



**FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI**

Čištění spalin s důrazem na technologii SCR

Flue gas cleaning with emphasis on SCR technology

disertační práce

Autor práce: Ing. Martin Novák

Školitel práce: Ing. Richard Matas, Ph.D.

Plzeň 2024

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě písemnou práci ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma:

Čištění spalin s důrazem na technologii SCR

vypracoval samostatně pod odborným dohledem školitele a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

.....

Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému školiteli Ing. Richardu Matasovi, Ph.D. za odborné vedení práce a poskytnuté konzultace. Taktéž chci poděkovat Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D. za udělené cenné rady.

Díky patří také Katedře energetických strojů a zařízení, jelikož jsem díky vstřícnému vedení schopen studovat a zároveň pracovat na NTC v odboru MST. V tomto odboru pracují odborníci, kterých si nesmírně vážím, a taktéž jim tímto děkuji za jejich vstřícnou pomoc nejen v profesním životě.

Děkuji své rodině za podporu po celou dobu studia. Nakonec bych velice rád poděkoval své manželce Tereze, která se mnou prožívá všechny strasti, radosti a je mi stále oporou.

ANOTACE DISERTAČNÍ PRÁCE

Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni

ak.rok odevzdání: 2024

AUTOR	<i>Příjmení (včetně titulů)</i> Ing. Novák	<i>Jméno</i> Martin
STUDIJNÍ PROGRAM	P0715D270024	
VEDOUČÍ PRÁCE	<i>Příjmení (včetně titulů)</i> Ing. Matas, Ph.D.	<i>Jméno</i> Richard
PRACOVIŠTĚ VEDOUČÍHO	Nové technologie - výzkumné centrum, ZČU Katedra energetických strojů a zařízení, FST, ZČU	
NÁZEV PRÁCE	Čištění spalin s důrazem na technologii SCR	

Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

Celkem	186	Textová část	173	Grafická část (přílohy)	13
---------------	-----	---------------------	-----	--------------------------------	----

Stručný popis zaměření, téma, cíl poznatky a přínosy	Tato disertační práce se zaměřuje na simulace potrubního systému před SCR katalyzátorem. Práce zkoumá pět základních geometrických úprav systémů, navržených ke zlepšení distribuce spalin vstupujících do katalyzátoru prostřednictvím jednoduchých geometrických úprav. Klíčovým prvkem technologie SCR, který je v této studii zkoumán, je vstřikování AdBlue®. Rozsáhlý výzkum vedl k obecně doporučeným místům vstřikování. Kromě toho se práce krátce dotýká simulací chemických rovnic popisujících katalytickou redukci NO_x . Na závěr disertace se všechny získané poznatky aplikují na reálný systém SCR. Zde dojde k ilustraci potenciálního zlepšení celého systému prostřednictvím navržených geometrických úprav.
Klíčová slova	SCR technologie, numerické simulace, výpočetní mechanika tekutin, CFD, vstřikování DEF, redukce NO_x

SUMMARY OF DISSERTATION WORK

FAKULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA

Submitted: 2024

Author	<i>Surname (including of Degrees)</i> Ing. Novák	<i>Name</i> Martin
Study Programmes	P0715D270024	
Supervisor	<i>Surname (including of Degrees)</i> Ing. Matas, Ph.D.	<i>Name</i> Richard
Instution/ Department	New Technologies - Research Centre, UWB Department of Power System Engineering, UWB	
Title of the Work	Flue gas cleaning with emphasis on SCR technology	

Number of pages

Total	186	Part of Text	173	Attachment	13
--------------	-----	---------------------	-----	-------------------	----

Brief Description of the Theme, Findings and Benefits	This dissertation focuses on the simulation of the piping system preceding the SCR catalyst. The work explores five fundamental geometric modifications of systems designed to enhance the distribution of flue gas entering the catalyst through straightforward geometric adjustments. A key element of SCR technology investigated in this study is AdBlue® injection. Extensive research has led to generally recommended injection locations. Additionally, the thesis briefly touches on simulations of chemical equations describing the catalytic reduction of NOx. In the end of this thesis, all acquired insights are applied to a real SCR system. This illustrates the potential improvement of the entire system through the proposed geometric modifications.
Key Words	SCR technology, numerical simulations, computational fluid dynamics, CFD, DEF injection, Nox reduction

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK.....	11
NOMENKLATURA	13
1 ÚVOD	19
2 MOTIVACE.....	21
2.1 HISTORIE	21
2.2 EMISE A IMISE.....	22
2.3 ODLUČOVÁNÍ TUHÝCH ČÁSTIC	24
2.3.1 Látkové filtry	26
2.3.2 Elektrické filtry	29
2.4 KATALYZÁTORY VÝFUKOVÝCH PLYNŮ.....	31
2.4.1 Nejběžnější geometrická uspořádání	33
2.4.2 Selektivní katalytická redukce	34
3 DOSAVADNÍ VÝZKUMNÁ ČINNOST	39
3.1 VÝZKUMNÁ ČINNOST V OBLASTI EO	39
3.2 VÝZKUMNÁ ČINNOST V OBLASTI LÁTKOVÝCH LITRŮ	42
3.3 VÝZKUMNÁ ČINNOST V OBLASTI OSTATNÍCH ENERGETICKÝCH SYSTÉMŮ.....	45
3.4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	47
4 ÚVOD DO PROUDĚNÍ TEKUTIN S ČÁSTICEMI	48
4.1 ROVNICE MECHANIKY TEKUTIN	48
4.2 PORÉZNÍ ZÓNA	53
4.3 MODELOVÁNÍ DISKRÉTNÍ FÁZE.....	55
4.4 OKRAJOVÉ PODMÍNKY	57
4.5 INDEX JEDNOTVÁRNOSTI A %RMS.....	62
5 SIMULACE CFD	65
5.1 PŮVODNÍ MODEL.....	65
5.2 UVAŽOVANÉ GEOMETRIE.....	68
5.3 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – STUDIE SÍŤ	72
5.4 GEOMETRICKÉ ÚPRAVY	74
5.4.1 Varianta „straight“	74
5.4.2 Varianta „double knee“	80
5.4.3 Varianta „long knee“	90
5.4.4 Varianta „short knee“	97
5.4.5 Varianta „tdm“	100
5.4.6 Varianta „triple knee“	103
5.4.7 Varianta „quadro knee“	105
5.5 VNITŘNÍ VESTAVBY – USMĚRNĚNÍ PROUDU LOPATKAMI	111
5.6 VYBRANÉ VARIANTY	117
5.7 APLIKACE GEOMETRICKÝCH ÚPRAV NA MODEL SYSTÉMU „A“	118
5.8 UVAŽOVANÉ TRYSKY A FRAKCE KAPEK	120
5.9 VYPAŘOVÁNÍ VSTŘIKOVANÝCH KAPEK	123
5.10 VSTŘIKOVACÍ MÍSTA	124
5.11 APLIKACE CHEMICKÝCH ROVNIC DO MODELU	134
5.11.1 Uvažované chemické rovnice.....	135
5.11.2 Experiment provedený na SCR systému „A“	138

5.11.3	CFD výpočty chemických reakcí na submodelu	140
5.11.4	Aplikace chemických reakcí do SCR systému „A“	142
6	ZHODNOCENÍ VÝZKUMU.....	150
6.1	ZÁVĚRY VÝZKUMU.....	150
6.2	PŘÍNOS VÝZKUMU.....	153
6.3	VÝHLED DO BUDOUCNA	153
7	ZÁVĚR.....	155
8	BIBLIOGRAFIE	158
	AUTOROVY PUBLIKACE A AKTIVITY.....	172
	PŘÍLOHA Č. 1	174
	PŘÍLOHA Č. 2	179

Seznam obrázků

Obrázek 1 Popis funkce látkového filtru [9]	28
Obrázek 2 Popis konstrukce elektrického odlučovače [17]	30
Obrázek 3 Ukázka řešených geometrií	34
Obrázek 4 Základní uspořádání SCR systému [41]	35
Obrázek 5 Následky nevhodného návrhu SCR systému, a) je uvedeno v [58], b) je uvedeno v [59]	36
Obrázek 6 Varianta s rovným vstupem do odlučovače (vlevo nahoře), varianta bez vstupního potrubí a rozdělovacího dílu (vpravo nahoře), varianta s pravým vstupem (vlevo dole) a varianta s levým vstupem (vpravo dole)	39
Obrázek 7 Geometrie filtru (vlevo), geometrie rozdělovací stěny s klapkami (vpravo) ...	40
Obrázek 8 Geometrie spalínovodu za Ljungströmem před vstupem do elektrického odlučovače	41
Obrázek 9 Geometrie původního filtru (vlevo), geometrie nového designu (vpravo)	43
Obrázek 10 Proudové pole v původní geometrii (první a třetí řez), geometrie nového designu (druhý a čtvrtý řez)	43
Obrázek 11 a) geometrie původního látkového filtru, b) geometrie filtru varianty B, c) geometrie filtru varianty D	44
Obrázek 12 a) submodel původní varianty vstupního dílu látkového filtru, b) submodel vstupního dílu varianta 2, c) submodel vstupního dílu varianta 3	45
Obrázek 13 Geometrie odsiřovacího zařízení	46
Obrázek 14 Geometrie potrubního systému pro dopravu plynného média	46
Obrázek 15 Rozdělení proudění tekutin podle vlastností tekutiny	48
Obrázek 16 Přehled metod modelování ustáleného proudění [90]	51
Obrázek 17 Chování okrajové podmínky „Wall Jet“	58
Obrázek 18 Chování okrajové podmínky „Wall Film“ [88]	61
Obrázek 19 Mapa režimů stochastického Kuhnkeho modelu [88]	62
Obrázek 20 SCR systém "A"	65
Obrázek 21 Průřez kanálku katalyzátoru	66
Obrázek 22 Fotografie uvažovaného katalyzátoru	67
Obrázek 23 Vnější geometrie katalytické konvertoru	67
Obrázek 24 Uvažované geometrické varianty	69
Obrázek 25 Vyobrazení vyhodnocovací plochy	70
Obrázek 26 Varianty „straight“: nahoře úprava „plain (1.2)“, uprostřed úprava „straight rctf 2 (1.4)“, dole úprava „straight half cone rect cls (1.7)“	75
Obrázek 27 Ilustrativní náčrty různých úhlů kónusu varianty "straight"	76
Obrázek 28 Tlakový spád sady variant s variabilním kónusem	77
Obrázek 29 UI sady variant s variabilním kónusem	78
Obrázek 30 Poměr ploch sady variant s variabilním kónusem	78
Obrázek 31 Ilustrační zobrazení variant "straight lh"	79
Obrázek 32 Ilustrační zobrazení variant „double knee“ s menšími poloměry a průměry potrubí	80

Obrázek 33 Ilustrační zobrazení variant „double knee“ s větším poloměrem a průměrem potrubí	82
Obrázek 34 Varianty "double knee" s vynechanými částmi potrubí	83
Obrázek 35 Doplňující úpravy vstupního potrubí varianty „double knee“	84
Obrázek 36 Úvodní varianty s upraveným tvarem vstupního kónusu typu „double knee“	86
Obrázek 37 Varianty sady „double knee twist“	87
Obrázek 38 Geometrické úpravy kónusu aplikované na varianty se zkráceným vstupním potrubím	88
Obrázek 39 Ilustrační zobrazení variant „double knee lh“	89
Obrázek 40 Ilustrační zobrazení variant „long knee“ s různými poloměry a průměry potrubí	91
Obrázek 41 Úvodní varianty s upraveným tvarem vstupního kónusu typu „long knee“ ..	93
Obrázek 42 Ilustrační zobrazení variant „long knee lh“	94
Obrázek 43 Ilustrační zobrazení variant „long knee lh str“	95
Obrázek 44 Sada varianty „long knee lh krt“	96
Obrázek 45 Varianta „short knee rvrs“ (4.1)	97
Obrázek 46 Varianta „short knee cone“ (4.2)	98
Obrázek 47 Ilustrativní obrázky sady variant „short knee lh“	99
Obrázek 48 Ilustrativní obrázky sady variant „tdm“	100
Obrázek 49 Varianta „tdm cone“ (5.7) a „tdm lh“ (5.8)	101
Obrázek 50 Varianty „tdm tupo bigst“	102
Obrázek 51 Ilustrativní zobrazení variant „triple knee“	103
Obrázek 52 Varianty „triple knee short (6.14)“ a „triple knee short lh (6.16)“	105
Obrázek 53 Varianta „quadro knee“ a sada „quadro knee lh“	106
Obrázek 54 Sada variant „quadro knee 3Dv1“	107
Obrázek 55 Ilustrativní zobrazení variant „quadro knee 3Dv2“ a „3Dv3“	108
Obrázek 56 Varianta „quadro knee short“ a „quadro knee short lh“	110
Obrázek 57 Zobrazení umístění lopatek ve variantách „mix“	112
Obrázek 58 Tlakový spád variant „double knee cone“ s různými natočeními lopatek ..	113
Obrázek 59 Poměr ploch variant „double knee cone“ s různými natočeními lopatek...	113
Obrázek 60 UI variant „double knee cone“ s různými natočeními lopatek.....	114
Obrázek 61 Tlakový spád variant „double knee cone“ s vestavbami natočenými vlevo a vpravo	115
Obrázek 62 Poměr ploch variant „double knee cone“ s vestavbami natočenými vlevo a vpravo	115
Obrázek 63 UI variant „double knee cone“ s vestavbami natočenými vlevo a vpravo ..	116
Obrázek 64 Vybrané varianty	117
Obrázek 65 Geometrické modifikace systému „A“	119
Obrázek 66 Fotografie trysky	121
Obrázek 67 Obraz z měření trysky	121
Obrázek 68 Geometrie submodelu pro ověření funkčnosti vypařování.....	123
Obrázek 69 Porovnání experimentu a výpočtů.....	124
Obrázek 70 Ilustrace logiky tvorby vstřikovacích poloh.....	125

Obrázek 71 Vstřikovací místa varianty "double knee lh"	126
Obrázek 72 Místa vstřiku a jejich směry nevhodných variant „double knee lh“	130
Obrázek 73 Vstřikovací místa ostatních počítaných variant	130
Obrázek 74 Doporučená místa vstřiku u varianty "short knee lh"	131
Obrázek 75 Doporučená místa vstřiku u varianty „long knee lh“	132
Obrázek 76 Vhodná (vlevo) a nevhodná (vpravo) místa vstřiku varianty „quadro knee short lh“	133
Obrázek 77 Schéma vytváření reakčního mechanismu [113]	138
Obrázek 78 Výsledky měření NO_x za katalyzátorem	140
Obrázek 79 Submodel chemických reakcí	141
Obrázek 80 Model SCR systému „A“ a vyhodnocovací plochy	143
Obrázek 81 Probíhající chemické reakce varianty 1 dle rovnice (5-2) [$kmol/(m^3 \cdot s)$]	146
Obrázek 82 Probíhající chemické reakce varianty 1 dle rovnice (5-3) [$kmol/(m^3 \cdot s)$]	146
Obrázek 83 Probíhající chemické reakce varianty 1 dle rovnice (5-4) [$kmol/(m^3 \cdot s)$]	147
Obrázek 84 Umístění vstřiku v modelu „A“ v4	147

Seznam tabulek

Tabulka 1 Typ částice, jejich vlastnosti a používané zákony [88]	59
Tabulka 2 Výsledky základních variant	72
Tabulka 3 Výsledky výpočtů pro citlivostní analýzu	73
Tabulka 4 Bodové hodnocení jednotlivých variant	73
Tabulka 5 Velikost výpočetní sítě vybraných variant	74
Tabulka 6 Výsledky rozšiřujících úprav varianty "straight"	76
Tabulka 7 Výsledky úprav "straight lh"	79
Tabulka 8 Výsledky variant „double knee“ s menšími poloměry a průměry potrubí	81
Tabulka 9 Výsledky variant „double knee“ s větším poloměrem a průměrem potrubí ...	82
Tabulka 10 Výsledky variant "double knee" s vynechanými částmi potrubí	83
Tabulka 11 Výsledky doplňujících úprav vstupního potrubí varianty „double knee“	85
Tabulka 12 Výsledky variant s upraveným tvarem vstupního kónusu typu „double knee“	86
Tabulka 13 Výsledky variant sady „double knee twist“	87
Tabulka 14 Výsledky geometrických úprav kónusu aplikované na varianty se zkráceným vstupním potrubím	88
Tabulka 15 Výsledky variant „double knee lh“	90
Tabulka 16 Výsledky variant „long knee“ s různými poloměry a průměry potrubí	92
Tabulka 17 Výsledky variant s upraveným tvarem vstupního kónusu typu „long knee“ .	93
Tabulka 18 Výsledky variant typu „long knee lh“	94
Tabulka 19 Výsledky variant „long knee str“	95
Tabulka 20 Výsledky sady variant „long knee krt“	96
Tabulka 21 Výsledky varianty „short knee rvrs“	97
Tabulka 22 Výsledky varianty „short knee cone“	98
Tabulka 23 Výsledky variant „short knee lh“	99
Tabulka 24 Výsledky sady variant „tdm“	101
Tabulka 25 Výsledky varianty „tdm cone (5.7)“ a „tdm lh (5.8)“	102
Tabulka 26 Výsledky variant „tdm tupo bigst“	102
Tabulka 27 Výsledky variant „triple knee“	104
Tabulka 28 Výsledky variant „triple knee short“ a „triple knee short lh“	105
Tabulka 29 Výsledky varianty „quadro knee“ a sady „quadro knee lh“	107
Tabulka 30 Výsledky variant „quadro knee 3Dv1“	108
Tabulka 31 Výsledky variant „quadro knee 3Dv2“ a „3Dv3“	109
Tabulka 32 Výsledky varianty „quadro knee short“ a „quadro knee short lh“	110
Tabulka 33 Výsledky variant s více koleny	111
Tabulka 34 Výsledky základních a vybraných variant	118
Tabulka 35 Výsledky geometrických modifikací systému „A“	120
Tabulka 36 Experimentální data vstříkovaných kapiček	122
Tabulka 37 Výsledky varianty „double knee lh v01“ se vstříkovaním AdBlue®	128
Tabulka 38 Měření před a za katalyzátorem	139
Tabulka 39 Zastoupení jednotlivých chemických sloučenin v submodelu	141

Tabulka 40 Hodnoty zadané do výpočtů submodelu.....	142
Tabulka 41 Zastoupení jednotlivých chemických sloučenin v systému „A“	144
Tabulka 42 Hodnoty zadané do výpočtů systému „A“	145
Tabulka 43 Hodnoty výsledků proudění případové studie systému „A“	148
Tabulka 44 Hodnoty výsledků chemie případové studie systému „A“	148

Nomenklatura

Seznam chemických prvků

CO	oxid uhelnatý
CO_2	oxid uhličitý
H_2	vodík
HC	uhlovodíky
H_2O	voda
NH_3	amoniak, čpavek
NO	oxid dusnatý
NO_x	oxidy dusíku
NO_2	oxid dusičitý
N_2O	oxid dusný
N_2	dusík
O_2	kyslík
$(NH_2)_2CO$	AdBlue® ($CO(NH_2)_2$)
$NHCO$	kyselina isokyanatá ($CONH$)

Seznam zkratek

AW	Area Weighted (vážené plochou)
AWA	Area Weighted Average (průměr vážený plochou)
$ČR$	Česká republika
DNS	Direct Numerical Simulation (Přímá numerická simulace)
DEF	Diesel Exhaust Fluid (AdBlue®)
DPM	Discrete Phase Model (Model diskrétní fáze)
EO	elektrický odlučovač
LES	Large Eddy Simulation (Simulace velkých vírů)
MYV	Mean Y Velocity (střední rychlost ve směru Y)
MZV	Mean Z Velocity (střední rychlost ve směru Z)

<i>MW</i>	Mass Weighted (vážené hmotnostním tokem)
<i>MWA</i>	Mass Weighted Average (průměr vážený hmotnostním tokem)
<i>RANS</i>	Reynolds-Averaged Navier–Stokes equations (Reynoldsovo středování Navier-Stokesových rovnic)
<i>Re</i>	Reynoldsovo číslo
<i>RMS</i>	Root Mean Square (střední kvadratická hodnota)
<i>SCR</i>	Selective Catalytic Reduction (selektivní katalytická redukce)
<i>SST</i>	Shear Stress Transport (Přenos smykového napětí)
<i>UI</i>	Uniformity Index (index jednotvárnosti)
<i>VM</i>	Velocity Magnitude (velikost rychlosti)

Seznam veličin

<i>A</i>	velikost sledované plochy [m^2]
<i>A_c</i>	celková plocha [m^2]
<i>A_{flow}</i>	plocha kterou proudí médium daným směrem [m^2]
<i>A_i</i>	velikost plochy buňky [m^2]
<i>A_p</i>	plocha kapky [m^2]
<i>A_r</i>	pre-exponenciální faktor [<i>konzistentní jednotka</i>]
<i>C_{2,ij}</i>	ztrátový koeficient jednotkové délky [–]
<i>C_d</i>	odporový součinitel částice [–]
<i>C_{ij}</i>	předepsaná matice vycházející ze setrvačných ztrát [–]
<i>C_s</i>	koncentrace na povrchu kapky [$kmol/m^3$]
<i>C_ω</i>	rotační odporový součinitel [–]
<i>C_∞</i>	koncentrace v objemu kapky [$kmol/m^3$]
<i>D_{ij}</i>	předepsaná matice vycházející z Darcyho zákona pro porézní média [$1/m$]
<i>D_ω</i>	příčná difuze [$kg/(m^3 \cdot s^2)$]
<i>E_f</i>	měrná energie tekutého média [J/kg]
<i>E_r</i>	aktivační energie reakce [$J/kmol$]
<i>E_s</i>	měrná energie pevného média [J/kg]

F	síla [N]
G_b	vznik turbulentní kinetické energie v důsledku vztlaku [W/m^3]
G_k	vznik turbulentní kinetické energie v důsledku střední rychlosti [W/m^3]
G_ω	vznik specifické míry disipace [$kg/(m^3 \cdot s^2)$]
$G_{\omega b}$	vznik specifické míry disipace v důsledku vztlaku [$kg/(m^3 \cdot s^2)$]
H	výška vrstvy [m]
I	jednotkový vektor [-]
I_p	moment setrvačnosti částice [$kg \cdot m^2$]
J	difúzní tok [$kg/(m^2 \cdot s)$]
M	kroutící moment [Nm]
M_w	molární hmotnost [kg/mol]
P	konstanta [-]
R	univerzální plynová konstanta [$J/(K \cdot mol)$]
Re	Reynoldsovo číslo [-]
R_g	specifická plynová konstanta [$J/(kg \cdot K)$]
S_f^h	zdrojový člen entalpie tekutiny [W/m^3]
S_h	tepelný zdroj [W/m^3]
S_i	zdrojový člen pro souřadnici x (y, z) v rovnici zachování hybnosti [N]
S_k	zdroj turbulentní kinetické energie definovaný uživatelem [W/m^3]
S_m	zdroj hmoty [$kg/(s \cdot m^3)$]
S_ω	zdroj specifické míry disipace definovaný uživatelem [$kg/(m^3 \cdot s^2)$]
T	termodynamická teplota [K]
T_p	teplota částice [K]
T_∞	teplota proudícího média [K]
Y_j	hmotnostní podíl zdroje j [-]
Y_k	disipace turbulentní kinetické energie v důsledku turbulence [W/m^3]
Y_ω	disipace specifické míry disipace v důsledku turbulence [$kg/(m^3 \cdot s^2)$]
c_p	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku (kapky) [$J/(kg \cdot K)$]

c_v	měrná tepelná kapacita za konstantního objemu [$J/(kg \cdot K)$]
d_p	průměr částice [m]
e	vnitřní energie [J/kg]
g	gravitační zrychlení [m/s^2]
h	měrná entalpie [J/kg]
h_{vap}	měrné latentní výparné teplo [J/kg]
k	turbulentní kinetická energie [J/kg]
k_c	koeficient přenosu hmoty [m/s]
k_{eff}	efektivní součinitel tepelné vodivosti [$W/(m \cdot K)$]
k_f	součinitel tepelné vodivosti tekutého média [$W/(m \cdot K)$]
$k_{f,r}$	rychlost reakce [$mol/(m^3 \cdot s)$]
k_s	součinitel tepelné vodivosti pevného média [$W/(m \cdot K)$]
m	hmotnost [kg]
m_p	hmotnost částice [kg]
p	tlak [Pa]
p_{op}	operační tlak [Pa]
p_{abs}	absolutní tlak [Pa]
r	specifická plynová konstanta [$J/(kg \cdot K)$]
t	čas [s]
v	rychlost [m/s]
v_p	rychlost částice [m/s]
v_f	rychlost tekutiny [m/s]
v_{mean}	střední rychlost [m/s]
v_{tang}	tangenciální rychlost [m/s]
x	souřadnice [m]
Γ_k	efektivní difuzivita turbulentní kinetické energie [$kg/(m \cdot s)$]
Γ_ω	efektivní difuzivita specifické míry disipace [$kg/(m \cdot s)$]
Θ_R	radiační teplota [K]

ϕ	vstupní úhel kapky [-]
ϕ_a	průměrná hodnota proměnné vážená plochou [-]
ϕ_i	hodnota proměnné v daném místě [-]
ϕ_m	průměrná hodnota proměnné vážená průtokem [-]
Ψ	odrazový úhel kapky [-]
Ω	relativní úhlová rychlost mezi částicí a tekutinou [1/s]
α	permeabilita [m]
α_p	součinitel přestupu tepla [W/(m ² K)]
β	konstanta [-]
β_r	teplotní exponent [-]
γ	porozita porézního média [-]
γ_a	UI vážený plochou [-]
γ_m	UI vážený průtokem [-]
δ_{ij}	Kroneckerovo delta . [-]
ε_p	emisivita částice [-]
μ	dynamická viskozita [Pa · s]
π	Ludolfovo číslo [-]
ρ_f	hustota tekutiny [kg/m ³]
ρ_p	hustota částice [kg/m ³]
ρ_s	hustota pevného média [kg/m ³]
σ	Stefan-Boltzmanova konstanta [W/(m ² K ⁴)]
τ	tenzor napětí [Pa]
τ^R	tenzor Reynoldsova napětí [Pa]
τ_r	charakteristický čas [s]
ω	specifická míra disipace [1/s]
ω_p	úhlová rychlost částice [1/s]

$\%RMS$ střední kvadratická hodnota [%]

Indexy a modifikátory

i, j	kartézský koordinační index
k	sčítací index
$\bar{\chi}$	střední hodnota při konvenčním středování
χ'	fluktuační při konvenčním středování
$\vec{\chi}$	vektor

1 Úvod

V dnešní době, kdy se globální diskuse zaměřuje na udržitelnost a ekologickou zodpovědnost, je otázka čištění spalin klíčovým prvkem ve snaze minimalizovat negativní dopady průmyslových a energetických procesů na životní prostředí. Spalovací procesy, nezbytné pro naši energetickou potřebu, jsou významnými zdroji emisí škodlivých látek, jako jsou oxidy dusíku (NO_x), oxidy síry (SO_x), uhlovodíky C_xH_y anebo částice.

