10^{-2}}{2}$$

$$\lambda_{vz} = 2{,}72 \cdot 10^{-2}\ \frac{W}{m \cdot K}$$

Další výpočty obdobným způsobem

- $c_{vz} = 1015\ \frac{J}{kg \cdot K}$
- $\rho_{vz} = 1{,}09\ \frac{kg}{m^3}$
- $Pr_{vz} = 0{,}727\ [-]$
- $\beta_{vz} = 3{,}13 \cdot 10^{-3}\ K^{-1}$
- $\nu_{vz} = 18{,}20 \cdot 10^{-6}\ \frac{m^2}{s}$
- $a_{vz} = 2{,}51 \cdot 10^{-5}\ \frac{m^2}{s}$
- $v_{vz} = 1{,}9\ \frac{m}{s}$ - Neměřená rychlost proudění anemometrem na podobném výměníku a přepočítáno na konkrétní výměník.

$$\dot{Q}_{vz} = \pi \cdot {r_d}^2 \cdot v_{vz} \tag{2.6}$$

$$\dot{Q}_{vz} = \pi \cdot (21 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1{,}9$$

$$\dot{Q}_{vz} = 2{,}63 \cdot 10^{-3}\ \frac{m^3}{s}$$

kde $\dot{Q}_{vz}\ \left[\frac{m^3}{s}\right]$ je objemový tok v jednom teplovzdušném kanálu, $r_d\ [m]$ je poloměr jednoho teplovzdušného kanálu v tepelném výměníku.

$$\dot{m}_{vz} = \rho_{vz} \cdot \dot{Q}_{vz} \tag{2.7}$$

$$\dot{m}_{vz} = 1{,}09 \cdot 2{,}66 \cdot 10^{-3}$$

$$\dot{m}_{vz} = 2{,}86 \cdot 10^{-3}\ \frac{kg}{s}$$

kde $\dot{m}_{vz}\ \left[\frac{kg}{s}\right]$ je hmotnostní průtok v jednom teplovzdušném kanálu a $\rho_{vz}\ \left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right]$ je střední hustota chladného média, tj. vzduch.

$$C_{min} = c_{vz} \cdot \dot{m}_{vz} \tag{2.8}$$

$$C_{min} = 1015 \cdot 2{,}89 \cdot 10^{-3}$$

$$C_{min} = 2{,}90 \cdot 10^{-3}\ \frac{J}{K \cdot s}$$

kde $C_{min}\ \left[\frac{J}{K \cdot s}\right]$ je minimální tepelná kapacita pro nejchladnější médium, tj. vzduch, $c_{vz}\ \left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ je měrná tepelná kapacita vzduchu.

Všechny níže uvedené vzorce jsou kriteriálními vzorci podobnosti a platí pouze pro přirozenou konvekci vertikální stěnou, popřípadě vertikální trubkou. Zároveň pro ně platí, že se jedná o bezrozměrné veličiny.
Na základě Rayleighova kritéria je nyní nutné rozhodnout, zda se jedná o laminární, nebo turbulentní proudění.

$$Ra_{x,krit} = \frac{g \cdot \beta_{vz} \cdot (t_{80} - t_{20}) \cdot l^3}{\nu_{vz} \cdot a_{vz}} \qquad (2.9)$$

$$Ra_{x,krit} = \frac{9{,}81 \cdot 3{,}13 \cdot 10^{-3} \cdot (80 - 20) \cdot 0{,}35^3}{18{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot 2{,}51 \cdot 10^{-5}}$$

$$Ra_{x,krit} = 17{,}30 \cdot 10^7\ [-]$$

kde $Ra_{x,krit}$ je Rayleighovo kritérium, $\beta_{vz}\ [-]$ je koeficient teplotní roztažnosti vzduchu, t_{80} a $t_{20}\ [°C]$ jsou teploty výstupního a vstupního vzduchu, $l\ [m]$ je délka výměníku, $\nu_{vz}\ \left[\frac{m^2}{s}\right]$ je kinematická viskozita vzduchu, $a_{vz}\ \left[\frac{m^2}{\mathrm{s}}\right]$ je součinitel teplotní vodivost.
„Pro vertikální povrch platí, že pokud je $Ra_x > 10^9$, jde o turbulentní režim, pokud je $Ra_x < 10^9$, jde o režim laminární [17].“ V tomto případě se jedná o laminární proudění.

$$Gr_{vz} = \frac{g \cdot \beta_{vz} \cdot (t_{80} - t_{20}) \cdot l^3}{{\nu_{vz}}^2} \qquad (2.10)$$

$$Gr_{vz} = \frac{9{,}81 \cdot 3{,}13 \cdot 10^{-3} \cdot (80 - 20) \cdot 0{,}35^3}{(18{,}2 \cdot 10^{-6})^2}$$

$$Gr_{vz} = 2{,}38 \cdot 10^8\ [-]$$

kde $Gr_{vz}[-]$[15] je Grashofovo kritérium podobnosti platné pro vzduch, $\beta_{vz}\ [K^{-1}]$ je koeficient teplotní roztažnosti vzduchu, t_{80} a $t_{20}\ [°C]$ jsou teploty výstupního a vstupního vzduchu, $l\ [m]$ je délka výměníku a $\nu_{vz}\ \left[\frac{m^2}{s}\right]$ je kinematická viskozita vzduchu.

