

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Selektivní katalytická redukce

Autor: **Jakub KAZDA**

Vedoucí práce: **Ing. Michal Volf**

Akademický rok 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub KAZDA**

Osobní číslo: **S16B0067P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**

Název tématu: **Selektivní katalytická redukce**

Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Máte za úkol vypracovat:


- princip selektivní katalytické redukce,
- popis používaných provedení v kogeneračních jednotkách,
- řešerši současného provedení na kogenerační jednotce,
- popis geometrie vstupní komory,
- popis kritických částí proudového pole,
- návrh možných modifikací vstupní komory,
- výpočty,
- zhodnocení výpočtů,
- závěr.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


- KLOUDA P.: Moderní analytické metody (2), upr. a dopl. vyd. Ostrava: Pavel Klouda, 2003, 132 s., ISBN 80-86369-07-2
- Lee S., Park K., Park J., Kim B.: Characteristics of reducing NO using urea and alkaline additives. Combustion and flame, 2005, no. 141, pp. 200-203
- STONE R.: Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999, 641 s., ISBN 0-333-74013-0
- Yu Yu, Yang Chen, Fan Li: Design and numerical simulation for selective catalytic reduction system in power plant [J]. Model Electric Power, 2007
- TEDOM [online], [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: www.TEDOM.com
- WHITE, Frank M.: Fluid Mechanics, McGraw-Hill Education, 2015, ISBN 978-0073398273
- ANSYS, ANSYS CFX-Solver Theory Guide [online], dostupné z: www.ansys.com
- KOZUBKOVÁ M.: Modelování proudění tekutin Fluent, CFX [online], [cit. 2018-10-30], VŠB-TU Ostrava, 2008, 154 s., dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium/skripta/>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Volf
Katedra energetických strojů a zařízení
Konzultant bakalářské práce: Stanislav Souček
Tedom a.s.

Datum zadání bakalářské práce: 30. října 2018
Termín odevzdání bakalářské práce: 24. května 2019


Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan




Dr. Ing. Jaroslav Synáč
vedoucí katedry

V Plzni dne 25. října 2018

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych velmi rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Volfovi za cenné a odborné rady, bez kterých by tato práce nevznikla a mému konzultantovi Stanislavu Součkovi ze společnosti TEDOM a.s., který mi zadal velmi zajímavé a poutavé téma. Dále děkuji své rodině za podporu při celém studiu.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kazda	Jméno Jakub	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Volf	Jméno Michal	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Selektivní katalytická redukce		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	59	TEXTOVÁ ČÁST	36	GRAFICKÁ ČÁST	10
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	Bakalářská práce obsahuje popis selektivní katalytické redukce, používaných katalyzátorů a jejich zapojení. Dále se tato práce zabývá numerickou simulací proudění spalín ve vstupní komoře katalyzátoru. Cílem výpočtu je zhodnocení geometrických modifikací zejména z hlediska rychlosti a tlakové ztráty. V této práci je zahrnuta tvorba geometrie, diskretizace, nastavení řešiče a následný výpočet. Pro celou simulaci a vyhodnocení výsledků byl použit software ANSYS 19.2.
KLÍČOVÁ SLOVA	Katalytická redukce, SCR, oxidy dusíku, CFD, ANSYS, CFX, numerická simulace, katalyzátor, optimalizace

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Kazda	Name Jakub	
FIELD OF STUDY	2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Volf	Name Michal	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Selective catalytic reduction		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Design of Power Machines and Equipment	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	--	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	59	TEXT PART	36	GRAPHICAL PART	10
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	The bachelor thesis contains a description of selective catalytic reduction, catalysts and their involvement. Furthermore, this work deals with the numerical simulation of gas flow in the catalyst inlet chamber. The aim of the calculation is to evaluate geometric modifications, especially speed and pressure drop. In this work is included design of geometry, discretization, solver setting and numerical calculation. The software ANSYS 19.2 was used for the whole simulation and results evaluation.
KEY WORDS	Catalytic reduction, SCR, nitrogen oxides, CFD, ANSYS, CFX, numerical simulation, catalyst, optimization

Seznam použitých veličin a symbolů

Veličina	Jednotka	Název
Q	$[J]$	Teplo
P	$[J \cdot s^{-1}]$	Výkon
E	$[W \cdot h]$	Elektrická energie
T	$[K]$	Teplota
t	$[s]$	Čas
l	$[m]$	Délka
w	$[m \cdot s^{-1}]$	Relativní rychlost proudění
p	$[Pa]$	Tlak
Δp	$[Pa]$	Tlaková ztráta
\dot{m}	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní tok
I	$[\%]$	Intenzita turbulence
U_k	$[m \cdot s^{-1}]$	Průměrná rychlost proudění
K_Q	$[m \cdot kg^{-4}]$	Kvadratický rezistentní koeficient
W	$[-]$	Hmotnostní koncentrace
M	$[g \cdot mol^{-1}]$	Molární hmotnost
X	$[-]$	Objemová koncentrace
r	$[J \cdot K^{-1} \cdot g^{-1}]$	Specifická plynová konstanta
R	$[J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}]$	Univerzální plynová konstanta
c_p	$[J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita při stálém tlaku
Re	$[-]$	Reynoldsovo číslo
y^+	$[-]$	Bezrozměrná vzdálenost stěny

Další označení a zkratky

<i>SCR</i>	Selektivní katalytická redukce
<i>SNCR</i>	Selektivní nekatalytická redukce
<i>TUV</i>	Teplá užitková voda
<i>REZZO</i>	Registr emisí a zdrojů znečištění ovzduší
<i>OECD</i>	Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj

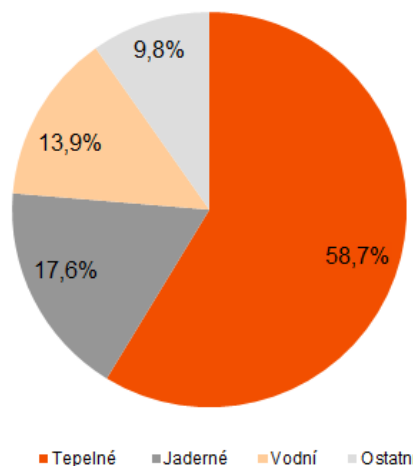
Obsah

1.1.	Monitorování zdrojů znečišťující ovzduší	11
1.2.	Emisní norma EURO	13
2.1.	Kogenerace.....	14
2.2.	Trigenerace.....	15
3.1.	Primární metody.....	16
3.2.	Sekundární metody.....	16
3.2.1.	Radiační metoda	16
3.2.2.	Selektivní katalytická redukce (SCR).....	17
3.2.3.	Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)	18
4.1.	Geometrie katalyzátorů	19
4.1.1.	Vliv monolitické geometrie	20
4.2.	Základní konfigurace katalyzátoru.....	23
4.3.	Nežádoucí reakce	24
6.1.	Atomizér.....	26
6.1.1.	Tlakový atomizér	26
7.1.	Základní metody.....	27
7.1.1.	Metoda konečných prvků.....	27
7.1.2.	Metoda konečných objemů.....	27
7.1.3.	Metoda konečných diferencí.....	27
7.2.	Turbulentní proudění.....	28
7.2.1.	DNS - Přímá numerická simulace	28
7.2.2.	LES - Metoda velkých vírů.....	28
7.2.3.	RANS - Metoda časového středování NS rovnic	28
8.1.	Zadaná geometrie a její zjednodušení	29
8.2.	Návrh možných variant	31
8.2.1.	Varianta 1.....	31
8.2.2.	Varianta 2.....	31
8.2.3.	Varianta 3.....	32
8.3.	Verifikace sítě	33
8.4.	Nastavení hlavních parametrů výpočtu.....	35
8.5.	Nastavení okrajových podmínek.....	36
8.5.1.	Vstup/výstup	36
8.5.2.	Stěna.....	36
8.6.	Porézní médium	37
8.7.	Metodika vyhodnocování.....	40

10.1.	Výsledné hodnoty	45
11.1.	Výsledné hodnoty	47
12.1.	Výsledné hodnoty	49
16.1.	Příloha A.....	56
16.2.	Příloha B.....	58

1. Úvod

Spotřebitelská náročnost na energii ve světě stále roste, a to má škodlivý vliv na globální ekologii. Výrobu elektřiny zajišťují z 58,7% tepelné elektrárny [1], které spalují fosilní paliva a jsou tak velmi důležitým zdrojem škodlivých látek vypouštěných do ovzduší, což znázorňuje Obr. 1. Spalováním vznikají nebezpečné emise (NO_x , CO_x , SO_x a další) a při nedodržení správných postupů se mohou dostat do atmosféry. [2] Ve vzduchu tyto oxidy mají neblahý vliv na životní prostředí, především na lesy a sliznice dýchacích orgánů většiny živočichů, a to i lidí, proto má smysl se tímto problémem zabývat a vyvíjet stále nové postupy snižování NO_x . [2]



Obr. 1 Struktura světové výroby elektřiny v zemích OECD (2017) [1]

Označením NO_x se myslí oxidy dusíku. NO_{x-y} vznikají spalováním fosilních paliv, kde probíhá oxidace dusíku ve vzduchu. Oxid dusnatý (NO) je relativně neškodný plyn, ale jakmile se uvolní do atmosféry, reaguje během několika minut s kyslíkem, aby vytvořil oxid dusičitý (NO_2). Který je dráždivý a kyselý a v atmosféře může dále reagovat s OH-radikály za vzniku kyseliny dusičné. Tímto způsobem NO_x přispívá k vytvoření kyselého deště nebo fotochemického smogu. [3]

Tato bakalářská práce se zaměřuje především na snižování emisí výše zmíněných dvou druhů oxidů dusíku, vznikajících ve stacionárních zdrojích znečištění metodou selektivní katalytické redukce (SCR). Mezi stacionární zdroje řadíme různé teplárny, domácí kotle a elektrárny. Pro úplnost dodejme, že vyjma stacionárních zdrojů existují i mobilní jednotky, což jsou především motory dopravních prostředků.

1.1. Monitorování zdrojů znečišťující ovzduší

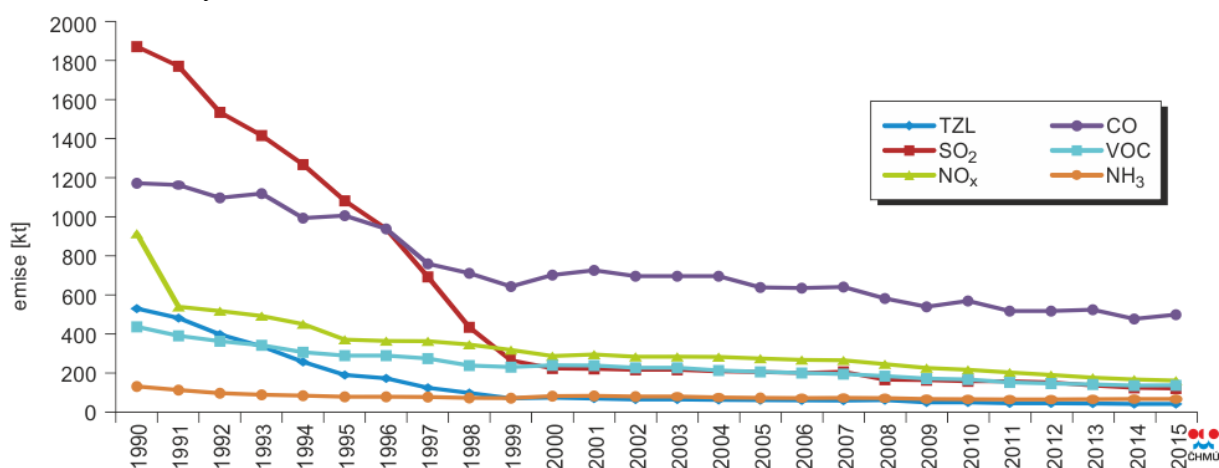
Ministerstvo životního prostředí zajišťuje registr emisí a zdrojů znečištění ovzduší (REZZO). REZZO eviduje zdroje (stacionární a mobilní), které výrazně znečišťují kvalitu ovzduší, v souladu se zákonem (č. 86/2002 Sb.) a je spravován Českým hydrometeorologickým ústavem. Tento registr každým rokem publikuje bilanci emisí ze všech typů zdrojů a zahrnuje pevné částice, oxid siřičitý (SO_2), oxidy dusíku (NO_x), oxid uhelnatý (CO) a uhlovodíky (C_xH_y). Registr definuje následující kategorie zdrojů: [4]

- REZZO 1 – velké stacionární zdroje znečištění s tepelným výkonem nad 5MW a zařízení na speciální technologické procesy. Řadí se sem různé spalovny, tepelné elektrárny a další bodové zdroje.
- REZZO 2 – střední stacionární zdroje znečištění s tepelným výkonem od 0,2 do 5MW. Patří sem uhelné lomy a plochy s možností hoření nebo úletu znečišťujících látek.

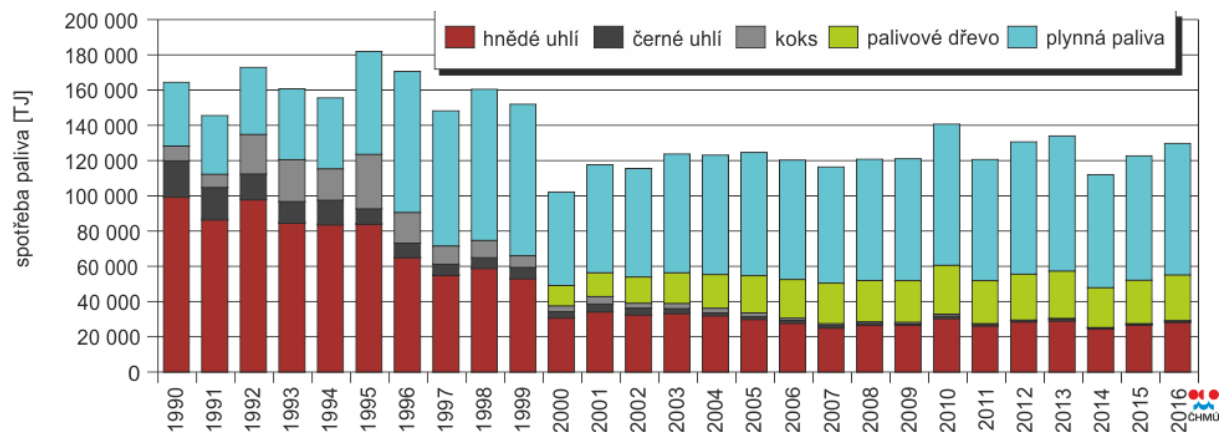
Stejně jako REZZO 1 se sledují jednotlivě a provozovatelé jsou povinni každý rok aktualizovat data hodnot znečištění.

- REZZO 3 – malé stacionární zdroje znečištění spalující palivo, o tepelném výkonu nižším než 0,2 MW, proto jsou zde evidovány plochy, kde jsou prováděny práce znečišťující životní prostředí a domácí topeniště. Plošné zdroje jsou monitorovány hromadně, domácí topeniště jsou odhadovány na základě informací od energetických a teplárenských závodů. Na Obr. 3 lze vidět vývoj spotřeby těchto zdrojů.
- REZZO 4 – mobilní zdroje znečištění ovzduší. Zde velkou roli hrají automobily se spalovacími nebo jinými motory, vlaky, plavidla, letadla apod.

Díky stále se zpřísnujícím limitům celkové emise stále klesají. Na Obr. 2 lze spatřit snižující se trend celkových emisí.



Obr. 2 Vývoj celkových emisí v letech 1990–2015 [5]

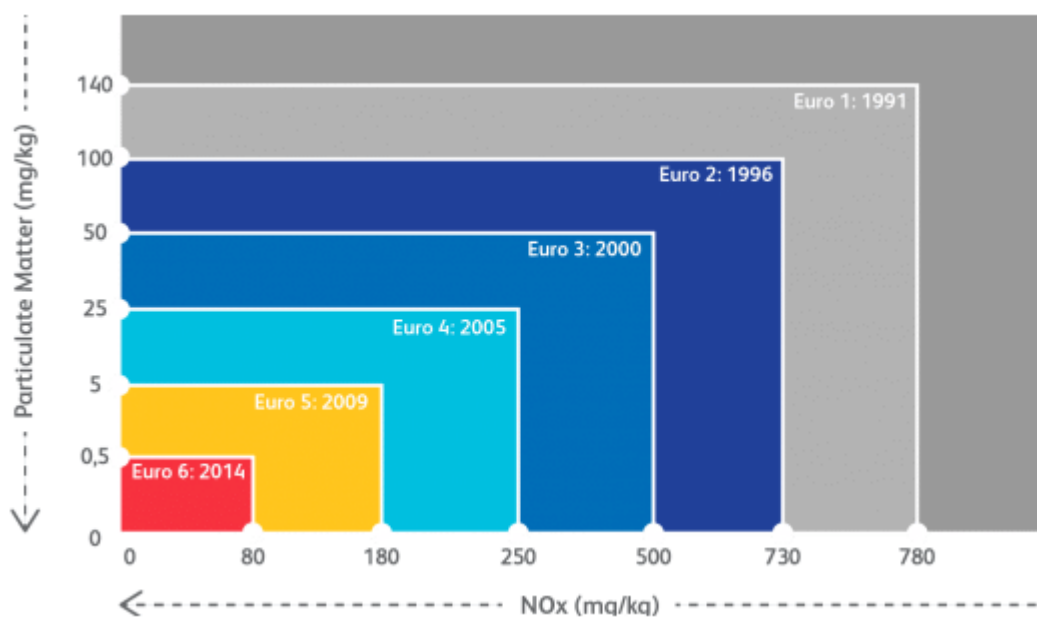


Obr. 3 Spotřeba paliv zdrojů REZZO 3 v letech 1990–2016 [5]

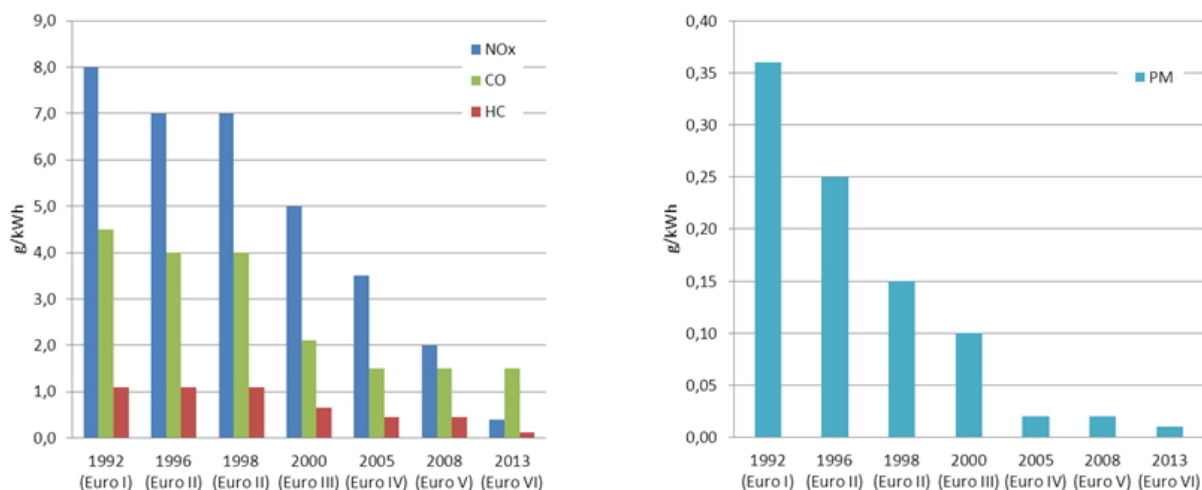
1.2. Emisní norma EURO

Norma EURO omezuje množství výfukových exhalací (CO, HC, NO_x, PM) vypouštěné do ovzduší. První emisní normování vzniklo v Kalifornii v roce 1968 a první emisní norma EURO platná v zemích Evropské unie vznikla v roce 1992. Od tohoto roku přibližně každé čtyři roky vchází v platnost nová norma EURO, která je z principu v povolených emisních limitech přísnější než norma předchozí. V současnosti je v platnosti norma EURO 6. [6]

Znárodnění emisních limitů lze vidět na Obr. 4, kde je vertikální osa reprezentovaná produkcí pevných částic a horizontální osa znázorňuje limity NO_x. Tyto limity musí také splňovat i motory o větším výkonu, na Obr. 5 lze vidět vývoj normy pro těžké dieslové motory s výkonem nad 85kW.



Obr. 4 Historie emisních limitů pro Evropu [7]



Obr. 5 Emisní normy EU pro těžké dieslové motory s výkonem > 85kW [8]

2. Kombinovaná výroba tepla a elektřiny

2.1. Kogenerace

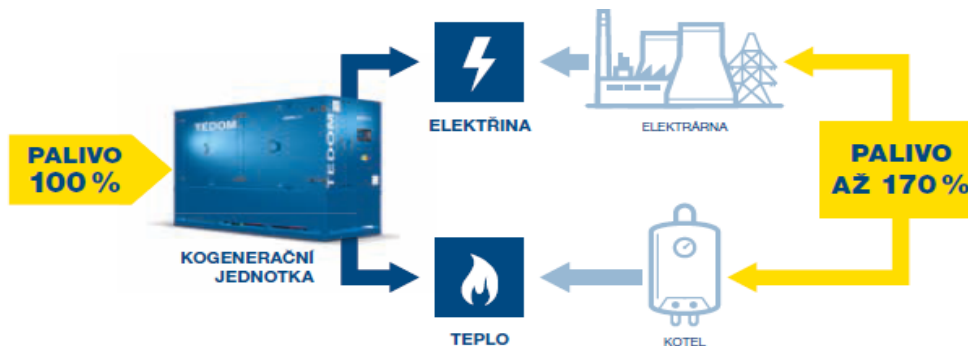
Kogenerace neboli kombinovaná výroba tepla a elektřiny je ekologický a velice efektivní způsob zpracování vznikajícího tepla při výrobě samotné elektřiny, které by se jinak bez využití vypustilo do ovzduší. Díky vysokému množství využití primární energie paliva pro účely vytápění a k ohřevu teplé užitkové vody (TUV), spotřebujeme méně paliva a tím i vyprodukujeme méně škodlivých spalin ze spalování fosilních paliv. Níže přiložený Obr. 6 přehledně znázorňuje energetické toky s a bez kogenerace, jak si lze povšimnout, tak oddělená výroba tepla a elektřiny spotřebuje o 59% více energie ve vstupním palivu proti kombinované výrobě v kogenerační jednotce.

