

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

## FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: Stavba energetických strojů a zařízení

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

## Optimalizace komory katalyzátoru

Vypracoval: Jiří Hlaváč

Vedoucí práce: Ing. Michal Volf

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Jiří HLAVÁČ</b>
Osobní číslo:	<b>S16B0047P</b>
Studijní program:	<b>B2301 Strojní inženýrství</b>
Studijní obor:	<b>Stavba energetických strojů a zařízení</b>
Téma práce:	<b>Optimalizace komory katalyzátoru</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra energetických strojů a zařízení</b>

### Zásady pro vypracování

1. Princip využití katalyzátoru.
2. Popis geometrie komory.
3. Popis kritických částí, které ovlivňují tepelné a proudové pole.
4. Návrh možných modifikací komory.
5. Provedení numerických simulací.
6. Vyhodnocení výsledků.
7. Závěr.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **neuveđen**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- KOUBEK, J.: Průmyslové katalytické procesy, skripta VŠCHT Praha, 2007
- SPIVEY, J. J.: Catalysis today, ISSN: 0920-5861
- JAWAD, B., BIGGS, Ch., KLEIN, B.: Exhaust System Design for a Four Cylinder Engine, Proceedings of the 2002 SAE Motorsports Engineering Conference and Exhibition, ISSN 0148-7191
- TEDOM [online]. [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: [www.TEDOM.com](http://www.TEDOM.com)
- ANSYS, ANSYS CFX-Solver Theory Guide [online], dostupné z: [www.ansys.com](http://www.ansys.com)

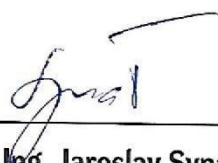
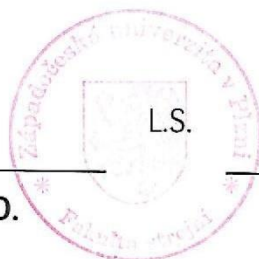
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Volf**  
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant bakalářské práce: **Stanislav Souček**  
Tedom a.s.

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2020**



**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan



**Dr. Ing. Jaroslav Synáč**  
vedoucí katedry

## **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 rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Volfovi za nesmírnou ochotu a velmi cenné rady, bez kterých by tato práce nevznikla a mému konzultantovi Stanislavu Součkovi ze společnosti TEDOM a.s. za zadání velmi zajímavého tématu. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a blízkému okolí za podporu v rámci celého studia.

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Hlaváč	Jméno Jiří	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 / Stavba energetických strojů a zařízení		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Volf	Jméno Michal	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Optimalizace komory katalyzátoru		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	68	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	42	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	26
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	<p>Bakalářská práce se zabývá katalyzátory a technologií kogenerace. Obsahuje studii vlivu tvaru komory katalyzátoru kogenerační jednotky společnosti TEDOM a.s. na rozložení hmotnostního toku a tlakové ztráty média. Získané poznatky byly aplikovány při optimalizaci této komory. Potřebné numerické výpočty byly provedeny pomocí software ANSYS.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	<p>CFD, numerický výpočet, simulace, katalyzátor, složení spalin, kogenerace, kogenerační jednotka, tlaková ztráta, koeficient tlakové ztráty, optimalizace</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Hlaváč	Name Jiří	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 / Stavba energetických strojů a zařízení		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Volf	Name Michal	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Optimization of a catalytic converter chamber		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Design of Power Machines and Equipment	<b>SUBMITTED IN</b>	2020
----------------	------------------------	-------------------	--	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	68	<b>TEXT PART</b>	42	<b>GRAPHICAL PART</b>	26
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	<p>The bachelor thesis focuses on catalytic converters and the technology of cogeneration. It contains a study of an impact of the chamber shape included in TEDOM a.s. cogeneration unit on decomposition of mass flow and pressure losses of the medium. Analysis data was used to optimize the chamber. Required calculations were processed by ANSYS software.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>CFD, numerical calculation, simulation, catalytic convertor, flue gas composition, cogeneration, cogeneration unit, pressure loss, pressure loss coefficient, optimization</p>

## Seznam použitých veličin a symbolů

Veličina	Jednotka	Název
$\lambda$	[ - ]	Součinitel přebytku vzduchu
$M_v$	[kg]	Hmotnost suchého vzduchu
$M_p$	[kg]	Hmotnost paliva ve směsi
$L_{vt}$	[kg]	Teoretické množství suchého vzduchu
Re	[ - ]	Reynoldsovo číslo
L	[m]	Délka
D	[m]	Průměr potrubí
w	[ $m \cdot s^{-1}$ ]	Relativní rychlost proudění
$\nu$	[ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]	Kinematická viskozita
$\rho$	[ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Hustota
$P_V$	[ - ]	Objemová porozita
t	[ s ]	Čas
p	[ Pa ]	Tlak
$\Delta p$	[ Pa ]	Tlaková ztráta
$\zeta$	[ - ]	Koeficient místních ztrát
$\dot{m}$	[ $kg \cdot s^{-1}$ ]	Hmotnostní tok
T	[ K ]	Teplota
I	[ % ]	Intenzita turbulence
$C_{r1}$	[ $kg/m^3 \cdot s$ ]	Lineární rezistentní koeficient
$C_{r2}$	[ $m \cdot kg^{-4}$ ]	Kvadratický rezistentní koeficient
y+	[ - ]	Bezrozměrná vzdálenost stěny

## Další označení a zkratky

KVET                      Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie



## Obsah

Úvod .....	13
1 Princip kogenerace .....	14
1.1 Druhy kogeneračního systému .....	15
1.1.1 Topping cyklus .....	15
1.1.2 Bottoming cyklus .....	16
1.2 Kogenerační jednotka .....	17
2 Katalyzátor .....	18
2.1 Úvod do katalytického procesu .....	18
2.2 Spalování .....	21
2.2.1 Škodliviny plynového spalovacího motoru .....	23
2.3 Konstrukční provedení kovových katalyzátorů .....	24
2.3.1 Třícestný katalyzátor .....	24
2.3.2 Oxidační katalyzátor .....	25
2.3.3 Lambda sonda .....	26
2.3.4 Filtr pevných částic .....	27
3 Úvod do numerických simulací .....	29
3.1 Základní metody numerických simulací .....	29
3.1.1 Metoda konečných diferencí .....	29
3.1.2 Metoda konečných objemů .....	29
3.1.3 Metoda konečných prvků .....	29
3.2 Alternativní metody .....	30
3.3 Metody výpočtů turbulentního proudění .....	30
3.3.1 Přímá numerická simulace (DNS) .....	30
3.3.2 Metoda velkých vírů (LES) .....	30
3.3.3 Metoda časového středování Navier-Stokesových rovnic (RANS) .....	31
4 Numerická simulace katalyzátoru .....	32
4.1 Zadaná geometrie a její úprava .....	32
4.2 Verifikace a tvorba výpočetní sítě .....	35
4.2.1 Popis geometrie pro verifikaci výpočetní sítě .....	35
4.2.2 Varianty výpočetní sítě .....	35
4.2.3 Nastavení výpočtu pro účely verifikace výpočetní sítě .....	37
4.2.4 Vyhodnocení .....	37
4.3 Studie porézního média .....	41
4.4 Nastavení výpočtů .....	42

4.4.1	Hlavní parametry .....	42
4.4.2	Okrajové podmínky .....	42
4.5	Způsob vyhodnocování výsledků .....	43
5	Výchozí varianta .....	45
5.1	Shoda výchozí simulace s realitou .....	49
5.2	Porovnání s transientní simulací .....	49
6	Optimalizace .....	51
6.1	Varianty profilu otočné komory .....	51
6.1.1	Varianta č. 1 (profil „K“) .....	52
6.1.2	Varianta č. 2 (profil „W“) .....	53
6.1.3	Varianta č. 3 (profil „O“) .....	53
6.2	Optimalizace dle tvaru .....	54
6.2.1	Varianta K .....	57
6.2.2	Varianta W .....	57
6.2.3	Varianta O .....	57
6.3	Optimalizace dle vzdálenosti .....	58
6.4	Spektrum optimalizace .....	62
	Závěr .....	66
	Citovaná literatura .....	67

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Porovnání kogenerace se separátní výrobou [2].....	14
Obrázek 2: Porovnání kogenerace a separátní výroby [3] .....	14
Obrázek 3: Topping cycle [5].....	16
Obrázek 4: Bottoming cycle [5] .....	16
Obrázek 5: Konstrukce kogenerační jednotky [6].....	17
Obrázek 6: Chemické schéma katalytického procesu [7] .....	18
Obrázek 7: Diagram potenciální energie [7] .....	19
Obrázek 8: Nanočástice pevného katalyzátoru [7].....	20
Obrázek 9: Složení emisí v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu u zážehového motoru [11] .....	22
Obrázek 10: Složení emisí v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu u vznětového motoru [11] .....	22
Obrázek 11: Třícestný katalyzátor [16].....	24
Obrázek 12: Oxidační katalyzátor – řez [18] .....	25
Obrázek 13: Schéma zapojení lambda sondy [20] .....	26
Obrázek 14: Lambda sonda - závislost napětí [19] .....	26
Obrázek 15: Filtr pevných částic s keramickou filtrační vložkou [22] .....	27
Obrázek 16: Filtr pevných částic – zaklínění [23] .....	27
Obrázek 17: Filtr pevných částic – zachycení [23] .....	28
Obrázek 18: Filtr pevných částic – difúze [23] .....	28
Obrázek 19: Průběh DNS, LES a RANS v závislosti na čase [24] .....	31
Obrázek 20: Zadaná geometrie.....	32
Obrázek 21: Zadaná geometrie - řez .....	33
Obrázek 22: Geometrie média.....	34
Obrázek 23: Geometrie média - řez .....	34
Obrázek 24: Popis geometrie pro verifikaci výpočetní sítě .....	35
Obrázek 25: Výpočetní síť komory katalyzátoru .....	36
Obrázek 26: Rozložení rychlosti ve směru X na výstupu (varianty 1 & 2) .....	38
Obrázek 27: Rozložení rychlosti ve směru X na výstupu (varianty 3 & 4) .....	38
Obrázek 28: Konvergence reziduí a tlakových ztrát – 3. varianta .....	39
Obrázek 29: Konvergence imbalancí - posl. 20 iterací - 1. & 4. varianta.....	39
Obrázek 30: Výpočetní síť výchozí varianty .....	40
Obrázek 31: Výpočetní síť výchozí varianty - detail.....	40
Obrázek 32: Vyhodnocovací roviny .....	43
Obrázek 33: Výchozí varianta – rychlost – kontury - roviny XY & XZ .....	46
Obrázek 34: Výchozí varianta - rychlost – vektor – roviny XY & XZ.....	46
Obrázek 35: Detail vírové oblasti.....	46
Obrázek 36: Výchozí varianta - tlak – roviny XY & XZ.....	47
Obrázek 37: Výchozí varianta - rychlost K (absolutní hodnota, ve směru X,Y a Z).....	48
Obrázek 38: Výchozí varianta - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY).....	48
Obrázek 39: Průběh tlakové ztráty v komoře katalyzátoru .....	50
Obrázek 40: Výchozí varianta.....	52
Obrázek 41: Varianta č. 1 (profil „K“).....	52
Obrázek 42: Varianta č. 2 (profil „W“).....	53
Obrázek 43: Varianta č. 3 (profil „O“).....	53

Obrázek 44: Varianta K - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s .....	54
Obrázek 45: Varianta W - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s .....	55
Obrázek 46: Varianta O - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s .....	55
Obrázek 47: Varianta K - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY) .....	55
Obrázek 48: Varianta W - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY) .....	56
Obrázek 49: Varianta O - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY) .....	56
Obrázek 50: přiblížení - 10 mm - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s .....	58
Obrázek 51: oddálení - 30 mm - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s .....	59
Obrázek 52: oddálení - 60 mm - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s .....	59
Obrázek 53: přiblížení - 10 mm- vektory rychlosti - detail otočné komory (XY) .....	59
Obrázek 54: oddálení - 30 mm - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY).....	60
Obrázek 55: oddálení - 60 mm - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY).....	60

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Vývoj kogeneračních jednotek [1] .....	15
Tabulka 2: Varianty výpočetních sítí .....	36
Tabulka 3: Vyhodnocení variant výpočetních sítí.....	37
Tabulka 4: Lineární a kvadratické koeficienty poréznych médií.....	41
Tabulka 5: Vypočtené hodnoty výchozí varianty .....	45
Tabulka 6: Tlakové ztráty transientního simulace .....	50
Tabulka 7: Vypočtené hodnoty varianty K .....	54
Tabulka 8: Vypočtené hodnoty varianty W .....	54
Tabulka 9: Vypočtené hodnoty varianty O .....	54
Tabulka 10: Vypočtené hodnoty - přiblížení - 10 mm .....	58
Tabulka 11: Vypočtené hodnoty - oddálení - 30 mm.....	58
Tabulka 12: Vypočtené hodnoty - oddálení - 60 mm.....	58
Tabulka 13: Přehled tlakové ztráty dle rozdílů statických tlaků .....	62
Tabulka 14: Přehled tlakové ztráty dle koeficientů místních ztrát.....	62
Tabulka 15: Přehled rozložení rychlostí – rovina K - směr X – rozsah 0 – 6 m/s .....	63
Tabulka 16: Přehled rozložení rychlostí – rovina K - směr X – rozsah 3 – 6 m/s .....	64

## Úvod

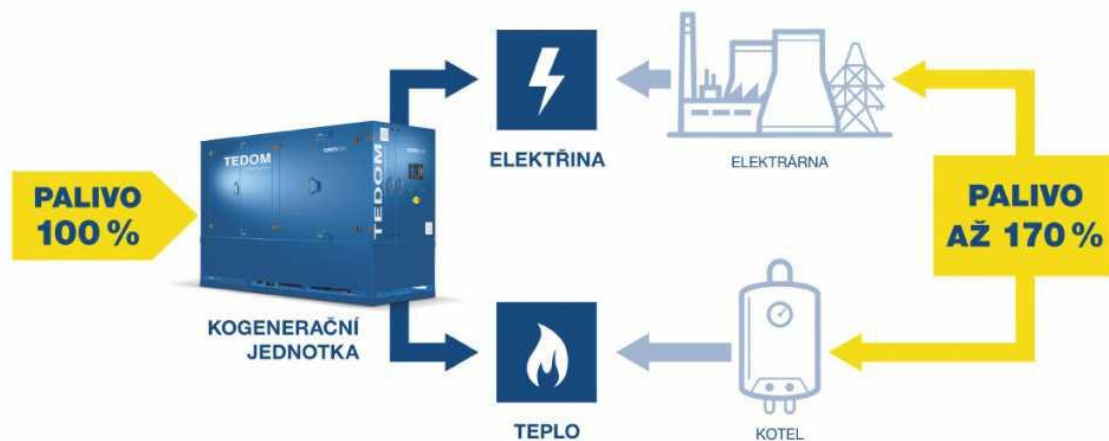
Od doby průmyslové revoluce se v historii techniky i společnosti uskutečnily nesmírné skoky vedoucí ke změně životního stylu prakticky všech lidí žijících v rozvinutých částech světa. Technologickým pokrokem se výrazně snížilo potřebné úsilí k zajištění potřeb. Rozvoj pomohl rozvinout již existující odvětví, kterým je například zemědělství. V případě dopravy a komunikace představoval významný krok kupředu a otevřel nové dříve nepředstavitelné možnosti. Vynález spalovacích motorů představoval téměř kompletní opuštění starých principů využívaných k pohonu vozidel. Objevy nových technologií vedly k počátkům zcela nových vědních oborů. Pravděpodobně nejvýznamnějším příkladem revolučního objevu je elektrický proud, bez kterého se moderní člověk prakticky neobejde. Tato silná závislost na elektrické energii ovšem znamená, že je po ní celosvětově nesmírně vysoká poptávka.

Vysoké nároky na výrobu elektrické energie, pohon dopravních prostředků a dalších nezbytných aspektů moderní doby drasticky změnilo životní prostředí na naší planetě. Ihned po proběhnutí průmyslové revoluce se na enviromentální dopad nebral příliš velký zřetel. Postupem času se ovšem staly negativní vlivy nepřehlédnutelným problémem. Začaly se čím dál tím více využívat obnovitelné zdroje s menším negativním dopadem na životní prostředí. Vlády států po celém světě začaly zavádět nařízení omezující emisní dopady (EURO normy, Kjótský protokol a další). Příkladem konkrétního opatření je povinné zavedení katalyzátorů do automobilů a dalších strojů a zařízení obsahující spalovací či vznětové motory. Jejich přítomností se potlačuje tvorba škodlivých plynných složek vypouštěných do ovzduší a jsou proto velmi významné pro boj proti negativním vlivům novodobé společnosti na naši planetu.

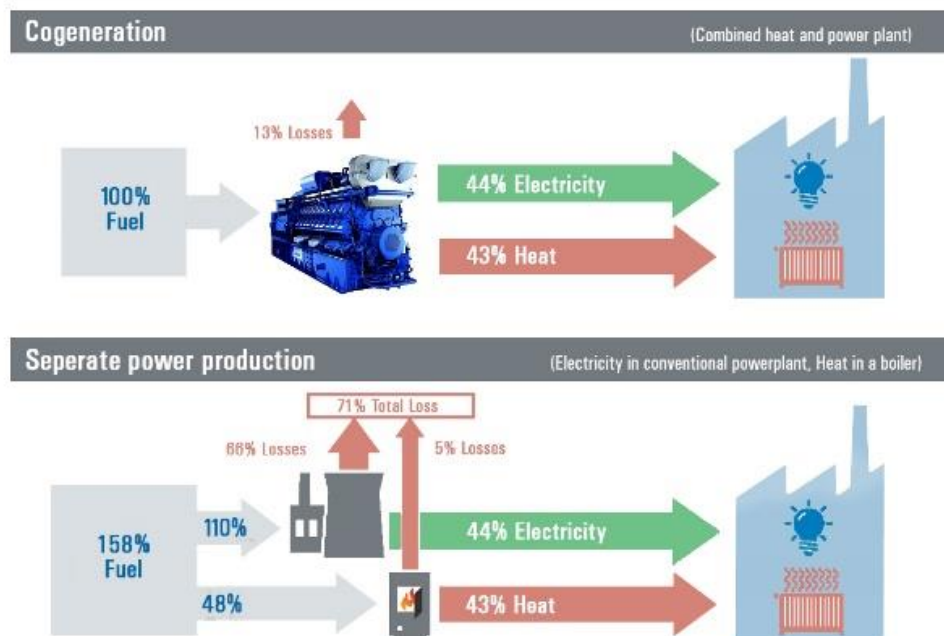
Objektem této bakalářské práce je optimalizace komory katalyzátoru kogenerační jednotky firmy TEDOM a.s. za pomoci nalezení vhodného profilu a polohy víka ovlivňující proud spalin v této komoře. Za výstup optimalizace se považuje zmenšení tlakové ztráty a zajištění rovnoměrného rozložení hmotnostního toku média, což by mělo vést ke zvýšení účinnosti katalyzátoru.

## 1 Princip kogenerace

Pojem kogenerace neboli kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie, též známý pod obecně uznávanou zkratkou KVET, se začal v České republice dostávat do podvědomí občanů na počátku devadesátých let minulého století se zaváděním prvních kogeneračních jednotek na našem území. Hlavní ideou společné výroby dvou rozdílných typů energie byla především snaha o zvýšení tepelné účinnosti cyklu (Obrázek 1, Obrázek 2). V souladu s druhým termodynamickým zákonem není možné využít 100 % energie paliva, ovšem tepelná energie, která vzniká spalováním paliva jako vedlejší produkt výroby energie elektrické, by byla za normálních podmínek nevyužita, a proto ji technologie kogenerace využívá např. k ohřevu vody, či vytápění objektů.



Obrázek 1: Porovnání kogenerace se separátní výrobou [2]



Obrázek 2: Porovnání kogenerace a separátní výroby [3]

Využitím tepelné energie se docílí úspory paliva, a tudíž i zmírnění dopadu na životní prostředí. Jelikož dochází ke snížení spotřeby paliva, představuje KVVET jistou ekonomickou výhodnost, což vedlo k zavedení kogeneračních jednotek nejen do průmyslového prostředí, ale i do soukromého na úrovni domácností. Mezi výhody využívání kogeneračních jednotek patří také eliminace přenosových ztrát tepla při vlastní spotřebě tepelné a elektrické energie. Postupným vývojem této technologie (Tabulka 1) se každým krokem navyšovala úspora paliva. Dnešní úspora paliva dosahuje až 40 % oproti separátním technologiím pomocí 80% až 85% účinnosti cyklu.

Tabulka 1: Vývoj kogeneračních jednotek [1]

Vývoj kogeneračních jednotek		
Minulost	Současnost	Budoucnost
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oběhy s parní turbínou</li> <li>• Oběhy s plynovou turbínou</li> <li>• Paroplynový cyklus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Na bázi pístových spalovacích motorů</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ORC cyklus</li> <li>• Mikroturbíny</li> <li>• Stirlingův motor</li> <li>• Parní motor</li> <li>• Palivové články</li> </ul>

V případě nadměrné výroby elektrické energie je možné tuto nadprodukcí prodávat do veřejné rozvodné sítě, což vede k dalšímu zvednutí ekonomické výhodnosti a tudíž návratnosti investice do této technologie. Jako každá technologie má ovšem kogenerace i své nevýhody, jako jsou například vyšší investiční náklady, a fakt, že tato návratnost je silně závislá na optimálním využití vyrobených energií. [1] [3]

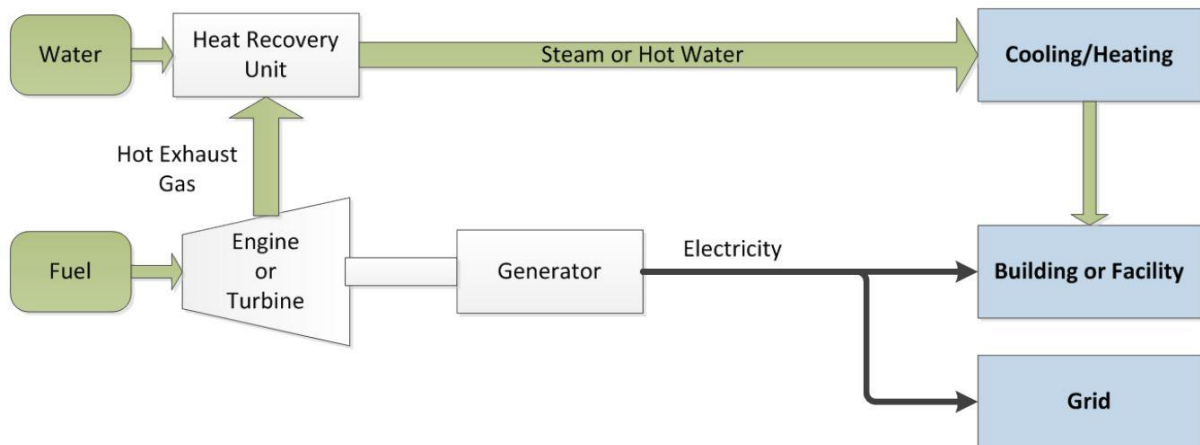
## 1.1 Druhy kogeneračního systému

Podle různých atributů můžeme rozdělit kogenerační systémy na tzv. topping či bottoming cykly. Jejich rozdíl spočívá v rozdílném přístupu ke zpracování energie paliva. Volba cyklu přímo závisí na prioritách odvětví, pro které je využíváný.

