VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

STANOVENÍ RYCHLOSTNÍHO POLE V EXPERIMENTÁLNÍM VÝMĚNÍKU TEPLA

DETERMINATION OF THE VELOCITY FIELD IN AN EXPERIMENTAL HEAT EXCHANGER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Jakub Volf

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Dominika Babička Fialová, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2025

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	**Jakub Volf**
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Dominika Babička Fialová, Ph.D.**
Akademický rok:	2024/25

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:

Stanovení rychlostního pole v experimentálním výměníku tepla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na výpočtové stanovení rychlostního pole v experimentálním výměníku tepla a jeho analýzu z pohledu zanášení jeho teplosměnných ploch. Cílem je seznámit se s problematikou moderního výpočtového modelování proudění pracovních látek v osově symetrických procesních zařízeních a pro konkrétní provozní zadání experimentálního výměníku tepla provést s podporou vybraného softwarového systému výpočtové stanovení rychlostního pole pracovní látky v oblasti středové roviny výměníku tepla a analyzovat dosažené výsledky z pohledu jejich dopadů na zanášení teplosměnných ploch.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznámit se se základy problematiky moderního výpočtového modelování proudění pracovních látek v osově symetrických procesních zařízeních.
2. Seznámit se s provedením osově symetrického experimentálního výměníku tepla, který bude předmětem výpočtového modelování proudění.
3. Pro konkrétní provozní zadání experimentálního výměníku tepla provést s podporou vybraného softwarového systému výpočtové stanovení rychlostního pole pracovní látky v oblasti středové roviny výměníku tepla.
4. Provést analýzu dosažených výsledků z pohledu jejich dopadů na zanášení teplosměnných ploch experimentálního výměníku.

Seznam doporučené literatury:

ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide, Version 2024 R1. Canonsburgh, PA: ANSYS, Inc., 2024.

HÁJEK, J. Modelování s využitím CFD – I. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav procesního inženýrství, 2008.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

Abstrakt

Zanášení výměníků tepla představuje významnou průmyslovou výzvu, neboť negativně ovlivňuje jejich účinnost, zvyšuje náklady na údržbu a může vést k nežádoucím dopadům na životní prostředí. Z tohoto důvodu je v provozech se zvýšeným rizikem zanášení nezbytné navrhnout vhodné typy výměníků tepla. Tato bakalářská práce se proto zabývá numerickou analýzou proudění v testovacím zařízení, které slouží k popisu podmínek reálného provozu pro následnou aplikaci při návrhu výměníku tepla pro daný provoz. Prostřednictvím CFD metod byly provedeny analýzy rychlostního pole v zařízení při dvou různých provozních podmínkách a jejich výsledky byly porovnány s daty z laboratorního a provozního měření. CFD analýzy v ANSYS Fluent byly vytvořeny jako dvourozměrné ustálené simulace pro podmínky obou testů a jako tranzientní pro laboratorní test. Analýza výsledků simulací umožnila porovnání s výsledky měření, zejména se zaměřením na tvorbu nánosů v závislosti na charakteru rychlostního pole, které jejich vznik výrazně ovlivňuje. Výsledky potvrdily, že oblasti s nízkou rychlostí proudění v simulacích odpovídají místům s pozorovaným vyšším výskytem nánosů. Zároveň byla potvrzena vhodnost použití 2D CFD modelu pro predikci proudění a zanášení v řešeném výměníku.

Klíčová slova

Výměník tepla, zanášení, CFD, rychlostní pole, 2D simulace

Abstract

Fouling of heat exchangers represents a significant industrial challenge, as it negatively affects their efficiency, increases maintenance costs, and can lead to undesirable environmental impacts. For this reason, it is essential to design suitable types of heat exchangers for operations with an increased risk of fouling. This bachelor's thesis focuses on the numerical analysis of flow in test equipment that is utilized to describe the real operational conditions for subsequent integration into the design of a heat exchanger for a specific industrial application. Using CFD methods, analyses of the velocity field were carried out under two different operating conditions, and the results were compared with data from laboratory and operational measurements. The CFD analyses in ANSYS Fluent were performed as two-dimensional steady-state simulations for both tested conditions and as a transient simulation for the conditions of the laboratory test. The analysis of the simulation results enabled a comparison with experimental data, with particular emphasis on the formation of deposits depending on the characteristics of the velocity field, which significantly influences their development. The results confirmed that low velocity regions in the simulations correspond to areas with observed higher deposit accumulation. Additionally, the suitability of employing a 2D CFD model to predict flow behavior and fouling-prone zones in the heat exchanger under consideration was confirmed.

Key words

Heat exchanger, fouling, CFD, velocity field, 2D simulation

Bibliografická citace

VOLF, Jakub. *Stanovení rychlostního pole v experimentálním výměníku tepla*. Online, bakalářská práce. Dominika BABIČKA FIALOVÁ (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165630. [cit. 2025-05-23].

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Stanovení rychlostního pole v experimentálním výměníku tepla* vypracoval samostatně s odborným vedením Ing. Dominiky Babičky Fialové, Ph.D. Použitou literaturu s podklady uvádím v seznamu zdrojů.

Jakub Volf

Rád bych poděkoval především vedoucí mé bakalářské práce Ing. Dominice Babičce Fialové, Ph.D. za její odborné vedení, vstřícnost, trpělivost a pomoc při vytváření této práce. Mé poděkování patří také mé rodině za jejich podporu při studiu.

Obsah

1 ÚVOD 10

1.1 CÍLE PRÁCE 10
1.2 PODĚKOVÁNÍ 10

2 TEPELNÉ VÝMĚNÍKY V ZANÁŠIVÉM PROSTŘEDÍ 11

2.1 ROZDĚLENÍ TEPELNÝCH VÝMĚNÍKŮ 11
2.2 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO VÝMĚNÍKU 14

3 ZANÁŠENÍ 17

3.1 MECHANISMUS ZANÁŠENÍ 17
3.2 TYPY ZANÁŠENÍ 19
3.2.1 Partikulární zanášení 19
3.2.2 Krystalizační zanášení 20
3.2.3 Zanášení tuhnutím tekutiny 20
3.2.4 Zanášení kvůli korozi 20
3.2.5 Chemické zanášení 21
3.2.6 Biologické zanášení 21
3.3 PROUDĚNÍ TEKUTIN 21
3.4 PŘENOS HMOTY 23
3.5 VÝPOČET PŘENOSU TEPLA PŘI ZANÁŠENÍ 23
3.6 PŘÍKLADY ZANÁŠENÍ V PRŮMYSLU 23
3.7 DOPADY ZANÁŠENÍ 25
3.8 METODY PREVENCE A ČIŠTĚNÍ 26
3.8.1 Metody zmírnění zanášení 26
3.8.2 Čištění tepelných výměníků 27

4 SIMULACE PROUDĚNÍ POMOCÍ CFD 29

4.1 ZÁKLADNÍ ROVNICE POPISUJÍCÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU 29
4.1.1 Rovnice kontinuity 30
4.1.2 Navier-Stokesova rovnice 30
4.1.3 Energetická rovnice 31
4.2 METODY POPISU TURBULENCE 31

5 TVORBA CFD MODELŮ 32

5.1 MODEL PRO CFD ANALÝZU PROUDĚNÍ 32
5.1.1 Tvorba výpočetní sítě 33
5.2 VLASTNOSTI VYTVOŘENÉ VÝPOČETNÍ SÍTĚ 34
5.2.1 Zhodnocení kvality sítě 36
5.3 LABORATORNÍ PODMÍNKY 38
5.3.1 Nastavení výpočtu stacionární simulace 42
5.3.2 Nastavení výpočtu tranzientní simulace 44
5.4 PROVOZNÍ PODMÍNKY 45
5.4.1 Nastavení výpočtu 46

6 VÝSLEDKY SIMULACE CFD A SROVNÁNÍ S PROVEDENÝMI EXPERIMENTY 49

6.1 VÝSLEDKY LABORATORNÍHO TESTU 49
6.2 ANALÝZA PROUDĚNÍ PŘI LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH 51
6.2.1 Analýza proudění ustálených modelů 51

6.2.2 Analýza proudění tranzientního modelu *53*
6.3 SROVNÁNÍ OBDRŽENÝCH VÝSLEDKŮ PRO LABORATORNÍ PODMÍNKY 54
6.4 VÝSLEDKY PROVOZNÍHO TESTU 55
6.5 ANALÝZA PROUDĚNÍ PŘI PODMÍNKÁCH PROVOZNÍHO TESTU 58
6.6 SROVNÁNÍ OBDRŽENÝCH VÝSLEDKŮ PRO PROVOZNÍ PODMÍNKY 59
7 ZÁVĚR 60
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 61
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 64

1 Úvod

Zanášení výměníků tepla představuje technologickou výzvu nejen kvůli snižování nákladů, ale také kvůli tématům důležitým pro dnešní společnost, jako je ochrana životního prostředí a zmenšování zásob neobnovitelných zdrojů. Usazování částic na teplosměnných površích výměníků vede ke snížení účinnosti přestupu tepla, zvýšení tlakových ztrát a nutnosti častější údržby zařízení. Identifikace a pochopení mechanismů zanášení je proto klíčová pro návrh účinných a spolehlivých zařízení hlavně v provozech, kde je přítomnost zanášivých částic v proudícím médiu běžná.

Pro detailní analýzu těchto jevů představuje výpočetní dynamika tekutin (CFD) účinný nástroj, který umožňuje detailní popis proudění v reálných nebo zjednodušených geometriích za definovaných okrajových podmínek. V této práci je proudění analyzováno v experimentálním výměníku tepla s osově symetrickým uspořádáním trubek, přičemž výpočty jsou prováděny ve středové rovině zařízení.

Porovnání výsledků simulací s výstupy z laboratorních a provozních testů rozšiřuje poznání o chování proudící pracovní látky, kdy tyto děje je buď zcela nemožné zkoumat v reálném zařízení, nebo jen s velkými obtížemi.

1.1 Cíle práce

Cílem této práce je vytvoření a vyhodnocení výpočtového modelu proudění v osově symetrickém experimentálním výměníku tepla. Práce je zaměřena na popis a simulaci proudění ve středové rovině zařízení a následnou analýzu rychlostního pole výměníku z hlediska vzniku zanášení.

Prvním dílčím cílem práce bylo seznámit se se základní problematikou výpočetní dynamiky tekutin v osově symetrických procesních zařízení. To je probráno v kapitolách 4 a 5, které popisují základy metod CFD, tvorbu samotného 2D modelu, nastavení simulací a metody sledování konvergence úlohy. Dalším dílčím cílem byl popis výměníku tepla, který byl předmětem výpočtového modelování proudění. Vlastnosti zařízení byly popsány v kapitole 2.2, přičemž kapitola 2 se věnuje obecnému kontextu výměníků tepla používaných v procesním průmyslu s důrazem na jejich vhodnost pro zanášivé prostředí. Problematice zanášení, jeho mechanismům, dopadům i možné prevenci je věnována kapitola 3. Pomocí simulací v programu ANSYS Fluent bylo stanoveno rychlostní pole pro laboratorní a provozní podmínky (dílčí cíl 3). Podmínky laboratorních i provozních zkoušek, které posloužily i jako okrajové podmínky numerických úloh, jsou popsány v kapitolách 5.3 a 5.4. Diskuze výsledků simulací z pohledu jejich dopadu na zanášení výměníku, tj. dílčí cíl 4, byla provedena v kapitole 6.

1.2 Poděkování

Tato práce vznikla v rámci projektu TK05020076 *Vývoj mobilního testeru pro bezpečné a spolehlivé využití tepla ze zanášivých spalin a generátoru amoniaku k jejich čištění*, který byl spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu THÉTA.

2 Tepelné výměníky v zanášivém prostředí

Výměníky tepla jsou zařízení sloužící k předávání tepelné energie pomocí proudících teplonosných médií s různými teplotami. Dochází zde k přenosu tepla z média s vyšší teplotou do média chladnějšího. Tohoto procesu lze podle potřeb technologických procesů využít k ohřevu nebo ochlazení. Výměníky tepla se dělí na několik typů, z nichž každý má specifické vlastnosti a použití. [1]

Problémem výměníků aplikovaných v zanášivých procesech je akumulace částic na jejich (teplosměnných) plochách, což vede ke snížení účinnosti přenosu tepla a zvýšení tlakových ztrát. To negativně ovlivňuje provozní náklady a snižuje životnost zařízení. Při závažném znečištění může dojít až k poškození zařízení. [2]

V praxi se výměníky tepla v podmínkách zanášivého prostředí využívají například v energetice (např. dochází k usazování vodního kamene nebo biologickému zanášení v chladících systémech elektráren), petrochemickém průmyslu (např. při předehřevu surové ropy v síti trubkových výměníků [3]) nebo potravinářství (např. u deskových výměníků v linkách na zpracování mléka [4]).

Pro zajištění dlouhodobé efektivity je nutné pravidelně provádět údržbu a snížit vliv nebo rychlost zanášení vhodnými úpravami a dimenzováním konstrukce tepelného výměníku nebo přidáním aditiv do proudícího média [2].

2.1 Rozdělení tepelných výměníků

Výměníky tepla se dají dělit podle celé řady kritérií (viz [1] a [5]). Jedno ze základních rozdělení výměníků je následující:

- **Rekuperační** – Proudící média jsou oddělena nepropustnou stěnou, k přenosu tepla dochází prostupem stěnou (vedení a proudění).
- **Regenerační** – Do vymezeného prostoru vtéká ohřívající médium, které předá teplo výměníku a v dalším intervalu vtéká ohřívané médium, které od výměníku teplo přijímá.
- **Kontaktní** – Horké a chladné médium jsou v různých fázích a po vzájemném kontaktu a předání tepla se od sebe oddělují.
- **Směšovací** – Dochází k vzniku směsi horkého a chladného média v homogenní směs.

Dále se tepelné výměníky dají dělit například podle účelu a použití; podle způsobu přenosu tepla; podle směru a smyslu proudění teplosměnných médií a podle konstrukce výměníku.

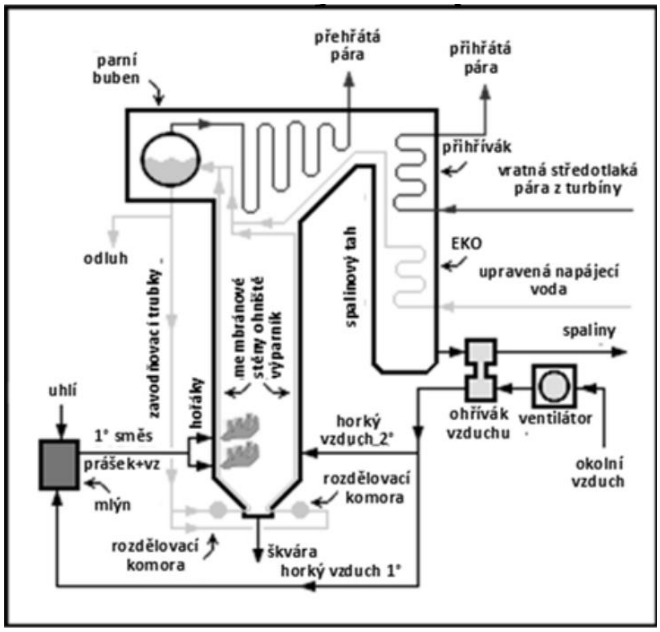
Experimentální výměník, který je hlavním předmětem této bakalářské práce, spadá do kategorie rekuperačních výměníků tepla. Níže uvedené způsoby dělení výměníků, stejně jako další části předložené bakalářské práce, je proto pojato právě z této perspektivy.

1.1.1 Podle účelu a použití

Jedná se např. o tyto typy zařízení:

- **Ohříváky a ekonomizéry** – Dochází ke zvýšení teploty ohřívaného média bez změny jeho fáze.
- **Chladiče** – Dochází ke snížení teploty ochlazovaného média bez změny jeho fáze.
- **Přehříváky a mezipřehříváky** – Dochází ke zvýšení teploty syté nebo přesycené páry.
- **Topná tělesa** – Používají se například v systémech ústředního vytápění.

V kontextu energetického a procesního průmyslu lze ukázat aplikaci hned několika typů výměníků tepla např. na parním kotli, viz schéma na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 – Schéma zapojení parního kotle [6]

1.1.2 Podle způsobu přenosu tepla

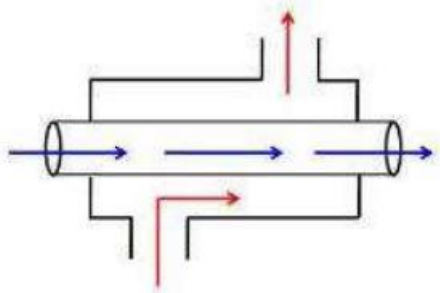
Existují 3 základní způsoby přenosu tepla**.** Přenos tepla vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací). V každém z následujících typů výměníků dochází ke každému typu přenosu tepla, způsoby přenosu jsou však pro každý typ výměníku různě důležité. Přenos tepla vedením popisuje přenos tepla pohybem částic (molekuly tekutin, elektrony pevných látek a vibrace atomů pevných látek) a předáváním jejich kinetické energie na sousední molekuly. Nejvýrazněji se vedení projevuje u pevných látek. Přenos tepla prouděním vzniká přemístěním molekul v prostoru v důsledku proudění, tím se přenáší i jejich tepelná energie. Proudění se projevuje hlavně u tekutin (v pevných látkách dochází k difúzi). K přenosu tepla sáláním dochází u každé látky teplejší než 0 K a nositelem tepelné energie jsou fotony. [7]

Z pohledu výměníků používaných v procesním průmyslu jsou zásadní:

- **Konvekční** – Přenos tepla je zajištěn především prouděním (konvekcí) teplonosného média. Teploty pracovních látek dosahují maximálně cca 300 °C.
- **Sálavé (radiační)** – Přenos tepla probíhá hlavně prostřednictvím tepelného záření. Pracovní látky dosahují teplot nad 600 °C.
- **Kombinované** – Přenos tepla zahrnuje jak konvekci, tak sálání. Teploty pracovních látek se pohybují v rozmezí 300–600 °C.

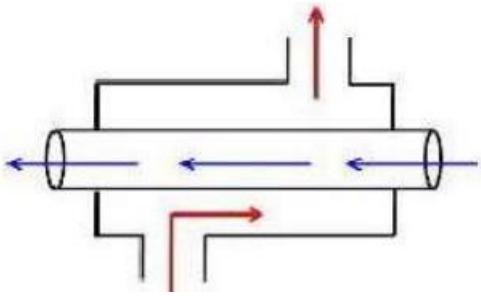
1.1.3 Podle směru a smyslu proudění teplosměnných médií

- **Souproudé** – Obě média proudí stejným směrem (viz Obr. 2.2).



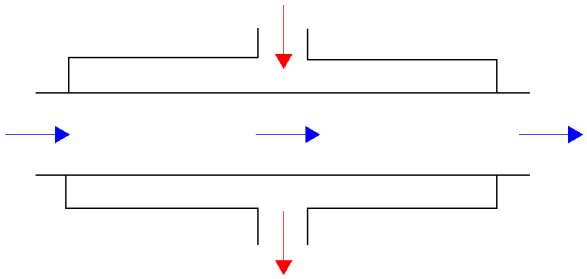
Obr. 2.2 – Souproudý výměník [8]

- **Protiproudé** – Proudy obou médií jsou rovnoběžné a směřují proti sobě (viz Obr. 2.3).



Obr. 2.3 – Protiproudý výměník [8]

- **Křížové** – Obě média proudí vzájemně pod pravým úhlem (viz Obr. 2.4)



Obr. 2.4 – křížový výměník [1]

- **Se šikmým vzájemným prouděním** – Média proudí pod úhlem, který není pravý.
- **Vícenásobné proudění** – jedno nebo více proudících médií několikrát prochází výměníkem (např. několika trubkami a chody ekonomizéru)
- **Kombinované proudění** – Dochází současně k několika typům proudění v jednom výměníku (např. u výměníků se svazkem trubek v plášti se segmentovými přepážkami)

1.1.4 Rozdělení tepelných výměníků podle konstrukce

Uvedené typy výměníků jsou základní typy výměníků používaných v procesních systémech podle [5] a [9]:

- **Trubkové výměníky** – Teplosměnná plocha je tvořená trubkami, kde jedno médium proudí v trubkách, druhé je obtéká v tzv. mezitrubkovém nebo plášťovém prostoru. Počet, průměr, délka a rozteč trubek se může lišit podle designu výměníku. Trubkové

výměníky můžou být dále rozděleny na výměník trubka v trubce a trubkový výměník s přepážkami. Trubkový výměník typu trubka v trubce je vhodný pro výkony desítek až stovek kW a vyznačuje se vysokou konstrukční variabilitou. Lze jej přizpůsobit specifickým požadavkům procesu – např. použitím žebrování, šroubovicových trubek či úpravou materiálů. Pracuje spolehlivě i při vysokých tlacích a v náročných provozních podmínkách. Trubkový výměník s přepážkami je určen pro výkony od stovek kW po jednotky MW [10]. Přepážky v mezitrubkovém prostoru slouží pro zlepšení přestupu tepla; tvarově mohou být přepážky rovné (např. segmentové) nebo helikální (šroubovicové) – ty jsou výhodnější právě v zanášivém provozu. Díky robustní konstrukci, široké variabilitě a materiálové flexibilitě umožňuje tento výměník optimalizaci pro specifické provozní podmínky, a i proto je nejpoužívanějším typem v průmyslu [10].