Společnost TEDOM si je tohoto faktu vědoma a navíc využívá také zemní plyn, který už tak je charakterizován nízkými emisemi CO₂.



Obr. 6 Znárodnění energetických toků s a bez kogenerace [9]

Jak již bylo řečeno, na poli kogenerační výroby tepla a elektřiny působí firma TEDOM, kde jejich kogenerační jednotky jsou většinou u malých a středně velkých instalací na bázi plynových spalovacích motorů. Teplo ze spalin a z chlazení motoru se nejčastěji využívá přímo k přípravě teplé užitkové vody. Kogenerace se nejčastěji využívá v objektech s nároky na odběr elektřiny a tepla, což jsou především zdravotnická zařízení, školy, průmyslová střediska a průmyslové závody. Jelikož tyto (výše uvedené) typy kogeneračních jednotek nejsou závislé na počasí (slunce, vítr), jsou spolehlivým doplňkem obnovitelných zdrojů energie. Velikost kogenerační jednotky se navrhuje podle potřebného tepla, pokud se vyrábí přebytek elektřiny, je možné ji uložit do akumulátorů nebo prodat do sítě. [10]



Obr. 7 Schéma úspory energie pomocí kogenerace TEDOM [10]

2.2. Trigenerace

Tato metoda sdílí hlavní myšlenku kogenerace, tedy využít odpadní teplo při výrobě elektrické energie, kdy je kogenerační jednotka doplněna o absorpční chladicí jednotku. Absorpční chladicí jednotka využívá primárně teplo vzniklé kogenerací a přeměňuje ho na chlad, mluvíme tedy o společné výrobě tepla, elektřiny a chladu.

Častým případem využití trigenerace je výroba tepla v zimních měsících a výroba chladu v létě. Vedle toho je však možná i současná výroba všech tří druhů energie zároveň.

Na níže přiloženém obrázku (Obr. 8) lze spatřit trigenerační jednotku firmy TEDOM.



Obr. 8 Trigenerační jednotka TEDOM [10]

3. Metody snižování NO_x

Dělíme je do dvou hlavních skupin a to na primární metody (snaha o snížení NO_x při samotném spalování) a na sekundární metody (snaha o odstranění NO_x úpravou vzniklých spalin). [11] Emisní limity pro oxidy dusíků budou pravděpodobně stále klesat, a proto jsou ve výhodě nové zdroje oproti starším, které budou potřebovat radikální rekonstrukce pro zavedení primárních metod.

3.1. Primární metody

Tyto metody oproti sekundárním působí na stroj trvale a upravují spalovací proces třemi způsoby regulace a to regulací spalovací teploty, regulací kyslíku a zkrácením doby pobytu reagujících látek v kritických oblastech pro vznik NO_x. [12] Běžně se tyto způsoby používají kombinovaně, aby se dosáhlo co nejpříznivějších výsledků. Tyto metody dosahují snížení NO_x o 40-60%. [11] Mezi základní způsoby, které potlačují tvorbu NO_x, patří: [12]

- Vícestupňové spalování (stupňovitý přívod paliva, stupňovitý přívod spalovacího vzduchu, kombinace stupňovitého přívodu paliva a stupňovitého přívodu spalovacího vzduchu)
- Chlazení plamene (snížení teploty reakční zóny plamene je nejčastěji dosahováno vnitřní nebo vnější recirkulací spalin)
- Nucený odtah spalin
- Bezplamenné spalování (oxidace paliva vysoce přehřátým vzduchem až na teplotu 1000°C)

3.2. Sekundární metody

Tato opatření jsou využitelná pouze ve velkých spalovacích jednotkách, jako jsou kotle, spalovny apod. Mezi hlavní výhody patří vysoká účinnost redukce oxidů dusíků ve spalinách a to až o 90% ovšem provozní náklady jsou vyšší než u primárních metod. Tyto dodatečné metody čištění již vzniklých spalin jsou velmi často nezbytným doplňkem primárních metod, především z důvodu stále přísnějších dovolených emisní hodnot. [13] Mimo radiační metodu do této skupiny řadíme i selektivní redukci.

Selektivní redukce, tedy reakci mezi oxidy dusíku a amoniakem (NH₃) při vyšších teplotách a může být buď katalytická (SCR) nebo nekatalytická (SNCR). [11]

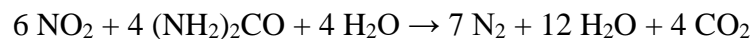
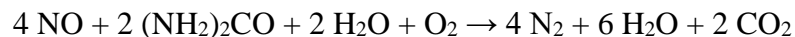
3.2.1. Radiační metoda

Toto opatření snižuje NO_x až o 80%, což je jeho velká výhoda, ovšem tuto výhodu převyšuje nevýhoda vysoké energetické náročnosti, proto se v České republice prozatím nevyužívá. Radiační metoda je založená na podobném procesu jako selektivní katalytická redukce s tím rozdílem, že funkci katalyzátoru nahrazuje působení urychlených elektronů, které ozařují spaliny. To má za následek vznik radikálů, které s kombinací s přítomným kyslíkem a čpavkem vedou ke vzniku síranu amonného ((NH₄)₂SO₄) a dusičnanu amonného (NH₄NO₃). Síran amonný a dusičnan amonný se nejčastěji dále využívají jako hnojivo. [13]

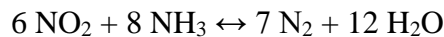
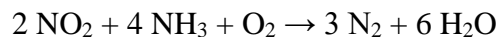
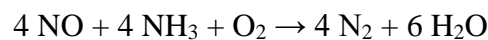
3.2.2. Selektivní katalytická redukce (SCR)

Tato sekundární metoda redukce NO_x ze spalin je instalována do zařízení po celém světě, důvodem je její dostupnost a nižší potřebné teploty pro redukci. [14] SCR se nejčastěji využívá v elektrárnách, spalovnách odpadů a v plynových turbínách. Díky přítomnosti katalyzátoru probíhá reakce mezi močovinou (NH₂) nebo amoniakem (NH₃) s oxidy dusíku při teplotě 300 až 400°C. Do spalin o teplotě 170 až 510°C je vstřikováno redukční činidlo a v katalyzátoru se následně redukuje NO_x na N₂. Pro nejvyšší účinnost redukce je potřeba docílit stechiometrického poměru (NO_x/redukční činidlo). [14]

- Močovina jako redukční činidlo [14]:



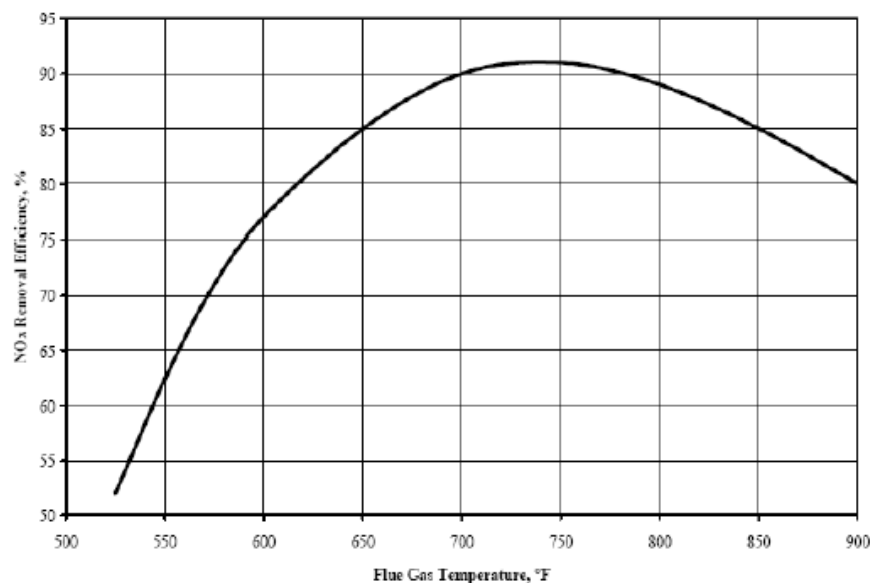
- Amoniak (čpavek) jako redukční činidlo [14]:



Amoniak se používá ve formě vodného roztoku (amoniaková voda) nebo ve zkapalněném stavu a je vstřikován systémem trysek tak, aby bylo dosaženo homogenního poměru mezi amoniakem a spalinami. Před použitím se čpavek však musí odpařit na plynný čpavek. Pro úplné promíchání se do kanálu umísťuje míšič. Pro malé zařízení (<50MW) se močovina používá ve formě granulí, které se před aplikací rozpouštějí ve vodě.

Velkou výhodou je, že v procesu SCR se 80 až 90% NO_x odstraní při 300 až 400°C různými redukčními činidly, jako jsou CH₄, CO, H₂ a NH₃. [15] Další výhodou je možnost spalování mnoha druhů paliv (zemní plyn, procesní plyny a uhlí). [14]

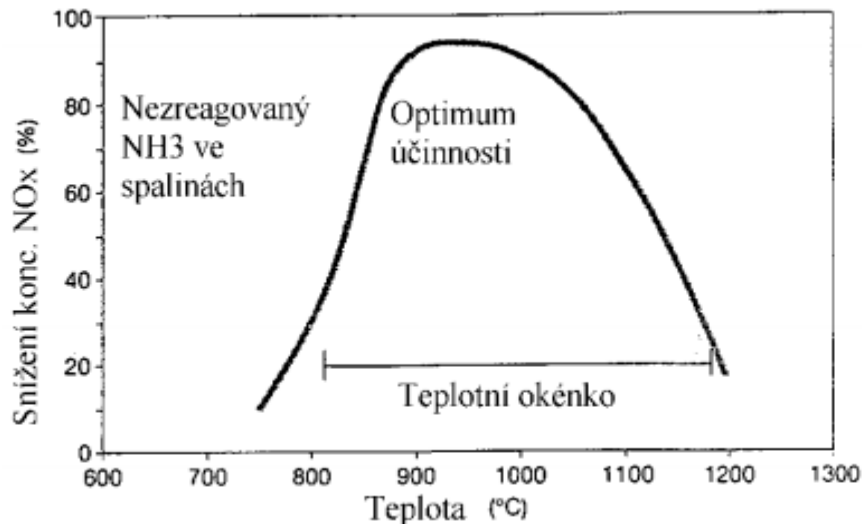
Často využívané metalické katalyzátory mají nejvyšší účinnost odstraňování NO_x při 400°C (cca 750°F), to je znázorněno na Obr. 9.



Obr. 9 Závislost efektivity odstraňování NO_x na teplotě pro metalické katalyzátory [16]

3.2.3. Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)

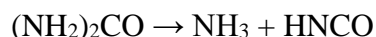
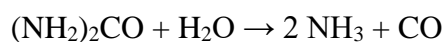
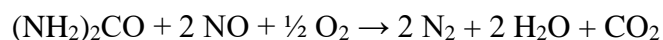
Vznikla až po objevení SCR jako alternativní selektivní metoda redukce NO_x . Výhodou je, že zde nevzniká otrava katalyzátoru čínidlem. Problémem je, že vstřikování redukčního činidla musí probíhat v teplotním rozmezí 800-1150°C (Obr. 10), doba pobytu nad 1s přináší optimální snížení NO_x . [17] V praxi se u velkých průmyslových jednotek používá amoniak, amoniaková voda a močovina. Amoniak (čpavek) je nebezpečná látka, která vyžaduje složitější technologie skladování. Proto se často nahrazuje močovinou, kdy je ale nutné uvažovat vznik koroze. Účinnost této metody se uvádí mezi 40-70% a pořizovací náklady jsou přibližně o 80% nižší než náklady na SCR. [13]



Obr. 10 Účinnost SNCR na teplotě spalín [13]

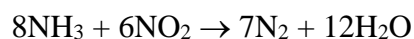
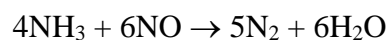
Na obr. 9 lze vidět graf závislosti účinnosti SNCR na teplotě spalín, kdy ideální rozsah teplot udává teplotní okénko.

- Močovina jako redukční činidlo [17]

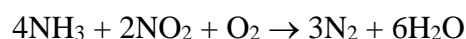
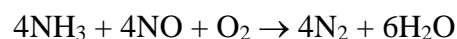


- Amoniak (čpavek) nebo amoniaková voda jako redukční činidlo [17]

- bez přítomnosti kyslíku:



- s přítomností kyslíku:



Snížení NO_x pomocí SNCR lze dosáhnout tepelným De NO_x procesem, kde je amoniak jako redukční činidlo, dále procesem NO_xOUT (močovina jako redukční činidlo) a procesem RAPRE NO_x (využívá kyselina isokyanatá). [15]

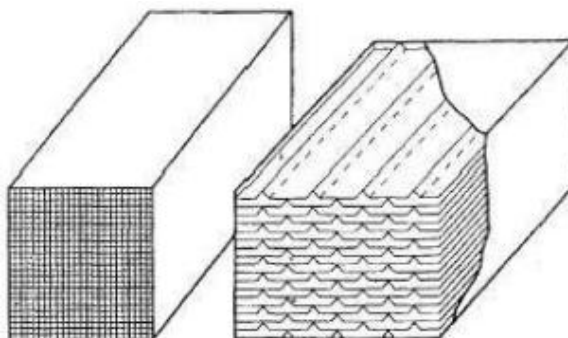
4. Katalyzátory

Pro správný provoz a požadovaný výkon systému SCR je velice důležitý správný výběr katalyzátoru. SCR katalyzátory jsou složeny z aktivních kovů nebo keramiky s vysoce porézní strukturou. Materiál katalyzátoru a jeho konfigurace určují vlastnosti katalyzátoru. Časem aktivita katalyzátoru klesá, vyžaduje výměnu, praní nebo čištění, omlazení a v neposlední řadě regeneraci. [16]

Původně SCR katalyzátory byly z drahých kovů jako je například platina (Pt). Na konci sedmdesátých let začali japonští výzkumníci používat dostupnější kovy sestávající z vanadu (V), titanu (Ti) a wolframu (W), což vedlo k výraznému snížení nákladů na katalyzátory. V dalších letech se pro rozšíření rozsahu reakčních teplot používali oxidy kovů, a to oxid titaničitý (TiO_2), oxid zirkoničitý (ZrO_2), oxid křemičitý (SiO_2) a oxid vanadičitý (V_2O_5). Také se začaly používat zeolity (krystalické silikáty oxidu hlinitého), které jsou schopné pracovat při teplotě 350 až 600°C. Od roku 1980 do roku 2012 klesly náklady na katalyzátor z přibližně 34 000\$/m³ až na 5 000\$/m³. [16]

4.1. Geometrie katalyzátorů

Geometrie katalyzátorů mohou mít odlišné strukturální podoby, nejčastěji se ale vyskytují v deskovém provedení nebo jako medové plástve.



Obr. 11 Katalyzátor typu medových pláství (vlevo) a deskový katalyzátor s výstupky (vpravo) [13]

Katalyzátory typu medových pláství jsou typicky charakterizované čtvercovým kanálem a získávají se vytlačováním katalytické pasty. Prvky mají obvykle rozměry 150x150x(350 až 1000)mm, tloušťka stěn je 0,7 až 1,4mm. [18] Jsou skládány do standardních ocelových modulů, které jsou pak umístěny uvnitř systému ve formě vrstev, viz Obr. 11.

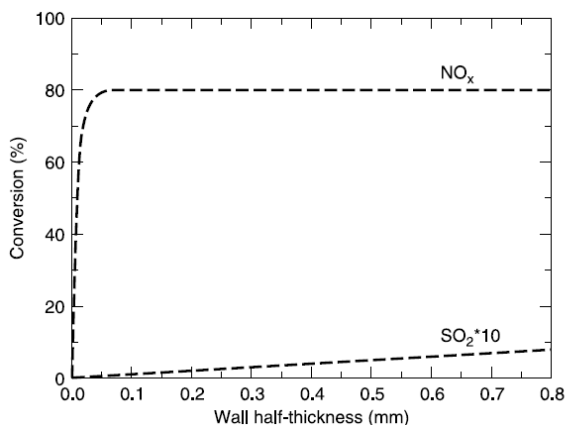
Deskové katalyzátory se vyrábí nanesením katalytického materiálu na síť z nerezové oceli nebo perforovanou kovovou desku. Stejně jako u voštinových matic jsou desky skládány do modulů a vloženy do systému ve vrstvách. Využívají se hlavně pro aplikace s vysokým obsahem prachu a vysokým obsahem síry (uhelné elektrárny). Oproti voštinovému typu jsou deskové katalyzátory méně náchylné k zablokování (jiná struktura). Desky jsou velmi tenké (0,8 až 1,2mm), takže tlaková ztráta po průchodu je nízká. [18]

4.1.1. Vliv monolitické geometrie

Při konstrukci monolitické geometrie vytlačovacím procesem jsou často kladena technická omezení, a to zejména mechanickými vlastnostmi výtlačku. Výsledné geometrické rysy katalyzátoru jsou také ovlivňované specifickou aplikací systému SCR tedy vysokoprašné nebo nízkoprašné uspořádání (tyto pojmy budou blíže přiblíženy v kapitole: 4.2).

V této kapitole je popsán vliv geometrie, která má typické parametry monolitů (tloušťka stěny, velikost kanálu, tvar kanálu) jak na DeNOx reakci, tak na oxidaci SO₂.

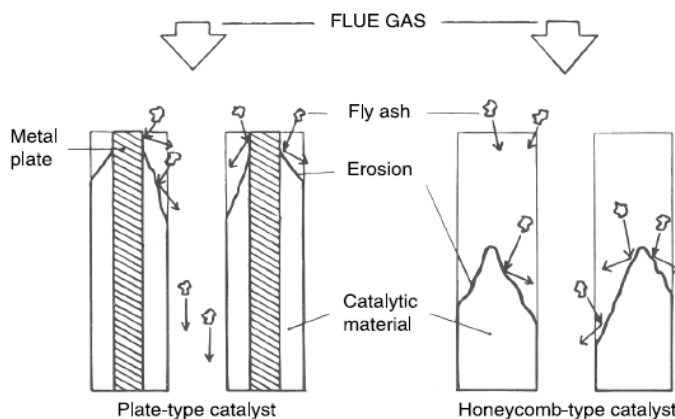
Konverze NO_x je ovlivňována tloušťkou stěny monolitu pouze do velmi malé kritické hodnoty, při tloušťce stěny větší než tato kritická hodnota konverze NO_x již ovlivňována není. Konverze SO₂ se zvyšuje lineárně s rostoucí tloušťkou stěny. Závislosti konverze NO_x a SO₂ jsou přehledně zobrazeny na obrázku níže (Obr. 12). [18]



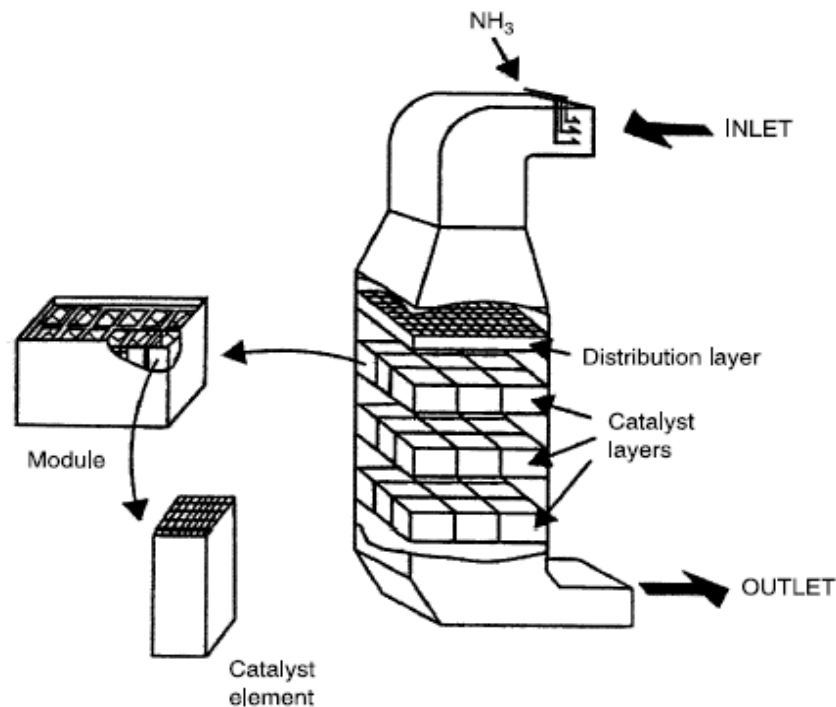
Obr. 12 Vliv poloviční tloušťky monolitových katalyzátorových stěn na konverze NO a SO₂ [18]

Konstrukce monolitických katalyzátorů pro systém SCR by vzhledem k těmto závislostem měla usilovat o realizaci velmi tenkých katalytických stěn. Obr. 11 například ukazuje, že snížení poloviny tloušťky stěny katalyzátoru z 0,7 na 0,2mm nemá žádný vliv na efektivitu konverze NO_x, ale způsobuje velice významné snížení oxidace SO₂ a to až o 78%.