Níže uvedené vztahy lze použít i pro vysoký vertikální válec, pokud je splněna podmínka, že tloušťka mezní vrstvy je mnohem menší než průměr válce: $\delta_{oc} \ll d_{tr}$. Pro dané hodnoty je tato podmínka splněna

[15] Grashofovo číslo, které charakterizuje mimo jiné i samovolné proudění vzdušin na základě rozdílu jejich teplot [1] a je typickým kritériem pro přirozenou konvekci [17].

$$Nu_{vz} = 0{,}68 \cdot \sqrt{Pr_{vz}} \cdot \frac{\sqrt[4]{Gr_{vz}}}{(0{,}952 + Pr_{vz})^{\frac{1}{4}}} \qquad (2.11)$$

$$Nu_{vz} = 0{,}68 \cdot \sqrt{0{,}727} \cdot \frac{\sqrt[4]{2{,}38 \cdot 10^{8}}}{(0{,}952 + 0{,}727)^{\frac{1}{4}}}$$

$$Nu_{vz} = 63{,}27 \ [-]$$

kde $Nu_{vz}\ [-]$ je Nusseltovo kritérium [16], $Pr_{vz}[-]$ je Prandtlovo číslo vzduchu, $Gr_{vz}\ [-]$ je Grashofovo číslo vzduchu.

$$\alpha_{vz} = Nu_{vz} \cdot \frac{\lambda_{vz}}{l} \qquad (2.12)$$

$$\alpha_{vz} = 63{,}27 \cdot \frac{2{,}72 \cdot 10^{-2}}{0{,}35}$$

$$\alpha_{vz} = 4{,}93 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

kde $\alpha_{vz}\ \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$ je součinitel přestupu tepla vzduchu, $\lambda_{vz}\ \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ je součinitel tepelné vodivosti vzduchu, $l\ [m]$ je délka výměníku a $Nu_{vz}\ [-]$ je Nusseltovo kritérium.

2.4 Vybrané fyzikální parametry spalin (vstupní teplé médium)

- $\lambda_{sp} = 6{,}268 \cdot 10^{-2}\ \frac{W}{m \cdot K}$ [20]
- Průměrná naměřená vstupní teplota spalin uvnitř kouřovodu (dle tab. 1) $t_{sp,in} = 300{,}5\ °C$
- $t_{sp,out} = 281{,}28\ °C$ – hodnota dosažena iteračně
- $T_{sp,in} = 573{,}65\ K$
- $T_{sp,out} = 554{,}25\ K$
- $\dot{m}_{sp} = 8{,}7 \cdot 10^{-3}\ [\frac{kg}{s}]$
- $c_{sp} = 1080\ \frac{J}{kg \cdot K}$ [21]
- $\rho_{sp} = 1{,}25\ \frac{kg}{m^3}$ [21]
- $\beta_{sp} = 1{,}75 \cdot 10^{-3}\ K^{-1}$
- $\nu_{sp} = 67{,}83 \cdot 10^{-6}\ \frac{m^2}{s}$ [20]
- $\mu_{sp} = 28{,}20 \cdot 10^{-6}\ \frac{m^2}{s}$ [22]

$$Pr_{sp} = \frac{\mu_{sp} \cdot c_{sp}}{\lambda_{sp}} \qquad (2.3)$$

$$Pr_{sp} = \frac{28{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot 1080}{6{,}268 \cdot 10^{-2}}$$

[16] *„Charakterizuje závislost mezi intenzitou přestupu tepla a teplotním polem v mezní vrstvě tekutiny* [1]. *“*

$$Pr_{sp} = 0{,}49\ [-]$$

kde $Pr_{sp}\ [-]$ je Prandtlovo číslo pro spaliny, $\mu_{sp}\ \left[\frac{m^2}{s}\right]$ je dynamická viskozita spalin $c_{sp}\ \left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ je střední měrná tepelná kapacita spalin při konstantním tlaku a normálních podmínek a $\lambda_{sp}\ \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ je tepelná vodivost spalin.

$$Gr_{sp} = \frac{g \cdot \beta_{sp} \cdot (t_{sp,in} - t_{sp,out}) \cdot l^3}{{\nu_{sp}}^2} \qquad (2.13)$$

$$Gr_{sp} = \frac{9{,}81 \cdot 1{,}75 \cdot 10^{-3} \cdot (300{,}5 - 281{,}28) \cdot 0{,}35^3}{(16{,}83 \cdot 10^{-6})^2}$$

$$Gr_{sp} = 3{,}07 \cdot 10^6\ [-]$$

kde $Gr_{sp}[-]$ je Grashofovo kritérium podobnosti pro spaliny, $\beta_{sp}\ [K^{-1}]$ je koeficient teplotní roztažnosti, $t_{sp,in}$ a $t_{sp.out}\ [°C]$ jsou teploty spalin, které vstupují do výměníku a vystupují z něj, $l\ [m]$ je délka výměníku a $\nu_{sp}\ \left[\frac{m^2}{s}\right]$ je kinematická viskozita spalin.

$$Nu_{sp} = 0{,}68 \cdot \sqrt{Pr_{sp}} \cdot \frac{\sqrt[4]{Gr_{sp}}}{\left(0{,}952 + Pr_{sp}\right)^{\frac{1}{4}}} \qquad (2.14)$$

$$Nu_{sp} = 0{,}68 \cdot \sqrt{0{,}49} \cdot \frac{\sqrt[4]{3{,}07 \cdot 10^6}}{(0{,}952 + 0{,}49)^{\frac{1}{4}}}$$

$$Nu_{sp} = 18{,}13\ [-]$$

kde $Nu_{sp}\ [-]$ je Nusseltovo kritérium, $Pr_{sp}[-]$ je Prandtlovo číslo spalin, $Gr_{sp}\ [-]$ je Grashofovo číslo spalin.