- **Deskové výměníky** – Jsou sestaveny z tenkých plátů, mezi kterými proudí pracovní média. Výměníky mohou být dále rozděleny na výměníky s profilovanými deskami, spirálové deskové výměníky a lamelové výměníky [5]. Výměníky s profilovými deskami jsou vhodné pro výměnu tepla mezi čistými nebo mírně znečištěnými kapalinami, nabízí vysoký přestup tepla a možnost úpravy výkonu změnou počtu desek [10]. Tento typ výměníku není vhodný pro zanášivý provoz, ale jeho výhodou je rozebíratelnost (pro snadnější čištění) a nízká cena [10]. Spirálový výměník tepla má kompaktní a robustní konstrukci, je vhodný i pro zanášivé látky i vyšší provozní tlaky (až 3–4 MPa), umožňuje snadné čištění díky rozebíratelnosti a má sníženou tendenci zanášení (samočistící schopnost výměníku) [10]. Přestup tepla je sice nižší než u deskového výměníku, ale vyšší než u hladkých stěn.

Podle [5] jsou dalším typem výměníky s rozšířeným povrchem, které jsou vhodné pro zlepšení přestupu tepla. Žebra, která často tato rozšíření tvoří, však napomáhají tvorbě a hromadění nečistot na teplosměnných plochách, a proto často nejsou vhodné pro zanášivé provozy.

Nedojde-li k výběru jednoho z uvedených standardních výměníků, což je častým případem právě při předpokladu silného zanášení výměníku, dochází k návrhu a konstrukci speciálních výměníků, které vyhovují konkrétním podmínkám v daném provozu.

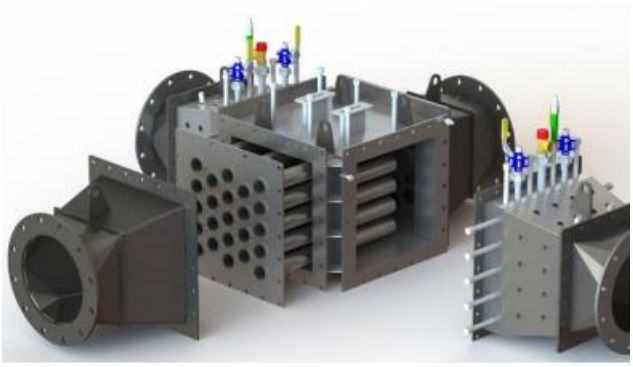
2.2 Popis experimentálního výměníku

Zkoumaný experimentální tepelný výměník slouží k měření a identifikaci vhodných parametrů výměníku pro konkrétní průmyslové podmínky a následný návrh vhodného výměníku tepla pro daný provoz. Pro získání testovacích dat je výměník opatřen řadou vstupních otvorů, které slouží pro vstup měřicí techniky, případně pro testování metod odstranění nánosů. Na obr. 1.3 je zobrazen model tohoto experimentálního křížového trubkového výměníku.

U řešeného experimentálního výměníku protéká vzdušina svazkem 16 trubek uspořádaných do konfigurace 4×4 (viz Obr. 2.6). Trubky mají délku 630 mm a tloušťku stěny 2,9 mm. V bakalářské práci je řešena konfigurace, kde jsou trubky usazeny v zákrytu s osovou vzdáleností 98 mm mezi sousedními trubkami, ale výměník může být také sestaven také v uspořádání přesazeném (jak je patrné z Obr. 2.5). Tělo výměníku je vyrobeno ze svařence plechů z žáruvzdorné oceli a je uspořádán do kříže se čtyřmi hrdly. Díky modulárnosti zařízení může zanášivé médium protékat mezitrubkovým prostorem i trubkami samotnými.

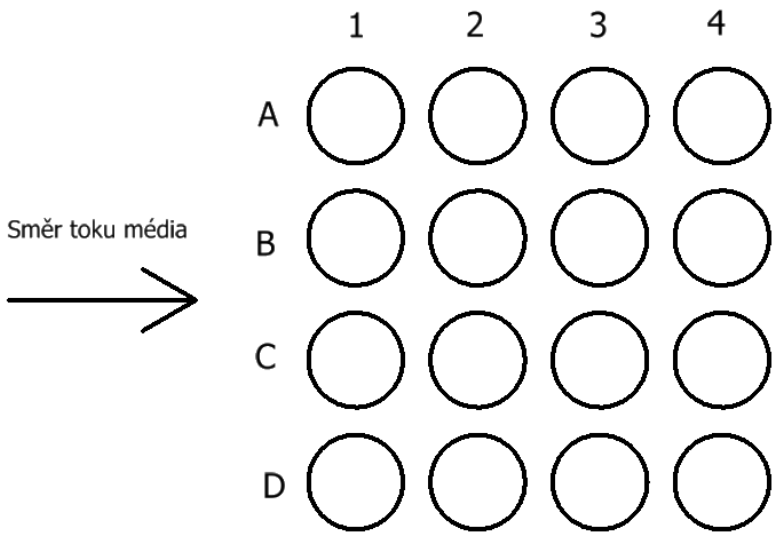
Z hlediska účinnosti se křížové výměníky nacházejí mezi souproudými a protiproudými výměníky, přičemž jsou konstrukčně jednodušší než další zmíněné typy [3]. Volba křížového uspořádání proudů nejlépe odpovídá průmyslové využívaným řešením. Konstrukce výměníku navíc rozměrově odpovídá průmyslovému zařízení, což vede k lepšímu popisu podmínek reálného provozu a adekvátnější aplikaci získaných poznatků při návrhu zařízení pro předmětný provoz. Testovací zařízení je rozebíratelné, modifikovatelné a mobilní. Výměník je možné testovat v laboratoři (v simulovaných podmínkách), ale i v provozu průmyslového podniku, přičemž výměník je schopný pracovat v teplotách do 800 °C.

Výhodou použitého trubkovém svazku je, možnost otestovat zanášení trubek v blízkosti stěn i v centru svazku. Svazek trubek je popsán jednotlivými sloupci označenými 1–4 a řadami trubek A–D (viz Obr. 2.7). Obr. 2.8 dále rozděluje trubku na 12 úseků kvůli popisu tvorby nánosů na trubkách, jak bude ukázáno v dalších kapitolách.

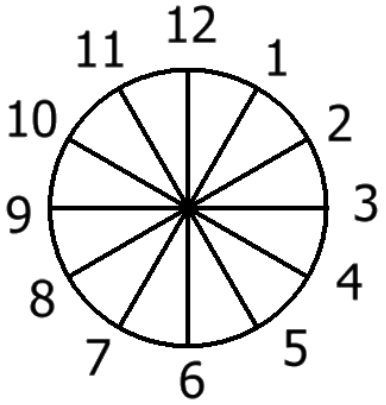


Obr. 2.5– Experimentální výměník [11]

Obr. 2.6– Model trubkového svazku [11]



Obr. 2.7– Označení trubek ve svazku



Obr. 2.8 – Rozdělení trubky na jednotlivé úseky

3 Zanášení

Zanášením se označuje proces usazování různých materiálů z teplonosných látek na teplosměnných plochách. Nánosy vytváří zvýšený tepelný odpor a snižují tak účinnost přenosu tepla v daném výměníku. Usazeniny mohou také přispívat k tvorbě korozivního prostředí vlivem kondenzace par na příliš chladném povrchu, popř. ve stagnačních zónách (s nulovou či minimální rychlostí proudění pracovní látky). Naopak v jiných částech výměníku nános látek vede k zmenšování průtočného průřezu a tím zvyšuje rychlost proudění média, čímž přispívá k navýšení abraze (úbytku materiálu otěrem) [1]. Zanášení se může projevovat ze strany obou médií. Problematickým materiálem z hlediska zanášení může být samotná tekutina (typicky např. tvrdá voda, mléko, ropné produkty), ale častěji jsou to částice, které tekutina obsahuje (např. pevné částice popílku v proudu spalin).

Zanášení (rychlost, resp. míru) lze ovlivnit konstrukčními opatřeními, snížením koncentrace zanášivé látky v pracovním médiu nebo čištěním teplosměnných ploch (mechanickým nebo chemickým). Zanášení výměníků tepla však představuje technologickou výzvu nejen kvůli snižování nákladů, ale také kvůli tématům důležitým pro dnešní společnost, jako je ochrana životního prostředí a zmenšování zásob neobnovitelných zdrojů [2]. Tyto dopady jsou probírány v podkapitole 3.7.

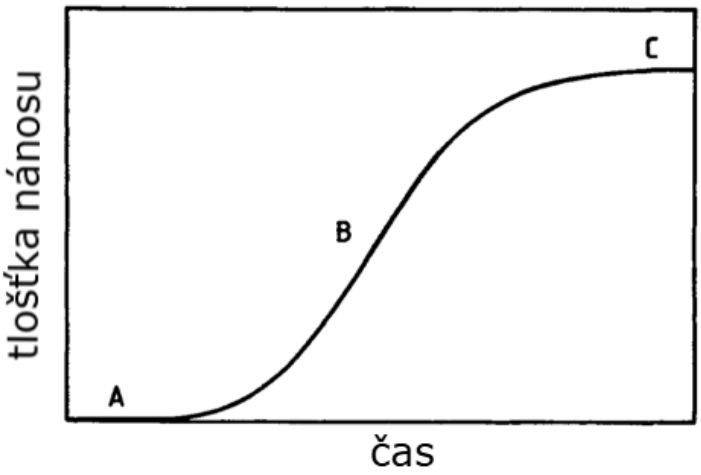
3.1 Mechanismus zanášení

Při zanášení povrchů můžou být pozorovány tři fáze:

- difuzní přenos zanášivého média mezi povrchovými vrstvami teplosměnných ploch a tekutinou,
- adheze zanášivého média na povrch samotný,
- transport materiálu od povrchu.

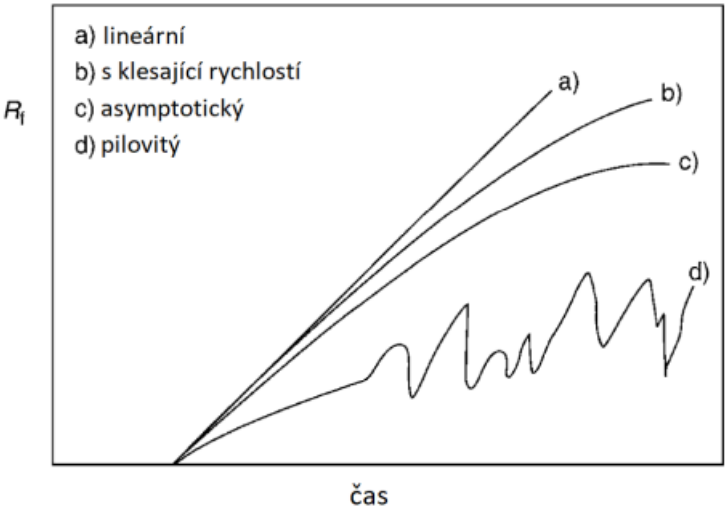
Dohromady tyto fáze určují charakter růstu množství usazeného materiálu na povrchu [2].

Na Obr. 3.1 je potom idealizovaný graf tloušťky nánosů za čas. Oblast A je začátek procesu zanášení, který může trvat minuty nebo i několik týdnů. V oblasti B dochází k postupnému růstu nánosu, rychlost růstu ale postupně klesá a naopak roste odstraňovaní materiálu. Nakonec se tloušťka nánosů ustálí na jedné hodnotě v oblasti C. [2]



Obr. 3.1– Idealizovaný vývoj tloušťky nánosů za čas [2]

Na Obr. 3.2 jsou zobrazeny základní způsoby růstu nánosů (a tedy i zanášecího součinitele R_f), které lze u tepelných výměníků obvykle pozorovat. Lineární růst se objevuje u nánosů, jejichž odstraňování za čas je zanedbatelné nebo konstantní a zároveň je zanášení rychlejší než odstraňování nánosů. Křivka s klesající rychlostí růstu se objevuje u nečistot, když se rychlost zanášení za čas zmenšuje nebo dochází k větší rychlosti odstraňování při zvýšení místní rychlosti tekutiny ve výměníku. Asymptotický nárůst je nejčastěji dokumentovanou možností vývoje, při kterém se za určitý čas rychlost nánosu začne rovnat rychlosti odstraňování, je tedy dosaženo konstantní tloušťky nánosu. Při pilovitém růstu nánosu dochází k nepravidelnému odpadu nánosu ze zanešených ploch. [12]



Obr. 3.2 – Možnosti vývoje růstu nánosů (zanášecího součinitele R_f) za čas [13]

Rychlost růstu nánosu může být pak u všech typů zanášení popsána rovnicí (3.1) [2]:

$$\frac{dm}{dt} = \phi_D - \phi_R \tag{3.1}$$

m hmotnost nánosu

ϕ_D hmotnostní tok nánosu na povrch

ϕ_R hmotnostní tok odstraňování z povrchu

3.2 Typy zanášení

Zanášení můžeme rozdělit na zanášení partikulární, krystalizační, zanášení tuhnutím tekutiny, zanášení kvůli korozi a biologické zanášení. V této části budou jednotlivé typy základně popsány, přičemž větší důraz je kladen na partikulární zanášení, kterému se věnují experimenty prováděné s pomocí řešeného experimentálním výměníku.

Je důležité si uvědomit, že v reálném provozu často nedochází k izolovanému výskytu jednoho typu zanášení, ale spíše k jejich kombinacím. Různé mechanismy zanášení mohou probíhat současně a zpravidla se vzájemně podporují. Např. krystalizační usazeniny mohou zachytávat pevné částice nebo sloužit jako substrát pro biologické růsty. V každé kategorii lze jejich chování popsat obdobnými modely [13].

3.2.1 Partikulární zanášení

Partikulární zanášení označuje usazování malých částic (částice menší než 10 μm) na teplosměnných plochách, nebo gravitační usazování velkých částic (větší než 10 μm) na vodorovné povrchy [13]. K zanášení může docházet v plynech (např. popílek nebo prachové částice ve vzduchu) i kapalinách (nečistoty v chladící vodě z vodních nádrží) [12]. Transport částic je součástí tvorby i dalších typů zanášení (např u krystalizačního zanášení musí nejdříve dojít k pohybu krystalů k povrchu teplosměnných ploch) [2]. K mechanismu gravitačního usazování dochází hlavně u pomalu proudících tekutin. V případě řešeného experimentálního výměníku se předpokládá, že ke gravitačnímu usazování bude docházet méně než vlivem transportu partikulárních částic.

Aby se částice stala součástí nánosu na teplosměnné ploše, musí dojít k transportu částice na povrch a při dosažení povrchu se na něj musí částice přilepit, aby se stala součástí zanášecí vrstvy. Na mechanismu transportu částice má velký vliv její velikost, kdy se větší částice kvůli své hmotnosti transportuje k povrchu hlavně svou hybností a menší částice se pohybují k povrchu hlavně difuzí. Dalšími faktory transportu částic jsou síly (např. van der Waalsovy síly a elektrostatické síly), které působí v okolí povrchů a množství částic v jeho blízkosti. [2]

Základní popis rychlosti ukládání nánosu může být podle [2] popsat rovnicí (3.2):

$$\phi_D = K_t(c_b - c_s) \tag{3.2}$$

ϕ_D rychlost ukládání částic

K_t koeficient přepravy

c_b koncentrace částic v nenarušeném proudu média

c_s koncentrace částic na povrchu

3.2.2 Krystalizační zanášení

Krystalizační zanášení označuje usazování rozpuštěných solí na teplosměnných plochách [13]. Rozpustnost solí ve vodě se s teplotou mění a při dosažení její maximální hodnoty pro danou teplotu pracovní látky může dojít k supersaturaci. V takovém případě na površích výměníků s jinou (nižší) povrchovou teplotou dochází k tvorbě krystalů [12]. Zárodky krystalů mohou vznikat i přímo v tekutině a následně jsou na povrch partikulárně přepraveny. Krystalizace začíná v zárodečných místech, např. jamkách a škrábancích na povrchu, a často se pak rozšíří na celý povrch zařízení [12]. Na základě složení a podmínek prostředí mohou vznikat různé typy usazenin – od měkkých a porézních až po tvrdé a kompaktní vrstvy.

Tvrdé vrstvy se obvykle tvoří z inverzně rozpustných solí, např. uhličitanu vápenatého ($CaCO_3$) nebo síranu vápenatého ($CaSO_4$), a jsou charakteristické vysokou adhezí a odolností vůči odstranění [14]. Naopak měkčí vrstvy mohou vznikat při nízkých teplotách nebo v počátečních fázích zanášení, často v podobě méně stabilních forem, jako je vaterit, který je modifikací uhličitanu vápenatého [14]. Oba typy vrstev snižují efektivitu tepelného přenosu a tyto nánosy mohou způsobit velký nárůst teploty na stěnách trubek, případně materiál trubky zcela izolovat. V nejkrajnějším případě pak může toto nerovnoměrné tepelné zatížení výměníku způsobit jeho mechanické poškození [2].

3.2.3 Zanášení tuhnutím tekutiny

K tuhnutí proudící tekutiny dochází, když teplota teplosměnné plochy klesne pod bod tuhnutí některé složky tekutiny. Tato část tekutiny pak na chladném povrchu vytváří pevnou usazeninu, která brání účinnému přenosu tepla. Tuhnutí kapaliny se podobá krystalizaci, až na transport částic k povrchu, ke kterému u tuhnutí kapaliny nedochází, protože částice se už na povrchu vyskytují [2]. Typickými příklady zanášení tuhnutím je usazování vosků z ropy na stěnách výměníku tepla nebo tvorba ledu na površích výměníku při výrobě chlazené vody [15].

3.2.4 Zanášení kvůli korozi

Při tomto typu zanášení reaguje povrch výměníku s proudící tekutinou a koroduje [12].Produkty této chemické reakce můžou zanášet teplosměnné povrchy nebo dochází k zanášení dalších součástí ve směru proudění [12]. Korozní zanášení se projevuje zvýšenou drsností povrchu, který podporuje tvorbu usazenin jinými mechanismy zanášení [13].

Nejčastější korozní reakcí je koroze železa, která vzniká reakcí železa, kyslíku a vody a lze ji popsat chemickou reakcí (3.3) [2]:

$$4Fe + 3O_2 + 6H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 \tag{3.3}$$

Koroze povrchů je v procesních zařízeních neustále přítomný problém. Ochrana proti korozi může být přirozeně poskytnuta výskytem oxidů kovů na povrchu, ale při jejich odstranění může dojít k závažnému ovlivnění materiálu pod povrchem. Volbou vhodného materiálu je možné se korozi vyhnout úplně, bohužel cena těchto materiálů často převažuje benefity, proto je třeba zjistit, jestli se použití korozivzdorných materiálů vyplatí (pomocí technickoekonomické analýzy). [2]

3.2.5 Chemické zanášení

Chemické reakce, které způsobují chemické zanášení, buď vytváří nános přímo na povrchu výměníku, nebo vytváří v kapalině zárodky nánosu, které jsou následně na povrch přeneseny. Vlastnosti nánosu samotného se pak obvykle liší v jednotlivých vrstvách kvůli různým teplotám u teplosměnného povrchu a na poslední vrstvě. [2]

Tyto chemické reakce můžou probíhat ve výměníku s i bez zapojení povrchů teplosměnných ploch, které se někdy do reakcí zapojují jako katalyzátory, nebo naopak snižují až potlačují chemickou reakci. Chemické zanášení je často spojené s organickými látkami, nečistoty ale mohou obsahovat i velká množství látek anorganických, které podporují další reakce a další zdroje nánosů, jako jsou soli nebo korozní produkty v tekutině. Chemické zanášení se objevuje v rafineriích, petrochemickém a potravinářském průmyslu. [2]

3.2.6 Biologické zanášení

Biologické zanášení je způsobeno usazováním a růstem mikroorganismů (např. řas, bakterií) a makroorganismů (mořských řas, mlžů) na teplosměnných površích [15]. Mikrobiální znečištění vždy předchází znečištění makroorganismy [2]. Mikroorganismy vytvářejí na površích ve výměníku ochranný biofilm (tzv. sliz), který následně slouží jako živiny a přilnavá vrstva pro další mikro – a makroorganismy a dochází tak k dalšímu růstu nánosu [2].

Tepelná vodivost vrstvy vytvořené zanášením je velmi nízká, což omezuje přenos tepla ve výměníku. Nárůstem organismů může dojít až k částečnému ucpání průtokových cest a zvýšení rychlosti a tlakové ztráty ve výměníku [15]. Vývoj a intenzita biologického zanášení jsou silně závislé na podmínkách procesu, zejména na rychlosti proudění, teplotě, smykovém napětí u stěny a koncentraci mikroorganismů ve vodě [15]. Tento typ zanášení pak nejen snižuje účinnost přenosu tepla, ale často také podporuje vznik dalších forem zanášení. Lepivá povaha biologické vrstvy totiž zvyšuje adhezi suspendovaných částic i chemických sloučenin, a tím urychluje např. krystalizační nebo korozní zanášení [2]. Biologické nánosy jsou časté při použití neošetřené vody z moří, řek, jezer nebo jiných zásobáren vody např. v chladicích systémech elektráren [2].

3.3 Proudění tekutin

Proudění tekutin má významný vliv na účinnost přenosu tepla a funkčnost výměníku tepla, ale i na zanášení teplosměnných ploch. Zvláště přenos zanášivých látek proudem tekutiny ovlivňuje míru hromadění nečistot. Tyto interakce mezi prouděním a přenosem hmoty, které pak ovlivňují tvorbu nánosů zanášejících částic na teplosměnných plochách výměníku, jsou velmi komplexní a obtížné na přesné popsání. [2]

Hustota (ρ) a viskozita (μ) jsou dvě klíčové fyzikální vlastnosti tekutin, které zásadně ovlivňují jejich proudění. Viskozita kapaliny je mírou jejího odporu vůči proudění a popisuje vnitřní tření pohybující se tekutiny; hustota kapaliny ovlivňuje její setrvačnost a hydrostatické vlastnosti. Aby se tekutina mohla pohybovat musí na ni působit smyková síla τ, která je dána vztahem (3.4).