Čištění spalin představuje nejen technologickou výzvu, ale také morální imperativ, který vyžaduje nalezení efektivních a udržitelných řešení pro omezení emisí a zachování kvality ovzduší. Tato problematika spojuje odvětví průmyslu, energetiky a výzkumu, a vyžaduje multidisciplinární přístup k nalezení optimálních technologií, které budou respektovat potřeby současné společnosti, aniž by ohrožovaly budoucí generace.

V rámci této problematiky bude část práce věnována různým typům filtrů, které jsou klíčovými průmyslovými nástroji pro čištění spalin. Látkové filtry, schopné zachytávat pevné částice a drobné částice, budou zkoumány pro svůj přínos v redukci emisí. Elektrické filtry, založené na principu elektrického zachycení částic, jsou běžně používanou technologií, která je potřeba stále vylepšovat pro svou univerzálnost a schopnost velkoobjemového čištění spalin.

Následně bude práce zaměřena na konkrétní technologii čištění spalin, a to selektivní katalytickou redukcí (SCR). Tato technologie se stala klíčovým nástrojem v redukci oxidů dusíku (NO_x), a práce bude směřovat k hlubšímu pochopení jejího fungování, zlepšení a integraci do komplexního systému čištění spalin. Tato práce si klade za cíl nalézt vyvážený a efektivní přístup k redukci emisí, který zároveň bude spočívat v ekologicky a energeticky efektivním řešení.

V následující kapitole bude čtenář uveden do problematiky znečištění ovzduší, jež se ukazuje jako stále větší a větší problém, kterému lidstvo čelí. S tím je však potřeba něco dělat a filtrační technologie jsou stále aktuálním tématem, jelikož je snaha o bezemisní technologie. Kapitola shrne zákon týkající se dovolených emisí a uvede základní teoretické znalosti o látkových filtrech a elektrických odlučovačích. Dále se stručně uvede i SCR technologie, jež je hlavním řešeným tématem této práce.

Třetí kapitola se bude věnovat dosavadnímu výzkumu, který se týká řešeným tématům v této práci. Okrajově zde bude uvedený výzkum v oblasti látkových filtrů, které začínají být stále více aplikované v energetických celcích z důvodu nižších emisí. Dále zde bude uvedena problematika elektrických odlučovačů, jež jsou aktuálně nejpoužívanějšími odlučovacími zařízeními pro velké objemové průtoky spalin, kde by množství částic nepříznivě ovlivňovalo funkci látkových filtrů. Látkové filtry jsou nyní občas přidávány za elektrické odlučovače, jelikož se aktuálně naráží na fyzikální limity těchto filtrů, a i přesto je snaha snížit emise. Další uvedený výzkum se zabývá SCR technologií. V závěru kapitoly bude uveden výzkumný záměr.

Ve čtvrté kapitole budou přiblíženy základní rovnice používané při modelování numerických simulací. Tyto matematické vzorce jsou všeobecně známé a slouží k prezentaci zejména v oblasti výpočtů CFD (z anglického Computational Fluid Dynamics, česky Výpočtová mechanika tekutin) a k vysvětlení základů těchto metod. Tato kapitola taktéž uvede použitý turbulentní model a další modely aplikované ve výpočetním programu ANSYS Fluent. Tyto modely budou následně aplikované ve výpočtech. V této kapitole bude zároveň uvedena literatura a další zdroje, které mohou čtenáři pomoci s hlubším pochopením popisované problematiky.

Pátá kapitola se již bude zabývat samotným výzkumem, což je hlavní část disertační práce. V této kapitole budou uvedeny uvažované geometrické modely, jež jsou běžně používané v SCR technologiích. Výzkum se bude zabývat návrhem geometrické modifikace potrubního systému pro maximalizaci zrovnoměnění proudu na vstupu do katalytické vložky. Výsledky z těchto simulací budou vzájemně porovnány a na konci této části dojde k vyhodnocení nevhodnějších variant při daných zkoumaných geometriích. V této kapitole bude snaha aplikovat i vnitřní vestavby, jež by mohly být obecně doporučeny pro aplikaci v daných geometriích. Následně se výzkum bude zabývat vstřikováním AdBlue®, odparem této fáze. Následně se uvede aplikace chemických rovnic pro SCR do zkoumaného modelu. Závěr kapitoly se bude věnovat aplikaci všech předešlých modelů do jednoho jediného. To by mělo ověřit, zda takto komplexní simulace bude možné provádět ve velké škále případů.

Následující kapitola shrnuje závěry z provedených výpočtů. Tato kapitola bude obsahovat závěry z uvedených simulací a obecně doporučitelné závěry týkající se geometrických modifikací, vstřikovacích míst při použití jednoho vstřiku a proběhne i diskuze nad aplikovatelností komplexních simulací (obsahující předešlé použité modely) při tvorbě velkého množství modifikací, jež se běžně provádí během CFD výzkumu.

Sedmá kapitola nastíní další potenciální kroky výzkumu. Jelikož technologie na redukcí emisí jsou stále aktuální, a ještě nějaký čas budou, bude v této kapitole prezentován další možný postup ve výzkumu, který může navázat na uvedenou studii. Tato kapitola bude sloužit jako základ pro pokračování výzkumu přímo navazující na tuto práci, či potenciální základ pro další výzkumníky věnující se této oblasti, jež nemusí být nezbytně přímo navazující.

Závěr bude obsahovat zhrnutí výsledků a závěrů práce. Dále zde bude uvedeno, zda se dosáhlo vytyčených cílů v plném rozsahu. Tato kapitola bude uzavírat celou disertační práci.

2 Motivace

V souvislosti s narůstajícími environmentálními výzvami a potřebou ochrany ovzduší nabývá otázka čištění spalin stále zásadnějšího významu. Průmyslové a energetické odvětví, přestože jsou poháněna potřebou energetického rozvoje, nesou zodpovědnost za emise škodlivých látek do atmosféry. Právě zde se otvírá možnost implementace efektivních technologií, které minimalizují negativní dopady těchto emisí na životní prostředí. Tato disertační práce se věnuje problematice čištění spalin, s důrazem na selektivní katalytickou redukci (SCR). Skrze systematický přístup k SCR technologii je snaha přinést inovativní řešení, která nejenže zvýší efektivitu tohoto procesu v rámci redukce oxidů dusíku, ale také posílí širší úsilí o udržitelný a čistý energetický sektor.

2.1 Historie

„Organický život na zeměkouli potřebuje pro svou existenci a další vývoj ovzduší a jeho nepostradatelnou složkou je kyslík. Ovzduší je jednou ze základních složek biosféry, tj. prostředí existence živých organismů na planetě, bez níž by život v dnešní podobě nemohl vůbec existovat. Čisté a zdravé ovzduší je proto jedním z hlavních činitelů, bez něhož si nelze představit vyhovující životní prostředí.“ [1] Znečišťování ovzduší není pouze doménou lidského působení, jelikož různé přírodní jevy, jakožto sopečná činnost, elektrické výboje za bouří, lesní požáry atd., jsou a byly zdrojem tuhých i plyných emisí od počátku existence života na Zemi. Vzhledem k dříve napsanému lze říct, že bezvadně čisté ovzduší na naší planetě ani nikdy nepanovalo. [1]

Rozvoj techniky vedl k výraznějšímu znečišťování ovzduší a lidé začali vnímat negativní účinky na zdraví. Bylo to zejména v době, kdy se ve větší míře začalo používat k topení uhlí místo dřeva. Veřejnost začala věnovat zvýšenou pozornost těmto vlivům až při prvních tragických událostech, které byly způsobeny silným smogovým znečištěním. [1] To je důvod, proč je nezbytné se zabývat nejen složením vzduchu, ale zároveň i ostatními složkami, které se v něm vyskytují. Následující text se zabývá kvalitou ovzduší, načež se rozvíjí hlavní myšlenka filtračních zařízení používaných v energetických celcích, které mají nepříznivou kvalitu ovzduší zlepšit, případně zcela zabránit zhoršování ovzduší.

Jednotlivé plyné složky vzduchu nejsou vzhledem k neustálým změnám v ovzduší stálé, avšak obsahy hlavních složek lze stanovit poměrně přesně (dusík, kyslík a vzácné plyny). Ostatní složky se zúčastňují různých chemických reakcí, a navíc jejich obsah kolísá v závislosti na místu a nejen ročním, ale i denním období. Kromě plyných složek jsou ve vzduchu obsaženy i různé kapalné a tuhé složky ve formě aerosolů. Ty jsou tvořeny mikroskopickými částicemi hmoty rozptýlenými v plyném prostředí. Kapalné složky se mohou v ovzduší vyskytovat ve formě mlhy a mraků, které jsou tvořeny malými kapičkami vody. Existují i aerosoly, jejichž koncentrace se pohybuje od jednotek nanogramů až po desítky miligramů. Tyto aerosoly mohou vznikat působením vulkanických erupcí, lesních požárů, nad moři, biologickými aktivitami atd. [1]

„Čistý vzduch, neobsahující žádný prach ani plynné znečišťující látky, je tedy ideálním pojmem a v přírodě se prakticky nevyskytuje. Je tomu tak proto, že mezi ovzduším, hydrosférou, zemským povrchem, biosférou apod. dochází ke stálým dynamickým změnám, jež složení vzduchu významně ovlivňují.“ [1] Je zřejmé, že nelze mít dokonale čistý vzduch, jelikož znečištění je jeho přirozenou součástí, a v němž se všechny živé organismy vyvíjely od počátku.

Znečišťování ovzduší obecně zahrnuje celou škálu činností, během něž vnášíme látky nebo energie do atmosféry. Znečištění neznamená jen vnášení hmotných látek do ovzduší, ale znečistit ovzduší lze i hlukem, teplem či elektromagnetickým zářením. [1]

„V užším slova smyslu znečišťováním ovzduší rozumíme vypouštění hmotných látek v tuhém, kapalném nebo plynném skupenství ze zdrojů do ovzduší, které buď přímo nebo po chemických změnách v atmosféře, nebo ve spolupůsobení s jinou látkou, negativně ovlivňují kvalitu a složení venkovního ovzduší a mají za následek nepříznivé účinky na lidi, živou a neživou přírodu, ekosystém, hmotný majetek, zdroje surovin a využívání životního prostředí.“ [1] Ačkoliv je znečišťování částečně přirozený jev, tak není nezbytné, aby k tomu lidé ve velké míře přispívali, proto je nutné řešit chování společnosti. Vypouštění hmotných látek je stále aktuální téma, jelikož nejen v ČR je mnoho aktivních provozů, jež tyto látky vypouštějí do ovzduší. Bez omezení vypouštěných látek by ovzduší bylo brzy natolik znečištěné, že by většina populace měla značné zdravotní potíže. Proto je potřeba řešit zdroje znečištění a jejich redukci.

Pojem znečištění ovzduší je něco jiného než znečišťování ovzduší. Znečišťování označuje děj, tedy nějaký proces, vypouštění (emisi) znečišťujících látek do atmosféry. Zatímco znečištění ovzduší označuje stav, v jakém se atmosféra (ovzduší) nachází, což je vlastně důsledkem nějaké činnosti či děje. Znečištění poukazuje na obsah (imisi), či přítomnost, znečišťujících látek v ovzduší v takové koncentraci, kdy dochází k neblahému ovlivňování prostředí. [1]

2.2 Emise a imise

Pojem emise znamená vstup látky, či látek, do atmosféry. Atmosféra slouží jako prostředek přenosu těchto látek od zdroje do přízemní vrstvy atmosféry, kde mají negativní vliv nejen na životní prostředí, ale i na zdraví živočichů. V průběhu transportu (transmise) znečišťujících látek atmosférou, může docházet k interakcím jednotlivých složek mezi sebou při vhodných podmínkách, nebo k interakci se samotnou atmosférou. Množství znečišťujících látek v přízemní vrstvě atmosféry je nazýváno jako imise. [1] Zjednodušeně lze napsat následující:

$$emise \rightarrow transmise \rightarrow imise$$

Je tedy zřejmé, že aby se snížilo množství znečišťujících látek v ovzduší čili došlo ke snížení imisí, je potřeba snížit emise. Tento „boj“ o snižování emisí je nazýván ochranou ovzduší. „Ochranou ovzduší se rozumí předcházení znečišťování ovzduší a snižování úrovně znečišťování tak, aby byla omezena rizika pro lidské zdraví způsobená znečištěním

ovzduší, snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a poškozujícími ekosystémy a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší.“ [2] O hodnocení a řízení kvality ovzduší pojednává v ČR zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů.

Druhů emisí, které se mohou vyskytovat, je několik. Jsou uvedené v zákoně č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů a dále se o nich mluví ve vyhlášce 415/2012 Sb. Je potřeba zajistit požadované hodnoty rychlosti proudění a objemového toku odpadního plynu, dále vlhkost odpadního plynu, koncentraci kyslíku, hmotnostní koncentraci plyných znečišťujících látek (oxid siřičitý, oxidy dusíku, oxid uhelnatý), hmotnostní koncentrace organických látek, koncentrace tuhých znečišťujících látek a koncentrace pachových látek. Dále se odebírají vzorky pro stanovení množství těžkých kovů, persistentních organických látek a těkavých anorganických sloučenin chlóru. [3]

Kritériem při hodnocení znečišťování ovzduší je druh znečišťující látky, které se rozlišují podle skupenství, účinku nebo míry škodlivosti z hlediska příjemců, anebo podle chemického složení. Pokud se zaměříme pouze na rozlišení podle skupenství, členíme je na tuhé, kapalně a plynné. [1]

Tuhé a kapalně látky se společně běžně označují jako „částeczkové“, jelikož k jejich zachycování jsou většinou použity fyzikální principy, jež jsou založené na tom, že měrná hmotnost těchto znečišťujících látek je o několik řádů větší než měrná hmotnost plynu. [1]

Velikost tuhých a kapalných částic látek znečišťující ovzduší má značné velikostní rozpětí od makromolekulárních částic až po viditelná zrnka. Složení částic je různorodé a obsahuje celou řadu jak anorganických, tak i organických látek. Částice mohou být jak neživého charakteru (prach, mořské soli, částice popela z požárů atd.), tak i částice živého původu (pyl rostlin, viry atd.). Důležitý parametr tuhých látek je velikost těchto částic, jelikož se jedná o základní údaj pro určení granulometrického složení prachu. [1]

Vliv znečišťujících částic na lidské zdraví je závislý hlavně na velikosti částic. Částice větší než $100\ \mu\text{m}$ se poměrně rychle usazují, proto mají relativně malý přímý zdravotní význam. Jemnější částice se mohou slučovat a vzhledem ke značnému povrchu může docházet k reakcím, čímž se mohou stát značně jedovaté pro lidi, zvířata i rostliny. Zda k tomuto jevu bude docházet, závisí na chemické podstatě jednotlivých částic. Částice větší než $5\ \mu\text{m}$ jsou při vdechování usazeny v dýchacích cestách. Částice menší než $0,01\ \mu\text{m}$ jsou natolik malé, že se začínají chovat jako molekuly plynu a jsou z velké části vydechovány. Problémové částice jsou tedy v rozmezí přibližně od $5\ \mu\text{m}$ do $0,01\ \mu\text{m}$, tyto částice pronikají průduškami do plicních sklípků, kde jsou až z 90 % zachycovány. [1]

Přípustné úrovně jednotlivých znečišťujících látek jsou určeny legislativou, jež upravuje emisní i imisní látky. Jednotlivé emisní limity lze nalézt v [4], imisní limity jsou uvedeny v [5]. Tyto limity jsou taktéž uvedeny v zákoně č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů [6], ale i ve 415/2012 Sb [3]

Emisní limity jsou maximální přípustné hodnoty znečišťující látky, které zdroje znečištění vypouštějí do ovzduší. Aktuálně specifické limity jsou uvedeny v příloze č. 1. Obvykle jsou emisní limity vyjádřeny jednou z těchto uvedených možností:

„hmotnostní koncentrace znečišťující látky v odpadních plynech“ [1]

„hmotnostní tok znečišťující látky za jednotku času“ [1]

„hmotnostní množství znečišťující látky vztažené na jednotku produkce“ [1]

„stupeň znečišťování ovzduší tímto zdrojem způsobený (tmavost kouře)“ [1]

Imisní limity jsou maximální přípustné hmotnostní koncentrace znečišťujících látek obsažených v ovzduší. Jednotlivé znečišťující látky mají rozdílné imisní limity, které jsou ovlivněny škodlivostí těchto látek z hygienických hledisek a jejich dopady na lidské zdraví. [1]

Zákon o ovzduší rozděluje zdroje znečišťujících látek vypouštěných do ovzduší na stacionární a pohyblivé, tzv. mobilní zdroje. S ohledem na toto rozdělení lze zdroje znečištění popsat takto:

„technologické objekty obsahující stacionární zařízení ke spalování paliv, zařízení technologických procesů, uhelné lomy a jiné plochy s možností zapaření, hoření nebo úletu znečišťujících látek nebo plochy, na kterých jsou prováděny práce, které mohou způsobovat znečišťování ovzduší, sklady a skládky paliv, surovin, produktů a odpadů“ [1]

„pohyblivá zařízení se spalovacími i jinými motory znečišťující ovzduší, zejména silniční motorová vozidla, železniční kolejová vozidla, plavidla a letadla (tzv. mobilní zdroje znečišťování)“ [1]

2.3 Odlučování tuhých částic

Odlučování tuhých částic lze rozdělit do tří základních kategorií. První kategorií je odlučování znečišťujících částic z průmyslových plynů, které vznikají např. při spalovacích procesech. Odlučování je zde jako ochrana ovzduší před emisemi. Druhou kategorií tvoří odsávací odlučovací zařízení u zdrojů prašnosti. Účelem těchto zařízení je hlavně ochrana pracovního prostředí. Třetí kategorií jsou filtrační zařízení, jež odlučují tuhé částice z atmosféry, čehož se využívá ve větrací a klimatizační technice. [7]

Dvě z nejdůležitějších veličin charakterizující částice je jejich velikost a tvar. Tyto parametry rozhodují o možnostech odlučování z plynného prostředí. V mechanických a elektrických odlučovacích rozhoduje velikost a tvar o odlučovacích rychlostech, a tedy i konečném odloučení. Kupříkladu u elektrických odlučovačů závisí rozměr částice na velikosti elektrického náboje, který je hlavním činitelem odlučovacího procesu. Měření koncentrace a zrnitost částic je taktéž závislá na rozměrech znečišťujících částic. [7]

Lepivost je poměrně důležitá „vlastnost“, která vlastností není, jelikož tento pojem není jednoznačně fyzikálně definován. Lepivost prachu se běžně používá a je v podstatě

souborem jevů, jež ovlivňují soudržnost shluků částic, a taktéž ulpívání částic na površích. Lepivostí prachů se většinou rozumí ulpívání částic na stěnách, z čehož pramení problematické zanášení odlučovačů. Původ lepidlosti je v adhezi částic, jež je způsobená adhezními silami. [7]

Základním principem všech odlučovacích procesů tuhých a kapalných částic je oddělování částic z plynu na odlučovací plochu. Tuhé částice mohou být odlučovány buďto přímo na stěnu odlučovače (např. vírové nebo gravitační odlučovače), anebo odlučovací plochou může být vhodná vestavba (např. rotační nebo elektrické odlučovače). V některých případech se částice odlučují již na vrstvu odloučených částic (filtrační koláč u látkových filtrů). Odlučovací plochy mohou být i kapalně částice, pokud se jedná o mokré odlučovače. [7]

„Charakter síly, která se v daném případě podílí na separaci částic, určuje odlučovací princip.“ [7] Působení gravitační síly dává za vznik gravitačnímu principu, setrvačný princip využívá setrvačnosti částic. Při proudění ve válcových nádobách se využívá odstředivý princip, jelikož je proudění plynu vedeno tangenciálně, čímž rotuje a na částice působí odstředivé síly. Nabíjení částic elektrickými silami zapřičiňuje elektrický princip. U některých filtrů působí více těchto principů najednou. Pokud některý z principů ve filtru převládá, využije se tohoto názvosloví a filtr získá název po daném fyzikálním principu (gravitační filtr, elektrický filtr). [7]

Odlučovací princip charakterizuje nejdůležitější část odlučování – separaci částic. Například u elektrických odlučovačů se očekávají vhodné elektrické vlastnosti nabíjených částic. Zajištění správné separace částic z plynné složky však neznamena správnou funkci celého zařízení. Druhou důležitou částí odlučování je odstranění odloučených částic ze zachytných ploch, což se děje buď kontinuálně, nebo v časových intervalech, které nemusí být nezbytně vždy stejně dlouhé. Tomuto procesu odstraňování usazených částic se říká „regenerace“. Odstraňování usazených částic je značně ovlivněno vlastnostmi částic (adheze, úhel skluzu). Další nedílnou součástí suchých odlučovačů je přesun odprašků (odloučené částice, které se odstranily z usazovacích ploch) do zásobníků (výsypek). Výsypky se poté vyprazdňují pomocí šnekových dopravníků a odprašky se následně likvidují. Pro správnou funkci filtračních zařízení je potřeba splnit značné množství požadavků. Nejdůležitější však je separace částic na odlučovací plochy. Další kroky odlučování mohou výsledný efekt při špatném zajištění těchto kroků pouze zhoršit. [7]

Kategorie průmyslových separačních technologií zahrnuje různé zařízení a metody, které se používají k separaci a čištění různých látek v průmyslových procesech. Tyto technologie jsou klíčovými prvky v mnoha průmyslových odvětvích, od potravinářství a farmacie po chemický průmysl, výrobu energie a environmentalistiku. Hlavním cílem průmyslových separačních technologií je separace a čištění různých látek z průmyslové výroby. To může zahrnovat oddělení pevných částic od kapalných nebo plyných médií, oddělení různých složek směsí nebo čištění průmyslových emisí, aby byly splněny environmentální normy. Typy technologií [7]:

- Filtrace: Filtrace zahrnuje použití různých druhů filtrů (jako jsou textilní filtry, membránové filtry, sací filtry) k zachycení pevných částic nebo kontaminantů z média.
- Separace kapalin: Tyto technologie zahrnují destilaci, extrakci, sedimentaci a centrifugaci k oddělení kapalin nebo složek kapaliny.
- Elektrické odlučování: Elektrické odlučovače využívají elektrostatické síly k odstranění pevných částic nebo aerosolů z průmyslových proudů.
- Destilace: Destilace se používá k oddělení různých složek směsí na základě jejich odlišných bodů varu.
- Extrakce: Extrakce se používá k oddělení látek z jednoho rozpouštědla do druhého na základě jejich rozpustnosti.
- Absorpce: Absorpce je proces, při kterém se plynné látky nebo parní látky zachytávají nebo vstřebávají do absorbentu.