$$\alpha_{sp} = Nu_{sp} \cdot \frac{\lambda_{sp}}{l} \qquad (2.15)$$

$$\alpha_{sp} = 18{,}13 \cdot \frac{6{,}286 \cdot 10^{-2}}{0{,}35}$$

$$\alpha_{sp} = 3{,}25\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

kde $\alpha_{sp}\ \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$ je součinitel přestupu tepla spalin, $\lambda_{sp}\ \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ je součinitel tepelné vodivosti spalin, $l\ [m]$ je délka výměníku a $Nu_{sp}\ [-]$ je Nusseltovo kritérium.

$$C_{max} = \dot{m}_{sp} \cdot c_{sp} \qquad (2.16)$$

$$C_{max} = 8{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 1080$$

$$C_{max} = 9{,}40\ \frac{J}{K \cdot s}$$

kde C_{max} $\left[\frac{J}{K \cdot s}\right]$ je maximální tepelná kapacita pro teplé médium, tj. spaliny o teplotě 300,5 °C, $\dot{m}_{sp}$ $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ je hmotnostní průtok spalin za normálních podmínek, hodnota vybrána z technické dokumentace kamen (viz příloha 2) a c_{sp} $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ je měrná tepelná kapacita spalin.

2.5 Sdílení tepla

Součinitel prostupu tepla k $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$ pro válcovou plochu vztažený k vnějšímu povrchu jednoho teplovzdušného kanálu.

$$k = \left[\frac{r_{tk}}{r_d} \cdot \frac{1}{\alpha_{vz}} + \frac{r_{tk}}{\lambda_{oc}} \cdot ln\left(\frac{r_{tk}}{r_d}\right) + \frac{1}{\alpha_{sp}}\right]^{-1} \tag{2.17}$$

$$k = \left[\frac{22{,}5 \cdot 10^{-3}}{21 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{4{,}93} + \frac{22{,}5 \cdot 10^{-3}}{47} \cdot ln\left(\frac{22{,}5 \cdot 10^{-3}}{21 \cdot 10^{-3}}\right) + \frac{1}{3{,}25}\right]^{-1}$$

$$k = 1{,}90 \ \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

kde r_{tk} $[m]$ je poloměr jednoho teplovzdušného kanálu, r_d $[m]$ je poloměr díry v kanálu, λ_{oc} $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ je součinitel tepelné vodivosti oceli, α_{vz} $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$ je součinitel přestupu tepla vzduchu a α_{sp} $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$ je součinitel přestupu tepla spalin.

Number of transfer unit [−] [17]

$$NTU = \frac{k \cdot 8 \cdot S_{tr}}{C_{min}} \tag{2.18}$$

$$NTU = \frac{1{,}90 \cdot 8 \cdot \ 0{,}05}{2{,}90}$$

$$NTU = 0{,}26 \ [-]$$

kde k $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$ je součinitel prostupu tepla, 8 je počet teplovzdušných kanálů, S_{tr} $[m^2]$ je plášť jednoho teplovzdušného kanálu a C_{min} $\left[\frac{J}{K \cdot s}\right]$ je minimální tepelná kapacita pro nejchladnější médium, tj. vzduch.

Rovnice pro výpočet efektivnosti výměníku platná pro souproudý výměník [17]

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{\left[-NTU \cdot \left(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right]}}{\frac{C_{min}}{C_{max}}} \tag{2.19}$$

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{\left[-0{,}26 \cdot \left(1 + \frac{2{,}93}{9{,}40}\right)\right]}}{\frac{2{,}90}{9{,}40}}$$

$$\varepsilon = \ 0{,}22 \ [-]$$

kde ε $[-]$ je efektivnost daného výměníku, C_{max} $\left[\frac{J}{K \cdot s}\right]$ je maximální tepelná kapacita pro teplé médium, tj. spaliny o teplotě 300,5 °C zbylé veličiny i s jednotkami uvedeny viz výše.

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} \cdot \left(T_{sp,in} - T_{20}\right) \tag{2.20}$$

$$\dot{Q}_{max} = 2{,}90 \cdot (573{,}65 - 293{,}15)$$

$$\dot{Q}_{max} = 814{,}65\ W$$

kde Q_{max} $[W]$ je maximální možný výkon 8 teplovzdušných kanálů, C_{min} $\left[\frac{J}{K \cdot s}\right]$ je minimální tepelná kapacita pro nejchladnější médium, tj. vzduch, $T_{sp,in}$ $[K]$ je termodynamická teplota vstupního teplého média, tj. spalin, T_{20} $[K]$ je termodynamická teplota vstupního chladného média, tj. vzduch.