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dx} \tag{3.4}$$

μ dynamická viskozita

$\frac{dv}{dx}$ rychlostní gradient (změna velikosti rychlosti v závislosti na vzdálenosti od stěny)

Tento vztah vyjadřuje Newtonův zákon viskozity, který platí pro tzv. newtonské kapaliny. U těchto kapalin je smykové napětí přímo úměrné rychlostnímu gradientu.

Tekutina může proudit dvěma způsoby, laminárně a turbulentně. Laminární proudění tekutin je uspořádané a částice tekutiny se při něm pohybují ve vrstvách, které se spolu nemísí. Naopak při turbulentním proudění dochází k nepravidelnému pohybu částic a jejich intenzivnímu mísení. O jaký typ proudění se jedná můžeme zjistit pomocí Reynoldsova čísla *Re,* které je pro proudění v trubce definováno vztahem (3.5).

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} \tag{3.5}$$

D vnitřní průměr trubky

ρ hustota tekutiny

v rychlost proudění

Re v mezitrubkovém prostoru (tj. uvnitř samotného výměníku) je podle [16] definováno rovnicí (3.6), která vychází z podobnosti proudění obtékajícího kolem jedné trubky.

$$Re = \frac{Dv_{max}\rho}{\mu} \tag{3.6}$$

v_{max} maximální rychlost ve výměníku

D vnější průměr obtékané trubky

Preferovaným typem proudění ve výměnících tepla je turbulentní proudění, protože zajišťuje intenzivnější přenos tepla a snižuje riziko usazování. Z hlediska hydrodynamiky je však turbulence zároveň složitější na popis a výpočet, a proto představuje výzvu při analýze proudění. Vznik turbulence závisí na poměru setrvačných a viskózních sil, které na tekutinu působí, což lze vyjádřit zmíněným *Re* (3.5).V trubce s kruhovým průřezem dochází k přechodu z laminárního do turbulentního proudění přibližně při hodnotě Re ≈ 2300. Proudění v rozmezí *Re* ≈ 2300–4000 se označuje jako přechodové (nestabilní proudění, kdy se střídají laminární a turbulentní chování tekutiny). Plně vyvinuté turbulentní proudění pak nastává při hodnotách *Re* > 4000, kdy jsou vírové struktury ustálené a mísení tekutiny intenzivní. [17]

Turbulence se vyznačuje náhodnými změnami rychlostí v kapalině a vytvářením proudících vírů, které se mohou u proudění s vysokým *Re* vyskytovat ve velkém rozsahu velikostí, tzn. že při turbulentním proudění i za ustálených podmínek nezůstávají hodnoty rychlosti, tlaku ani dalších parametrů stejné. Vznikají také tzv. koherentní struktury turbulentních vírů, u kterých můžeme pozorovat jistou uspořádanost, která vzniká z nestabilit v proudění. Tyto koherentní struktury jsou však těžké na pozorování, protože obsahují jen přibližně 10 % energie turbulence. Uvádí se však, že velká většina celkového přenosu vlastností proudění, energie, hybnosti nebo hmoty je způsobena právě koherentními strukturami. [17]

Matematické modelování turbulence je složité a není možné turbulentní proudění popsat zcela přesně, proto se využívají přibližující modely (dále popsány v kapitole 4.2). [17]

3.4 Přenos hmoty

Přenosem hmoty je označován přesun zanášivých částic z proudu na povrch. U tekutiny, která je v klidu nebo proudí laminárně, dochází k náhodnému neboli Brownovu pohybu. V turbulentním proudění je Brownův pohyb nahrazen „vírovou difuzí“, která je způsobena neuspořádaným pohybem částic. Rychlost difuze N_A při turbulentním proudění je dle [2] popsána rovnicí (3.7):

$$N_A = -(D + E_D) \cdot \frac{dc}{dx} \tag{3.7}$$

D difuzivita látky v tekutině

c koncentrace látky ve vzdálenosti x od povrchu

E_D vírová difuze

3.5 Výpočet přenosu tepla při zanášení

Při výpočtu tepelného výkonu výměníku se zanášení zohledňuje např. součinitelem zanášení ve formě tepelného výkonu R_f [K·m^2·W^{-1}]. Přenášený výkon výměníku $\dot{Q}$ lze popsat rovnicí (3.8) [10]. Součinitel prostupu tepla trubkových výměníků k, který zohledňuje zanášení teplosměnných ploch, je dle např. [10] dán vztahem (3.9):

$$\dot{Q} = A \cdot k \cdot \Delta\overline{T} \tag{3.8}$$

A plocha výměny tepla

ΔT střední teplotní rozdíl

$$\mathrm{k} = \frac{1}{\frac{\mathrm{d}_2}{\mathrm{d}_1} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \mathrm{R}_{f1}\right) + \frac{\mathrm{d}_2}{2\,\lambda_\mathrm{t}} \cdot \ln\frac{\mathrm{d}_2}{\mathrm{d}_1} + \left(\frac{1}{\alpha_2} + \mathrm{R}_{f2}\right)} \tag{3.9}$$

λ_t tepelná vodivost materiálu trubek

d_1, d_2 vnitřní (1) a vnější (2) průměr trubek

$R_{f1,2}$ součinitele zanášení v trubkovém (1) a mezitrubkovém (2) prostoru

3.6 Příklady zanášení v průmyslu

Zanášení výměníků tepla je problémem velkého množství průmyslových odvětví. V Tab. 3.1 jsou uvedeny příklady typů zanášení a odhad závažnosti problému, jaký dle [13] způsobují v daných průmyslových odvětvích. Autoři tohoto přehledu však blíže nespecifikují procesy, u nichž jsou odhadovány různé velikosti problémů způsobených zanášením.

Tab. 3.1 – Zanášení tepelných výměníků v průmyslu a hodnocení závažnosti dle [13]

Odvětví průmyslu	Typ zanášení	Velikost problému
Potraviny a obdobné produkty	Chemické	Velký
	Krystalizační	Velký
	Biologické	Střední
	Partikulární	Malý / Velký
	Korozní	Malý
Textilní produkty	Partikulární	-
	Biologické	-
Dřevěné a papírové výrobky	Krystalizační	Velký
	Partikulární	Malý
	Biologické	Malý
	Chemické	Malý
	Korozní	Střední
Chemické a související výrobky	Krystalizační	Střední
	Partikulární	Malý / Střední
	Biologické	Střední
	Chemické	Malý / Velký
	Korozní	Střední
Ropné rafinerie	Chemické	Velký
	Krystalizační	Střední
	Partikulární	Malý / Střední
	Biologické	Střední
	Korozní	Střední
Sklo, beton	Partikulární	Malý / Velký
Výroba elektrické energie	Biologické	Velký
	Krystalizační	Malý
	Partikulární	Velký
	Korozní	Velký
	Biologické	Střední

3.7 Dopady zanášení

Světová spotřeba energie je velká a stále se zvětšuje, přičemž na její výrobu jsou často používána fosilní paliva, uhlí, zemní plyn nebo ropné výrobky. Teplo, které se vytváří při technologických procesech (včetně spalování těchto paliv), se pak využívá v sítích tepelných výměníků, u kterých často dochází k zanášení [2].

Zanešené teplosměnné plochy snižují účinnost tepelných výměníků a při závažném znečištění může docházet až ke ztrátě funkčnosti či dokonce poškození zařízení [1]. Větší znečištění obvykle vede ke zvýšení tlakové ztráty výměníku, což nepříznivě ovlivňuje další členy provozní linky (ventilátory, čerpadla apod.). Snížená efektivita výměníku také zvyšuje spotřebu paliva, čímž se zvedají provozní náklady a má negativní dopad i na životní prostředí [2].

Při návrhu tepelného výměníku je proto nutné zohlednit i zanášení. Aby se kompenzovalo snížení účinnosti tepelného přenosu během kontinuálního provozu, je doporučováno zvětšit teplosměnnou plochu. [5]

Tlaková ztráta vzniká ve výměníku v důsledku odporu kladenému proudícímu médiu, kdy tento odpor je způsoben třením mezi tekutinou a stěnami, případně překážkami (prvky) v potrubí (tzv. místní ztráty). Usazeniny vytvořené zanášením způsobují snížení průměru trubky (a tedy nárůst rychlosti proudění v tomto místě) a zároveň zvyšují drsnost povrchu, čímž zvyšují odpor proudění a vedou k nárůstu tlakové ztráty [12]. Její zvýšení pak vede ke zvýšení elektrické spotřeby čerpadla nebo ventilátoru, který proudící médium pohání, a může docházet také k provozní nestabilitě. Odstávky (plánované i mimořádné) výměníků jsou častěji způsobeny právě příliš vysokou tlakovou ztrátou spíše než kvůli sníženému přestupu tepla [13].

Zanášení výměníků má negativní dopady na životní prostředí především kvůli snížení účinnosti přenosu tepla ve výměníku, přičemž kompenzace tohoto nedostatečného výkonu vede k vyšší spotřebě paliva, resp. energie. Největší část skleníkových plynů (zejména CO_2) vzniká právě kvůli spalování fosilních paliv pro transformaci energie a pro potřeby tepla v průmyslu, jedná se zejména o provozy elektráren, chemické a petrochemické závody. Např. v petrochemických závodech musí být ropa nejdříve předehřáta v tepelných výměnících, ve kterých často dochází k zanášení právě surovou ropou nebo ropnými produkty, přičemž [18] uvádí, že zanášení představuje asi 2,5% nárůst emisí CO_2 ročně. Tyto emise přispívají k urychlení klimatické změny a zhoršování kvality ovzduší.

Chemické látky, které se používají při čištění výměníků, mohou mít také významné negativní dopady, a vyžadují tedy speciální nakládání při likvidaci. Např. v chladičích, které používají vodu, je častým problémem biologické zanášení, jehož běžným preventivním prostředkem je přidání chemických látek. To však vede k produkci odpadních vod, které mohou kontaminovat vodní toky a půdu.

Ekonomické dopady zanášení tepelných výměníků jsou významné a zahrnují zvýšené náklady na energie, na údržbu, častější odstávky zařízení a v extrémních případech i nutnost výměny poškozených komponent. Snížení účinnosti přenosu tepla vede k potřebě dodat více energie k dosažení požadovaného výkonu, to zvyšuje provozní náklady. Studie ukazují, že i relativně tenká vrstva usazenin (např. 0,6 mm) může způsobit až 40% nárůst spotřeby paliva u parního kotle [19]. Pravidelné čištění výměníku je významnou položkou v rozpočtu na údržbu. Zanášení může za čas vést i k potřebě výměny zařízení (např u předohřevných systémů v ropném průmyslu) [19]. Celkově se odhaduje, že ekonomické důsledky zanášení, náklady na údržbu a ztráty produkce během odstávek mohou ve vyspělých průmyslových zemích dosahovat až 0,25 % HDP [19].

Efektivní prevence a řízení zanášení tedy nejsou pouze ekonomickým, ale i ekologickým zájmem, protože vedou ke snížení emisí, spotřeby surovin i zatížení životního prostředí.

3.8 Metody prevence a čištění

Probrané dopady zanášení jsou problémem, který se v praxi řeší řadou preventivních opatření a pravidelným čištěním výměníků [2]. Preventivní opatření zahrnují zejména vhodný návrh konstrukce výměníku a „online“ opatření, mezi které lze zařadit např. chemické inhibitory. Nutno však poznamenat, že zanášení nelze zcela eliminovat; teplosměnné plochy budou znečištěny i přes snahu tomuto procesu zabránit. Pravidelné čištění je proto velice důležité pro udržení efektivity přeměny tepla. Efektivní prevence a čistící metody jsou velmi důležité avýběr správného výměníku a vhodných čistících metod závisí na celé řadě kritérií – technických (např. dominantním typu zanášení, závažnosti zanášení, intervalu mezi potřebou čištění) i ekonomických (ceně vlastního výměníku, ale i ceně preventivních opatření a čištění) [20].

3.8.1 Metody zmírnění zanášení

Metody prevence zanášení lze rozdělit do dvou hlavních kategorií: (i) zmírnění prostřednictvím konstrukčního návrhu výměníku a (ii) „on-line“ prevenční metody, tedy takové metody, které se aplikují během provozu zařízení. Každý z těchto přístupů má své specifické výhody i omezení a volba konkrétní metody závisí na podmínkách provozu, typu média i přístupnosti zařízení pro údržbu. Podle [20] patří mezi hlavní návrhová opatření:

- výběr vhodného typu a geometrie výměníku,
- konstrukce umožňující lehký přístup při čištění,
- omezení provozních podmínek, která k zanášení vedou,
- zajištění dostatečné rychlosti proudění.

Konstrukční prevence zahrnuje zejména volbu vhodného typu výměníku a jeho geometrie tak, aby přispívala k eliminaci provozních stavů podporujících zanášení a aby návrh umožňoval snadné čištění teplosměnných ploch. Tato opatření, která mohou významně snížit riziko vzniku usazenin, jsou součástí již počáteční fáze návrhu zařízení.

Optimalizace designu výměníku je jedním z nejúčinnějších způsobů, jak zmírnit jeho zanášení. Kompaktní výměníky (např. spirálové) vykazují v mnoha případech nižší míru zanášení díky vyšší turbulenci a rovnoměrnému rozložení proudu [20]. Dalším příkladem výměníku, jehož návrh je vhodný na zmírnění zanášení je výměník se škrábaným povrchem [20].

Příkladem vhodné volby geometrických parametrů, která přispívá ke snížení zanášení u trubkových výměníků, může být zmenšení podélné rozteče trubek v trubkovém svazku nebo nahrazení kruhových trubek trubkami eliptického průřezu. Obě tyto úpravy vedou ke zvýšení rychlosti proudění v mezitrubkovém prostoru a zlepšení proudových poměrů, čímž dochází ke snížení náchylnosti k tvorbě usazenin [21].

Online metody prevence zanášení představují techniky, které snižují rychlost tvorby usazenin během provozu výměníku, a jak uvádí [20], dělí se do několika podkategorií:

- změny provozních podmínek,
- filtrace proudící tekutiny,
- chemické inhibitory,
- mechanické metody,
- fyzikální metody zmírnění.

Mezi metody prevence pomocí změny provozních podmínek řadí např. změny rychlosti a obrácení směru proudění, kdy krátkodobé změny mohou snížit tvorbu usazenin, které jsou slabě přilnavé. Naopak filtrace tekutiny je aplikována před vstupem do výměníku; příkladem je odstranění sodíku a síry z paliv před jejich spalováním. Příkladem změny provozních podmínek může být i tepelný šok, tj. krátkodobé zahřátí nebo ochlazení povrchů, které může vést k rozpadu usazenin. [20]

Dalším způsobem zmírnění zanášení je používání chemických inhibitorů. Ty představují široce používaný nástroj pro zmírnění zanášení v průmyslových výměnících tepla, zejména v systémech s vodou coby pracovním médiem. Mezi nejčastěji používané typy patří sekvestrační činidla (např. EDTA), práhové inhibitory (např. polyfosfáty a polyfosfonáty), modifikátory krystalů (např. polykarboxylové kyseliny) a dispergátory. Tyto látky působí různými mechanismy – od zabránění tvorby krystalických jader a narušování růstu krystalů až po rozptylování částic, které by jinak sedimentovaly na teplosměnné ploše. Účinnost chemické prevence však závisí na konkrétních podmínkách, např. na tvrdosti vody, jejím pH a typu usazenin. [12]

Použití technik mechanické prevence závisí na typu zanášení a jeho vlastnostech. Mechanická prevence může vést ke snížení doby odstávek na údržbu a efektivnějšímu provozu zařízení, ale je třeba zvážit investiční a provozní náklady, které přichází se zařízeními používanými pro mechanickou prevenci. Příklady mechanické prevence zanášení při chodu jsou čistící projektily (projektily jsou prohnány trubkami výměníku a odstraňují nečistoty na površích) a trubkové vestavky (zvyšují efektivitu přestupu tepla a mohou snižovat zanášení). Dalšími příklady jsou mechanické vibrace teplosměnných povrchů nebo použití materiálů, které snižují přilnavost povrchů. [20]

Fyzikální metody zmírnění zanášení se snaží omezit zanášení bez změny konstrukce výměníku, jeho provozu nebo použití chemických látek, a to úpravou vzájemného působení teplosměnných povrchů s částicemi tvořícími usazeniny. Mezi fyzikální metody patří zejména použití ultrazvuku a elektromagnetických polí, ale také úprava povrchu povlakováním. Ultrazvuk narušuje vrstvy usazenin mechanickými vibracemi a brání jejich přilnutí k povrchu, zatímco elektromagnetická pole ovlivňují ionty v kapalině a zpomalují tvorbu krystalických struktur. [20]

3.8.2 Čištění tepelných výměníků

U tepelných výměníků pracujících v zanášivých podmínkách se pravidelnému čištění ani při používání metod pro zmírnění formování nánosů nelze vyhnout. Čištění může být provedeno při odstávce zařízení neboli „off-line“ pomocí tekutin, chemických látek nebo mechanicky. Čištění výměníku může také probíhat přímo při jeho používání neboli „on-line“. Nutno poznamenat, že „on-line“ čištění může zvýšit dobu mezi odstávkami výměníku, ale stejně jako u metody prevence je třeba zvážit investiční a provozní náklady technologie potřebné k čištění. [20]

Vysokotlaké tryskání vodou nebo párou může být účinným způsobem čištění povrchů. U depozitů s velkou odolností se do vody nebo vzduchu v trysce můžou přidat také abrazivní částice (např. písek) nebo chemické látky, které pomáhají s čištěním. Tryskání je často časově náročné. [20]

Mechanické čištění je velice běžné – k odstranění usazenin v trubkách se používají například gumové projektily nebo kovové škrabky [20]. Trubkové vrtání je jedním ze způsobů odstraňování odolných nánosů z trubkového prostoru výměníku. Můžou být také použity čisticí projektily [2].

Chemické čištění je rychlé, nedochází k mechanickému poškození povrchů a velkou výhodou je, že lze čistit i pro člověka nedosažitelné prostory výměníku. Také je méně náročné na pracovní sílu než čištění mechanické. Čisticí látky jsou však často nebezpečné pro zdraví a životní prostředí, případně může dojít k reakcím s povrchovými vrstvami výměníku a jejich poškození. [20]

4 Simulace proudění pomocí CFD

Pro zkoumání chování tekutin při řešení praktických problémů je stále nejspolehlivější experimentální zkoumání (laboratorní či provozní experimenty), tento přístup ale může být velice nákladný a zároveň je limitován i obtížnou měřitelností některých parametrů. Jako moderní alternativa a doplněk k experimentálním metodám se proto často používají metody *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD kombinuje principy mechaniky tekutin, numerické matematiky a výpočetní techniky. Jedná se o moderní nástroj pro analýzu a simulaci proudění tekutin, přenosu tepla a hmoty, který nachází uplatnění v široké škále oborů od aerodynamiky a automobilového průmyslu až po chemické inženýrství, biomedicínu a environmentální vědy. [17]

Před použitím nástrojů CFD je nezbytné vyhodnotit jejich výhody a posoudit, zda jsou pro daný problém vhodné a efektivní. CFD poskytuje detailní informace o chování tekutin, zejména prostorové rozložení veličin spojených s prouděním, jako jsou např. teploty, tlaky, rychlosti a další parametry. Tyto hodnoty jsou důležité pro pochopení fyzikálních jevů, jako je přenos tepla, turbulence nebo směšování látek. Ve srovnání s experimentálními metodami je CFD obvykle levnější a rychlejší způsob získání potřebných dat, avšak výsledky nemusí být vždy stejně přesné. Přesto je v mnoha případech CFD jedinou možností, jak daný problém analyzovat, a výrazně tak urychluje výzkum nových technologií nebo optimalizaci stávajících řešení. [17]

CFD softwarové nástroje nabízí možnost provádět simulaci samotného 3D modelu, ale také existují možnosti zjednodušení modelovaných problémů. Zjednodušení modelů snižuje výpočetní náročnost, a tedy urychluje výpočty. Tato zjednodušení mohou zahrnovat geometrii (např. zanedbání některých tvarových prvků nebo omezení dimenze modelu), simulované podmínky a vlastnosti látek (např. izotermická úloha či ideální plyn), případně množství modelovaných jevů (např. zanedbání přenosu tepla či chemických reakcí).

Co se týče volby dimenze modelu, 3D simulace je vhodnější pro detailní analýzu proudění a jsou zde zohledněny parametry reálné konstrukce, které ovlivňují chování systému. 2D modely jsou proti tomu vhodné pro geometrii rotačně nebo zrcadlové symetrické, vytváří se pak např. model průřezu. Taková simulace je pak výpočetně mnohem jednodušší. Lze také modelovat subsystém, který umožňuje detailní analýzu omezené oblasti zájmu.

4.1 Základní rovnice popisující proudění vzduchu

CFD pracuje se třemi základními rovnicemi: Rovnicí kontinuity, která vyjadřuje zákon zachování hmoty, Navierovou-Stokesovou rovnicí, která popisuje zákon zachování hybnosti a rovnicí energie, vyjadřující zákon zachování energie. Ty jsou potom doplněny v rámci různých přístupů o modelování turbulence.