Průmyslové separační technologie se používají v široké škále aplikací. Patří sem čištění pitné vody, oddělení pevných látek z rud v těžebním průmyslu, čištění vzduchu od průmyslových emisí, separace složek v potravinářství a farmacii, čištění odpadních vod, získávání čistého vzduchu ve výrobě elektroniky a mnoho dalších. Průmyslové separační technologie hrají klíčovou roli v ochraně životního prostředí tím, že umožňují redukci emisí znečišťujících látek a recyklaci surovin a energie. [7]

Celkově jsou průmyslové separační technologie klíčovými prvky v průmyslových procesech, které mají vliv na kvalitu produktů, účinnost výroby a životní prostředí. Zlepšení těchto technologií může vést ke snížení odpadů, nižším nákladům na energii a suroviny, a zvýšení udržitelnosti průmyslových operací. [7]

V posledních letech dochází k neustálému vývoji a inovacím v oblasti průmyslových separačních technologií. Tyto inovace zahrnují vylepšení materiálů používaných ve filtračních systémech, vývoj energeticky efektivnějších metod separace a využití pokročilých senzorů a řídicích systémů pro monitorování a zlepšení separačních procesů. S ohledem na stále rostoucí požadavky na udržitelnost a ochranu životního prostředí jsou průmyslové separační technologie nejen klíčovým prvkem průmyslu, ale také důležitým nástrojem pro dosažení ekologických a energetických cílů. [7]

2.3.1 Látkové filtry

Základem filtrace těchto filtrů je filtrační vrstva, ve které dochází k odlučování znečišťujících částic. Filtrační vrstva může být vyrobena z různých materiálů, přičemž nejrozšířenější jsou vláknité vrstvy, avšak mohou být použity i porézní hmoty či zrnité vrstvy. Nejen struktura filtrační vrstvy je důležitá, taktéž je nezbytné přihlídnout k fyzikálně-chemickým vlastnostem použitých materiálů, které slouží k její výrobě. [7]

Základní parametry charakterizující filtrační vrstvu je tlaková ztráta a odlučivost („procentuální podíl tuhých částic odloučených ze znečištěného plynu“ [8]). Oba tyto parametry nezávisí jen na struktuře vrstvy, ale zároveň i na vlastnostech plynu a zanesení filtrační vrstvy odloučených částic. [7]

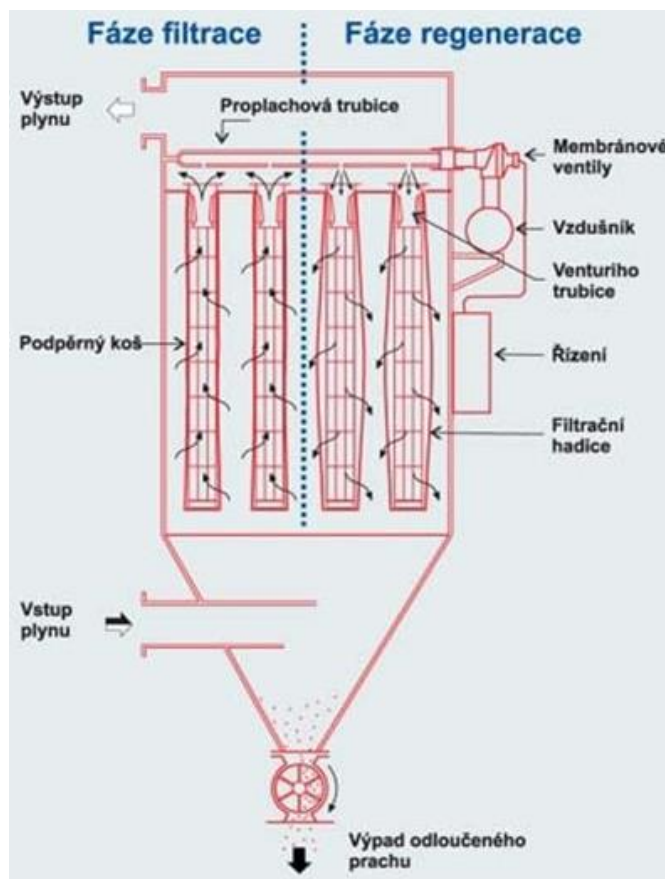
Kvalitní filtrační vrstva je důležitým parametrem účinné filtrace. Tato vrstva na začátku filtračního procesu zabraňuje pronikání částic do „čisté“ komory na druhé straně filtrační vrstvy. Vysoké koncentrace částic v plynu spolu s jejich poměrně velkými rozměry zaplňují póry filtrační vrstvy. Následně dochází k tomu, že další částice se odlučují na již odloučených částicích a vzniká tzv. „filtrační koláč“. Jelikož se částice odlučují na již dříve odloučených částicích dochází k výrazné tlakové ztrátě, jež je úměrná tloušťce filtračního koláče. Při dosažení určitého limitu tlakové ztráty je nutno filtrační vrstvu tzv. „regenerovat“. Během regenerace dochází k odstranění koláče z filtrační vrstvy. Během prvních regeneračních cyklů se odstraňují i částice z filtrační vrstvy, avšak po nějaké době se ve filtrační vrstvě vytvoří stálá vrstva usazených částic, která není regenerací ovlivněna, a zvyšuje účinnost filtračního zařízení. [7]

Nejčastěji se jako filtrační materiál používá textilie s velkou teplotní odolností. Tato filtrační zařízení jsou uspořádána tak, že jejich filtrační plocha má tvar hadic, případně hlubokých kapes. Podle tohoto se odvíjí názvy filtrů – hadicové nebo kapesové. Obdobně vypadají a fungují i filtry se zrnitou vrstvou, jež nesou název podle materiálu filtrační vrstvy, která je zde použita. [7]

Regenerace těchto filtrů probíhá pomocí zpětného proplachu, případně pulsním profukem (proplachem). U hadicových filtrů je navíc možné použít mechanický způsob regenerace. To se děje buď pomocí kmitavého pohybu hadic v podélném směru, anebo třesením v kolmé rovině na osu hadice. [7]

Na obrázku číslo 1 je popis funkce látkového filtru. Obrázek obsahuje jak fázi filtrace, tak fázi regenerace, kvůli zachycení celkové funkce filtru. Spaliny obsahující pevné částice vstupují v tomto případě do filtru ve spodní části (ve výsypce), kde dojde vlivem změny průřezu k poklesu rychlosti proudu, čímž se odloučí první hrubé částice, díky jejich hmotnosti. Spaliny, obsahující již nyní menší částičky pevných částic, postupují vzhůru k filtračním hadicím, kterými prostupuje vzdušina do komory již čisté části. Tato vzdušina následně vystupuje z látkového filtru. [7]

Pevné částice se zachycují na povrchu filtračních hadic a vytvářejí proto souvislou vrstvu prachu, kterou je nezbytné pravidelně odstraňovat. K tomuto odstraňování je v tomto případě použita již zmíněná pulsní regenerace. Regenerace je prováděná pomocí krátkých pulsů stlačeného vzduchu, který je do vnitřní části filtrační hadice (z čisté strany), vháněn z proplachové trubice skrz Venturiho trubici, která vlivem své konstrukce urychluje proplachový vzduch. Tyto pulsy způsobují, že dojde k odstranění usazené vrstvy pevných částic na vnější straně hadic. Tyto částice poté padají do výsypky, odkud jsou odváděny mimo prostor látkového filtru. [7]



Obrázek 1 Popis funkce látkového filtru [9]

Existují situace, kdy stačí relativně malý zásah do konstrukce zařízení a dosáhne se zlepšení situace. Například Qi a spol. [10] provedli analýzu jejich stávajícího látkového filtru na zjednodušeném modelu. Vymodelovali jen polovinu filtru, protože se jedná o symetrické zařízení. Následně navrhli vložení plechů do spodní části výsypky, čímž zlepšili distribuci spalin do jednotlivých hadic. [10]

Ne vždy je však možné použít pouze malý zásah do konstrukce filtru. Například Rocha a spol. [11] zkoumali změnu vstupního potrubí do látkového filtru. Původní návrh měl pouze jeden vstup, avšak nový návrh byl takový, že vstupní potrubí rozdělili na tři větve, které umístili nad sebe. Tímto dosáhli lepšího rozdělení spalin ve filtru a rovnoměrnějšího zatížení hadic. Rozdělením vstupního potrubí, a zachováním původního průřezu, zmenšili vstupní rychlost, díky čemuž očekávají nižší abrasivní účinek na hadice a prodloužení životnosti filtru. [12] Obdobným, avšak důslednějším výzkumem se zabývali Pereira a spol. [13], kteří řešili změnu polohy a vstupní průřez přívodního potrubí. Dospěli k závěru, že zaústěním vstupního potrubí do výsypky dosáhnou nejrovnoměrnějšího rozložení průtoku vzdušiny skrz hadice. [13]

Využití 2D simulací při simulacích těchto filtrů ukazuje Rocha a spol. [14] ve svých dvou velice podobných článcích. Věnují se zde změně pozice vstupního dílu v závislosti na výšce umístění a následně vlivu na tlakovou ztrátu. Výsledky jsou jednoznačné. Čím níže se dá vstupní díl, tím nižší je tlaková ztráta. S ohledem k výsledkům, které jsou v práci

reprezentovány, a vzhledem k 2D přístupu k řešení jednoznačné 3D úlohy je skepticismus k přínosu této práce namístě. [11] [14]

2.3.2 Elektrické filtry

Elektrické odlučovače (EO) jsou občas nevhodně nazývány jako elektrostatické odlučovače. Elektrické pole je mezi elektrodami v principu elektrostatické, díky výbojové činnosti vzniká mezi elektrodami proud iontů, tudíž název elektrostatický není zcela přesný. Během procesu elektrického odlučování jsou tuhé, či kapalné, částice z nosného plynu odstraňovány působením elektrických sil. Tento typ odlučovačů je aktuálně nejpoužívanějším typem filtračního zařízení pro čištění spalin u velkých energetických zdrojů, ale jeho zastoupení klesá kvůli přísnějším emisním limitům, proto jsou stále rozšířenější látkové filtry, které jsou účinnější. [7]

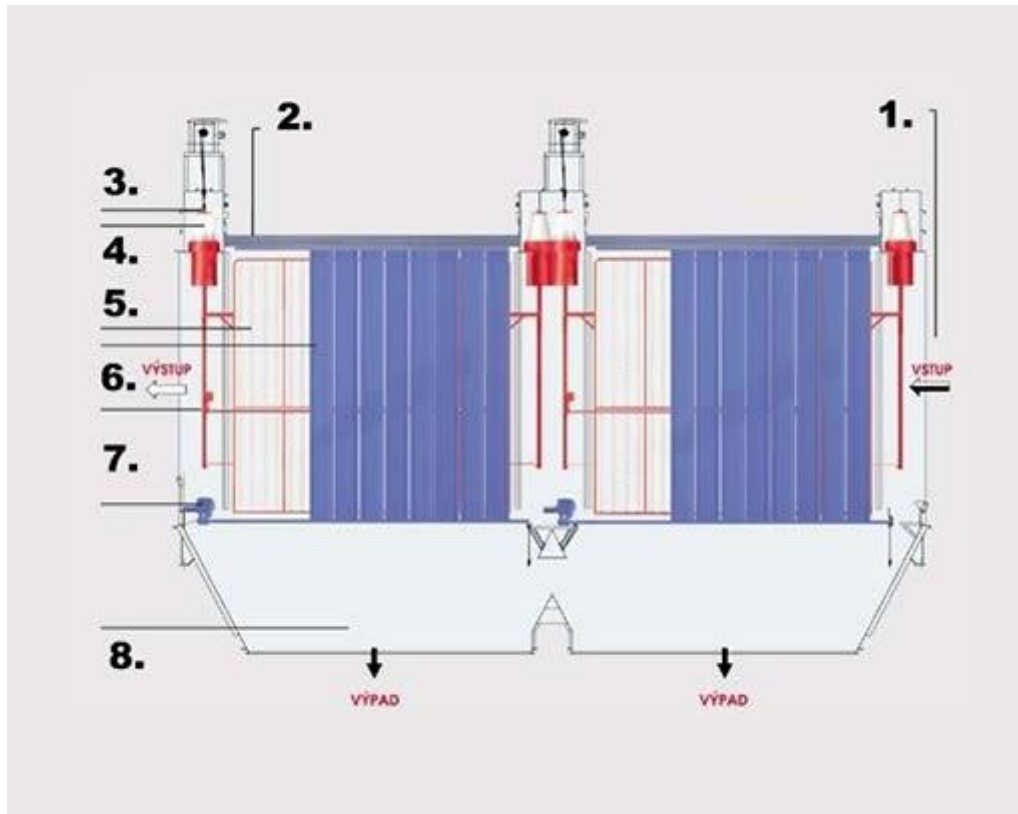
Účinné elektrické odlučování je závislé na dostatečně vysokém monopolárním elektrickém náboji částice. Tento náboj částice získají umělým nabíjením. U elektrických odlučovačů se používá nabíjení pomocí volných iontů, které vznikají při korónovém výboji. Korónový výboj je druh elektrického výboje, který je způsoben ionizací tekutiny obklopující elektrický vodič (vysokonapěťová elektroda) nabitý vysokým napětím. Přes tekutinu (spaliny) se dále nabíjí částice, na které působí elektrická síla (Coulombova síla). Tento efekt má za následek usazování částic na usazovacích elektrodách. [7] [15] [16]

Elektrické odlučovače se dělí podle uspořádání soustavy elektrod, a to buď na komorové, nebo trubkové. Komorové odlučovače se skládají z několika paralelně řazených komor. Tyto odlučovače jsou nejrozšířenějším typem používaným pro separaci popílku ze spalin. Trubkové odlučovače jsou složeny z několika stejných prvků. Každý prvek je tvořen symetrickou válcovou sběrací elektrodou, přičemž v ose této elektrody je umístěná vysokonapěťová elektroda. Trubkové elektrické odlučovače jsou používané ve speciálních případech, jako je třeba odlučování kapalných příměsí (olejů, dehtu). Elektrické odlučovače lze dělit podle směru průtoku plynu na horizontální (většinou komorové) a vertikální (trubkové). Další dělení je možné provést podle toho, jak se odvádí odloučené částice z usazovacích elektrod. Podle způsobu odvodu se dělí na suché a mokré. Poslední běžně používané dělení je podle toho, zda je odlučovací zóna oddělena od zóny ionizační, takže máme buď dvouzónové (tyto odlučovače mají předřazenou ionizační část) a jednozónové. [7]

Komorové odlučovače mohou být složeny z několika sekcí, které jsou ve směru průtoku čištěného plynu. Maximální počet sekcí se uvádí 5. Každá sekce bývá napájena samostatně a běžně se v různých sekcích používají různě vysoká napětí. Pokud je potřeba filtrovat velké objemové množství plynu, tak lze zařadit více odlučovačů vedle sebe. [7]

Popis konstrukce elektrického odlučovače je znázorněn na obrázku číslo 2. Na vstupu, jež je označen číslem 1, jsou umístěné rozdělovací stěny, které mají za cíl rovnoměrně roz distribuovat plyn do celého průřezu odlučovače. Číslo 2 označuje vzduchotěsnou skříň (komoru), ve které jsou upevněné usazovací elektrody, vysokonapěťové elektrody, clonící plechy a další doplňkové prvky. Číslo 3 ukazuje

na zavěšení vysokonapěťového systému, jenž dodává usměrněné napětí. Vysokonapěťové elektrody každé sekce jsou zavěšeny na kónických izolátorech, ty jsou označeny číslem 4. Vysokonapěťové elektrody jsou označeny číslem 5. Usazovací elektrody jsou zde označeny číslem 6. Regenerační systém těchto filtrů je vyřešen pomocí oklepávacího systému, který pravidelně čistí vysokonapěťové i usazovací elektrody. Tento systém je označen číslem 7. Poslední z důležitých částí odlučovače jsou výsyvky, kam padá odloučený prach vlivem oklepávání. Výsyvky jsou označeny číslem 8. [17]



Obrázek 2 Popis konstrukce elektrického odlučovače [17]

Elektrické odlučovače jsou nejen geometricky, ale i z pohledu fyzikálního, poměrně složitá zařízení. Množství fyzikálních jevů, které se v nich uplatňují je poměrně značné. Nejlepší přístup jakýchkoliv numerických simulací by byl, kdyby se modely nezjednodušovaly. To však není aktuálně možné, jelikož výpočetní zařízení na takové množství dat není připraveno. Na toto téma pojednávají Zhuangbo a spol. [18], kteří hovoří o jednotlivých jevech v EO a odkazují na jednotlivé autory, kteří se jednotlivými tématy zabývají. Vzhledem ke složitosti celého systému se vhodně používají RANS simulace, které dávají dostatečně dobré výsledky. Nasimulovat však celý systém odvodu spalin najednou je poměrně komplikovaná záležitost, proto různí autoři přistupují k tomuto problému různě.

Jako přehledný vstup do CFD výpočtů v EO může posloužit článek od Bhaskera [19], který popisuje celý proces výpočtu od přípravy výpočtů, přes simulace až po vyhodnocení výpočtů. Poukazuje na použití rozdílných programů při výpočtech. Hlavní význam článku je ten, že každý použitý software má vlastní specifika, avšak výsledky z nich jsou

srovnatelné. Například Hou a spol. [20] přistoupili k výpočtům EO tak, že nahradili rozdělovací desku porézním médiem, tím získali proudové pole uvnitř filtrů. Následně provedli simulaci části spalínovodu tak, že nahradili EO pomocí porézních ploch tak, aby tlaková ztráta odpovídala již provedeným výpočtům na samotném odlučovači. Swaminathan a spol. [21] provedli analýzy použití rozdělovacích desek. Zjistili, že pro rovnoměrné rozdělení je potřeba několik desek o různém množství děr (porozitě) a taktéž záleží na jejich umístění ve vstupní části filtru. Rozdělovací desky byly taktéž modelovány pomocí porézního média. Závěr jejich práce poukazuje na fakt, že velká porozita nemá schopnost dobré distribuce proudu, ale malá porozita zvyšuje tlakovou ztrátu filtru. Haque a spol. [22] provedli simulace EO aplikovaného ve velkém energetickém zdroji. Vzhledem k velikosti filtru provedli simulaci pouze na polovině odlučovače, jelikož se jedná o symetrickou geometrii. Rozdělovací stěny nahradili porézními médii s různými porozitami tak, aby co nejvěrohodněji odpovídala skutečnosti. Výpočty mají experimentálně ověřeny a uvádějí shodu rychlostního pole do 20 %. Důležitost modelování a následných simulací celého potrubního systému před EO potvrzují výpočty provedené Jedrusikem a spol. [23]. Sulcovova a spol. [24] navrhli možnost předfiltrace, pokud to konstrukce dovolí. Sulcovova provedla analýzu proudění ve spalovacím zařízení a identifikovala místo, kde by vhodná změna konstrukce zlepšila odloučení větších pevných částic rovnou v této lokalitě, čímž by se zmenšilo množství pevných částic směřujících do následného filtru.

Někteří autoři přistupují k výpočtům EO pomocí 2D simulací, kupříkladu Zhenyu a spol. [25]. Ačkoliv se jednalo pouze o 2D simulaci, která je značně zjednodušující, protože proudění v EO je jednoznačně třídímenzionální problém, tak i přesto autor této studie dospěl k závěru, že je velice důležité znát situaci před i za filtrem.

2.4 Katalyzátory výfukových plynů

V dnešní době se obavy ohledně životního prostředí a znečištění vzduchu stávají stále naléhavějšími. Jedním z hlavních znečišťujících faktorů jsou emise výfukových plynů z automobilů a průmyslových zařízení.

Katalyzátor výfukových plynů je zařízení umístěné ve výfukovém potrubí spalovacího zdroje. Tato komponenta slouží k urychlení chemických reakcí, které se odehrávají ve výfukových plynech. Hlavním úkolem katalyzátoru je přeměna škodlivých složek výfukových plynů na méně nebezpečné látky. Nejčastěji se jedná o oxid uhelnatý CO na oxid uhličitý CO_2 , oxidy dusíku NO_x na dusík N_2 a kyslík O_2 a uhlovodíky HC na oxidy uhličitý CO_2 a H_2O . [26] [27]

Katalyzátory výfukových plynů obsahují katalytické materiály, obvykle na bázi drahých kovů, jako je platina, rhodium a paladium, které slouží jako aktivní centra pro chemické reakce. Tyto kovy mají schopnost urychlovat chemické reakce tím, že snižují energii potřebnou k jejich proběhnutí (aktivace). Katalyzátor má také speciální strukturu, která zajišťuje co největší plochu styku mezi výfukovými plyny a katalytickými materiály. [26] [27]

Běžně se uvažují tři typy katalyzátorů výfukových plynů:

1. Oxidační katalyzátory: Tyto katalyzátory se zaměřují na oxidaci škodlivých látek, jako je oxid uhelnatý CO a uhlovodíky HC , na oxidy uhličitě CO_2 a vodní páry H_2O .
2. Redukční katalyzátory: Tyto katalyzátory snižují oxidy dusíku NO_x na méně škodlivé sloučeniny, jako je dusík N_2 a kyslík O_2 .
3. Kombinované katalyzátory: Tyto katalyzátory kombinují funkce oxidace a redukce a jsou schopny snižovat škodlivé emise výfukových plynů účinněji.

Princip fungování redukčního katalyzátoru spočívá v chemické reakci zvané selektivní katalytická redukce (SCR). Redukční katalyzátory obsahují katalytický materiál, který často zahrnuje drahé kovy, jako je například rhodium nebo platinové sloučeniny. Tyto kovy působí jako aktivní centra katalyzátoru a umožňují urychlení chemických reakcí. [25]

Proces SCR probíhá za přítomnosti redukčního činidla, kterým je obvykle amoniak NH_3 , nebo močovina $CO(NH_2)_2$. Toto činidlo je obvykle dodáváno do výfukového systému jako přídatná látka, buď přímo nebo pomocí speciálních systémů, které ho generují ze zplyňování močoviny. Když oxidy dusíku procházejí redukčním katalyzátorem spolu s redukčním činidlem, probíhá reakce, při které se oxidy dusíku redukují na dusík a kyslík. [25] [27]

Reakce SCR mohou probíhat při relativně nízkých teplotách (v rozmezí 227–447 $^{\circ}C$), což je výhodné zejména při studeném startu stroje, kdy ještě není dosaženo optimální teploty pro jiné typy katalyzátorů. Teplota výfukových plynů je důležitá pro účinnost SCR a správný provoz katalyzátoru. [25] [27]

SCR technologie je velice účinná při snižování emisí oxidů dusíku a umožňuje dosáhnout vysokého stupně redukce škodlivých látek. Redukční katalyzátory jsou schopné pracovat s různými druhy paliv, včetně nafty, benzínu a zemního plynu, což zvyšuje jejich univerzálnost. Katalytické materiály používané v redukčních katalyzátorech jsou vysoce odolné vůči opotřebení a mají dlouhou životnost, což zajišťuje jejich trvanlivost. [25]

I když jsou redukční katalyzátory velmi účinné při snižování emisí oxidů dusíku, existují i některá omezení. Je nezbytné použití redukčních činidel, jako je amoniak nebo močovina, vyžadující zvláštní manipulaci a skladování. Musí být zajištěno bezpečné a efektivní dodávání těchto látek do výfukového systému. Při nízkých teplotách se může účinnost redukčních katalyzátorů snižovat, což může vést k vyšším emisím oxidů dusíku. Správná údržba redukčních katalyzátorů, včetně kontroly a výměny redukčního činidla, je důležitá pro jejich optimální funkci. [25] [27]

Obecně lze říci, že katalyzátory výfukových plynů jsou jedním z neúčinnějších způsobů snižování emisí z automobilů a průmyslových zařízení. Pomáhají snižovat škodlivé účinky výfukových plynů na lidské zdraví a životní prostředí. Jsou také relativně cenově dostupné a dlouhodobě udržitelné. Nicméně mají některá omezení, například

vyžadují určitou operační teplotu, aby dosáhly optimálního provozu. To znamená, že při studeném startu nejsou tak účinné. Kromě toho mohou být citlivé na přítomnost určitých látek ve výfukových plynech, jako je olovo, které může snižovat účinnost. [25] [27]

Katalyzátory výfukových plynů se staly klíčovou technologií pro snižování škodlivých emisí a pro ochranu životního prostředí. Jejich další vývoj a zdokonalování přispívá k čistějšímu životnímu prostředí a ochraně zdraví.