### 1.1.1 Topping cyklus

Jedná se o systém vhodnější pro odvětví energetiky. Primární výrobu představuje výroba elektrické energie. Teprve po využití paliva pro tento účel je generována tepelná energie, která je využita pro zajištění tepelných podmínek procesu, popřípadě na jiné účely (Obrázek 3). Topping cycle lze kategorizovat na čtyři poddruhy na základě zvolené pohonné jednotky:

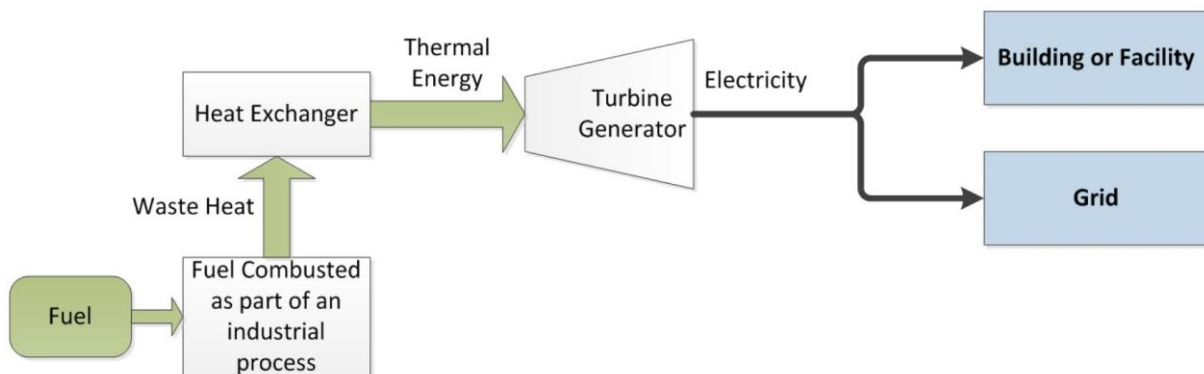
- **Cyklus s parní turbínou**
- **Cyklus s vnitřním spalováním**
- **Cyklus se spalovací turbínou**
- **Kombinovaný cyklus**



Obrázek 3: Topping cycle [5]

### 1.1.2 Bottoming cyklus

Oproti topping cyklu je palivo nejprve využito na výrobu tepelné energie o vysoké teplotě. Elektrická energie je generována až sekundárně právě z této tepelné energie pomocí regeneračního kotle nebo turbínového generátoru (Obrázek 4). Bottoming cyklus se využívá u procesu pracujícího s vysokými teplotami, ať už jde o potřebu dodávky nebo odvodu emisního tepla. Konkrétně jde například o cementový, ocelářský, keramický, petrochemický nebo plynárenském průmysl. [4]



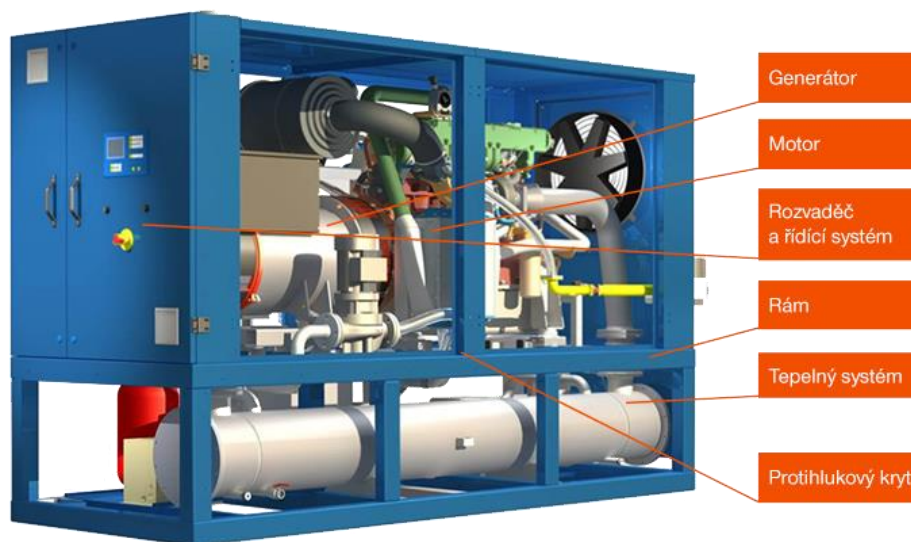
Obrázek 4: Bottoming cycle [5]



## 1.2 Kogenerační jednotka

Celý proces kogenerace probíhá v tzv. kogenerační jednotce. Jde o zařízení obsahující potřebné komponenty uzavřené v konstrukčním rámu. Příklad konstrukčního řešení je znázorněn na následujícím obrázku (Obrázek 5). Nezbytné komponenty jednotky představují: [4], [6]

- **Pohonná jednotka** – aktivní člen – pohánějící generátor
- **Palivový systém**
- **Generátor** – komponenta generující elektrickou energii
- **Regenerační systém** – systém zajišťující odvod dosud nevyužitého tepla motoru
- **Chladicí systém** – systém odvádějící nevyužitelné teplo vygenerovaného motorem
- **Spalovací a ventilační systém** – systém dodávající čistý vzduch do a znečištěný vzduch z motoru
- **Kontrolní systém** – systém pro zachování bezpečného optimálního chodu
- **Kryt** - část konstrukce ochraňující zařízení i personál, redukce hluku



Obrázek 5: Konstrukce kogenerační jednotky [6]

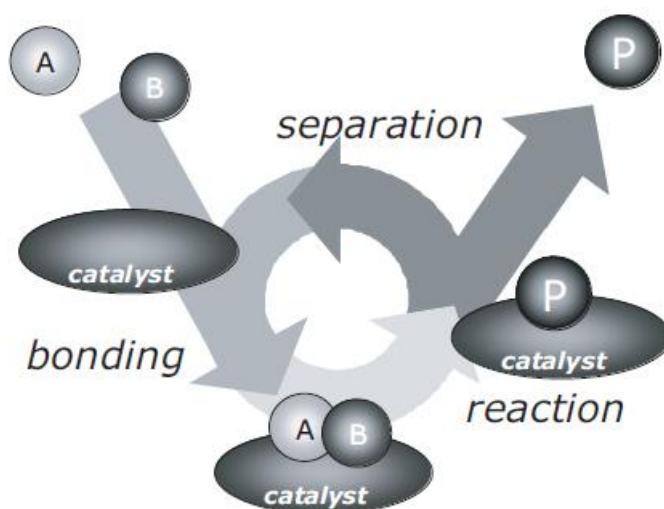
## 2 Katalyzátor

Práce se zaměřuje na oblast katalyzátoru kogenerační jednotky umístěné za pohonnou jednotkou, kterou je vznětový motor. Cílem této kapitoly je shrnout základní poznatky týkající se katalytického procesu, jeho rozdělení, škodlivin spalovacího procesu, způsobu jejich eliminace a konstrukčního provedení kovových katalyzátorů.

### 2.1 Úvod do katalytického procesu

Dá se s jistotou říci, že katalytické procesy tvoří nemalou a velmi důležitou složku průmyslu po celém světě a ve velkém spektru zaměření. Přibližně 85 – 90 % produktů chemického průmyslu by nebylo možné zhotovit bez využití katalýzy. Jedná se především o výrobu paliv v rafinériích a industriálních chemikálií ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NO}$  a jiné). Když opomineme význam v samotné výrobě, dalším velmi užitečným využitím je odstraňování nečistot z vedlejších produktů spalovacího procesu a tím snížení emisní stopy zařízení či závodu. Právě za tímto účelem kogenerační jednotka disponuje katalyzátorem.

Předtím, než se podíváme na specifické využití katalyzátorů, je nutné definovat a osvětlit základní chemické mechanismy katalytického procesu. Z chemického hlediska jde o urychlení či vůbec umožnění chemické reakce. Katalyzátor, který může být jakéhokoli hlavního skupenství (v případě této práce se jedná o skupenství pevné, konkrétně o kov), se chemickou vazbou naváže na reaktanty chemické reakce. Vytváří tak chemicky stabilní komplex. Tímto jsou vytvořeny ideální podmínky a látka vytvoří finální produkt za současného odloučení katalyzátoru. Ten je po uskutečnění reakce chemicky nezměněn a připraven vytvořit nový komplex s nově přichozími reaktanty. Můžeme pak katalytickou reakci definovat jako cyklickou událost, do které katalyzátor vstupuje a vystupuje z ní se stejným chemickým složením (Obrázek 6).



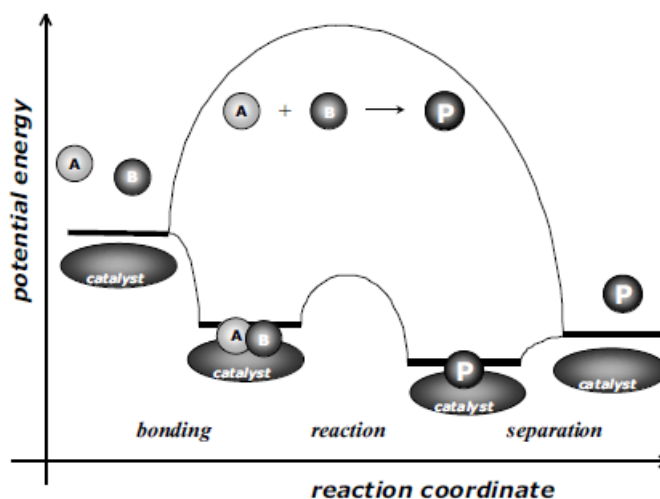
Obrázek 6: Chemické schéma katalytického procesu [7]

Výhoda využití katalyzátoru spočívá v jeho schopnosti ovlivnit hladiny potenciálních hladin reakce. Průběh na následujícím diagramu (Obrázek 7) představuje 2 energetické průběhy stejné reakce (bez a za přítomnosti katalyzátoru). Za předpokladu, že by chemická reakce měla proběhnout za standardních podmínek (bez jakékoli pomoci) musí reaktanty A a B překonat

tzv. „aktivační energii“. Tato potenciální energie je výsledkem vazebných sil mezi molekulami a představuje energii potřebnou k vytvoření stabilního chemického komplexu. Jeho vytvoření představuje energeticky náročnou část reakce. Následuje jeho rozpad na jeden či více produktů. Dochází k poklesu Gibbsovy volné energie vůči komplexu A + B. Reakce obsahující katalyzátor probíhá stejnými fázemi. Jediný zásadní rozdíl mezi nimi jsou hladiny potenciálních energií aktivovaných komplexů, kde komplex obsahující katalyzátor má energii menší. Míra tohoto rozdílu ovlivňuje nutné podmínky pro uskutečnění reakce její rychlost a v případě, že je energie komplexu menší než energie reaktantů, i její samovolnost. Porovnáním počáteční a koncové energetické hladiny lze reakce rozdělit na následující druhy:

- Exotermická
- Endotermická

Pokud se energie procesu ponížší na energii nižší, než je hodnota energie původní hladiny, jedná se o reakci exotermickou. V tomto případě se na základě zákona o zachování energie uvolňuje přebytečná energie ve formě emisního tepla. Pokud je výsledná energie vyšší, musí se energie do systému naopak dodat a jde tak o reakci endotermickou.



Obrázek 7: Diagram potenciální energie [7]

Dále je možné rozdělit katalytickou reakci na **homogenní** a **heterogenní**. Rozhodující kritérium je shodnost skupenství katalyzátoru a reaktantů. Pokud jsou obě skupenství stejná, jedná se o homogenní katalytickou reakci. V opačném případě jde o heterogenní. [7], [9]

Při shodě skupenství se jedná téměř výhradně o plynnou fázi, a nebo ještě častěji o kapalnou. Tento druh má velké zastoupení i v přírodě, například při rozpadu molekuly ozonu:

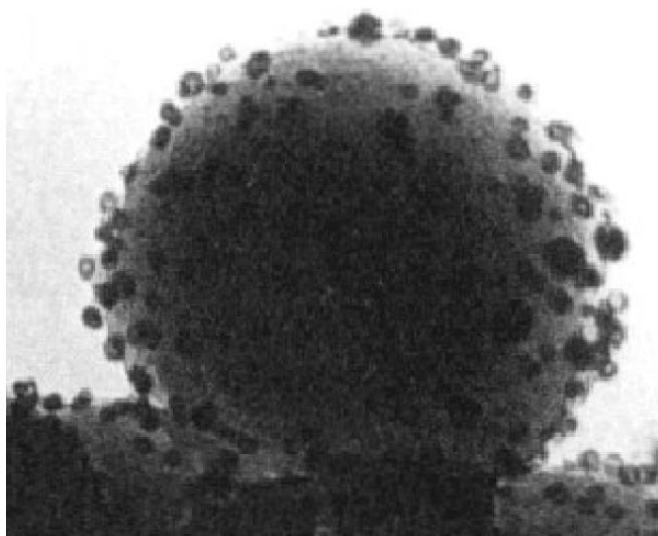


Celá reakce, se dá zapsat jednoduchým zápisem:



Ozon jako takový se rozpadá sám od sebe bez jakýchkoli dalších činitelů, ovšem při působení činitelů, jako je například vliv světla (dodává energii do reakce) nebo katalyzátoru (v tomto případě atom chlóru), je reakce velmi urychlena. Tento typ katalytické reakce především využívá chemický průmysl při výrobě lehkých chemikálií. [7], [8]

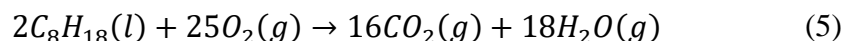
V rámci této práce je zastoupena heterogenní katalýza. Pro strojírenský průmysl je mnohem významnější. Jde především o katalýzu plynu či roztoku pomocí pevné látky. Pokud je katalyzátor neporézní, probíhá reakce pouze na povrchu z důvodu neproniknutí tekutiny dovnitř struktury pevné látky (Obrázek 8). To neplatí za předpokladu, pokud uvažujeme katalyzátor jako porézní materiál. Velmi často se využívá ušlechtilých kovů, jako je například platina. Vzhledem k její ceně se aplikuje velmi šetrně se snahou o maximalizaci povrchu vůči objemu a to ve formě částic o rozměrech v řádu nanometrů, které jsou podporované na inertní porézní struktuře. Hlavním účelem pevných katalyzátorů v průmyslu je snížení emisí za pomoci podpory rozkladu škodlivých látek obsažených ve spalínách na méně závadné produkty. [7], [9]



Obrázek 8: Nanočástice pevného katalyzátoru [7]

## 2.2 Spalování

Volba vhodného katalyzátoru silně závisí na složení spalin motoru. To je závislé nejen na chemickém složení paliva, ale i na kvalitě jeho spálení. Aktivní složku paliva představuje oktan a zastoupení ostatních chemikálií se liší pro každý druh paliva a určuje složení nečistot ve spalinách. Proces spalování oktanu je popsán následující rovnicí: [10]



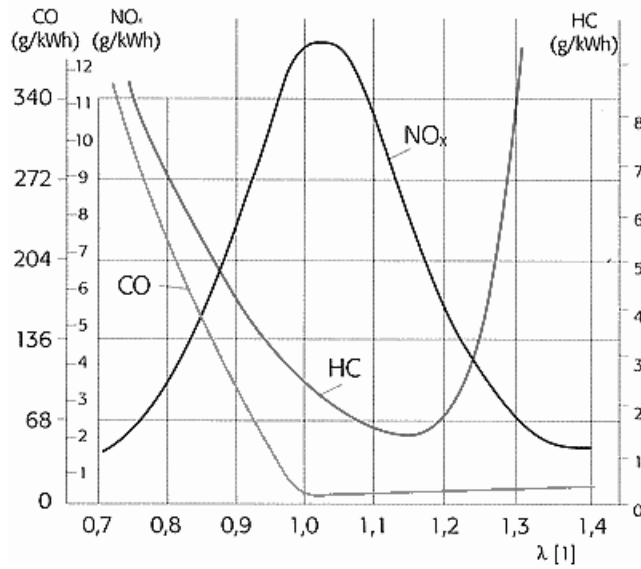
Při reálném průběhu reakce ovšem ne všechny přivedený kyslík s oktanem reaguje a za účelem zefektivnění spalování je nutno přivést větší množství vzduchu. Tím se zredukuje (popřípadě eliminuje) množství nespáleného paliva. Koeficient přebytku vzduchu představuje poměr skutečné hmotnosti přivedeného vzduchu ku hmotnosti nutné ke stechiometrickému spalování a jde tedy o hlavní parametr chemického složení spalin.

$$\lambda = \frac{m \text{ přivedeného vzduchu}}{m \text{ teoretické potřeby vzduchu}} = \frac{M_v}{M_p * L_{vt}} \quad (6)$$

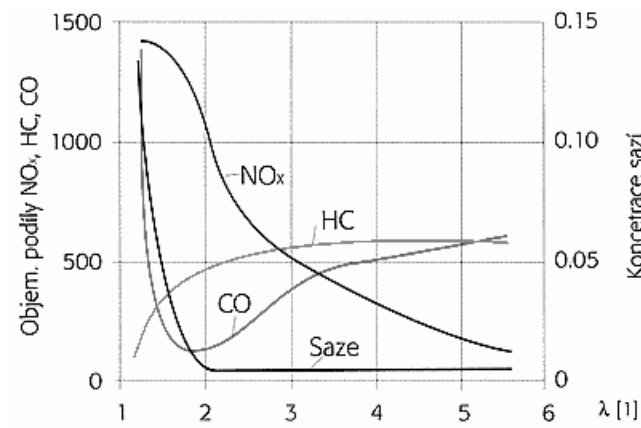
Součinitel je funkcí hmotnosti suchého vzduchu  $M_v$ , hmotnosti paliva ve směsi  $M_p$  a teoretického množství suchého vzduchu pro dokonalé spálení 1 kg paliva  $L_{vt}$ .

Pokud platí, že  $\lambda = 1$ , dochází k dokonalému spalování. V případě nedostatku vzduchu, kdy  $\lambda < 1$ , lze dosáhnout nejvyššího výkonu a to v rozsahu 0,85 – 0,95. V tomto případě lze říci, že jde o bohatou směs. V opačném případě pro  $\lambda > 1$  (přesněji v rozmezí 1,05 – 1,3) jde o přebytek vzduchu neboli chudou směs, jejíž důsledek představuje nižší spotřebu paliva a s ní spojený snižující se výkon. Pokud se součinitel přebytku vzduchu dostane nad hodnotu **1,3**, ztrácí směs schopnost zapálení. Tím se zhoršuje běh zařízení, stává se nepravidelným z důvodu vynechávání spalování. [12]

Pojem emise je chápán jako souhrnný název pro mnoho škodlivin obsažených ve spalinách, přičemž zastoupení jednotlivých škodlivin je silně závislé na přítomnosti nečistot a na koeficientu přebytku vzduchu. Problém spočívá ve faktu, že produkce jednotlivých plynů je určena jinými funkčními závislostmi. Proto nelze jednoznačně určit obecné optimum z emisního hlediska. Záleží na mnoho faktorech, jako je například složení využitého paliva nebo druh motoru. Obrázek 9 zobrazuje závislost emisních plynů na koeficientu  $\lambda$  pro zážehový motor a Obrázek 10 pro vznětový. Pro specifické případy lze ovšem empiricky stanovit intervaly pro enviromentálně nejpříjemnější využití.



Obrázek 9: Složení emisí v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu u zážehového motoru [11]



Obrázek 10: Složení emisí v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu u vznětového motoru [11]

## 2.2.1 Škodliviny plynového spalovacího motoru

Chemický proces nedokonalého spalování paliva vede k produkci mnoha odpadních sloučenin, primárně v plynné fázi. Některé z nich nemají žádný, případně pozitivní dopad na životní prostředí. Mezi ně patří například dusík ( $N_2$ ), kyslík ( $O_2$ ) nebo voda ( $H_2O$ ). Většina plynných složek je ovšem silně nežádoucích. Níže je uveden přehled nejrelevantnějších příkladů.

### 2.2.1.1 Oxid uhličitý ( $CO_2$ )

Jde o netoxický plyn. Nemalou měrou ovšem podporuje acidifikaci (okyselování) oceánů a představuje jeden z primárních skleníkových plynů způsobující globální oteplování. Především kvůli druhému bodu existuje velká mezinárodní snaha o snížení emisí oxidu uhličitého.

### 2.2.1.2 Oxid uhelnatý ( $CO$ )

Oxid uhelnatý představuje především riziko na lidském zdraví. Konkrétně snižuje schopnost krve vázat kyslík na červené krvinky. To může vést k bolestem hlavy, problémům s dýcháním a v některých případech i ke smrti. Tento typ oxidů vzniká nedokonalým spalováním.

### 2.2.1.3 Oxidy dusíku ( $NO_x$ )

Vzniká jakýmkoli spalovacím procesem. Po reakci s atmosférickým kyslíkem oxidují a přispívají tvorbě kyselých dešťů. Pokud reagují s uhlovodíky, vytvářejí ozon ( $O_3$ ), který může způsobovat záněty dýchacích cest, astma a sníženou funkci plic. Dále přispívají k tvorbě pevných částí.

### 2.2.1.4 Oxid siřičitý ( $SO_2$ )

Síra se jako taková objevuje v surové ropě a tudíž je obsažena i v benzínu a naftě. Svými účinky je oxid siřičitý obdobou oxidů dusíku. Při spalování tvoří kyselinu a tím přispívá k tvorbě kyselých dešťů, způsobuje korozi motoru, podporuje tvorbu ozonu a pevných částí.

### 2.2.1.5 Uhlovodíky a jejich deriváty ( $HC$ )

Uhlovodíky neboli karbohydráty jsou emitovány ze spalovacího zařízení jako nespálené palivo a také pomocí evaporace z palivové nádrže. Spolu s oxidy dusíku za přítomnosti světla produkují fotochemické oxidanty (mezi které patří i ozon), způsobující dýchací problémy, především u lidí trpících astmatem.

### 2.2.1.6 Benzen ( $C_6H_6$ )

Vyskytuje se ve stopovém množství jako součást ropy a tudíž i v kapalných palivech. Do atmosféry uniká jako nespálené palivo a vypařováním skrze netěsnosti. Je toxický a karcinogenní. Dlouhodobý kontakt je úzce spjat s leukémií.

### 2.2.1.7 Pevné části ( $PM$ ) a saze

Tato pevná složka spalin vzniká nedokonalým spalováním paliva a chemickými reakcemi mezi ostatními škodlivinami výfukových plynů. Částice menších rozměrů mohou proniknout do plic a způsobit dýchací potíže. Také zvyšují riziko výskytu kardiovaskulárních onemocnění. Tomuto typu znečištění se zabráňuje především užíváním filtrů pevných částic. [11], [13]

## 2.3 Konstrukční provedení kovových katalyzátorů

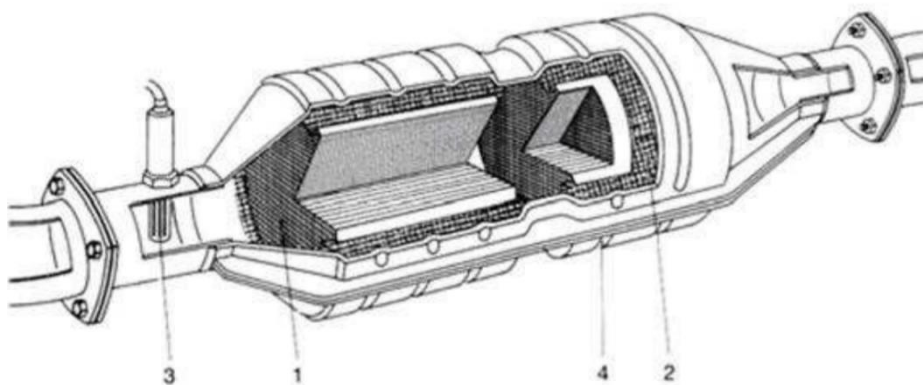
Po základním definování toho, co je to katalyzátor z hlediska fyzikálních a chemických dějů je důležité se seznámit s druhy katalyzátoru z pohledu technického. Dělí se např. z hlediska použitých kovů, samotné konstrukce, struktury, případné porézности a také z hlediska optimálního využití jeho výhod a nevýhod. Mezi nejvyužívanější typy využívané plynovými spalovacími motory patří katalyzátory oxidační a třícestrné. U dalších zdrojů emisí, benzínových a naftových spalovacích motorů se dále využívá například redukčních, dvoucestných, čtyřcestných katalyzátorů a zásobníkového katalyzátoru  $\text{NO}_x$ .

### 2.3.1 Třícestný katalyzátor

Třícestný katalyzátor (Obrázek 11), také přezdívaný trojčinný, tříložkový či řídicí, získal své jméno z důvodu využití tří vzácných kovů a to platiny (Pt), palladia (Pd) a rhodia (Rh). Současné využití těchto kovů zajišťuje přeměnu nejzávadnějších škodlivin na plyny méně škodlivé životnímu prostředí. Jedná se oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ), oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ) a uhlovodíky (HC) spolu s jeho deriváty.

V dnešní době patří k nejpoužívanějším a katalyzátorům díky svojí velké efektivnosti a spolehlivosti. Pro optimální fungování vyžaduje stechiometrické složení paliva ( $\lambda = 1$ ), což v případě motorů na zemní plyn odpovídá složení palivo : vzduch = 1 : 9,53. Jedná se o tzv. „okno“. Pro regulaci tohoto specifického poměru se využívá tzv. lambda sondy (na obrázku položka č.3), měřící aktuální obsah kyslíku ( $\text{O}_2$ ) a poté následně regulující řídicí jednotku dodávaného paliva (proto alternativní název „řídicí“).