4.1.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity (4.1) říká, že hmotnostní tok tekutiny je ve všech místech toku stejný a vyjadřuje zákon zachování hmotnosti. [22]

$$\frac{\partial_\rho}{\partial_t} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) = 0 \tag{4.1}$$

Kde příslušné symboly mají následující význam

ρ	hustota tekutiny
t	čas
$\vec{v}$	vektor rychlosti tekutiny
∇	diferenciální operátor nabla

Pro konstantní hustotu (ideální 3D proudění) pak platí rovnice (4.2):

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \tag{4.2}$$

Tj. celkový tok tekutiny dovnitř a ven z každého malého objemu je rovnovážný.

4.1.2 Navier-Stokesova rovnice

Navier-Stokesovy rovnice (4.3) vyplívají z 2. Newtonova pohybového zákona a popisují pohyb tekutin. Rovnice přenosu hybnosti jsou často odvozeny pro infinitezimální kontrolní objem, pohybující se spolu s tekutinou. Rovnici pro nestlačitelné proudění newtonské tekutiny lze podle [22] zapsat ve vektorové formě takto:

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla\vec{v}\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2\vec{v} + \rho\vec{f} \tag{4.3}$$

p	tlak
f	objemové síly
μ	dynamická viskozita

Tato rovnice zohledňuje jak konvekční ($\vec{v} \cdot \nabla\vec{v}$), tak difuzní ($\mu\nabla^2\vec{v}$) členy, které ovlivňují proudění. $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$ popisuje změnu rychlosti za čas, $-\nabla p$ vyjadřuje tlakové síly a $\rho\vec{f}$ objemové síly.

4.1.3 Energetická rovnice

Energetická rovnice (4.4) vyjadřuje zákon zachování energie – ten říká, že změna energie v soustavě se rovná energii ze soustavy odebrané nebo energii přidané. Podle [23] se rovnice vyjádří takto:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{v}\tau) + S_E \tag{4.4}$$

h_{tot} celková entalpie

λ tepelná vodivost

T teplota

S_E externí zdroje energie

Člen $\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t}$ vyjadřuje nestacionární změnu energie, $-\frac{\partial p}{\partial t}$ popisuje změnu tlaku za čas, $\nabla\ (\rho \vec{v} h_{tot})$ pak konvekční přenos energie. Vedení tepla je popsáno členem $\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$ a $\nabla\ (\vec{v}\tau)$ popisuje vliv viskózních sil.

4.2 Metody popisu turbulence

Nejpřesnějším metodou, která nejlépe popisuje turbulenci v rámci CFD modelování, je *Direct Numerical Simulation* (DNS). Tato metoda je velice náročná na výpočet i pro dnešní výpočetní technologii, protože nevyužívá žádný model pro zjednodušení turbulence, ale řeší turbulenci ve všech měřítkách přímo pomocí Navier-Stokesových rovnic [24]. DNS je zatím nevyhovující pro běžné účely inženýrských úloh.

Metoda LES (*Large Eddy Simulation*) se používá, když je důležité popsat přechodné a turbulentní struktury proudění. Na rozdíl od jednodušších modelů (viz níže), kde je celá turbulentní struktura modelována statisticky, LES přímo simuluje větší turbulentní víry a pouze menší víry (které mají menší vliv na celkové proudění) jsou modelovány pomocí jednodušších modelů. Velmi přesný popis proudění a turbulence, který LES modely poskytují, znamená však i vyšší náročnost na přístrojové vybavení a výpočetní čas. [25]

Modely RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) jsou metody modelování turbulence, které jsou v CFD výpočtech často používané pro účely inženýrských úloh v oblasti konvektivního přenosu tepla a proudění, tedy i pro analýzu výměníků tepla či jejich dílčích částí. Metoda RANS pracuje se středními hodnotami veličin. V současnosti nejpoužívanější jsou dvou-rovnicové modely turbulence, které využívají dvě parciálně diferenciální rovnice. Jedna z těchto rovnic je většinou rovnice kinetické energie turbulence *k,* zatímco tvar druhé rovnice se liší podle zvoleného modelu. Nejčastěji používanými modely jsou:

- *k-ε* model – *ε* zde představuje disipaci (rozpad) kinetické energie turbulence;
- *k-ω* model – kde *ω* je měrná rychlost disipace kinetické energie. [17]

Model *k-ε* je použit i pro finální simulace, jejichž nastavení je popsáno v kapitole číslo 5.3.1.

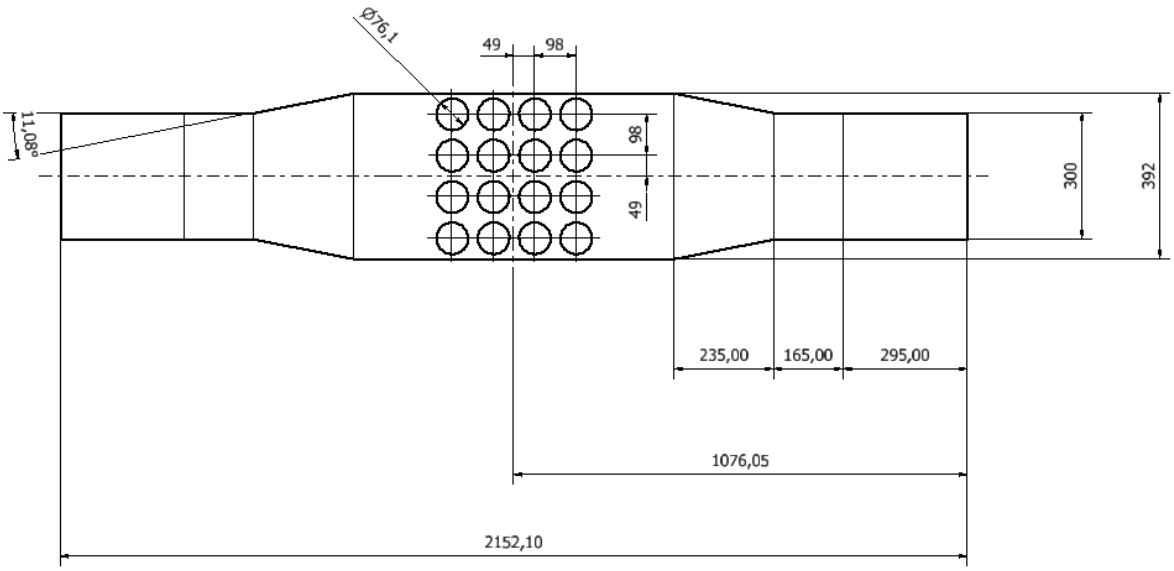
5 Tvorba CFD modelů

Tato kapitola je věnována vlastní tvorbě CFD modelů, které byly hlavním předmětem předložené bakalářské práce. Popis se věnuje tvorbě modelů, včetně přijatých zjednodušení, tvorbě výpočetní sítě a nastavení simulace ve zvoleném softwarovém nástroji. Dále jsou zde shrnuty okrajové podmínky simulovaných úloh, které vyplynuly z obdržených laboratorních a provozních dat. Část kapitoly je proto věnována také popisu zkoušek experimentálního výměníku.

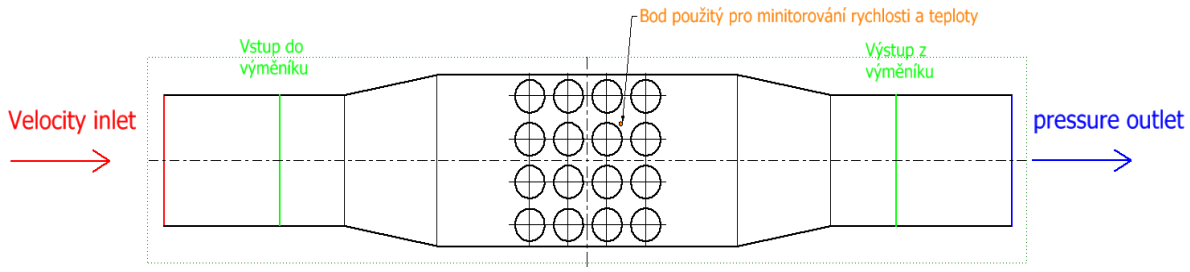
5.1 Model pro CFD analýzu proudění

Vytvořený model byl ve 2D, tedy jako zjednodušený model; důvodem je snížení výpočetní náročnosti modelu. Důležitým omezením je limit studentské licence použitého softwaru (byl ANSYS Fluent [ANSYS, Inc., Canonsburg, USA]), přičemž toto omezení se týká především velikosti sítě (maximálně 510 000 buněk) a omezení pro výpočty na více jádrech CPU. Zároveň lze konstatovat, že pro základní zobrazení rychlostního pole je díky tvaru výměníku možnost 2D úlohy přijatelná.

Model pro analýzu rychlostního pole byl vytvořen pomocí programu SpaceClaim (ANSYS, Inc., Canonsburg, USA) Model je vytvořen ve 2D souřadnicovém systému a zobrazená rovina ukazuje řez středem experimentálního výměníku kolmý na soubor trubek, jak je zobrazeno na Obr. 5.1 – Kótovaná geometrie 2D modelu. V modelu je zobrazena celá délka tepelného výměníku i s prodloužením, které představují přívodní a odvodní potrubí z výměníku a geometrie je ukončena na místech, kde docházelo k měření tlakové ztráty výměníku. Obr. 5.2 pak ukazuje nastavení okrajových podmínek vstupu a výstupu úlohy, vstup a výstup samotného výměníku tepla a místa použitá pro monitorování výpočtů v CFD.



Obr. 5.1 – Kótovaná geometrie 2D modelu



Obr. 5.2 – Geometrie 2D modelu s důležitými místy pro nastavení a monitorování simulace

5.1.1 Tvorba výpočetní sítě

Kvalitní výpočtová síť je důležitým prvkem CFD modelování, protože množství a kvalita buněk vytvořené sítě přímo ovlivňuje kvalitu dosažených výsledků a výpočetní náročnost simulace. Tvar prvků, z něhož posouzení jejich kvality vychází, je po vygenerování výpočetní sítě vyhodnocen samotným programem, který prvky vytváří, porovnáním s ideálním tvarem příslušného prvku.

V případě 2D sítě je doporučeným tvarem čtyřúhelník (ideálním tvarem pro hodnocení je tedy čtverec), popř. trojúhelník (rovnostranný trojúhelník), a program hodnotí jejich šikmost (neboli *skewness*) nebo *orthogonal quality*. Obě možnosti vyjadřují, jak se vygenerovaná buňka blíží svou geometrií tvaru buňky ideální. Hodnota je určena na základě odchylky od normovaného rovnostranného úhlu u určování *skewness*, resp. pomocí normálového vektoru buňky a jak kolmý je vůči vektorům spojujícím středy buněk u *orthogonal quality*. Následně jsou přiřazeny hodnoty od 0 do 1 podle jejich kvality, kde 0 je nejlepší pro hodnocení kvality pomocí *skewness* a 1 nejlepší pro hodnocení podle *orthogonal quality* [26]. Dle doporučení [26] by např. maximální *skewness* sítě pak měla být pod 0,9 a průměrná hodnota pod 0,4, aby byla kvalita sítě dostatečná pro následující výpočty. maximální *skewness* sítě pak měla být pod 0,9 a průměrná hodnota pod 0,4, aby byla kvalita sítě dostatečná pro následující výpočty. Pokřivené prvky mohou způsobovat chybné výsledky, a proto by se jejich výskyt ve vytvořené síť měl byl co nejmenší.

Aspect ratio je dalším hodnotícím kritériem, které porovnává nejdelší a nejkratší stranu. Ideální hodnota je 1 (např. u krychle), zatímco hodnota větší než 1 se objevuje u protáhlých nebo deformovaných buněk [26].

Zvláště důležité je vyhnout se deformovaným nebo příliš velkým buňkám v kritických místech geometrie, jako je v blízkosti stěn, okolo tvarových prvků, případně v místech, kde lze očekávat náhlé změny některých veličin. Co se týče vstupu a výstupu, úhel mezi čarami mřížky a okrajem výpočetní oblasti by měli být co nejbližší 90° [24]. Dále je třeba sledovat a pečlivě volit i podobnost velikostí sousedících buněk, neboť velké rozdíly mezi velikostmi buněk můžou také vést k chybám výpočtů [27].

Dalším z důležitých parametrů, které popisují charakteristiku výpočtové sítě, je bezrozměrné číslo y^+. Volba tohoto parametru je zásadní pro celkovou přesnost simulace a způsob modelování mezní vrstvy. Nastavení okrajových podmínek stěny závisí na velikosti první buňky ve vzdálenosti od stěny.

Podle [28] je hodnota y^+ určena pomocí rovnice (5.1):

$$y^+ = \frac{y \cdot u_T}{\mu} \tag{5.1}$$

y vzdálenost od stěny

u_T třecí rychlost

ν lokální kinematická viskozita

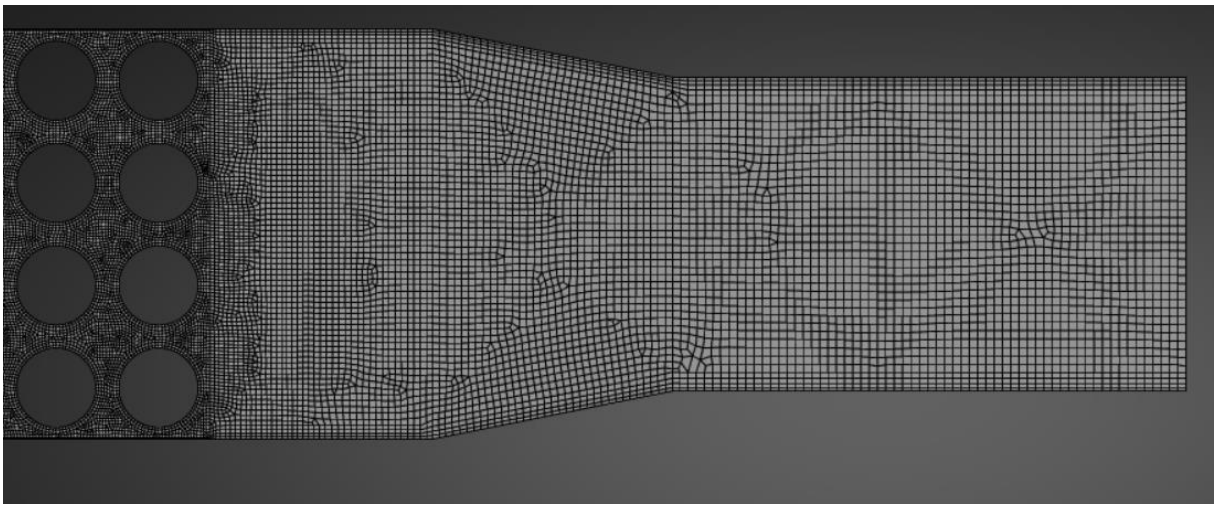
Upřednostňovaný způsob pro určení optimální velikosti sítě pro danou CFD simulaci spočívá v provedení testovacích simulací na různých konfiguracích sítě a porovnávání numerického řešení s experimentálními daty, což se označuje jako test nezávislosti výsledků simulace na velikosti výpočetní sítě (*grid independence test*) [28]. Pro tento test byly proto vytvořeny tři základní výpočetní sítě s průměrnými hodnotami $y^+ \approx \{1; 2{,}5; 30\}$.

V simulaci samotné se pak volí vhodná metoda modelování v blízkosti stěn (*near-wall region*). Tradičně se používají dva základní přístupy: použití stěnových funkcí (*wall function*) nebo detailní modelování celé vrstvy (*near wall modeling*). Stěnové funkce (např. *Non-Equilibrium Wall Function*) nahrazují přímé řešení viskózně ovlivněné oblasti mezi stěnou a turbulentním prouděním semi-empirickými vzorci. Tento přístup umožňuje použití hrubší sítě, neboť není třeba detailně řešit turbulentní pole až ke stěně. Tento přístup byl použit pro variantu sítě $y^+ \approx 30$. *Near wall modeling*, které modifikují turbulenční model tak, aby bylo možné vyřešit viskózně ovlivněnou oblast přímo, vyžaduje velmi jemnou síť hlavně u stěn (typicky $y^+ \approx 1$).

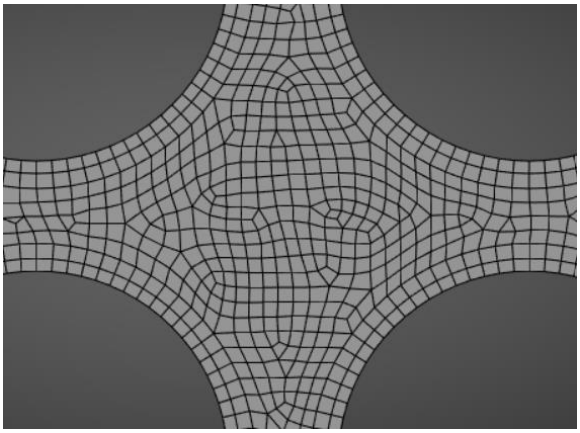
5.2 Vlastnosti vytvořené výpočetní sítě

Vygenerované výpočetní sítě byly navržena tak, aby se přizpůsobovaly náročnosti různých částí geometrie výměníku a předpokládané dynamice proudění v těchto částech. Od vstupní a výstupní oblasti směrem ke střední části s trubkami se každá vytvořená síť postupně zjemňuje. Postupné zjemňování je opodstatněno zvýšenou turbulencí a složitostí proudění v oblasti trubek. Jedna z vytvořených sítí i její proměnlivá hustota je zobrazena na Obr. 5.3

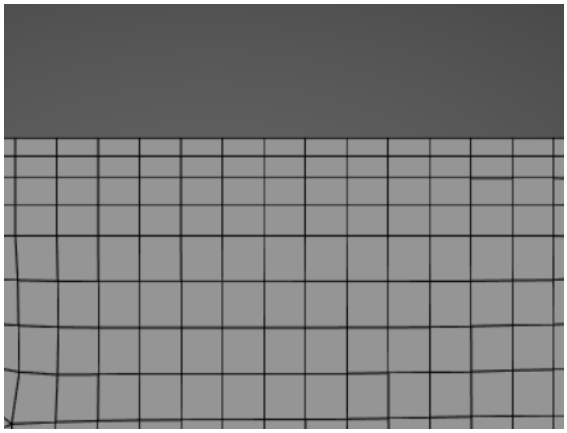
Obr. 5.4 a Obr. 5.5 zobrazují vytvořenou síť pro mesh s hodnotou $y^+ \approx 30$. Velikost buněk této výpočetní sítě se pohybuje od 8 mm v okrajových částech až po 3 mm v nejhustších částech mezi trubkami. Síť vytvořená na stěnách výměníku a trubek je modelována jako zahuštěná přechodová oblast (*inflation layer*) s cílovou (průměrnou) hodnotou y^+ přibližně 30. Obr. 5.4 a Obr. 5.5 zobrazují zhuštěnou oblast buněk vytvořenou pro trubky a stěny. Obr. 5.6 a Obr. 5.7ukazují *inflation layer* pro vytvořené sítě $y^+ \approx 1$. Z obrázků lze porovnat síť na stejných místech geometrie pro oba vytvořené druhy sítě.