$$\dot{Q}_{8tk} = Q_{max} \cdot \varepsilon \tag{2.21}$$

$$\dot{Q}_{8tk} = 823{,}22 \cdot 0{,}22$$

$$\dot{Q}_{8tk} = 180{,}38\ W$$

kde Q_{8tk} $[W]$ je skutečný výkon 8 teplovzdušných kanálů, zbylé veličiny uvedeny v rov. *(2.20)* a *(2.21)*.
Výkon jednoho teplovzdušného kanálu lze poté spočítat jako:

$$\dot{Q}_{tk} = \frac{Q_{8tk}}{8} \tag{2.22}$$

$$\dot{Q}_{tk} = \frac{180{,}38}{8}$$

$$\dot{Q}_{tk} = 22{,}55\ W.$$

Z rovnic tepelné bilance $\dot{Q} = \dot{m}_{sp} \cdot c_{sp} \cdot \left(t_{sp,in} - t_{sp,out}\right)$ a $\dot{Q} = \dot{m}_{vz} \cdot c_{vz} \cdot \left(t_{vz,out} - t_{20}\right)$ vyjádříme $t_{sp,out}$ a $t_{vz,out}$ jako:

$$t_{sp,out} = t_{sp,in} - \frac{\dot{Q}_{8tk}}{\dot{m}_{sp} \cdot c_{sp}} \tag{2.23}$$

$$t_{sp,out} = 300{,}5 - \frac{180{,}38}{8{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 1080}$$

$$t_{sp,out} = 281{,}30\ °C$$

kde $t_{sp,out}[°C]$ je výstupní teplota spalin z výměníku, $t_{sp,in}[°C]$ je teplota spalin naměřená v kouřovodu stupující o výměníku, $\dot{m}_{sp}$ $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ je hmotnostní průtok spalin, c_{sp} $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ je měrná tepelná kapacita spalin a $\dot{Q}_{8tk}$ $[W]$ je popsáno viz výše.

$$t_{vz,out} = \frac{\dot{Q}_{8tk}}{\dot{m}_{vz} \cdot c_{vz}} + t_{20} \tag{2.24}$$

$$t_{vz,out} = \frac{180{,}82}{2{,}89 \cdot 10^{-3} \cdot 1015} + 20$$

$$t_{vz,out} = 81{,}8\ °C$$

kde $t_{vz,out}$ $[°C]$ je teplota vzduchu na výstupu z teplovzdušných kanálů, Q_{8tk} $[W]$ je skutečný výkon 8 teplovzdušných kanálů, $\dot{m}_{vz}$ $\left[\frac{kg}{s}\right]$ je hmotnostní průtok v každém teplovzdušném kanálu, c_{vz} $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ je měrná tepelná kapacita vzduchu a t_{20} $[°C]$ je teplota vstupního chladného média, tj. vzduch.

2.6 Výkon pláště výměníku

Stefan-Boltzmannův zákon pro zářivost šedého tělesa [23]:

$$\dot{Q}_{pv} = S_v \cdot \varepsilon_{oc} \cdot \sigma \cdot \left(T_{pv}^4 - T_{20}^4\right) \quad (2.25)$$

$$\dot{Q}_{pv} = 0{,}41 \cdot 0{,}8 \cdot 5{,}669 \cdot 10^{-8} \cdot (393{,}15^4 - 293{,}15^4)$$

$$\dot{Q}_{pv} = 309{,}71\ W$$

kde S_v (m^2) je povrch pláště výměníku, $\varepsilon_{oc} = 0{,}8$ $[-]$ je poměrná zářivost šedého tělesa (emisivita[17]), $\sigma = 5{,}669 \cdot 10^{-8}$ je Stefan – Boltzmannova konstanta, T_{pv} $[K]$ je termodynamická teplota na povrchu pláště výměníku[18], T_{20} $[K]$ je termodynamická teplota vstupního chladného média, tj. vzduch.

2.7 Celkový výkon výměníku

$$\dot{Q}_v = \dot{Q}_{8tk} + \dot{Q}_{pv} \quad (2.26)$$

$$\dot{Q}_v = 180{,}38 + 309{,}71$$

$$\dot{Q}_v = 490{,}08\ W$$

2.8 Výkon pláště kouřovodu v místě určeném pro výměník tepla

$$S_k = \pi \cdot d_k \cdot l \quad (2.27)$$

$$S_k = \pi \cdot 150 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}350$$

$$S_k = 0{,}16\ m^2$$

kde S_k $[m^2]$ je povrch pláště výměníku, d_k $[m]$ je průměr kouřovodu a l $[m]$ je délka kouřovodu, který představuje část pro výměník.

$$\dot{Q}_{pk} = S_k \cdot \varepsilon_{oc} \cdot \sigma \cdot \left(T_{pv}^4 - T_{20}^4\right) \quad (2.28)$$

$$\dot{Q}_{pk} = 0{,}16 \cdot 0{,}8 \cdot 5{,}669 \cdot 10^{-8} \cdot (393{,}15^4 - 293{,}15^4)$$

$$\dot{Q}_{pk} = 126{,}46\ W$$

kde $\dot{Q}_{pk}$ $[W]$ je výkon pláště kouřovodu, zbylé veličiny stejné jako v rov. *(2.27)* a *(2.28)*.

---

[17] Která má hodnotu 0 až 1 (pro ocel se pohybuje v intervalu od 0,52 do 0,85 [32]; vybráno na základě konzultace)

[18] Viz kapitola 2.1 měření vstupních parametrů – druhá část měření

2.9 Porovnání výkonů výměníku a kouřovodu

$$\frac{\dot{Q}_v}{\dot{Q}_{pk}} = 3{,}97\ [-] \tag{2.29}$$

Instalací výměníku na kouřovod je možné dosáhnout téměř čtyřnásobného výkonu.