Účinnost se pohybuje ve velkém rozmezí 50 – 95 %. Záleží na provozní teplotě, přičemž maximální účinnosti se dosahuje při dosažení teploty 400 – 800 °C, a také na stupni regulace  $\lambda$ . Za ideálních provozních podmínek dochází k vyvážení koncentrace oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) a  $\text{CO}$ . Mezi těmito plyny dochází k redukčně-oxidační substituci za výměny kyslíku, kde  $\text{NO}_x$  je donorem a  $\text{CO}$  akceptorem. Co se týče samotné stavby kompresoru, jeho základní strukturu tvoří keramický či kovový základ, na jehož povrchu se nachází ušlechtilý kov. Následující obrázek (Obrázek 11) popisuje konstrukční uspořádání. [14], [15]



Obrázek 11: Třícestný katalyzátor [16]

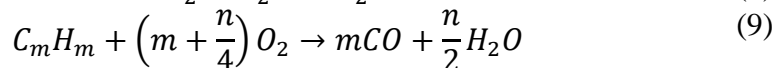
(1 - keramický monolit, 2 – elastická drátěná vložka, 3 – lambda sonda, 4 – kryt)



### 2.3.2 Oxidační katalyzátor

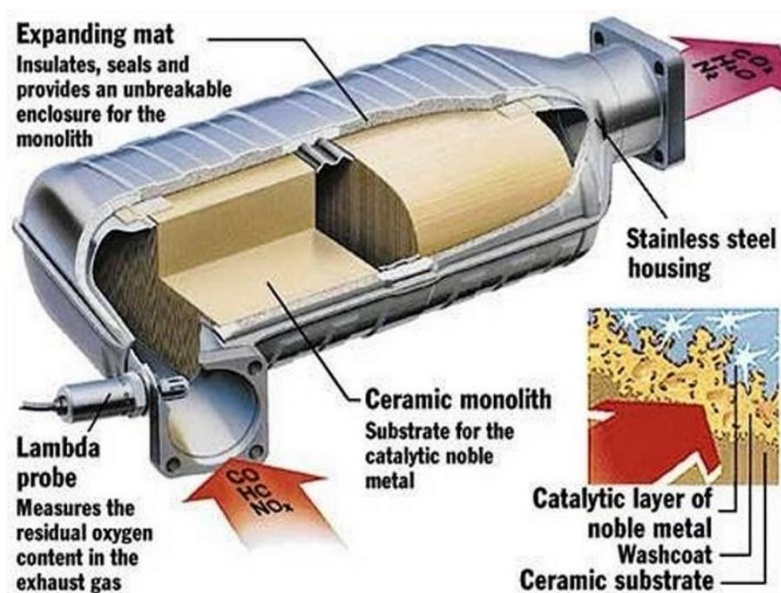
Vyjma využití u plynových motorů se tento druh katalyzátoru využívá i u vznětových motorů a zaměřuje se především na přeměnu oxidu uhelnatého (CO) a doposud nespálených uhlovodíků (CH) na oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) a vodu (H<sub>2</sub>O). Jako sekundární reakci přeměňuje oxid dusný (NO) na oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>). V obou případech jde o reakci redoxního typu a odtud tedy získává katalyzátor svůj název.

Chemický zápis výše popsaných reakcí:



Stejně jako třístný katalyzátor i tento druh vyžaduje k optimální funkčnosti optimální koeficient přebytku vzduchu  $\lambda$ . V tomto případě je zapotřebí přebytek vzduchu ( $\lambda > 1$ ). Základ oxidačního katalyzátoru tvoří buďto keramické, nebo kovové nosné těleso s aktivním kovem na svém povrchu (Obrázek 12). V případě kovového tělesa má struktura po své délce vedené kanály o milimetrových rozměrech. Použitými vzácnými kovy jsou nejčastěji platina (Pt) a rhodium (Rh).

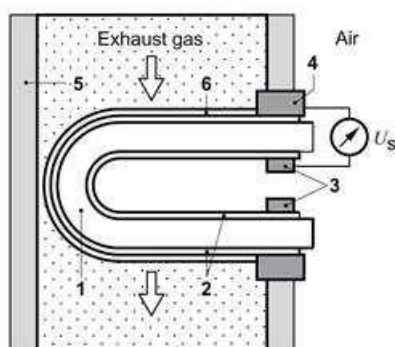
V soustavách se oxidační katalyzátor zapojuje před filtr pevných částic, pokud je jeho využití zapotřebí (např. při spalování zemního plynu se nevyužívá). Tato vzájemná pozice je výhodná především pro fakt, že oxid dusičitý vznikající v katalyzátoru následně přeměňuje saze (představující z největší části uhlík C) pomocí další oxidace na oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>). Dusík z oxidu dusičitého je zároveň redukován na molekulu dusíku N<sub>2</sub>, která představuje neškodnou složku vzduchu. [16], [17]



Obrázek 12: Oxidační katalyzátor – řez [18]

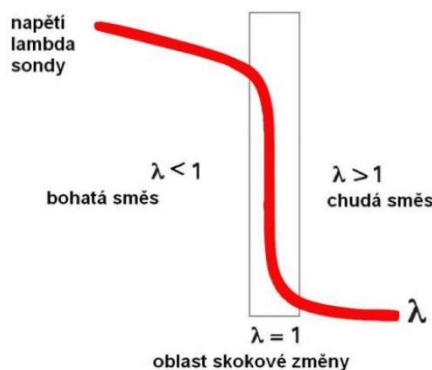
### 2.3.3 Lambda sonda

Lambda sonda je zařízení řídicí chod katalyzátoru. Pro správné fungování je nutné znát koeficient přebytku vzduchu, který je měřený právě těmito sondami. Zpravidla jsou aplikovány minimálně dvě: jedna před katalyzátorem pro regulaci a druhá za ním, která slouží pro kontrolu. Samotné měření je založeno na principu galvanického kyslíkového článku s elektrolytem v pevné fázi. Její funkčnost umožňuje galvanický kyslíkový článek a pevný elektrolyt. Tento elektrolyt je vyroben z keramického tělesa z jedné strany nepropustného pro plyny. Z obou konců je opatřen tenkými platinovými plechy schopnými propouštět plynné složky sloužící jako elektrody. Vnitřek tohoto tělíska je chráněn vrstvou porézní keramiky. Takto rozdělená sonda je pak umístěna takovým způsobem, že na ní zvenku působí měřené výfukové plyny a na izolovaný vnitřek okolní vzduch, který v tomto zapojení slouží jako referenční plyn (Obrázek 13).



Obrázek 13: Schéma zapojení lambda sondy [20]

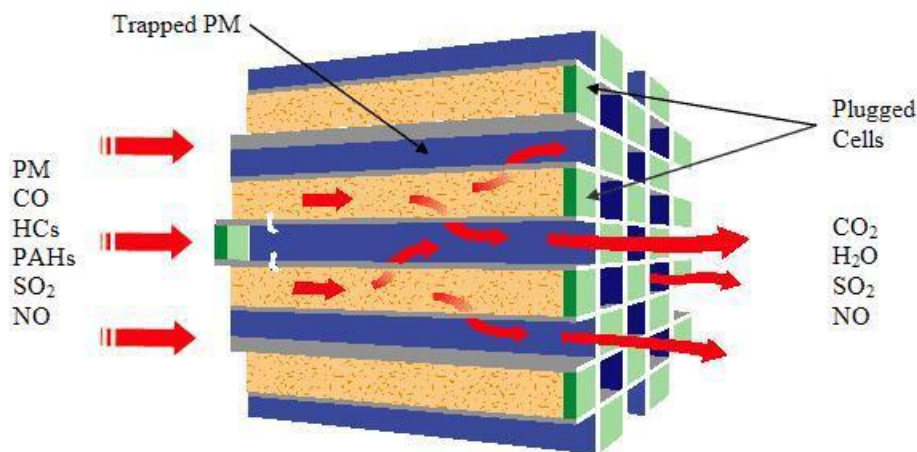
Pro správnou funkčnost sondy je zapotřebí zajistit správné provozní podmínky, zvláště pak teplotu. Při 350 °C se keramická složka stává vodivou pro kyslíkové ionty. Při rozdílném podílu iontů na koncích tělesa vzniká na platinových elektrodách elektrické napětí (Obrázek 14). To je snímáno kontakty a pomocí něho lze určit koeficient přebytku vzduchu na základě funkční závislosti mezi těmito dvěma veličinami. Pro představu: pro stechiometrické směsi ( $\lambda = 1$ ) se napětí pohybuje mezi 650 – 750 mV, bohaté směsi mezi 800 – 1000 mV a chudé směsi jen okolo 100 mV. Teplota samotná ovšem může ovlivnit samotné měření a musí se do detekce započítat. [19], [20], [21]



Obrázek 14: Lambda sonda - závislost napětí [19]

### 2.3.4 Filtr pevných částic

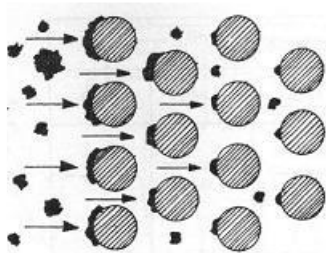
Vyjma katalyzátoru lze za účelem produkce co nejvíce environmentálně přívětivých spalin využít i filtru, který slouží k mechanickému zadržení pevné složky spalin tvořené malými částicemi (Obrázek 15). Filtr je proto zpravidla vyroben z porézní keramiky s drátěnou vložkou. Při plnění funkce ovšem dochází k zahlcování a následnému snížení účinnosti. Filtry se tedy navrhují tak, aby i při částečném zanesení nedocházelo ke zvyšování tlaku potřebného k průchodu média. Stále je ovšem zapotřebí provádět průběžnou regeneraci, při které se zachycené částice spálí za vzniku vodní páry a oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ). [23]



Obrázek 15: Filtr pevných částic s keramickou filtrační vložkou [22]

#### 2.3.4.1 Zaklínění

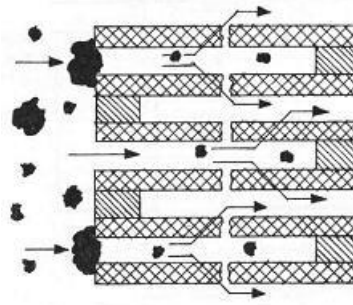
Tento typ zaklínění je prováděn pomocí drátěné vlny. Pro zajištění požadovaných vlastností je tato vlna slisována za účelem dosažení optimální mezery mezi jednotlivými vlákny (Obrázek 16). Pro tento typ zachycování částic je regenerace nezbytná.



Obrázek 16: Filtr pevných částic – zaklínění [23]

#### 2.3.4.2 Zachycení

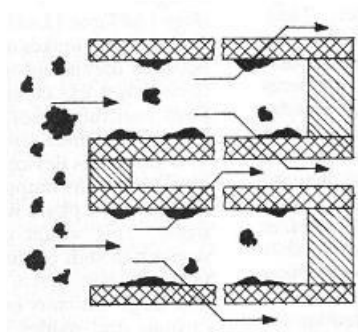
V tomto případě dochází ke sběru pevných částic na ústí jednotlivých chodeb filtru a následnému nahromadění dalších pevných částic na již zachycených (Obrázek 17). Pokud se filtr značně zanesení, tlak potřebný pro průchod média naroste a pro zajištění funkčnosti je nutno filtr zregenerovat. V opačném případě bude filtr ucpán, což znemožní průchod spalin.



Obrázek 17: Filtr pevných částic – zachycení [23]

### 2.3.4.3 Difúze

Zde jde o podobný princip jako v předchozím případě. Namísto u ústí chodby se ovšem pevná částice zachytí na stěně (Obrázek 18). To umožňuje větší rozměr průduchů a povrchová úprava keramiky, ze které je filtr vyroben. Plynná složka spalin zůstává filtrem neovlivněna. V průběhu provozu se opět filtr zahlcuje. Jako důsledek stále se zužujících pórů je poté zapotřebí většího provozního tlaku. [23]



Obrázek 18: Filtr pevných částic – difúze [23]

### 3 Úvod do numerických simulací

Zadaná bakalářská práce je svojí podstatou praktická zaměřující se na optimalizaci za pomoci Computational Fluid Dynamics (CFD). Proto je následující kapitola věnována krátkému přehledu metod, kterými lze charakterizovat zkoumané proudění za pomoci jeho rychlosti, jeho teploty, vířivosti, tlaku a dalších fyzikálních parametrů.

#### 3.1 Základní metody numerických simulací

Ve většině případů je nepraktické využít experiment kvůli jeho ceně a nemožné využít analytický výpočet kvůli jeho nedostatečnosti pro výpočet turbulentního proudění, které tvoří většinu řešených problematik. Kompromis mezi těmito přístupy představuje numerická simulace. Existuje řada softwarů jako jsou například OpenFoam a Star-CCM+. Výpočty pro tuto bakalářskou práci byly tvořeny v programu ANSYS.

Aby mohly být výsledky považovány za spolehlivé, musí být provedena jejich validace a verifikace. Validace představuje porovnání vypočtených hodnot s hodnotami získanými experimentem. Lze ji tedy provést pouze retrospektivně až po zhotovení dané konstrukce či díla. Jde tedy o porovnání fyzikálních veličin. Verifikace má více matematický charakter. Představuje zjištění optimální velikosti elementů a tak i jejich počet nutný k zajištění neměnnosti výsledků, tzn. při zjemnění výpočetní sítě zůstávají výsledky zaměnitelné.

Mezi nejrozšířenější metody patří:

- Metoda konečných diferencí
- Metoda konečných objemů
- Metoda konečných prvků

##### 3.1.1 Metoda konečných diferencí

Tato metoda představuje nejzákladnější variantu z výše uvedených. Její princip spočívá v aproximaci soustavy parciálních diferenciálních rovnic popisující řešený problém. Nejedná se o ideální metodu v tom ohledu, že se musí doplňovat o ostatní fyzikální zákony jako jsou zákony o zachování energie, hmoty a hybnosti. Vzhledem k její nedokonalosti lze využít jen na strukturované sítě. [24]

##### 3.1.2 Metoda konečných objemů

Jak její název naznačuje, řešená oblast je rozdělena výpočetní sítí na konečný počet částí (objemů). Jak velké jsou zvoleny elementy (a tudíž tak i jemnost síťování) silně ovlivňuje výpočetní náročnost a kvalitu výpočtu. Jemnější síť vede na přesnější výpočet, který bude vyžadovat větší výpočetní kapacitu. Každý takto vytvořený objem pak nese informace o proudění, které charakterizují stav a chování v daném místě. Tyto informace jsou v rámci výpočtu předávány sousedním elementům. Výsledek simulace vede na soustavu energetických, pohybových a dalších diskretizovaných algebraických rovnic. Metoda konečných objemů je velmi často využívána pro případy zabývající se prouděním tekutin. Na rozdíl od metody konečných diferencí tato metoda pokrývá i zákony zachování hmoty, energie a hybnosti.

##### 3.1.3 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků představuje zdokonalení metody konečných diferencí a je v dosti ohledech podobná metodě konečných objemů. Na rozdíl od ní není ovšem vhodná na řešení turbulentního proudění a využívá se především pro analýzu konstrukce. Především pro

vyšetření kritických míst a celkovou pevnostní kontrolu. Její primární výhoda spočívá ve schopnosti řešit geometrii libovolného tvaru. Obdobně jako u metody konečných diferencí je nutno dodat vztahy popisující zákony zachování hmoty, energie a hybnosti, které nejsou do této metody implementovány. Princip spočívá v rozdělení domény na množinu obecně nestrukturovaných konečných prvků. Řešení má podobu soustavy nelineárních algebraických rovnic. [24]

### 3.2 Alternativní metody

V technické praxi by bylo pro návrh jakékoli zadané konstrukce nejvhodnější využít experimentu. Jeho nespornou výhodou oproti ostatním metodám je poskytnutí velmi přesných výsledků. Zároveň bohužel jde o finančně i časově náročný proces. Pokud je nutno experiment skutečně provést, je snaha jej navrhnout, tak aby jeho výsledky byly co nejobecnější a tudíž aplikovatelné i u dalších problémů podobného typu.

Na druhé straně spektra co se týče náročnosti, ceny a přesnosti se nachází analytický výpočet. Při této metodě se ovšem musí počítat s fakty, že jde o velmi výraznou simplifikaci řešení a že je aplikovatelná na velmi jednoduché příklady zabývající se laminárním prouděním. Tyto případy se v technické praxi vyskytují velmi zřídka.

### 3.3 Metody výpočtů turbulentního proudění

Turbulence vzniká u většiny řešených problémů mechaniky tekutin. Jejím typickým charakterem je vysoké Reynoldsovo číslo  $Re$  a to řádově větším než  $10^5$ .

$$Re = \frac{D * w}{\nu} \quad (10)$$

Turbulence se vyznačuje vysokým stupněm nahodilosti, proměnlivosti v čase, vířivosti, disipativnosti a difuzivity. Je velmi obtížné vypočítat a zobrazit takto složité chování tekutiny. Existují různé metody simulací popisující proudění specifickým způsobem (Obrázek 19).

#### 3.3.1 Přímá numerická simulace (DNS)

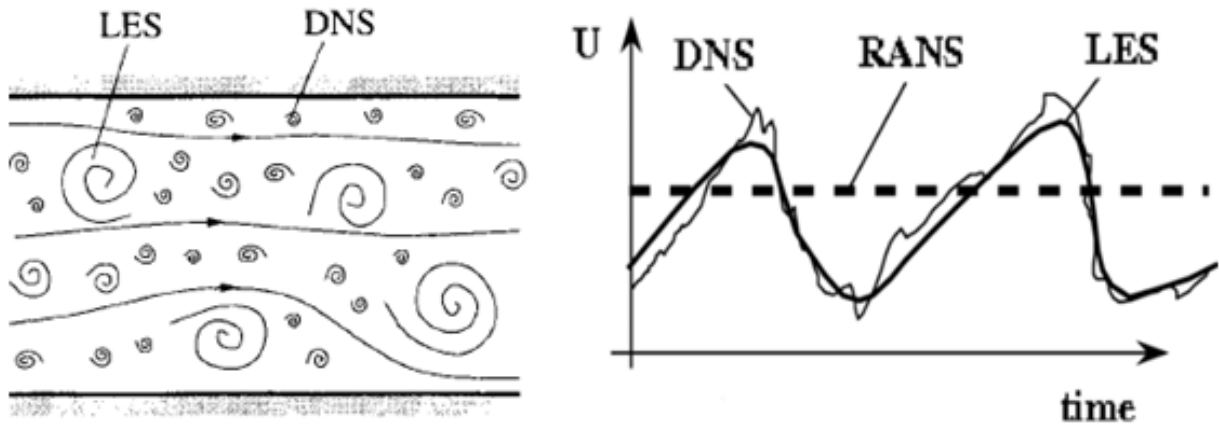
Jak název DNS (angl. Direct Numerical Simulation) naznačuje, tato simulace je představitelem nejpresnějšího typu. Nevyužívá totiž žádného průměrování sledovaných veličin. Je založena na řešení soustavy Navier-Stokesových rovnic. Vzhledem k její podrobnosti vyžaduje velmi jemnou výpočetní síť (velikost elementu by měl odpovídat velikosti řešeného víru). To vede k velké výpočetní náročnosti a je se současnou výpočetní technikou řešitelná jen pro velmi úzkou oblast úloh. Pro optimalizační úlohy je prakticky nevyužitelná. [24]

#### 3.3.2 Metoda velkých vírů (LES)

Zkratka LES představuje Large Eddy Simulation. Zakládá se na stejných principech jako Direct Numerical Simulation ovšem s rozdílem, že se nezabývá simulováním malých vírů, ale pouze těch velkých (také známy jako energetické). Jelikož se malé víry nepodílejí velkou částí na přenosu hmoty, je na ně použita filtrace turbulentního pole a neuvažují se. LES je oproti DNS méně výpočetně náročná, protože se velké víry snadněji zachytí ve výpočetní síti. Výsledky této metody se vyznačují menšími fluktuacemi než u přímé numerické simulace. [25]

### 3.3.3 Metoda časového středování Navier-Stokesových rovnic (RANS)

Princip metody RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) spočívá v řešení Reynoldsových rovnic a vede na ustálené řešení (zprůměrovanou hodnotu fyzikální veličiny). K dosažení této střední hodnoty se využívá tzv. Reynoldsovo středování, které se zakládá na rozdělování průběhu fyzikálních veličin na složku časově středovanou a na složku flukтуаční. RANS je nejvíce využívána pro strojírenskou praxi zvláště z důvodu možnosti využití nejhrubší sítě a má tak ve srovnání s DNS a LES nejrychlejší výpočet. Její řešení je ideální pro získání hrubé představy o chování tekutiny. [25]



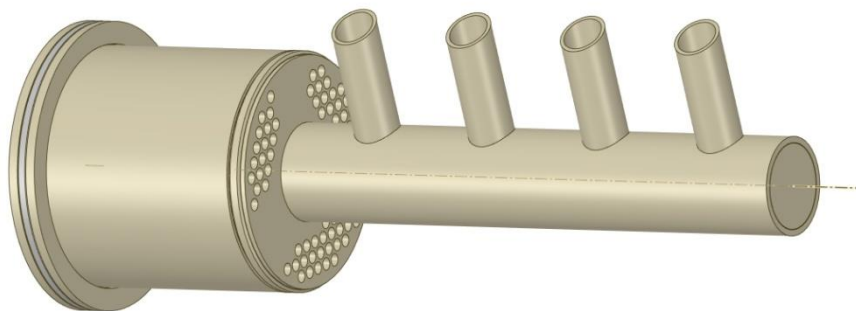
Obrázek 19: Průběh DNS, LES a RANS v závislosti na čase [24]

## 4 Numerická simulace katalyzátoru

V této kapitole je popsán postup numerických simulací komory katalyzátoru kogenerační jednotky společnosti TEDOM a. s. Zabývá se podrobným popisem jednotlivých částí tvorby CFD výpočtu, kterými jsou vhodná úprava geometrie, její diskretizace pomocí výpočetní sítě, nastavení parametrů výpočtu a vyhodnocení výsledků. **Cílem těchto výpočtů je popis vlivu změny tvaru a vzdálenosti profilu otočné komory katalyzátoru na tlakové ztráty proudu spalin a jejich hmotnostního rozložení na vstupu do katalyzátoru po otočení proudu.**

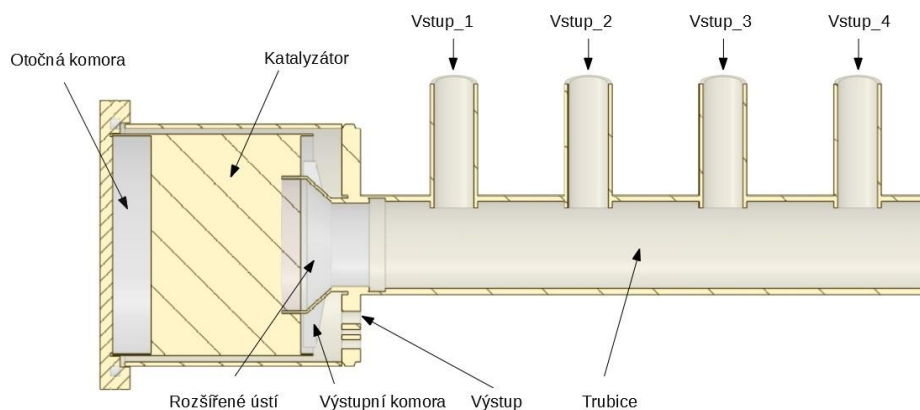
### 4.1 Zadaná geometrie a její úprava

Jako část zadání bakalářské práce byla firmou TEDOM a. s. dodána výstupní geometrie oblasti určené k optimalizaci (Obrázek 20, Obrázek 21). Jedná se ovšem o konstrukční provedení a pro účely CFD simulace jej bylo zapotřebí převést na doménu proudícího média. Spolu s tímto procesem byla provedena určitá zjednodušení geometrie za účelem odstranění částí neovlivňující námi sledované veličiny, kterými jsou tlaková ztráta a rychlost. Níže je popsán postup tvorby výchozí proudové oblasti pro numerickou simulaci.



Obrázek 20: Zadaná geometrie





Obrázek 21: Zadaná geometrie - řez

Sledovaná oblast zahrnuje rovnoběžné přívody ze čtyř pístů vznětového motoru kogenerační jednotky. Všechny svírají úhel  $90^\circ$  s trubicí, ve které se jednotlivé proudy přívodů budou mísit. Tato trubice je z jedné strany uzavřena a je tedy umožněno proudění pouze jedním směrem. V tomto směru se nachází mírné skokové zmenšení průměru a poté jeho kuželovité rozšíření. Následuje oblast katalyzátoru. Přes něj budou spaliny proudit pouze axiálním směrem až po dosažení otočné komory. Tato komora představuje kritickou část celé sestavy a objekt optimalizace této práce. Jejím působením se spaliny dostanou do vnější části katalyzátoru a následně do komory za ním, odkud proud opouští sledovanou oblast výstupními trubičkami. Směr proudu je patrný na obrázku (Obrázek 21) představující řez sestavy.

Pro účely CFD simulace není vhodné zanechat geometrii v původním stavu. V rámci úspory buněk a zlepšení kvality sítě je radno ji zjednodušit tak, aby neobsahovala žádné přebytečné prvky, ale aby výstižně substituovala reálné řešení.

Byly odstraněny jakékoli netěsnosti a geometrické prvky, u kterých se nepředpokládá signifikantní vliv na proud média, což vedlo k možnosti využití více strukturovaných sítí vyznačující se značně menším počtem prvků. Rovněž byl z proudové domény odstraněn prsteneček vznikající netěsností mezi vnějším obvodem katalyzátoru a válcem uzavírající celou komoru, jelikož se v něm nepředpokládá žádný významný pohyb média výrazně ovlivňující výpočet. V oblasti výstupu média z katalyzátoru byly dále odebrány křídélkové profily z důvodu malého předpokládaného vlivu na proud média a jeho umístění až za sledovanou oblastí.