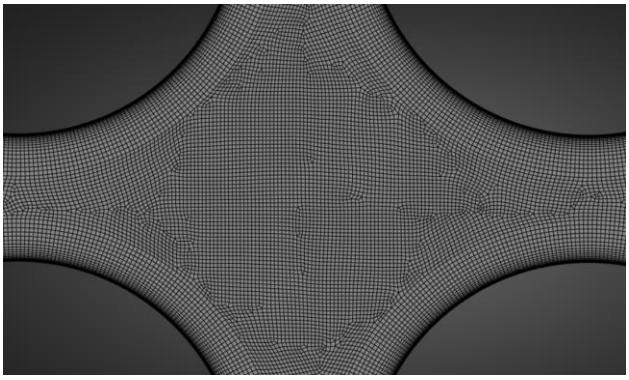
Obr. 5.3 – Výpočetní síť ($y^+ \approx 30$) s proměnlivou hustotou



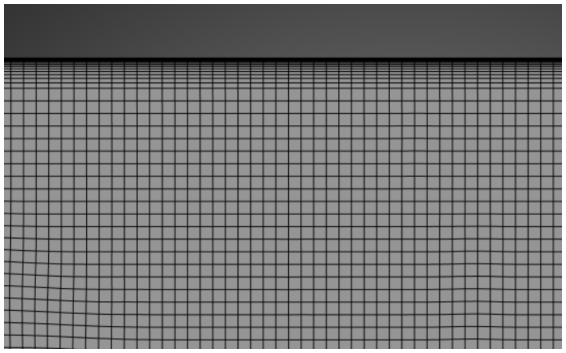
Obr. 5.4 – Okrajové vrstvy na trubkách $y^+ \approx 30$



Obr. 5.5 – Okrajové vrstvy na stěnách $y^+ \approx 30$



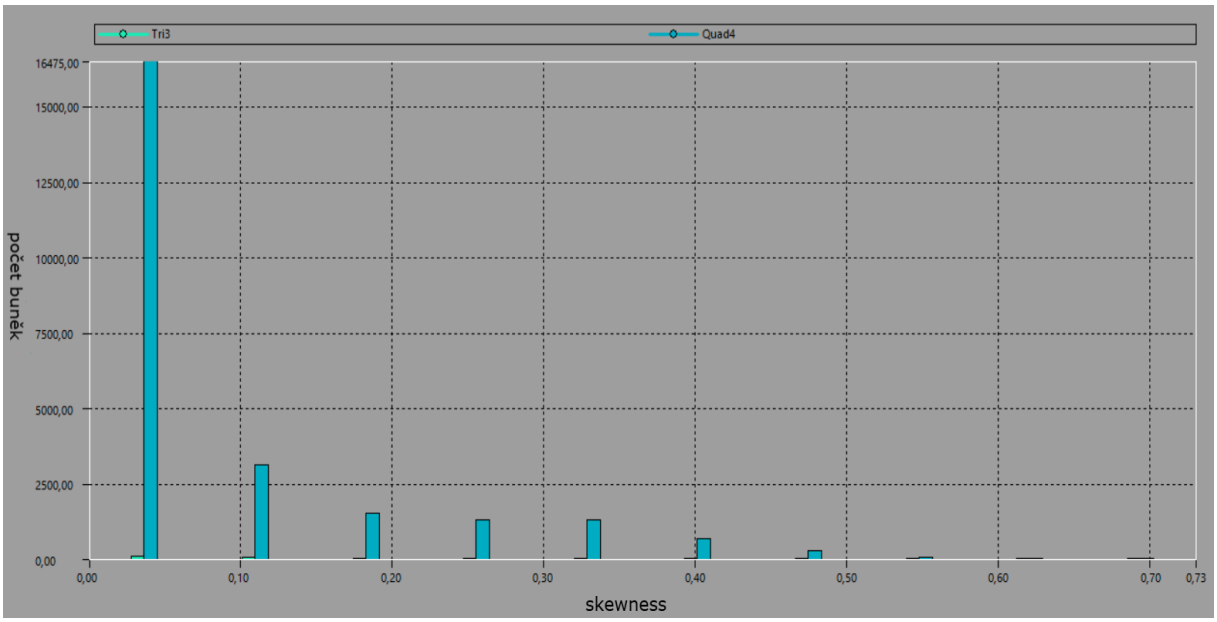
Obr. 5.6 – Okrajové vrstvy na trubkách $y^+ \approx 1$



Obr. 5.7 – Okrajové vrstvy na stěnách $y^+ \approx 1$

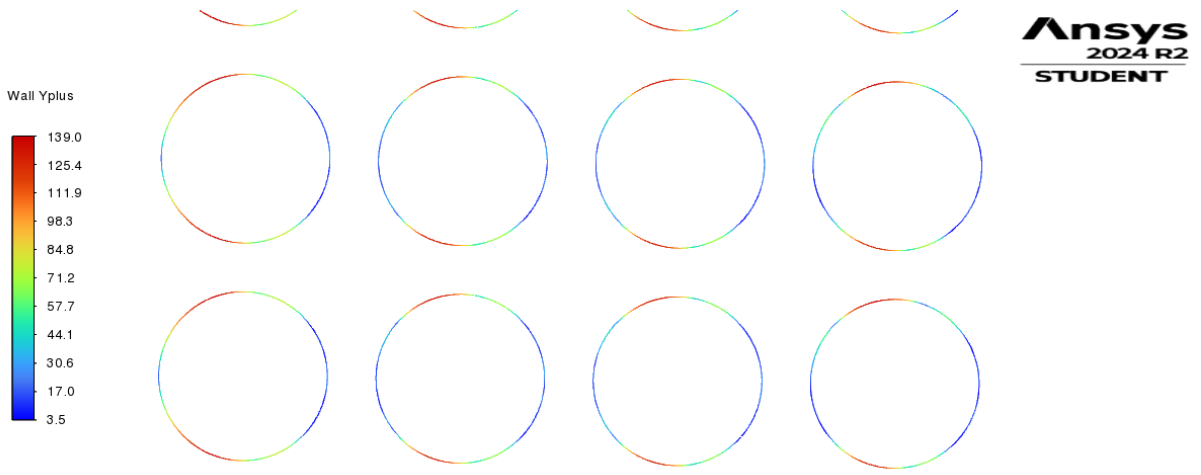
5.2.1 Zhodnocení kvality sítě

Prvním hodnotícím kritériem je *skewness*. Vyhodnocení na Obr. 5.8 ukazuje histogram, který byl získaný z aplikace Ansys Meshing (ANSYS, Inc., Canonsburg, USA). Maximální *Skewness* činila 0,73 a průměrnou hodnotou byla $8{,}5 \cdot 10^{-2}$. Tyto parametry říkají, že vygenerovaná síť je svou kvalitou dostačující pro další použití. Vyšší *skewness* se objevuje hlavně u buněk mezi trubkami, jak je vidět na obr. 4.4, která je způsobena právě geometrií trubek. Kvalita by mohla být upravena například zmenšením velikosti buněk v této oblasti. Maximální hodnotou *aspect ratia* byla 5,72 a průměrná hodnota činila 1,2.

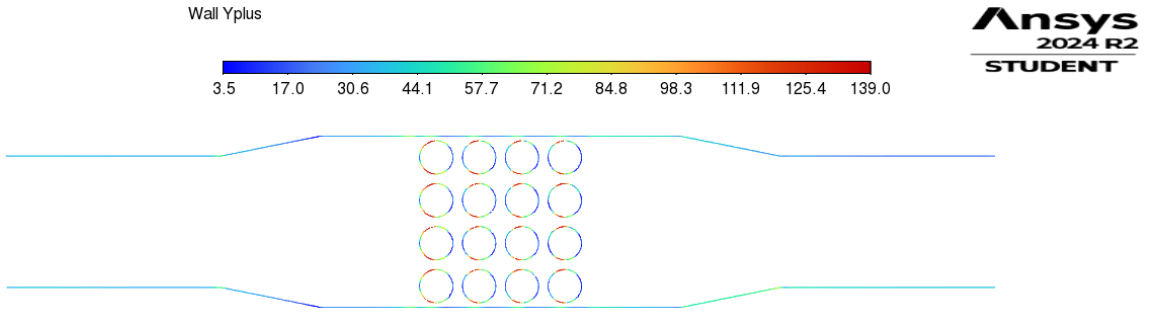


Obr. 5.8 – Zhodnocení kvality sítě ($y^+ \approx 30$) podle kritéria *skewness*

Výše popsaná vygenerovaná síť byla nazvána $y^+ \approx 30$, nicméně y^+ se pohybovaly mezi hodnotami 3,5 až 140. Největší rozdíly byly pozorovány na trubkách, které měly po celém obvodu stejné velikosti buněk, ale hodnota y^+ se kvůli změnám u_T po obvodu trubek pohybuje po celé škále velikostí, jak ukazuje obr. 4.9. Při generování nebylo možné dosáhnout úplného odstranění buněk s hodnotami $y^+ < 11{,}225$ (minimální hodnota doporučená pro použití stěnové funkce *Non-Equilibrium Wall Function*), protože by se kvalita sítě zmenšila pod přijatelnou mez. Výsledná síť $y^+ \approx 30$ byla proto vytvořena tak, aby podíl takto malých buněk nepřesáhl 5 %. Zobrazení y^+ na všech stěnách je zobrazeno na Obr. 5.10 a detail zaměřený na trubky je uveden na Obr. 5.9.



Obr. 5.9 – y^+ na trubkách



Obr. 5.10 – y^+ na stěnách

Síť $y^+ \approx 1$ se počtem buněk blíží 500 000 a kvalita sítě je podobná síti $y^+ \approx 30$, byl však pozorovaný větší rozdíl mezi tlakovou ztrátou zjištěnou simulací a měřením (u modelu *k-ε* o 51,9 %, při použití modelu *k-ω* o 118,2 %). Síť $y^+ = 2{,}5$ byla vytvořena s větší volností y^+ parametru a i přesto, že se nad hodnotu 5 (doporučená hranice použití modelu *k-ε enhanced wall treatment*) dostalo jen asi 2 % buněk, tak výpočet měl problém dosáhnout zkonvergovaného řešení. U této konfigurace nedošlo ke konvergenci škálovaných reziduí, která zůstávala prakticky beze změny po úvodním poklesu nad obecnou hranicí konvergence ($1 \cdot 10^{-3}$). Síť s $y^+ \approx 30$ byla zvolena jako výchozí kvůli nejbližší shodě (6,6 %) s experimentálně zjištěnou hodnotou 100,2 Pa (určenou podle provedených testů). Tab. 5.1 – Vlastnosti výpočetních sítí a zjištěná tlaková ztráta shrnuje parametry jednotlivých výpočetních sítí a zjištěné tlakové ztráty. Kromě nastavení, které používají model turbulence *k-ε*, byl vytvořen i výpočet s modelem *k-ω*. Podrobnosti tohoto nastavení jsou vysvětleny v kapitole číslo 6.2.

Tab. 5.1 – Vlastnosti výpočetních sítí a zjištěná tlaková ztráta

Průměrná y^+	Velikost výpočetní sítě	*Skewness* průměrná hodnota	*Skewness* nejvyšší hodnota	*Aspect ratio* průměrná hodnota	Tlaková ztráta [Pa]
1 (k-ε)	470 017	$4{,}29 \cdot 10^{-2}$	0,71	2,51	148,0
2,5 (k-ε)	113 440	$5{,}3 \cdot 10^{-2}$	0,6	3,55	152,1
30 (k-ε)	24 722	$8{,}53 \cdot 10^{-2}$	0,73	1,19	93,6
1 (k-ω)	470 017	$4{,}29 \cdot 10^{-2}$	0,71	2,51	218,6
Měření	–	–		–	100,2

K porovnání jednotlivých CFD modelů byla vypočtena relativní chyba tlakové ztráty v porovnání s referenční hodnotou tlakové ztráty naměřenou při laboratorním experimentu. Relativní chyba byla vypočítána jako rozdíl získané hodnoty ze simulace a referenční hodnoty podělený referenční hodnotou tlakové ztráty. Vztah (5.2)znázorňuje obecný výpočet relativní chyby, protože je použit i v dalších kapitolách.

$$\delta_{rel} = \frac{x_v - x_{ref}}{x_{ref}} \tag{5.2}$$

δ_{rel} relativní chyba

x_v hodnota získaná výpočtem

x_{ref} hodnota referenční

5.3 Laboratorní podmínky

Test byl zaměřen na proudění zanášivých částic v mezitrubkovém prostoru experimentálních zařízení. Nutno poznamenat, že provedení zkoušek proběhlo ještě před zapojením autora do výzkumně-vývojového projektu. Autorovi předložené bakalářské práce byla proto poskytnuta surová data ze všech měření pro jejich další zpracování a provedení detailních numerických analýz.

K laboratornímu testu byl použitý jemný materiál (dle laserové difrakce činila maximální velikost částic 10 µm, průměrná potom 2,215 µm) podobný uhličitanu vápenatému s koncentrací 997 mg/m^3. Lze tedy říci, že laboratorní test byl prováděn při relativně malé koncentraci cementárenského prášku na rozdíl od běžných hodnot dosahovaných v cementárenském provozu (viz podrobnosti provozního testu) kvůli množství dostupného materiálu pro testování. Tato testovaná koncentrace zanášivých částic by odpovídala spíše koncentracím vyskytujícím se při spalování tuhých paliv [29].

Test probíhal po dobu 3 h, než došlo k dosažení ustáleného stavu ve výměníku, kdy se stav systému se v čase již dál neměnil. V tomto případě byl ustálený stav určen podle tlakové ztráty. Test byl prováděn za průměrné teploty 26,2 °C, relativní vlhkosti 57,1 % a barometrického tlaku 986,1 hPa.

V Tab. 5.2 jsou uvedeny naměřené hodnoty hlavních sledovaných veličin. Rychlost na vstupu do potrubí popisuje, jakou rychlostí vzduch vstupuje do přívodního potrubí celé testovací sestavy skrze zmenšený průřez (viz Obr. 5.11), jehož nastavení odpovídalo 25 % průtočného průřezu potrubí DN315. Rychlost vypočtená a rychlost dle senzoru (TESTO440) odpovídají rychlosti vzduchu ve volném průtočném průřezu potrubí DN315. Po konzultaci problematiky měření rychlosti proudění plynů pomocí pitotovy trubice byla hodnota stanovená senzorem také zkontrolována výpočtem, který vycházel z naměřených hodnot diferenčních a statických tlaků podle vzorce (5.3). Relativní odchylka zjištěných rychlostí byla vypočtena pomocí vzorce (5.2). V nastavení simulací byla poté použita vypočtená rychlost. Jak je však patrné z Tab. 5.2, odchylky rychlostí jsou minimální.

$$\bar{v} = K \cdot \sqrt{2 \cdot R} \sqrt{\frac{T \cdot \Delta\bar{p}}{p \cdot M}} \tag{5.3}$$

$\bar{v}$	průměrná vypočtená rychlost
K	koeficient Prandtlovy trubice (zvolena hodnota 1)
R	molární plynová konstanta (8314,462 $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot kmol^{-1}$)
T	průměrná teplota vzdušiny
$\Delta\bar{p}$	průměrný diferenční tlak
p	absolutní statický tlak plynu
M	molární hmotnost plynu (29 $kg \cdot kmol^{-1}$)

Obr. 5.11 – Zúžení dávkovacího otvoru

Tab. 5.2 – Naměřené hodnoty laboratorního testu

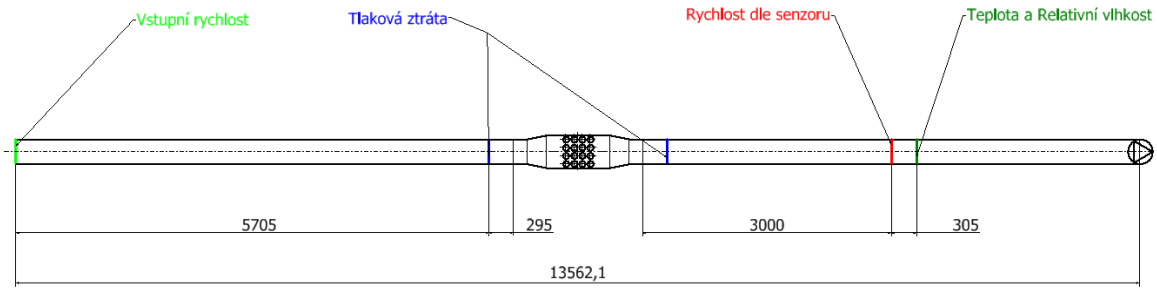
Čas odečtu	Rychlost na vstupu do potrubí [m/s]	Rychlost dle senzoru [m/s]	Rychlost vypočtená [m/s]	Rel. odchylka rychlostí [%]	Tlaková ztráta [Pa]
10:00	25,94	5,85	5,71	2,40	128
10:10	24,71	5,97	5,83	2,44	107
10:20	24,98	5,88	5,74	2,39	105
10:30	24,61	6,04	5,90	2,39	105
10:40	24,73	5,91	5,77	2,39	101
10:50	24,76	5,84	5,70	2,46	101
11:00	23,58	5,80	5,66	2,55	100
11:10	22,99	5,87	5,71	2,73	101
11:20	23,09	5,87	5,73	2,46	101
11:30	23,07	5,71	5,57	2,55	98
11:40	23,48	5,75	5,61	2,46	98
11:50	22,19	5,80	5,61	3,37	97
12:00	22,36	5,86	5,71	2,59	93
12:10	22,89	5,77	5,63	2,56	95
12:20	21,35	5,70	5,55	2,65	96
12:30	23,43	5,73	5,58	2,65	91
12:40	23,19	5,72	5,58	2,47	95
12:50	22,86	5,66	5,52	2,50	92
Průměry	**23,57**	**5,82**	**5,67**	**2,56**	**100,2**

V Tab. 5.3 jsou uvedeny měřící přístroje, které byli použity k měření. V tabulce je také uvedena varianta měření (laboratorní nebo provozní) a pro jaké veličiny byly přístroje použity. Schéma výměníku na Obr. 5.12 ukazuje, kde byly měřeny, jaké hodnoty během laboratorních zkoušek.

Tab. 5.3 – Seznam měřidel a přístrojů

Měřidlo	**Médium**	**Primární funkce**	**Varianta experimentu**
Dataloger MS6D	–	Časový záznam průběhů teplot	Provoz
Pole termočlánků K (MTC 11 – 61-600-500-11) ve svazku TESTERu	Spaliny / zanášivá vzdušina	Záznam teplotního pole trubkového svazku TESTERu a vybraných teplotních signálů z potrubí	Provoz
Vlhkostní sonda TESTO 440	Spaliny / zanášivá vzdušina	Měření teploty vstupního zanášivého proudu	Provoz Laboratoř
Termočlánek K	Spaliny / zanášivá vzdušina	Měření teploty výstupního zanášivého proudu	Provoz

Měřidlo	Médium	Primární funkce	Varianta experimentu
Termočlánek K	Spaliny / zanášivá vzdušina	Měření teploty výstupního zanášivého proudu po smíšení s hnacím proudem (za proudovým čerpadlem EJ01)	Provoz
Anemometr TESTO 445	Chladící vzduch	Měření teploty vstupujícího chladícího vzduchu	Provoz
Anemometr TESTO 445	Hnací vzduch	Měření teploty vstupujícího hnacího vzduchu	Laboratoř
Pitotova trubice TESTO 440	Spaliny / zanášivá vzdušina	Měření průtoku zanášivého proudu	Provoz Laboratoř
Anemometr TESTO 445	Chladící vzduch	Měření rychlosti toku (průtoku) chladícího vzduchu	Provoz
Anemometr TESTO 445	Hnací vzduch	Měření rychlosti toku (průtoku) hnacího vzduchu	Laboratoř
Diferenční tlakoměr TESTO 440 dP	Spaliny / zanášivá vzdušina	Měření a záznam tlakového rozdílu na trubkovém svazku TESTERu na zanášivé straně	Provoz Laboratoř
Vlhkostní sonda TESTO 440	Spaliny / zanášivá vzdušina	Měření vlhkosti a teploty zanášivého proudu	Provoz Laboratoř
Barometr BBP 3300	–	Měření atmosférického tlaku	Provoz Laboratoř



Obr. 5.12 – Zobrazení měřících míst při laboratorním testu

5.3.1 Nastavení výpočtu stacionární simulace

Simulace byla provedena ve stacionárním režimu, který u systémů se zanedbatelnou časovou změnou nabízí efektivní a jednoduché modelování. Zároveň byla uvažována adiabatická podmínka na stěnách, nedocházelo tedy k výměně tepla mezi stěnami a tekutinou.

Podle rovnice (3.5) bylo určeno Reynoldsovo číslo prodění vzduchu v přívodním potrubí $Re = 117280$ a hodnota Reynoldsova čísla ve výměníku podle (3.6) pak $Re = 64346$. Z toho vyplývá, že proudění v přívodové trubce i v samotném výměníku tepla bude turbulentní.

Použité řešiče a fyzikální modely

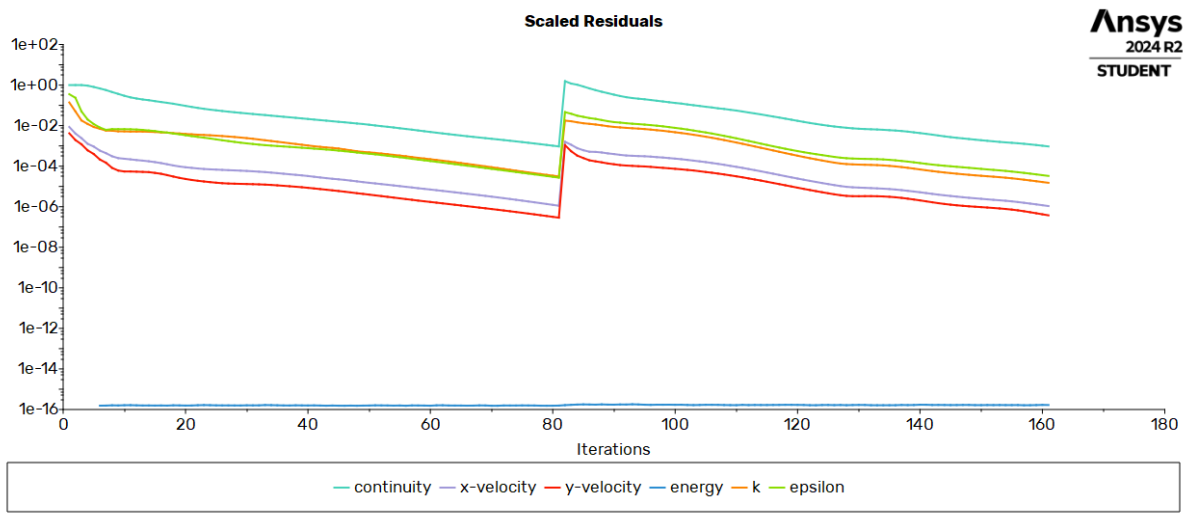
Pro výpočet byl zvolen tlakově založený řešič (*pressure-based solver, absolute velocity formulation*), který je vhodný pro nestlačitelné a částečně stlačitelné proudění. Turbulence byla popsána pomocí modelu *Realizable k-ε* se stěnovou funkcí *Non-Equilibrium Wall Function.* Nutno poznamenat, že úlohy s výpočetní sítí $y^+ \approx 1$, resp. 2,5 využívaly model *Realizable k-ε* v kombinaci s *enhanced wall treatment* (přístup vhodný pro detailní modelování mezní vrstvy). Výpočetní síť $y^+ \approx 1$ byla testována i pomocí modelu *k-ω* SST.

Okrajové podmínky

Vstup byl řešen jako *velocity inlet* se vstupní rychlostí 5,67 m/s a tlakem 98,61 kPa. Podmínka na výstupu byla formulována jako *pressure outlet* s absolutní hodnotou tlaku 98,1 kPa. Stěny byly nastaveny jako stacionární z oceli bez skluzu s drsností 6 µm.