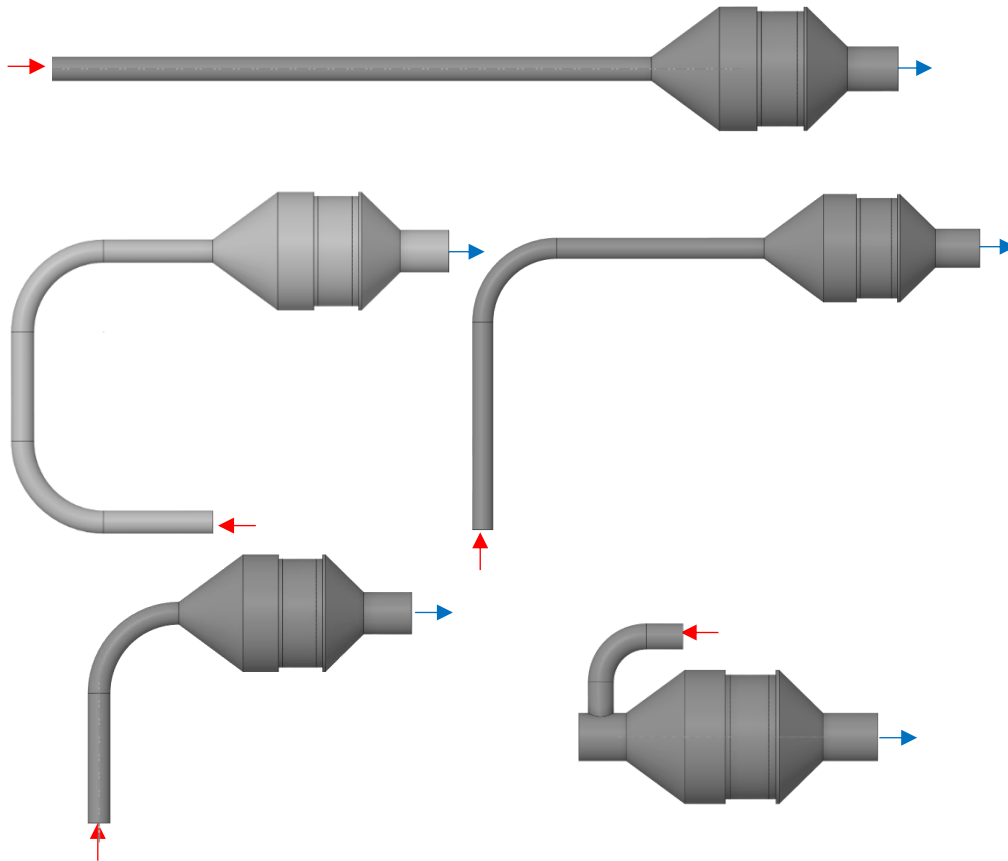
2.4.1 Nejběžnější geometrická uspořádání

Každý SCR systém je originální a je potřeba specifický přístup k řešení proudění uvnitř, pokud se nejedná alespoň o malosériovou výrobu. Nicméně při bližším prozkoumání možných uspořádání, které si výrobci většinou pečlivě střeží, je možné zjistit několik podobností. Nejjednodušším geometrickým uspořádáním je umístit všechny komponenty v řadě za sebou bez jakýchkoliv kolen. To je možné vidět například zde [28]. Geometrie potrubí je v tomto případně jednoduchá a proudění není ovlivněné koleno nebo jinými geometrickými prvky. Jedná se však o komplikované řešení kvůli zastavěnému prostoru. Další potrubní systém mezi SCR katalyzátorem a energetickým zdrojem je možné vidět zde [29] a [30]. Jedná se o navedení proudu spalin z motoru dále pomocí dvou a více kolen (viz. [31] a [32]). Obdobné uspořádání s jiným usměrněním (každé koleno je ohnuté jiným směrem) lze vidět zde [33] a zde [34]. Toto uspořádání se vyskytuje nejčastěji při vyhledávání geometrického uspořádání SCR systémů. Umožňuje tedy konstruktérům variabilitu umístění technologie. Z proudového hlediska je toto řešení však složitější než předešlé rovné uspořádání. Jedno koleno je možné vidět kupříkladu zde [35] a zde [36]. Zkrácení potrubí mezi motorem a katalyzátorem je uvedeno zde [37]. Zcela jiný přístup k řešení potrubí má kupříkladu společnost TEDOM a.s., která umísťuje katalyzátor velice blízko motoru, a navíc používá skokové změny průměru potrubí. To lze vidět zde [38], podrobnější vzhled na situaci je zde [39]. Obdobný systém je vidět i zde [40]. Možných zdrojů pro získání informací týkající se geometrického uspořádání potrubí mezi SCR katalyzátorem a motorem (energetickým zdrojem) je značné množství, ale jedná se téměř vždy o období zde uvedené.

Následující obrázek 3 obsahuje pět geometrických variant, které se snaží reprezentovat nejběžnější uspořádání potrubí mezi výstupem ze spalovacího zařízení, případně za turbodmychadlem, a SCR katalyzátorem. Možných geometrických uspořádání je nepřehledné množství, další řešené varianty geometrií jsou popsány v dalších kapitolách, kde budou ukázky nejen změny na těchto pěti geometriích, ale zároveň i další upravené varianty, čímž je myšleno jejich směry, počty kolen a vzdálenosti mezi některými prvky.

Nahoře v obrázku 3 je varianta „straight“, která se uvažovala jako základní a testovací model, na které se nejdříve testovaly jednotlivé úpravy, jež se následně aplikovaly na další geometrie. Uprostřed vlevo je varianta „double knee“, jelikož má dvě kolena. Tato varianta se uvažuje za nejběžněji používanou v reálných aplikacích. Uprostřed vpravo je varianta „long knee“, vychází z varianty předchozí s tím rozdílem, že má pouze jedno koleno. Dole vlevo je varianta „short knee“ jež opět vychází z předchozí

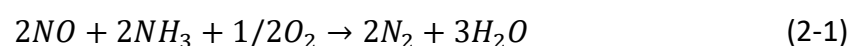
a neuvažuje se rovná část před SCR katalyzátorem, jelikož tyto systémy jsou většinou omezeny zastavitelným prostorem. Poslední ze zde uvedených variant nese název „tdm“. Jedná se o nejkompaktnější variantu a zároveň o nejvíce extrémní, jelikož zde je minimální prostor na ovlivnění proudu před vstupem do katalyzátoru výfukových plynů.

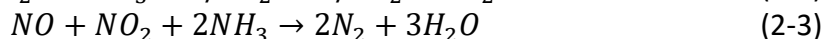
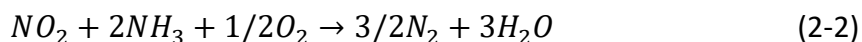


Obrázek 3 Ukázka řešených geometrií

2.4.2 Selektivní katalytická redukce

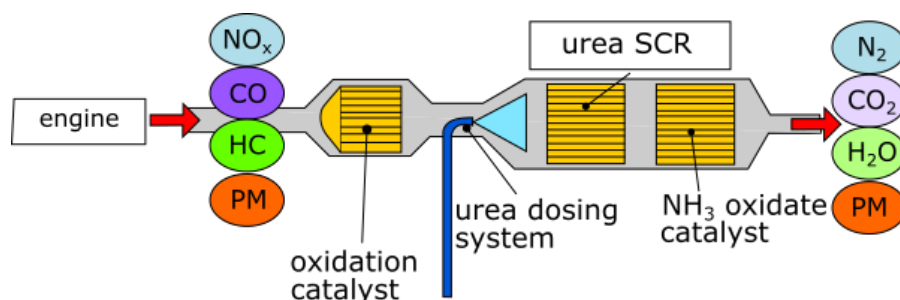
Selektivní katalytická redukce je druh procesu, který se využívá ve spalovacích motorech za účelem redukce emisí dle požadavků emisní normy Euro. Existují i jiné technologie využívané v automobilovém průmyslu za účelem redukce tuhých znečišťujících částic, avšak tyto metody zvyšují množství NO_x ve spalinách. [41] SCR systém nemusí být použitý pouze ve vozidlech – podstatu tohoto systému lze použít i na stacionární zdroje energie využívající uhlí či zemní plyn. Redukce NO_x je nezbytná i v těchto zařízeních, jelikož tyto zdroje jsou velkými producenty těchto emisí. [42] Snížení emisí NO_x je dosaženo vstřikováním dvousložkové kapaliny, která je z 32,5 % močovina a z 67,5 % voda, do proudu spalin. Již zmíněná kapalina nese obchodní název AdBlue®. AdBlue® se vstříkuje do spalinovodu, kde se následně vypaří a začne probíhat chemická redukce na katalyzátoru (značná plocha potřebná ke správné funkci redukce) se spalinami. Tři základní chemické reakce jsou uvedeny na řádcích (2-1) až (2-3). [43]





Z těchto rovnic je tedy vidět, že NO_x reagují s amoniakem, který je nezbytnou součástí při těchto reakcích. „AdBlue® se rozkládá vlivem tepla za přítomnosti obsažené vody na amoniak (NH_3) a oxid uhličitý (CO_2).“ [44] Tím se dosáhne toho, že ve spalínách je amoniak potřebný pro výše uvedené chemické reakce. [45] Je tedy nezbytné, aby se vstříkovaná kapalina vypařila co nejdříve po vstříknutí do spalínovodu, čímž dojde k řádnému promíchání se spalínami, a následně se dosáhne správné distribuce smíchaných plynů v katalyzátoru. [46]

Základní uspořádání SCR systému je zobrazeno na obrázku 4. Jak je vidět, tak se jedná o komplexní soustavu, která se netýká pouze redukce množství NO_x emisí. Na obrázku je dobré poukázat na fakt, že vstříkování roztoku močoviny se uvažuje blízko katalyzátoru, což jde proti předchozím tvrzením, jež říkají, že se vstříkovaná kapalina má kompletně vypařit před vstupem do katalyzátoru.



Obrázek 4 Základní uspořádání SCR systému [41]

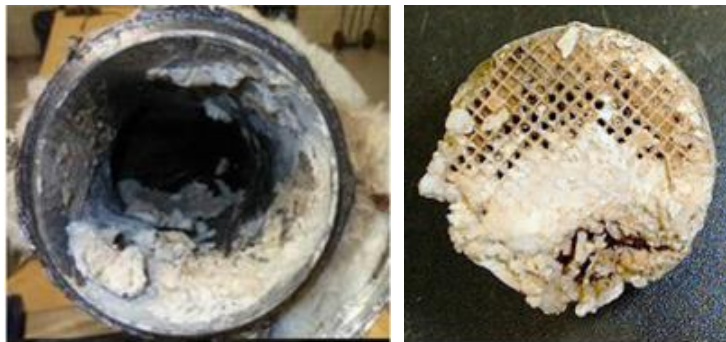
SCR systém je nezbytné navrhnout dobře, jinak nejsou splněny požadavky, jako je dostatečná doba setrvání vstříkovaného AdBlue® a následně rovnoměrné rozdělení amoniaku na vstupu do katalyzátoru. Velice často se stává, že systém není vhodně vyřešený a je potřeba změny geometrie pro zlepšení funkčnosti tohoto systému. Pokud je to možné, je snaha o co nejmenší zásah do konstrukce systému. Zdárný příklad jednoduché změny geometrie provedli Li a spol. [47], kteří pouze malou úpravou již používaných lopatek dosáhli požadované změny. [47] Další příklad jednoduché úpravy spalínovodu provedli Mi a spol. [48], kteří přidali do spalínovodu vhodně zvolené lopatky pro lepší rozdělení proudu a tím zajistili lepší distribuci amoniaku. [48] Podobnou změnou geometrie zlepšili proudovou situaci ve spalínovodu i Hong a spol. [49]

Další běžně používanou komponentou je axiální statický usměrňovač (anglicky: „Static Axial Rectifiers“). Použitím tohoto usměrňovače se zvyšuje účinnost SCR systému, jak uvádí Mehdi a spol. [50] Zvýšení účinnosti je způsobeno v jejich případě tím, že se zvýší doba setrvání kapek v potrubí, čímž dojde k vyššímu odpaření, a tudíž k vyšší účinnosti. Další důvod vyšší účinnosti je to, že se zvýší i přestup tepla do kapiček díky zvýšené turbulenci, proto se kapičky vypaří rychleji. Tato tvrzení potvrzují i Tan a spol. [51] ve své publikaci. Několik zajímavých návrhů usměrňovacích modulů ve své práci zobrazují Xu a spol. [52] V tomto článku je také dobré poukázat na fakt, že vzdálenost na vypařování

v jejich SCR systému je velice malá, proto se nedá očekávat úplné vypaření vstříkované kapaliny před vstupem do katalyzátoru. Avšak i přesto se zvýší účinnost systému při použití již zmíněných modulů. [52] Existují však další články potvrzující zlepšení funkce systému, viz [53], [54], [55].

Modelování katalyzátoru je poměrně složitá záležitost, jelikož se skládá z velkého množství malých kanálků, proto se běžně přistupuje ke zjednodušení této části modelu v CFD simulaci pomocí porézního média. Toto zjednodušení nepřináší žádný výrazný negativní vliv na výsledky. Porovnání simulace v ANSYS Fluent a experimentu popisuje Holtz a spol. [56] a udává, že výsledky jsou srovnatelné.

Důvod, proč je potřeba správně navrhnout celý SCR systém, je snaha o snížení NO_x po spalování. Správně navržený systém funguje v požadované kvalitě po celou dobu své životnosti. To se však ukazuje jako problém při nesprávném návrhu těchto systémů, jelikož dochází k zanášení katalyzátorů v situacích, kdy nedochází k vypaření celé kapalné fáze AdBlue® před vstupem do katalyzátoru. Důsledky tohoto jevu je možné vidět na obrázku 5. Tento jev se objevuje při provozních teplotách pod $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, proto je doporučená provozní teplota nad $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, avšak ani to není zárukou toho, že se nebudou tvořit v systému usazeniny. [57]



Obrázek 5 Následky nevhodného návrhu SCR systému, a) je uvedeno v [58], b) je uvedeno v [59]

Důležitou částí SCR jsou chemické procesy, které se zde uplatňují. Většina článků zabývajících se tímto tématem je alespoň částečně prostoupena chemií, avšak některé se tomuto tématu věnují více. Například Schaber a spol. [60] se věnovali chemické pyrolýze již v roce 1999 [61]. Následně Schaber pokračoval ve výzkumu a detailnějším popisu rovnic v článku z roku 2004. [60] Další podrobnou studii zabývajících se obdobným tématem zpracovali Brack a spol. [62] V závěru své práce uvádějí, že je nezbytné uvažovat i změnu skupenství močoviny během vypařovacího procesu při detailním zkoumání chemických reakcí. [62] Chemické procesy neprobíhají však pouze před katalyzátorem, těmto dějům se věnovali v menším rozsahu Yao a spol. [63], kteří se zabývali převážně jen procesy uvnitř katalyzátoru. [63] Rozsáhlejší studii udělali Shin a spol. [64], jež provedli značné množství experimentů, na jejichž základě vytvořili výpočetní model, který má velice dobrou shodu s jejich experimenty. [64] Chemickými pochody před a uvnitř katalyzátoru se zabývali Baleta a spol. [65], ti se zaměřili na proudění před katalyzátorem, vstříkování a vypařování kapiček roztoku vody a močoviny. [65]

Rozsáhlou experimentální a výpočetní studii provedli Kim a spol. [66] V této studii se zabývali vstřikováním roztoku močoviny do experimentálního standu. Zároveň provedli výpočty, které měly velice dobrou shodu s výsledky jejich experimentální studie, která zahrnovala i chemické reakce. Tento výzkum se velice často objevuje v jiných článcích, které porovnávají své výsledky s těmi od Kima a spol. Um a spol. [67] se ve své studii zaměřili na vhodný tvar vstupního potrubí do katalyzátoru, ve výpočtech zahrnuli jednoduché chemické reakce a jejich výpočty porovnali s výsledky od Kima a spol. Tvorbou výpočetního vstřikovacího modelu s chemickými procesy se zabývali Abu-Ramadan a spol. [68], kteří model ověřovali pomocí experimentů od Kima a spol. [66] a Wanga a spol. [69] Tento model byl pomocí UDF dodán do výpočetního programu ANSYS Fluent, ve kterém probíhaly výpočty. Kromě, pravděpodobně, nejznámějšího výpočetního CFD softwaru ANSYS Fluent se v této oblasti výpočtů běžně používá program Fire od společnosti AVL. Tvorbě vypařovacího modelu se věnovali Birkhold a spol. [70], kteří tento model ověřovali pomocí experimentu provedeným Kimem a spol. Jejich nový model zahrnující i chemické reakce byl aplikován do již zmíněného programu Fire. Navazující studii provedli Birkhold a spol. [71], kde vylepšují svůj předchozí model, který následně taktéž implementují do programu Fire.

Blinov a spol. [72] provedli numerické simulace vypařování roztoku močoviny v proudu vzduchu, své výsledky porovnali s výsledky od Kima a spol. Následně vypařovací model vložili do svých simulací a přidali statické mixéry, které měly za úkol zvýšit přeměnu močoviny na amoniak. Obdobnou studii provedli i Munnannur a spol. [73], kteří simulace prováděli v ANSYS Fluent a dodatečné chemické procesy zakomponovali pomocí uživatelských funkcí. Další obdobný výzkum provedli Drennan a spol. [74] Taktéž využili mixéry pro zlepšení vypařovacího procesu. V jejich studii navíc využili automatického síťování kvůli lepšímu zachycení dějů v oblasti vstřikování.

Numerické studie však nejsou opírány pouze o studii provedenou Kimem a spol. Vlastní experimentální ověření výpočtů provedli Wardana a spol. [75] Jejich výzkum obsahoval chemické reakce a vypařovací proces roztoku vody a močoviny. Ve své studii zkoumali mixéry pro lepší promíchání a zvýšení přeměny roztoku na amoniak. 3D simulace podpořené vlastními experimentálními výsledky uvedli i Luo a spol. [76] Ti ve svém výzkumu používali nejjednodušší redukční rovnice v proudu spalin, avšak zabývali se i chemickými pochody v katalyzátoru, který zjednodušují pomocí porézního média. Porovnali stacionární a nestacionární přístup k výpočtům a dospěli k závěru, že stacionární výpočet ztrácí minimum informací oproti nestacionárnímu výpočtu. Komplexní přístup k 3D CFD simulaci SCR systému měl ve své studii Lee [77]. Ten ve výpočtech postihl vypařovací proces, termolýzu a hydrolýzu močoviny (roztoku vody a močoviny), kapalinový film (anglicky „Wall Film“) a vliv mixéru na celkový systém. Výpočty porovnal s experimenty a dospěl k velice dobré shodě. Ve své studii taktéž zkoumal změnu polohy vstřikování roztoku a vkládání mixérů do proudu spalin. Velice zajímavé mixéry do proudu spalin navrhli Zhang a spol. [78] ve své studii, která zahrnuje vypařování kapiček, kapalinový film na stěnách mixérů a chemické pochody týkající se SCR. Své výsledky experimentálně ověřili, navíc během experimentů poukázali na problém s usazováním močoviny a jejich derivátů na stěnách.

Aplikaci SCR systému v lodní dopravě zkoumali Mehdi a spol. [50] Ve své studii uvádějí krok za krokem, jak probíhají jednotlivé chemické reakce, vyhýbají se však oxidačním rovnicím. Taktéž dospěli k závěru, že je vhodné využít ve spalínovodu mixéry, které zlepšují proudovou situaci. Jedná se pouze o numerickou simulaci bez experimentálního ověření. SCR systémy mohou být aplikovány na různých zařízeních, kupříkladu Gao a spol. [79] ve své studii provedli numerické simulace a experiment na spalínovodu za plynovou turbínou. Použili tři nejběžnější rovnice popisující chemické reakce selektivní katalytické redukce a dospěli k závěru, že výsledky si jsou rovnocenné.

Kromě vypařování AdBlue[®], potažmo roztoku vody a močoviny, v proudu spalin je podle Börnhorsta a spol. [80] potřeba řešit i usazování močoviny a jejích derivátů na stěnách. Ti ve svém výzkumu uvedli komplexní chemické pochody, které probíhají v SCR systémech. Provedli simulace a experimenty, které mají velice dobrou shodu. Usazeniny, které vznikají v SCR systémech, popisují ve svém výzkumu Prabhu a spol. [81] Ti provedli experiment a numerické simulace týkající se chování usazenin, které jsou způsobené chemickými pochody při odpařování a rozkladu AdBlue[®] a močoviny. Taktéž uvedli, že teplota hraje velkou roli při tvorbě usazenin – čím větší teplota, tím méně usazenin. Spolu s teplotou je důležitým faktorem při tvorbě usazenin i drsnost stěn. Tvrzení o teplotě potvrzují i Sampath a spol. [82] ve své studii, kde popisují, co se děje s roztokem močoviny a vody při různých teplotách. Ve své studii prováděli 3D simulace s chemickými pochody, kapalinovým filmem, a interakcí kapiček na stěnách. Taktéž zmiňují, že nejsou zcela prozkoumány všechny chemické pochody, které se v SCR systémech dějí. Zajímavou interakci kapiček a stěny provedli ve své studii Niwa a spol. [83], ve které vstříkovali roztok močoviny na destičku umístěnou v proudu spalin. Zkoumali vhodné umístění vstřikovače a natočení destičky. Provedli jak numerické 3D simulace, tak i experimentální studii a výsledky se jim shodují. Jako problematickou část jejich nápadu uvádějí, že v některých natočeních se tvoří usazeniny močoviny a jejích derivátů, které nezmizí.

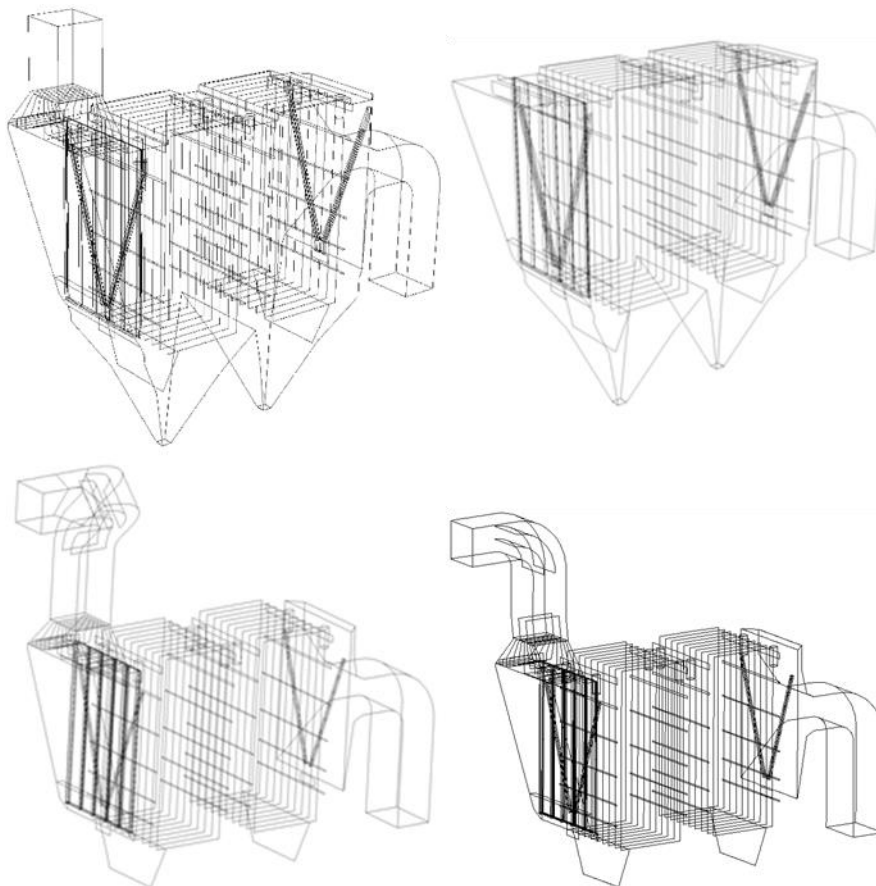
Přímé vstříkování roztoku vody a močoviny není vhodným zdrojem amoniaku pro SCR systémy podle Koebela a spol. [84], kteří naznačují, že by bylo lepší využít rovnou amoniak, který je však bohužel hůře skladovatelný a navíc nebezpečný. V této studii se autoři snaží obhájit využitelnost externích reaktorů, kde by mělo docházet k přeměně močoviny na amoniak předtím, než se začne míchat s hlavním proudem spalin. Většina studií se snaží zajistit kompletní využití amoniaku, aby nedocházelo k únikům této látky.

3 Dosavadní výzkumná činnost

Tato kapitola se zaměřuje na ukázkou autorovi odborné činnosti v oblasti elektrických odlučovačů a látkových filtrů. Jedná se o filtrační zařízení nezbytná pro plnění emisních limitů u energetických zařízení. Oba dva typy filtrů jsou zastoupené v české energetice ve velké míře, jelikož se používají zejména v uhelných elektrárnách, které jsou historicky páteří české energetické sítě. Každé z uvedených zařízení bylo či je reálně provozováno a výzkumná činnost byla dělána v součinnosti s provozovateli, za účelem zlepšení funkčnosti zařízení, čehož bylo ve většině případů úspěšně dosaženo.