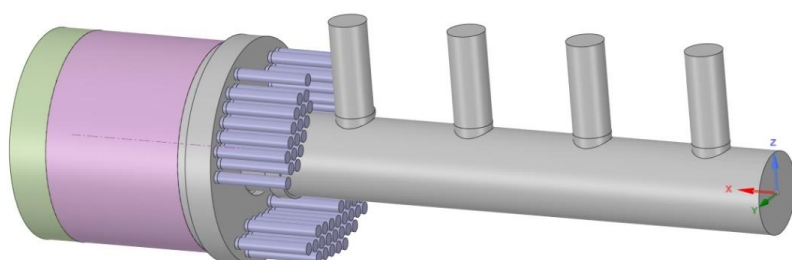
Tyto modifikace vytvořily ideální základ pro tvorbu inverzní geometrie, která představuje proudící médium (Obrázek 22, Obrázek 23). Výstup z domény byl vyřešen prodloužením výstupních profilů, jelikož při členitější geometrii nemusí docházet k ustálenému proudění nebo dokonce může docházet k proudění zpětnému, byl proveden přibližný výpočet délky potřebné pro tvorbu vyvinutého proudění  $L_e$  na základě rozměrů a zadaného hmotnostního toku a dopočteného Reynoldsova čísla  $Re$ . [26]

$$Re = \frac{w*d}{\nu} = \frac{11,65*0,0102}{81,01*10^{-6}} = 1466,88 \quad (11)$$

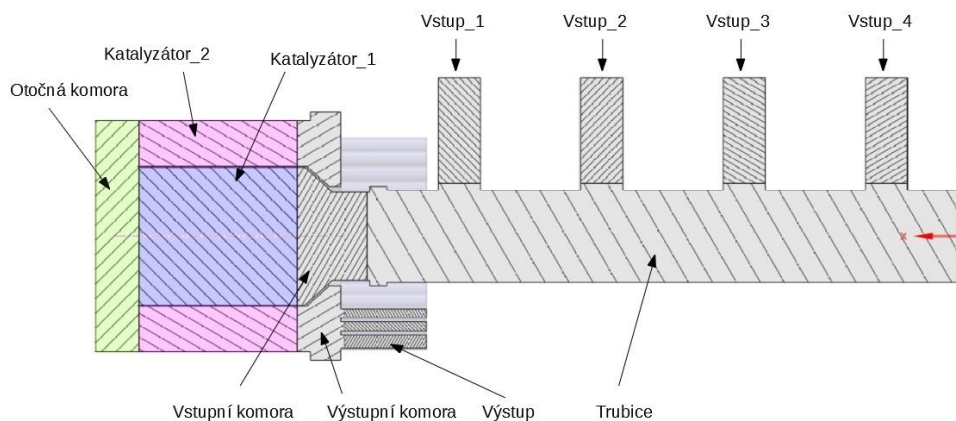
$$L_e = D * 1,6 * \sqrt[4]{Re} = 0,0102 * 1,6 * \sqrt[4]{1466,88} \approx 0,1 \text{ m} \quad (12)$$

Protože výpočet uspokojivě konvergoval bez zpětného proudění, byla zanechána původně odhadnutá délka výstupu o délce 65 mm. S myšlenkou vytvořit co nejkvalitnější síť byla rovněž doména rozdělena na mnoho částí umožňující polymorfní síťování. Veškeré části, které lze vytvořit pouhým tažením profilu (přívody z pístů, výstupní trubičky, katalyzátor a oblast těsně před ním), byly od zbytku sestavy odděleny.

Jelikož by bylo velmi nepraktické modelovat katalyzátor reálně, byl v rámci této práce nahrazen porézním médiem. Protože se ovšem předpokládá pohyb média pouze axiálně v ose  $x$  a nepředpokládá se pohyb radiální, byl rozdělen na dvě souosé části (Obrázek 23). Byla vytvořena fiktivní stěna zasahující mírně do oblasti otočné komory za účelem umožnění lepší návaznosti strukturované a nestrukturované sítě.



Obrázek 22: Geometrie média



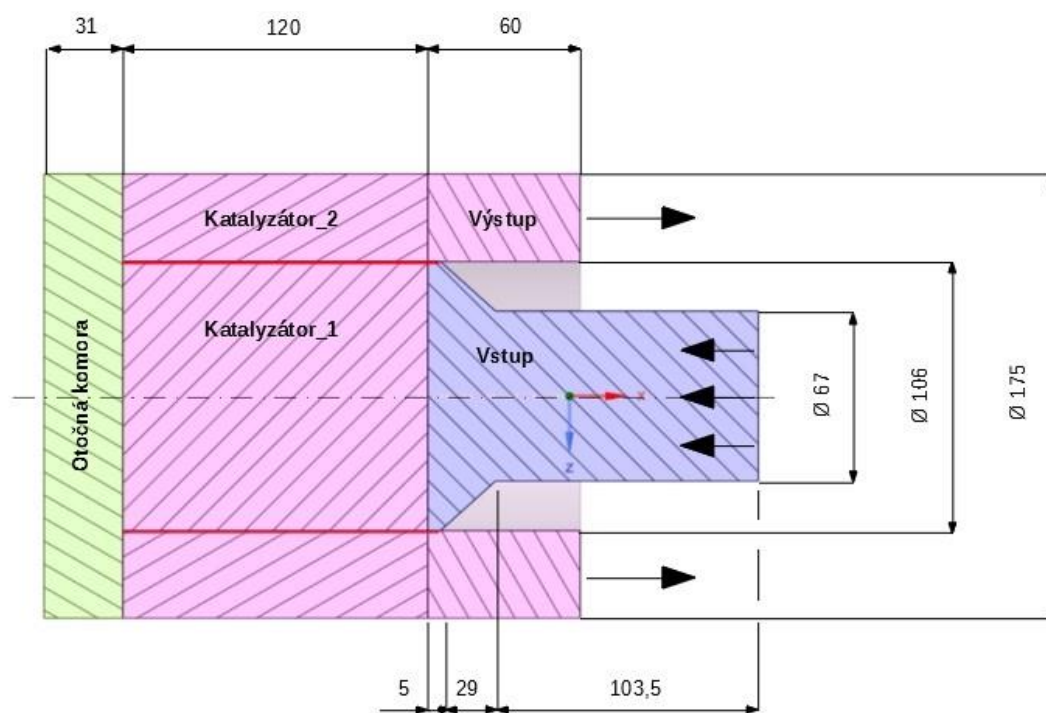
Obrázek 23: Geometrie média - řez

## 4.2 Verifikace a tvorba výpočetní sítě

Verifikace výpočetní sítě je nedílnou součástí každé CFD simulace. Jejím prostřednictvím lze nalézt kompromis mezi výpočetní náročností, resp. výpočetním časem a přesností realizované simulace. Lze předpokládat, že se zmenšujícími se elementy výpočetní sítě se bude zvyšovat přesnost simulace, nicméně od určitého okamžiku cena, tj. výpočetní čas, za vyšší přesnost simulace přestává být úměrná vlastnímu nárůstu přesnosti. Hledáme tedy takovou výpočetní síť, resp. takovou velikost elementů, jejichž další zmenšování již nepovede k výraznému zpřesnění simulace, nýbrž jen k rapidnímu zvýšení výpočetního času.

### 4.2.1 Popis geometrie pro verifikaci výpočetní sítě

Studie výpočetní sítě bude provedena na výchozí geometrii komory katalyzátoru (Obrázek 24), kterou pro účely verifikace sítě dále zjednodušíme, a to odstraněním přívodních svodů z válců motoru, jelikož ty nejsou předmětem prováděné optimalizace designu. Výstup z vnějšího katalyzátoru byl prodloužen z důvodu uklidnění výstupního proudu a zamezení vzniku zpětného proudění v průběhu numerické simulace. V neposlední řadě byla uvažována nulová tloušťka stěny mezi vnějším a vnitřním katalyzátorem.



Obrázek 24: Popis geometrie pro verifikaci výpočetní sítě

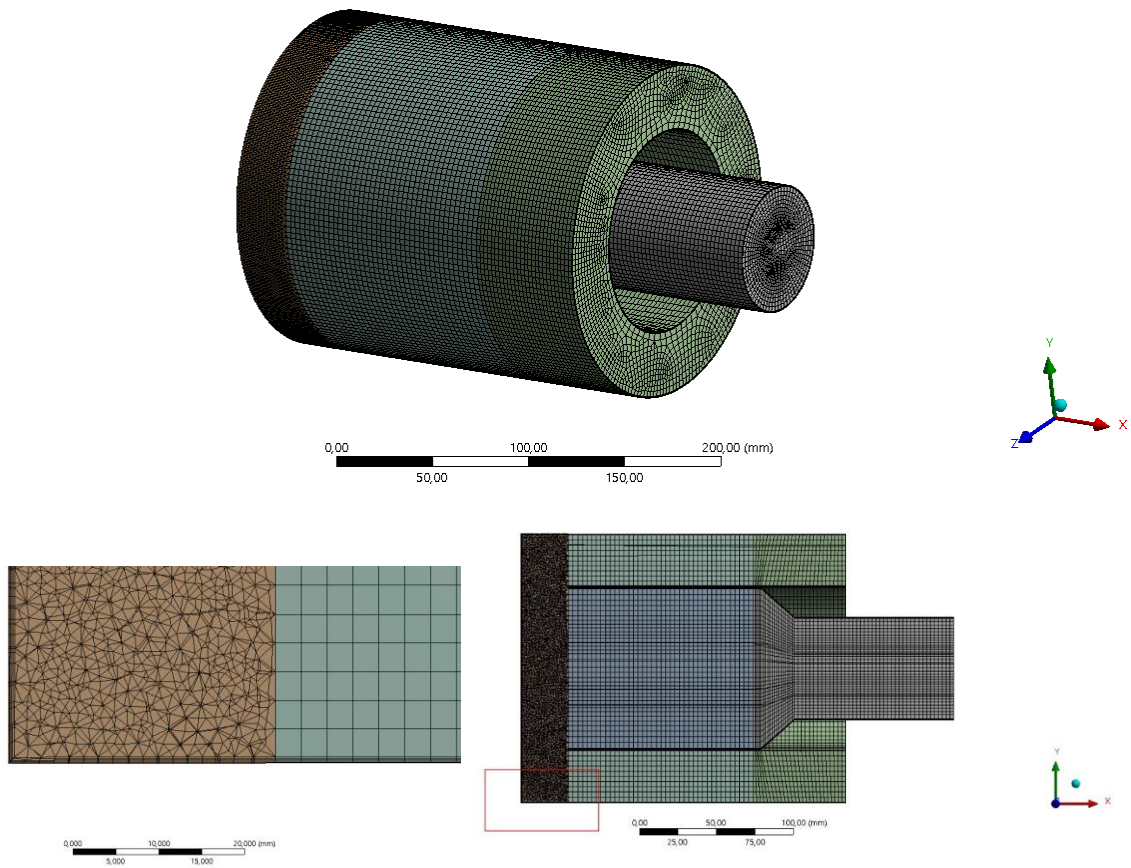
### 4.2.2 Varianty výpočetní sítě

Celkem byly vytvořeny 4 varianty výpočetní sítě, přičemž při jejich tvorbě byl aplikován princip zjemňování prvků v poměru 1:2 (délka prvku u jemnější sítě je tedy poloviční ve srovnání s prvkem nejbližší hrubší sítě). Metodika síťování se napříč sítěmi neměnila, tzn. všechny části geometrie, vyjma otočné komory, jsou diskretizovány pomocí hexahedrálních elementů a výpočetní síť je zde strukturovaná (Obrázek 25). Otočná komora je diskretizována pomocí tetrahedrálních elementů, a to především z důvodu možnosti lokálně zjemnit prvky na zadní stěně komory, kde dochází k nárazu proudu a k jeho otočení. Mezi všemi částmi geometrie byla sdílena topologie, a tudíž je vzniklá výpočetní síť konformní. Jednotlivé výpočetní sítě, jejich počty prvků i odpovídající kvalita jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 2).

Tabulka 2: Varianty výpočetních sítí

Verze	1	2	3	4
Počet buněk [-]	292 608	682 706	1 200 357	2 475 248
First layer thickness [mm]	0,2	0,15	0,1	0,1
Aspect ratio [-]	6,2943	5,1406	5,3307	5,2188
Skewness [-]	0,19164	0,18578	0,19047	0,19872

Tloušťky mezní vrstvy (definované pomocí rozměru první vrstvy) jednotlivých variant se s rostoucím počtem buněk zmenšují. Záměrem bylo poukázat na chování parametru  $Y^+$  v závislosti na tomto rozměru.



Obrázek 25: Výpočetní síť komory katalyzátoru

### 4.2.3 Nastavení výpočtu pro účely verifikace výpočetní sítě

Podmínky výpočtu byly nastaveny dle podmínek stanovených pro výchozí variantu vycházející z měření společnosti TEDOM a. s. podrobněji popsané v kapitole 4.4. Vstupní okrajová podmínka byla definována hmotnostním tokem média o hodnotě 0,035 kg/s. Na výstupu byl stanoven relativní tlak -3 000 Pa vůči referenčnímu tlaku 1 atm. Tato podmínka představuje reálnou tlakovou ztrátu v optimalizované komoře katalyzátoru. Na stěnách výpočetní domény byla stanovena podmínka nulové rychlosti na stěně (angl. no slip condition).

Vnitřní i vnější katalyzátor je simulován pomocí porézního média, jehož nastavení je detailně popsáno v kapitole 4.3. Výpočet vychází ze známé tlakové ztráty, kterou máme zadanou od výrobce katalyzátoru. Obtíž je ve skutečnosti, že zadaná tlaková ztráta zahrnuje nejen třecí ztráty média v katalyzátoru, ale i místní ztráty vzniklé otočením proudu v otočné komoře. Jelikož předmětem studie sítě je zajistit nezávislost výsledků numerické simulace na velikosti elementů, budeme předpokládat, že zadaná tlaková ztráta se realizuje jen v porézním médiu. Po provedení verifikace výpočetní sítě bude provedena analýza nastavení porézního média, tj. odlišení třecí a místní složky ze zadané tlakové ztráty. Tento postup byl zvolen i s přihlédnutím k očekávané skutečnosti, že třecí ztráta v katalyzátoru bude násobně vyšší než místní ztráta otočením proudu, a tedy výsledky simulací po korekci nastavení porézního média by neměly být výrazně odlišné.

Pro účely studie sítě není nutné porézní médium nastavit tak, aby celková tlaková ztráta odpovídala naměřené hodnotě. Jelikož je zde nutné zkoumat změnu sledované veličiny a ne její konkrétní hodnotu, postačí se tedy zadané hodnotě přiblížit řádově.

### 4.2.4 Vyhodnocení

Sledovanými parametry pro studii výpočetní sítě je tlaková ztráta proudícího média a dále rozložení hmotnostního toku před vstupem do vnějšího katalyzátoru. Porovnáním těchto výsledků (Tabulka 3) pro různé výpočetní sítě odlišující se velikostí, a tedy i celkovým počtem prvků, bude rozhodnuto o parametrech sítě. Ta pak bude použita pro navazující výpočty v rámci optimalizace konstrukčního provedení komory katalyzátoru.

Tabulka 3: Vyhodnocení variant výpočetních sítí

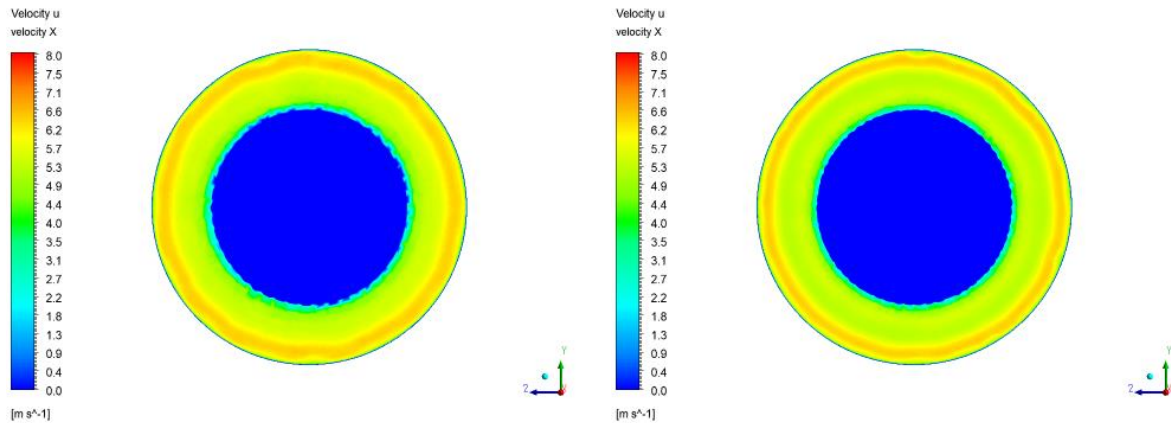
Verze	1	2	3	4
Y+	10,18	8,461	6,376	6,618
Tlaková ztráta	2602,6 Pa	2598,5 Pa	2598,1 Pa	2600,1 Pa
Výpočetní čas pro konvergenci	13 min 5s	21 min 34s	39 min 6 s	1 h 56 min 57s
Čas jedné iterace	10,3 s	22,3 s	38,5 s	1m 16 s

Tlakové ztráty jednotlivých výpočetních sítí, včetně potřebného výpočetního času přepočteného na jednu iteraci, jsou uvedeny v „Tabulka 3“. Srovnáním hodnot tlakových ztrát je zřejmé, že vypočtená hodnota tlakové ztráty se mění jen nepatrně v závislosti na počtu prvků výpočetní sítě, de facto lze odchytku do jisté míry považovat za numerickou chybu simulace.

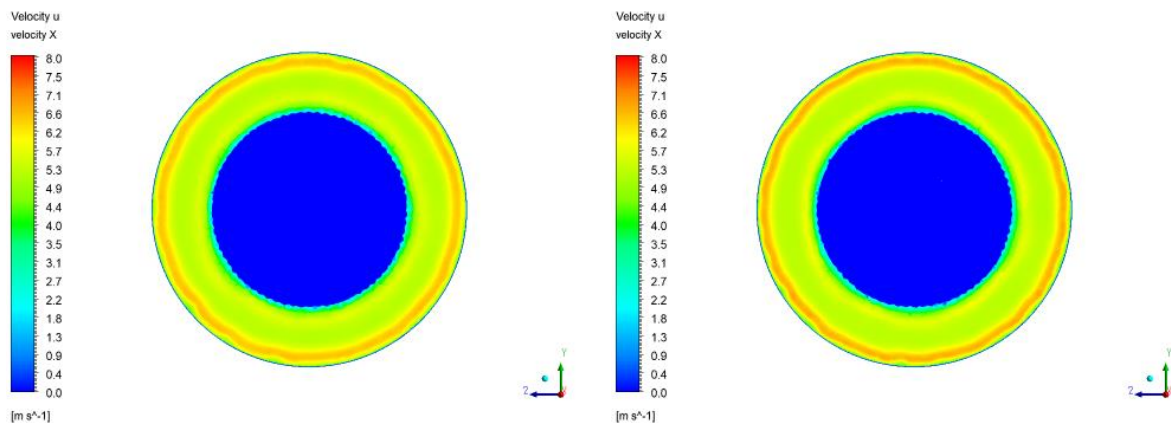
Dále je z výsledků patrné, že u jemnějších sítí dochází k lepšímu modelování mezní vrstvy, tedy klesajícímu bezrozměrnému parametru Y+. Nicméně u všech sítí je hodnota tohoto parametru menší než 10, což vzhledem k tomu, že nesimulujeme přestup tepla, lze považovat

za dostačující. Výrazné změny napříč variantami nejsou ani při pohledu na průběh konvergence jednotlivých výpočtů.

Porovnáním rozložení hmotnostních toků (reprezentovaných konturami rychlostí v axiálním směru – ve směru osy X) vidíme, že nedochází k významné změně (Obrázek 26, Obrázek 27). Oblast lokálního maxima rychlosti varianty č. 1 se vykazuje mírně větší šířkou než následující varianty. S výjimkou tohoto rozdílu se mohou tato hmotnostní rozložení považovat za zaměnitelné.

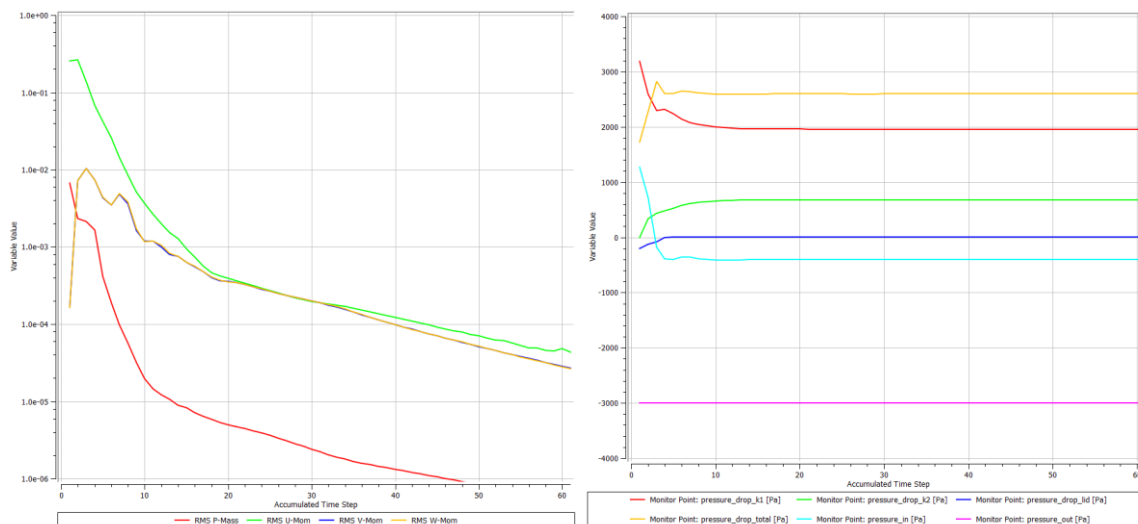


Obrázek 26: Rozložení rychlosti ve směru X na výstupu (varianty 1 & 2)

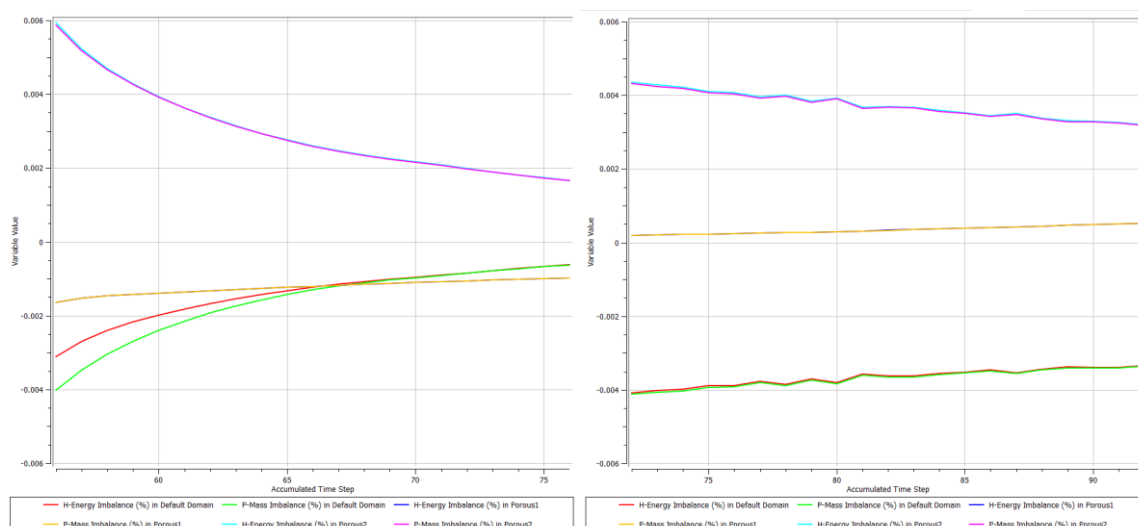


Obrázek 27: Rozložení rychlosti ve směru X na výstupu (varianty 3 & 4)

Průběhy konvergence reziduí, imbalancí a sledovaných tlakových ztrát v komoře se kromě rychlosti a nutnosti potřebných iterací příliš nelišily. Z tohoto důvodu jsou uvedeny ilustrace konvergence reziduí a tlakové ztráty pouze třetí varianty tvořené z 1,2 milionu buněk (Obrázek 28). Rezidua hmotnosti se postupem výpočtu dostaly pod hodnotu  $10^{-6}$  a celková tlaková ztráta (označena jako „pressure\_drop\_total“) se ustálila v řádu desetin pascalu. Obrázek 29 znázorňující imbalance nejméně a nejvíce kvalitní sítě slouží k ilustraci identického průběhu výpočtů.