Metody řešení

Výpočet byl prováděn se ve dvou krocích s mírně odlišným nastavením. Pro první fázi bylo zvoleno nastavení nižších diskretizačních řádů (*First Order*, resp. *First Order Upwind*), které vykazuje vyšší stabilitu výpočtu. Po dosažení konvergence první části výpočtu bylo nastavení upraveno na použití metod druhého řádu (*Second Order*, resp. *Second Order Upwind*) pro všechny rovnice – tlaku, hybnosti, kinetické energie turbulence, disipace turbulentní kinetické energie i energie. Pro provázání rovnic tlaku a rychlosti bylo použito schéma *Coupled*. V druhém kroku byl sledován výpočet také až k dosažení zkonvergovaného řešení. Základní kritérium konvergence, které bylo využito, byly hodnoty škálovaných reziduí tlaku, složek rychlosti a turbulentních veličin. Cílem byl jejich pokles pod hodnotu 10^{-3} a energie pod 10^{-6}. Průběh reziduí na Obr. 5.13 ukazuje průběh výpočtů prvního i druhého nastavení.

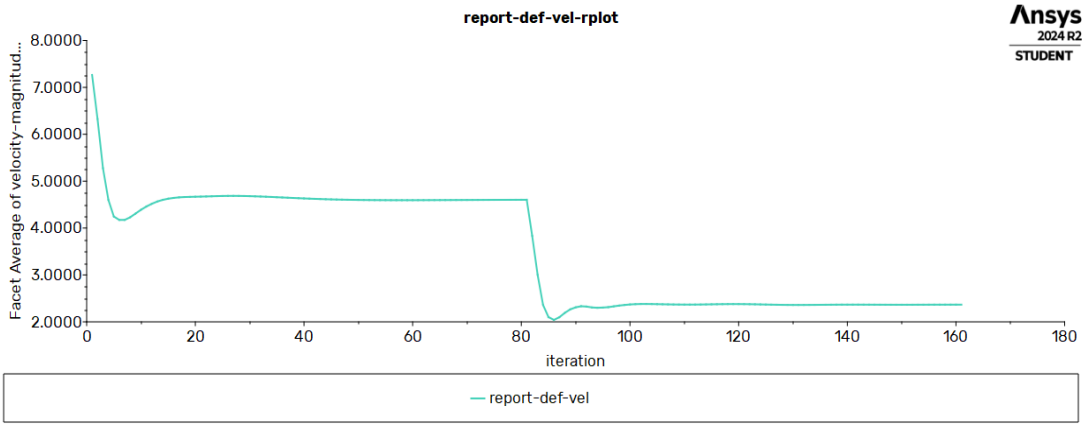


Obr. 5.13 – Průběh škálováných reziduí (výpočet *k-ε*, *Non-Equilibrium Wall Function*)

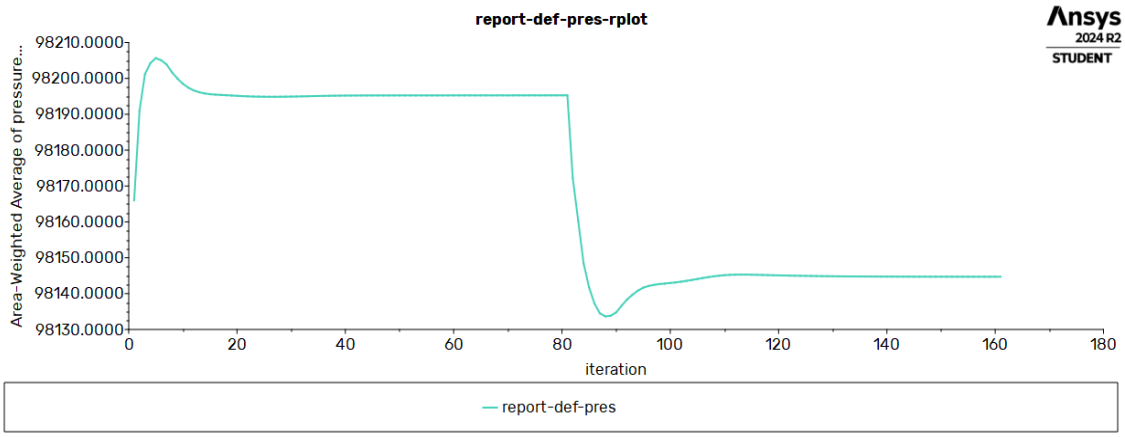
Monitory stacionární simulace

Při vyhodnocování stability a konvergence výsledku je důležité sledování i tzv. monitorů. Sledování veličin (např. teplota, rychlost, tlak a hmotnostní průtok) umožňuje kontrolovat, zda simulace směřuje k smysluplnému a stabilnímu řešení. Pokud sledované hodnoty výrazně kolísají může to znamenat nevyhovující nastavení výpočtu, špatnou kvalitu sítě nebo potřebu využít transientní úlohu (časově závislé řešení), naopak při ustálení hodnot lze předpokládat, že výpočty probíhají správně a předpoklad ustáleného stavu je vhodný pro danou úlohu.

Pro sledování vývoje výpočtu byly zvoleny bodové monitory pro rychlost (viz Obr. 5.14) a teplotu. Tlak a hmotnostní průtok byly sledovány na plochách (reprezentovaných úsečkami ve 2D modelu). Na Obr. 5.15 je znázorněn vývoj tlaku na ploše vstupu do výměníku. Z obou uvedených grafů je patrné, že bylo dosaženo zkonvergovaného řešení úlohy v ustáleném stavu.



Obr. 5.14 – Monitorování rychlosti v bodě



Obr. 5.15 – Monitorování tlaku na ploše vstup do výměníku

5.3.2 Nastavení výpočtu tranzientní simulace

Po vyhodnocení úlohy v ustáleném stavu (kontrole obdržených výsledků tlakového a rychlostního pole) byla provedena simulace časově závislého řešení.

Nastavení modelu tranzientní simulace laboratorního testu se podobalo nastavení modelů pro stacionární laboratorní test. Simulace byla provedena v tranzientním režimu, adiabatická se zapnutým modelem turbulence *Realizable k-ε* (v kombinaci s *Non-equilibrium* stěnovou funkcí) a se zapnutou rovnicí energie. K výpočtu simulace byla opět použita síť $y^+ \approx 30$. Okrajové podmínky tranzientní simulace byly totožné s okrajovými podmínkami simulace stacionární.

Metody řešení

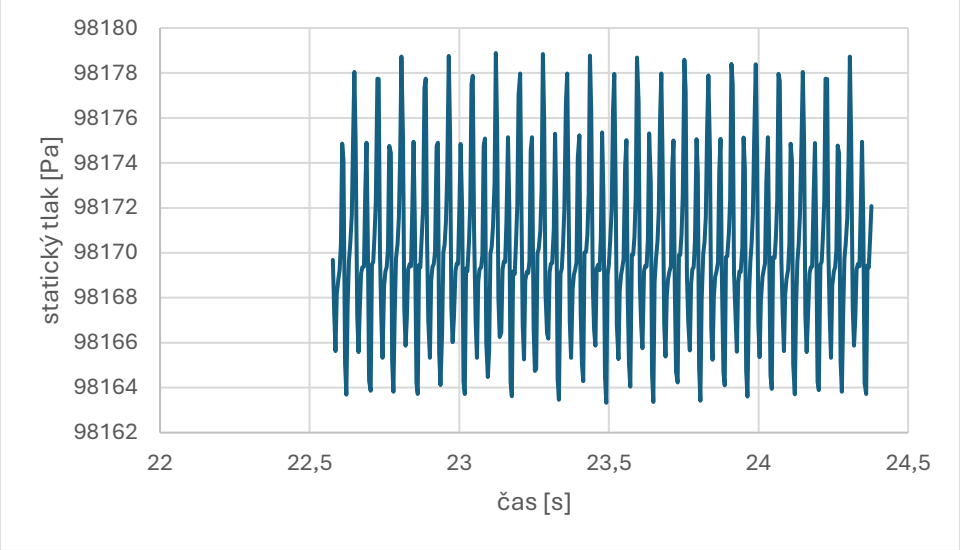
Výpočet byl proveden pomocí diskretizací 2. řádu pro všechny rovnice včetně implicitní tranzientní formulace. Simulovaná doba činila 25,58 s s časovým krokem 0,005 s, který byl zvolen podle Courant-Fridrichs-Lewy podmínky. Pomocí této podmínky podle [30] byla určena velikost časového kroku z rovnice (5.4):

$$\Delta t = \frac{C \cdot \Delta x}{u} \tag{5.4}$$

Δt	časový krok
C	Courantovo číslo (C=1)
Δx	délka nejmenší buňky sítě
u	rychlost proudění

Během výpočtu byla sledována především oblast úplavu výměníku za posledním sloupcem trubek (monitory tlaku na plochách uvnitř výměníku a sledování součinitelů odporu a vztlaku), Pozorování vývoje tlaku ve výměníku je ukázáno na Obr. 5.16 - Část vývoje statického tlaku kolem trubek při monitorování 6.

Výsledky tranzientní simulace při laboratorních podmínkách jsou uvedeny v kapitole 6.2.2.



Obr. 5.16 - Část vývoje statického tlaku kolem trubek při monitorování průběhu výpočtu

5.4 Provozní podmínky

Provozní zkoušky experimentálního výměníku byly prováděny v cementárně Mokrá společnosti Heidelberg Materials CZ, a.s. Zanášivý proud proudil v mezitrubkovém prostoru s koncentrací 40 g/m^3 a jeho teplota ve vstupním potrubí se pohybovala mezi 130 a 135 °C při průměrné 7% relativní vlhkosti a za barometrického tlaku 992,5 hPa. Test probíhal po dobu 2 h; naměřené, popř. dopočítané hodnoty hlavních veličin jsou uvedeny v Tab. 5.4. Zkušební sestava (ještě bez instrumentace) je na Obr. 5.17.

Tab. 5.4 – Naměřené hodnoty provozního testu

čas [h:m]	Rychlost z pitotovy trubice [m/s]	Rychlost vypočtená [m/s]	relativní odchylka rychlostí [%]	tlaková ztráta [Pa]
12:35	6,63	6,9	3,91	109,0
12:45	6,98	7,2	3,06	127,0
12:55	7,23	7,494	3,52	137,0
13:05	7,46	7,747	3,70	141,0
13:15	7,52	7,8	3,59	150,0
13:25	6,26	6,505	3,77	155,0
13:35	7,53	7,821	3,72	166,0
13:45	7,34	7,62	3,67	175,0
13:55	5,41	5,614	3,63	197,0
14:05	6,66	6,876	3,14	195,0
14:15	7,61	7,861	3,19	185,0
14:25	6,17	6,37	3,14	200,0
Průměr	**6,90**	7,1	3,50	**161,4**

Obr. 5.17 – Zapojení zkušební sestavy pro provozní testování [31]

5.4.1 Nastavení výpočtu

Nastavení modelu provozního testu se podobalo nastavení modelů pro laboratorní test. K výpočtu simulace byla také použita síť $y^+ \approx 30$, která byla nejvhodnější pro laboratorní podmínky a byla tedy přejata i pro podmínky provozní. Simulace byla provedena jako stacionární, adiabatická se zapnutým modelem turbulence *Realizable k-ε* (v kombinaci s *Non-equilibrium* stěnovou funkcí) a se zapnutou rovnicí energie. Použité řešiče a fyzikální modely jsou stejné jako u laboratorních testů. Ke změně tak došlo pouze u okrajových podmínek výpočtu.

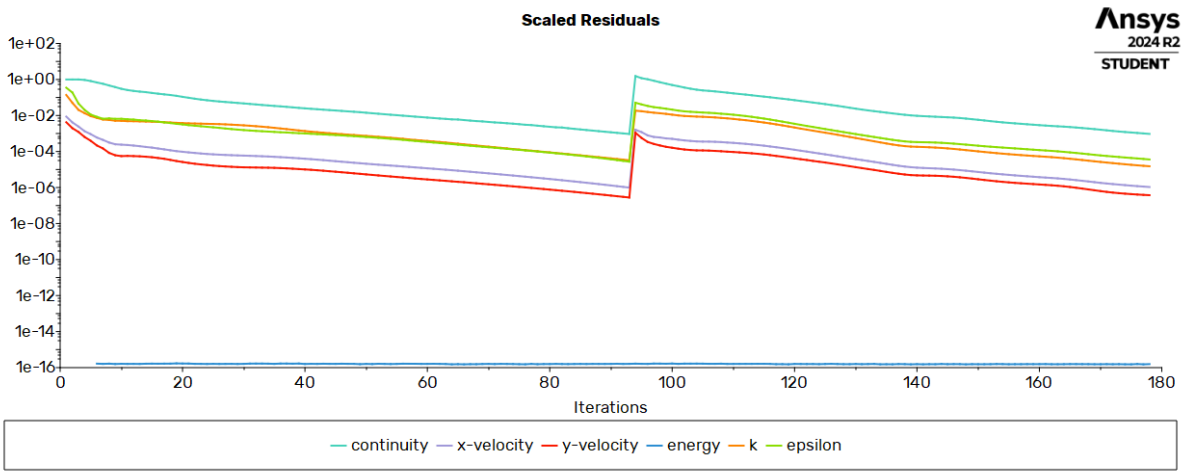
Podle rovnice (3.5) bylo určeno Reynoldsovo číslo prodění vzduchu v přivodní trubici $Re = 112693$ a hodnota Reynoldsova čísla ve výměníku podle (3.6) pak $\mathrm{Re} = 54367$ z toho vyplívá že proudění v přívodové trubce i v samotném výměníku tepla bude turbulentní.

Okrajové podmínky

Vstup byl opět řešen jako velocity inlet se vstupní rychlostí 7,18 m/s a tlakem 99,25 kPa. Pressure outlet s absolutní hodnotou tlaku 98,55 kPa. Stěny byli nastaveny jako stacionární z oceli bez skluzu s výškou drsnosti 6 μm.

Metody řešení

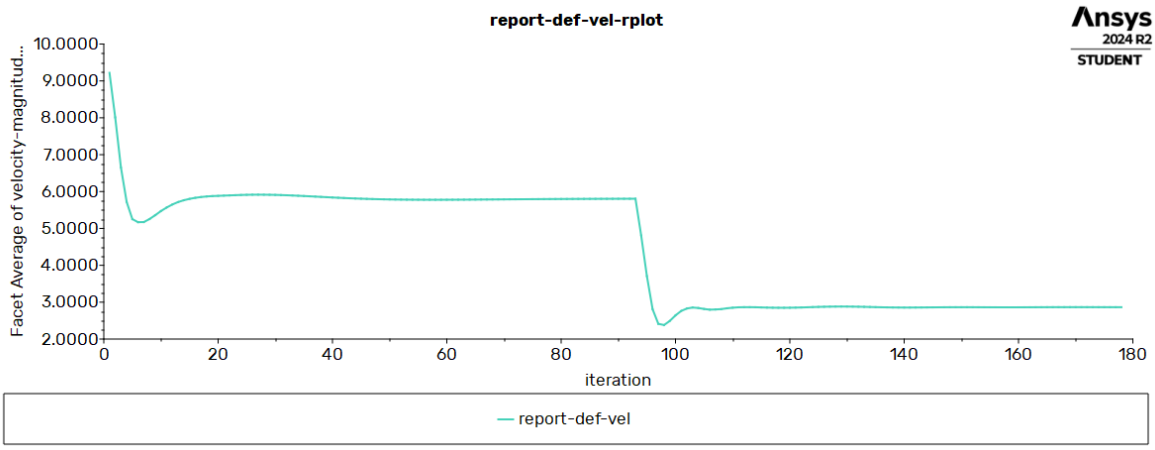
Postup numerického řešení a použité metody zůstaly nezměněny oproti předchozí simulaci ustáleného stavu, která byla provedena v prostředí ANSYS Fluent. Bylo použito také stejné numerické schéma. Důraz byl i nadále kladen na zajištění konvergence řešení a zachování dostatečné přesnosti v oblasti výměníku. Na Obr. 5.18 je zobrazen průběh reziduí provozního testu.



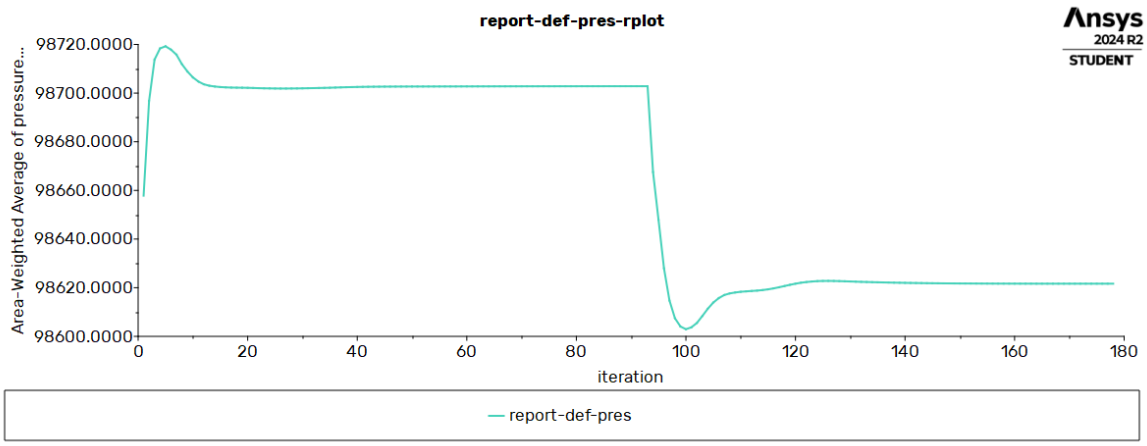
Obr. 5.18 – Průběh reziduí provozního testu

Monitory simulace

I při výpočtu simulace za provozních podmínek byly monitorovány veličiny pro kontrolu stability řešení (viz Obr. 5.19 a Obr. 5.20). Z grafů průběhu těchto veličin i z průběhu škálovaných reziduí je patrná dobrá konvergence řešení úlohy ustáleného stavu. Sledovací monitory byli zvoleny obdobně jako při stacionární simulaci laboratorního testu.



Obr. 5.19 – Monitorování rychlosti v bodě



Obr. 5.20 – Monitorování tlaku na ploše vstup do výměníku

6 Výsledky simulace CFD a srovnání s provedenými experimenty

Výsledky provedených simulací CFD jsou v této kapitole porovnány s daty naměřenými během experimentů. Srovnání mělo za úkol posoudit, jak vytvořený CFD model odpovídá reálnému chování proudění v experimentálním výměníku tepla při laboratorním a provozním testu. Nejdříve jsou probrány výsledky měření, následně jsou experimentální data srovnána s výsledky vytvořených simulací proudění experimentálním výměníkem.

6.1 Výsledky laboratorního testu

Z fotografií pořízených v rámci vyhodnocení laboratorního testu zanášení lze pozorovat tvorbu nánosů v mezitrubkovém prostoru experimentálního zařízení. Výsledná vrstva a množství nánosů byla oproti použití experimentálního zařízení v cementárně velmi malá, což je důsledkem nižší koncentrace částic v proudu vzdušiny, jak bylo zmíněno dříve.

Na sloupci trubek 1 (Obr. 6.1) byl pozorován nános na celé nátokové straně, zatímco na sloupcích 2, 3 a 4 (viz Obr. 6.2 –Obr. 6.4) vznikly největší nánosy na trubkách mezi 10. a 11. a mezi 7. a 8. úsekem (viz definice úseků uvedená na Obr. 2.8), zatímco v úsecích, jejichž tečny jsou kolmé ke dnu výměníku, nevznikly v podstatě žádné nánosy částic. Vrstva nánosů vznikala i na výtokové straně výměníku (v analogických úsecích trubek), ale zde bylo pozorované mnohem menší množství. Tvorba nánosů měla pilovitý charakter, tedy v průběhu experimentu docházelo k postupnému nanášení a následnému opadu nečistot. To je také jeden z hlavních důvodů hromadění nánosu na dně výměníku, který lze na fotografiích pozorovat.

Obr. 6.1 – Zanášení na sloupci 1

Obr. 6.2 – Zanášení na sloupci 2

Obr. 6.3 – Zanášení na sloupci 3

Obr. 6.4 – Zanášení na sloupci 4

Během laboratorního testu se v tepelném výměníku usadilo největší množství cementárenského prášku právě na dně výměníku, a to asi 1,2 kg. Množství nánosu na teplosměnných plochách výměníku je uvedeno v Tab. 6.1 – Množství nánosů na jednotlivých trubkách. Největší množství cementárenského prášku je na trubkách v prvním sloupci (označeném 1) a na řadě označené C. Je tedy možné pozorovat, že větší vrstvy nánosů jsou pozorovány na trubkách vzdálených od stěn těla výměníku spíše než na krajních trubkách.

Je nezbytné poznamenat, že před zvážením množství prášku na jednotlivých trubkách došlo k opadu části prášku na trubkách při odstranění trubkovnice. Reálné množství nánosu na trubkách tedy byla mírně větší. Tyto rozdíly mezi naměřenými a reálnými hodnotami vnášejí nejistotu do výsledků testování, ale neovlivnily pozorování lokalizace nánosů. Dalším externím vlivem je vlastní opad materiálu, který může zkreslovat (zvyšovat) množství nánosu na spodní řadě trubek.