Je třeba poznamenat, že volba velikosti kanálu musí také zohledňovat problémy s ucpáváním a erozí. Proudící tok spalin vždy obsahuje určité množství pevných částic (popílek), tyto částice negativně ovlivňují životnost katalyzátorů, a proto je důležité dbát na pravidelné kontroly. Popílek svými nárazy může způsobit značné poškození a tím i ohrozit správnou redukci oxidu dusíku. Vliv nárazů pevných částic na katalyzátor a mechanika eroze je znázorněna na Obr. 13. [18]



Obr. 13 Mechanismus eroze v deskových a voštinových katalyzátorech [18]



Obr. 14 Struktura monolitického katalyzátoru [18]

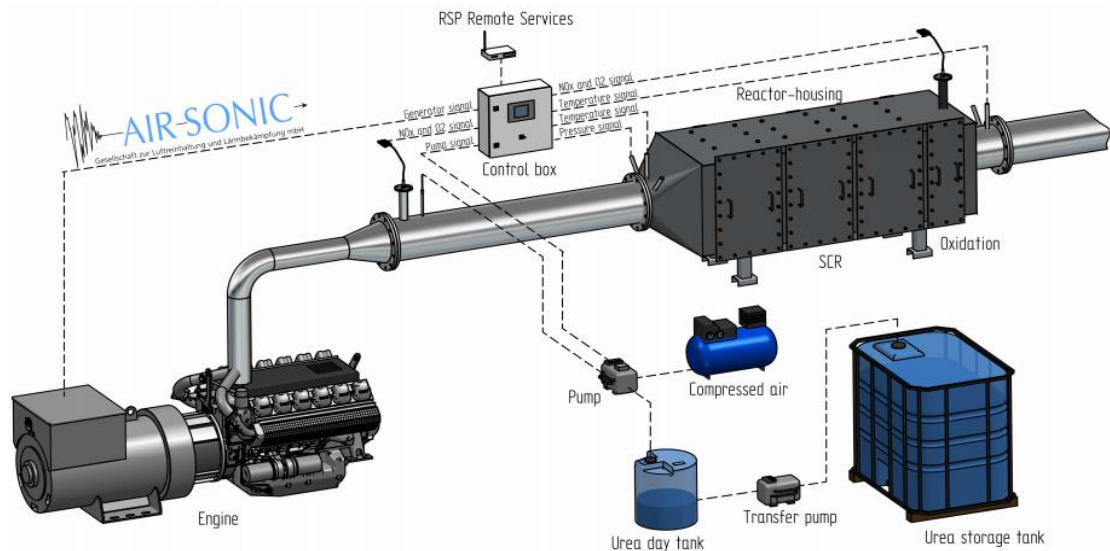
Typy katalyzátorů používané pro selektivní katalytickou redukci: [14]

- Oxidy základních kovů – základním prvkem zde je oxid titaničitý (TiO_2) společně s vanadem, wolframem a molybdenem. Většinou se používá oxid vanadičitý (V_2O_5) s nižším množstvím oxidu wolframového (WO_3) přidaným pro prodloužení teplotního okénka a oxidu křemičitého (SiO_2), který stabilizuje strukturu. Dále se přidává malé množství oxidu molybdenového (MoO_3), který ochrání katalyzátor před otravou ze vzniklých emisí. Tento katalyzátor pracuje při teplotách 300 až 450°C.
- Zeolity – krystalické, přírodně porézní nebo syntetické. Používají se při teplotách mezi 350 až 600°C.
- Oxidy železa – kombinace železných oxidů a fosforečnanu železa.
- Aktivní uhlík – skládá se z práškového uhlí nebo lignitu (karbonizované hnědé uhlí) a mísí se s inertními prvky za vzniku pelet. Provozní teploty jsou nízké a to 100 až 220°C.

Zlepšování katalyzátorů v průběhu času má za následek snížení nežádoucích vedlejších reakcí, jako je například konverze oxidu sírového (SO_2 na SO_3). Inovování konstrukce katalyzátorů zvyšuje jeho aktivitu¹, plochu povrchu na jednotku objemu a teplotní rozsah pro redukční reakce. U kotlů spalujících uhlí dodavatelé SCR katalyzátorů obvykle garantují životnost 8 000 až 24 000 hodin, pro aplikace využívající zemní plyn až 32 000 hodin.

Konfigurace katalyzátoru jsou obecně konstrukce keramických plástů a plechů (monolit) v reaktoru s pevným ložem, které poskytují vysoký poměr povrchu k objemu. Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, pro prodloužení životnosti katalyzátoru se vrstvy katalyzátoru nahrazují nebo promývají (odstranění vrstvy nanesených částic), čistí, omlazují a regenerují (obnovení katalytické aktivity). [16]

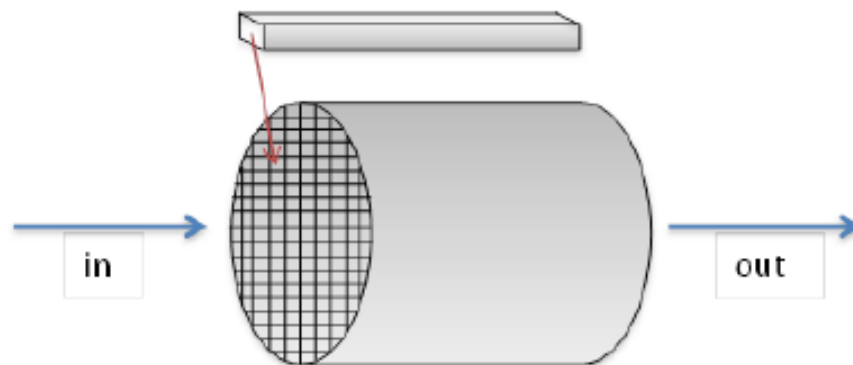
¹Aktivita katalyzátoru - poměr rychlosti chemické reakce dosažené za použití daného katalyzátoru k rychlosti chemické reakce za vhodně volených standardních podmínek.



Obr. 15 Uspořádání SCR katalyzátoru u velkých stacionárních zdrojů [19]

Pro požadovanou účinnost je důležité dbát na co nejdokonalejší promíchání směsi před vstupem do katalyzátoru. Vzhledem k tomu, že je katalyzátor rozdělen na kanály, nedojde k významnému míšení po vstupu plynu do katalyzátoru. Proto je důležité distribuovat účinnou látku rovnoměrně již před vstupem do katalyzátoru a tím ji zpřístupnit ve všech kanálech. [20] Katalyzátory se používají i u velkých stacionárních zdrojů, kde je také nutné zajistit dokonalé promíchání směsi před vstupem, uspořádání i velkých zdrojů je zobrazeno na Obr. 15 a schéma vstupu do katalyzátoru je pak zobrazeno na Obr. 16.

Průchozí kanály v katalyzátorech mají různě velké průměry, které se optimalizují na základě prostředí, ve kterém je katalyzátor využíván. Mezi hlavní faktory určující velikost kanálu patří charakteristiky prachu a tlaková ztráta při průchodu katalyzátorem, přičemž by se zátěž vlivem prachu měla minimalizovat a tlaková ztráta by měla být v rozmezí povolené ztráty. Velikost katalyzátoru, potřebného pro požadovanou účinnost, je závislá na jeho aktivitě, objemu spalin, chemickém složení plynu, katalytických jedech, požadovaném snížení NO_x a teplotě spalin. [14]



Obr. 16 Schématická podoba monolitického katalyzátoru [20]

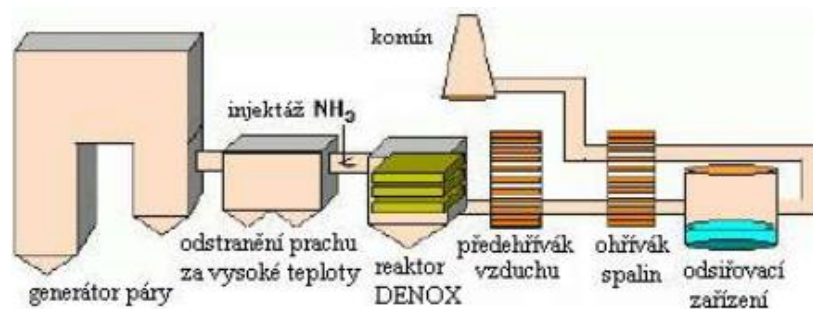
4.2. Základní konfigurace katalyzátoru

Níže je uveden přehled základních zapojení katalyzátorů zohledňující množství prachu a koncový plyn:

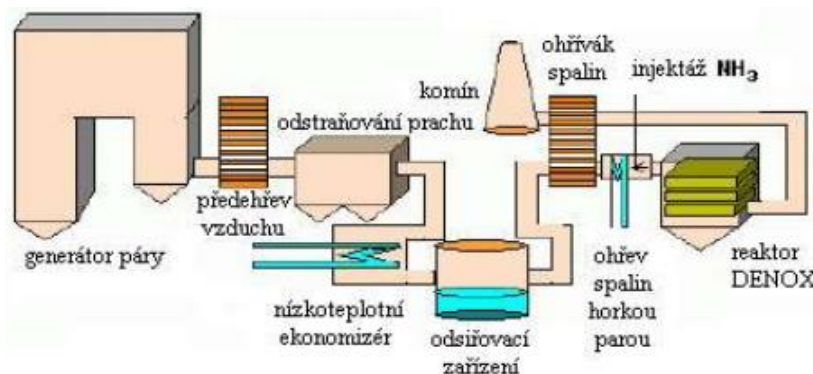
- Vysokoprašné uspořádání (Obr. 17) se používá pro zpracování proudu spalin s vysokým obsahem pevných částic, proto jsou zde použity katalyzátory s velkými kanálovými otvory (6mm) a tloušťkou stěny (1,2 až 1,4mm). Aby se minimalizovalo usazování prachu a eroze katalyzátoru je tok plynu vertikálně dolů. [18] U tohoto uspořádání spaliny obsahují mimo většího obsahu prachu také katalytické jedy, které snižují aktivitu katalyzátoru a tím i účinnost odstraňování No_x . [14]
- Nízkoprašné uspořádání (Obr. 18) má obecně delší životnost než vysokoprašné, to je dáno menším mechanickým poškozením katalyzátoru od pevných částic. Toto uspořádání musí obsahovat odlučovače pro vysokoteplotní prach. [14]
- Uspořádání pro koncový plyn (Obr. 19) má objem katalyzátoru menší než vysokoprašné uspořádání; používají se katalyzátory s menší roztečí. Toto uspořádání obsahuje přídavné hořáky, které přehřívají vstupující spaliny. Hořáky k ohřevu často využívají zemní plyn. [14]



Obr. 17 Uspořádání DeNOx při SCR ve vysokoprašném prostředí [14]



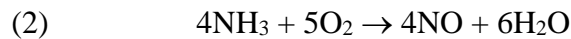
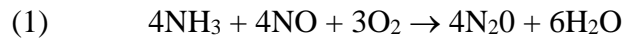
Obr. 18 Uspořádání DeNOx při SCR v nízkoprašném prostředí [14]



Obr. 19 Uspořádání DeNOx při SCR pro koncové zařízení [14]

4.3. Nežádoucí reakce

Při teplotách vyšších než 400°C je pravděpodobné, že amoniak (NH₃) bude na povrchu katalyzátoru reagovat na oxid dusný (N₂O) a při ještě vyšší teplotě může amoniak oxidovat (reakce 1 a 2). Tyto teploty jsou dosaženy při vysokém pracovním zatížení motoru. [20]



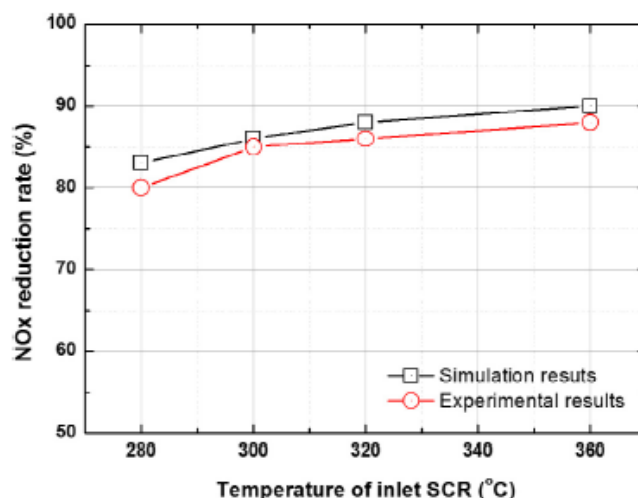
Díky tomu že tyto reakce spotřebovávají amoniak, je maximální konverze NO_x limitována množstvím zreagovaného amoniaku. Vznik oxidu dusného prokazatelně přispívá ke globálnímu oteplování, což je další důvod pro zamezení této reakční cesty. [20]

Za určitých podmínek může nedokončený rozklad močoviny způsobit tvorbu nežádoucích vedlejších produktů s vysokou molekulovou hmotností, které mohou vytvářet vrstvu na povrchu SCR systému. Usazování pevných částic má vliv na tvorbu NH₃ a povrch katalyzátoru může být ovlivněn tím, že se sníží účinnost snižování NO_x. Tvorba tuhých usazenin z vedlejších produktů závisí hlavně na teplotě. Bylo zjištěno, že tuhé usazeniny v SCR systémech vznikají při teplotách pod 300°C. Většina usazenin se však odpaří při teplotách nad 350°C. Teploty nižší než 300°C jsou dosaženy tehdy, když má motor relativně nízké pracovní zatížení a proud výfukového plynu není vyhříván na vyšší teplotu. [20]

5. Mísení močoviny a vody v SCR

V důsledku vysoké účinnosti metody SCR se aplikace tohoto systému velice zpopularizovala a bylo provedeno mnoho různých experimentů, při kterých bylo zjištěno, že na vstupu a výstupu směšovače ve směšovací trubce se vytváří tenký film. Film vzniká tak, že kapičky vody smíchané s močovinou naráží na stěny, kde se následně usazují. Numerické simulace v porovnání s příslušnými experimenty ukazují, že se dá vytváření stěnového filmu a různé další vlastnosti tohoto systému s velikou přesností předpovídat. [21]

V technologii SCR založené na využívání roztoku močoviny (cca 40%) a vody (cca 60%) se směs vstříkuje do horkých výfukových plynů a následně vzniká redukční činidlo odpařením vody. Roztok vody (67,5%) a močoviny (32,5%) je často označován jako AdBlue. Homogenní distribuce redukčního činidla před katalyzátorem je důležitým faktorem pro správnou konverzi NO_x. [21]



Obr. 20 Porovnání experimentu a simulace v katalyzátoru na bázi vanadu [21]

Pro dosažení požadovaných limitů emisní normy EURO 6 je zejména pro těžké dieselové motory využívající metodu SCR mimo dosažení homogenního roztoku před katalyzátorem také důležité sledovat akumulaci nánosů v systému. Toto jsou základní klíčové parametry pro konstrukci směšovače (mixéru). [22]

Dieselové motory jsou dominantním zdrojem energie pro střední a těžké použití užitkových vozidel jako jsou například nákladní automobily, autobusy nebo off-road vozidla v posledních desetiletích. Ve srovnání s benzínovými motory mají vznětové motory řadu výhod, mezi hlavní řadíme vyšší trvanlivost a zvýšený točivý moment. Nevýhody těchto motorů jsou škodlivé výfukové plyny vypouštěné do ovzduší způsobené spalováním nafty. Tyto výfukové plyny, dle veřejného znečištění dělíme na tři základní skupiny a to:

1. Částicové látky - směs pevných nečistot, které vznikají při spalování nafty. Tyto látky tvoří tisíce chemikálií, které jsou převážně karcinogeny. Malá velikost částic, která je přibližně 1-2 μm , má přímý účinek na veřejné zdraví především v plicích.
2. Oxid uhelnatý (CO) - toxická chemikálie.
3. Oxidy dusíku (NO_x) – skleníkové plyny.

Efektivní mixér ve spojení s dobře navrhnutým systémovým uspořádáním zajišťuje vyšší výkon míšení roztoku. Na Obr. 21 je zobrazen statický mixér, který je umístěn v takové vzdálenosti, aby se spaliny po průchodu mixérem dostatečně promíchaly.

Pro dosažení spolehlivého návrhu systému SCR je třeba vzít v úvahu mnoho parametrů, jako je míchací výkon, riziko ukládání močoviny, účinnost snižování NO_x , protitlak systému a trvanlivost. [22]

Účinný návrh konstrukce mixéru by měl být založen na povaze vybraného injektoru, který přivádí močovinu.



Obr. 21 Osmibřítý statický mixér [20]

Postup míchání se liší v závislosti na vlastnostech toku, kde turbulentní tok poskytuje efektivnější míchání než laminární a je tedy žádoucím stavem. Zavedení mixéru vždy zvyšuje tlakovou ztrátu v celém systému ve srovnání s případem, kde není použit žádný mixér.

Vzhledem k tomu, že směšovače jsou příznivé jak pro nízké tlakové ztráty, tak i pro vysokou účinnost míchání, design mixéru je důležitým parametrem. Cílem směšovače je zvýšit průtokové míchání vytvořením turbulentního toku a zvýšit odpařování roztoku.

6. Injektory

Roztok AdBlue je vstřikován (rozprašován) do proudu výfukových plynů injektorem (sprejem). Rozprašování kapalin je běžný provozní proces, kde se objem tekutiny přeměňuje na sprejový systém tak, aby rozhraní plyn-kapalina byla co největší (výměna mezi fázemi se zlepšuje se vzrůstajícím povrchem). Interakce mezi postřikem a stěnou zahrnuje složité mechanismy, které závisí na několika parametrech včetně vlastností kapiček, okolního plynu a stěny.

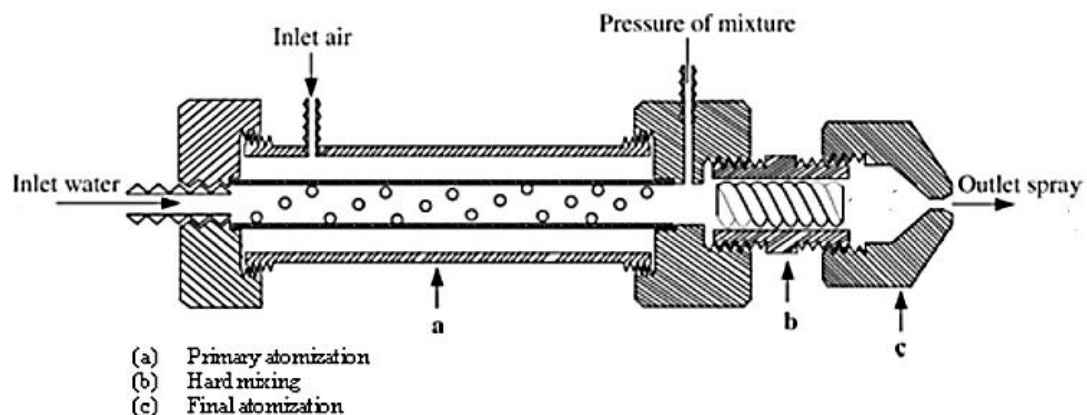
6.1. Atomizér

Samotný proces rozprašování je způsob rozpadu tekutiny a následný vznik sprejové struktury. Použitý princip se v různých případech liší a závisí na vlastnostech kapaliny, která má být atomizována. Viskozita, povrchové napětí a hustota jsou důležité vlastnosti, které se mohou mezi jednotlivými materiály značně lišit. Lze říci, že typ rozprašovače, používaného pro konkrétní účel, závisí na: [20]

- Vlastnostech kapalného materiálu
- Propustnosti kapalného materiálu
- Požadované vlastnosti postřiku

6.1.1. Tlakový atomizér

Rozprašovač používaný ve většině technických aplikací je tlakový rozprašovač s tryskou, který je používán v systému SCR u společnosti Volvo Penta. V tlakovém rozprašovači je kapalina vytlačována malým otvorem za pomoci tlaku do plynu a tryska s prostým otvorem vytváří plný kuželový sprej. Kapalina se v důsledku rozdílu rychlosti rozpadne na malé kapky (v řádech stovek mikronů). Tento typ atomizéru je typicky využíván u kapalin s nízkou viskozitou. Pro trysky s plochým otvorem je nejdůležitější prvek rozprašování rozměr tohoto otvoru. Nejlepšího rozpadu se dosáhne, když je co možná nejmenší. Nicméně, čím menší je, tím je obtížnější udržet otvor bez cizích částic. To znamená, že při výběru velikosti clony vždy existuje kompromis. Díky tomu je minimální velikost otvoru obvykle omezena na přibližně 0,3mm. Nedostatkem tlakového atomizéru je přirozeně potřeba tlakové kapaliny, hmotnostní průtok je nízký a vzniklé kapičky jsou relativně velké. [20] Na Obr. 22 lze vidět tlakový vírový rozprašovač.



Obr. 22 Tlakový vírový atomizér [23]

7. Numerické simulace proudění

Vzhledem k faktu, že v této práci je část věnovaná numerické simulaci zadané úlohy, je v této kapitole sepsána základní charakteristika numerických simulací proudění.

7.1. Základní metody

Numerické výpočty jsou nezbytné k získání představy o chování proudů, vírů, rozložení rychlostí a dalších vlastností daného média, které proudí v předem připravené geometrii. Analyticky lze řešit jednoduchá proudění – laminární. Bohužel více než 95% technických úloh představuje proudění značně turbulentní a tam nám analytické metody již příliš nedostačují a je prakticky nemožné tyto úlohy touto cestou řešit. K dispozici je řada softwarů – ANSYS, Star-CCM+, OpenFoam aj. Pravdou je, že programy se stále zdokonalují a ideální by bylo, aby dosáhli shody s experimentem, nicméně experiment je mnohdy cenově náročná položka.

Mezi nejpoužívanější metody řadíme:

1. Metoda konečných prvků
2. Metoda konečných objemů
3. Metoda konečných diferencí

Aby mohl být výstup z numerického řešení platný, musí být provedena validace a verifikace. Validace je fyzikálního hlediska porovnání vypočtených hodnot s experimentem a je tedy možná až po výstavbě modelu nebo díla. Verifikace je z matematického hlediska zjištění takového počtu a velikosti elementů v síti, kdy se výsledky příliš neliší.

7.1.1. Metoda konečných prvků

Tato metoda je v mnoha pohledech podobná metodě konečných objemů (viz níže) a vznikla zdokonalením metody konečných diferencí. Podobně jako metoda konečných diferencí nezajišťuje platnost zákonů zachování, což se musí řešit dodatečnou implementací. Doména je rozdělena na množinu konečných prvků, které jsou obecně nestrukturované. Výsledkem je soubor nelineárních algebraických rovnic. Důležitou výhodou této metody je schopnost řešit libovolnou geometrii ovšem při velkých objemech je řešení značně časově náročné. Nevýhodou je špatné řešení turbulentního proudění. Využívá se pro kontrolu nebo pro zjištění kritického místa konstrukce. [24]

7.1.2. Metoda konečných objemů

Sledovaná oblast je rozdělena na konečný počet menších objemů pomocí síťování. Každý vytvořený element v sobě nese informace, které v daném místě charakterizují vlastnosti proudění a přes své stěny tyto informace předává sousednímu elementu. [24] Výsledkem je soubor pohybových, energetických a další základních diskretizovaných algebraických rovnic. Tato metoda se nejčastěji používá v případě řešení proudění, jelikož již z principu jsou zajištěny zákony zachování hmoty, energie a hybnosti. Ve většině případů platí, že čím jemnější a kvalitnější síť, tím přesnější výsledky, bohužel je často rozhodujícím faktorem, v drtivé většině případů, právě výpočetní náročnost.