Obrázek 28: Konvergence reziduí a tlakových ztrát – 3. varianta

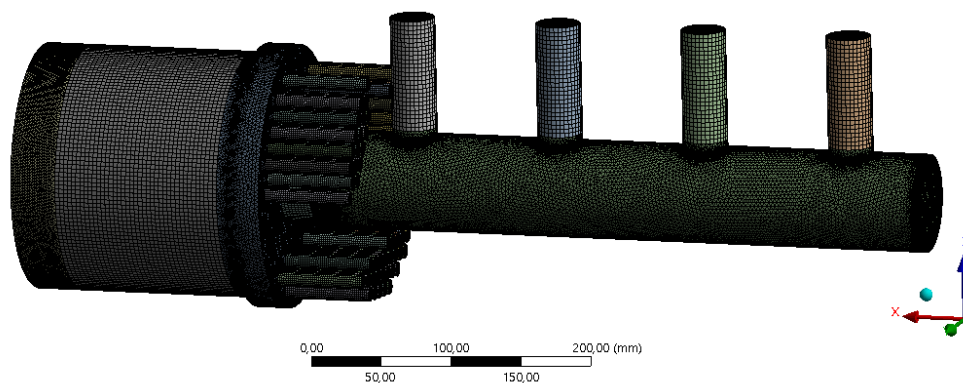


Obrázek 29: Konvergence imbalancí - posl. 20 iterací - 1. & 4. varianta

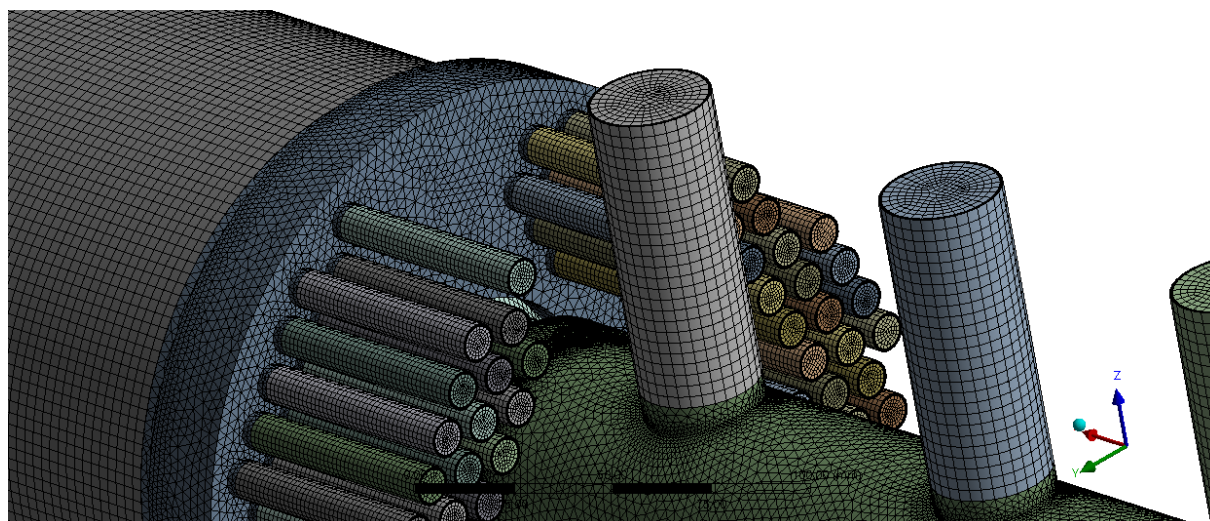
Srovnáním kvality jednotlivých výpočetních sítí, výsledků provedených simulací a průběhů konvergence lze dospět k závěru, že zjemňováním sítě dochází ke zlepšení její kvality, nicméně výsledky numerických analýz jsou, až na drobnou změnu oblasti lokálního maxima mezi první a druhou variantou, prakticky totožné. Jelikož předmětem závěrečné práce je provést optimalizaci designu, **bylo rozhodnuto zvolit třetí variantu výpočetní sítě (1,2 mil. prvků)**, která vykazuje uspokojující kvalitu, rozumný výpočetní čas a zároveň velikost prvků je dostatečně malá tak, abychom mohli považovat výsledky u optimalizovaných designů za reprezentativní.

Parametry sítě o 1,2 milionu prvků byly implementovány pro tvorbu sítě výchozí varianty (Obrázek 30). Oblasti domény, které lze vytvořit pouhým tažením profilu, využívají strukturovanou výpočetní síť. Výjimku tvoří oblast otočení proudu, která představuje kritickou oblast výpočtu. Pro navýšení přesnosti simulace byla síťována pomocí nestrukturované sítě.

Tento typ síťování byl aplikován i na oblasti složitějších tvarů, na které nelze strukturovanou síť aplikovat. Přechody mezi těmito typy sítě a zjemnění mezní vrstvy jsou patrné na následujícím obrázku (Obrázek 31).



Obrázek 30: Výpočetní síť výchozí varianty



Obrázek 31: Výpočetní síť výchozí varianty - detail



### 4.3 Studie porézního média

Jak již bylo řečeno, tělo katalyzátoru bylo rozděleno na dvě části řešené jako porézní médium. Jde o kritickou část nastavení, jelikož srovnávací parametr s realitou představuje nám známá tlaková ztráta tlakové komory. Měření společnosti TEDOM a. s. se zakládá na rozdílu statických tlaků před vstupem a za výstupem z katalyzátoru. Tlaková ztráta činí **3 kPa** a skládá se z jednotlivých tlakových ztrát na první části katalyzátoru („Katalyzátor\_1“), otočné komoře a druhé části katalyzátoru („Katalyzátor\_2“). Předpokládá se, že tlaková ztráta otočné komoře bude v porovnání s třecí ztrátou v katalyzátoru velice malá a zbylý úbytek se rozdělí na jednotlivé části katalyzátoru podle poměru průřezů (délka obou částí je identická).

Obě porézní média sdílí s globálním nastavením parametry jako nastavení materiálu a matematický model turbulence. Na obou médiích byla nastavena isotropická povrchová porozita a objemová porozita  $P_V$  byla z dodaných parametrů spočtena na hodnotu 0,96.

Vzhledem k porézní podstatě katalyzátoru nelze objemovou porozitu určit pomocí rozměrů vnitřní struktury. Zvolený postup výpočtu využívá daný zaujímaný objem katalyzátoru, jeho hmotnost, poměr využitých prvků (Pt:Rh = 5:1) a jejich hustoty.

$$V_{poréz} = \frac{\pi * D^2}{4} * L = \frac{\pi * 175^2}{4} * 120 = 2886337,65 \text{ mm}^3 \quad (13)$$

$$\rho_{slitina} = \frac{5 * \rho_{Pt} + 1 * \rho_{Rh}}{6} = \frac{5 * 21,45 + 1 * 12,41}{6} = 19,94 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \quad (14)$$

$$V_{slitina} = \frac{m_{slitina}}{\rho_{slitina}} = \frac{2241}{19,9433} = 112,368 \text{ cm}^3 = 112368 \text{ mm}^3 \quad (15)$$

$$P_V = 1 - \frac{V_{slitina}}{V_{poréz}} = 1 - \frac{112368}{2886337,65} = 0,96 \quad (16)$$

Tlaková ztráta porézního média byla nastavena s ohledem na skutečnost, že reálné proudění probíhá jen v podélném směru, což je dáno konstrukcí katalyzátoru. Byla tedy definována tlaková ztráta ve směru osy x, tj. ve směru proudění. Ve směrech kolmých ke směru proudění byla záměrně zvýšena tlaková ztráta prostřednictvím Streamwise Coefficient Multiplier o hodnotě 10000.

Streamwise Loss bylo definováno lineárním a kvadratickým koeficientem na základě výše zmíněného poměru průřezů. Bylo provedeno několik výpočtů za účelem jejich určení podle výsledné tlakové ztráty. Jejich výsledné hodnoty jsou obsaženy v následující tabulce (Tabulka 4).

Tabulka 4: Lineární a kvadratické koeficienty porézních médií

Doména	Katalyzátor_1	Katalyzátor_2
Lineární koeficient [kg/m <sup>3</sup> *s]	11,15	25,01
Kvadratický koeficient [kg/m <sup>4</sup> ]	124,40	625,39

## 4.4 Nastavení výpočtů

Tato kapitola popisuje nastavení numerického výpočtu v programu CFX-Pre. Vzniklá simulace by se měla co nejvíce přibližovat realitě a bude představovat výchozí stav pro další simulace sloužící pro optimalizaci. Jelikož je úkolem práce optimalizovat pouze otočnou komoru, budou parametry výpočtu neměnné.

### 4.4.1 Hlavní parametry

Základ procesu představuje definice domén a proudícího média. Celá sestava byla nastavena jako tekutina („fluid“), kromě dvou částí představující tělo katalyzátoru. Ty byly kvůli svojí složité geometrii definovány jako porézní médium.

Proudící médium představují motorové spaliny. Vzhledem k jejich vlastnostem a faktu, že je uvažujeme jako homogenní tekutinu a ne jako směs, bylo možno je aproximovat na ideální plyn, jemuž byly přiřazeny zadané i dopočtené parametry vlastností (molární hmotnost, individuální plynová konstanta a měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku). Aproximace na ideální plyn byla umožněna provozními parametry, jelikož je tlak přibližně roven atmosférickému a uvažujeme vyšší absolutní teploty.

Matematický model turbulence byl nastaven na Shear Stress Transport (SST  $k-\omega$ ). Energetická rovnice byla zahrnuta. Referenční tlak byl nastaven na 1 bar na všech doménách vzhledem ke způsobu formulování cílových tlakových ztrát.

Většina výpočtů byla provedena stacionárním způsobem. Výjimku představuje transientní simulace výchozí geometrie sloužící ke zjištění přesnosti stacionární varianty (kapitola 5.2). Není zamýšlena pro účely optimalizace z důvodu výpočetní a časové náročnosti.

### 4.4.2 Okrajové podmínky

Stejně jako hlavní parametry i okrajové podmínky zůstávají přes proces optimalizace neměnné. Výjimku představuje vstupní hmotnostní tok pro transientní simulaci.

#### 4.4.2.1 Vstup

Vstup na zadané geometrii představují 4 identické vstupní kanály. Na všech byly nastaveny stejné parametry intenzity turbulence proudění ( $I = 5\%$ ) a celkové teploty ( $t = 520\text{ °C}$ ,  $T = 793,15\text{ K}$ ). Ze zadání známý hmotnostní tok ( $\dot{m} = 0,035\text{ kg/s}$ ) byl rovnoměrně rozdělen. Na každý vstup byl tedy nastaven tok o hodnotě  $\dot{m} = 0,009\text{ kg/s}$ . Proudění bylo definováno jako subsonické.

#### 4.4.2.2 Výstup

Na výstup bylo rovněž nastaveno subsonické proudění. Výstupní podmínku představuje relativní tlak 3,7 kPa oproti referenčnímu. Tato hodnota byla naměřena na reálné konstrukci v místě výstupu z katalyzátoru. Jelikož se nepředpokládá významná tlaková ztráta mezi tímto místem a výstupem, je tato hodnota pro účely práce adekvátní.

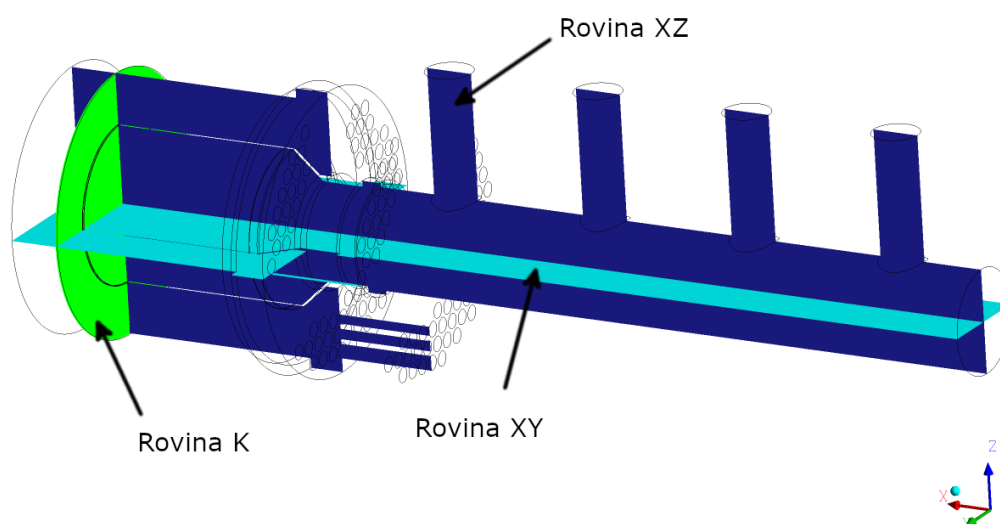
#### 4.4.2.3 Stěna

Přenos tepla mezi médiem a stěnou konstrukce není předmětem práce a tudíž byla tato podmínka nastavena jako adiabatická. Rovněž byla nastavena podmínka nulové rychlosti na stěně. Povrch byl zvolen jako hydraulicky hladký.

#### 4.5 Způsob vyhodnocování výsledků

Předmětem práce je optimalizovat profil otočné komory za účelem snížení tlakové ztráty a homogenizace rozložení hmotnostního toku na vstupu do druhé části katalyzátoru. S přihlédnutím na kritické aspekty je vhodné vyhodnocovat všechny varianty.

Pro účely tvorby kontur (rychlosti a tlaku) a vektorů (rychlosti) byly definovány tři roviny (Obrázek 32). Roviny XY a XZ protínají celou zadanou geometrii, svírají mezi sebou úhel  $90^\circ$  a jejich průsečnice je identická s primární osou geometrie (osa všech komponent vyjma vstupních a výstupních trubic). Rovina K je rovnoběžná s rovinou YZ a nachází se v otočné komoře 1 mm od stěny katalyzátoru. Toto umístění bylo provedeno s ohledem na vliv těla katalyzátoru na proudící médium přímo na hranici vstupu (především jeho zpomalení). Mírné oddálení vyšetřované roviny tedy zajišťuje vhodnější vyšetření proudu při porovnání odlišných variant profilu komory. Následující obrázek popisuje umístění zmíněných rovin.



Obrázek 32: Vyhodnocovací roviny

Kontury hmotnostního toku mohou být v případě rozdílných velikostí buněk zkreslené. Větší objem buňky při stejné rychlosti představuje větší hodnotu hmotnostního toku, což znamená, že kontury hmotnostního toku jsou značně ovlivněny proměnlivou velikostí buněk výpočetní sítě a nelze je v této podobě použít pro vyhodnocování výpočtů. Jednou z možností, jak vyřešit tento problém s vyhodnocením, je považovat proudění za nestlačitelné, čímž lze vyšetřovat kontury rychlosti jakožto kontury hmotnostního toku, neboť jsou si ekvivalentní. Obecně lze proudění plynu považovat za nestlačitelné, pokud se jeho rychlosti pohybují do  $0,3 \text{ Ma}$ , což simulace této práce splňují. Proto za účelem monitorování rozložení hmotnostního toku byla sledována rychlost média. Rychlost byla vyhodnocena následovně:

- Hodnota maximální a minimální rychlosti v rámci celé domény
- Kontury a vektory rychlosti ve třech zvolených rovinách
- Detail vektorů rychlosti na profilu otočné komory

Kontury rychlosti v rovině K byly vyhodnoceny pomocí absolutní hodnoty a pro lepší analýzu rozložení i ve směrech os X, Y a Z (viz. Obrázek 37). Rychlost v ose X nejlépe reprezentuje rozložení hmotnostního toku v oblasti vstupu do druhé (vnější) části katalyzátoru a pro účely optimalizace bude nadále představovat primární rozhodovací ukazatel. Zvolený rozsah hodnot rychlosti zajišťuje pouze vykreslení proudu proti směru orientace osy X. Vnitřní červené kruhové oblasti na ose symetrie komory (Obrázek 37) představují proudění ve směru orientace osy (proud vystupující z první části katalyzátoru). Kontury rychlostí v rovině K ve směru Y a Z představují měnící se úhel náběhu vektorů rychlosti. Vzhledem k rotační symetrii proudu jsou tyto kontury identické a otočené o 90°. Tyto úhly lze rovněž pozorovat na detailu vektorů rychlostí roviny XY.

Hodnoty tlakových ztrát byly přiřazeny kritickým oblastem a průběh jejich konvergence byl monitorován za účelem zvýšení důvěryhodnosti výsledků. Tlak byl vyhodnocen následovně:

- Hodnoty statických a celkových tlaků v oblastech vstupů a výstupů obou katalyzátorů (Katalyzátor\_1 & Katalyzátor\_2 viz. Obrázek 23)
- Kontury statického tlaku ve třech zvolených rovinách (Obrázek 32)
- Hodnoty tlakových ztrát v celé doméně, otočné komoře a komoře katalyzátoru za pomoci rozdílů statických tlaků
- Hodnoty koeficientu místního odporu  $\zeta$  ztrát v celé doméně, otočné komoře a komoře katalyzátoru

Koeficient místního odporu  $\zeta$  se využívá pro výpočet tlakových ztrát, které nevznikají třením jako ve vodorovném prizmatickém potrubí ale samotným tvarem části domény proudění (tzv. místní ztráty). Tyto části mohou představovat například mírné či skokové změny průřezu potrubí, jeho zakřivení, přítomnost obstrukčního tělesa atd. Většina v praxi využívaných oblastí nemá řád koeficientu vyšší než  $10^1$ . Pokud se ovšem místní ztráty vážou na část, která silně ovlivňuje charakter proudu (vznik velkých oblastí turbulence nebo v tomto případě významný nárůst kontaktní plochy vedoucí k nárůstu třecího odporu), mohou hodnoty  $\zeta$  dosáhnout vyšších řádů. Hodnota pro konkrétní koeficient vychází z měření (v případě této práce z numerické simulace) na příslušném příkladu. [27]

$$\Delta p_z = \frac{\zeta * \rho * w^2}{2} \quad (17)$$

$$\zeta = \frac{p_{01} - p_2}{p_{d01}} \quad (18)$$

$p_{01}$ ..... celkový tlak na vstupu

$p_2$  ..... statický tlak na výstupu

$p_{d01}$  ... dynamický tlak na vstupu

## 5 Výchozí varianta

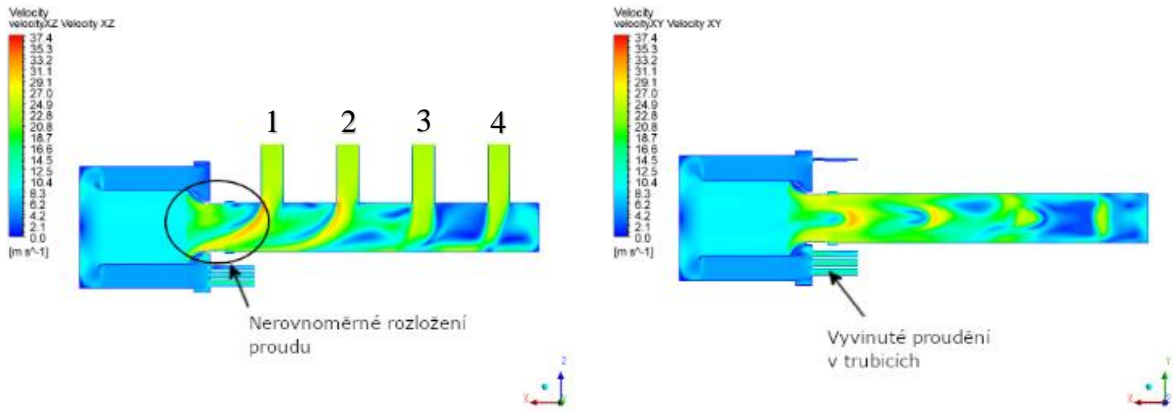
Pro účely optimalizace je nejprve zapotřebí provést výpočet výchozí varianty, jejíž doména proudícího média je popsána v kapitole 4.1 (Obrázek 23), a porovnat výsledky s hodnotami transienční simulací a reálnými hodnotami naměřené společností TEDOM a.s. Výstupy kapitoly 4 popisují doménu této varianty, její diskretizaci, parametry porézního média, nastavení výpočtu a způsob vyhodnocení.

Pokud budou hodnoty stacionárního výpočtu vykazovat shodu s transienčními, lze předpokládat, že porézní médium (katalyzátor) v rámci transienční simulace proud ustálil a chování proudu v otočné komoře je pak obdobné u obou typů výpočtu. Pro účely práce by pak byla stacionární simulace použitelná. V následující tabulce (Tabulka 5) jsou shrnuty hodnoty popsané v kapitole 4.5 pro stacionární výpočet výchozí varianty:

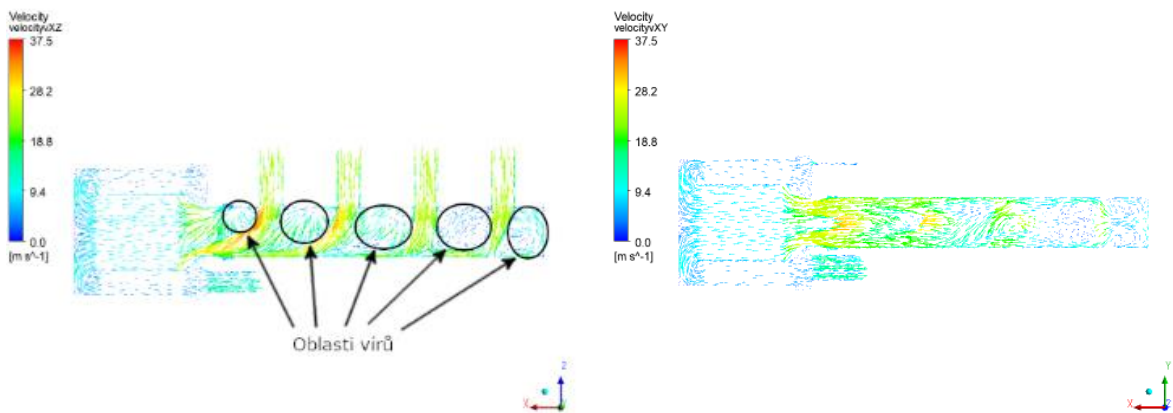
Tabulka 5: Vypočtené hodnoty výchozí varianty

<b>Rychlost [m/s]</b>		
Maximum	37.54	
Minimum	$1.748 \cdot 10^{-3}$	
<b>Tlak [kPa]</b>	<i>Statický tlak</i>	<i>Celkový tlak</i>
Vstup do domény	6.850	6.978
Výstup z domény	3.700	3.737
Vstup do „Katalyzátor_1“	6.757	6.794
Výstup z „Katalyzátor_1“	5.634	5.652
Vstup do „Katalyzátor_2“	5.634	5.643
Výstup z „Katalyzátor_2“	3.765	3.771
<b>Tlakové ztráty</b>	<i>Statický tlak [kPa]</i>	$\zeta [-]$
Celá doména	-3.150	25.68
Otočná komora	$-1.455 \cdot 10^{-4}$	1.008
Komora katalyzátoru	<b>-2.992</b>	<b>81.98</b>

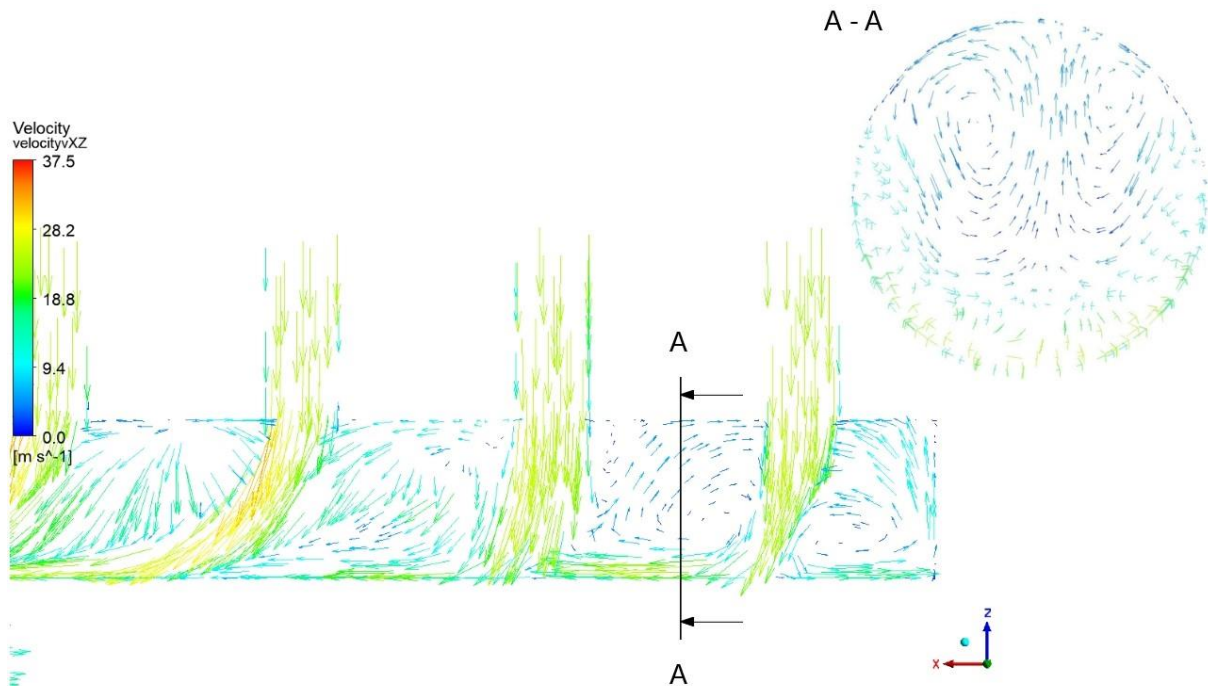
Jelikož se veškeré úpravy variant týkají jen otočné komory umístěné mezi dvěma porézními tělesy, které silně ovlivňují médium, jsou změny rychlosti a tlaku v samotné otočné komoře řádově menší. Globální analýza bude popsána pouze pro výchozí variantu. Změna víka ovlivňuje proud jen v otočné komoře vzhledem k velkému vlivu porézního média na proud. Většina řešené domény je identická pro všechny varianty. Samotná optimalizace se bude zabývat pouze lokálními změnami otočné komory.