Tab. 6.1 – Množství nánosů na jednotlivých trubkách

Trubka	A1	A2	A3	A4
množství [g]	13	3,5	2	2,5
Trubka	B1	B2	B3	B4
množství [g]	9	11	9	10
Trubka	C1	C2	C3	C4
množství [g]	15	15	18,5	22
Trubka	D1	D2	D3	D4
množství [g]	9,5	8	6,5	2,5

6.2 Analýza proudění při laboratorních podmínkách

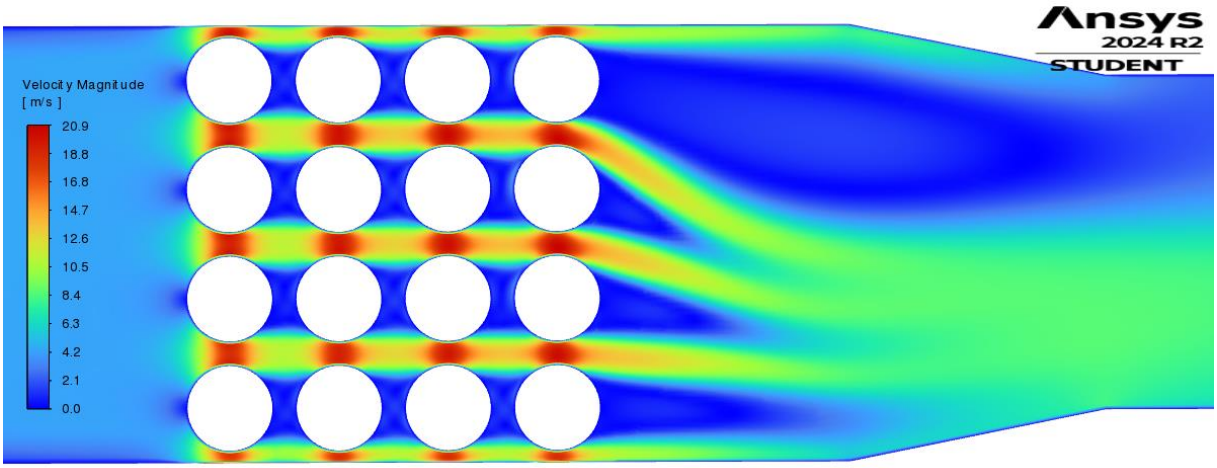
Vyhodnocení výsledků CFD simulace proudění při podmínkách odpovídajících laboratornímu testu experimentálního výměníku se zaměřilo především na rychlostní pole v těle výměníku a tlakové poměry. V této kapitole jsou nejprve analyzovány výsledky ustáleného výpočtu a následně také tranzientního modelu.

6.2.1 Analýza proudění ustálených modelů

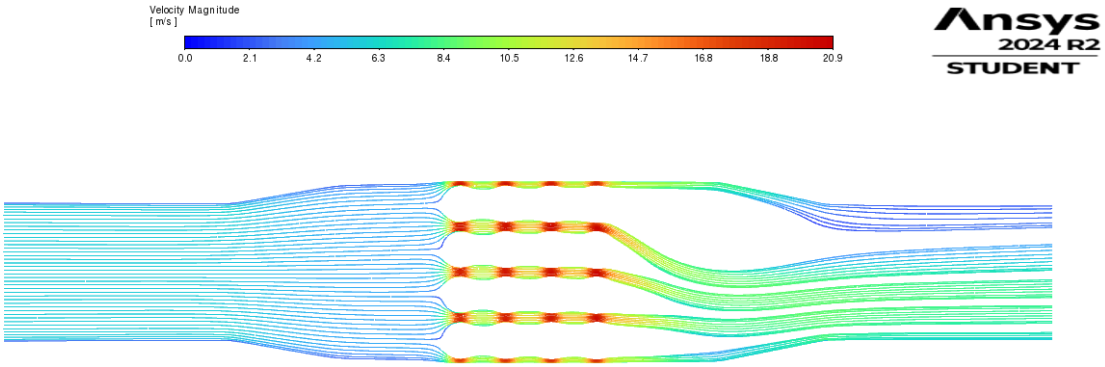
Na Obr. 6.5 je zobrazení velikosti rychlosti v okolí trubek, z nějž lze usuzovat, že vhodné podmínky pro usazování částic budou panovat v místech s nízkými rychlostmi mezi trubkami a na plochách prvního sloupce trubek nacházejícího se na nátokové straně svazku. Naproti tomu lze usuzovat, že na horních a spodních stranách trubek, kde jsou predikovány největší hodnoty rychlosti vzduchu, k usazování docházet nebude. Tomu odpovídá i tvar proudnic (viz Obr. 6.6), které jsou v těchto místech v podstatě tečnami.

Při tvorbě jednotlivých modelů se na všech modelech tvořených s turbulentním modelem k-ε vytvořil nesymetrický úplav a velký vír za trubkou A4, proto byl zkontrolován i výsledek predikce dalšího modelu k-ω (Obr. 6.7). Úplav vytvořený při použití modelu k-ω byl naopak symetrický, ale model se tlakovou ztrátou (218,6 Pa) nejvíce odlišoval naměřené hodnotě, proto nebyl použit. Rozdíl chování rychlostního pole u obou modelů by mohl znamenat, že ve výměníku dochází za trubkovým svazkem ke změnám rychlostního pole v čase, ale obě úlohy byly vytvořeny jako simulace ustáleného stavu. Nedá se z nich tedy zjistit, jak přesně se chová proudící vzdušina v prostoru za trubkovým svazkem.

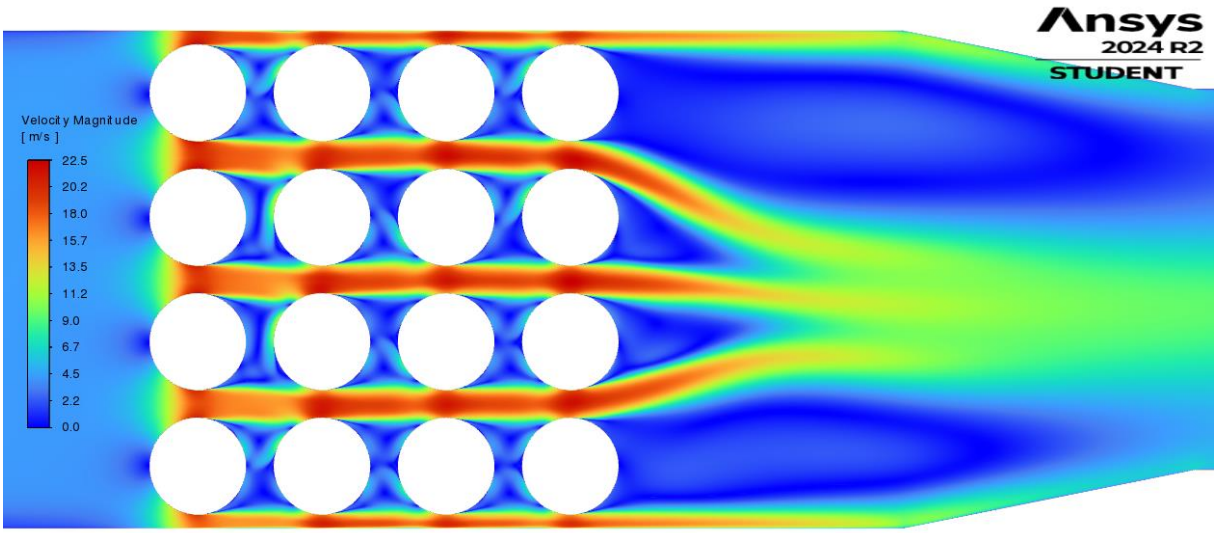
Obr. 6.8 zobrazuje průběh tlaku v kompletním tepelném výměníku a ukazuje rozložení celkové vzniklé tlakové ztráty 100,2 Pa.



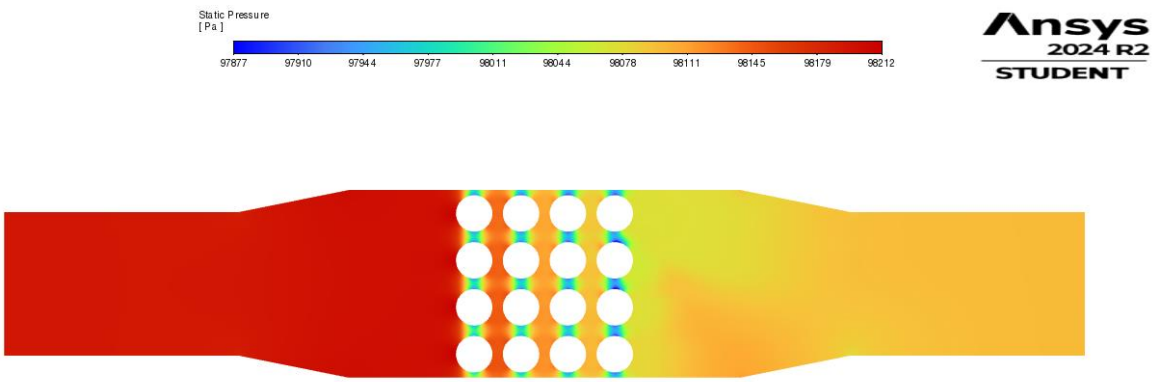
Obr. 6.5 – Rychlostní pole v mezitrubkovém prostoru predikované modelem *k-ε*



Obr. 6.6 – Rychlostní pole laboratorního testu ve výměníku predikované modelem *k-ε*



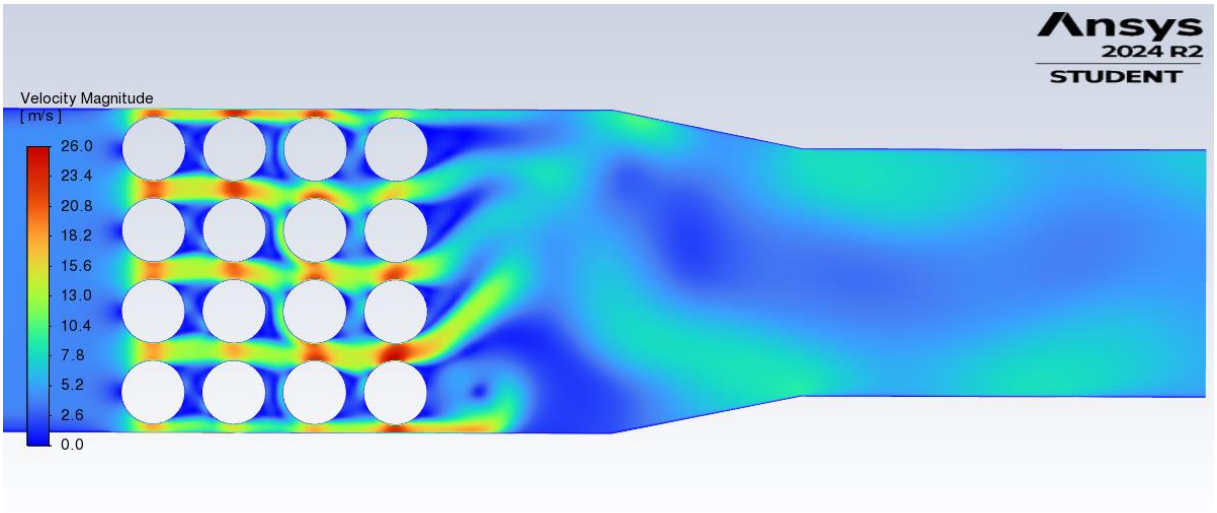
Obr. 6.7 – Rychlostní pole v mezitrubkovém prostoru predikované modelem *k-ω*



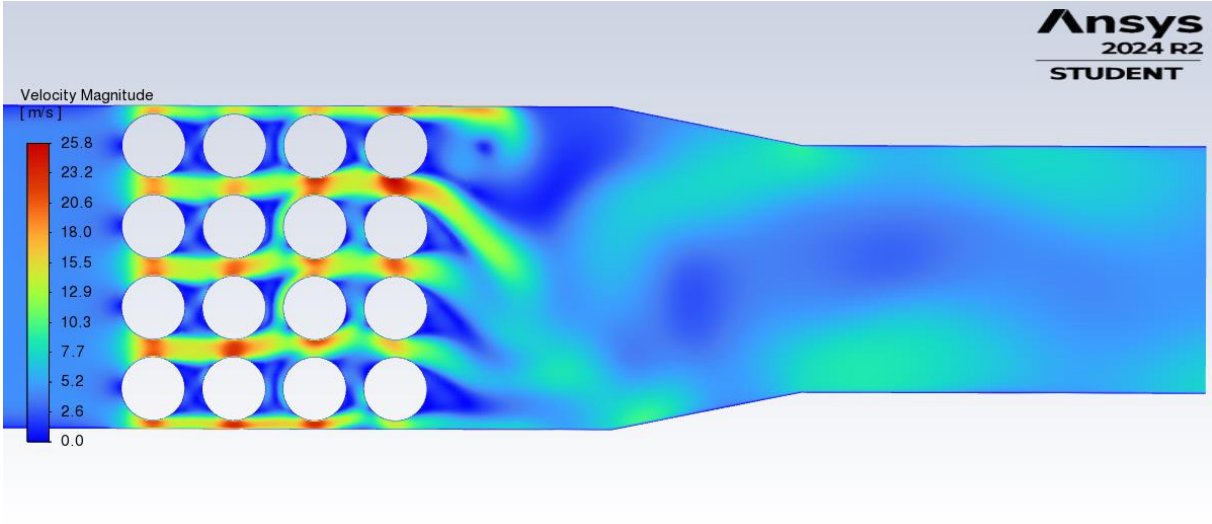
Obr. 6.8 – Kontura tlakového pole laboratorního testu ve výměníku predikované modelem *k-ε*

6.2.2 Analýza proudění tranzientního modelu

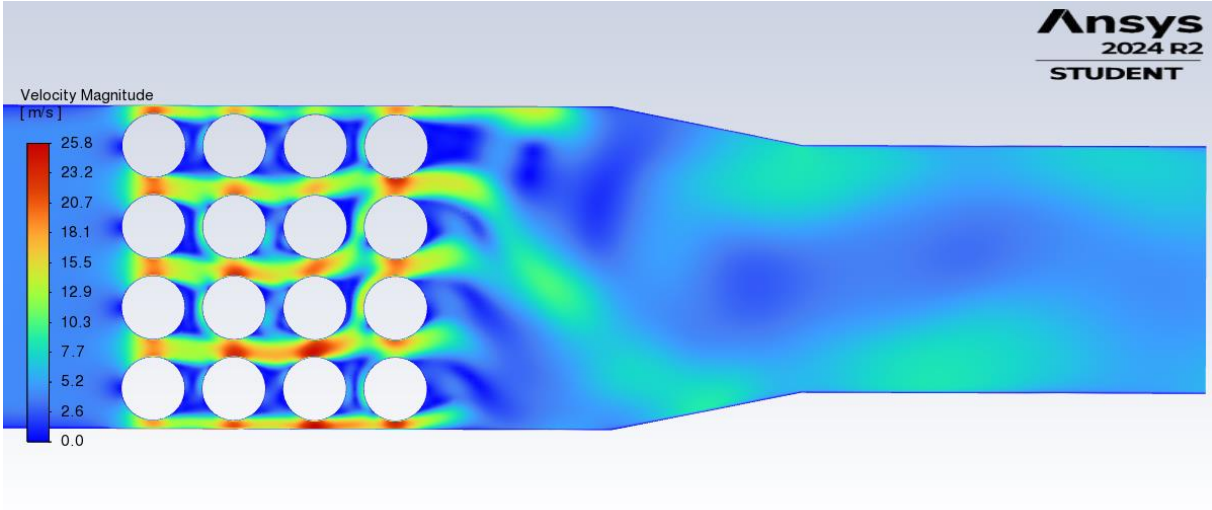
Tranzientní výpočtový model byl vytvořený kvůli prozkoumání úplavu za trubkami ve čtvrtém sloupci. Na rozdíl od stacionárního výpočtu, lze zde pozorovat tvorbu vírů a jejich vliv na rychlostní pole. Na Obr. 6.9 – Obr. 6.11 je jasně patrná tvorba velkých vírů za trubkami A1 a A4, které jsou nejspíš způsobeny tvorbou tzv. karmánových vírových stezek [32]. Tyto víry jsou vytvářeny periodicky po čase 0,13 s (tedy např. za trubkou D4 vznikají víry po 0,13s).



Obr. 6.9 – Rychlostní pole v mezitrubkovém prostoru predikované modelem *k-ε* (čas 24,61 s)



Obr. 6.10 – Rychlostní pole v mezitrubkovém prostoru predikované modelem *k-ε* (čas 24,655 s)



Obr. 6.11 - Rychlostní pole v mezitrubkovém prostoru predikované modelem *k-ε* (čas 24,675 s)

6.3 Srovnání obdržených výsledků pro laboratorní podmínky

Při srovnání výsledků CFD analýzy s pozorovanými výstupy laboratorního testu lze konstatovat, že tvorba nánosů na trubkách (na Obr. 6.1 – Obr. 6.4) odpovídá predikovaným stagnačním zónám (místa s velmi nízkou rychlostí proudění), které jsou znázorněné na Obr. 6.5 tmavě modrou barvou mezi trubkami. Z tranzientní simulace také vyplývá, že tyto nízkorychlostní oblasti jsou relativně stálé v čase, což zvyšuje pravděpodobnost usazování částic. Větší množství nánosů na řadách B a hlavně C je způsobeno rozdělením proudění vzdušiny, a tedy i částic prášku kolem těchto dvou řad.

V rámci experimentů v laboratoři byl výměník osazen trubkovnicemi z plexiskla, díky nimž bylo možné pozorovat opad materiálu z trubek a velkou turbulenci proudící vzdušiny s částicemi. CFD analýza však zároveň odhalila značnou dynamiku proudění za poslední řadou

trubek. Právě toto chování není možné blíže pozorovat u reálného zařízení, ani při použití endoskopických kamer. Zároveň mají tyto úplavy vliv na nánosy tvořené v potrubní trase za výměníkem, což sice v provedeném experimentu nebylo hodnoceno, ale toto chování může mít dopad na případná další zařízení (umístěná po proudu za výměníkem) při případné aplikaci v provozu.

6.4 Výsledky provozního testu

Při provozním testu byla koncentrace cementárenského prášku (40 g/m^3) mnohem vyšší než při testu laboratorním, což se projevilo také na velikosti a rozmístění nánosů. Vrstva prášku se v tomto případě vytvořila vždy po celém obvodu trubek. Obr. 6.12 – Obr. 6.15 ukazují nánosy tepelného výměníku po ukončení provozního testu. Z fotografií je vidět, že vysoká koncentrace prášku se projevila na mnohem výraznějším zanesení teplosměnných ploch oproti testu laboratornímu.

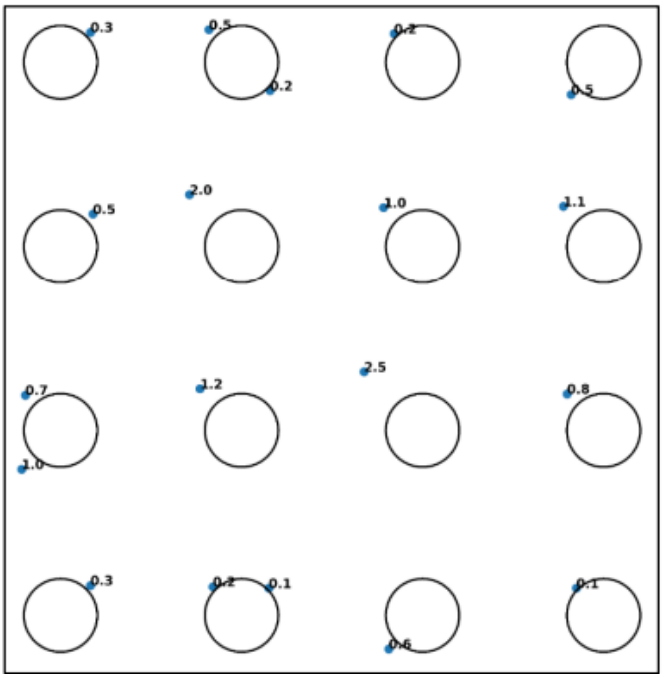
Obr. 6.12 – Pohled na kompletní svazek trubek po odstranění trubkovnice (směr toku zanášivého proudu zprava doleva)

Obr. 6.13 – Pohled na zanešení řady B (směr toku zanášivého proudu zprava doleva)

Obr. 6.14 – Pohled na zanešení řady C (směr toku zanášivého proudu zprava doleva)

Obr. 6.15 – Pohled na zanešení řady D (směr toku zanášivého proudu zprava doleva)

Usazování cementárenského prášku při provozních podmínkách je shrnuto na radiálním schématu na Obr. 6.16. Toto schéma ukazuje, kde na jednotlivých trubkách vzniká největší vrstva nánosů. Na schématu můžeme pozorovat, že nánosy se tvoří spíše na trubkách vzdálených od stěn těla výměníku (řady B a C) spíše než na trubkách u stěn (řady A a D). I při provozním testu vnikaly větší vrstvy nánosu na nátokové straně trubek, ale na rozdíl od laboratorního testu jsou vrstvy na výtokové straně trubek poměrně velké, což bylo nejspíš způsobeno mimo jiné mnohem vyšší koncentrací prášku ve vzduchu.