7.1.3. Metoda konečných diferencí

Jinak také nazývaná metoda sítí je založena na aproximaci parciálních diferenciálních rovnic, které popisují danou problematiku. Tato metoda je použitelná pouze na strukturované síť a do řešiče se musí zvlášť implementovat zákony zachování hmoty, energie a hybnosti. [24]

7.2. Turbulentní proudění

Vzniká při vysokých Reynoldsových číslech ($Re > 10^5$) a je patrné ve většině úloh strojírenské praxe, což je často problém pro numerické řešení. Z důvodu extrémní složitosti výpočtu jsou vyvíjeny metody, jež umožňují provést výpočet v relativně krátké době.

Turbulence je charakterizována těmito základními atributy:

- Nahodilost, proměnlivost v čase
- Vířivost
- Difuzivita
- Disipativnost

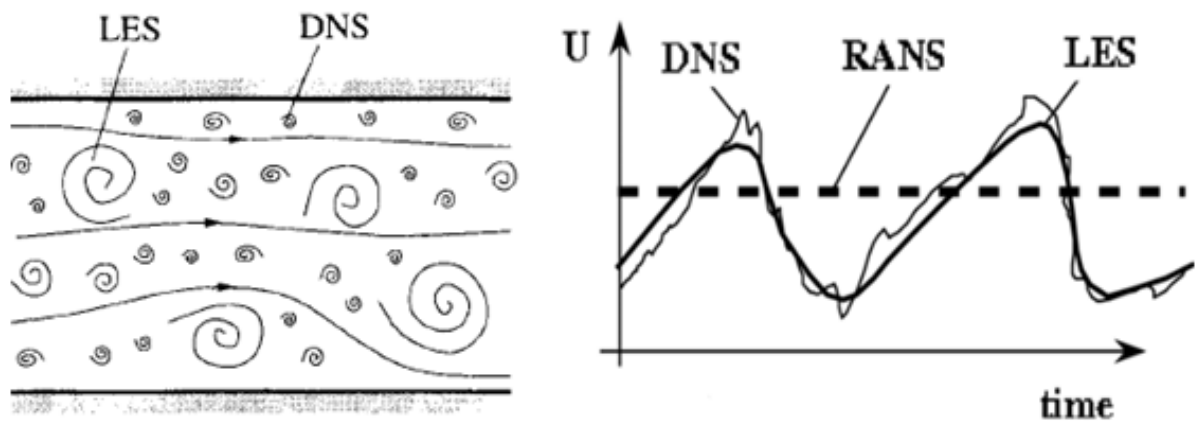
Pro řešení turbulentního proudění využíváme středované rovnice nebo přímou numerickou simulaci. Níže je uveden výpis používaných metodik.

7.2.1. DNS - Přímá numerická simulace

Přímá numerická simulace neboli Direct numerical solution vychází z myšlenky že, nejpřesnější přístup k simulování turbulence je řešení úplné soustavy Navier-Stokesových rovnic. Toto řešení je mimořádně náročné na kapacitu a výkon počítače. Navíc požadovaný výkon rapidně stoupá se stále se zvyšujícím Reynoldsovým číslem. Minimální velikost vírů musí být stejná jako velikost řešeného elementu, to vede k enormnímu nárůstu dat a je téměř nemožné takovouto úlohu vyřešit s dosavadní výpočetní technikou. [24]

7.2.2. LES - Metoda velkých vírů

Jinak také Large Eddy Simulation je metoda méně výpočetně náročná než DNS, protože je založena na simulování energetických vírů, které jsou nositelem energie víru a snáze je zachytit výpočetní sítí. Malé víry, vyvolané velkými víry nemají značný vliv na transportní jevy a jsou odstraněny pomocí filtrace turbulentního pole. [25]



Obr. 23 Schématické znázornění turbulentního pohybu (vlevo) a časovou závislost na rychlosti v bodě [24]

7.2.3. RANS - Metoda časového středování NS rovnic

Řeší se Reynoldsovy rovnice a výsledkem je ustálené řešení (střední veličiny). Základem je Reynoldsovo středování, které vychází z myšlenky, že se daná hodnota veličin může rozdělit na flukuační a časově středovanou složku. Tato metoda se používá pro klasické průmyslové práce, protože její velkou výhodou je možnost použití daleko hrubší sítě oproti DNS nebo LES a tím pádem zjednodušení a zrychlení výpočtu. Poskytne obraz na časově středované proudové pole. Existuje mnoho turbulentních modelů, které nahrazují tenzor Reynoldsových napětí, jenž se vyskytují v Reynoldsových rovnicích. [25]

Na Obr. 23 jsou k vidění principy výše zmíněných metod.

8. Numerická simulace katalyzátoru

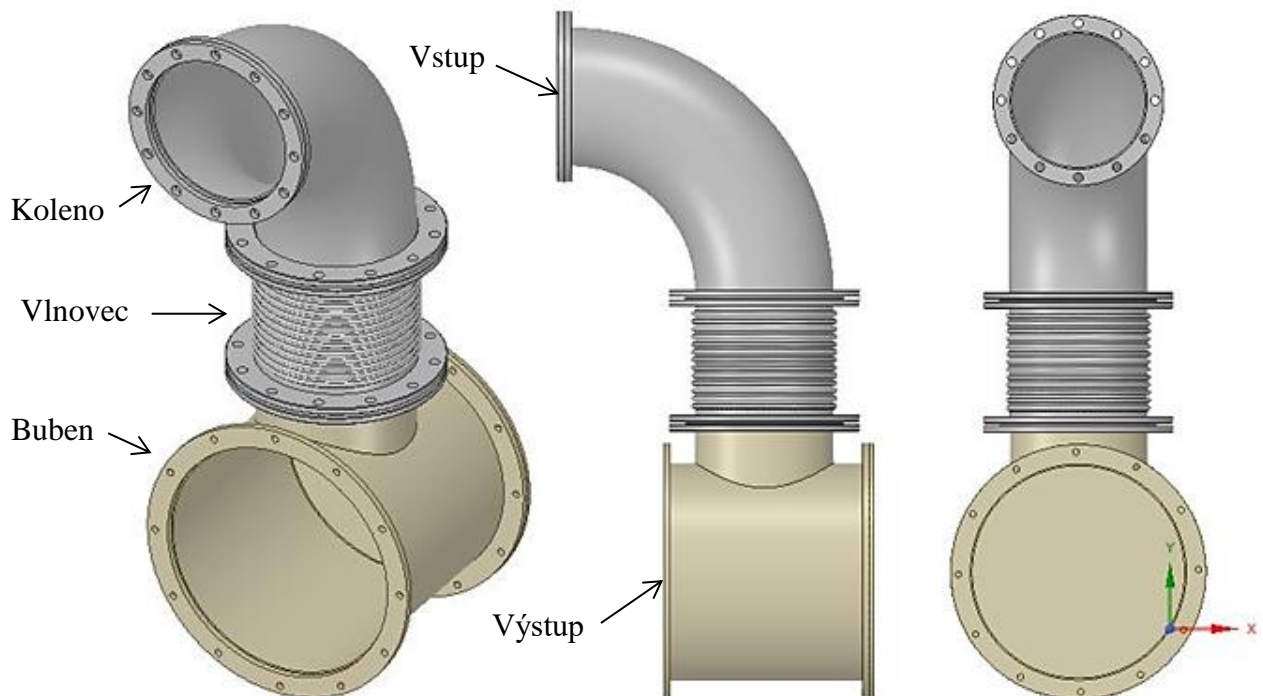
V této kapitole je popsána numerická simulace zadané vstupní komory od společnosti TEDOM a.s., která je umístěna před katalyzátorem v motoru MAN E3268 LE 212.

Cílem této úlohy je usměrnit proud spalin tak, aby vstupoval do katalyzátoru co možná nejrovnoměrněji. Proud v těsné blízkosti vstupu do katalyzátoru by měl mít rychlost přibližně 10-15m/s a tlaková ztráta by měla být menší než 1000Pa.

Úprava geometrie, tvorba variant, diskretizace, nastavení výpočtu a následné provedení výpočtu s vyhodnocením výsledků bylo provedeno v softwaru ANSYS 19.2 (CFX).

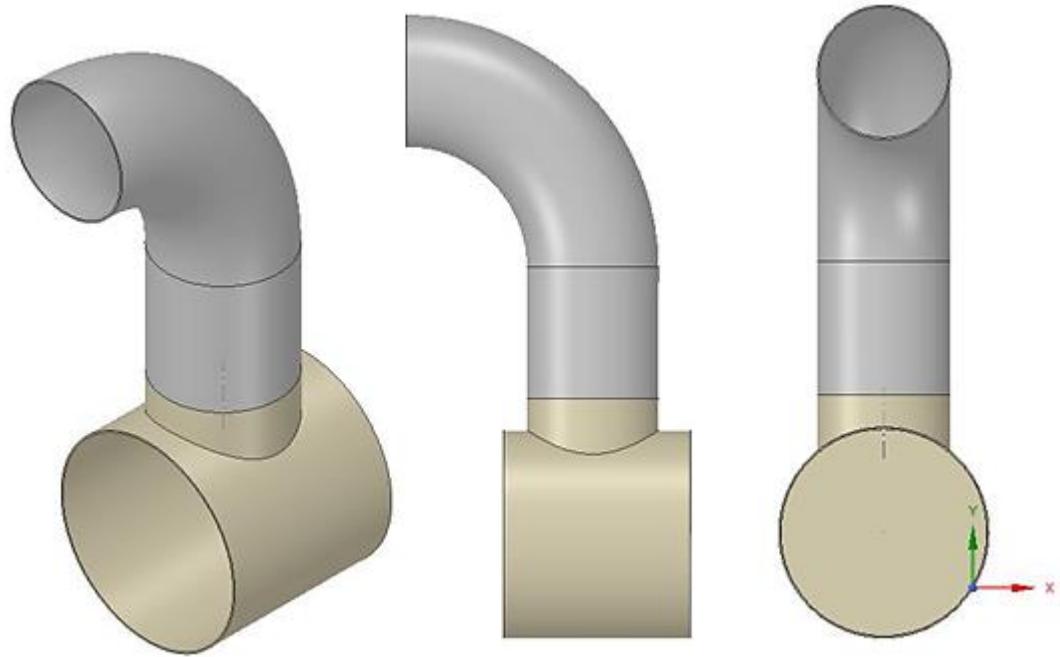
8.1. Zadaná geometrie a její zjednodušení

V níže přiloženém obrázku (Obr. 24) je náhled vstupní komory, kde spaliny vstupují do kolena a vystupují z bubny. Sestava se skládá z několika součástí, včetně devadesáti stupňového kolena, vlnovce, bubny a několika přírub.



Obr. 24 Zadaná geometrie vstupní komory

Zadaná geometrie není vhodná k přímému použití pro tvorbu výpočetní sítě, a to jednak z důvodu, že se nejedná o geometrii proudové oblasti; dále z důvodu, že obsahuje řadu elementů (přírub, zaoblení atd.), které jsou pro účely numerické simulace nadbytečné. Ponechání těchto elementů by znamenalo, že při tvorbě výpočetní sítě bude nutné síť lokálně zjemnit např. v zaoblení, zkosení atd., čímž se zvýší celkový počet prvků sítě a vzroste tedy výpočetní náročnost a tím i výpočetní čas simulací. Lze předpokládat, že tyto elementy významným způsobem neovlivňují proudové pole ve sledované oblasti (před vstupem do trubiček katalyzátoru), a tedy jejich odstraněním se nezmění charakter úlohy. Výhodu lze pozorovat ve zvýšení produktivity práce (rychlejší tvorba sítě), či ve větší pružnosti simulací (tj. odezvy na změny geometrie, okrajových podmínek). Značná výhoda ovšem spočívá v možnosti účelně zjemnit výpočetní síť v místech, kde se předpokládají velké gradienty sledovaných veličin (rychlost, tlak), aniž by náročnost výpočtu přesáhla dostupných výpočetních kapacit. Zjednodušená geometrie s pracovním názvem „solid“ je vyobrazena na Obr. 25.

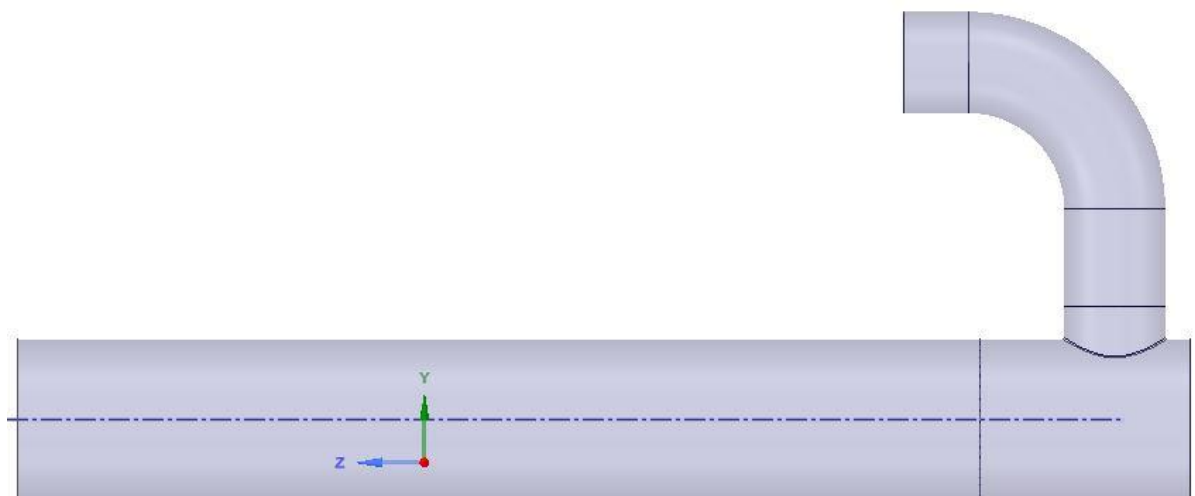


Obr. 25 Zjednodušená geometrie (solid)

Cílem této práce není zkoumat přestup tepla od spalin skrz komoru a není tedy nutné síťovat a simulovat stěnu katalyzátoru, proto byl výpočet proveden pouze na geometrii proudové oblasti (inverzní geometrie ke zjednodušené geometrii) označenou pracovním názvem „fluid“. Náhled na vnitřní geometrii je k dispozici na Obr. 26.

Z důvodu aplikace takové okrajové podmínky (tlak, hmotnostní tok), která nedefinuje rychlostní profil na vstupu do výpočetní oblasti, byla geometrie před kolenem prodloužena o 200mm, aby došlo k vyvinutí rychlostního profilu (a tedy i mezní vrstvy) před vstupem.

Lze očekávat vznik vysoké turbulence v bubnu, protože se proud spalin po průchodu kolenem odtrhne a narazí do spodní části bubnu přibližně pod pravým úhlem. Turbulentní víry se chovají nahodile a nelze předvídat rozložení proudového pole v oblasti výstupu z bubnu. Z důvodu ustálení proudění na výstupu z domény, a tím zamezení zpětného proudění na výstupu, byl výstup z domény prodloužen o 3000mm. Tato zvolená hodnota se během výpočtu ukázala být dobrým odhadem. Prodloužení výstupní oblasti v konečném důsledku přispělo ke stabilizaci výpočtu a ke zlepšení jeho konvergence.



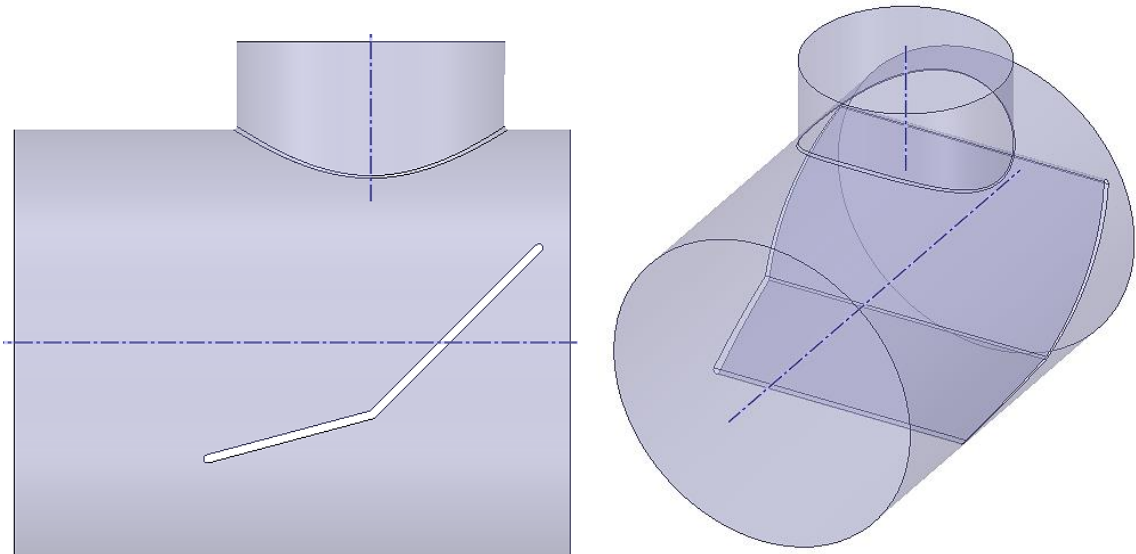
Obr. 26 Inverzní geometrie, na které bude provedena optimalizace (fluid)

Jak již bylo řečeno v kapitole: 4.1, katalyzátory se skládají z vrstev, skrze které prostupuje proud spalin a to pouze v podélném směru. Trubičky katalyzátoru byly zanedbány a jejich vliv byl nahrazen porézním médiem (bude vysvětleno v kapitole: 8.6).

8.2. Návrh možných variant

8.2.1. Varianta 1

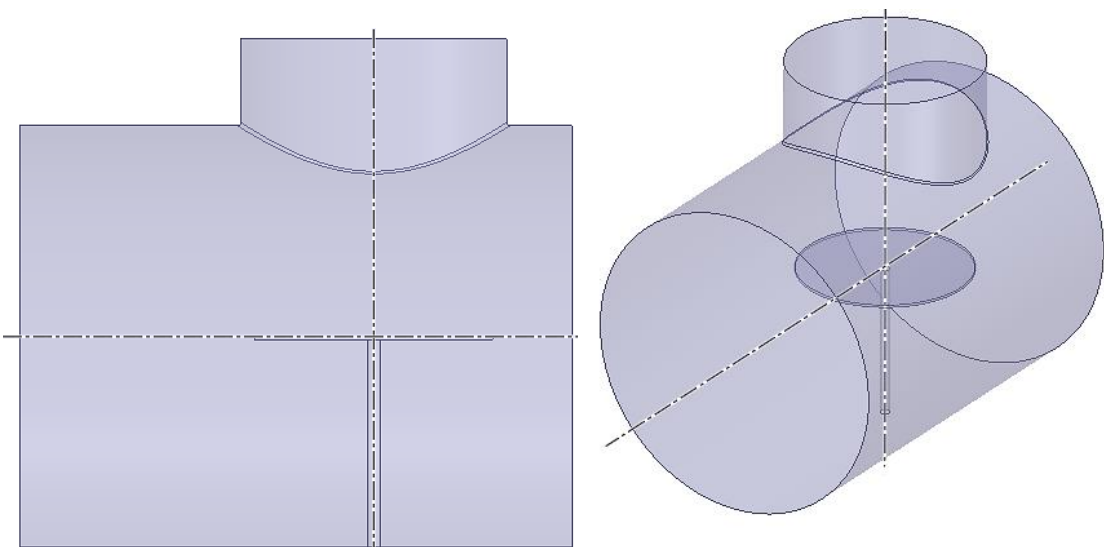
U této optimalizace byla snaha o usměrnění proudu vloženým tvarovým plechem. Plech je v bubnu uložen bočními stranami a je mírně prohnut tak, aby lépe zachytil odtržený proud spalin z kolena.



Obr. 27 Návrh první varianty

8.2.2. Varianta 2

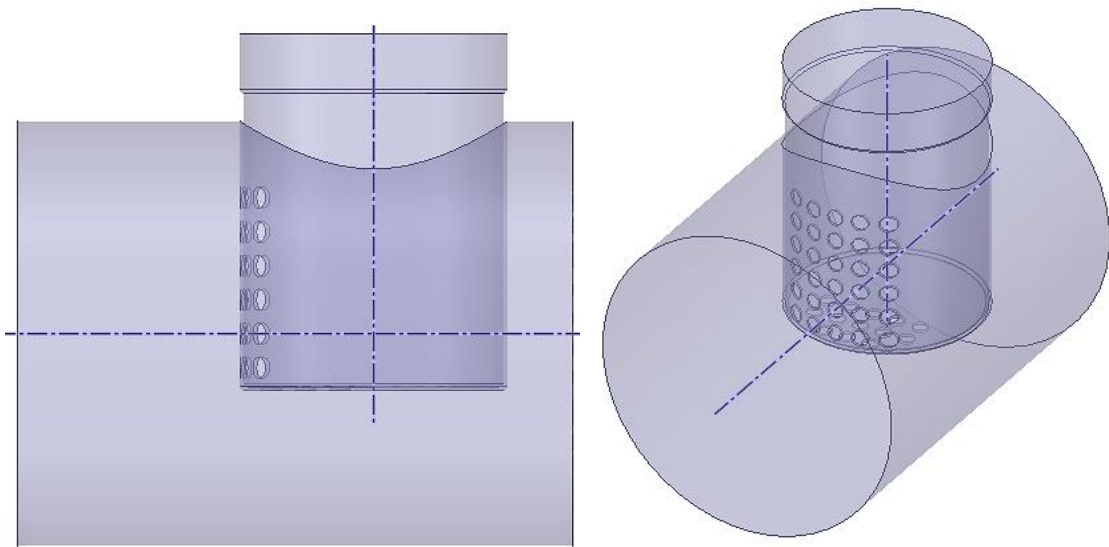
Tato varianta se zakládá na myšlence vzniku čtyř dominantních vírů, které rovnoměrně vstoupí do katalyzátoru (porézu). Je zde vložen kruhový plech v ose vstupu, který je na tyči připevněn ke spodní části bubnu. Průměr kruhového plechu je o 10% menší než průměr vstupu.



Obr. 28 Návrh druhé varianty

8.2.3. Varianta 3

V této variantě je do prostoru bubnu vložen koš s otvory. Otvory jsou ve směru proudění umístěny na plášti a na spodní části koše.