Obrázek 33: Výchozí varianta – rychlost – kontury - roviny XY & XZ



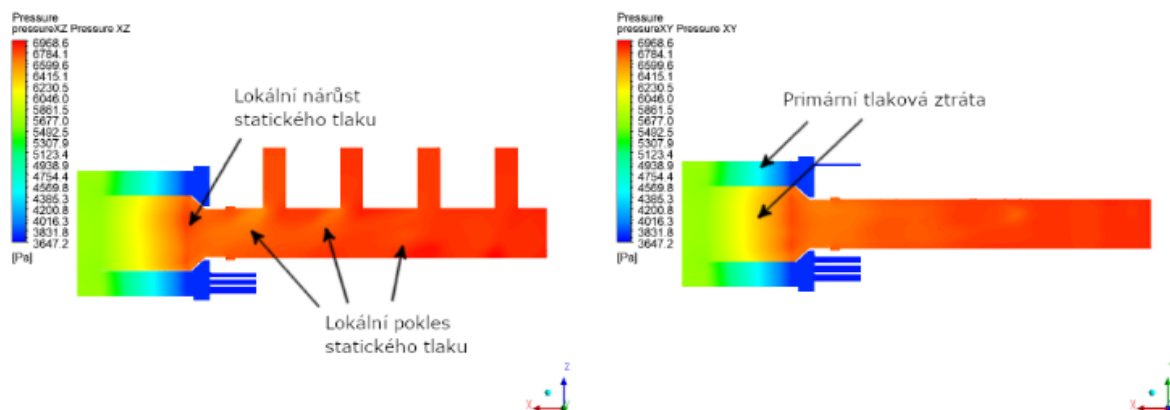
Obrázek 34: Výchozí varianta - rychlost – vektor – roviny XY & XZ



Obrázek 35: Detail vířové oblasti

Na konturách rychlosti (Obrázek 33) a poté lépe na vektorovém rozložení (Obrázek 34, Obrázek 35) lze pozorovat vznik velkých vírů v oblastech mezi vstupy do společné trubice. Jelikož dochází k usměrňování a zrychlování proudu ve směru ke komoře katalyzátoru, dochází ke strhávání vstupních proudů a postupnému zmenšování těchto oblastí. Největší z těchto vírů vzniká u nejvzdálenějšího vstupu (Vstup\_4), kde je rozložení rychlosti nejvíce homogenní a má zároveň nejmenší průměrnou hodnotu.

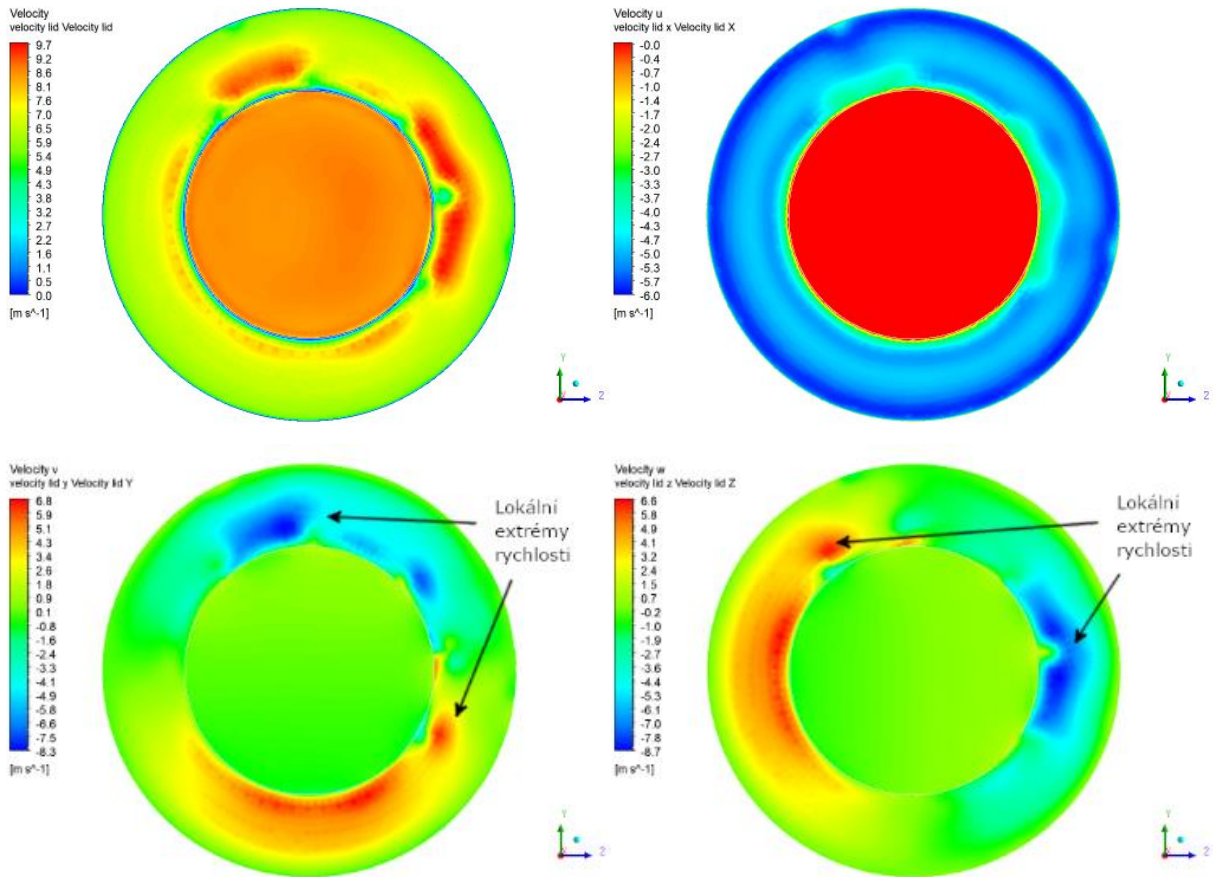
Oblast před vstupem do katalyzátoru charakterizuje kuželovité rozšíření, což na základě zákona zachování hmotnosti snižuje průtočnou rychlost a statický tlak se tak mírně navýší (Obrázek 36). Rozložení proudu není ovšem na stěně vstupu rovnoměrné (Obrázek 33), jelikož je ovlivněno kolmě orientovanými vstupními proudy, především tím nejbližším. Stěna katalyzátoru i přes svoji permeabilitu způsobuje značné zpomalení proudu a jeho rovnoměrnější rozložení po celé ploše vstupu.



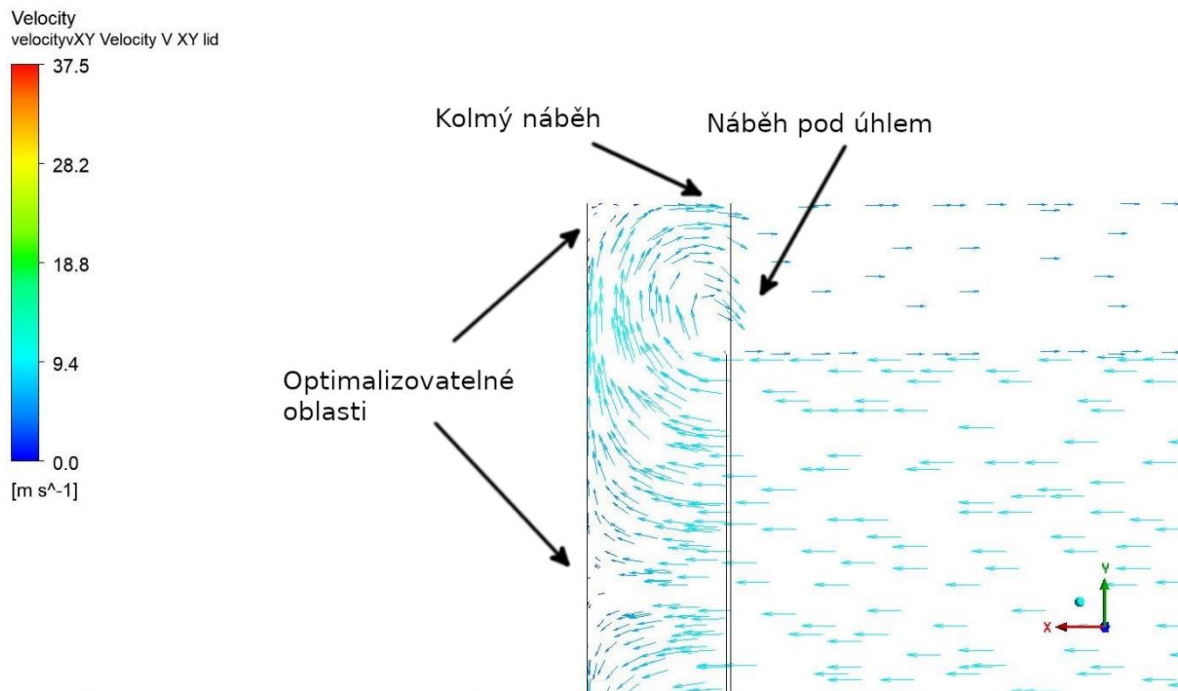
Obrázek 36: Výchozí varianta - tlak – roviny XY & XZ

Tyto jevy se dají v menším měřítku pozorovat na konturách statického tlaku, jelikož zvýšení rychlosti v dané oblasti vede k jeho lokálnímu zmenšení (Obrázek 36). Tento jev je markantní především v oblastech blíže komory katalyzátoru. Jelikož jsou doména i vstupní proudy symetrické dle roviny XZ, vykazují kontury rychlosti a tlaku symetrii podle této roviny (Obrázek 33, Obrázek 36).

Kontury i vektory rychlostí v katalyzátoru jsou vzhledem k nastavení porézních médií velmi rovnoměrné a usměrňené. Zde dochází především k primární tlakové ztrátě celé zadané domény. Lze pozorovat velmi plynulý ovšem rapidní tlakový spád na obou tělesech katalyzátoru (Obrázek 36), tedy dominantní třetí složku tlakové ztráty, čímž se potvrzují předpoklady v kapitole 4.2.3. V samotné otočné komoře dochází jen k malému úbytku statického tlaku (Tabulka 5).



Obrázek 37: Východí varianta - rychlost K (absolutní hodnota, ve směru X, Y a Z)



Obrázek 38: Východí varianta - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY)



Kontury rozložení rychlosti roviny K (Obrázek 37) indikují nerovnoměrné radiální rozložení hmotnostního toku. Stejnou skutečnost podporuje i detail vektorového zobrazení rychlosti v oblasti otočné komory. Směr rychlosti vstupu do druhé části katalyzátoru („Katalyzátor\_2“) je sice na vnějším poloměru kolmý na stěnu vstupu, ovšem v oblasti blíže ose vstupní úhel roste až po hodnotu přibližně  $45^\circ$  (Obrázek 38). Homogennější rozložení rychlosti ve směru X vykazuje kolmější úhly náběhu (pod menšími úhly se proud koncentruje).

Proudění v oblasti za výstupem z porézního média je velmi rovnoměrné. Vstup do výstupních trubic způsobuje značné zmenšení průtočné plochy a tudíž skokové navýšení rychlosti. Proud v této oblasti je vyvinutý a nedochází ke zpětnému proudění (Obrázek 33).

## 5.1 Shoda výchozí simulace s realitou

Hranice dostatečné shody hodnoty kritického parametru s reálnou hodnotou lze považovat za subjektivní, nicméně tlaková ztráta v komoře katalyzátoru s výše uvedenými parametry spolehlivě konverguje na hodnotě  $\Delta p = 2,992 \text{ kPa}$ . K zadané ztrátě 3 kPa se tedy výpočet blíží s přijatelnou odchylkou **0,27 %**. Všechny sledované hodnoty statických tlaků velmi rychle konvergovaly. Rezidua výpočtu pravidelně kolísaly v řádu  $10^{-6}$  a imbalance klesly na řád tisícín procenta. Toto chování potvrzuje, že zahrnutí domény v plném rozsahu nevedlo k potřebě zjemnit výpočetní síť.

## 5.2 Porovnání s transientní simulací

Pro vypracování optimalizace bylo již v raném stádiu rozhodnuto o využití stacionárních simulací, jelikož je tento typ výpočtu vhodnější z pohledu reprezentace obecného chování proudu. Časově proměnný průběh zahrnuje nejen geometrické, ale i časové extrémy sledovaných funkcí, což není pro tvorbu závěrů týkající se obecného chování vhodné. Rovněž představuje významnou úsporu výpočetní náročnosti. Stacionární výpočet byl zastaven po provedení 468 výpočetních iterací, kdežto pro transientní výpočet jich bylo zapotřebí 3200.

Provedená stacionární simulace výchozí varianty ovšem pracuje s idealizovanými vstupními podmínkami. Hmotnostní tok byl brán jako časově ustálená veličina a byl rovnoměrně rozložen na všechny čtyři vstupy. Je ovšem vhodné porovnat výsledky této simulace s transientní (závislé na čase), která představuje reálnější reprezentaci řešeného problému. Nastavení této simulace je naprosto identické se stacionární vyjma zadání aproximované funkční závislosti hmotnostního toku na čase pro jednotlivé vstupy. Pro dostatečné množství dat k výpočtu střední hodnoty tlaku, byla simulace nastavena 320 časových kroků.

V čase  $t = 0 \text{ s}$  byla nastavena nulová rychlost na celé doméně a simulovaný interval byl nastaven na 0,16 sekund což odpovídá čtyřem otáčkám motoru. Jelikož jsou při každé otáčce aktivní jen dva píсты, mají jednotlivé otáčky rozdílný charakter. Periodu procesu tedy tvoří dvě otáčky. Počáteční nulová rychlost média může ovšem výsledky podstatně zkreslit (svoji setrvačností zpomalují proudění) a pro vyhodnocení střední tlakové ztráty komory katalyzátoru v čase budeme tedy brát v potaz poslední dvě otáčky, při kterých rychlosti média lépe vystihují provozní podmínky. Následující tabulka (Tabulka 6) obsahuje hodnoty tlakových ztrát na zvoleném intervalu.

Tabulka 6: Tlakové ztráty transientního simulace

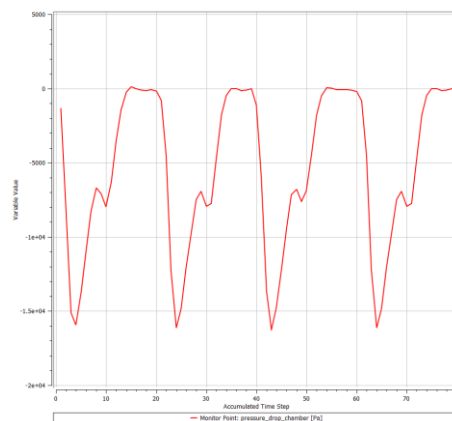
Čas [s]	$\Delta p$ [Pa]
0,08	-1114
0,088	-14780
0,096	-6792
0,104	-1826
0,112	-72,07
0,12	-199,3
0,128	-16140
0,136	-7493
0,144	-4847
0,152	-21,01
0,16	68,99

Z dostupných dat transientního výpočtu byla vypočtena střední hodnota tlakové ztráty  $\Delta p = 5,4307$  kPa. Tato hodnota je podstatně vyšší v porovnání se stacionární simulací, konkrétně o 81,5 %. Příčinu tohoto výrazného navýšení představuje závislost tlakové ztráty na dynamickém tlaku.

$$\Delta p = \zeta * p_d \quad (19)$$

$$p_d = \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (20)$$

Mezi rychlostí a dynamickým tlakem existuje kvadratická závislost. Jelikož rychlost média na základě vstupních podmínek výrazně fluktuuje, je tímto chováním silně ovlivněn i dynamický tlak a přes něj i tlakové ztráty média. Průběh ztrát je vyobrazen na následující obrázku (Obrázek 39). Časové extrémy ztrát tlaku klesají k hodnotě 16 kPa a představují dobu průběhu jednotlivých taktů motoru. V časových úsecích mezi takty se difference tlaků před a za komorou pohybují okolo nulové hodnoty. Tyto úseky jsou po prvním a třetím taktu (využívající Vstup\_1 a Vstup\_3, viz. Obrázek 23) pozorovatelně delší. Prodleva je způsobena tím, že médium dále proudí do domény vzdálenějšími vstupy (Vstup\_2 a Vstup\_4) a spaliny tedy musí urazit větší dráhu.



Obrázek 39: Průběh tlakové ztráty v komoře katalyzátoru

## 6 Optimalizace

Jak již bylo uvedeno, cílové parametry, jimiž jsou rozložení hmotnostního toku a celková tlaková ztráta komory katalyzátoru, mohou být ovlivněny jak tvarem víka otočné komory, tak jeho vzdáleností. V této kapitole jsou obsaženy studie obou těchto parametrů a jejich kombinace.

Z analýzy výchozí varianty je známo, že hlavní složku tlakové ztráty představuje třecí ztráta v katalyzátoru. Z tohoto důvodu bude pro účely této práce primární cíl zajistit pokud možno co nejrovnoměrnější radiální rozložení hmotnostního toku na vstupu do vnější části katalyzátoru. Homogennější vstupní podmínky totiž představují menší tlakové ztráty. Snížení samotné ztráty způsobené otočením proudu je považováno dle požadavků TEDOM a.s. za druhotný úkol.

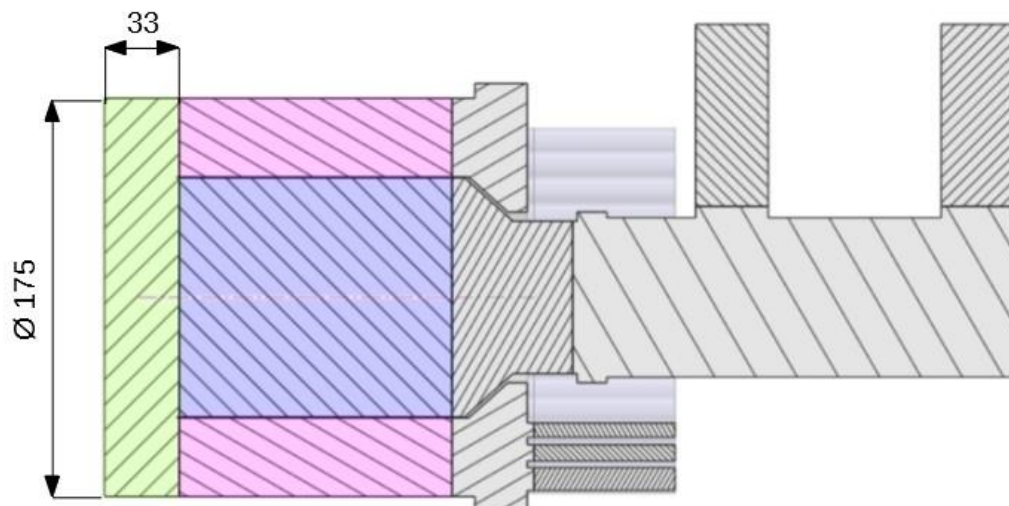
Jelikož není nutné provádět globální analýzu popsanou v kapitole 5, budou výstupy jednotlivých variant představovat tabulkové hodnoty tlakových ztrát, kontury rychlostí axiálního směru a detail vektorů rychlosti roviny XY. Kontury rychlostí ve směru osy X jsou provedeny v původním rozsahu rychlostí 0 – 6 m/s a pro větší kontrast i ve zúženém rozsahu 3 – 6 m/s.

### 6.1 Varianty profilu otočné komory

Tato podkapitola se zabývá představením navržených profilů, které byly tvořeny s ohledem na nedostatky původního rovinného profilu a které byly identifikovány po provedení numerických simulací na základě rozboru kontur (Obrázek 33) a vektorů (Obrázek 38) rychlosti v oblasti otočné komory. Ty indikují přítomnost problematických oblastí na zadní stěně komory v blízkosti osy a okrajové hrany. V nich se proud přirozeně zpomaluje, čímž zde narůstá statický tlak. Rovněž lze předpokládat, že redukce těchto oblastí zmenší míru turbulence v komoře, což sníží množství zbytečně disipované energie. Následující alternativy tvaru otočné komory se zakládají na myšlence tyto oblasti odstranit.

Jelikož sledovaná oblast vykazuje rotační symetrii, jsou jednotlivé varianty otočné komory navrhovány jako rotační tělesa s identickou osou. Tím je v případě uvedení do výroby zajištěna i ekonomičnost návrhu.

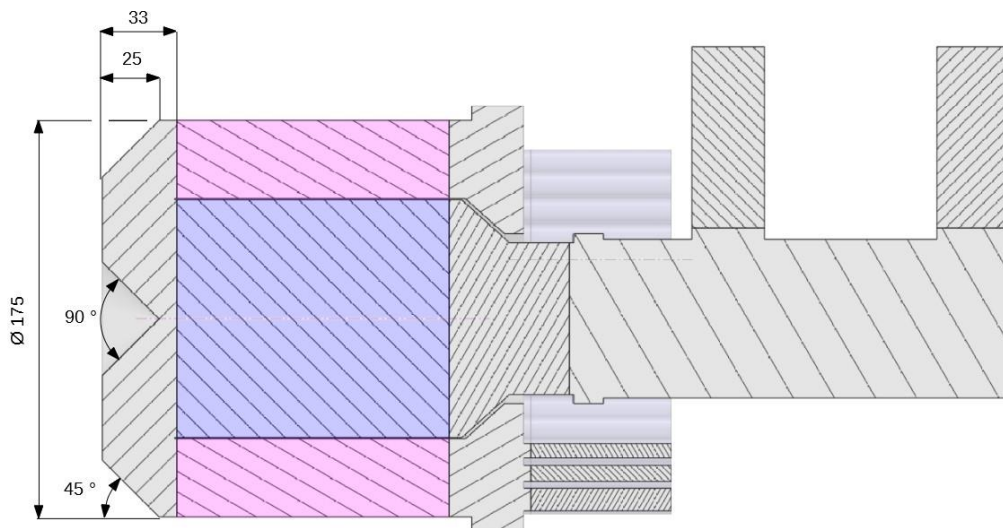
Před samotnou přípravou jednotlivých variant bylo rozhodnuto, že optimalizace bude provedena nejen za pomoci variant profilu komory, ale také jejich vzdálenosti od zbytku sestavy. Je proto nutné definovat tento výchozí rozměr na všech variantách obdobným způsobem. Vzhledem k rozdílné topologii byl tento rozměr určen jako vzdálenost nejvzdálenějšího bodu/plochy od roviny vstupu do otočné komory. Všechny níže zvolené návrhy byly tvořeny s možností zmenšení této hodnoty a tak na výchozí délce nepřiléhají k samotnému katalyzátoru. Pro možnost přiblížení profilu č. 3 byla původní vzdálenost navýšena o 2 mm oproti zadané geometrii (zanedbatelný vliv na chování proudu) na hodnotu **33 mm** (viz. Obrázek 40).



Obrázek 40: Výchozí varianta

### 6.1.1 Varianta č. 1 (profil „K“)

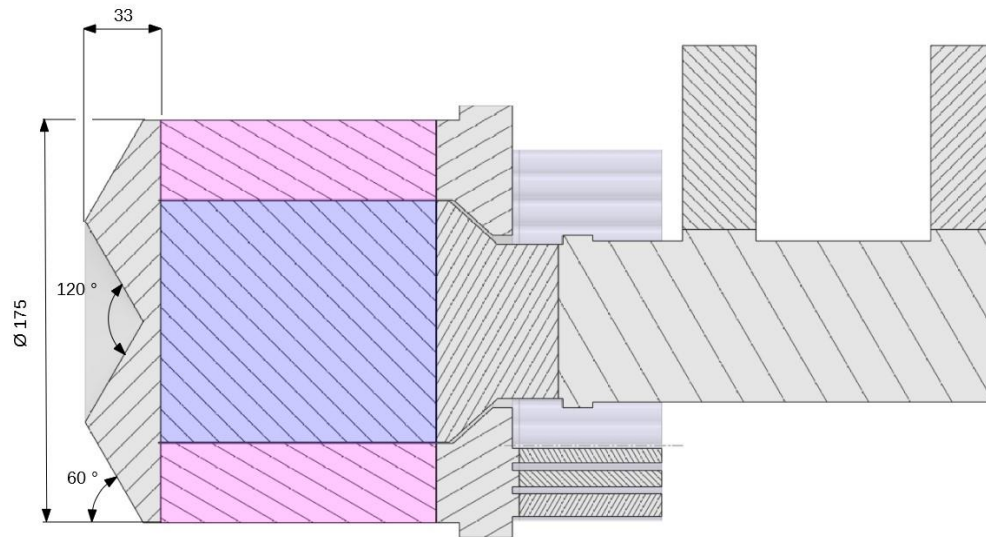
První návrh víka je založen na přidání kuželu na společnou osu katalyzátoru a otočné komory spolu se zkosněním obvodové hrany. Kužel i zkosnění zasahují do vzdálenosti 25 mm a oba prvky jsou definovány pod úhlem 45° (Obrázek 41). Jde o hrubé odstranění oblastí, kde proud na rovinné ploše přirozeně zpomaluje a roste zde tedy statický tlak. Tato varianta byla nazvána pracovníě jako profil „K“ (indikující přítomnost kužele).