2.10 Porovnání výpočetních metod ε-NTU a LMTD

Tab. 2 Porovnání výpočetních metod

Veličina	Metoda ε-NTU	Metoda LMTD
Celkový výkon výměníku $\dot{Q}_v$	490,08 W	487,97 W
Výkon 8 teplovzdušných kanálů $\dot{Q}_{8tk}$	180,38 W	178,26 W
Výkon jednoho teplovzdušného kanálu $\dot{Q}_{tk}$	22,55 W	22,28 W
Výkon pláště výměníku $\dot{Q}_{pv}$	309,71 W	309,71 W
Teplota vzduchu na výstupu jednoho teplovzdušného kanálu $t_{vz,out}$	81,8 °C	88,89 °C
Porovnání výkonů výměníku a kouřovodu $\frac{\dot{Q}_v}{\dot{Q}_{pk}}$	3,97	3,95

2.11 Konečné parametry navrženého výměníku tepla

Tab. 3 Technické parametry výměníku tepla

Název	Velikost/počet/definice
Celkový průměr výměníku	300 mm
Vnitřní průměr límce	150 mm
Tloušťka každé stěny	1,5 mm
Počet trubek	8
Vnitřní průměr teplovzdušného kanálu	45 mm
Rozteč teplovzdušných kanálů	228 mm
Celková délka	550 mm
Délka těla výměníku s teplovzdušnými kanály (funkční)	350 mm
Délka horního límce	100 mm
Délka spodního límce	100 mm
Celkový výkon	490 W
Výkon osmi teplovzdušných kanálů	180,4 W
Výkon jednoho teplovzdušného kanálu	22,6 W
Výkon pláště	309,7 W
Teplota na výstupu každé z osmi teplovzdušných kanálů	81,8 °C
Materiál	ocel 1.4404
Studené teplonosné médium	vzduch
Teplé teplonosné médium	spaliny
Přenos tepla	Přirozená konvekce, kondukce a sálán

2.12 Výhody a nevýhody instalace a použití výměníku

Výměník přispěje k celkovému tepelnému výkonu krbových kamen o 490 W. Jednou z nesporných výhod je, že se jedná jednorázovou investici, ze které nevyplývají žádné náklady z provozu. Další výhodou je poměrně jednoduchá instalace.

Nevýhod je však také několik. Výměník se zanáší sazemi, tyto saze se usazují na stěnách výměníku, a zvyšují tak odpor při vedení tepla, tudíž výměník ztrácí výkon po dlouhodobějším používání [1]. Lze jej vyčistit, ale bude se jednat o poměrně komplikovaný úkon. Dále je třeba mít na paměti, že dnešní moderní krbová kamna umí velmi dobře pracovat s teplotou spalin, aby byly co nejúčinnější. Pokud se na kouřovod nainstaluje výměník, odebírá část z teploty spalin, a tedy spaliny mají nižší teplotu i na ústí komína. Pokud tato teplota klesne pod rosný bod spalin, mohlo by dojít k dehtování[19] na ústí komína. A s tím je spojen případný problém s revizí spalinové cesty.

Problém s usazováním sazemi je však možné odstranit, pokud se na kouřovod instaluje výměník, který neporuší samotnou strukturu spalinové cesty. Nedojde tedy k přímému kontaktu se spalinami, ale výměník bude pouze odebírat teplo prostřednictvím vedení od zahřátého povrchu kouřovodu. Je nutné, povrch kouřovodu zvýšit viz obr. 27, 28 a 29.

Instalaci výměníku je dobré zvážit a najít nejvhodnější teplotu spalin tak, aby výměník měl co možná největší tepelný výkon, ale zároveň teplota spalin byla tak vysoká, aby nedocházelo k dehtování na ústí komína.

Obr. 28 Žebra na kouřovodu [35]

Obr. 27 Žaluzie umístěné na kouřovodu [36]

Obr. 29 Ventilátor s Peltierovým článkem na kouřovod [37]

[19] Dehet (tér) je směs stovek chemických látek, které vytvářejí hustou olejovitou kapalinu charakteristického zápachu, tmavohnědé až černé barvy [38].

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala využitím odpadního tepla a snížením komínové ztráty. Celé práce je členěna do dvou stěžejních kapitol. První část obsahovala krátkou rešerši. V této části byly mimo jiné vymezeny pojmy jako konvekce, kondukce a sálání. Následovalo rozdělení výměníků tepla podle určitých kritérií. Toto rozdělení je klíčové pro návrh a výpočet výměníku tepla. Podle pracovního pochodu rozdělíme výměníky na: rekuperační, regenerační, kontaktní a směšovací, je velmi vhodné použít i další rozdělení např. podle charakteru proudění.

V dalších kapitolách byly přiblíženy teplonosná média a požadavky na ně, dále potom problémy vyplývající z provozu výměníků a jejich technický význam. Výměníky tepla jsou naprosto nepostradatelné prvky většiny průmyslových odvětví. Usnadňují nám život, vděčíme jim za technické pokroky a díky nim šetrněji hospodaříme s našimi zdroji. Lze se s nimi setkat v elektrárnách, chemičkách, automobilech (chladiče, výparníky, kondenzátory), v letadlech, ale i v domácnostech (radiátory, kotle, krbová kamna). Ke krbovým kamnům je možné nainstalovat teplovodní a teplovzdušný výměník.

Druhá část se zabývala měřením vstupních veličin, návrhem teplosměnných ploch a samotným výpočtem. Také nastínila možné využití odpadního tepla.