3.1 Výzkumná činnost v oblasti EO

Původní geometrie s dalšími počítanými modifikacemi jsou zobrazeny na obrázku 6. Vlevo dole je původní varianta s pravým vstupním spalínovodem. Vpravo dole původní varianta s levým vstupním spalínovodem. Vlevo nahoře je varianta s rovným vstupním potrubím pro zjištění vlivu tvaru potrubí na proudovou situaci uvnitř filtračního zařízení. Vpravo nahoře je varianta bez vstupního potrubí a bez vstupní rozdělovací komory pro zjištění kvality návrhu těchto komponent.



Obrázek 6 Varianta s rovným vstupem do odlučovače (vlevo nahoře), varianta bez vstupního potrubí a rozdělovacího dílu (vpravo nahoře), varianta s pravým vstupem (vlevo dole) a varianta s levým vstupem (vpravo dole)

Snaha o provedení co nejpřesnějších simulací vedla k vytvoření reálné geometrie rozdělovací stěny s klapkami. Byly provedeny výpočty s porézní rozdělovací stěnou, jejíž vlastnosti byly ovládány pomocí uživatelsky definované funkce (User-Defined Function – UDF). Ačkoliv byla snaha o co nejvíce podobnou geometrii s reálným dílem, tak ne všechny prvky byly modelovány. Šrouby, matice atd. jsou zanedbatelné prvky, které nemají výrazný vliv na proudění uvnitř filtru. Vliv tvaru usazovacích elektrod byl taktéž zkoumán.

Výsledky variant s rovným potrubím a bez vstupního potrubí poukázaly na fakt, že proudění ve filtru bylo symetrické. Druhé dvě varianty s nesymetrickým vstupním potrubím měly nesymetrické proudění ve filtru způsobené právě rozdílným vstupem.

Díky tomuto zjištění se provedly geometrické návrhy a modifikace vestaveb ve vstupní části a zároveň se navrhly i změny vstupní komory. Vzhledem k množství navržených variant a časové náročnosti výpočtu, se vytvořil submodel, který obsahoval vstupní potrubí původní varianty, vstupní díl s vestavbami a vstupní komoru. Submodel tedy vypadal tak, jako skutečný filtr, ale byl ukončený před rozdělovací stěnou. To dovolilo provést značné množství simulací v kratším čase.

Z výsledků je možné usoudit, že vstupní potrubí značně ovlivňuje proudění v tomto elektrickém odlučovači. Proto je potřeba při návrhu vstupní komory přistoupit k podrobné analýze proudového pole pro dosažení co nejlepší účinnosti filtračního procesu.

U druhého odlučovače byly simulace provedeny za účelem posouzení aktuálního designu a možnosti zlepšení proudové situace, jež by měla za následek zlepšení účinnosti filtračního zařízení v případě vyšších emisních požadavků.

Geometrie tohoto filtru je zobrazena na obrázku 7 vlevo. Model obsahoval kromě filtrační části i vstupní a výstupní kouřovody. Během tvorby modelu se zanedbaly nedůležité části v konstrukci, jako jsou šrouby, zakřivení usazovacích elektrod atd. Nezbytné však bylo zachovat co nejpřesněji geometrii rozdělovací stěny s klapkami, jelikož její vliv je zanedbatelný na celkové proudění ve filtru. Tuto stěnu je možné vidět na obrázku 7 vpravo.



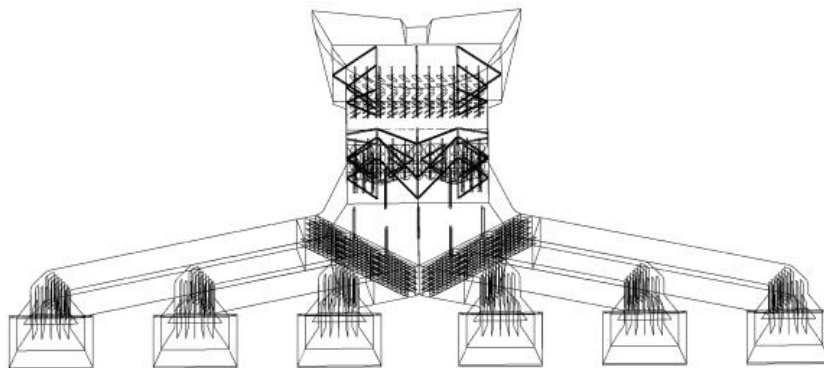
Obrázek 7 Geometrie filtru (vlevo), geometrie rozdělovací stěny s klapkami (vpravo)

Nastavení modelu bylo poměrně jednoduché, jelikož se uvažovalo pouze turbulentní proudění bez jakýchkoliv částic. Předpokládalo se, že částice následují proud spalin a pokud se provede správná distribuce spalin ve filtrační části zařízení,lepší se tím následně i účinnost filtru. První z počítaných geometrií je původní varianta. Následně byl proveden rozbor situace a byly navrženy tři jednoduché modifikace geometrie ve vstupním potrubí pomocí prodloužení jednotlivých vnitřních vestaveb.

Výsledky z tohoto elektrického odlučovače ukázaly, že tyto systémy jsou náchylné na malé změny ve vstupních částech filtrů. Při návrhu těchto zařízení je potřeba se zaměřit i na vstupní spalinovody, jelikož i tato potrubí mají značný vliv na správnou funkci filtračního zařízení, protože proudění uvnitř filtru již není možné usměrnit. Rozdělovací klapky jsou velice silnou zbraní v řešení problémů, ale nejsou dostatečné.

Následující část elektroodlučovače je součástí jednoho z největších zařízení svého druhu v ČR, zároveň se jedná o jedno z nejmodernějších odlučovacích zařízení na našem území. Byly provedeny studie zabývající se prouděním ve spalinovodech s následným rozdělením proudu do jednotlivých částí odlučovače. Studie byly provedeny s různými geometrickými úpravami, které mohou mít vliv na proudění s potenciálním zlepšením filtrační účinnosti.

První částí byl spalinovod z kotle, který obsahuje velké množství zavětrování a dalších geometricky složitých částí, do Ljungströmu. Na výstupu z Ljungströmu je rozdělovací část, která je vyobrazená na obrázku 8. Výpočty spalinovodu daly za vznik rychlostnímu a tepelnému profilu na výstupu z Ljungströmu, které byly použity v následných výpočtech. Další částí studie bylo provést analýzu aktuálního stavu rozdělení proudu do jednotlivých větví.



Obrázek 8 Geometrie spalinovodu za Ljungströmem před vstupem do elektrického odlučovače

Analýza výsledků ukázala, že potenciální zlepšení systému lze provést pouze v části od Ljungströmu do rozdělovací komory. Následně už není, logicky, proud rozdělitelný. Proto se vytvořil submodel i této části, kde se prováděly geometrické úpravy, které by bylo v případě zpřísnění emisních požadavků možné provést pro zlepšení účinnosti filtračního zařízení.

Bylo navrženo velké množství geometrických úprav v této části. Navržené varianty byly tvořeny s ohledem na umístění zavětrování, pro snadnější aplikaci ve spalinovodu.

Designové úpravy nebyly pouze pomocí vnitřních vestaveb, ale některé varianty pracovaly i se změnou vnější části potrubí, avšak tyto varianty nedosáhly dobrých výsledků.

Tento elektrický odlučovač byl podroben velice důkladné analýze stávajícího stavu. Dále bylo navrženo několik potenciálních úprav geometrie, které by mohly v budoucnu zlepšit filtrační proces, pokud by byla potřeba řešit zpřísnující emisní limity.

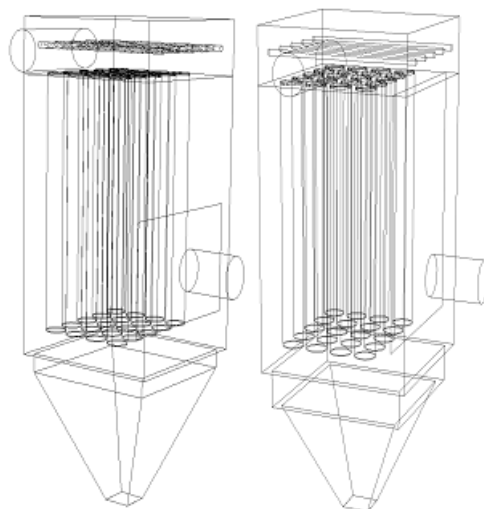
Ačkoliv část elektrického odlučovače jako taková může být stejná, či velice podobná u většiny elektrárenských zařízení, tak největší rozdíly ve stabilitě a funkčnosti zařízení dělají potrubní systémy před a za EO. Proto nelze generalizovat a říci jednoznačně, co je potřeba udělat v dané konfiguraci za úpravy. Nejjednodušší a nejlogičtější by bylo udělat všechno co nejvíce lineárně s minimem změn proudu. V případě změny proudu nejprve srovnat a homogenizovat proudění. A následně pokračovat s další technologií, která by tím, co se děje před ní, byla minimálně ovlivněna. Nicméně takovýto přístup není z finančního, ani zástavbového hlediska proveditelný, proto je nezbytné každý EO řešit samostatně a je složité obecně doporučit nejlepší možné řešení.

3.2 Výzkumná činnost v oblasti látkových filtrů

Návrh látkových filtrů se nezdá být složitou záležitostí, avšak při bližším prozkoumání navrhnutého stavu z pohledu proudové situace a rovnoměrného zatížení jednotlivých hadic se dojde k závěru, že je vhodné využít CFD simulací a předejít nežádoucím jevům vznikajících uvnitř filtru. Tohoto postupu je však využíváno málo a je běžnou praxí, že se k zjištění stávajícího stavu uvnitř filtračního zařízení přistupuje až v případě nějakého problému.

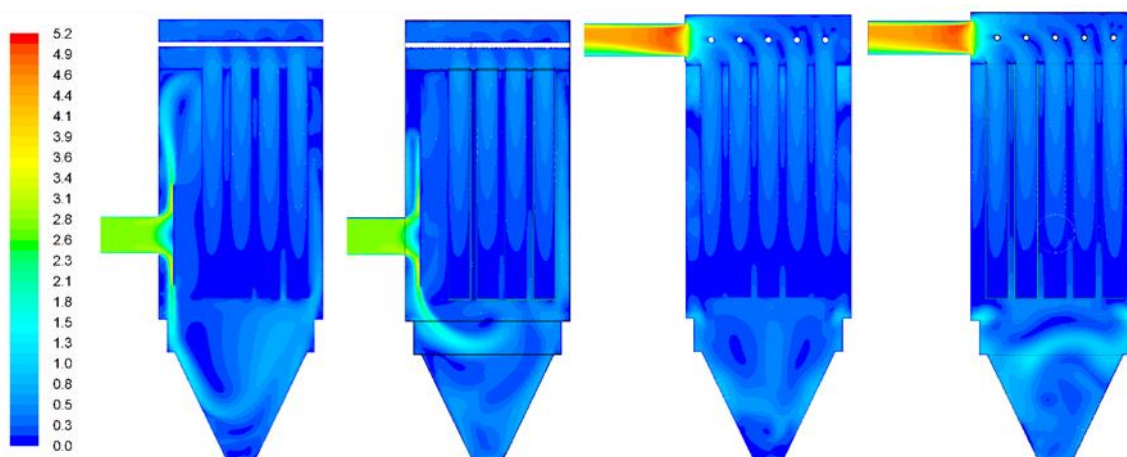
Analýza následujícího filtru byla rozdělena na dvě rozdílné sekce. První částí byla analýza stávající situace a popis tohoto designu spolu s konstrukční úpravou, která měla za cíl zlepšit rozložení rychlostního pole a minimalizovat potenciální poškození filtračních hadic. Druhá část analyzovala vliv zjednodušujících předpokladů na kvalitu výsledných simulací. (Tento požadavek byl podán průmyslovým partnerem pro nedostatek výpočetního výkonu.)

Původní geometrie je zobrazená na obrázku 9 vlevo. Obsahuje dvacet filtračních hadic, nad kterými byla umístěna trubka umožňující proplach. Ve spodní části byla výsypka a před vstupním potrubím byl plech, který měl za cíl rozdělit proud tak, aby spaliny proudili na filtrační hadice shora i zdola. Filtrační hadice byly modelovány jako duté trubky a jejich stěny byly porézním médiem, které propouštěly vzdušinu pouze v jednom směru. Koeficienty nastavení porézní stěny byly zvoleny tak, aby tlaková ztráta odpovídala skutečným hodnotám.



Obrázek 9 Geometrie původního filtru (vlevo), geometrie nového designu (vpravo)

Rozdělení proudu pomocí rozrážecího plechu je možné vidět na obrázku 10. V tomto případě hrozí velké nebezpečí mechanického poškození hadic v horní části u uchycení, jelikož abraze může filtrační hadice „uříznout“. Proto byla navržena varianta na obrázku 9 vpravo. Rozrážecí deska je zde prodloužena tak, aby proud byl usměrněn pouze do dolní části filtrační části neboli pouze do výsypky. Tam se odseparují těžké částice, které nemají dostatečnou energii na vystoupení k hadicím. Hadice jsou chráněny před přímým proudem spalin, takže už nehrozí odříznutí.

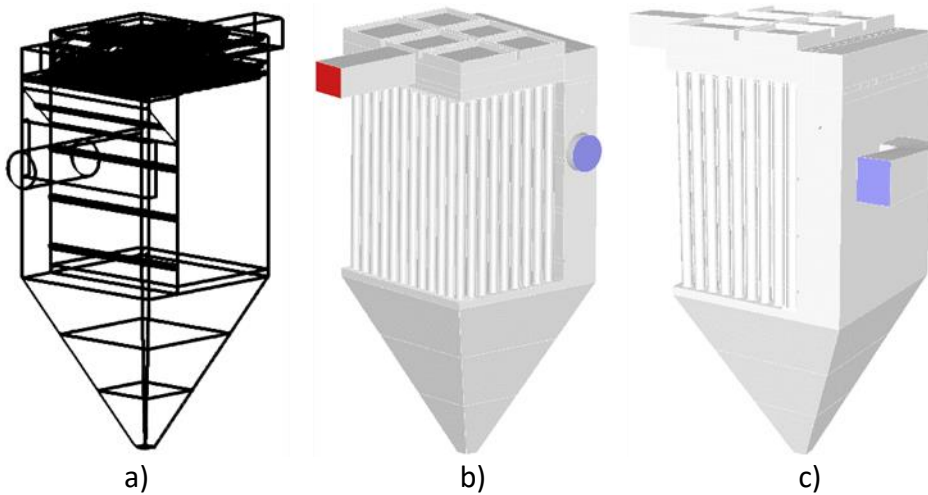


Obrázek 10 Proudové pole v původní geometrii (první a třetí řez), geometrie nového designu (druhý a čtvrtý řez)

Druhá část výzkumu se zabývala analýzou potenciálních zjednodušení modelů pro ušetření výpočetního času při opakování výpočtů při různých provozních stavech. Výchozí variantou pro porovnávání zjednodušení byla zvolena upravená varianta s prodlouženou rozrážecí stěnou, kde platilo, že hadice byly modelovány reálně, tzn. byly duté s porézním médiem místo textilního materiálu. Navrhovaná zjednodušení byla taková, že uvažovala hadice nekruhového průřezu vyplněné tak, že se jednalo pouze o porézní médium. Nejextrémnější varianta spočívala v nahrazení všech hadic jedním velkým porézním blokem. Je potřeba brát v potaz fakt, že zjednodušujícími předpoklady nelze nikdy

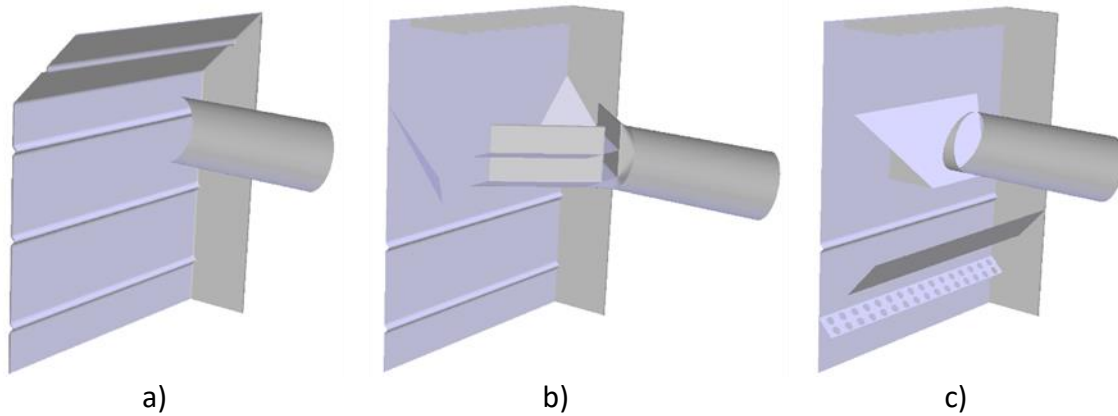
dosáhnout plnohodnotných výsledků. Zjednodušení pomocí porézního bloku bylo příliš radikální, ostatní varianty dosahovaly dobrých výsledků při dodržení správné tlakové ztráty, průřezu jednotlivých hadic a správně zvoleném množství buněk v hadici. Výsledky z této studie byly úspěšně použity pro návrh finální varianty velkého látkového filtru pro elektrárnu Tušimice (včetně porovnání s plným modelem).

Obdobná záležitost se řešila v dalším látkovém filtru pro spalovnu odpadů. V tomto případě bylo potřeba provést studii aktuálního designu s ohledem na usazovací časy pevných částic pro proběhnutí chemických reakcí po přidání katalyzátoru v práškové formě. Uvažovalo se, že se částice usazují na látkových hadicích a ve spodní části výsypky. Následovaly tři výpočty potenciální změny vstupního potrubí do filtru. Původní variantu lze vidět na obrázku 11 a). Dvě z upravených geometrií vstupu je možné vidět na 11 b) a 11 c). Po analýze těchto prvotních výpočtů bylo zjištěno, že ani jedna z uvedených variant nezlepšuje situaci natolik, aby bylo vhodné zasahovat do konstrukce filtru. Proto následovaly výpočty na submodelech, které se zabývají pouze vstupní částí filtru.



Obrázek 11 a) geometrie původního látkového filtru, b) geometrie filtru varianty B, c) geometrie filtru varianty D

Navrhnutých submodelů bylo velké množství, příklady těchto upravených geometrií je možné vidět na obrázku 12 a) až c). V těchto submodelech se sledovalo proudové pole na výstupu ze submodelu (před vstupem do filtrační části/výsypky) a taktéž doba pobytu částic v submodelu. Doba setrvání částic ve filtru je důležitým parametrem pro proběhnutí požadovaných chemických reakcí. Z těchto výpočtů se vybralo několik variant, které byly následně znovu zasazeny do celého filtru.



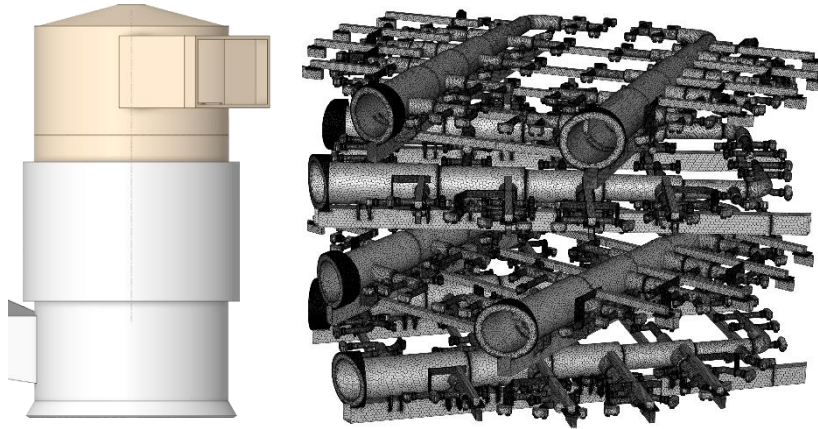
Obrázek 12 a) submodel původní varianty vstupního dílu látkového filtru, b) submodel vstupního dílu varianta 2, c) submodel vstupního dílu varianta 3

Výsledky z navrhnutých variant ukazují na to, že jakékoliv větší zásahy do změny konstrukce nepřinesou zásadní vliv na filtrační proces.

3.3 Výzkumná činnost v oblasti ostatních energetických systémů

Do separačních technologií patří nejen látkové filtry a elektrické odlučovače, ale i další důležité komponenty, jako je již dříve zmíněná SCR technologie, odsíření a další chemické úpravy spalin. Co však většina technologií, nejen v energetice, má společné, je to, že je potřeba řešit správné rozložení proudu tekutiny v daném zařízení tak, aby jednotlivé procesy probíhaly v požadované kvalitě. Což je jedním v nejběžnějších zadání při práci s CFD v oblasti energetických systémů.

Geometrie pláště odsiřovacího zařízení, je zobrazená na obrázku 13 vlevo. Vnější geometrie je poměrně jednoduchá, jedná se o velkou válcovou nádobu o průměru 11,5 [m]. Vnitřní uspořádání je však mnohem složitější. V dolní části je vodní hladina, kam stéká sádrovcová suspenze, která je rozstříkována tryskami ze systému, zobrazeném na témže obrázku vpravo. Samotný průtok spalin je 350 [kg/s], průtok suspenze z těchto trysek je 2722 [l/s], tento průtok je rozdělen do 944 jednotlivých vstříků. Nad těmito tryskami jsou zařazeny separátory kapiček, které mohou být proudem spalin unášeny. Modelování kapiček bylo řešeno pomocí modelu diskretní fáze.

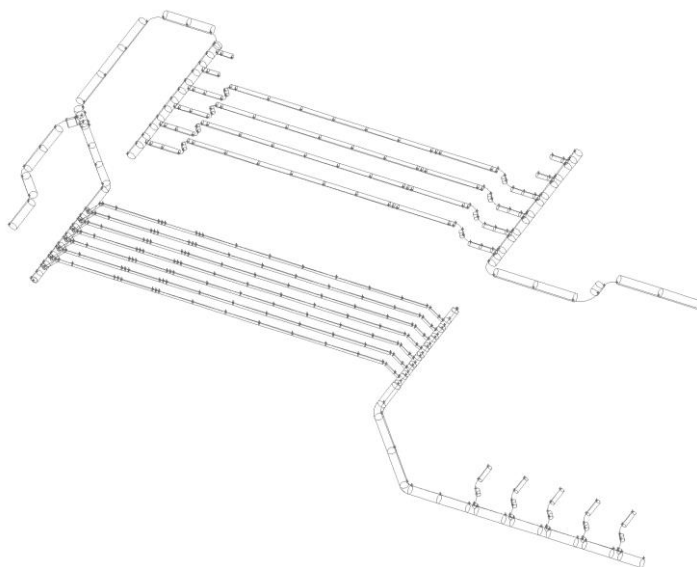


Obrázek 13 Geometrie odsiřovacího zařízení

V tomto projektu se řešilo právě unášení kapiček spalinami v horní části, takže se upravovala geometrie jednotlivých separátorů. Dále se řešila rozdělovací deska v dolní části nad volnou hladinou, jelikož takto velké množství tekutiny může ucpávat jednotlivé díry v rozdělovací desce, což by způsobovalo nerovnoměrně rozdělení proudu spalin v zařízení. DPM model v tomto případě fungoval velice dobře. Chemické procesy v simulacích nebyly zahrnuty, jelikož jejich vliv na zkoumané procesy byl malý.

Následující geometrie na obrázku 14 zobrazuje měřící stanici pro zemní plyn operující na území ČR. V tomto případě se řešilo proudění přes měřící členy, jelikož při měření je potřeba co nejrovnoměrnější profil před průtokoměrem. Uvažovaly se různé turbulizující, či usměrňující členy přidané do potrubí, pro dosažení požadovaných výsledků. Kromě těchto vestaveb se uvažovaly i jiné typy kolen a změny části potrubí. Provedly se i simulace při uzavření jednotlivých potrubí a ovlivnění zbylých větví.

Na tento projekt se aktuálně navázalo a výzkum pokračuje tak, že se uvažuje alternativní médium, v současnosti vodík, než na které byl tento systém navržený.



Obrázek 14 Geometrie potrubního systému pro dopravu plynného média

Tato kapitola je zde pouze jako úvod do širokého spektra řešené problematiky filtrace a úpravy proudu, nejen spalin, v energetickém průmyslu. Bližší téma, kterému se bude následující text věnovat je zaměřený na SCR technologii, která má potenciál do budoucna, jelikož se jedná o zařízení pro kontrolu emisí. Tato technologie bude nezbytně přidávána celosvětově i v budoucnu ke starým zřízením, jelikož emisní limity jsou zpřísňovány v každé zemi zvlášť. A nová zařízení jsou již povinná plnit limity, kterých je možné dosáhnout pomocí právě této technologie. Proto je vybráno téma SCR technologie, jelikož se jedná o nejperspektivnější téma z pohledu ekologie.