Obrázek 41: Varianta č. 1 (profil „K“)

### 6.1.2 Varianta č. 2 (profil „W“)

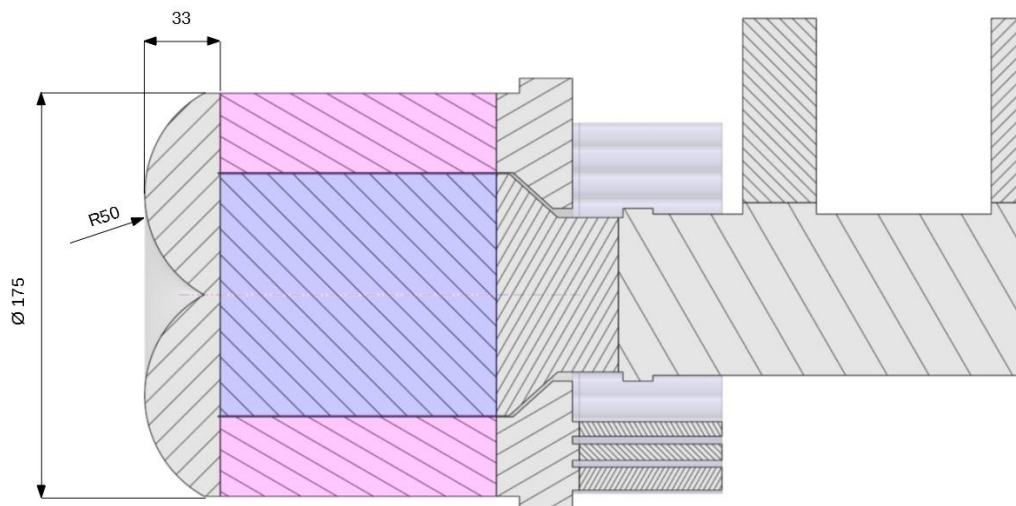
Druhý návrh vychází z předcházejícího tzn. zkosení i kužel zůstávají zastoupeny, ale jejich parametry jsou upraveny tak, že se zcela eliminuje zbytek původní rovinné plochy a tyto elementy splynou na společné křivce. Profil definuje úhel zkosení  $120^\circ$  a připomíná písmeno „W“ (odtud jeho pracovní pojmenování). Obrázek 42 popisuje řez tímto typem otočné komory.



Obrázek 42: Varianta č. 2 (profil „W“)

### 6.1.3 Varianta č. 3 (profil „O“)

Stejně jako druhá varianta i tento profil je úpravou té předchozí. V tomto případě byl upraven profil do hladkého oblouku o poloměru 50 mm (Obrázek 43). Vzdálenost nejvzdálenější křivky byla zanechána. Tento návrh byl označen jako profil „O“.



Obrázek 43: Varianta č. 3 (profil „O“)

## 6.2 Optimalizace dle tvaru

Tato kapitola se věnuje chování veličin v závislosti pouze na tvaru profilu. Maximální vzdálenost profilu od tělesa katalyzátoru (33 mm) zůstává v těchto podmínkách neměnná. Topologie jednotlivých profilů již byla popsána v minulé kapitole 6.1. Níže jsou uvedeny pouze sledované veličiny v oblasti komory katalyzátoru (Tabulka 7, Tabulka 8, Tabulka 9).

Tabulka 7: Vypočtené hodnoty varianty K

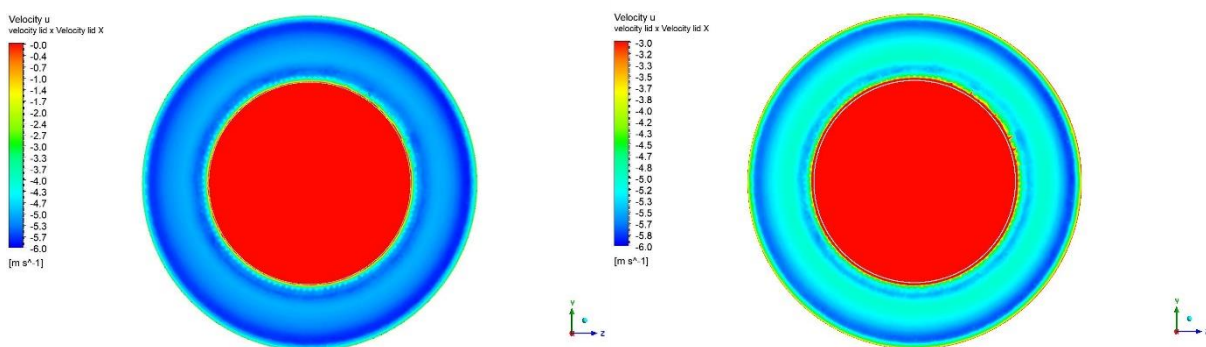
Tlakové ztráty	statický tlak [kPa]	$\zeta$ [-]
Celá doména	-3.240	25.99
Otočná komora	$4.495e * 10^{-3}$	0.7597
Komora katalyzátoru	<b>-3.084</b>	<b>82.38</b>

Tabulka 8: Vypočtené hodnoty varianty W

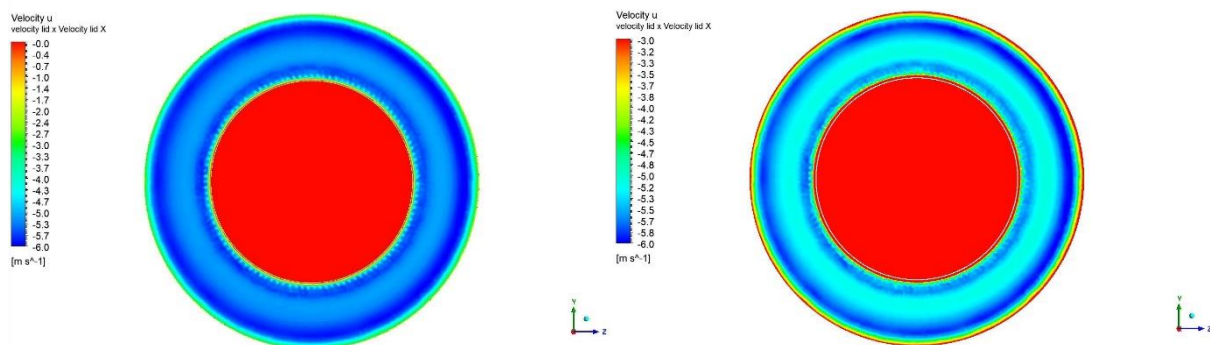
Tlakové ztráty	statický tlak [kPa]	$\zeta$ [-]
Celá doména	-3.243	26.01
Otočná komora	$2.380e * 10^{-3}$	0.8728
Komora katalyzátoru	<b>-3.086</b>	<b>82.61</b>

Tabulka 9: Vypočtené hodnoty varianty O

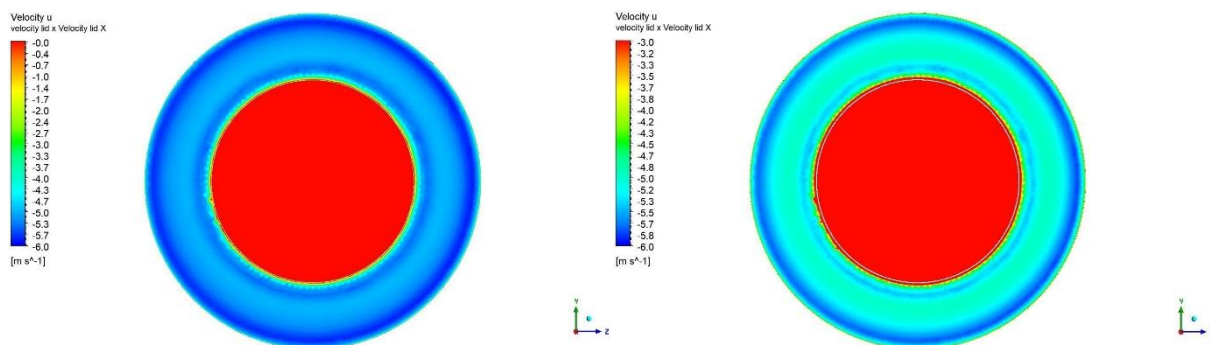
Tlakové ztráty	statický tlak [kPa]	$\zeta$ [-]
Celá doména	-3.239	25.98
Otočná komora	$4.194e * 10^{-3}$	0.7758
Komora katalyzátoru	<b>-3.084</b>	<b>81.96</b>



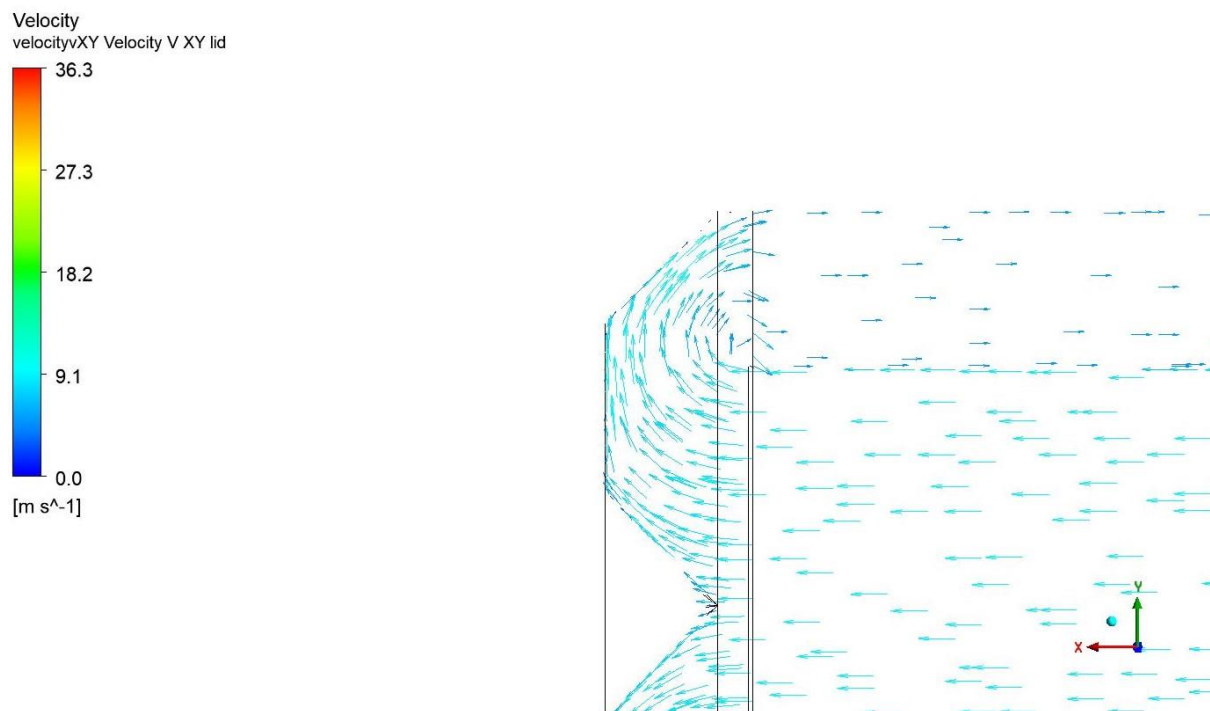
Obrázek 44: Varianta K - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s



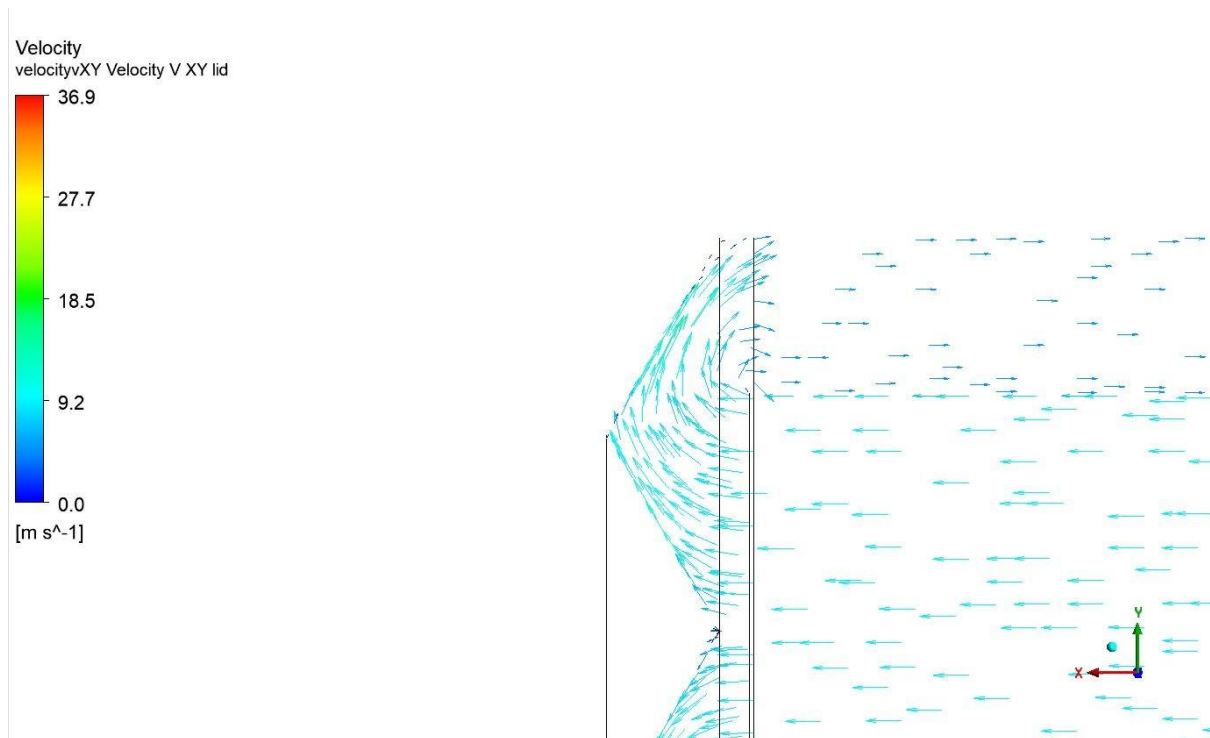
Obrázek 45: Varianta W - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s



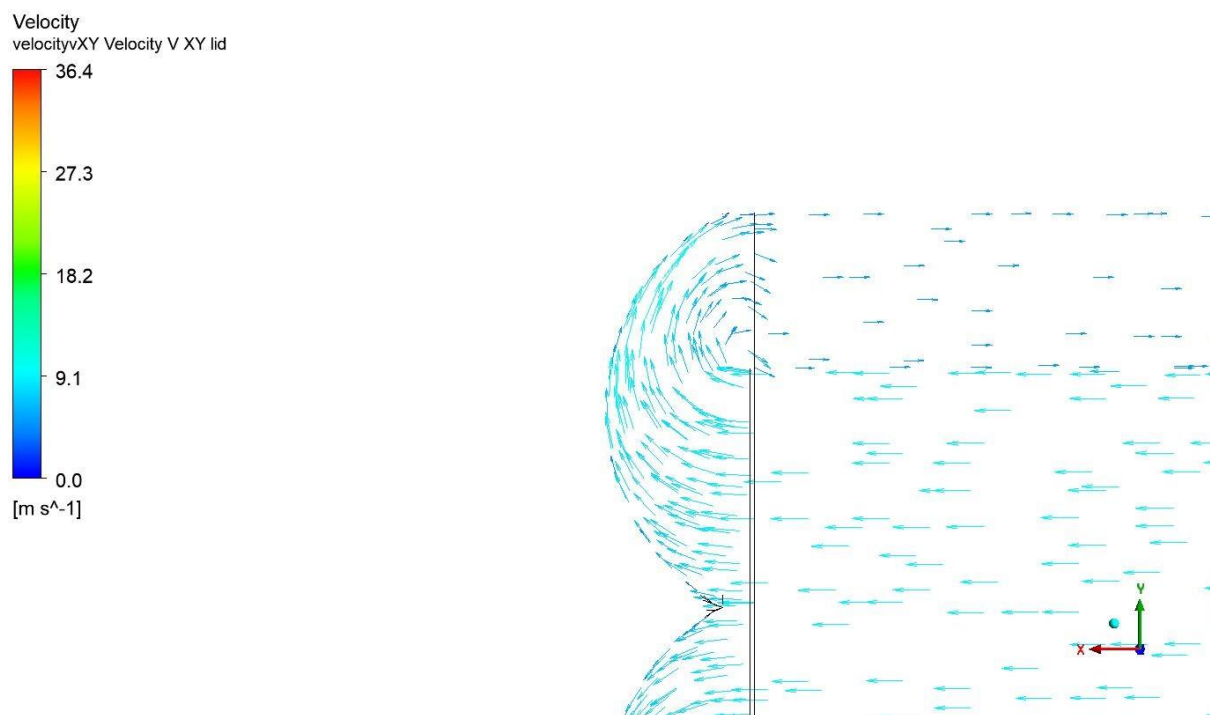
Obrázek 46: Varianta O - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s



Obrázek 47: Varianta K - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY)



Obrázek 48: Varianta W - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY)



Obrázek 49: Varianta O - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY)



### 6.2.1 Varianta K

První varianta vykazuje navýšení statického tlaku i koeficientu  $\zeta$ . Ke zhoršení tlakové ztráty došlo pravděpodobně z důvodu celkového zmenšení objemu otočné komory oproti výchozí variantě. V tabulce (Tabulka 7) jsou obsaženy konkrétní vypočtené hodnoty.

Implementací tohoto profilu došlo k výraznému zlepšení distribuce proudu (Obrázek 44). Důvodem je pravděpodobně ustálení proudu a eliminace problémových oblastí na hraně a středu plochy původní komory. Kontury rychlosti ve směru X vykazují mnohem menší lokalizovanost. Z detailu vektorů rychlosti (Obrázek 47) lze pozorovat zrychlení proudu v bezprostřední blízkosti profilu.

### 6.2.2 Varianta W

Druhá varianta ze stejného důvodu jako varianta první vykazuje zhoršení tlakové ztráty hodnocené pomocí obou parametrů. Tabulka 8 obsahuje konkrétní hodnoty.

Tento profil sice představuje zlepšení rozložení toku oproti výchozí variantě, ovšem ne v porovnání s profilem K. Charakterizuje jej sice také pravidelné rozložení rychlosti, ale i větší gradient v radiálním směru (v oblasti u vnější válcové stěny velmi markantní) viditelné na kontuře (Obrázek 45). Vektory v detailu otočné komory (Obrázek 48) indikují radikálněji usměrněný proud než u profilu K, což vede v porovnání s ním k většímu zrychlení proudu na profilu zadní stěny.

### 6.2.3 Varianta O

Třetí varianta (Tabulka 9) je v otázce snížení ztráty statického tlaku kvantitativně stejně neefektivní jako varianta první a řádově srovnatelná s variantou druhou. Nicméně v tomto případě došlo k velmi mírnému zlepšení koeficientu místních ztrát ve srovnání s výchozím profilem. Tento rozdíl je ovšem zanedbatelný.

Rozložení axiálních rychlosti v rovině K pro tuto variantu (Obrázek 46) představuje zlepšení nejen oproti výchozí variantě ale i oproti ostatním navrženým alternativám. Má gradient největšího růstu axiální rychlosti s rostoucí vzdáleností od osy symetrie. Obrázek 49 také sice indikuje nucené zakřivení proudu, ovšem jde o vedení po rovnoměrně zakřivených proudnicích bez lokálního nárůstu flexní křivosti.

## Celkové zhodnocení

Všechny varianty profilu vedly na mírné navýšení celkové ztráty statického tlaku a vyjma velmi mírného zlepšení u profilu O i ke zhoršení koeficientu místních ztrát. Verze K a především verze O zajistily homogenizaci rychlostních polí a tudíž i rozložení hmotnostního toku.

### 6.3 Optimalizace dle vzdálenosti

Druhý aspekt nalezení ideální otočné komory spočívá ve sledování stejných veličin jako v předchozí kapitole, ovšem variací vzdálenosti. Byly provedeny tři následující úpravy původní komory:

- Přiblížení o 10 mm
- Oddálení o 30 mm
- Oddálení o 60 mm

Tabulka 10: Vypočtené hodnoty - přiblížení - 10 mm

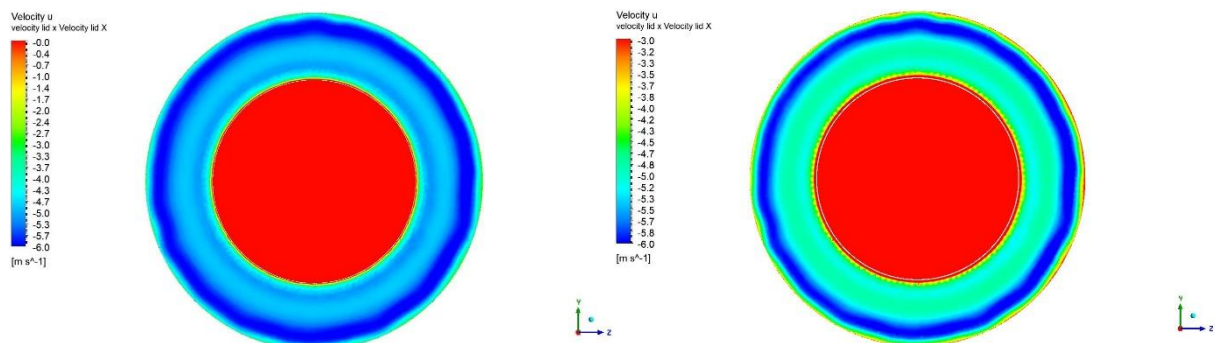
Tlakové ztráty	statický tlak [kPa]	$\zeta$ [-]
Celá doména	-3.148	25.65
Otočná komora	$-2.230 \cdot 10^{-3}$	1.121
Komora katalyzátoru	<b>-2.994</b>	<b>82.10</b>

Tabulka 11: Vypočtené hodnoty - oddálení - 30 mm

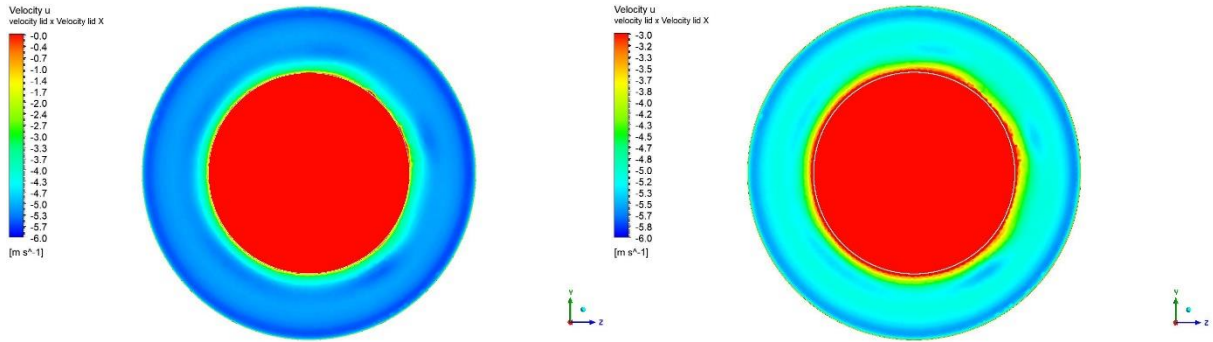
Tlakové ztráty	statický tlak [kPa]	$\zeta$ [-]
Celá doména	-3.140	25.59
Otočná komora	$3.744e \cdot 10^{-3}$	0.7966
Komora katalyzátoru	<b>-2.989</b>	<b>81.99</b>

Tabulka 12: Vypočtené hodnoty - oddálení - 60 mm

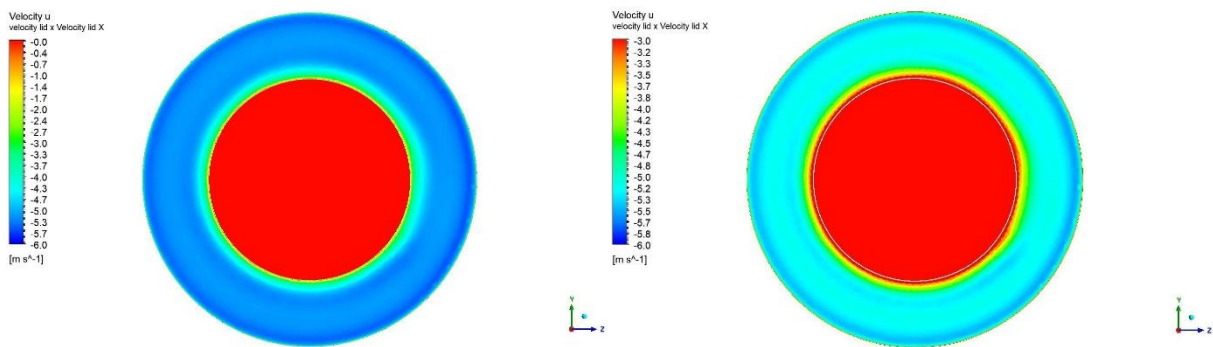
Tlakové ztráty	statický tlak [kPa]	$\zeta$ [-]
Celá doména	-3.138	25.57
Otočná komora	$4.588 \cdot 10^{-3}$	0.7507
Komora katalyzátoru	<b>-2.988</b>	<b>83.14</b>