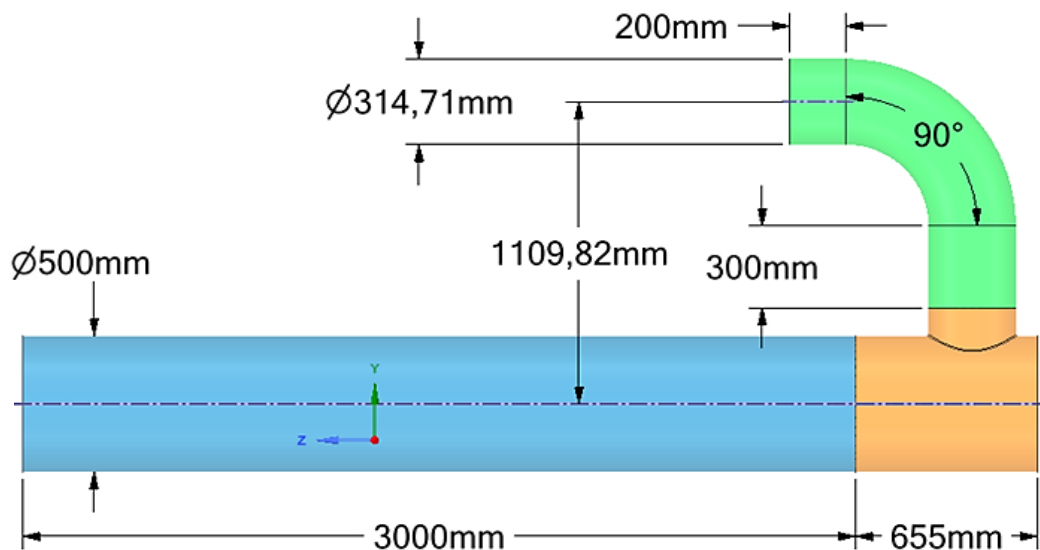


Obr. 29 Návrh třetí varianty

8.3. Verifikace sítě

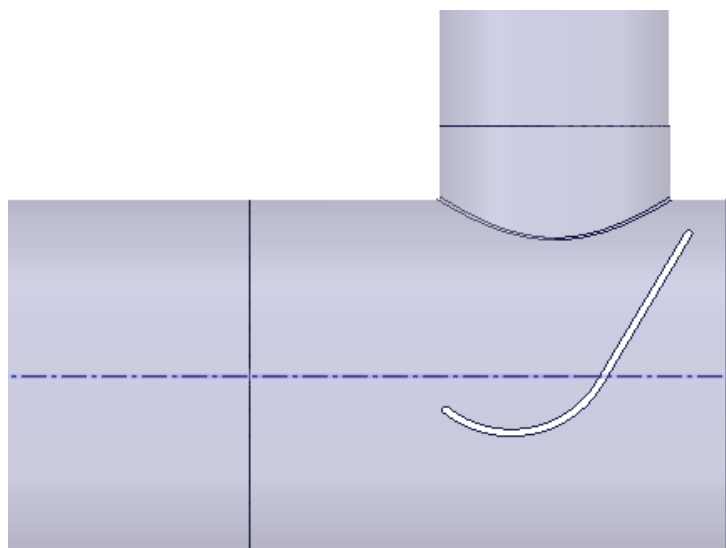
K zadanému problému neexistuje bohužel experiment, který by poskytl reálné naměřené hodnoty zkoumaných veličin, proto zde není možné provést validaci výpočtu. Ovšem vždy je nutné provést verifikaci sítě, čímž se myslí provést studii nezávislosti a zjistit tak optimální velikost a počet elementů vzhledem k výpočtové době a hodnotě naměřených veličin. V našem případě byl pozorován vliv jemnosti sítě vůči tlakové ztrátě.

Sítování celého objektu jako jednoho celku by nebylo příliš vhodné, protože potřebujeme jemnější síť v bubnu oproti ostatním částem. Geometrie byla s výhodou rozdělena na tři tělesa, která budou diskretizována samostatně pomocí odlišných metod a velikostí elementů. Na Obr. 30 jsou tyto tři nová tělesa rozlišeny barvami kde zelená část je pracovně označena jako „vstup“, oranžová jako „buben“ a modrá jako „výstup“.



Obr. 30 Rozdělení geometrie fluidu a základní rozměry tělesa

Jak již bylo řečeno, lze očekávat, že u výchozí geometrie dojde k nárazu proudu po výstupu z kolena na válcovou stěnu bubnu, čímž se proud rozdělí a značně zavíří. Toto chování bylo ověřeno na prvotních testovacích výpočtech, kde se ukázalo, že proudění je vysoce proměnlivé v čase a nepodařilo se dosáhnout stacionárního řešení ani po velmi vysokém počtu iterací. Stacionární simulace nevykazovaly zlepšení z pohledu konvergence ani při zjemňování výpočetní sítě. S ohledem na skutečnost, že u ostatních geometrických variant se toto chování, resp. tato významná proměnlivost proudového pole v čase neočekává, bylo rozhodnuto, že studie zavířivosti výsledků simulace na velikosti sítě bude provedena na variantě s usměrněným proudem vystupujícím z kolena (viz Obr. 30). Konkrétně byla zvolena geometrie s jednou lopatkou, která zabrání nárazu proudu do válcové stěny bubnu, což bylo identifikováno jako hlavní příčina nemožnosti docílit stacionárního řešení u výchozí geometrie. Tato myšlenka se následnými simulacemi potvrdila, jelikož varianty s lopatkou, i následné další geometrické modifikace, již neměly problémy s konvergencí stacionárního výpočtu.



Obr. 31 Geometrie bubnu s vloženou lopatkou pro usměrnění proudu

Pro studii nezávislosti sítě byly vytvořeny celkem čtyři varianty výpočetní sítě. Prodloužením výpočetní domény na výstupu napomohlo k odstranění zpětného proudění, čímž se také napomohlo lepší konvergenci výpočtu. Během výpočtu se sledovala vyjma běžných kritérií konvergence i tlaková ztráta. Ta po proběhnutí určitého počtu iterací začala oscilovat, přičemž rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou nepřesáhl 3% od střední hodnoty, což lze považovat za uspokojivé. Aby bylo srovnání směřodonné, byl každý výpočet zastaven v horní hodnotě výkmitu. Vlastnosti a naměřené odchylky hodnot jsou sepsány v Tab. 1.

Název sítě	Mesh_1	Mesh_2	Mesh_3	Mesh_4
Počet elementů	1 340 329	3 176 140	5 382 593	9 416 680
Mín. tlak [Pa]	7,540	5,891	6,156	5,961
Max tlak [Pa]	7,750	6,016	6,250	6,117
Odchylka [%]	2,710	2,078	1,501	2,555
Naměřeno [Pa]	7,734	6,008	6,242	6,109
Skewness	0,18903	0,13120	0,11471	0,10703
Aspect ratio	57,760	36,614	27,060	19,450
Hodnota y^+	0,71982	0,67199	0,66570	0,65852
Výpočetní čas	1h 24min	6h 6min	14h 56min	20h 24min

Tab. 1 Verifikace sítí

Všechny čtyři sítě byly síťovány stejným způsobem, přičemž se síťoval jako první vstup, poté buben a nakonec výstup. Sítě byly zhotoveny se sdílenou topologií a jsou tedy konformní. Ve sledované geometrii hraje významnou roli odtržení proudu spalin, proto byla snaha modelovat mezní vrstvu tak, aby se dosáhlo co možná nejmenšího „ y^+ “. Nejvyšší hodnota „ y^+ “ byla zaznamenána u nejhrubší sítě, tedy u sítě Mesh_1, což je znázorněno v Tab. 1.

Podrobnosti způsobu síťování a vlastnosti sítí jsou seskupeny v následující tabulce (Tab. 2). Pro dosažení co nejvyšší kvality sítě („aspect ratio“ a „skewness“) byly, mimo toto nastavení, změněny některé defaultní hodnoty. Například úhel mezi dvěma normálami, vztyčené z ploch dvou sousedních buněk, byl přenastaven z původních 18° na 15° , to zajistí jemnější vyhlazení sítě.

Název sítě	Mesh_1	Mesh_2	Mesh_3	Mesh_4
Velikost buněk - buben [mm]	20	13,5	11	9
Metoda - buben	Tetrahedrons			
Velikost buněk - vstup [mm]	15	9	7	5,5
Metoda - vstup	Sweep			
Velikost buněk - výstup [mm]	15	9	7	5,5
Metoda - výstup	Sweep			
Mezní vrstva	0,04			
Počet vrstev	6			

Tab. 2 Parametry nastavení sítě

Jako výchozí způsob diskretizace byla zvolena síť s pracovním názvem **Mesh_2** (viz Tab. 1). U sítě Mesh_3 a Mesh_4 je naměřená hodnota tlakové ztráty velice podobná (odchylka 2,13%), přičemž odchylka mezi Mesh_2 a Mesh_3 je 3,75% a mezi Mesh_2 a Mesh_4 je 1,65%. Úspora času u sítě Mesh_2 je oproti síti Mesh_3 a Mesh_4 velice příznivá a pro charakter úlohy s přihlédnutím na fakt, že se budou varianty konstrukčně lišit, je tato síť vyhovující.

8.4. Nastavení hlavních parametrů výpočtu

Nastavení řešiče proběhlo v prostředí CFX-Pre, kde byly nastaveny okrajové podmínky, interface a definovány domény. V této aplikaci se vytváří výpočtový model z jednotlivých částí sítě, kterému je přiřazena správná charakteristika použitého materiálu nebo správná skladba chemických a fyzikálních vlastností.

Jako výchozí materiál byl zvolen ideální plyn, to z důvodu, že úloha není explicitně řešena jako směs několika plynů, ale je uvažováno, že se proudící spaliny chovají homogenně. Proudícím médiem jsou tedy spaliny modelované pomocí ideálního plynu, u nějž byly změněny jeho vlastnosti. Analyticky byla vypočtena molární hmotnost směsi a z ní individuální plynová konstanta a měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku (Příloha A). Všechny tyto vypočtené hodnoty byly změněny v materiálových vlastnostech ideálního plynu.

Jako matematický model turbulence byl zvolen SST model, dále byla zahrnuta energetická rovnice. Referenční tlak byl nastaven na 0atm, aby nebylo nutné přepočítávat nastavení tlaku na okrajových podmínkách.

Typ výpočtu byl pro všechny varianty zvolen jako stacionární, kde byly limity residuí nastaveny na velice malou hodnotu, aby byla zajištěna možnost manuálního sledování a ukončení výpočtu po dosažení jeho konvergence. Pro variantu bez optimalizace, tedy pro zadanou úlohu bylo nutné nastavit typ výpočtu jako transientní, kde byla simulovaná 1 sekunda. Aby se, co možná nejvíce, zobrazil průběh rychlostního pole v čase, byl nastaven jemný časový krok na 0,01s, který byl zvolen s ohledem na velikost domény a očekávanou rychlost v ní.

8.5. Nastavení okrajových podmínek

Pro všechny vytvořené modely byly nastaveny stejné okrajové podmínky, v této kapitole je uveden popis nastavení okrajových podmínek v různých částech geometrie. Poloha vstupu a výstupu je znázorněna na Obr. 32.

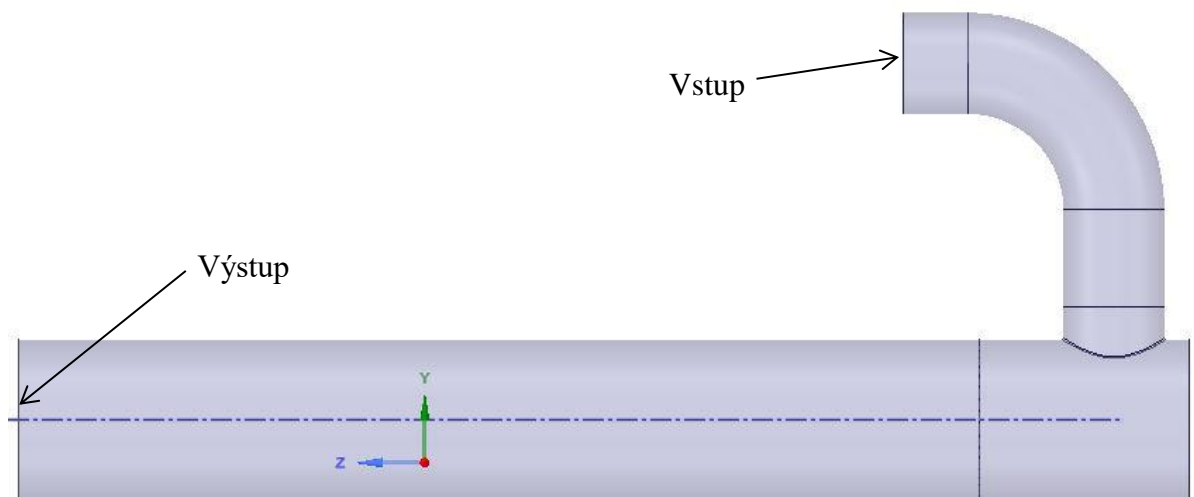
8.5.1. Vstup/výstup

Na vstupu byla nastavena intenzita turbulence na 5%, a jelikož proudící spaliny nedosahují vysoké rychlosti, byl nastaven typ proudění jako subsonický. Hmotnostní průtok je $0,560556\text{kg/s}$ a celková teplota je nastavena na hodnotu 456°C .

Na výstupu byl také nastaven typ proudění na subsonický a byla definována okrajová podmínka statického tlaku. Tlak byl nastaven na hodnotu 1atm , jelikož referenční tlak byl nastaven na hodnotu 0atm .

8.5.2. Stěna

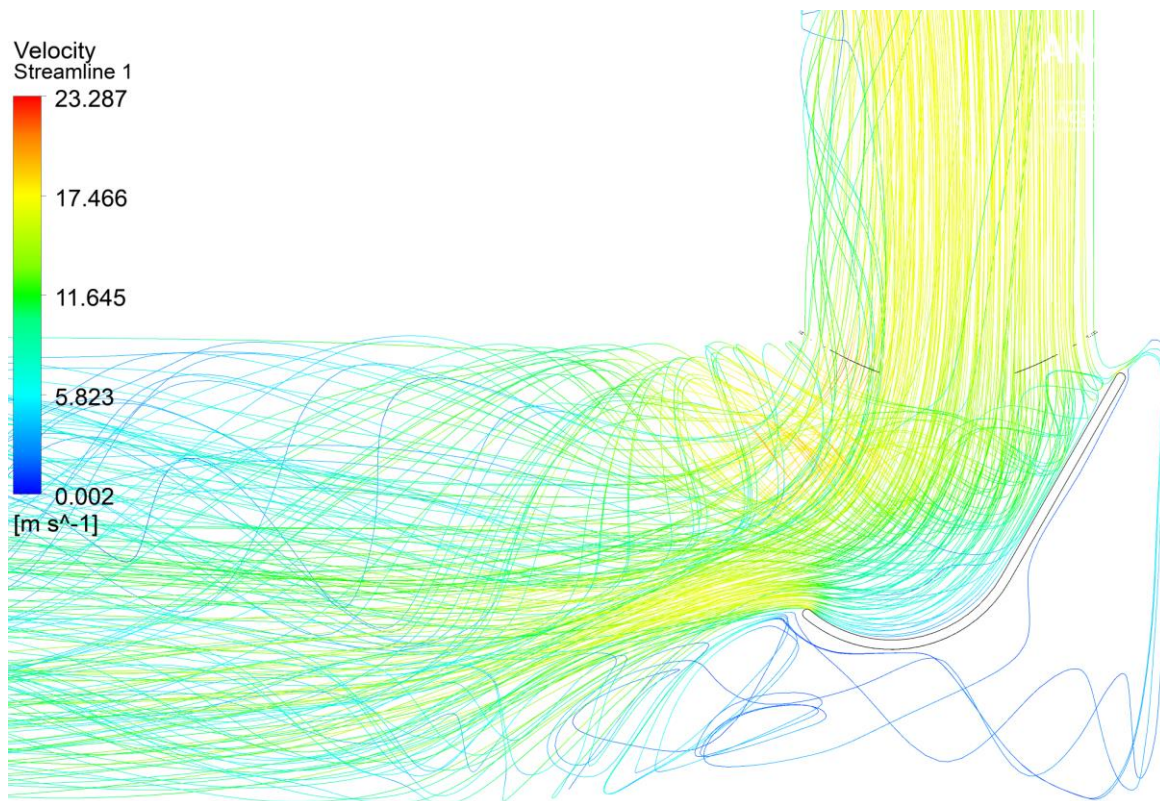
Přenos tepla mezi řešenou doménou a okolím není předmětem této úlohy, proto byla okrajová podmínka na stěně nastavena jako adiabatická, ze stejného důvodu je řešena pouze doména spalin bez stěn vstupní komory. Dále byla nastavena podmínka nulové rychlosti na stěně.



Obr. 32 Geometrie se znázorněnou polohou vstupu a výstupu

8.6. Porézní médium

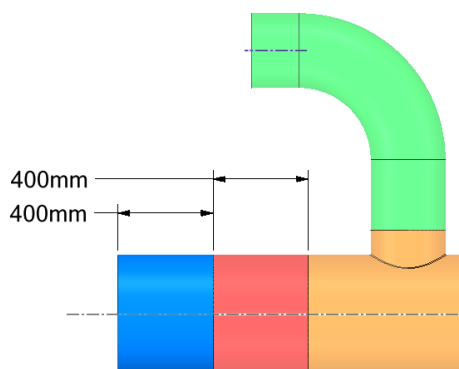
Jelikož v oblasti vstupu do trubiček katalyzátoru je proudění velmi nerovnoměrné a lze očekávat, že trubičky budou mít významný vliv na usměrnění proudu a tlakovou ztrátu, bylo zařazeno porézní médium. Nerovnoměrné chování proudu je názorně vidět na vykreslených proudnicích (Obr. 33) v geometrii Mesh_2, která byla zvolena ze studie nezávislosti.



Obr. 33 Vykreslené proudnice (Mesh_2)

Nastavení porézního média také proběhlo v CFX-pre. Ze studie nezávislosti sítě bylo zjištěno optimální nastavení parametrů sítě, které bylo následně importováno do všech variant s porézním médiem. Vliv porézního média v těchto simulacích má za cíl nahradit katalyzátor a simulovat tak odpor, který musí proud spalin překonat.

Jelikož je katalyzátor ve skutečnosti situován hned za bubnem, byla změněna geometrie tak aby co nejvíce odpovídala realitě (Obr. 34), tudíž bylo přidáno porézní médium, s pracovním názvem „porous“, hned za výstup z bubnu (označeno červenou barvou). Za porézním médiem byl vytvořen válec pro vyvinutí proudového pole s pracovním názvem „výstup“ (označen modrou barvou).



Obr. 34 Náhled na výchozí geometrii, na které bude provedena optimalizace

Požadavek na porézní médium byl, aby simuloval tlakovou ztrátu, naměřenou na reálném katalyzátoru, a sice 863Pa, přičemž byla známá geometrie porézního média.

V nastavení řešiče byla vytvořena nová doména s pracovním názvem „porous“. V této doméně byly nastaveny vlastnosti porézního média tak, aby vliv propustnosti splňoval základní fyzikální zákony, tj. že částice spalin po vstupu do porézu mohou proudit pouze ve směru podélné osy trubiček, resp. válce reprezentujícího porézní médium. Nastavení porézního média je zobrazeno v následující tabulce (Tab. 3).

Domain Type	Porous Domain
Material	Air Ideal Gas
Turbulence	Shear Stress Transport
Area Porosity	Isotropic
Volume Porosity	0.799594434
Loss Model	Directional Loss
Loss Velocity Type	True Velocity
Streamwise Direction	Cartesian Components
	X 0
	Y 0
	Z 1
Streamwise Loss	Quadratic Coefficients
Quadratic Resistance Coefficient	38.35555556
Transverse Loss	Streamwise Coefficient Multiplier
Multiplier	1000

Tab. 3 Nastavení porézního média

Hodnota porosity je v rozmezí 0 až 1 a byla vypočtena jako poměr objemu otvorů a celkovému objemu. Byla dovolena ztráta pouze v jednom směru a to sice v ose Z, protože pouze tento směr proudění je fyzikálně přijatelný.

Parametr „Streamwise Multiplier“ udává, kolika násobná bude tlaková ztráta větší v kolmém směru na nastavený směr proudění. Proto byl tento parametr nastaven na hodnotu 1000, aby zaručil dokonale rovnoběžný průchod spalin se zadanou osou, což bylo doporučeno dle zdroje [26].