3.4 Cíle disertační práce

Tato kapitola se věnuje stanovení konkrétních cílů disertační práce, jež směřuje k hlubšímu porozumění a vylepšení návrhů technologie selektivní katalytické redukce. Primárním zájmem je nejen teoretická analýza, ale především praktická implementace opatření, které povedou k cílenému zvýšení účinnosti SCR systémů. Jsou stanoveny tři cíle, které si tato práce dává za své řešit.

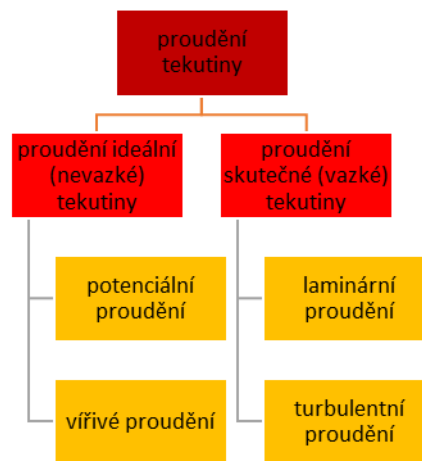
- 1) Návrh obecně použitelných úprav potrubního systému
Stanovení konkrétních úprav potrubního systému s cílem zlepšit proudovou situaci na vstupu do katalyzátoru, což povede k efektivnějšímu průběhu selektivní katalytické redukce a následně i ke snížení emisí oxidů dusíku.
- 2) Návrh obecně doporučitelných míst vstřikování AdBlue®
Identifikace optimálních míst pro vstřikování DEF s ohledem na dosažení homogenního rozložení amoniaku na vstupu do katalyzátoru. Cílem je maximalizovat účinnost redukce NO_x a minimalizovat potenciální nehomogenity ve směsi reaktivních látek.
- 3) Tvorba komplexního modelu SCR systému v ANSYS Fluent
Vytvoření komplexní simulace v programu ANSYS Fluent, zahrnující všechny nezbytné modely pro co nejpřesnější reprodukci fyzikálních procesů v systému SCR. Cílem je poskytnout komplexní a věrohodný soubor poznatků získaných pomocí provedených simulací, aby na jejich základě pak bylo možné postavit samostatné experimentální zařízení pro ověřených získaných dat.

4 Úvod do proudění tekutin s částicemi

Počítačová dynamika tekutin neboli CFD, je rychle se rozvíjející obor, který je poměrně náročný. Podstatou CFD je numerické řešení rovnic, které pro většinu problémů nemají analytické řešení.

4.1 Rovnice mechaniky tekutin

Mechanika tekutin je obor, který zahrnuje rozsáhlou oblast fyziky. Zde se text vymezí pouze na proudění tekutin. I tak je však potřeba blíže specifikovat o čem jde, jelikož i proudění tekutin je poměrně rozsáhlé téma. Zde se jedná o proudění turbulentní. Následující schéma 15 ukazuje zařazení turbulentního proudění do oblastí modelování proudění tekutin. [85]



Obrázek 15 Rozdělení proudění tekutin podle vlastností tekutiny

Nadále se bude uvažovat pouze proudění reálné tekutiny s tím, že se očekává turbulentní proudění, jež se v praxi většinou stanovuje pomocí hodnoty Reynoldsova čísla. Dělení podle kritické hodnoty tohoto čísla však není zcela jednoznačné, jelikož vliv na druh proudění nemá pouze tato hodnota, ale i složitost geometrie a další parametry. Možnosti modelování úloh výpočtové mechaniky tekutin jsou závislé na výpočetní síle počítačů (hardware), avšak díky dynamickému vývoji hardwaru se i tyto výpočty značně rozvíjí a dovolují stále lepších a přesnějších výpočetních simulací. Důvod, proč je nezbytný kvalitní hardware, je ten, že numerické výpočty v CFD řeší složité soustavy nelineárních parciálních diferenciálních rovnic.

Mechanika tekutin jako taková se snaží najít hodnoty čtyř základních veličin. Jedná se o tlak p , vektor rychlosti \vec{v} , teplotu T a hustotu ρ . K řešení těchto neznámých se používají tři fyzikální zákony. První z nich je zákon zachování hybnosti, druhý je zákon zachování hmoty a třetí je zákon zachování energie. Dále se používá stavová rovnice. [86] [87]

Stavová rovnice pro ideální plyn je zapsána vztahem (4-1). [86]

$$\frac{p}{\rho} = rT \quad (4-1)$$

V této rovnici vystupuje tlak p , hustota ρ , absolutní teplota T a specifická plynová konstanta r .

Zákon zachování hmoty popisuje rovnice kontinuity (4-2). Jedná se o obecný zápis rovnice kontinuity platný jak pro nestlačitelné, tak stlačitelné proudění. Stejně tak pro stacionární a nestacionární proudění. Rovnice obsahuje hustotu ρ , čas t a složku rychlosti v_i . Pravá strana S_m vyjadřuje zdroje hmoty, může se jednat třeba o vypařování kapalně fáze. [86] [87] [88] [89]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = S_m \quad (4-2)$$

Zákon zachování hybnosti je reprezentovaný Navierovo – Stokesovou rovnicí, která je analyticky řešitelná pouze ve výjimečných případech, a proto se přistupuje k jejímu numerickému řešení. Hybnost je vektorem, proto je nezbytné k ní tak přistupovat a rozepsat ji do třech složek, viz. rovnice (4-3). V této rovnici se nově objevuje tlak p , tenzor napětí τ_{ij} , a vnější síly F_i , které mohou obsahovat příspěvky, jež se odvíjejí od použitých specifických modelů, například porézní média, gravitace a další. [85] [86] [87] [88] [89]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \nabla \cdot (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + F_i \quad (4-3)$$

Tenzor napětí vystupující v Navierově – Stokesově rovnici je vyjádřen vztahem (4-4). Tento vztah obsahuje dynamickou viskozitu μ a Kroneckerovo delta δ_{ij} . [89]

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) \quad (4-4)$$

Poslední z výše zmíněných zákonů, zákon zachování energie můžeme zapsat rovnicí (4-5). Měrná entalpie je h , q_j je tepelný tok a S_h jsou další tepelné zdroje. [89]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho h v_j) = \frac{\partial p}{\partial t} + v_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} + S_h \quad (4-5)$$

Tyto rovnice jsou nezbytnou podmínkou pro řešení proudění tekutin, ale jejich analytické řešení je pro praktické případy natolik složité, že je nezbytné použít numerické přístupy. Problém se nadále komplikuje, pokud se předpokládá turbulentní proudění, pro jeho řešení se používají tři odlišné metody, částečně založené na empirických zkušenostech. [90]

První z přístupů je metoda přímé numerické simulace (DNS – Direct Numerical Simulation). Tato metoda je použitelná pouze za určitých specifických předpokladů,

zároveň je velice náročná na výpočetní techniku a čas. Obecně řeší nestacionární proudění. DNS řeší přímo základní rovnice soustavy rovnic, které jsou výše uvedené. Výsledky z těchto simulací jsou srovnatelné s výsledky z měření. [89] [90]

Druhý přístup je metoda velkých vírů (LES – Large Eddy Simulation). „Tato metoda je založena na modelování velkých vírů, které lze zachytit výpočetní sítí.“ [90] V této metodě jsou velké víry řešeny pomocí DNS metody na prostorově filtrovaném poli rychlosti a vliv malých vírů je zahrnut pomocí subgridního modelu. Tuto metodu lze aplikovat na řešení různých problémů již s dostupnou výpočetní technikou. [90]

Třetím přístupem je metoda Reynoldsova časového středování Navier – Stokesových rovnic (RANS – Reynolds Averaged Navier – Stokes Equations). Tento přístup je v běžné praxi nejvíce používaným. Jedná se o statistický přístup popisu turbulence. [89] [90]

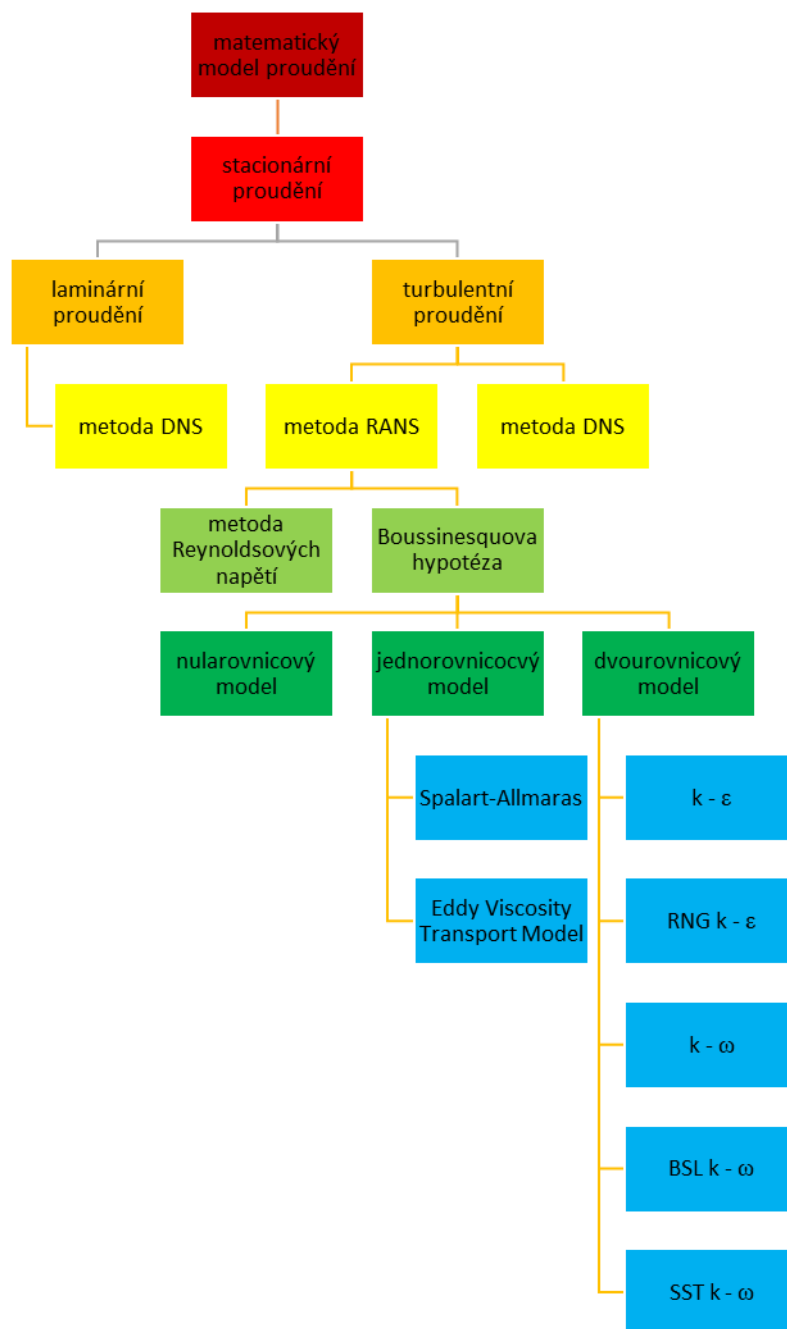
Jelikož turbulentní proudění má nahodilý charakter, je potřeba uvažovat všechny fyzikální veličiny (tlak, teplotu, rychlost, hustotu atd.) jako funkce času. „Při aplikaci statistických metod je ale proudění stabilní, tj. pokud vytvoříme průměrnou hodnotu v různých časových okamžicích a z různě dlouhých časových záznamů, dostaneme vždy tutéž hodnotu.“ [87] [90] V tomto přístupu je každá z veličin vyjádřena jako součet své střední hodnoty a fluktuace, na příkladu rychlosti je toto vidět v rovnici (4-6).

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i \quad (4-6)$$

V předchozí rovnici tedy platí, že v_i je složka rychlosti, \bar{v}_i je střední hodnota složky rychlosti a v'_i je fluktuační složka rychlosti. Dosazením takových rozkladů lze upravit všechny tři dříve zmíněné základní rovnice, které se po úpravě využívají v RANS modelech. Tyto úpravy lze nalézt například v [85], [88], [89] a [90]. Složky tenzoru napětí je potřeba rozložit podle rovnice (4-6), čímž se dostane vztah (4-7).

$$\tau_{ij} = \bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}^R \quad (4-7)$$

V této rovnici na pravé straně je střední hodnota smykového napětí $\bar{\tau}_{ij}$ a symetrický tenzor Reynoldsova napětí τ_{ij}^R . Všechny metody RANS obsahují Reynoldsovo napětí, v čemž spočívá základní problém těchto metod. Tato napětí přidávají do systému šest nových neznámých a systém rovnic proto není uzavřen. Proto se ke středovaným rovnicím přidávají rovnice a empirické vztahy, které tvoří řešitelný systém. Tyto uměle dosazené rovnice se nazývají modely turbulence. Rozdělení těchto modelů je možné vidět na obrázku 16. Následující text je zaměřen pouze na metodu RANS, konkrétně na model turbulence *SST* $k - \omega$. [90]



Obrázek 16 Přehled metod modelování ustáleného proudění [90]

Boussinesquova hypotéza je jedním z přístupů k řešení proudění pomocí RANS. Tato hypotéza předpokládá, že turbulentní napětí a toky jsou úměrné gradientu střední rychlosti, koncentrace, teploty atd. Při řešení pomocí této hypotézy se v turbulentním proudění uvažuje obdobný vztah pro turbulentní napětí, který je analogií vztahu pro napětí dle Newtonova vztahu, který se používá v laminárním proudění. Pro laminární proudění platí rovnice (4-8) a pro turbulentní proudění rovnice (4-9). [89] [90]

Smykové napětí $\overline{\tau_{ij}}$ se vypočítá pomocí rovnice (4-8). [90]

$$\overline{\tau_{ij}} = \mu \left(\frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4-8)$$

Reynoldsovo turbulentní napětí τ_{ij}^R se vypočítá pomocí součinu hustoty ρ , fluktuační rychlosti složky v_i' fluktuační rychlosti složky v_j' , viz rovnice (4-9) uprostřed. Používá se i zápis pomocí turbulentní dynamické viskozity μ_t v součinu se změnou střední rychlosti což je vidět na pravé straně rovnice. [89] [90]

$$\tau_{ij}^R = -\rho \overline{v_i' v_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \rho \overline{v_k' v_k'} \quad (4-9)$$

Díky této úpravě již není potřeba řešit šest neznámých Reynoldsových napětí, jelikož se jejich tenzor nahradil tenzorem viskózních napětí dle (4-8), který má jedinou neznámou a tou je turbulentní viskozita. Turbulentní viskozita není závislá na proudící látce, je lokální vlastností proudění. [89]

Boussinesquova hypotéza dala základ vzniku turbulentním modelům, které hledají řešení turbulentní viskozity pomocí doplňkových rovnic. Počet diferenciálních rovnic použitý k hledání výsledku dává název těmto modelům, přičemž nularovnicové modely jsou čistě algebraické. [85] [89]

Turbulentní model SST $k - \omega$ hledá turbulentní viskozitu pomocí dvou dodatkových diferenciálních rovnic. Název tohoto modelu již napovídá, že jedna z rovnic je rovnice řešící měrnou turbulentní kinetickou energii k . Druhá rovnice řeší dosud nezmíněnou specifickou míru disipace ω . Tento model má široké využití v běžné praxi. [90] [91] Základní rovnice modelu vychází z modelu BSL $k - \omega$ a tyto dvě rovnice popisují vztahy (4-10) a (4-11). [88] [89]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k + G_b \quad (4-10)$$

Ve vztahu (4-10) vystupuje efektivní difuzivita turbulentní kinetické energie Γ_k , vznik turbulentní kinetické energie v důsledku střední rychlosti G_k , disipace turbulentní kinetické energie v důsledku turbulence Y_k . Následuje zdroj turbulentní kinetické energie definovaný uživatelem S_k a posledním členem je G_b , který udává vznik turbulentní kinetické energie v důsledku vztaku. [88]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega + G_{\omega b} \quad (4-11)$$

V rovnici (4-11) vystupují další členy, které jsou podobné těm v první rovnici (4-10). Γ_ω reprezentuje efektivní difuzivitu specifické míry disipace, G_ω vznik specifické míry disipace, Y_ω je disipace specifické míry disipace v důsledku turbulence. Dalším z členů na pravé straně je příčná difuze D_ω , S_ω reprezentuje zdroj specifické míry disipace

definovaný uživatelem a posledním členem je $G_{\omega b}$. Tento člen popisuje vznik specifické míry disipace v důsledku vztlaaku. [88]

BSL model kombinuje výhody Wilcoxova modelu a $k - \varepsilon$ modelu, přesto nedokáže správně předpovědět vznik a velikost separace proudění u hladkých povrchů. Hlavním důvodem je, že oba modely nezohledňují přenos turbulentního smykového napětí, což má za následek nadhodnocenou předpověď turbulentní viskozity. Model *SST* $k - \omega$ zahrnuje všechna vylepšení modelu BSL, a navíc zohledňuje přenos turbulentního smykového napětí v definici turbulentní viskozity. Díky těmto vlastnostem je model přesnější a spolehlivější pro větší množství proudění než model BSL či standardní $k - \omega$. [86] [87] [88] [89]

Problematika numerického řešení soustavy parciálních diferenciálních rovnic je komplikovaná a nad rámec této práce. V této kapitole jsou uvedeny základní rovnice, ze kterých se vychází. Další doplňující informace lze nalézt v [88], nicméně ani zde nejsou uvedeny všechny nezbytné podklady ke zdárnému vyřešení rovnic. Komplexnější vysvětlení teoretických rovnic lze nalézt například v [86], [87] a [89].

4.2 Porézní zóna

Model porézního média je použitelný pro velké množství případů jednofázového a vícefázového proudění, včetně proudění skrze filtrační papíry, perforované desky, rozdělovače proudění, katalyzátory atd. Při použití tohoto modelu se definuje zóna buněk, ve kterých je tento model aplikovaný, a tlaková ztráta v proudění je určena prostřednictvím vstupních hodnot v rovnici (4-12). Přenos tepla porézním médiiem může být reprezentován pomocí tepelné rovnováhy mezi médiiem a proudící tekutinou, nicméně lze provést výpočet i bez tepelné rovnováhy, což v tomto případě nebude uvažováno. Energetickou rovnici aplikovanou pro rovnovážný stav v porézním médiu popisuje vztah (4-15). [88]

Model porézního média zahrnuje empiricky stanovený odpor proudění ve vybrané oblasti použití. Model v podstatě přidává propad hybnosti v této oblasti. Z toho vyplývají některé předpoklady a omezení. [88]

- Efekt porézního média na turbulentní pole je pouze aproximovaný. [88]
- Model porézního média v programu ANSYS Fluent pro jednofázové a vícefázové proudění předpokládá, že pórovitost je izotropní a může se měnit v prostoru (směru) a čase. [88]
- Člen odporu hybnosti porézního média a zdroj tepla se počítají pro každou fázi zvlášť. [88]
- Interakce mezi porézním médiem a rázovými vlnami se neuvažuje. [88]

Použitím porézního média se mění výpočet tak, že se ke standardní rovnici řešící proudění přidá další zdroj hybnosti. Zdrojový člen se skládá ze dvou částí: viskózního ztrátového členu, první člen na pravé straně rovnice (4-12), a setrvačného ztrátového členu, druhý člen na pravé straně též rovnice. [88]

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |\vec{v}| v_j \right) \quad (4-12)$$

Platí tedy, že S_i je zdrojový člen hybnosti pro jednotlivé souřadnice, $|\vec{v}|$ je velikost vektoru rychlosti a D a C jsou předepsané matice vycházející z Darcyho zákona, potažmo ze setrvačných ztrát. Tato ztráta hybnosti přispívá k tlakovému gradientu v porézni zóně, vytváří tedy tlakovou ztrátu úměrnou rychlosti proudění tekutiny. [88]

Matice D_{ij} vychází z Darcyho zákona. Jedná se o diagonální matici, kde na hlavní diagonále jsou převrácené hodnoty permeability α , kterou lze stanovit podle následujícího vztahu (4-13). [88]

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = - \frac{\mu}{\alpha} v_i \quad (4-13)$$

Matice C_{ij} vychází ze setrvačných ztrát, jedná se taktéž o diagonální matici, kde na hlavní diagonále však jsou členy C_{2ij} , které se vypočítají z rovnice na řádce (4-14). [88]

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = - \sum_{j=1}^3 C_{2ij} \left(\frac{1}{2} \rho v_j |\vec{v}| \right) \quad (4-14)$$

Tyto dvě předchozí rovnice jsou důležité, jelikož jsou hlavním zdrojem informací pro správné modelování porézni zóny. Bez nich není možné korektně nastavit model a provést výpočty. [88]

ANSYS Fluent řeší energetickou rovnici v porézni zóně standardně, pouze s malou úpravou členu toku tepla vedením a nestacionárního členu. V simulacích, kde se uvažuje mezi porézním médiem a proudící tekutinou tepelná rovnováha, se pro vedení tepla v porézni zóně používá efektivní vodivost a nestacionární člen zahrnuje tepelnou setrvačnost pevné části porézního média v dané oblasti. Upravená rovnice použitá v tomto případě je rovnice (4-15). [88]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f e_f + (1 - \gamma) \rho_s e_s) + \frac{\partial}{\partial x_k} (v_k (\rho_f e_f + p)) \\ & = S_f^h + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_k} - \left(\sum_i h_i J_{ik} \right) + (\tau_{kj} v_j) \right] \end{aligned} \quad (4-15)$$

Porozita porézního média je γ , ρ_f je hustota tekutiny, měrná energie tekutiny e_f , hustota pevného média ρ_s , měrná energie pevného média je e_s a S_f^h je zdrojový člen entalpie tekutiny. [88]

Efektivní tepelnou vodivost pro porézní zónu (4-16) program ANSYS Fluent počítá jako objemový průměr tepelné vodivosti tekutiny a pevného tělesa. Součinitel tepelné vodivosti pevného média je k_s a tekutiny k_f . [88]

$$k_{eff} = \gamma k_f + (1 - \gamma)k_s \quad (4-16)$$

Model porézního média je jedním z nejběžněji používaných modelů při modelování filtračních zařízení energetických strojů. Používá se ke zjednodušení geometricky složitých částí, kde lze provést homogenizaci složitých tvarů, jako jsou rozdělovací desky, či katalyzátory. Popis změny základních rovnic mechaniky tekutin je zde uveden pro přehlednost, další informace lze nalézt ve [88].

4.3 Modelování diskrétní fáze

V současné době existují dva přístupy k numerickému výpočtu vícefázového proudění. Eulerův-Lagrangeův přístup a Euler-Eulerův přístup, který zde není uveden. Tato kapitola uvádí základní informace o modelování diskrétní fáze (anglicky Discrete Phase Model, neboli DPM) Eulerovo-Lagrangeovým přístupem v programu ANSYS Fluent. [88]

Tekutá fáze je řešená jako kontinuum pomocí Navier-Stokesových rovnic, zatímco disperzní fáze je řešená sledováním velkého počtu částic, bublin nebo kapek v počítaném proudovém poli. Disperzní fáze si může s kapalnou fází vyměňovat hybnost, hmotnost a energii. [88]

Tento přístup je jednodušší, pro případy, kdy disperzní fáze zaujímá poměrově nízký objem (maximálně 10 %), i když je přijatelný její vyšší hmotnostní podíl ($\dot{m}_{částic} \geq \dot{m}_{tekutiny}$). Trajektorie částic, či kapek, se během výpočtu počítají jednotlivě v intervalech. Díky tomu je model vhodný pro modelování rozprašovacích sušiček, spalování uhlí, kapalných paliv a některých proudění s částicemi, ale je nevhodný pro modelování směsí kapaliny a kapaliny, fluidních vrstev nebo jakýchkoli aplikací, kde nelze zanedbat objemový podíl druhé fáze. Pro takové aplikace lze interakce mezi částicemi zahrnout pomocí jiného modelu, který je popsán v [88].