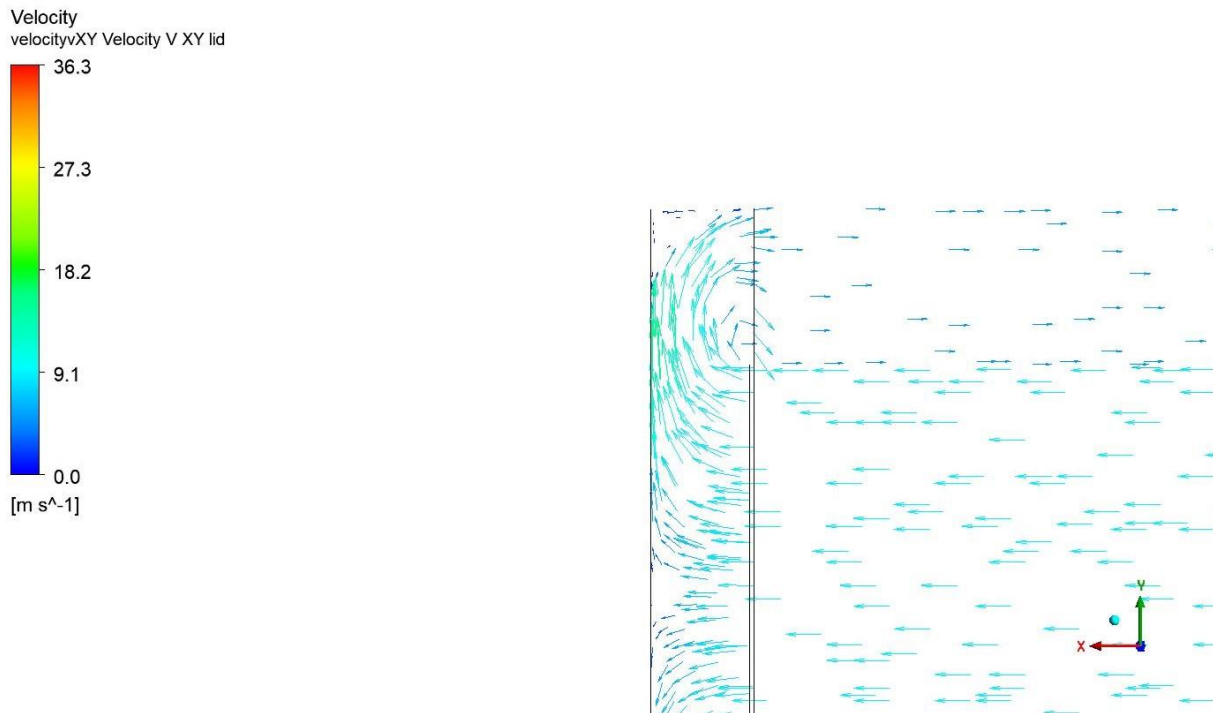
Obrázek 50: přiblížení - 10 mm - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s



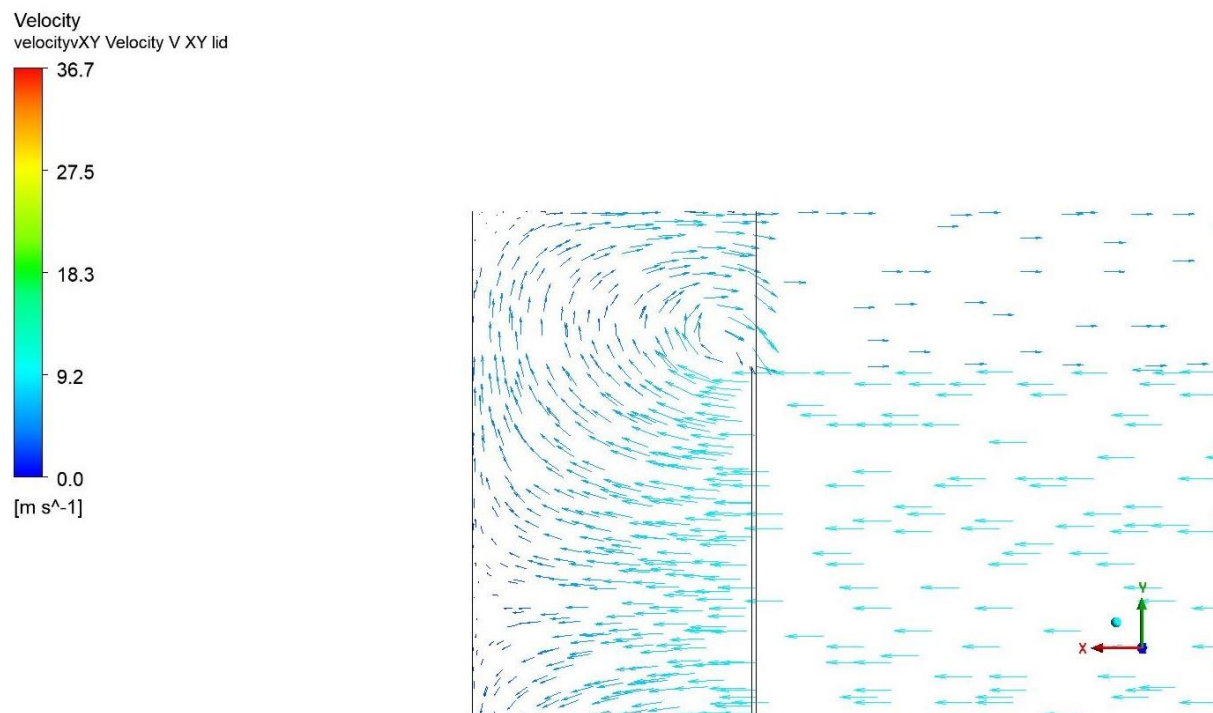
Obrázek 51: oddálení - 30 mm - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s



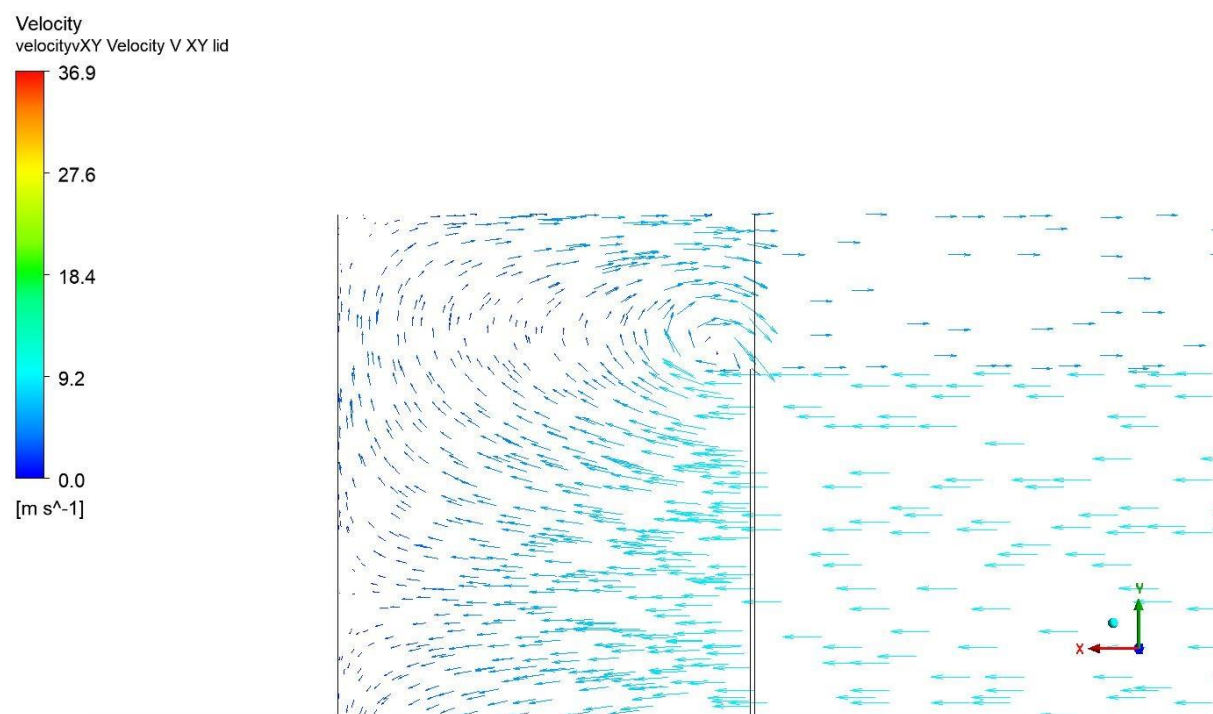
Obrázek 52: oddálení - 60 mm - rychlost – osa X – rozsah 0 – 6 m/s & 3 – 6 m/s



Obrázek 53: přiblížení - 10 mm- vektory rychlosti - detail otočné komory (XY)



Obrázek 54: oddálení - 30 mm - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY)



Obrázek 55: oddálení - 60 mm - vektory rychlosti - detail otočné komory (XY)

Dle analýzy provedených výpočtů lze konstatovat, že tlakové ztráty nevykazují žádnou významnou závislost na vzdálenosti víka od katalyzátoru (Tabulka 10, Tabulka 11 a Tabulka 12). Stejně jako u procesu optimalizace víka, jeho přiblížení způsobilo nárůst ztrát statického tlaku a ve stejném smyslu jeho oddálení (oddálení o 30 a 60 mm) tento spád mírně zmírnilo. Jde ovšem o velmi malé změny v řádu desetin procenta. V rámci hodnocení ztrát pomocí koeficientu místních ztrát došlo při jakékoli manipulaci k jeho zhoršení. Obecně lze tvrdit, že manipulace vzdálenosti nevyvolává řádově signifikantní změny tlakových ztrát.

Na konturách axiálních rychlostí (Obrázek 50, Obrázek 51 a Obrázek 52) vykazuje s rostoucí vzdáleností zadní stěny od vstupu do katalyzátoru rozložení hmotnostního toku rostoucí jednodušší. Tato závislost je více patrná porovnáním rychlostních polí s menším rozsahem rychlostí.

Obrázky detailu vektorů rychlosti (Obrázek 53, Obrázek 54 a Obrázek 55) ukazují neměnnou topologii tvaru proudnic. Proud dále od katalyzátoru se přirozeně zpomaluje. Varianta přiblížení o 10 mm se vykazuje zrychlením proudu v blízkosti zadní stěny. Rychlosti na stěnách se s rostoucí vzdáleností postupně zmenšují. Míra zakřivení proudu není závislá na axiální vzdálenosti od vstupu do otočné komory, nýbrž na radiální od osy symetrie. Vektory rychlosti v oblasti stěny katalyzátoru mají tedy ve všech variantách obdobný charakter.

## 6.4 Spektrum optimalizace

V předchozích kapitolách bylo ilustrováno chování pouze jednoho parametru na sledované veličiny. Pro korektní zvážení obou parametrů bylo vytvořeno šest dalších variant pro tvorbu spektra obsahující možné kombinace posunutí vzdálenosti navržených profilů o 5 mm do obou směrů. Míra tohoto posunutí byla omezena konstrukčním provedením jednotlivých variant. Pro zajištění nezkráceného pozorování vlivu vzdálenosti na jednotlivé profily nebyla míra prodloužení navýšena, i když by to byla z konstrukčního hlediska přijatelná možnost.

Bylo prokázáno, že změny tlakových ztrát jsou za daných podmínek téměř zanedbatelné a že hmotnostní rozložení je mnohem více citlivé na úpravy provedené v této práci. Následující tabulky (Tabulka 13, Tabulka 14, Tabulka 15, Tabulka 16) ilustrují výsledky tlakových ztrát a rozložení všech variant obsahu této práce. Nebylo ovšem zapotřebí zpracovat všechny kombinace profilů a vzdáleností, a proto tabulky obsahují prázdná pole.

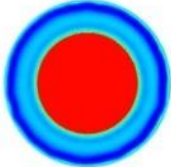
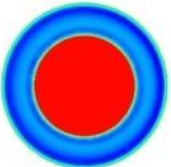
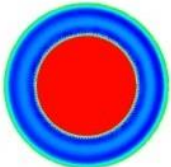

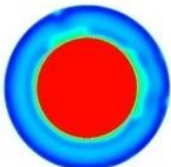
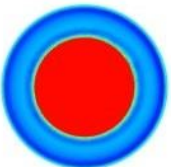
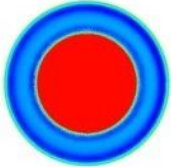
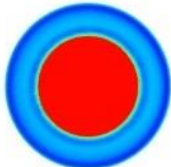

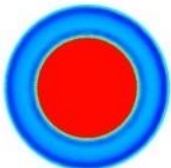

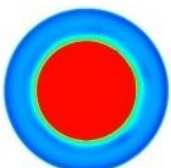

Tabulka 13: Přehled tlakové ztráty dle rozdílu statických tlaků

Vzdálenost	$\Delta p$ (výchozí profil) [kPa]	$\Delta p$ (profil „K“) [kPa]	$\Delta p$ (profil „W“) [kPa]	$\Delta p$ (profil „O“) [kPa]
23	-2,994	-	-	-
28	-	-3,085	-3,091	-3,085
33	-2,992	-3,084	-3,086	-3,084
38	-	-3,084	-3,084	-3,084
63	-2,989	-	-	-
93	-2,988	-	-	-

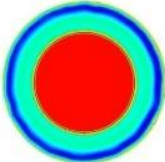
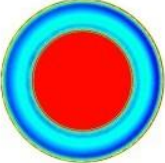
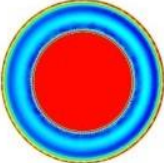
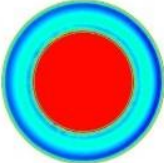
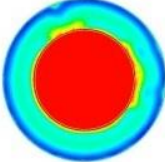
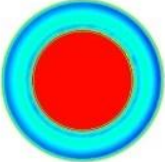
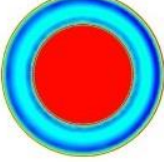
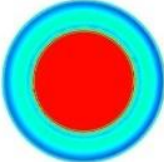
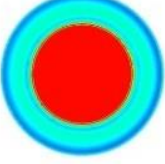
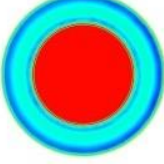
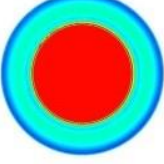
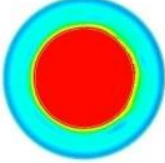
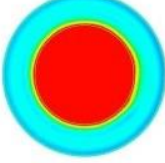
Tabulka 14: Přehled tlakové ztráty dle koeficientů místních ztrát

Vzdálenost	$\Delta p$ (výchozí profil) [kPa]	$\Delta p$ (profil „K“) [kPa]	$\Delta p$ (profil „W“) [kPa]	$\Delta p$ (profil „O“) [kPa]
23	82,1	-	-	-
28	-	82,31	81,09	83,02
33	81,98	82,38	82,61	81,96
38	-	83,87	83,48	84,22
63	81,99	-	-	-
93	83,14	-	-	-

Tabulka 15: Přehled rozložení rychlostí – rovina K - směr X – rozsah 0 – 6 m/s

Vzdálenost [mm]	Výchozí profil	Profil č. 1 („K“)	Profil č. 2 („W“)	Profil č. 3 („O“)
23				
28				
33				
38				
63				
93				

Tabulka 16: Přehled rozložení rychlostí – rovina K - směr X – rozsah 3 – 6 m/s

Vzdálenost [mm]	Výchozí profil	Profil č. 1 („K“)	Profil č. 2 („W“)	Profil č. 3 („O“)
23				
28				
33				
38				
63				
93				



U variant modifikovaných profilů s přiblížením ke katalyzátoru došlo ke znatelnému zhoršení hmotnostního rozložení spolu s nárůstem tlakových ztrát. Výjimkou je koeficient místních ztrát profilu W. Jde ovšem opět o téměř neznamenný rozdíl.

Oddálení těchto profilů vedlo k mírné homogenizaci hmotnostního toku. Především kombinace s variantami K a W vedou na pravidelnější hmotnostní rozložení. Rozdíly tlakových spádů byly rovněž téměř neznamenné. Oproti původní vzdálenosti mírně narostly koeficienty  $\zeta$ . Je nutné podotknout, že ačkoli při výchozí vzdálenosti 33 mm vykazoval profil O homogennější rozložení toku než profil K, při mírném prodloužení je tomu naopak (Tabulka 15, Tabulka 16). Kontrast kontur a tudíž rozložení hmotnostního toku je u popisovaných variant především nejlépe charakterizován v oblasti okrajové hrany. Profil K s prodloužením má rovněž menší koeficient  $\zeta$ .

Při zvážení všech dostupných dat lze označit za výsledek optimalizace **variantu profilu č. 1 (varianta s kuželem a zkosením) v kombinaci s mírným prodloužením od těla katalyzátoru**. Ze všech kombinačních variant představuje optimum rozložení hmotnostního toku a přijatelné hodnoty ztráty statického tlaku i koeficientu místních ztrát  $\zeta$ . V případě zavedení této modifikace do výroby představuje relativní jednoduchost tohoto tvaru potenciální finanční úsporu oproti například pracněji vyrobitelné alternativy s obloukem. Pro účely případné navazující optimalizace by mělo na základě výsledků této práce s větším oddálením profilu č.1 docházet k homogennějšímu rozložení hmotnostního toku.

## Závěr

Cílem práce bylo popsat princip využití katalyzátoru a provést optimalizaci tvaru komory katalyzátoru kogenerační jednotky společnosti TEDOM a. s. za účelem snížení tlakových ztrát a zajištění rovnoměrné distribuce hmotnostního toku.

V teoretické části byla popsána technologie kogenerace, základní princip homogenní a heterogenní katalytické reakce, popsání různých druhů katalyzátorů využívaných v praxi a principy metod sloužící k tvorbě numerických analýz a popisu turbulentního proudění.

V rámci praktické části byl za pomoci softwaru společnosti ANSYS, Inc. proveden výpočet aproximující reálný stav původního konstrukčního řešení komory katalyzátoru. Z geometrie dodané společností TEDOM a. s. byla po její úpravě vytvořena geometrie proudící domény. Vzhledem ke složitému charakteru tvaru katalyzátoru, byla tato komponenta nahrazena dvěma porézními tělesy. Pro verifikaci výpočtu byla provedena nezávislá studie sítě potvrzující dostatečnou kvalitu výpočtu s ohledem na výpočetní náročnost. Tlakovou ztrátu komory katalyzátoru výchozí varianty, která tvořila základ pro samotnou optimalizaci, jsme se pomocí nastavení vlastností porézního média snažili přiblížit reálné ztrátě o hodnotě 3 kPa. Výchozí varianta se touto hodnotou lišila o 0,27 %. Bylo rovněž provedeno srovnání s reálnější (ovšem pro optimalizaci nepříliš vhodnou) transientní simulací, která zahrnovala časově proměnný hmotnostní tok na všech čtyřech vstupech do domény. Velké fluktuace rychlostí ovšem střední tlakovou ztrátu výrazně navýšily (o 81,5 %).

Po analýze výchozí varianty byla provedena optimalizace podle dvou kritických parametrů - tvaru a vzdálenosti profilu otočné komory. Studie chování tlakové ztráty a rozložení hmotnostního toku za změny obou parametrů proběhla separátně a poznatky z obou studií byly uplatněny pro rozhodnutí optimálního konstrukčního řešení. Tato fáze zahrnovala tvorbu dalších šesti simulací kombinující oba aspekty. Jelikož výsledky simulací obou studií neprokázaly významnou závislost na velikost tlakové ztráty, bylo za hlavní rozhodující kritérium určeno rozložení hmotnostního toku na vstupu do vnější části katalyzátoru po otočení proudu v komoře. Oddálení profilu má obecně pozitivní vliv na rozložení toku. Modifikace tvaru profilu má v případě variant 1 a 3 také pozitivní vliv na rozložení hmotnostního toku. Jelikož je cílem práce najít optimum, byl zvolen jako výstup práce profil č. 1 (komora obsahující kužel na ose rotační symetrie a zkosení na vnější hraně pod úhlem 45°) s oddálením od tělesa katalyzátoru o 5 mm. Rovněž je přijatelný profil č. 3 (komora obsahující obloukový profil o poloměru 50 mm) s prodloužením o 5 mm.

## Citovaná literatura

1. Paděra, Bc. Jiří. *Kogenerační jednotky pro domácí využití*. 2008.
2. a.s., TEDOM. VÝHODY A VYUŽITÍ KOGENERACE. <https://www.tedom.com/>. [Online] <https://www.tedom.com/cs/vyhody-a-vyuziti-kogenerace/>.
3. MWM. *Cogeneration & Trigenation*. [Online] 2020. <https://www.mwm.net/mwm-chp-gas-engines-gensets-cogeneration/mwm-competencies/cogeneration-trigenation-plants/>.
4. Elprocus. ELPROCUS. *Cogeneration (CHP) Definition – Types of Cogeneration Power Plants*. [Online] 2020. <https://www.elprocus.com/cogeneration-chp-definition-types-of-cogeneration-power-plants/>.
5. Inoplex. *Inoplex.com*. [Online] 2018. <https://www.inoplex.com.au/information/what-is-the-difference-between-topping-and-bottoming-cycle-chp>.
6. topenářství instalace. *topin.cz*. [Online] 2020. <http://www.topin.cz/clanky/o-kogeneraci-detail-4039>.
7. I. Chorkendorff, J.W. Niemantsverdriet. *Concepts of Modern Catalysis and Kinetics*. místo neznámé : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003.
8. THE OZONE HOLE. *OZONE DESTRUCTION*. [Online] 2020. <https://theozonehole.com/ozonedestruction.htm>.
9. LIBRETEXTS. *Catalysis*. [Online] 25. 5 2020. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General\\_Chemistry/Map%3A\\_Chemistry\\_-\\_The\\_Central\\_Science\\_\(Brown\\_et\\_al.\)/14%3A\\_Chemical\\_Kinetics/14.7%3A\\_Catalysis](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_Chemistry_-_The_Central_Science_(Brown_et_al.)/14%3A_Chemical_Kinetics/14.7%3A_Catalysis).
10. Chemistry for Liberal Studies - Forensic Academy. *The Chemistry of Combustion*. [Online] <https://www.chem.fsu.edu/chemlab/chm1020c/Lecture%207/01.php>.
11. Takáts, Michal. *Měření emisí spalovacích motorů*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1997.
12. Vlk, František. *Paliva amaziva motorových vozidel*. Brno : autor neznámý, 2006.
13. Automobile Association Developments Ltd. *VEHICLE EXHAUST EMISSIONS*. [Online] 11. 1 2017. <https://www.theaa.com/driving-advice/fuels-environment/emissions>.
14. Vlk, František. *VLK F., 2006: Automobilová elektronika. 1. vyd. Brno: František Vlk, 269 s., Brno : autor neznámý, 2006*.
15. NETT Technologies Inc. *How Does a Three-Way Catalyst Work?* [Online] 2020. <https://www.nettinc.com/information/emissions-faq/how-does-a-three-way-catalyst-work>.
16. Musil, Milan. *Katalytické systémy osobních automobilů*. Brno : autor neznámý, 2011.

17. **NETT Technologies Inc. *What Is a Diesel Oxidation Catalyst?* [Online] 2020.**  
<https://www.nettinc.com/information/emissions-faq/what-is-a-diesel-oxidation-catalyst>.
18. **ResearchGate. *www.researchgate.net.* [Online] 2008 - 2020.**  
[https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-three-way-catalytic-converter\\_fig2\\_266590841](https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-three-way-catalytic-converter_fig2_266590841).
19. **Honda Club. [Online] 2011. [http://www.honda-club.cz/forum/cms\\_view\\_article.php?aid=169](http://www.honda-club.cz/forum/cms_view_article.php?aid=169).**
20. **automatizace.hw.cz. *www.automatizace.hw.cz.* [Online] 2014.**  
<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART252-princip-a-pouzitilambda->
21. **Štoss, Milan. *Příslušenství spalovacích motorů. 2. opravené vydání.* Brno : autor neznámý, 1992.**
22. **Štěpánek, Josef. *FILTRY PEVNÝCH ČÁSTIC A ZPŮSOBY JEJICH REGENERACE.* Brno : autor neznámý, 2012.**
23. **Heisler, Heinz. *Advanced Engine Technology.* Oxford : autor neznámý, 2002.**
24. **Joel H. Ferziger, Milovan Peric. *Computational Methods for Fluid Dynamics.* Berlin : autor neznámý, 2002.**
25. **B. Andersson, R. Andersson, L. Hakansson, M. Mortensen, R. Sudiyo and B. Wachem. *Computational fluid dynamics for engineers.* Cambridge : autor neznámý, 2012.**
26. **TRANSFORMAČNÍ TECHNOLOGIE. *VZNIK TLAKOVÉ ZTRÁTY PŘI PROUDĚNÍ.* [Online] 2019. <http://www.transformacni-technologie.cz/38.html>.**
27. **ipotrubi.cz. *MÍSTNÍ TLAKOVÉ ZTRÁTY.* [Online] 5. 2 2015.**  
<https://www.ipotrubi.cz/clanky/6.-hydrodynamicke-a-termodynamicke-vypocty/2.-vypocet-tlakovych-ztrat/3.-mistni-tlakove-ztraty.html>.