Obr. 6.16 – Radiální schéma velikosti nánosů při provozním testu (směr toku zanášivého proudu zleva doprava)

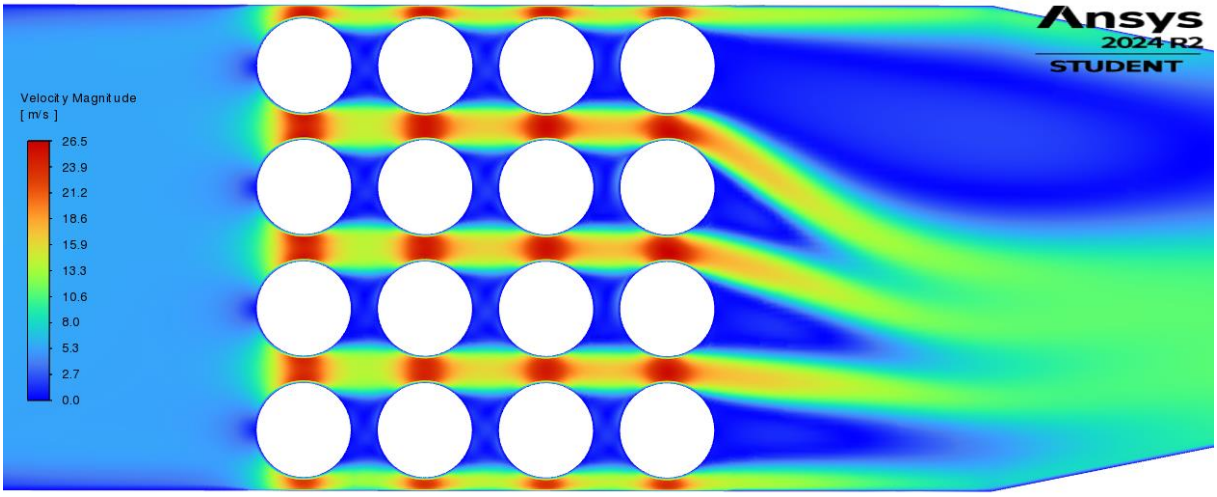
6.5 Analýza proudění při podmínkách provozního testu

Vyhodnocení výsledků CFD simulace proudění při podmínkách odpovídajících provoznímu testu experimentálního výměníku se zaměřilo opět na rychlostní pole v těle výměníku a tlakové poměry.

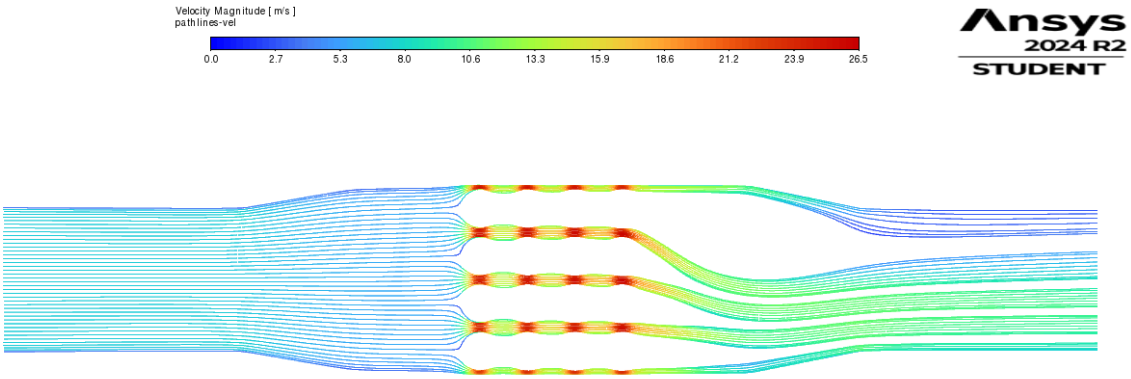
Na Obr. 6.17 je zobrazení velikosti rychlosti v okolí trubek, z nějž lze usuzovat, že vhodné podmínky pro usazování částic budou opět panovat v místech s nízkými rychlostmi mezi trubkami a na plochách prvního sloupce trubek nacházejícího se na nátokové straně svazku. Na horních a spodních stranách trubek došlo k nárůstu predikované maximální rychlosti proudění, která znesnadňuje případné usazování částic. Tvar proudnic (viz Obr. 6.18) opět ukazuje minimální promísení vzdušiny uvnitř svazku trubek.

Z grafů rychlostního pole je opět patrný silný úplav za trubkou A4, nicméně s ohledem na podobnost obou simulací (laboratorních a provozních podmínek), nebyl v tomto případě proveden transientní výpočet.

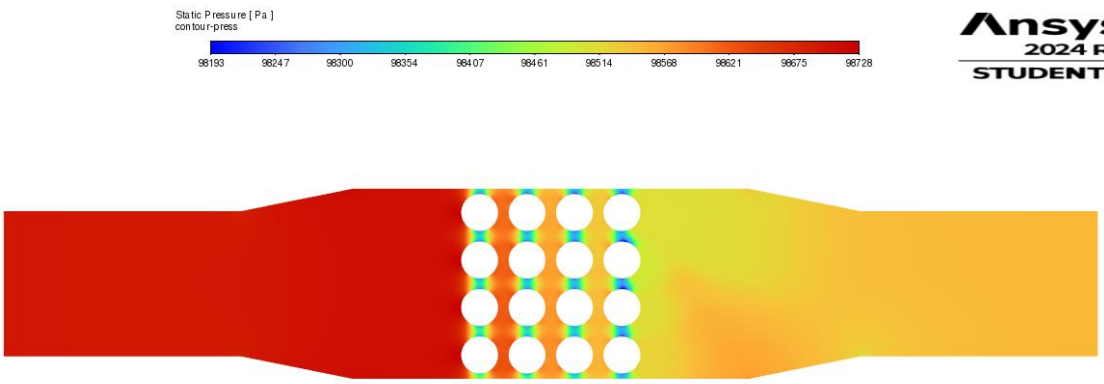
Obr. 6.19 zobrazuje průběh tlaku v tepelném výměníku a ukazuje tak vzniklou celkovou tlakovou ztrátu 147 Pa.



Obr. 6.17 – Kontura rychlostního pole v mezitrubkovém prostoru výměníku při podmínkách provozního testu



Obr. 6.18 – Proudnice obarvené velikostí rychlosti při podmínkách provozního testu



Obr. 6.19 – Tlakového pole výměníku provozního testu při podmínkách provozního testu

6.6 Srovnání obdržených výsledků pro provozní podmínky

Ze srovnání CFD simulace proudění s okrajovými podmínkami odpovídajícími podmínkám provozního testu s pozorovanými výstupy provozního testu (především ve formě radiálního schématu nánosů) lze pozorovat, že největší nánosy vznikají opět ve stagnačních zónách viditelných mezi trubkami. Na rozdíl od laboratorního testu vznikají větší vrstvy nánosu i z výtokové strany trubek – především u sloupce 1, což bude nejspíš způsobeno vyšší koncentrací prášku v proudu. Lze předpokládat, že již nalepený matriál na nátokové straně reaguje s množstvím částic unášených proudem (a narážejících do první trubky) a dochází k přirozené regulaci vrstvy. Podobný charakter rozložení nánosů jako u laboratorního testu lze pozorovat u větších vrstev na řadách B a hlavně C, což je způsobeno rozdělením proudění vzdušiny, a tedy i částic prášku kolem těchto dvou řad.

Pouze malá vrstva nánosu vzniká na trubkách v posledním sloupci výměníku – to je nejspíš způsobeno vzniklým úplavem a vytvořenými víry, tedy změnám ve směru proudění. Změnami proudění je tvorba usazenin v těchto místech regulována. Na rozdíl od laboratorního testu byla koncentrace prášku natolik vysoká, že došlo k tvorbě nánosu i v úsecích okolo 6 a 12 (viz definice úseků uvedená na Obr. 2.8). Přestože tedy byla celkově rychlost proudění kolem trubek při tomto testu vyšší než při laboratorních podmínkách, nebyla dostatečná, aby v úsecích s nejvyšší rychlostí proudění došlo ke strhávání částic a přirozenému čištění teplosměnné plochy.

7 Závěr

Zanášení výměníků tepla je významným technickým problémem, který ovlivňuje jak provozní účinnost zařízení, tak jeho ekonomiku a ekologický dopad. Usazování částic na teplosměnných plochách vede ke zhoršení přestupu tepla, zvýšení tlakových ztrát a častější potřebě údržby. Vzhledem k rostoucím nárokům na úsporu energie a snižování emisí je proto důležité hledat způsoby, jak zanášení předcházet nebo ho alespoň efektivně předvídat již ve fázi návrhu zařízení. Tato práce využívá výpočetní dynamika tekutin pro popis rychlostního pole. Data získaná z CFD simulací můžou posloužit k lepšímu pochopení chování zanášivého proudu a v konečném důsledku i k lepšímu návrhu zařízení na přenos tepla.

Všechny dílčí cíle práce byly úspěšně naplněny. Byla provedena rešerše zaměřená na modelování proudění pracovních látek v osově symetrických procesních zařízeních. Dále byl popsán a analyzován experimentální výměník tepla, na kterém byly následně provedeny výpočty rychlostního pole v oblasti středové roviny. Plánovaná aplikace experimentálního výměníku nesměřuje pouze do prostředí cementáren, ale také do podmínek spalovacích procesů, kde je proudící médium rovněž zatíženo tuhými částicemi. Tomu odpovídaly dvě testované koncentrace materiálu, které umožnily posoudit chování proudění za různých provozních podmínek. 2D simulace byly proto zpracovány ve stacionární podobě pro dvě různé koncentrace partikulárního materiálu a doplněny o jednu tranzientní simulaci. Výsledky výpočtů byly následně porovnány s experimentálními pozorováními zanášení, přičemž byla nalezena jednoznačná souvislost mezi oblastmi s nízkou rychlostí proudění a výskytem nánosů.

Srovnání experimentálních dat a výsledků simulací prokázalo, že testovací zařízení bylo dostatečně reprezentováno v jedné rovině zobrazení, což výrazně snižuje výpočetní náročnost a zároveň zachovává potřebnou úroveň přesnosti. Zvolený přístup simulace v jedné rovině má ovšem své limitace, které je třeba zdůraznit. Dvourozměrný model nedokáže postihnout vliv trojrozměrných jevů a nejsou zde zohledněny všechny parametry reálné konstrukce, které by mohly ovlivňovat chování systému nebo prostorové rozdělení částic. Model rovněž nezahrnuje přenos tepla ani transport pevných částic proudem, který má přímý vliv na tvorbu nánosů, a jehož simulace je metodicky i výpočetně náročná.

V rámci navazující práce by tedy bylo možné model dále rozšířit na 3D simulaci, o přenos tepla, přesnější popis vstupních podmínek včetně vlivu přívodního potrubí a o modelování částic v proudící vzduchu. To by umožnilo komplexněji vyhodnotit proces zanášení a dále zpřesnit návrh výměníku.

Seznam použité literatury

[1] BALÁŠ, M. *Kotle a výměníky tepla*. Vydání čtvrté. Učební texty vysokých škol. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2022. ISBN 978-80-214-6093-5.

[2] BOTT, T.R. *Fouling of Heat Exchangers*. Vol.26. Amstrerdam: Elsevier, 1995. ISBN 0-404-82186-4.

[3] COLETTI, F. a MACCHIETTO, S. Refinery Pre-Heat Train Network Simulation Undergoing Fouling: Assessment of Energy Efficiency and Carbon Emissions: Assessment of Energy Efficiency and Carbon Emissions. Online. *Heat Transfer Engineering*. 2011/03/22, roč. 32, č. 3-4, s. 228-236. ISSN 0145-7632. Dostupné z: https://doi.org/10.1080/01457632.2010.495606. [cit. 2025-05-23].

[4] VISSER, J. a JEURNINK, Th.J.M. Fouling of heat exchangers in the dairy industry. Online. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1997, roč. 14, č. 4, s. 407-424. ISSN 0894-1777. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0894-1777(96)00142-2. [cit. 2025-05-23].

[5] KUPPAN, T. *Heat exchanger design handbook*. 2nd ed. Mechanical engineering. Boca Raton: CRC Press, c2013. ISBN 978-1-4398-4212-6.

[6] DLOUHÝ, T. *Stavba kotlů: přednáška č. 1*. PDF. 2018.

[7] KLIMEŠ, L. *Základy přenosu tepla*. Studijní materiály, PDF. 2024.

[8] EDREIS, E. a PETROV, A. Types of heat exchangers in industry, their advantages and disadvantages, and the study of their parameters. Online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, roč. 963, č. 1, s. 10. ISSN 1757-8981. Dostupné z: https://doi.org/10.1088/1757-899X/963/1/012027. [cit. 2025-02-22].

[9] KAKAÇ, S. a LIU, H. *Heat exchangers: selection, rating and thermal design*. 3nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2012. ISBN 0-8493-0902-6.

[10] JEGLA, Z. *ZAŘÍZENÍ PRO PROCESNÍ VÝMĚNU TEPLA*. Studijní materiály, PDF. 2025.

[11] FIALOVÁ, D. B.; JEGLA, Z.; DAXNER, J.; JECHA, D.; KILKOVSKÝ, B. et al. *TECHNICKÁ DOKUMENTACE K FUNKČNÍMU VZORKU: Funkční vzorek TESTER TK05020076-V4*. PDF. 2024.

[12] KAZI, S.N. Fouling and Fouling Mitigation on Heat Exchanger Surfaces. Online. *Heat Exchangers - Basics Design Applications*. 2012, s. 600. ISBN 978-953-51-0278-6. Dostupné z: https://doi.org/10.5772/32990. [cit. 2025-02-23].

[13] *VDI heat atlas: with 1011 figures and 539 tables*. Second Edition. Springer reference. Heidelberg: Springer, [2010]. ISBN 978-3-540-77876-9.

[14] BERCE, J.; ZUPANČIČ, M.; MOŽE, M. a GOLOBIČ, I. A Review of Crystallization Fouling in Heat Exchangers. Online. *Processes*. 2021, roč. 9, č. 8. ISSN 2227-9717. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/pr9081356. [cit. 2025-05-09].

[15] AWAIS, M. a BHUIYAN, A. A. Recent advancements in impedance of fouling resistance and particulate depositions in heat exchangers. Online. *International Journal*

of Heat and Mass Transfer. 2019, roč. 141, s. 580-603. ISSN 0017-9310. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.011. [cit. 2025-05-23].

[16] BEGELL HOUSE, INC. *A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering*. Online. Begellhouse, 2006. Dostupné z: https://www.thermopedia.com/cn/content/1211/#TUBE_BANKS_CROSSFLOW_OVER_FIG1. [cit. 2025-05-07].

[17] HÁJEK, J. *Modelování s použitím CFD - I*. Studijní materiály, PDF. 2008.

[18] MÜLLER-STEINHAGEN, H.; , MALAYERI, M. R. a AND WATKINSON, A. P. Heat Exchanger Fouling: Environmental Impacts: Environmental Impacts. Online. *Heat Transfer Engineering*. 2009/10/01, roč. 30, č. 10-11, s. 773-776. ISSN 0145-7632. Dostupné z: https://doi.org/10.1080/01457630902744119. [cit. 2025-05-23].

[19] OCEANIT GLOBAL. *Estimating the Global Cost of Heat Exchanger Fouling: A Comprehensive Review*. Online. HeatX. 2024. Dostupné z: https://www.heatxglobal.com/estimating-the-global-cost-of-heat-exchanger-fouling-a-comprehensive-review/. [cit. 2025-05-09].

[20] MÜLLER-STEINHAGEN, H.; MALAYERI, M. R. a WATKINSON, A. P. Heat Exchanger Fouling: Mitigation and Cleaning Strategies. Online. *Heat Transfer Engineering*. 2011, roč. 32, č. 3-4, s. 189-196. ISSN 0145-7632. Dostupné z: https://doi.org/10.1080/01457632.2010.503108. [cit. 2025-02-22].

[21] HAN, H.; HE, Y.; TAO, W. a LI, Y. A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction. Online. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014, roč. 72, s. 210-221. ISSN 0017-9310. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.010. [cit. 2025-05-23].

[22] POZRIKIDIS, C. *Fluid dynamics: theory, computation, and numerical simulation*. Third edition. New York, NY, USA: Springer, [2017]. ISBN 978-1-4899-7991-9. Dostupné také z: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7991-9.

[23] ANSYS, INC. *Ansys*. Online. Ansys. 2025. Dostupné z: https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-computational-fluid-dynamics. [cit. 2025-03-06].

[24] TU, J.; YEOH, G. a LIU, Ch. *Computational fluid dynamics: a practical approach*. Third edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, [2018]. ISBN 978-0-08-101127-0.

[25] SIMSCALE GMBH. *What is Large Eddy Simulation (LES) in CFD?* Online. SIMSCALE. 2025. Dostupné z: https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/large-eddy-simulation-les/. [cit. 2025-05-13].

[26] ANSYS, INC. *ANSYS Fluent users guide*. PDF. Canonsburg: Ansys, 2021. [cit. 2025-03-19].

[27] ANSYS, INC. *Y+-Insensitive Near-Wall Treatment for ω-based Turbulence Models*. Online. ANSYS. Ansys Help. 2024. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=////Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/section_kbf_dl4_vvb.html. [cit. 2025-03-19].

[28] DAVIDSON, A.A. a SALIM, S.M. Wall y+ strategy for modelling rotating annular flow using CFD. Online. In: *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. Newswood Limited, 2018. ISBN 9789881404886. Dostupné z: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85062588100&partnerID=40&md5=b193c7d0f1e926e3adcc8f3e56c65ec6. [cit. 2025-05-23].

[29] KLEINHANS, U.; WIELAND, Ch.; FRANDSEN, F. J. a SPLIETHOFF, H. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior. Online. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2018, roč. 68, s. 65-168. ISSN 0360-1285. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.02.001. [cit. 2025-05-23].

[30] SIMSCALE GMBH. *The CFL Condition and How to Choose Your Timestep Size*. Online. SIMSCALE. 2025. Dostupné z: https://www.simscale.com/blog/cfl-condition/. [cit. 2025-05-22].

[31] FIALOVÁ, D. B.; JEGLA, Z.; DAXNER, J.; JECHA, D.; KILKOVSKÝ, B. et al. *TECHNICKÁ DOKUMENTACE K OVĚŘENÉ TECHNOLOGII: Ověřená technologie TESTER TK05020076-V5*. PDF. 2024.

[32] ANSYS, INC. *Unsteady Flow over a Cylinder - Simulation Example*. Online. Ansys Innovation Space. 2025. Dostupné z: https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/simple-approximations-of-fluid-flows/lessons/simulation-examples-homework-quizzes/topic/unsteady-flow-over-a-cylinder-simulation-example/. [cit. 2025-05-22].

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	Plocha výměny tepla	m^2
C	Courantovo číslo	–
c	Koncentrace látky	$kg \cdot m^{-3}$
c_b	Koncentrace částic v nenarušeném proudu média	$kg \cdot m^{-3}$
c_s	Koncentrace částic na povrchu	$kg \cdot m^{-3}$
D	Průměr trubky	m
	Difuzivita látky v tekutině	$m^2 \cdot s^{-1}$
d_1, d_2	Vnitřní a vnější průměr trubek	m
E_D	Koeficient vírové difuze	–
f	Objemové síly	$N \cdot m^{-3}$
h_tot	Celková entalpie	$J \cdot kg^{-1}$
K	Koeficient Prandtlovy trubice	-
K_t	Koeficient přenosu částic	–
k	Součinitel prostupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
	Turbulentní kinetická energie	$m^2 \cdot s^{-2}$
M	Molární hmotnost	$kg \cdot mol^{-1}$
m	Hmotnost nánosu	kg
N_A	Rychlost difuze	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
p	Tlak	Pa
$\dot{Q}$	Přenášený tepelný výkon	W
R	Molární plynová konstanta	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
R_{f1}	Součinitel zanášení v trubkovém prostoru	$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
R_{f2}	Součinitel zanášení v mezitrubkovém prostoru	$K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
Re	Reynoldsovo číslo	–
T	Teplota	K
t	Čas	S
u	Proudová rychlost	$m \cdot s^{-1}$
u_T	Třecí rychlost	$m \cdot s^{-1}$
v	Rychlost proudění	$m \cdot s^{-1}$
v_{max}	Maximální rychlost proudění ve výměníku	$m \cdot s^{-1}$
$\bar{v}$	Střední rychlost	$m \cdot s^{-1}$
$\vec{v}$	Vektor rychlosti tekutiny	$m \cdot s^{-1}$
x	Souřadnice ve směru proudění	M
x_{ref}	Hodnota referenční	-

x_v	Hodnota získaná výpočtem	-
y	Vzdálenost od stěny	m
y^+	Bezdimenzionální vzdálenost od stěny	–
ΔT	Střední teplotní rozdíl	K
$\Delta \bar{p}$	Průměrný diferenční tlak	Pa
Δt	Změna času	s
Δx	Délka nejmenší buňky sítě	m
α_1, α_2	Součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
ε	míra disipace turbulentní kinetické energie	$m^2 \cdot s^{-2}$
λ_t	Tepelná vodivost materiálu trubky	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
μ	Dynamická viskozita	$Pa \cdot s$
ν	Lokální kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
ρ	Hustota tekutiny	$kg \cdot m^{-3}$
τ	Smykové napětí	Pa
ω	měrná rychlost disipace kinetické energie	s^{-1}
∇	Diferenciální operátor (nabla)	–
ϕ_D	Hmotnostní tok nánosu na povrch	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
ϕ_R	Hmotnostní tok odstraňování z povrchu	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$

2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
CFD	*Computational Fluid Dynamics* (Výpočetní dynamika tekutin)
$CaCO_3$	Uhličitan vápenatý
$CaSO_4$	Síran vápenatý
CO_2	Oxid uhličitý
DNS	*Direct Numerical Simulation*
Fe	Železo
$Fe(OH)_3$	Hydroxid železitý
H_2O	Voda
LES	*Large Eddy Simulation*
MP	Mezitrubkový prostor
O_2	Kyslík
RANS	*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*