Numerické modelování mnoha jednotlivých částic je neproveditelné, proto se počítá s tím, že částice jsou agregovány do shluků částic, které dostatečně reprezentují chování v proudu. Následující text dává do rovnosti shluky částic a částice, jelikož ve výpočtech se vždy uvažují shluky částic. Výpočetní program ANSYS Fluent řeší trajektorii částice diskrétní fáze integrováním rovnováhy sil na částice. Tato rovnováha sil mezi setrvačnou silou částice s dalšími silami působící na částici je zapsaná rovnicí (4-17). [85] [88]

$$m_p \frac{dv_{p,i}}{dt} = m_p \frac{v_i - v_{p,i}}{\tau_r} + m_p \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i \quad (4-17)$$

V této rovnici reprezentuje m_p průměrnou hmotnost shluku částic, $v_{p,i}$ složky průměrné rychlosti shluku částic, ρ_p průměrnou hustotu shluku částic. F_i jsou složky přídatných sil a g_i jsou složky gravitační síly. τ_r je průměrný čas charakteristický shluku částic dle vztahu (4-18). [88]

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \quad (4-18)$$

V této rovnici platí, že μ je dynamická viskozita tekutiny, d_p průměr částice, C_d odporový součinitel částice a Re je Reynoldsovo číslo. [88]

$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{v}_p - \vec{v}|}{\mu} \quad (4-19)$$

Přirozenou součástí pohybu částic je i jejich rotace a jako taková může mít významný vliv na jejich trajektorii pohybu v tekutině. U velkých částic s velkým momentem setrvačnosti je tento vliv ještě výraznější. Pokud se v těchto případech při simulacích nezohledňuje jejich rotace, mohou se výsledné trajektorie výrazně lišit od skutečných drah. Pro zohlednění rotace částic se řeší další ODR pro moment hybnosti částice. [88]

$$I_p \frac{d\omega_{p,i}}{dt} = \frac{\rho_f}{2} \left(\frac{d_p}{2}\right)^5 C_\omega \sqrt{\Omega_k^2} \cdot \Omega_i = M_i \quad (4-20)$$

V této rovnici vystupují moment setrvačnosti částice I_p , jenž se vypočítá pomocí vzorce (4-22), dále složky úhlové rychlosti částice $\omega_{p,i}$, rotační odporový koeficient C_ω , složky točivého momentu M_i a Ω_i jsou složky relativní úhlové rychlosti mezi částicí a tekutinou, které lze vypočítat pomocí vztahu (4-21). [88]

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{v} - \vec{\omega}_p \quad (4-21)$$

Pro kulovou částici se vypočte moment setrvačnosti pomocí vztahu (4-22).

$$I_p = \frac{\pi}{60} \rho_p d_p^5 \quad (4-22)$$

Pohyb a chování shluku částic může být dále ovlivněno několika dalšími fyzikálními ději, které je možné použít v simulaci. Jedná se například o působení gravitace, termoforézní síla, Brownova síla, Saffmanova vztlaková síla či Magnusova vztlaková síla. [88] Nicméně žádný z těchto dějů není v tomto případě uvažovaný, proto není potřeba bližšího popisu.

4.4 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky jsou klíčovým prvkem v CFD. Tyto podmínky určují, jakým způsobem se tekutina chová na hranicích simulovaného prostoru. Správné definování okrajových podmínek je nezbytné pro vytvoření realistického a relevantního modelu proudění. Správná volba okrajových podmínek závisí na konkrétním problému, který se modeluje, a na přesných podmínkách v modelovaném díle. Špatně definované okrajové podmínky mohou vést k nerealistickým výsledkům simulace, takže je důležité věnovat jim dostatečnou pozornost. [88]

Okrajová podmínka „velocity inlet“, česky by se dalo přeložit jako „rychlostní vstup“, je okrajová podmínka použitá pro definování proudění na vstupu do modelu. Při použití této okrajové podmínky je nutné zadat rychlost vstupující tekutiny. To může být určeno konstantní hodnotou rychlosti nebo může být závislá na čase, či poloze. Je taktéž důležité určit směr vstupující tekutiny. V některých případech je nezbytné definovat další veličiny, jako je teplota nebo koncentrace částic apod.

Další používaná okrajová vstupní podmínka je „mass flow inlet“, česky by se dalo přeložit jako „průtokový vstup“. Tato podmínka se používá pro modelování toku tekutiny nebo plynu, který vstupuje do simulovaného prostoru s konstantním hmotnostním tokem, což zahrnuje jak rychlost, tak hustotu. Stejně jako v předchozí okrajové vstupní podmínce je možné definovat i některé další doplňující parametry, kupříkladu teplotu či koncentraci určitých látek. [88]

Další okrajovou podmínkou, která se používá v simulacích zde uvedených, je podmínka „interior“, kterou lze přeložit jako „vnitřek“, či „interiér“. Používá se pro definici chování tekutiny uvnitř simulovaného prostoru a neprovádí žádnou specifickou funkci. Tato podmínka slouží k oddělení jednotlivých oblastí, sdílejících stejné plochy tak, aby síť mezi nimi byla navazující. Tato podmínka může být připravena a efektivně použita i jako odečítací plocha během výpočtů, či následném vyhodnocení. [88]

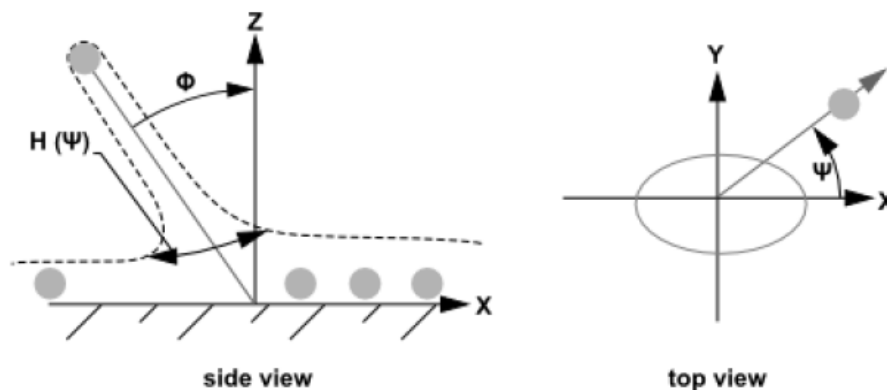
Výstupních okrajových podmínek je několik typů. Nejběžněji používanou, která je aplikovaná i v následujících simulacích, je podmínka typu „pressure outlet“, česky „tlakový výstup“. Používá se na výstupu nebo na hranici simulovaného prostoru, kde proudění opouští tento prostor. Zadává se požadovaná hodnota výstupního tlaku na příslušné části hranice simulace. [88]

Poslední ze zmíněných okrajových podmínek je „wall“, česky „stěna“. Tato podmínka se používá pro modelování chování tekutiny nebo plynu na povrchu pevného objektu, což může být stěna kanálu, povrch tělesa, nebo jakákoli jiná pevná hranice. Na stěně je implicitně předpokládána nulová rychlost tekutiny nebo plynu. V blízkosti stěny vytváří okolní proud tekutiny tzv. „mezní vrstvu“. To je oblast, kde rychlost tekutiny stoupá od nuly na stěně až na rychlost hlavního proudu. Tato vrstva má zásadní význam při analýze aerodynamických jevů. Používá se i pro řešení přestupu tepla na povrchu stěny. Okrajová podmínka stěny se používá ve velkém množství aplikací, kde je důležité simulovat interakci tekutiny s pevnými povrchy. To může zahrnovat analýzu

aerodynamiky vozidel, proudění vzduchu v budovách, simulaci chlazení elektronických zařízení a mnoho dalších případů. Správné modelování stěn je klíčové pro dosažení realistických výsledků v CFD simulacích. Vzhledem k povaze řešené problematiky této práce je potřeba řešit i chování částic, v tomto případě kapiček, ve styku se stěnou. [88]

Interakci částic a stěny lze řešit několika přístupy. Nejjednodušší je podmínka „reflex“, která odrazí částici zpět do proudu pod úhlem, stanoveným pomocí předem definovaných pravidel, které jsou závislé například na drsnosti stěny. Pro částice tvořené tekutinou je však doporučeno na stěně používat jiný typ podmínky. [88]

Běžně používaná podmínka je „Wall Jet“. Tato okrajová podmínka poskytuje rozsah směrů a rychlostí dorazů při interakci tekuté kapičky se stěnou. Je vhodná pro situace, kdy kapky narážejí na horkou stěnu, kde se netvoří kapalným film, ale kapky se odrážejí nebo ulpívají na stěně v závislosti na nárazových vlastnostech. Směr a rychlost kapek jsou dány výsledným tokem hybnosti, který je funkcí úhlu dopadu ϕ a Weberova čísla We . Grafické zobrazení chování „Wall Jet“ je vyobrazené na obrázku 17. [88]



Obrázek 17 Chování okrajové podmínky „Wall Jet“

Tato okrajová podmínka předpokládá analogii s nárazem neviskózního proudu na pevnou stěnu. Rovnice (4-23) ukazuje analytické řešení pro osově symetrický náraz za předpokladu empirické funkce pro výšku vrstvy H jako funkce odrazového úhlu kapky Ψ . [88]

$$H(\Psi) = H_{\pi} e^{\beta(1-\frac{\Psi}{\pi})} \quad (4-23)$$

V rovnici (4-23) platí, že H_{π} je výška vrstvy při $\Psi = \pi$ a β je konstanta určená na základě zachování hmoty a hybnosti. Pravděpodobnost, že kapka opustí bod dopadu pod úhlem mezi Ψ a $\Psi + \delta\Psi$ je dáno integrací výrazu $H(\Psi)$. Výpočet odrazového úhlu je dán vztahem na řádku (4-24). [88]

$$\Psi = -\frac{\pi}{\beta} \ln[1 - P(1 - e^{-\beta})] \quad (4-24)$$

Zde je P náhodné číslo mezi hodnotu 0 a 1. Výraz β je dán následujícím vztahem (4-25). Jedná se o zjednodušený výpočet, lze využít články od Naber a Reitz [92]. [88]

$$\sin(\phi) = \frac{e^\beta + 1}{(e^\beta - 1) \left(1 + \left(\frac{\pi}{\beta}\right)^2\right)} \quad (4-25)$$

Při modelování dopadu kapek na velmi horkou stěnu je tedy doporučeno používat okrajovou podmínku „Wall Jet“, jelikož se předpokládá, že pod dopadající kapičkou je vrstva páry, která zabraňuje kontaktu kapičky s horkým povrchem. Toto je známo jako Leidenfrostův jev. [88] [93]

Pomocí modelování diskretní fáze je možné zjišťovat chování částic a kapek v proudu vzdušiny, navíc lze zkoumat jejich vliv na spojitou fázi (vzdušinu). V programu ANSYS Fluent je k dispozici několik vztahů pro přenos tepla a hmoty, označovaných jako „zákony“. Těchto „zákonů“ je sedm a jejich užití je uvedeno v následující tabulce. Úplný popis zákonů je v [88].

Tabulka 1 Typ částice, jejich vlastnosti a používané zákony [88]

Typ částice	Popis	Používané „zákony“
Nehmotná	-	-
Inertní	inertní/ohřev nebo chlazení	1, 6
Kapka	ohřev/vypařování/var	1, 2, 3, 6
Spalovací	ohřev; vývin těkavých látek; heterogenní povrchové reakce	1, 4, 5, 6
Multikomponentní	multikomponentní kapičky/částice	7

Následující práce se zaměřuje na SCR technologii, která pracuje s AdBlue®, což je dvousložková tekutina skládající se z vody a močoviny, proto následující text stručně popíše pouze multikomponentní typ částice. Vícesložkové částice jsou v programu ANSYS Fluent popsány jako kapkové částice obsahující směs několika složek, či druhů. Hmotnost částice m_p se vypočítá jako suma všech jejích složek podle vztahu (4-26). [88]

$$m_p = \sum_i m_i \quad (4-26)$$

Hustota částice ρ_p může být konstantní, nebo průměrovaná objemem podle (4-27). [88]

$$\rho_p = \left(\sum_i \frac{m_i}{m_p \rho_i} \right)^{-1} \quad (4-27)$$

Rychlost odpařování vícesložkové kapky se vypočítá jako součet rychlostí odpařování jednotlivých složek i . Výpočet probíhá pomocí vztahu (4-28). [88]

$$\frac{dm_i}{dt} = A_p M_{w,i} k_{c,i} (C_{i,s} - C_{i,\infty}) \quad (4-28)$$

V rovnici (4-28) platí, že m_i je hmotnost jednotlivé komponenty. Plocha kapky je A_p , molární hmotnost i -té složky $M_{w,i}$, koeficient přenosu hmoty složky i je $k_{c,i}$, $C_{i,s}$ a $C_{i,\infty}$ jsou koncentrace i -té složky na povrchu kapičky a v jejím objemu. [88]

Rovnice pro teplotu vícesložkové částice se skládá z výrazů pro radiaci, konvekci a odpar. Energetická rovnice pro multikomponentní kapku je (4-29). [88]

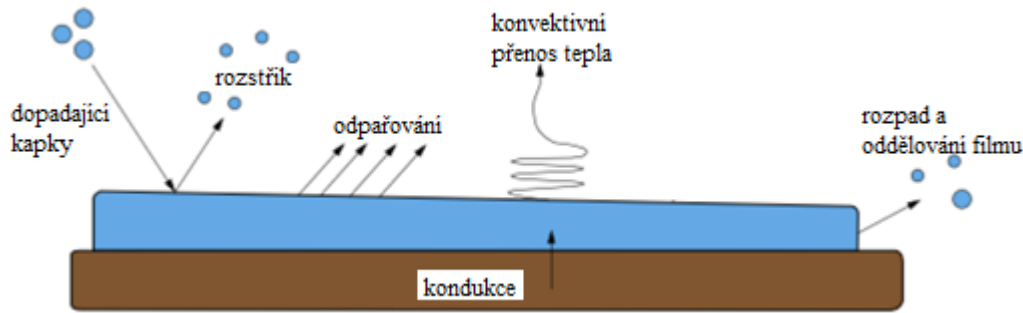
$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = A_p \varepsilon_p \sigma (\Theta_R^4 - T_p^4) + \alpha_p A_p (T_\infty - T_p) + \sum_i \frac{dm_i}{dt} (h_{vap,i}) \quad (4-29)$$

V této rovnici značí m_p hmotnost částice, c_p měrná tepelná kapacita kapky. ε_p je emisivita částice, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, Θ_R je radiační teplota. Teplota částice je T_p , α_p je součinitel přestupu tepla, T_∞ je teplota proudícího média (kontinua) a $h_{vap,i}$ je latentní výparné teplo i -té složky. Bližší informace o této rovnici a jejich jednotlivých členech lze opět nalézt v [88].

ANSYS Fluent má specifickou okrajovou podmínku pro simulaci kapek narážejících do stěn tvořících tenké kapalinové filmy. Jedná se o Lagrangeův model kapalinového filmu, který využívá nestacionární Lagrangeovy částice. Kromě tohoto modelu, existuje ještě Eulerovský kapalinový film, nicméně jeho využití zde dle [88] není vhodné.

Tvorba kapalinového filmu na stěně může být důležitým faktorem pro SCR procesy. Reakce oxidů dusíku s amoniakem je dobře známý děj a používaný způsob pro redukci emisí. Tato technologie se používá celosvětově pro plnění přísných emisních norem NO_x . SCR technologie se potýká s několika technickými problémy. Zejména se jedná o únik čpavku (který se přidává do technologie), krystalizaci močoviny a tvorbu usazenin při nízkých teplotách. Nezahrnutí modelu kapalinového filmu do výpočtů může vést k chybným závěrům předpovědi konverze NO_x . [88]

Model kapalinového filmu v ANSYS Fluent umožňuje modelovat náraz kapky na těnu a vytvoření kapalinového filmu. Model lze rozdělit do čtyř hlavních podsekcí: interakce během počátečního nárazu na stěnu, následné rozlévání po povrchu, výpočet proměnných filmu a propojení s plynnou fází. Obrázek 18 ukazuje mechanismy, které jsou součástí modelu kapalinového filmu. [88]



Obrázek 18 Chování okrajové podmínky „Wall Film“ [88]

Hlavní předpoklady a omezení pro Lagrangeův model kapalinového filmu jsou tyto:

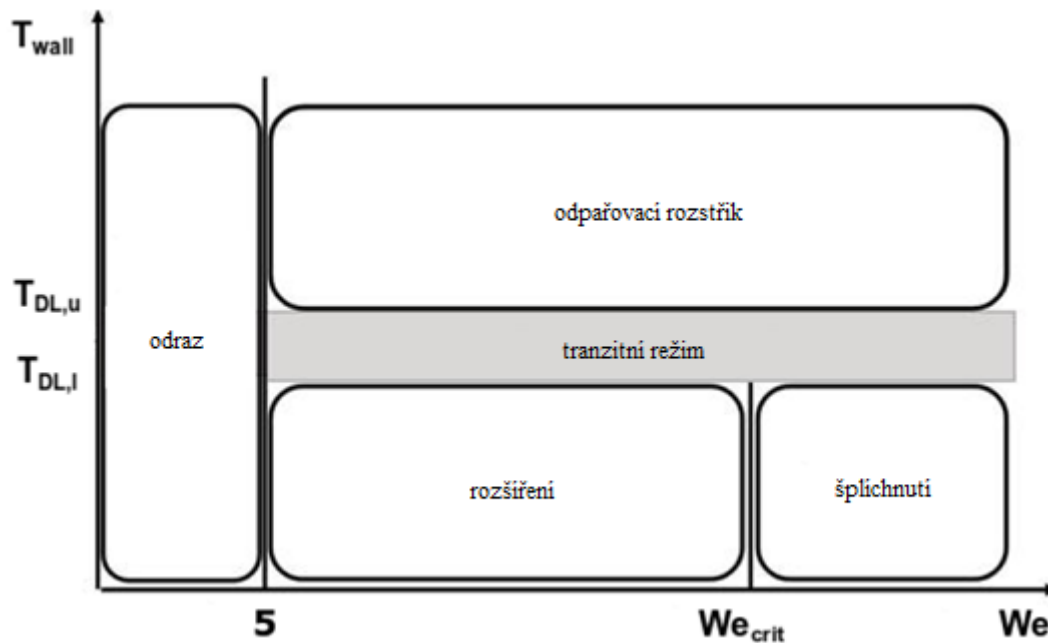
- Vrstva kapalinového filmu je tenká, má tloušťku menší než $500 \mu\text{m}$. Toto omezení vyplývá s předpokladu lineárního rychlostního profilu ve vrstvě. [88]
- Teplota kapalinového filmu se mění relativně pomalu. [88]
- Předpokládá se, že částice v kapalinovém filmu jsou v přímém kontaktu s povrchem stěny a přenos tepla ze stěny do filmu probíhá vedením. [88]
- Teplota filmu nikdy nepřekročí teplotu varu kapaliny. [88]

Předpověď dopadu kapky na stěnu není jednoduchá záležitost kvůli velkému počtu parametrů. Výsledek jakéhokoliv dopadu se řídí vlastnostmi kapaliny (viskozita, povrchové napětí a hustota) a podmínkami dopadu (průměr kapky a její rychlost). Dalšími dvěma důležitými faktory, které rozhodují o výsledku dopadu, jsou drsnost povrchu a tloušťka kapalinového filmu na povrchu stěny. Kromě toho může mít na dynamiku nárazu vliv také teplota stěny. [88]

Existuje několik modelů, které se snaží správně fyzikálně zachytit dopad a předpovídat výsledek. ANSYS Fluent nabízí tyto modely:

- Stantonovo – Rutlandův model používá teplotu stěny a kritérium založené na Weberově čísle, což jednoznačně rozliší mezi režimy interakce (přichycení, odraz, rozšíření a špláchnutí). Tento model je v ANSYS Fluent rozšířený pomocí konceptů od O'Rourkea a Amsdena [94]. [88]
- Kuhnkeho model bere v úvahu jak suché, tak mokré stěny. Zohledňuje kromě vlastností kapky a podmínek dopadu také vliv drsnosti povrchu a tloušťku kapalinového filmu. Kuhnkeho model rozlišuje mezi režimy interakce (odraz, rozptýl, špláchnutí a suchý rozstřík (tepelný rozpad)). [88]
- Stochastický Kuhnkeho model je odvozený od Kuhnkeho modelu a má následující vlastnosti:
 - Používá rozdílná kritéria přechodu mezi jednotlivými režimy, která byla vyvinuta a vyladěna speciálně pro SCR technologie. [88]
 - Zahrnuje stochastické efekty. [88]
 - Zavádí režim odpařovacího rozstříku s konceptem částečného odpařování, kde se během odpařovacího procesu část dopadajících kapiček za určitých podmínek zcela odpaří. [88]

Stochastický Kuhnkeho model je pro použití v SCR technologiích doporučený a již ověřený. Bai a spol. porovnali ve svém výzkumu tento model s jejich vlastním experimentem a dospěli k názoru, výsledky jsou ve velice dobré shodě. [95] Obrázek 19 graficky znázorňuje jednotlivé režimy tohoto modelu a jejich závislost na teplotě a Weberově číslu. [88]



Obrázek 19 Mapa režimů stochastického Kuhnkeho modelu [88]

Model zohledňuje všechny relevantní nárazové jevy tím, že je klasifikuje do následujících čtyř základních režimů na základě kritérií kritické teploty a Weberova čísla: odraz, rozšíření, šplíchnutí a odpařovací rozstřík. Režimy rozšíření a šplíchnutí vedou k tvorbě kapalinového filmu. Kromě toho je zde i tranzitní režim, který brání náhlým změnám během procesu nanášení filmu. [88]

4.5 Index jednotvárnosti a %RMS

Index jednotvárnosti, anglicky uniformity index (UI) je jeden z nejvíce používaných parametrů pro vyhodnocení rovnoměrného rozložení sledované veličiny v ploše na vstupu do katalyzátoru. Tento index poprvé užil Wentens a spol. v roce 1993 v jejich publikaci zabývající se rozložením proudového pole před vstupem do SCR katalyzátoru. [96] Tato veličina se ukázala jako velice důležitá pro kvantitativní hodnocení rovnoměrného rozložení rychlostního pole. [97] Bressler a spol. uvádějí, že řada experimentů potvrzuje potřebu zajistit homogenní rozložení rychlostního pole na vstupu do katalyzátoru, protože to zajistí delší životnost katalytické vložky a nižší tlakové ztráty. [98] Kromě toho se zvýší účinnost přeměny NO_x a sníží se únik (skluz) amoniaku, který je rovněž jednou z emisí. [99] [100] UI lze použít rovněž k vyhodnocení jiných proměnných než pouze rychlosti. Například Capetillo a spol. ho použili k hodnocení rovnoměrnosti distribuce amoniaku a Vedagiri a spol. ho použili k hodnocení koncentrací. [101] [102]

Výpočet UI pro rychlostní pole je ve vztahu (4-30) zapsán tak, jak ho uvádí Girard a spol., nebo Johansson a spol. [103] [104]

$$UI = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (|\vec{v}_i - \overline{v_{mean}}| \cdot A_i)}{A \cdot |\overline{v_{mean}}|} \quad (4-30)$$

Zde platí, že \vec{v}_i je vektor rychlosti v jednotlivé buňce, $\overline{v_{mean}}$ je vektor střední rychlosti přes celou sledovanou plochu $A = \sum_{i=1}^n A_i$ a A_i je velikost plochy jednotlivé i-té buňky.

Hodnota tohoto indexu se pohybuje mezi 0 a 1. Při hodnotě 1 je pole zcela rovnoměrné, což znamená, že hodnota proměnné je v každém místě (buňce) stejná. [103] Weltens a spol. uvádějí, že pro plně vyvinuté proudění v trubce s $Re = 64000 [-]$ je hodnota $UI = 0,94 [-]$. [96] Lu a spol. uvádí, že UI rychlostního pole musí být alespoň 0,98 [-], aby se zajistila maximální účinnost katalyzátoru. [99] Kurzdzymy a spol. uvádí, že hodnotu $UI \geq 0,94 [-]$ lze považovat za dobrý výsledek. [105] Všichni autoři publikací týkající se tohoto tématu ve svých studiích usilují o co nejvyšší hodnotu indexu jednotvárnosti.

ANSYS Fluent má implementované dva přístupy k výpočtu UI. První z nich je vážený plochou a značí se γ_a a pro proměnnou ϕ je definován vztahem (4-31). V této rovnici platí, že $\overline{\phi_a}$ je plošně vážená průměrná hodnota proměnné [88]

$$\gamma_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(|\phi_i - \overline{\phi_a}| A_i)]}{2|\overline{\phi_a}| \sum_{i=1}^n A_i} \quad (4-31)$$

$$\overline{\phi_a} = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4-32)$$

Druhý přístup je vážení hmotnostním tokem, viz vztah (4-33) a (4-34). V následujících řádcích je γ_m hmotnostně vážený UI a $\overline{\phi_m}$ je průměrná hodnota proměnné, která je stejně tak vážená hmotnostně.

$$\gamma_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(|\phi_i - \overline{\phi_m}|)(|\rho_i \vec{v}_i A_i|)]}{2|\overline{\phi_m}| \sum_{i=1}^n [|\rho_i \vec{v}_i A_i|]} \quad (4-33)$$

$$\overline{\phi_m} = \frac{\sum_{i=1}^n [\phi_i |\rho_i \vec{v}_i A_i|]}{\sum_{i=1}^n [|\rho_i \vec{v}_i A_i|]} \quad (4-34)$$

Index jednotvárnosti je jedním z nejdůležitějších ukazatelů pro hodnocení kvality varianty návrhu potrubí před katalyzátorem, protože vylučuje zjevně nevhodné varianty, a je často využíván v praxi, např. automobilkami.