- Byl navržen teplovzdušný plášťový rekuperační souproudý výměník se svazky trubek, ve kterém obě média proudí beze změny fáze
- Teplonosnými médii jsou vzduch a spaliny, přenos tepla probíhá na základě přirozené konvekce
- Metodou ε-NTU (zpracovaná v kapitole 2) a LMTD (součástí příloh) byl vypočítán výkon výměníku tepla
- Oba výpočty byly provedeny v aplikaci – SMath Studio Desktop
- Celkový výkon byl rozdělen na výkon osmi trubek a výkon pláště
- Pomocí Rayleighova kritéria, Grashofova a Nusseltova čísla popíšeme proudění uvnitř trubek
- Teplota na výstupu každé z osmi trubek bude přibližně 82 °C
- Celkový výkon výměníku je 490 W
- Výměník bude celistvý, k přihlédnutím na jeho jednoduchou výrobu
- Výkres výměníku a další technická dokumentace krbových kamen je součástí příloh
- Materiálem pro zhotovení výměníku bude ocel 1.4404.
- Byla tak snížena komínová ztráta, protože vypočítaný výměník má téměř čtyřnásobný výkon oproti klasickému kouřovodu

Dále je nutné vyzdvihnout zde výhody a to: jedná se o jednorázovou investici bez dalších nákladů vyplývajících přímo z provozu výměníku a připomenout úskalí: zanášení sazemi a snížení teploty spalin, a tím by mohlo dojít k dehtování na ústí v komíně. Zanášením spalinami je možno se vyvarovat použitím jiné konstrukce výměníku, která nenarušuje odtah spalin a vnitřní prostor kouřovodu. Jedná se tedy pouze o zvětšení teplosměnné plochy kouřovodu. Instalaci výše uvedeného kouřovodu doporučuji konzultovat s odborníkem, aby se nenaskytl problém s revizí spalinové cesty.

Na tuto práci by bylo možné navázat například zjištěním teploty spalin na ústí komínu, spočítáním výkonu výměníku, který nenarušuje vnitřní prostor kouřovodu (je umístěn pouze na jeho vnější ploše), popřípadě navrhnout esteticky lépe vypadající výměník tepla na kouřovod. Obsah této práce naplnil všechny předem stanovené cíle.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vydání třetí. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019. ISBN 978-80-214-5769-0.

[2] STEHLÍK, Petr, Josef KOHOUTEK a Jan NĚMČANSKÝ. *Tepelné pochody: výpočet výměníku tepla*. Brno: VUT Brno, 1991. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN isbn80-214-0363-2.

[3] Co je to rekuperace. *Www.wafe.eu* [online]. Vážská 845/5, 196 00 Praha 9 - Čakovice, 2018, 1 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: https://www.wafe.eu/clanek/co-je-to-rekuperace

[4] Co je to rekuperace tepla. *E.ON* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.eon.cz/radce/vytapeni-a-vetrani/usporne-vetrani/co-je-rekuperace/

[5] Air Preheater Seal Upgrades Renew Plant Efficiency. In: *Powermag* [online]. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://www.powermag.com/air-preheater-seal-upgrades-renew-plant-efficiency/

[6] KŘÍTEK, Jakub. *Optimalizace trubkového tepelného výměníku*. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická, 2019.

[7] ŠTĚTINA, Josef. Výměníky tepla. In: *Termomechanika online* [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/18kPk8nzEGPkDUPSlAiktZj92LZv3fSDR/view

[8] Poškozený výměník korozí a usazeninami. In: *Vosmik-vymeniky* [online]. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://www.vosmik-vymeniky.cz/data/140110-vliv-chemickeho-slozeni-vody-2.vlivy-zanaseni.pdf

[9] Lokální topení – nejjednodužší způsob vytápění bez rozvodů tepla. *Topeni-topenari.eu* [online]. [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: https://www.topeni-topenari.eu/topeni/systemy-vytapeni/lokalni/

[10] JAROSLAV, Dufka. Zkušenosti z vytápění rodinného domu krbovými kamny s teplovodním výměníkem tepla. In: *Tzb-info* [online]. 2018 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/17480-zkusenosti-z-vytapeni-rodinneho-domu-krbovymi-kamny-s-teplovodnim-vymenikem-tepla

[11] KOLONIČNÝ, Jan, Veronika BOGOCZOVÁ a Jiří HORÁK. *Postupy správného topení*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN isbn978-80-248-2255-6.

[12] Krbový teploměr spalin FLAMINGO - magnetický. In: *Obchod.hsflamingo* [online]. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://obchod.hsflamingo.cz/p/krbovy-teplomer-spalin-flamingo-magneticky

[13] *Jak zapojit teplovodní výměník* [online]. In: . [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://kamna.astranet.cz/jak-zapojit-teplovodni-vymenik

[14] Vyměnitelný výměník. In: *Haassohn-rukov* [online]. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://www.haassohn-rukov.cz/vase-plus/vymenitelny-vymenik

[15] Silnostěnný/slabostěnný výměník. In: *Zelezarstvikvasova* [online]. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: http://www.zelezarstvikassasova.cz/7963-teplovzdusne-vymeniky-ke-kamnum/

[16] Slabostěnný teplovzdušný výměník s průměrem hrdla 120 mm. In: *Zelezarstvikvasova* [online]. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: http://www.shop-admin.cz/userdata/shopimg/zelezarstvikassasova/_JOfpa0-9515__vymenik-tepla-klasik-prumer-120-delka-450.jpg

[17] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.

[18] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Sedmé vydání. Úvaly: Albra, 2021. ISBN 80-736-1124-4.