Kvadratický koeficient charakterizuje permeabilitu a byl vypočten podle vztahu pro tlakový gradient ve směru proudění. [27]

$$\frac{\delta p}{\delta z} = K_Q U_Z^2$$

$$K_Q = \frac{\Delta p}{\Delta z + U_Z^2}$$

Kde:

- K_Q - kvadratický rezistentní koeficient [$m^3 \cdot kg^{-4}$]
- $\frac{\delta p}{\delta z}$ - gradient poklesu tlaku ve směru proudění, tlaková ztráta v porézu [$Pa \cdot m^{-1}$]
- U_Z - průměrná rychlost ve směru proudění [$m \cdot s^{-1}$]

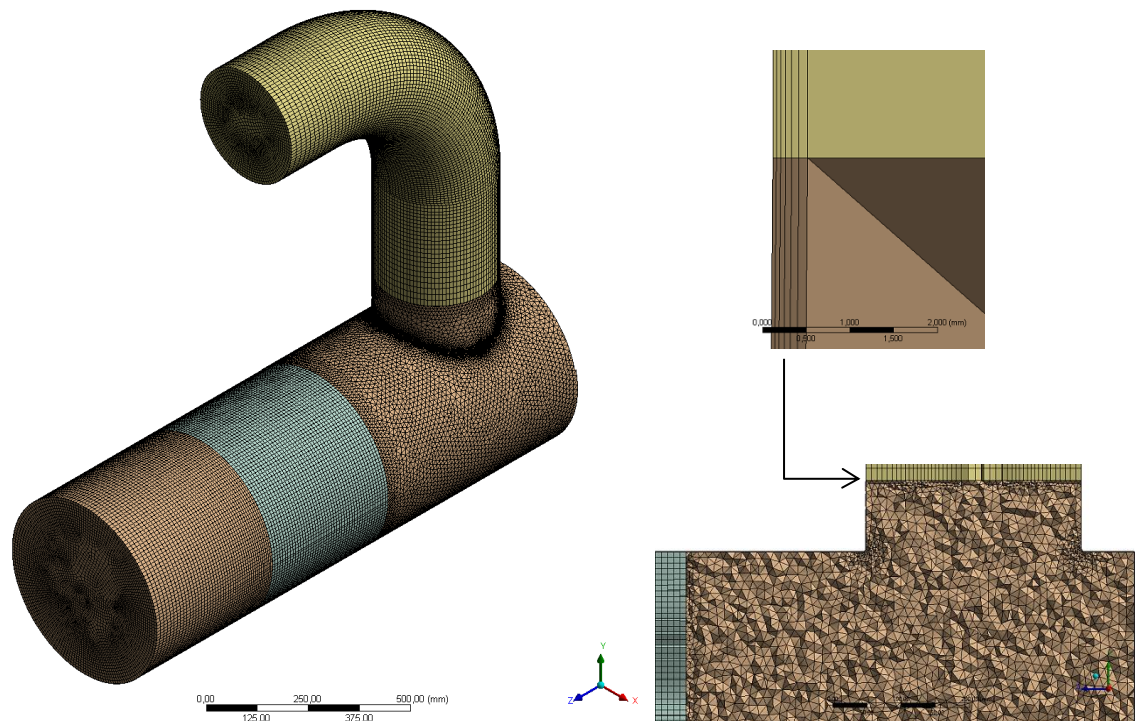
Průměrná rychlost ve směru proudění byla naměřena na rovině v místě porézní domény, tato rovina byla umístěna v geometrii bez optimalizace a bez porézního média, ovšem jak již bylo

řeceno, pro neoptimalizovanou (výchozí) geometrii se nepodařilo dosáhnout konvergence při stacionárním výpočtu, proto byl proveden transientní výpočet jedné sekundy s relativně malým časovým krokem (0,01s). Z tohoto výpočtu byla stanovena průměrná hodnota rychlosti v místě porézni domény na 7,5m/s.

Dále byl vypočten kvadratický koeficient a znovu puštěn transientní výpočet na stejné geometrii, nyní ale s nastavením porézni domény, ze kterého byla zpětně ověřena rychlost a tlaková ztráta v porézu.

Hodnota zadané tlakové ztráty a naměřené tlakové ztráty z testovací úlohy má odchylku 0.3%, hodnota zadané rychlosti a naměřené rychlosti má odchylku 1.3%. Tyto odchylky jsou vzhledem k tomu, že jsou stanoveny z transientního výpočtu a tlaková ztráta je téměř shodná se zadanou, plně dostačující. Náhled na finální síť výchozího stavu je možná na Obr. 35.

Toto nastavení je následně aplikováno na všechny varianty, které ovšem nebylo nutné řešit transientně, díky tomu že byl proud spalin usměrněn.

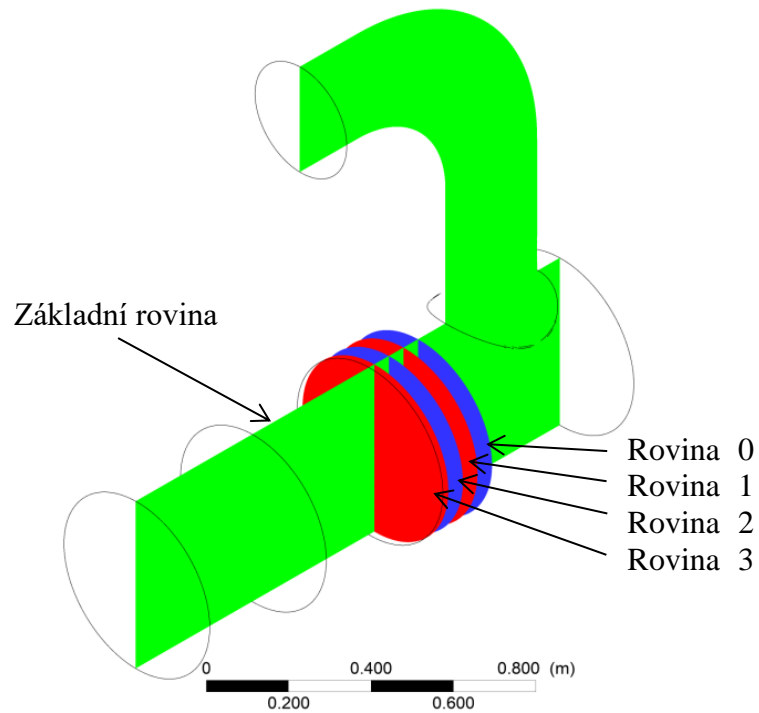


Obr. 35 Diskretizace výchozího stavu

8.7. Metodika vyhodnocování

Na níže přiloženém obrázku (Obr. 36) jsou znázorněny roviny, kde budou následně měřeny všechny důležité veličiny. Rovina 3 je vložena těsně před vstupem do porézního média. Rozložení rovin je shodné pro všechny geometrie.

Cílem je hodnotit tlakovou ztrátu a rychlost.



Obr. 36 Vykreslené roviny pro vyhodnocování výsledků

9. Výchozí stav

V tabulce níže (Tab. 4) je možný náhled na vlastnosti sítě výchozího stavu. Hodnota výpočetního času se vztahuje k tranzientnímu výpočtu.

Popis	Hodnota
Počet elementů	1 581 258
Skewness	0,14367
Aspect ratio	36,386
Hodnota y^+	0.886743
Výpočetní čas	7hod 49min

Tab. 4 Popis sítě výchozího stavu

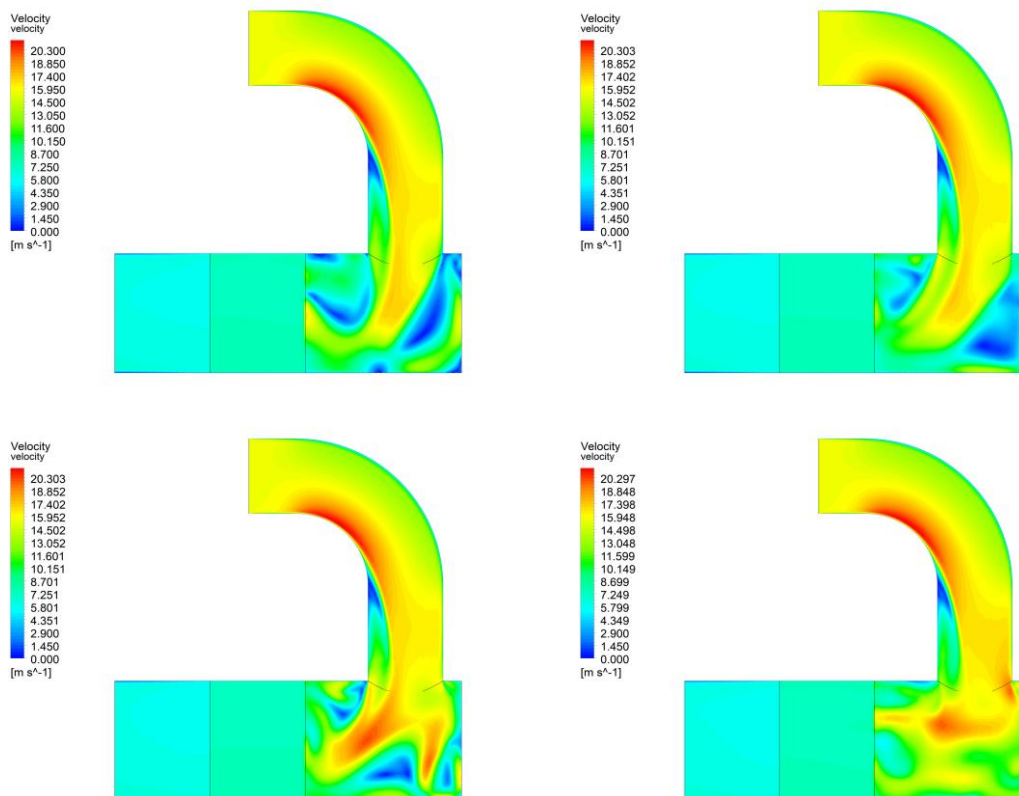
Jak již bylo popsáno výše, u zadané geometrie nebylo možné řešení provést stacionárně, byl proto vytvořen transientní výpočet, kdy byla simulovaná 1 sekunda. Aby se, co možná nejvíce, zobrazil průběh rychlostního pole v čase, byl nastaven jemný časový krok na 0,01s, který byl zvolen s ohledem na velikost domény a očekávanou rychlost v ní.

Bylo potvrzeno nahodilé chování vírů a naměřené hodnoty značně kolísaly. V následující tabulce (Tab. 5) je zobrazen přehled tlakové ztráty a rychlosti před porézni doménou v závislosti na čase.

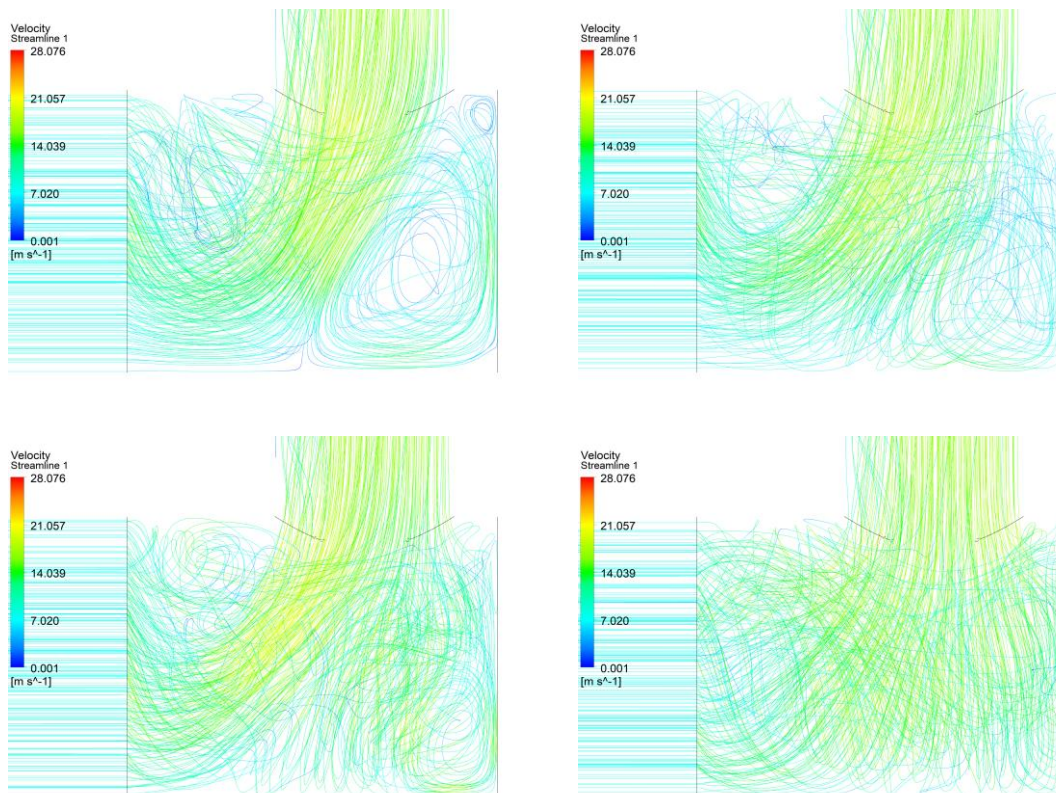
Čas [s]	Tlaková ztráta [Pa]	Rychlost [m/s]			
		Rovina 0	Rovina 1	Rovina 2	Rovina 3
0.1	903.070	10.868	10.761	9.965	9.427
0.2	902.820	12.428	11.379	9.969	9.576
0.3	900.414	9.156	8.379	7.996	9.227
0.4	901.844	10.321	10.029	9.490	9.408
0.5	914.664	11.306	9.844	8.802	8.885
0.6	918.391	11.533	11.497	11.800	11.980
0.7	910.867	8.890	10.325	10.416	10.673
0.8	903.641	8.374	8.673	8.907	9.567
0.9	905.984	10.268	9.613	9.174	9.578
1.0	914.586	11.992	11.149	10.305	9.789

Tab. 5 Naměřené tlakové ztráty a hodnoty rychlostí

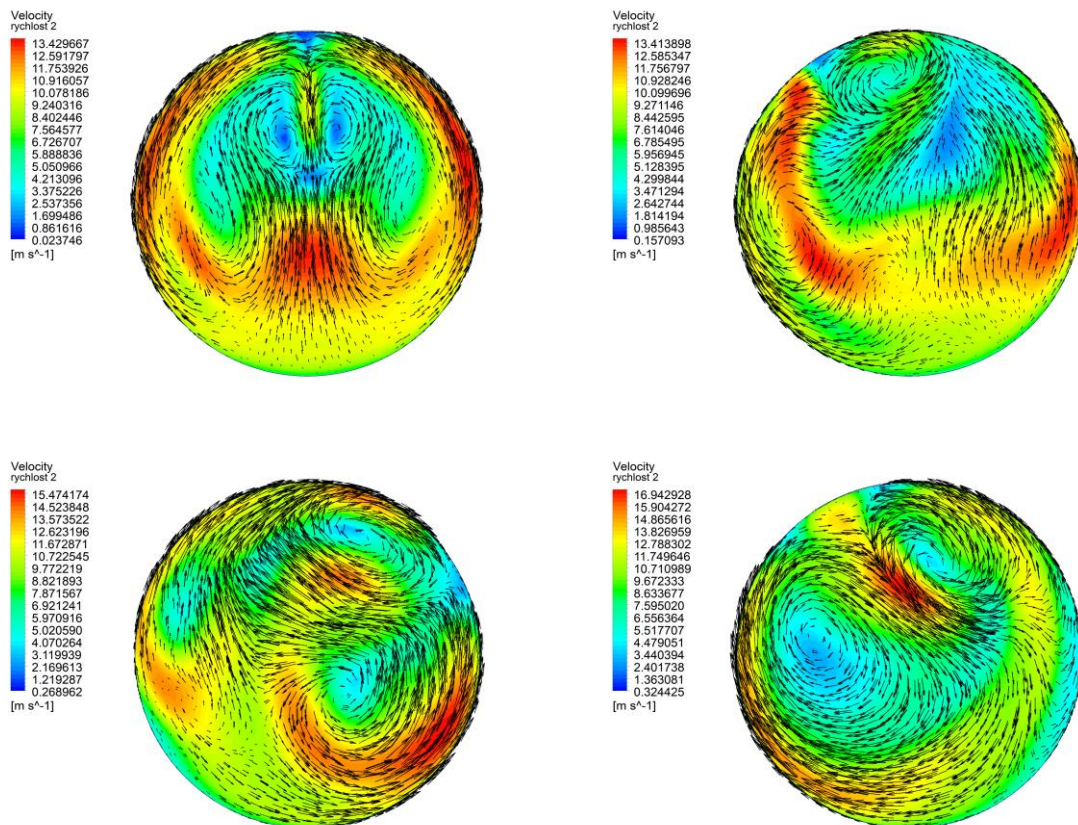
Jak si lze snadno povšimnout, hodnota naměřené rychlosti se mění až o $\approx 24\%$, díky čemu proud spalin nedokonale vstupuje do katalyzátoru. Optimalizace se týká geometrie bubnu, proto se budou všechny následně navržené varianty lišit pouze v této části.



Obr. 37 Rozložení rychlosti na základní rovině v čase 0,1, 0,4, 0,7, 1s



Obr. 38 Proudnic v čase 0,1, 0,4, 0,7, 1s



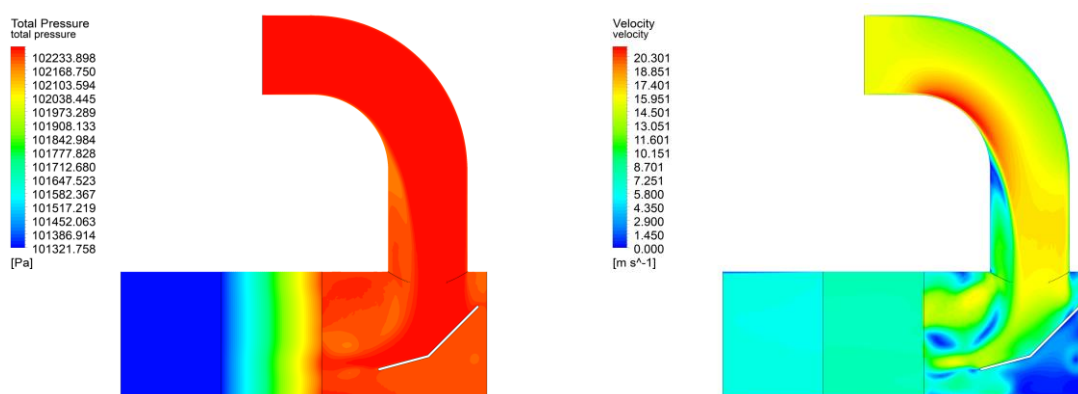
Obr. 39 Rozložení rychlosti na rovině 2 v čase 0.1, 0.4, 0.7, 1s

10. Varianta 1

V Tab. 6 jsou seskupeny vlastnosti sítě první varianty.

Popis	Hodnota
Počet elementů	1 150 208
Skewness	0,16777
Aspect ratio	32,524
Hodnota y+	0.771141
Výpočetní čas	2hod 21min

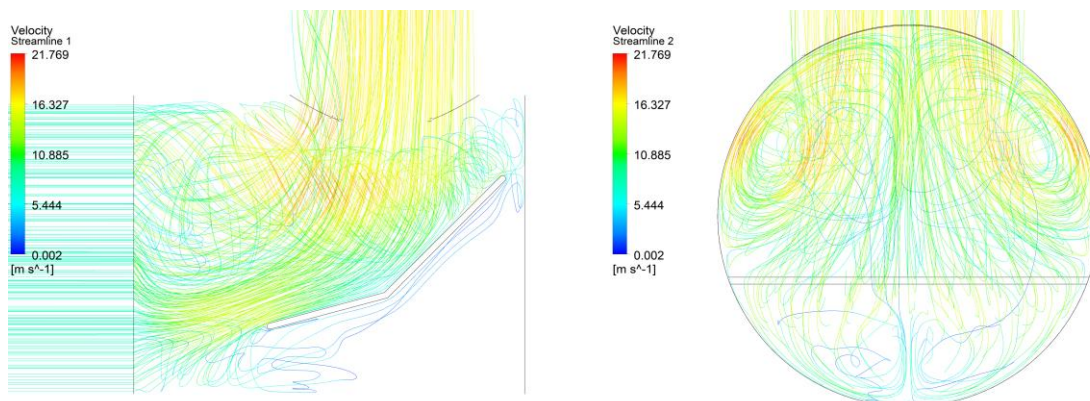
Tab. 6 Popis sítě první varianty



Obr. 40 Rozložení tlaku (vlevo) a rozložení rychlosti na základní rovině (Varianta 1)

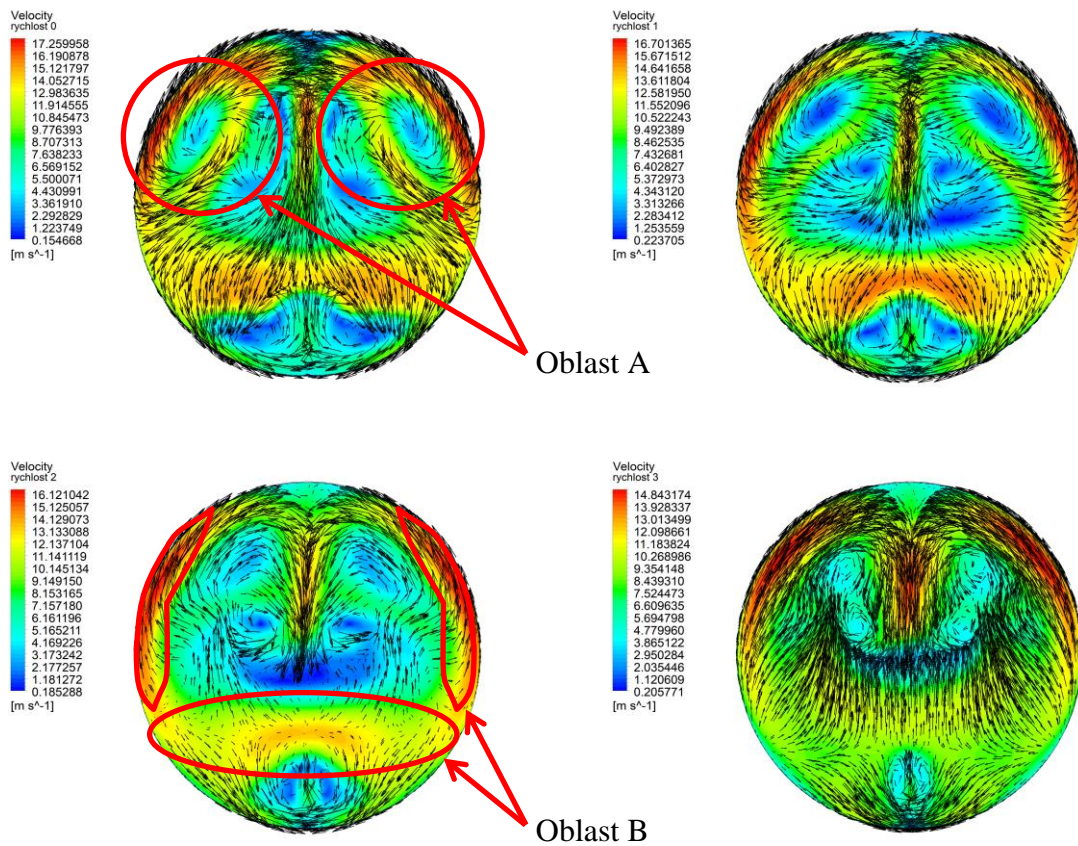
Tlaková ztráta v porézním médiu tvoří značnou část, a sice v tomto konkrétním případě 865.266Pa (viz Tab. 8). Celková naměřená tlaková ztráta činí 896,516Pa což je o 21,875Pa menší hodnota než nejvyšší naměřená hodnota u výchozího stavu, došlo tedy k významnému usměrnění proudu.