[19] Fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa. *Tzb-info* [online]. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/38-fyzikalni-hodnoty-pro-suchy-vzduch-pri-tlaku-100-kpa

[20] ŠPILÁČEK, Michal, Michaela ZÁRYBNICKÁ a Zdeněk FORTELNÝ. *Spalovací zařízení a výměníky tepla* [online]. In: . Energetický ústav: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/01/IUT/007_Spalovaci_zarizeni_a_vymeniky_tepla_-_Spilacek_-_P1.pdf

[21] Dimenzování vzduchospalinových cest krbů. In: *TZB-info* [online]. 2001 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: https://vytapeni.tzb-info.cz/kominy-a-kourovody/6616-dimenzovani-vzduchospalinovych-cest-krbu

[22] Flue gases properties table. In: *Pipe Flow Calculators* [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: https://www.pipeflowcalculations.com/tables/flue-gas.xhtml

[23] ŠTĚTINA, Josef. Základy přenosu tepla. In: *Vut* [online]. Fakulta strojního inženýrství, energetický ústav [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: https://docs.google.com/presentation/d/15Jb-neiTigB7alyEZcGlltQaMqHqjzcWlPF0FoXp6gc/edit#slide=id.p1

[24] Krbová kamna ORSTED. *HAAS+SOHN Rukov* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.haassohn-rukov.cz/produkty/krbova-kamna/04266-002-krbova-kamna-orsted

[25] Jaký je rozdíl mezi přenosem tepla vedením, prouděním a sáláním. In: *E-konstrukter* [online]. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-prenosem-tepla-vedenim-proudenim-a-salanim

[26] What's the Difference Between Conduction, Convection, and Radiation. In: Machinedesign. In: *Machinedesign* [online]. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://www.machinedesign.com/learning-resources/whats-the-difference-between/document/21834474/whats-the-difference-between-conduction-convection-and-radiation

[27] Měrné skupenské teplo varu. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9Brn%C3%A9_skupensk%C3%A9_teplo_varu

[28] Koroze. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Koroze

[29] Krbová kamna. In: *Homebydleni* [online]. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: https://homebydleni.cz/wp-content/uploads/2019/09/Thorma.jpg

[30] Silnostěnný výměník s průměrem hrdla 150 a 6 větracími otvory. In: *Zelezarstvikvasova* [online]. [cit. 2021-05-17].

[31] Schéma proudění vzduchu v teplovzdušném výměníku a jeho instalace. In: *Kanuk* [online]. [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: http://www.kanuk.cz/editor/image/stranky3_galerie/tn_zoom_obrazek_333.jpg?014715

[32] Emisivita oceli. In: *Testo* [online]. [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: https://www.testo.com/cz-

CZ/Hodnoty+emisivit+nejd%C5%AFle%C5%BEit%C4%9Bj%C5%A1%C3%ADch+materi%C3%A1l%C5%AF/services_knowledgeable_thermography_emissivity_table

[33] HYRŠ, Jan. *Měření teploty termočlánky*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012.

[34] Legislativa, normy, předpisy-spalinové cesty. In: *Technické informace - komíny - nezávislý informační web* [online]. 2022 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: https://www.tikcr.cz/uvodni-stranka/category/prispevky-ke-kominicke-problematice/legislativanormypredpisyspalinovecesty/page/2/

[35] Kouřovod 150 výměník /2mm ocel. In: *Mbterm-krby.cz* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: https://www.mbterm-krby.cz/images/produkty/431B_Vymenik.jpg

[36] Žaluzie na kouřovod 150 mm/6/1,5 mm- Topení Kořínek. In: *Topení - Kořínek.cz* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: https://www.topeni-korinek.cz/kourovody-ocelove-cerne-a-nerez-kourovody/kourovody-fm-1-5mm/1669-zaluzie-na-kourovod-150-mm-6-1-5-mm.htm#

[37] Ventilátor na kouřovod EKOVENT STANDART 5 magnetický výkonný. In: *Jakub Kasnar - goodgoods.cz* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: https://goodgoods.cz/1857-large_default/ventilator-na-kourovod-ekovent-standart-5-magneticky.jpg

[38] Dehet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Dehet

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
a_{20}	Součinitel teplotní vodivosti vzduchu při 20 °C	$m^2 \cdot s^{-1}$
a_{80}	Součinitel teplotní vodivosti vzduchu při 40 °C	$m^2 \cdot s^{-1}$
a_{vz}	Střední hodnota součinitele teplotní vodivosti vzduchu proudícího v teplovzdušném kanálu	$m^2 \cdot s^{-1}$
c_{20}	Střední měrná tepelná kapacita vzduchu při 20 °C	$J \cdot kg \cdot K^{-1}$
c_{80}	Střední měrná tepelná kapacita vzduchu při 80 °C	$J \cdot kg \cdot K^{-1}$
C_{max}	Maximální tepelná kapacita pro teplé médium, tj. spaliny o teplotě 300,5 °C	$J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}$
C_{min}	Minimální tepelná kapacita pro nejchladnější médium, tj. vzduch	$J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}$
c_{oc}	Střední měrná tepelná kapacita oceli	$J \cdot kg \cdot K^{-1}$
c_{sp}	Střední měrná tepelná kapacita spalin	$J \cdot kg \cdot K^{-1}$
c_{vz}	Střední hodnota měrné tepelná kapacita vzduchu proudícího v teplovzdušném kanálu	$J \cdot kg \cdot K^{-1}$
d_d	Průměr díry v kanálu	mm
d_d	Poloměr díry v kanálu	mm
D_k	Průměr kouřovodu	mm
D_{rtk}	Průměr roztečné kružnice teplovzdušných kanálů	mm
d_{tk}	Průměr teplovzdušného kanálu	mm
d_{tk}	Poloměr teplovzdušného kanálu	mm
D_v	Průměr výměníku tepla	mm
g	Gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
Gr_{sp}	Grashofovo kritérium podobnosti platné pro vzduch	$-$
Gr_{vz}	Grashofovo kritérium podobnosti platné pro vzduch	$-$
k	Součinitel prostupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
l	Délka výměníku tepla	m
$\dot{m}_{sp}$	Hmotnostní průtok spalin	$kg \cdot s^{-1}$
$\dot{m}_{vz}$	Hmotnostní průtok v jednom teplovzdušném kanálu	$kg \cdot s^{-1}$
NTU	Number of Transfer Unit	$-$
Nu_{sp}	Nusseltovo kritérium platné pro spaliny	$-$
Nu_{vz}	Nusseltovo kritérium platné pro vzduch	$-$
Pr_{20}	Prandtlovo číslo platné pro vzduch o teplotě 20 °C	$-$
Pr_{80}	Prandtlovo číslo platné pro vzduch o teplotě 80 °C	$-$
Pr_{sp}	Prandtlovo číslo pro spaliny	$-$
Pr_{vz}	Střední hodnota Prandtlova číslo pro vzduch	$-$
$\dot{Q}_{8tk}$	Skutečný výkon 8 teplovzdušných kanálů	W
$\dot{Q}_{max}$	Maximální možný výkon 8 teplovzdušných kanálů	W
$\dot{Q}_{pk}$	Výkon pláště kouřovodu	W