Vzhledem k tomu že buben disponuje kruhovou geometrií, vznikají zde víry, které jsou lépe znázorněny na vykreslených vektorech (Obr. 42 - Oblast A).



Obr. 41 Proudnic (Varianta 1)

Na Obr. 41 jsou k vidění vykreslené proudnice, které lépe popisují finální stav proudu. Na vykreslených proudnicích lze i názorně ukázat vliv odporu porézního média, kdy je dominantní proud usměrněný lopatkou nucen se před katalyzátorem rozšířit.



Obr. 42 Rozložení rychlostí na rovině 0,1,2,3 (Varianta 1)

10.1. Výsledné hodnoty

V této sekci jsou popsány výsledné hodnoty pro variantu 1. Jak si lze povšimnout, v Tab. 7 jsou rychlosti na prvních třech rovinách v rozmezí 10-15m/s, což bylo hlavním cílem optimalizace. Rychlost na rovině 3, tedy na rovině v těsné blízkosti porézního média, je menší z důvodu rozložení proudu spalín před vstupem do porézního média (viz Obr. 41). Nejvyšší možná rychlost se vyskytuje v kolenu v oblasti odtržení proudu (viz Obr. 40) a dosahuje hodnoty 21.39m/s, vložená lopatka tedy usměrnila směr proudu bez navýšení rychlosti.

Usměrnění proudu se projeví také na hmotnostním průtoku, který je největší v oblasti B na rovině 2. Na rovině 3 je hmotnostní průtok již rozložen po celém průřezu.

Lokace	Rychlost [m/s]
Rovina 0	12.284
Rovina 1	11.653
Rovina 2	10.516
Rovina 3	9.213

Tab. 7 Naměřené rychlosti (Varianta 1)

Popis	Tlaková ztráta [Pa]
Porézní doména	865,266
Celková	896,516

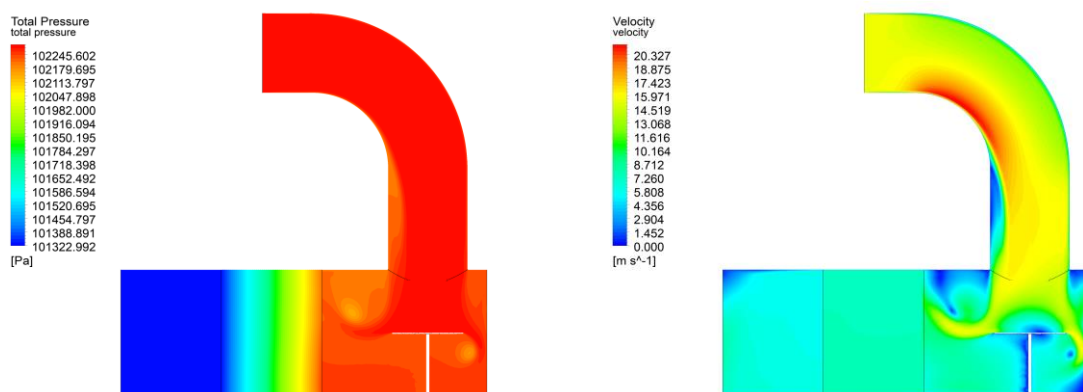
Tab. 8 Naměřené tlakové ztráty (Varianta 1)

11. Varianta 2

V Tab. 9 jsou seskupeny vlastnosti sítě druhé varianty.

Popis	Hodnota
Počet elementů	2 567 876
Skewness	0,18889
Aspect ratio	27,213
Hodnota y+	0.801446
Výpočetní čas	1hod 46min

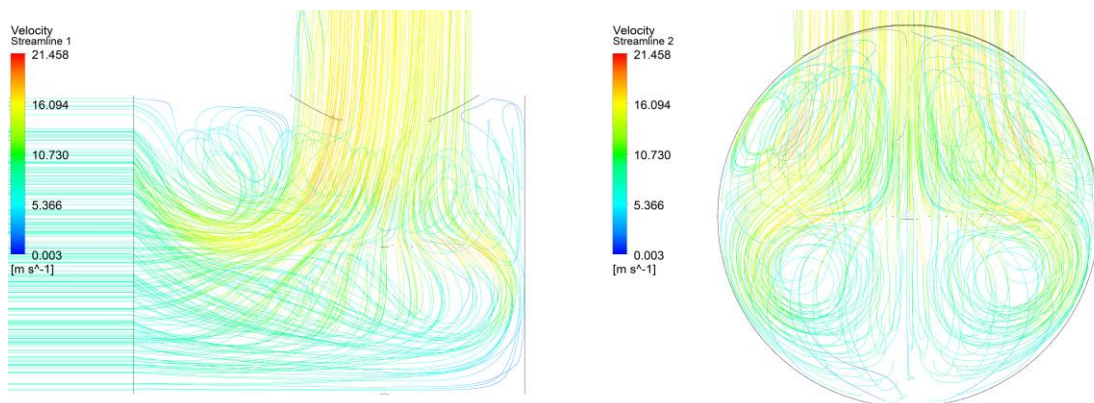
Tab. 9 Popis sítě druhé varianty



Obr. 43 Rozložení tlaku (vlevo) a rozložení rychlosti na základní rovině (Varianta 2)

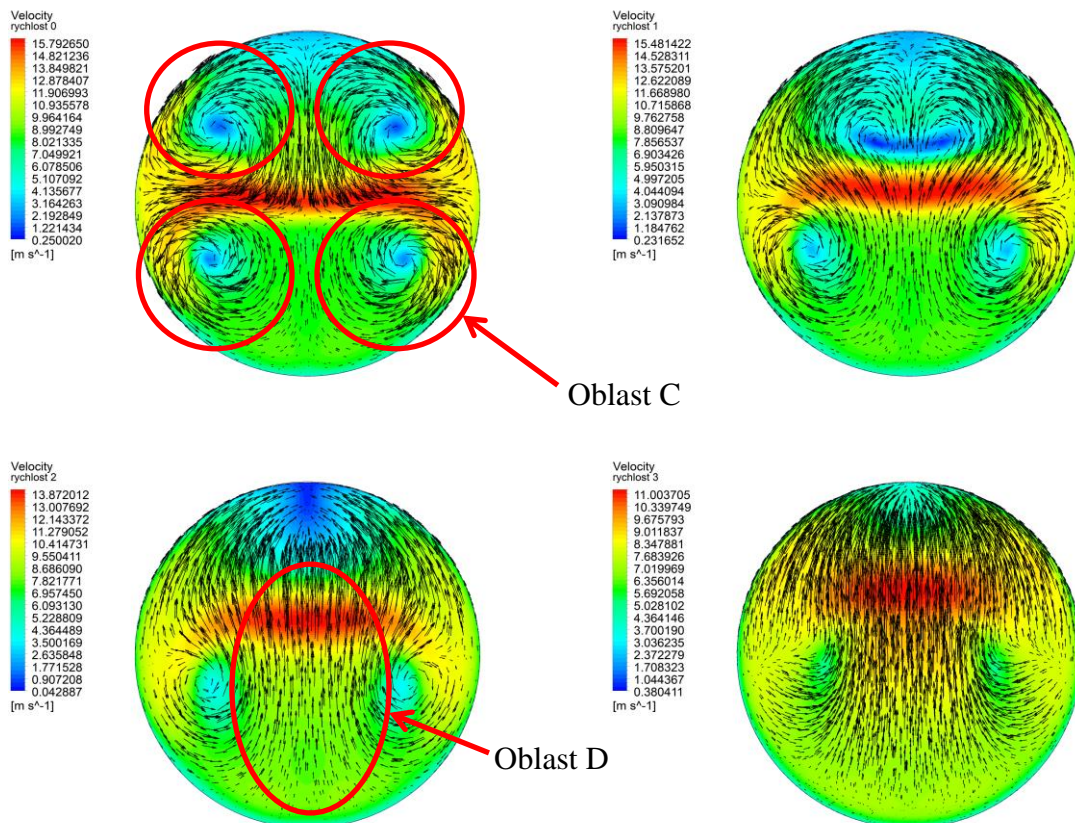
V této variantě tlaková ztráta v porézním médiu dosahuje hodnoty 865.664Pa (viz Tab. 11) a celková naměřená ztráta činí 908,359Pa což je o 10,032Pa nižší hodnota než nejvyšší naměřená hodnota tlakové ztráty u výchozího stavu. Celková tlaková ztráta a rychlosti se očekávaly horší než u předchozí varianty, nicméně tato optimalizace má za cíl zrovnoměnit hmotnostní tok před porézní doménou.

Jako u předchozí varianty, i zde hraje roli kruhová geometrie bubnu, která dopomáhá k vytvoření čtyř velkých vírů (Obr. 45 - oblast C).



Obr. 44 Proudnic (Varianta 2)

Na obrázku 38 je velice názorně vidět tvorba vírů, které se tvoří po celém obvodu kruhového plechu. Tyč, na které je plech upevněn, nemá žádný vliv na průchodnost proudu spalin.



Obr. 45 Rozložení rychlostí na rovině 0,1,2,3 (Varianta 2)

11.1. Výsledné hodnoty

V této sekci jsou popsány výsledné hodnoty pro variantu 2. Z Tab. 10 lze snadno vypočítat, že rychlosti na prvních dvou rovinách splňují požadavek optimalizace (rozmezí 10-15m/s), Nicméně rovina 2 a 3 se vyznačuje rychlostí nižší a požadavek tedy nesplňují, což je způsobeno nárazem proudu o vložený kruhový plech (viz Obr. 44). Podobně jako v předchozí variantě, i v této variantě se nejvyšší možná rychlost vyskytuje v kolenu v oblasti odtržení proudu (viz Obr. 43) a dosahuje hodnoty 21.42m/s, což je téměř shodná hodnota jako předchozí varianty.

Hmotnostní tok je největší v oblasti D na rovině 2, nicméně už zde je hmotnostní tok rozložen po celé rovině relativně rovnoměrně. Rovnoměrnost hmotnostního toku zajistili vzniklé čtyři velké víry (Obr. 45 – oblast C), které vstupují do porézního média.

Lokace	Rychlost [m/s]
Rovina 0	11.302
Rovina 1	10.684
Rovina 2	9.137
Rovina 3	7.709

Tab. 10 Naměřené rychlosti (Varianta 2)

Popis	Tlaková ztráta [Pa]
Porézní doména	865.664
Celková	908.359

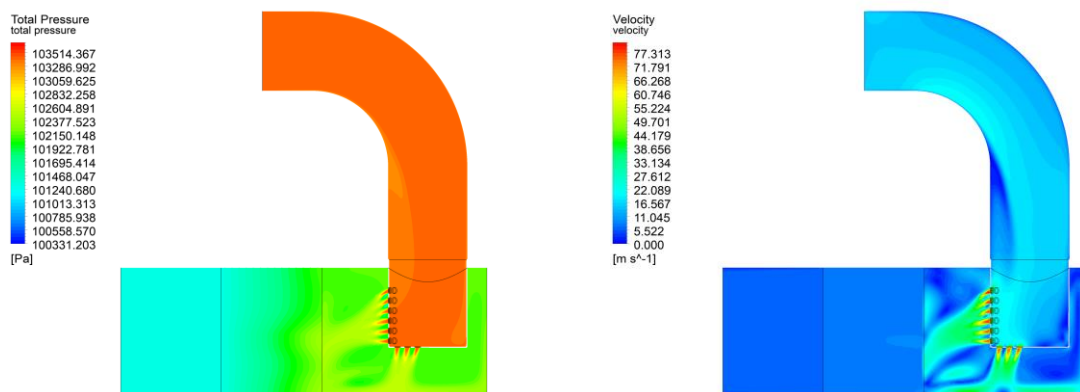
Tab. 11 Naměřené tlakové ztráty (Varianta 2)

12. Varianta 3

V Tab. 12 jsou seskupeny vlastnosti sítě třetí varianty.

Popis	Hodnota
Počet elementů	4 166 349
Skewness	0,20652
Aspect ratio	24,513
Hodnota y+	1.11366
Výpočetní čas	8hod 45min

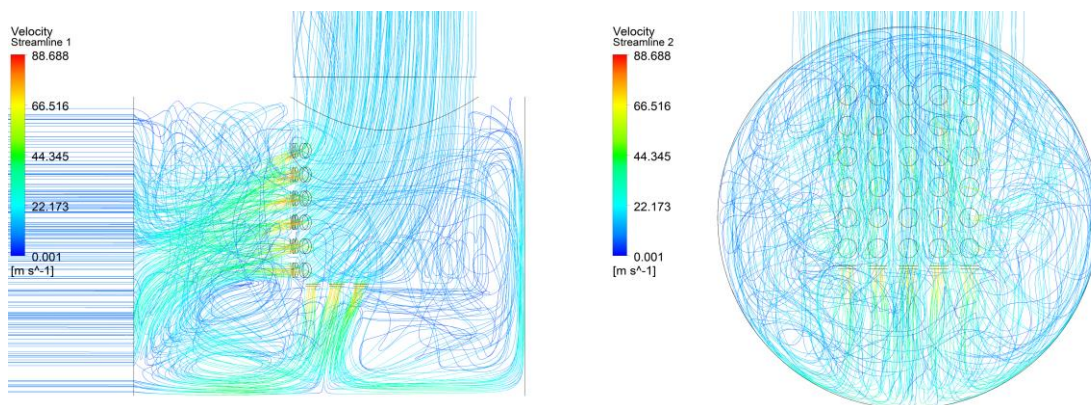
Tab. 12 Popis sítě třetí varianty



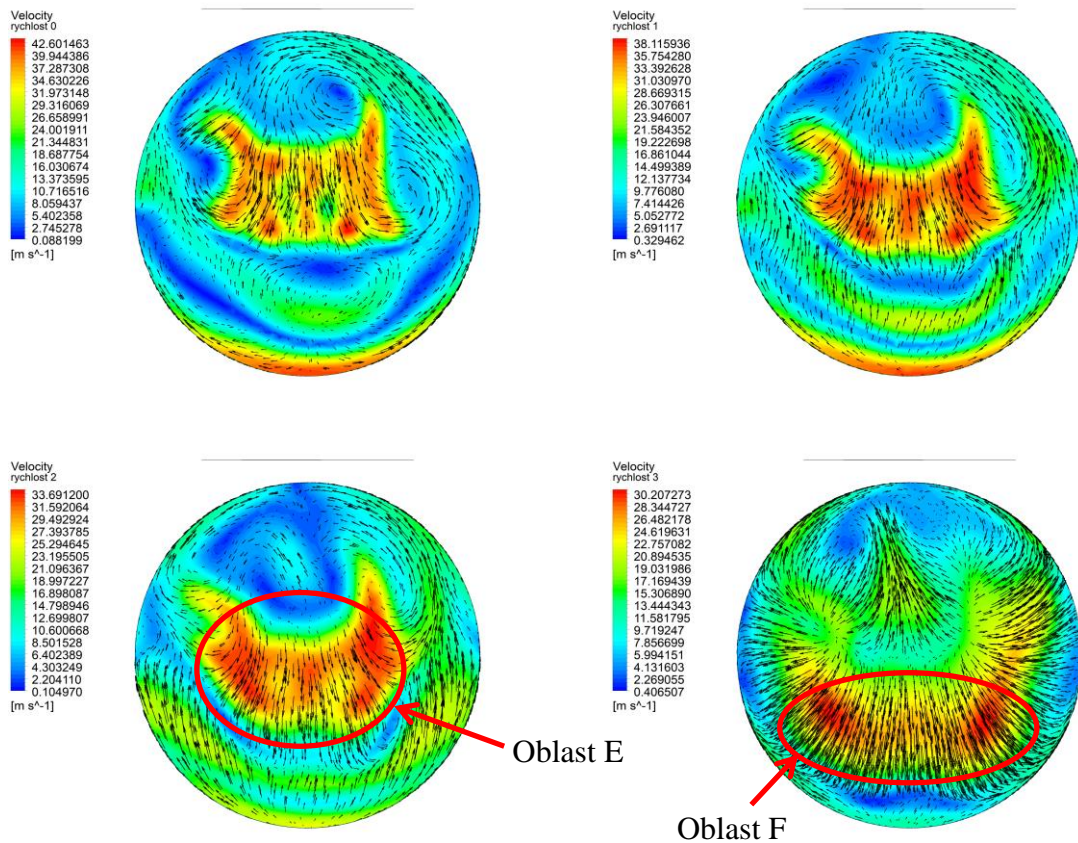
Obr. 46 Rozložení tlaku (vlevo) a rozložení rychlosti na základní rovině (Varianta 3)

Tato optimalizace se vyznačuje nejvyšší tlakovou ztrátou v porovnání s předchozími dvěma variantami. V porézním médiu dosahuje hodnota tlakové ztráty 867,586Pa a celková naměřená tlaková ztráta je 2 038,55Pa (viz Tab. 14). Tato hodnota je o 1120,159Pa vyšší než nejvyšší naměřená hodnota tlakové ztráty u výchozího stavu a také nesplňuje základní cíl této úlohy, a sice nepřekročit hodnotu tlakové ztráty 1000Pa.

Obr. 47 popisuje chování proudu spalin po průchodu košem. V příčném řezu si lze povšimnout, v jakém rastru jsou otvory rozpoloženy. Na rozdíl od dvou předchozích variant, zde kruhová geometrie bubny žádným výrazným způsobem neovlivňuje chování proudu spalin.



Obr. 47 Proudnic (Varianta 3)



Obr. 48 Rozložení rychlostí na rovině 0,1,2,3 (Varianta 3)

12.1. Výsledné hodnoty

V této sekci jsou popsány výsledné hodnoty pro variantu 3. Tato varianta usměrní proud tak, že mu dovolí proudit pouze otvory v daném směru. Díky tomu že jsou otvory malé, tak se spaliny po průchodu košem lokálně urychlí. V Tab. 13 jsou sepsány hodnoty rychlostí na příslušných rovinách, hodnoty jsou příliš vysoké a nejsou tedy v požadovaném rozsahu 10-15m/s. Nejvyšší možné rychlosti byly naměřeny v oblastech otvorů a dosahují 81,45m/s.

Hmotnostní tok na rovině 0 a 1 byl dominantní před otvory, na rovině 2 se hmotnostní tok začal rozprostírat po dané rovině (viz Obr. 48 – oblast E). V rovině 3 byl hmotnostní tok stále dominantní před oblastí E (viz Obr. 48 – oblast F).

Lokace	Rychlost [m/s]
Rovina 0	38.752
Rovina 1	34.477
Rovina 2	27.603
Rovina 3	18.762

Tab. 13 Naměřené rychlosti (Varianta 3)

Popis	Tlaková ztráta [Pa]
Porézní doména	867.586
Celková	2 038.550

Tab. 14 Naměřené tlakové ztráty (Varianta 3)

13. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat princip selektivní katalytické redukce a optimalizace zadané vstupní komory od společnosti TEDOM a.s., která je umístěna před katalyzátorem v motoru MAN E3268 LE 212.

Navržené modifikace vstupní komory, byly následně řešeny pomocí programu ANSYS, Inc. Cílem bylo usměrnění proudu spalin tak, aby vstupoval do katalyzátoru co možná nejrovnoměrněji. Proud v těsné blízkosti vstupu do katalyzátoru by měl mít rychlost přibližně 10-15m/s a tlaková ztráta by měla být menší než 1000Pa.

Celkem byly navrženy tři geometrické optimalizace, u kterých bylo nutné provést diskretizaci, nastavení řešiče a následné řešení numerické simulace s vyhodnocením výsledků. Výsledky byly porovnány jak mezi sebou, tak i s výchozím stavem, tedy s geometrií bez optimalizace. Výchozí stav bylo nutné řešit tranzientně, protože zde vznikala turbulence, která zapříčinila nahodilému chování proudu spalin, a nebylo tak možné dosáhnout konvergence. Všechny tři varianty již bylo možné řešit stacionárně.

Ze získaných výsledků variant bylo zjištěno, že optimalizace bubnu má významný vliv na chování proudu spalin. Ve variantě **1** došlo k usměrnění proudu spalin tak, že naměřené rychlosti na rovinách před vstupem do porézního média jsou v rozmezí 10-15m/s, celková tlaková ztráta je 896,5Pa a hmotnostní tok před porézní doménou je dostatečně zrovnoměrněn. Varianta **2** se zakládá na vzniku čtyř velkých vírů, které rovnoměrně vstupují do porézního média, tím se zajistilo dobré rozpoložení hmotnostního toku před vstupem do katalyzátoru, nicméně tato varianta disponuje vyšší tlakovou ztrátou (908,4Pa) a rychlost proudu spalin byla významně ovlivněna nárazem o vložený kruhový plech tak, že naměřené rychlosti na rovinách před katalyzátorem jsou nižší než požadované rozmezí. Varianta **3** obsahuje vložený koš s otvory, které dovolí spalinám proudit pouze v požadovaném směru, bohužel zde se proud spalin po průchodu otvory významně urychlí (max. rychlost 81,5m/s) a dále zde vzniká velice vysoká tlaková ztráta a sice 2 038,6Pa což je přibližně o 55% více než nejvyšší naměřená tlaková ztráta u výchozího stavu.

Jako nejvhodnější optimalizace byla zvolena **varianta 1**, protože právě v této modifikaci jsou splněny základní cíle této bakalářské práce. Pro tuhle variantu byl také proveden výpočet, kdy byl motor zatížen pouze na 75% (viz Příloha B).

Pro výsledky získané metodou CFD bohužel nebylo možné provést validaci, avšak byla provedena studie nezávislosti sítě, ze které bylo zjištěno optimální nastavení diskretizace.

Citovaná literatura

1. www.cez.cz. [Online] <https://www.cez.cz/cs/pro-media/cisla-a-statistiky/energetika-ve-svete.html>.
2. **Zerdaloglu, Ing. Stratos.** is.mendelu.cz. *Přírozené znečištění ovzduší*. [Online] 2018. https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=55071.
3. **Jo Van Caneghem, Johan De Greef, Chantal Block, Carlo Vandecasteele.** NOx reduction in waste incinerators by selective catalytic reduction. *Journal of Cleaner Production*. [Online] elsevier.com.
4. ENVIWIKI. REZZO. [Online] <https://www.enviwiki.cz/wiki/REZZO>.
5. Grafická ročenka 2016. *Český hydrometeorologický ústav*. [Online] http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/II_ovzd_CZ.html.
6. **Ing. Jan Sajdl, Ph.D.** Emisní norma EURO. *Autolexicon.net*. [Online] <http://www.autolexicon.net/cs/articles/emisni-norma-euro/>.
7. History of Emission Standards Europe. *Q8oilshub.co.uk*. [Online] <https://q8oilshub.co.uk/2017/05/31/trends-in-fuel-economy-what-do-they-mean/history-of-emission-standards-europe/>.
8. Workplace exposure to dusts and aerosols - diesel exhaust. *OSH WIKI*. [Online] https://oshwiki.eu/wiki/Workplace_exposure_to_dusts_and_aerosols_-_diesel_exhaust.
9. **s.r.o., OnSite Power.** Energetika. *www.tzb-info.cz*. [Online] <https://energetika.tzb-info.cz/119254-stane-se-vlastni-vyroba-elektriny-beznou>.
10. **a.s., TEDOM.** TEDOM, Dokumenty ke stažení. [Online] 2019. <https://www.tedom.com/cs/dokumenty-ke-stazeni/>.
11. SNIŽOVÁNÍ EMISÍ NOx. [Online] skupina ČEZ. https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovem_5.html.
12. **BĚLOHRADSKÝ, Ing. PETR.** Metody pro určování charakteristických parametrů procesů. [Online] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28309.
13. **Pořízek, Vít.** METODY PRO POTLAČENÍ TVORBY EMISÍ OXIDŮ. [Online] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55624.
14. Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách pro VELKÁ SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ. *Informační portál Ministerstva průmyslu a obchodu*. [Online] Integrovaná prevence a omezování znečištění (IPPC). https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/1/lcp_31-3-2010_complete.pdf.
15. **Lee S., Park K., Park J., Kim B.** *Characteristics of reducing NO using urea and alkaline additives. Combustion and flame*.
16. **Sorrels, John L.** *Selective Catalytic Reduction*. Research Triangle Park, NC 27711 : United States Environmental Protection Agency, 2016. Sv. II.
17. **PROCHÁZKOVÁ, Olga.** Výzkum možnosti aplikace technologie SNCR pro denitrifikaci kotle K4 v Elektrárně Opatovice. [Online] 2011.

https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/95860/GRY062_FS_P2346_2302V006_2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

18. **Isabella Nova, Alessandra Beretta, Gianpiero Groppi, Luca Lietti, Enrico Tronconi, and Pio Forzatti.** Monolithic Catalysts for NOX removal from stationary sources. [Online] [Citace: 17. Listopad 2018.]
19. AIR-SONIC. [Online] <https://www.air-sonic.com/air-pollution-control/scr-catalysts/?L=2>.
20. **EMELIE SAMUELSSON, SARA HOLMBERG.** A CFD Study of the Urea Supply, Droplet Breakup and Mixing in a Pipe Upstream of a SCR Catalyst. [Online] [Citace: 17. Listopad 2019.]
21. **Lee, Changhee.** Numerical and experimental investigation of evaporation and mixture uniformity of urea–water solution in selective catalytic reduction system. *Transportation Research Part D*. South Korea : Elsevier, 2017.
22. **I.Hakki. Savci, Ford Otomotiv Sanayi.** *COMPACT MIXER DESIGN FOR HEAVY DUTY SCR APPLICATION*. Istanbul, Turkey : International Journal of Advances on Automotive, 2018. Research Article – IJAAT – 2018 – 1.
23. **Vahid Abdolkarimi, Faramarz Hormozi.** Computational Fluid Dynamics Modeling of a Fluid Catalytic Cracking Atomizer. *Journal of chemical engineering of Japan*. 2010.
24. **Joel H. Ferziger, Milovan Peric.** *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer : autor neznámý, 2002. 3-540-42074-6.
25. **B. Andersson, R. Andersson, L. Hakansson, M. Mortensen, R. Sudiyo and B. Wachem.** *Computational fluid dynamics for engineers*. Cambridge: Cambridge University Press : autor neznámý, 2012. 978-1-107-01895-2.
26. **TIAN, Anna.** /www.cfd-online.com. *How to compute Streamwise Coefficient Multiplier*. [Online] 13. 7 2013. <https://www.cfd-online.com/Forums/cfx/113988-how-compute-streamwise-coefficient-multiplier.html>.
27. **TRŠKA, Bc. ANDREJ.** *CFD SIMULATION OF EXHAUST GASES FLOW THROUGH THE WASTEGATE OF PETROL ENGINE TURBOCHARGER*. Brno : autor neznámý, 2002.

14. Seznam obrázků

Obr. 1	Struktura světové výroby elektřiny v zemích OECD (2017) [1]	11
Obr. 2	Vývoj celkových emisí v letech 1990–2015 [5]	12
Obr. 3	Spotřeba paliv zdrojů REZZO 3 v letech 1990–2016 [5]	12
Obr. 4	Historie emisních limitů pro Evropu [7]	13
Obr. 5	Emisní normy EU pro těžké diesellové motory s výkonem > 85kW [8]	13
Obr. 6	Znázornění energetických toků s a bez kogenerace [9]	14
Obr. 7	Schéma úspory energie pomocí kogenerace TEDOM [10]	14
Obr. 8	Trigenerační jednotka TEDOM [10].....	15
Obr. 9	Závislost efektivity odstraňování NO _x na teplotě pro metalické katalyzátory [16] ...	17
Obr. 10	Účinnost SNCR na teplotě spalín [13]	18
Obr. 11	Katalyzátor typu medových pláštíků (vlevo) a deskový katalyzátor s výstupky (vpravo) [13]	19
Obr. 12	Vliv poloviční tloušťky monolitových katalyzátorových stěn na konverze NO a SO ₂ [18]	20
Obr. 13	Mechanismus eroze v deskových a voštinových katalyzátorech [18].....	20
Obr. 14	Struktura monolitického katalyzátoru [18].....	21
Obr. 15	Uspořádání SCR katalyzátoru u velkých stacionárních zdrojů [19]	22
Obr. 16	Schématická podoba monolitického katalyzátoru [20]	22
Obr. 17	Uspořádání DeNO _x při SCR ve vysokoprašném prostředí [14]	23
Obr. 18	Uspořádání DeNO _x při SCR v nízkoprašném prostředí [14].....	23
Obr. 19	Uspořádání DeNO _x při SCR pro koncové zařazení [14]	23
Obr. 20	Porovnání experimentu a simulace v katalyzátoru na bázi vanadu [21]	24
Obr. 21	Osmibřítý statický mixer [20]	25
Obr. 22	Tlakový vírový atomizér [23].....	26
Obr. 23	Schématické znázornění turbulentního pohybu (vlevo) a časovou závislost na rychlosti v bodě [24]	28
Obr. 24	Zadaná geometrie vstupní komory	29
Obr. 25	Zjednodušená geometrie (solid)	30
Obr. 26	Inverzní geometrie, na které bude provedena optimalizace (fluid).....	30
Obr. 27	Návrh první varianty.....	31
Obr. 28	Návrh druhé varianty	31
Obr. 29	Návrh třetí varianty.....	32
Obr. 30	Rozdělení geometrie fluidu a základní rozměry tělesa.....	33
Obr. 31	Geometrie bubnu s vloženou lopatkou pro usměrnění proudu.....	34
Obr. 32	Geometrie se znázorněnou polohou vstupu a výstupu	36
Obr. 33	Vykreslené proudnice (Mesh_2)	37

Obr. 34	Náhled na výchozí geometrii, na které bude provedena optimalizace	37
Obr. 35	Diskretizace výchozího stavu	39
Obr. 36	Vykreslené roviny pro vyhodnocování výsledků	40
Obr. 37	Rozložení rychlosti na základní rovině v čase 0.1, 0.4, 0.7, 1s.....	42
Obr. 38	Proudnice v čase 0.1, 0.4, 0.7, 1s	42
Obr. 39	Rozložení rychlosti na rovině 2 v čase 0.1, 0.4, 0.7, 1s	43
Obr. 40	Rozložení tlaku (vlevo) a rozložení rychlosti na základní rovině (Varianta 1).....	44
Obr. 41	Proudnice (Varianta 1)	44
Obr. 42	Rozložení rychlostí na rovině 0,1,2,3 (Varianta 1)	45
Obr. 43	Rozložení tlaku (vlevo) a rozložení rychlosti na základní rovině (Varianta 2).....	46
Obr. 44	Proudnice (Varianta 2)	46
Obr. 45	Rozložení rychlostí na rovině 0,1,2,3 (Varianta 2)	47
Obr. 46	Rozložení tlaku (vlevo) a rozložení rychlosti na základní rovině (Varianta 3).....	48
Obr. 47	Proudnice (Varianta 3)	48
Obr. 48	Rozložení rychlostí na rovině 0,1,2,3 (Varianta 3)	49
Obr. 49	Rozložení tlaku (vlevo) a rozložení rychlosti na základní rovině (Varianta 1 – zatížení 75%)	58
Obr. 50	Proudnice (Varianta 1 – zatížení 75%).....	58
Obr. 51	Rozložení rychlostí na rovině 0,1,2,3 (Varianta 1 – zatížení 75%).....	59

15. Seznam tabulek

Tab. 1	Verifikace sítí	34
Tab. 2	Parametry nastavení sítí	35
Tab. 3	Nastavení porézního média	38
Tab. 4	Popis sítě výchozího stavu	41
Tab. 5	Naměřené tlakové ztráty a hodnoty rychlostí.....	41
Tab. 6	Popis sítě první varianty	44
Tab. 7	Naměřené rychlosti (Varianta 1)	45
Tab. 8	Naměřené tlakové ztráty (Varianta 1)	45
Tab. 9	Popis sítě druhé varianty	46
Tab. 10	Naměřené rychlosti (Varianta 2)	47
Tab. 11	Naměřené tlakové ztráty (Varianta 2)	47
Tab. 12	Popis sítě třetí varianty	48
Tab. 13	Naměřené rychlosti (Varianta 3)	49
Tab. 14	Naměřené tlakové ztráty (Varianta 3)	49
Tab. 15	Popis sítě první varianty (zatížení 75%).....	58
Tab. 16	Naměřené rychlosti.....	59
Tab. 17	Naměřené tlakové ztráty	59

16. Seznam příloh

Příloha A.....	56
Příloha B.....	58

16.1. Příloha A

Zadané složení spalin při spalování zemního plynu:

CO ₂	14%
N ₂	76%
H ₂ O	10%

Hmotnostní koncentrace jednotlivých složek:

W _{CO₂}	0,14
W _{N₂}	0,76
W _{H₂O}	0,1

Molární hmotnost jednotlivých složek:

M _{CO₂}	44,0095 $\frac{g}{mol}$
M _{N₂}	28,0134 $\frac{g}{mol}$
M _{H₂O}	18,0153 $\frac{g}{mol}$

Objemová koncentrace jednotlivých složek:

$$X_{CO_2} = \frac{\frac{W_{CO_2}}{M_{CO_2}}}{\frac{W_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{W_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{W_{H_2O}}{M_{H_2O}}} = \frac{\frac{0,14}{44,0095}}{\frac{0,14}{44,0095} + \frac{0,76}{28,0134} + \frac{0,1}{18,0153}} = 0,088704$$
$$X_{N_2} = \frac{\frac{W_{N_2}}{M_{N_2}}}{\frac{W_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{W_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{W_{H_2O}}{M_{H_2O}}} = \frac{\frac{0,76}{28,0134}}{\frac{0,14}{44,0095} + \frac{0,76}{28,0134} + \frac{0,1}{18,0153}} = 0,756499$$
$$X_{H_2O} = \frac{\frac{W_{H_2O}}{M_{H_2O}}}{\frac{W_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{W_{N_2}}{M_{N_2}} + \frac{W_{H_2O}}{M_{H_2O}}} = \frac{\frac{0,1}{18,0153}}{\frac{0,14}{44,0095} + \frac{0,76}{28,0134} + \frac{0,1}{18,0153}} = 0,154798$$

Molární hmotnost směsi:

$$M_s = X_{CO_2} * M_{CO_2} + X_{N_2} * M_{N_2} + X_{H_2O} * M_{H_2O}$$
$$M_s = 0,088704 * 44,0095 + 0,756499 * 28,0134 + 0,154798 * 18,0153$$
$$M_s = 27,88434 \frac{g}{mol}$$

Specifická plynová konstanta směsi:

$$r = \frac{R}{M_s} = \frac{8,3144598}{27,88434} = 0,298177 \frac{J}{K \cdot g}$$
$$r = 298,177 \frac{J}{K \cdot kg}$$

Specifická plynová konstanta jednotlivých složek:

$$r_{CO_2} = \frac{R}{M_{CO_2}} = \frac{8,3144598 * 1000}{44,0095} = 188,9842 \frac{J}{K.kg}$$

$$r_{N_2} = \frac{R}{M_{N_2}} = \frac{8,3144598 * 1000}{28,0134} = 296,8030 \frac{J}{K.kg}$$

$$r_{H_2O} = \frac{R}{M_{H_2O}} = \frac{8,3144598 * 1000}{18,0153} = 461,5708 \frac{J}{K.kg}$$

Měrná tepelná kapacita jednotlivých složek při stálém tlaku:

$$C_{PCO_2} = \frac{r_{CO_2} * \kappa}{\kappa - 1} = \frac{188,9842 * 1,33}{1,33 - 1} = 761,4218 \frac{J}{K.kg}$$

$$C_{PN_2} = \frac{r_{N_2} * \kappa}{\kappa - 1} = \frac{296,8030 * 1,4}{1,4 - 1} = 1038,2703 \frac{J}{K.kg}$$

$$C_{PH_2O} = \frac{r_{H_2O} * \kappa}{\kappa - 1} = \frac{461,5708 * 1,33}{1,33 - 1} = 1860,2703 \frac{J}{K.kg}$$

Měrná tepelná kapacita směsi při stálém tlaku:

$$C_{PS} = W_{CO_2} * C_{PCO_2} + W_{N_2} * C_{PN_2} + W_{H_2O} * C_{PH_2O}$$

$$C_{PS} = 0,14 * 761,4218 + 0,76 * 1038,2703 + 0,1 * 1860,2703$$

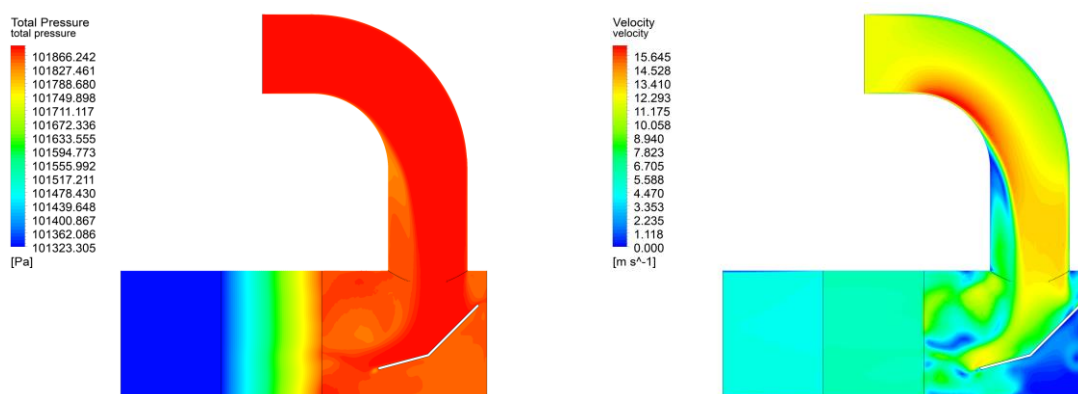
$$C_{PS} = 1082,1219 \frac{J}{K.kg}$$

16.2. Příloha B

V Tab. 15 jsou seskupeny vlastnosti sítě první varianty při zatížení na 75%. Oproti původní variantě, zde byla změněna okrajová podmínka na vstupu, a sice hmotnostní průtok byl změněn z 0,560556kg/s na 0,425278 kg/s a celková teplota byla změněna z 456°C na 465°C.

Popis	Hodnota
Počet elementů	1 150 208
Skewness	0,16777
Aspect ratio	32,524
Hodnota y+	0,635749
Výpočetní čas	2hod 7min

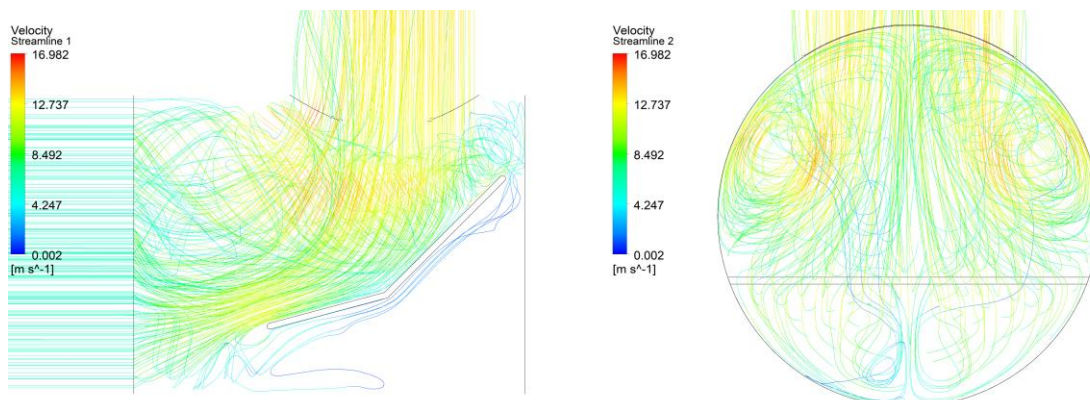
Tab. 15 Popis sítě první varianty (zatížení 75%)



Obr. 49 Rozložení tlaku (vlevo) a rozložení rychlosti na základní rovině (Varianta 1 – zatížení 75%)

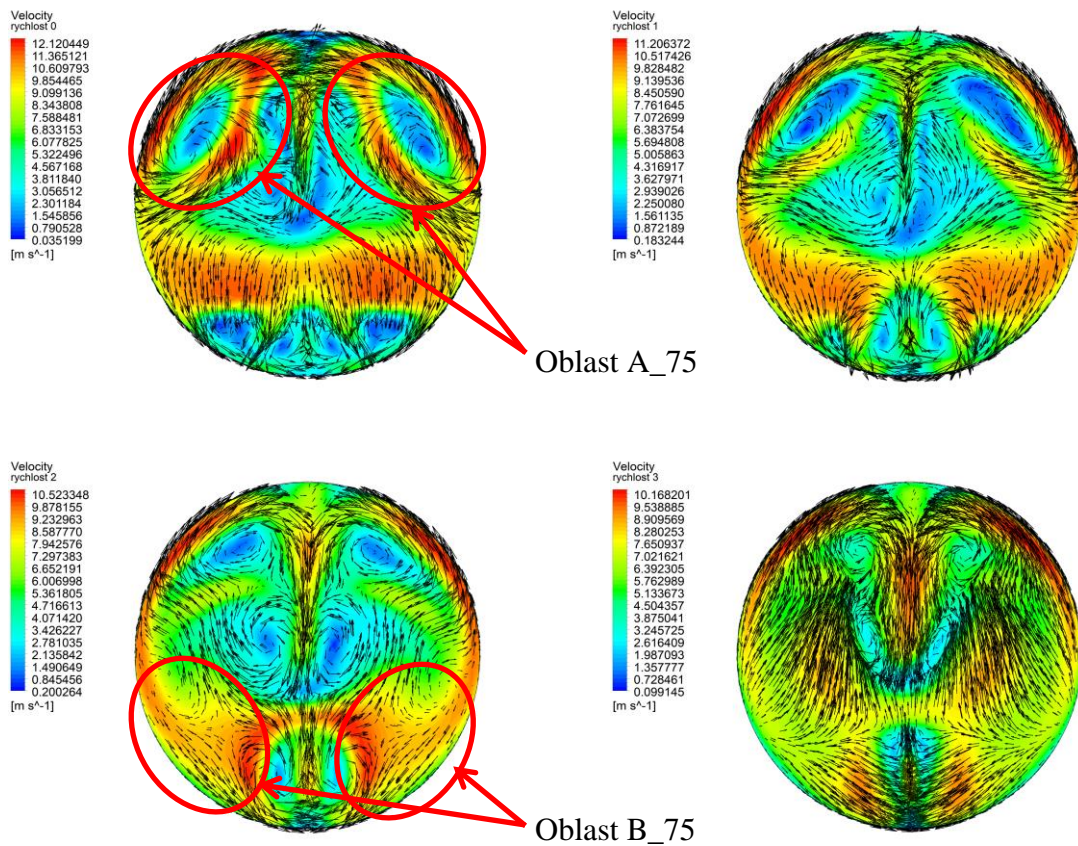
I zde tlaková ztráta v porézním médiu tvoří značnou část, a sice 512,547Pa, celková tlaková ztráta je 534,227Pa, což je o 40,4% méně než u zatížení na 100%.

Chování proudu je velice podobné jako u zatížení na 100%, vznikají zde podobné víry, které jsou k vidění na vykreslených vektorech (Obr. 51 - Oblast A_75).



Obr. 50 Proudnice (Varianta 1 – zatížení 75%)

Na Obr. 50 jsou vykresleny proudnice, lze si povšimnout, že jsou téměř shodné jako u zatížení na 100%.



Obr. 51 Rozložení rychlostí na rovině 0,1,2,3 (Varianta 1 – zatížení 75%)

Výsledné hodnoty

V této sekci jsou popsány výsledné hodnoty pro variantu 1 při zatížení na 75%. V níže přiložené tabulce (Tab. 16) je uvedeno srovnání s původní variantou, tedy při zatížení na 75% rychlost proudu spalin nedosahuje na žádné rovině zadaného rozmezí 10-15m/s.

Nejvyšší možná rychlost se vyskytuje ve stejné oblasti jako u varianty 1, tedy v kolenu v oblasti odtržení proudu (viz Obr. 49) a dosahuje hodnoty 16,48m/s.

Nižší zatížení se projevuje na hmotnostním toku, který je největší v oblasti B_75 na rovině 2.

Lokace	Rychlost [m/s] (zatížení 100%)	Rychlost [m/s] (zatížení 75%)
Rovina 0	12.284	9.289
Rovina 1	11.653	7.882
Rovina 2	10.516	7.478
Rovina 3	9.213	6.920

Tab. 16 Naměřené rychlosti

Popis	Tlaková ztráta [Pa] (zatížení 100%)	Tlaková ztráta [Pa] (zatížení 75%)
Porézní doména	865,266	512.547
Celková	896,516	534.227

Tab. 17 Naměřené tlakové ztráty