$\dot{Q}_{pv}$	Výkon pláště výměníku	W
$\dot{Q}_{tk}$	Výkon jednoho teplovzdušného kanálu	W
$\dot{Q}_{v}$	Celkový výkon výměníku	W
$Ra_{x,krit}$	Rayleighovo kritérium	$-$
R_k	Poloměr kouřovodu	mm
r_{tr}	Poloměr teplovzdušného kanálu	mm
R_v	Poloměr výměníku tepla	mm
S_k	Povrch pláště kouřovodu	mm^2
S_{tr}	Povrch pláště jednoho z 8 teplovzdušných kanálů	mm^2
S_v	Povrch pláště výměníku	mm^2
T_{20}	Termodynamická teplota vstupního chladného média, tj. vzduch	K
t_{20}	Teplota okolí a zároveň vstupní teplota chladného média, tj. vzduch	$°C$
T_{80}	Termodynamická teplota výstupního chladného média, tj. vzduch	K
t_{80}	Teplota na výstupu chladného média, tj. vzduch (dosažena iteračně)	$°C$
T_{pv}	Termodynamická teplota na povrchu pláště výměníku/kouřovodu	K
$T_{sp,in}$	Průměrná naměřená vstupní termodynamická teplota spalin uvnitř kouřovodu	$°C$
$t_{sp,in}$	Průměrná naměřená vstupní teplota spalin uvnitř kouřovodu	$°C$
$T_{sp,out}$	Výstupní termodynamická teplota spalin za výměníkem	$°C$
$t_{sp,out}$	Výstupní teplota spalin za výměníkem	$°C$
$t_{vz,out}$	Vypočítaná teplota na výstupu chladného média, tj. vzduch	$°C$
v_{vz}	Rychlost proudění chladného média v teplovzdušném kanálu	$m \cdot s^{-1}$
α_{sp}	Součinitel přestupu tepla spalin	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
α_{vz}	Součinitel přestupu tepla vzduchu	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
β_{20}	Součinitel objemové roztažnosti vzduchu při 20 °C	K^{-1}
β_{80}	Součinitel objemové roztažnosti vzduchu při 80 °C	K^{-1}
β_{sp}	Součinitel objemové roztažnosti spalin	K^{-1}
β_{vz}	Součinitel objemové roztažnosti spalin	K^{-1}
δ_{oc}	Tloušťka stěny výměníku tepla	mm
ε	Efektivnost výměníku tepla	$-$
ε_{oc}	Emisivita oceli	$-$
λ_{20}	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu při 20 °C	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_{80}	Součinitel tepelné vodivosti vzduchu při 80 °C	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

λ_{oc}	Součinitel tepelné vodivosti oceli	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_{sp}	Součinitel tepelné vodivosti spalin	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
λ_{vz}	Střední hodnota součinitele tepelné vodivosti vzduchu	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
μ_{sp}	Dynamická viskozita spalin	$m^2 \cdot s^{-1}$
ν_{20}	Kinematická viskozita vzduchu o teplotě 20 °C	$m^2 \cdot s^{-1}$
ν_{80}	Kinematická viskozita vzduchu o teplotě 80 °C	$m^2 \cdot s^{-1}$
ν_{sp}	Kinematická viskozita spalin	$m^2 \cdot s^{-1}$
ν_{vz}	Střední hodnota kinematická viskozity vzduchu	$m^2 \cdot s^{-1}$
ρ_{20}	Hustota vzduchu při 20 °C	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_{80}	Hustota vzduchu při 80 °C	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_{oc}	Hustota oceli	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_{sp}	Hustota teplého proudícího média, tj. spaliny	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_{vz}	Hustota chladného proudícího média, tj. vzduch	$kg \cdot m^{-3}$
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta	$-$

SEZNAM PŘÍLOH

1 Výkres výměníku tepla
2 Technická dokumentace krbových kamen Haas+Sohn Orsted [24]
3 Prohlášení o vlastnostech krbových kamen Haas+Sohn Orsted [24]
4 Energetický štítek krbových kamen Haas+Sohn Orsted [24]
5 Výpočet pomocí metody středního logaritmického teplotního spádu – LMTD