Další z možností, jak porovnávat jednotlivé varianty, je procentuální efektivní odchylka %RMS modelované veličiny. Tato veličina se uvažuje např. v elektrických odlučovačích, nebo spalinových cestách. V případě rychlosti je její definice je dána vztahem (4-35).

$$\%RMS = \frac{100}{|\overrightarrow{v_{mean}}|} \sqrt{\frac{\sum(|\overrightarrow{v}_i - \overrightarrow{v_{mean}}|)^2}{(\sum i) - 1}} \quad (4-35)$$

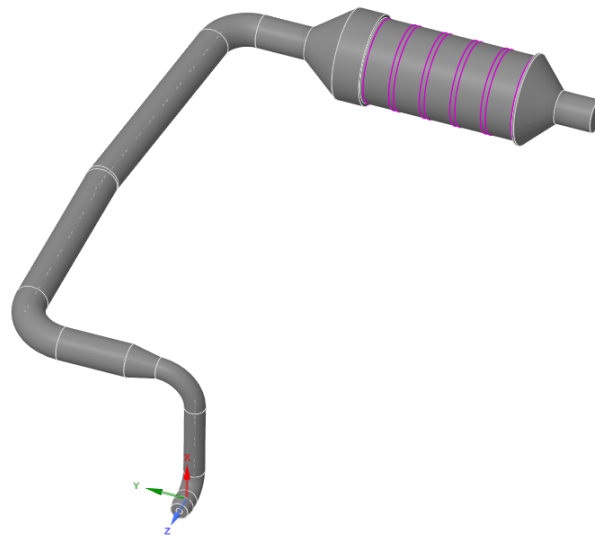
V této rovnici je $|\overrightarrow{v}_i|$ velikost vektoru rychlosti v buňce, $|\overrightarrow{v_{mean}}|$ je průměrná velikost vektoru rychlosti, a i je bod mřížky. Ve jmenovateli na pravé straně rovnice (4-35) je uvedena suma bodů mřížky $\sum i$, což je celkový počet buněk (bodů) na sledované ploše. %RMS tedy určuje, kolik procent plochy proudění se nachází mimo rozsah hodnot daný směrodatnou odchylkou a střední rychlostí na vyhodnocované ploše. Typicky je snaha dosáhnout hodnoty %RMS menší než 15 % na vstupních a výstupních rovinách. Někteří požadují dokonce pouze 10 %. Tato veličina umožňuje porovnání rychlostního pole s jiným rozložením, než je dokonale rovnoměrné proudění. [106]

5 Simulace CFD

Předchozí kapitola slouží jako obecný zjednodušený úvod do CFD simulací. Tato kapitola navazuje na předchozí. Jsou zde uvedeny jednotlivé řešené výpočty a výsledky k nim se vztahující. Na začátku kapitoly je popsáno proč, se řeší zrovna tento problém, následně jsou uvedeny jednotlivé vybrané základní geometrie SCR systémů, jež jsou běžně používané v reálných aplikacích. Po této kapitole následuje vyhodnocení všech řešených variant ve zkrácené formě. Následně proběhne výběr a diskuze nad vybranými variantami, které lze označit za nejlepší. Další výzkum se zabývá vstřikováním DEF. V poslední části je ukázáno zahrnutí i jednoduchých chemických procesů do výpočtu.

5.1 Původní model

Hlavním důvodem vzniku výzkumu uvedeného v této práci byl přeshraniční česko-bavorský projekt, ve kterém se řešil motor umístěný v jednom zařízení spolupracujících stran. Tento motor slouží jako kogenerační jednotka k výzkumnému účelu, ale později se přetransformoval do zařízení pouze pro vytápění a generování elektrického proudu, tzn. je funkční zejména během topného období, jelikož chlazení tohoto motoru předává teplo otopnému systému v budově, kde je umístěný.



Obrázek 20 SCR systém "A"

Tento motor používá jako hlavní palivo zemní plyn, avšak původně se používalo kapalné palivo. Jelikož se jedná o speciální typ motoru, nejsou na toto zařízení vztaheny všechny přísné požadavky na plnění emisních limitů, jako u ostatních motorů tohoto typu, proto SCR katalyzátor není běžně zařazený do potrubního systému. Geometrii je možné vidět na obrázku 20. Jako poslední element, před tímto potrubním systémem je turbodmychadlo, které ovlivňuje proudění v potrubí. Výstupní profil z turbodmychadla slouží jako vstupní profil do tohoto modelu. Je vidět, že potrubí obsahuje několik kolen a

zároveň i rozšíření, což má značný vliv na celkovou proudovou situaci, a hlavně rozložení spalin na vstupu do katalyzátoru.

Provedený výzkum týkající se projektu a tohoto modelu je popsán v článku [107] uvedeného na konferenci PSE v roce 2020. Výzkum byl z počátku zaměřený na rozbor aktuální situace a zjištění, zda v té době aktuální řešení splňuje požadavky na daný systém. Následující krok se zaměřil na vylepšení proudové situace na vstupu do katalyzátoru. Bylo však požadováno, aby se nezasáhlo do vnějšího pláště potrubního systému, tzn. aby se vestavby řešili pouze uvnitř. V již dříve zmíněném článku je popsáno a poukázáno, že tento požadavek je zásadním problémem. Pouze vnitřními vestavbami se nepodařilo dosáhnout zlepšení designu, jelikož proudění uvnitř je příliš rychlé. Existují řešení na zpomalení proudu, například pomocí rozdělovacích stěn, nicméně tyto stěny značně zvýší tlakovou ztrátu, což byl další z požadavků na zachování.

Samotný katalytický konvertor je ve všech simulacích stejný, tzn. jedná o prvek, který je ve všech simulacích neměnný. Katalytický konvertor jako takový je zařízení používané k redukci škodlivých emisí z výfukových plynů. Tato zařízení jsou klíčovou součástí výfukových systémů a hrají zásadní roli při snižování emisí škodlivých látek do ovzduší. Hlavním úkolem katalytického konvertoru je katalyzovat chemické reakce, které přeměňují škodlivé látky obsažené ve výfukových plynech na méně nebezpečné, nebo méně škodlivé sloučeniny. Nejčastěji se jedná o redukci oxidů dusíku NO_x na dusík N_2 , oxidu uhelnatého CO na oxid uhličitý CO_2 a oxidů síry SO_x na oxid siřičitý SO_2 . Vzhledem ke komplexnosti tohoto systému je tento text zaměřený pouze na redukci oxidů dusíku.

Katalytický konvertor je obvykle tvořen keramickým nebo kovovým tělesem s velkým povrchem, na kterém jsou nanesené katalytické materiály, jako je platina, rhodium nebo palladium. Materiály použité v tomto katalyzátoru jsou oxid titaničitý (TiO_2) a oxid vanadičný (V_2O_5). Tyto materiály slouží jako katalyzátory pro reakce v konvertoru. Katalytické konvertory jsou tedy klíčovými součástmi moderních systémů a hrají zásadní roli v ochraně životního prostředí a zlepšování kvality ovzduší. Obrázek 21 obsahuje zjednodušený průřez jednoho kanálku v katalytickém konvertoru, který je zobrazený na obrázku 22. Tyto kanálky jsou rovnoměrně rozdělovány celým průřezem konvertoru.



Obrázek 21 Průřez kanálku katalyzátoru

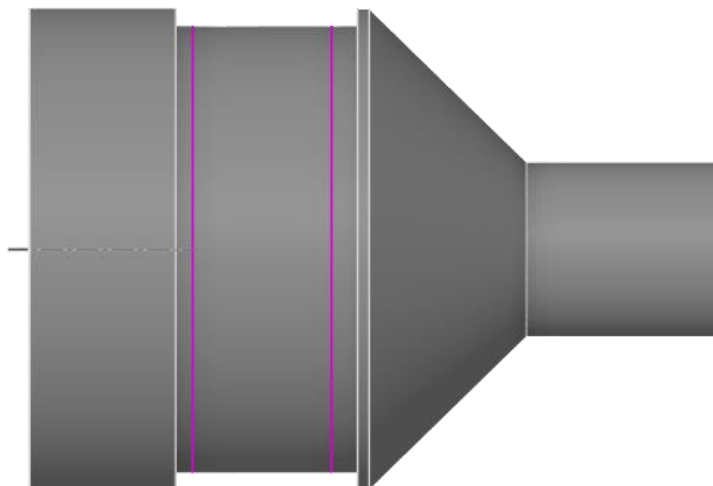
Geometrie katalytického konvertoru různých výrobců se liší, nejen vnější geometrií, ale i tím, jak se přistupuje ke zvyšování jeho vnitřní plochy ať už jde o kanálky trojúhelníkového průřezu, nebo porézní média. Liší se průřezem celého konvertoru, který je na obrázku 22 a 23 kruhového průřezu, nebo může být průřezu obdélníkového či čtvercového. Výrobci volí typ a druh materiálu podle zkušeností a požadavků na samotnou

funkci (množství spalin, teplota, množství vstřikovaného DEF). Množství vstřikovaného DEF je obecně doporučované a není většinou dodáváno jako funkce výkonu motoru, tzn. dochází k tomu, že se většinou vstřikuje větší množství, než je potřeba. To způsobuje usazování a větší než nezbytnou spotřebu DEF a tím pádem i dražší provoz.



Obrázek 22 Fotografie uvažovaného katalyzátoru

Původní uspořádání je použito jako základ pro tvorbu dalších modelů. Bylo osloveno několik výrobců katalytických konvertorů z důvodu konkrétnějších geometrií pro přesnější výpočty a zobecněný výpočtů, nicméně se jedná o firemní know-how a nebylo dosaženo žádného výsledku při komunikaci, tzn. nebyly obdrženy žádné geometrie ani modely. Proto se vychází z toho, co je dostupné právě díky projektu přeshraniční spolupráce.



Obrázek 23 Vnější geometrie katalytické konvertoru

Nastavení simulace je na začátku výpočtů poměrně jednoznačné a jednoduché. Simulace obsahují vstupní podmínku typu „velocity inlet“. Nicméně nejedná se o konstantní rychlost po poloměru na hranici, ale mění se. Rovnice popisující tangenciální rychlostní profil s proměnným poloměrem je na řádce (5-1). Tato rovnice platí pro použití

v základním souřadnicovém systému, pokud se střed vstupu posune mimo souřadnice základního systému, je potřeba ji upravit. Axiální rychlost odpovídá hodnotě 171 [m/s]. Teplota spalin je uvažována 623 [K].

$$v_{tang} = 7947,8 \cdot \sqrt{(x^2 + y^2 - 129,14)} \text{ [m/s]} \quad (5-1)$$

Druhou používanou vstupní okrajovou podmínkou je „mass flow inlet“, tato podmínka je použita u variant s názvem „unif“, což znamená že vstupní profil je rovnoměrný po celé ploše a nemění se s poloměrem. Hmotnostní tok na vstupu je použit 0,30785721 [kg/s], teplota 623 [K], což odpovídá obdobnému toku spalin jako při použití „velocity inlet“ s rotující tekutinou, viz předchozí odstavec. Tyto dvě okrajové podmínky, které zajišťují stejný hmotnostní tok, jsou ve své podstatě dva extrémní mezní případy proudění uvnitř potrubí. Lze zvolit i jiné „rozbití“ proudu jakožto vstupní podmínku, ale jednalo by se pouze o případ v rámci těchto dvou mezních extrémů.

Na výstupu se uvažuje okrajová podmínka „pressure outlet“, která zajišťuje odpovídající tlakový spád. Dále je zde aplikovaný model porézní zóny nahrazující katalyzátor, který je nastavený na odpovídající tlakovou ztrátu podle dostupných informací o základním SCR systému „A“. Model turbulence je zvolený podle všech doporučení a zkušeností $k - \omega SST$.

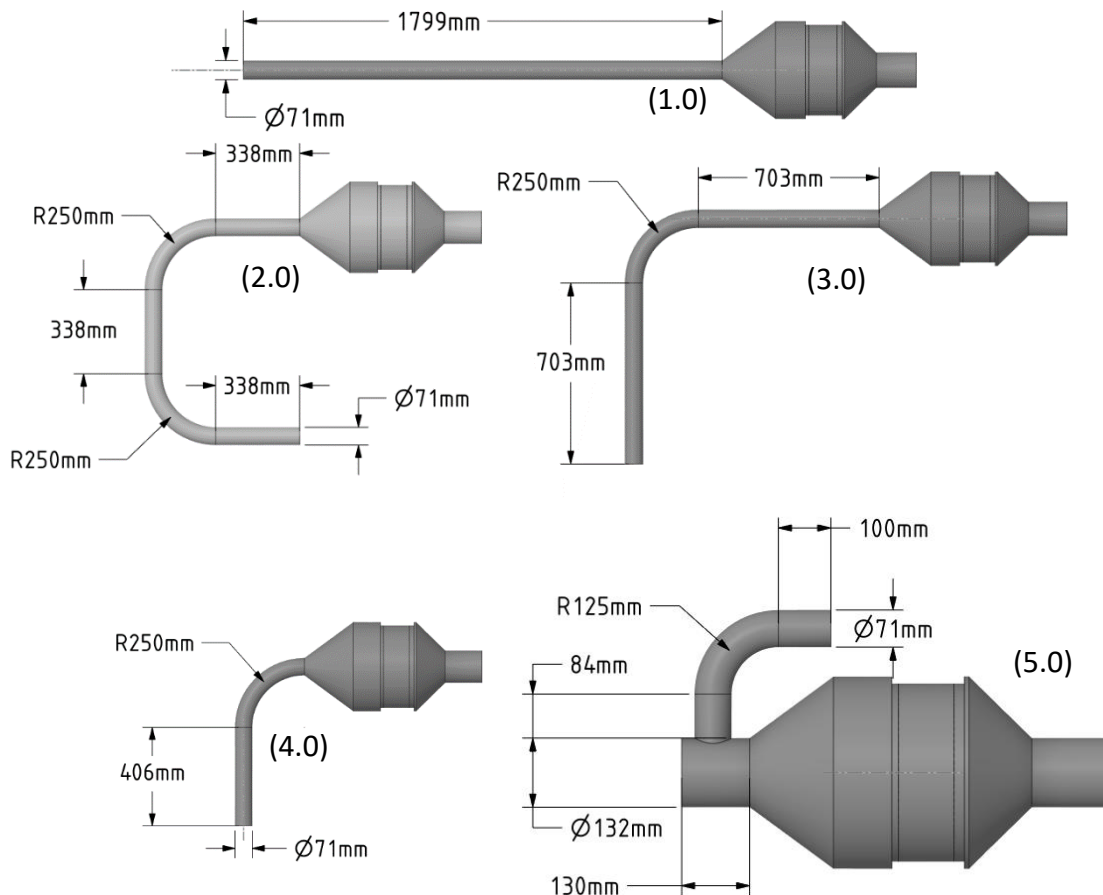
5.2 Uvažované geometrie

Obrázek 24 obsahuje pět původních variant, které vznikly na základně rešeršní činnosti nabízených SCR systémů používaných různými výrobci. Využilo se zdrojů jak z článků, kde se jednotlivé systémy počítaly, tak i webových stránek výrobců, prodejců a zároveň i informací obecně k nalezení na internetu. Tyto informace prošly úpravou, použily se podobnosti jednotlivých geometrií a vznikly právě čtyři varianty, které jsou zde vyobrazeny.

První varianta (1.0), která je na témže obrázku úplně nahoře, je idealizovaná varianta, která se uvažovala jako první. Zde se zkoušely první úpravy geometrie pro zlepšení proudové situace na vstupu do katalyzátoru, což byl v této fázi jediný ukazatel, který se používal pro rozlišení vhodnosti varianty. Jedná se o nejjednodušší geometrii ze všech uvedených, a přesto i zde se vyskytuje problém s distribucí proudu do samotné skříně katalyzátoru. Všechny další varianty jsou v podstatě pouze upravené varianty této rovné trubky, tzn. různě zahnuté trubky. Uvažovalo se, že při zlepšení distribuce proudu v této variantě lze aplikovat obdobnou metodiku na všechny ostatní varianty. Nicméně na začátku výzkumu práce probíhala simultánně na všech variantách.

Druhá uvedená varianta, uprostřed vlevo, je varianta „double knee“ (2.0), neboli dvě kolena. Tato varianta vznikla z předchozí uvedené tak, že potrubí má dvě kolena, tzn. že se potrubí dvakrát ohnulo. Celé potrubí má stejnou délku. Tato varianta vznikla,

protože se za každým kolenem při turbulentním proudění vytvoří víry, které značně ovlivňují proudění. Obdobná varianta vznikla ohnutím rovného potrubí pouze jednou, to je varianta „long knee“ (3.0) a je uprostřed vpravo. Tato varianta má stejně dlouhé potrubí jako dvě předchozí. Varianta vlevo dole na obrázku 24 je „short knee“ (4.0), neboli krátké koleno. Tato varianta je obdobou „long knee“ (3.0), s tím že se ubrala rovná část před katalyzátorem a zkrátila se vstupní rovná část. Největší rozdíl v geometrii je v poslední uvedené variantě „tdm“ (5.0), která je na stejném obrázku vpravo dole. Tato varianta je běžně používaná v různých variacích v kontejnerových kogeneračních jednotkách, kde není dostatek místa na „zbytečná“ potrubí.



Obrázek 24 Uvažované geometrické varianty

Všechny uvedené varianty mají jednotný průměr potrubí 71 [mm], což vychází právě z řešené geometrie v projektu. Dále se uvažuje ve většině variant rádius kolen 250 [mm]. Tento poloměr je zvolený na základě předchozí rešerše, nicméně v pozdější části práce jsou uvedené i rozdílné poloměry těchto kolen, pro ukázkou vlivu na rozložení proudového pole na vstupu do katalyzátoru. Rozdílný poloměr kolena u varianty „tdm“ (5.0) je z důvodu umístění vstupu, jelikož větší poloměr by neodpovídal obvyklým poměrům právě u těchto kontejnerových typů SCR systémů.

(1.0)



Obrázek 25 Vyobrazení vyhodnocovací plochy

Existuje mnoho proměnných, které lze během simulací sledovat, a ještě více hodnot lze vyhodnotit po dokončení simulace. Ačkoliv je na malém počtu simulací teoreticky možné všechny parametry sledovat a pracovat s nimi, tak i takto zevrubný postup by pravděpodobně nevedl k zamýšlenému cíli. Proto se zpravidla volí několik zásadních proměnných, které se vyhodnocují, a na základě těchto několika zvolených parametrů je možné hodnotit jednotlivé varianty. U CFD výpočtů se taktéž velice často přistupuje k hodnocení pomocí obrázků, které se vzájemně porovnávají. Nicméně tento postup není příliš exaktní a velice při něm záleží na zkušenostech jednotlivých pracovníků, jak k daným výsledkům přistupují a subjektivně hodnotí jednotlivé varianty, či výsledky. Nejběžněji vyhodnocované veličiny jsou tlak, teplota a rychlost. Všechny tyto veličiny mohou být posuzovány lokálně (bodově) nebo jako průměrné hodnoty přes plochu, či plochy. Průměrné hodnoty lze brát buď jako medián, či aritmetický průměr. Anebo lze vyhodnotit průměrné hodnoty vážené plochou či hmotnostním tokem.

Vyhodnocovací plocha je zobrazená na obrázku 25 a značí se jako „z4“. Tato plocha je umístěná těsně před samotným katalyzátorem, nicméně není shodná s plochou, která je na začátku katalyzátoru. Jak je zmíněno výše, v těchto simulacích se používá zjednodušený model katalyzátoru nahrazený porézní zónou. Při umístění vyhodnocovací plochy přímo na začátek této porézní zóny by došlo ke zkreslování výsledků, jelikož již na vstupu jsou hodnoty značně ovlivněny zabrzděním proudu, tzn. hodnoty jsou zde již „nehodnoceny“. Proto se používá plocha „z4“, která je těsně před vstupem.

Simulace zde uváděné jsou vyhodnocovány na základě čtyř parametrů. První z nich je tlakový spád na vstupu a výstupu. Tato veličina nemá přesnou hodnotu, kterou je zapotřebí dosáhnout, proto se používá jako porovnávací mezi jednotlivými geometrickými úpravami pro zjištění zlepšení či zhoršení tlakového spádu. Další vyhodnocovanou veličinou je již zmíněný index jednotvárnosti (UI), tento index je popsán v kapitole 4.5. V této kapitole je taktéž popsána možnost rozložení proudového pole pomocí odchylky. Na základě výsledků se ukázalo, že není potřeba vyhodnocovat oba tyto ukazatele, jelikož mezi nimi existuje silná korelace, tzn. když UI vzroste, tak %RMS klesne a naopak. A jelikož UI je běžněji používaným ukazatelem v SCR systémech, používá se zde primárně. ANSYS Fluent používá dva parametry navázané na UI, které jsou v již zmíněné kapitole výše popsány, a jsou zde uvedeny oba parametry pro porovnání a poukázání na fakt, jak spolu souvisí. Proměnná, která se vyhodnocuje pomocí UI, je střední unášivá rychlost ve směru proudění do katalyzátoru. Tato složka rychlosti je zvolena zejména proto, že se jedná o nejdůležitější parametr pro samotný katalyzátor. Nicméně nejde primárně o velikost této rychlosti, ale o její rozložení. Pouze vlivem této složky jsou spaliny dopravovány

do kanálků v katalyzátoru, kde dochází k požadovaným chemickým reakcím. Ostatní složky rychlosti, ať už tangenciální či radiální nehrají zásadní roli v proudění na vstupu do kanálků, jelikož jejich rozměr je natolik malý, že dojde téměř okamžitě k jejich utlumení.

Unášivá složka je navíc průměrována, takže se nejedná o její okamžité hodnoty, ale průměrné hodnoty. Označení průměrné rychlosti vychází z anglického názvosloví „mean z velocity“, proto „MZV“. A označení „AW“ udává vážení UI pomocí plochy, z anglického „Area Weighted“ a „MW“ je UI vážený pomocí hmotnostního toku, z anglického „Mass Weighted“.

Poslední z uvažovaných veličin, které se v následujících simulacích vyhodnocují, je poměr ploch. Jedná se o poměr celkové plochy kanálu v místě vyhodnocovací plochy „z4“ a plochy, ve které proudí spaliny ve směru do katalyzátoru. Tento poměr se pohybuje mezi hodnotou 0 a 1, a aby nevznikalo zpětné proudění, je cílem co nejvyšší hodnota tohoto poměru. Uvažovala se také korelace UI indexů a poměru ploch, nicméně se nedošlo k tomu, že existuje korelace mezi těmito dvěma veličinami, proto je potřeba obě vyhodnocovat.

Výsledky ze základních variant jsou zapsané v tabulce 2. Je vidět, že tlaková ztráta je téměř ve všech variantách obdobná. Největší tlaková ztráta je u varianty "tdm" (5.0), kde dochází, náhlým rozšířením a velkou změnou směru proudu na krátké vzdálenosti, k velkému zpětnému proudu, čímž dochází k větší tlakové ztrátě. Jelikož se jedná o zásadně jinou geometrii, tak nelze jednoznačně říci, zda se jedná o nežádoucí hodnotu. Je vidět, že hodnoty UI indexu nejsou shodné pro vyhodnocení podle plochy nebo hmotnostního toku. Pokud by se vyhodnocoval pouze jeden z těchto indexů, je spíše vhodnější vážení plochou, jelikož je obecně konzervativnější (přísnější), nicméně ne vždy to platí. Z důvodu snahy být na tzn. „bezpečné straně“ je vždy vhodnější zvolit tu nižší z těchto dvou hodnot jako ukazatel kvality rozložení proudu. Poměr ploch v tomto případě je u variant s rotujícím vstupním profilem velice dobrý, jelikož se blíží maximální možné hodnotě. Nicméně u variant s rovnoměrným vstupem dochází ke zhoršení UI ale i poměru ploch, což je dáno tím, že proudění se nerozprostře odstředivou silou a je koncentrované pouze uprostřed. Jediný rozdíl je u variant „tdm“ (5.0) a (5.1), kde je proudění tak rozbito geometrií, že se tento efekt neprojevuje.

Hodnocení variant je pro přehlednost znázorněno v následujících tabulkách barvami. Značení je pomocí barevné škály RGB. Nevhodné varianty jsou značeny **červenou** barvou, akceptovatelné varianty mají **zelenou** barvu a vyhovující varianty mají **modrou** barvu. Toto značení je již zavedené v tabulce 2.

Tabulka 2 Výsledky základních variant

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
double knee (2.0)	9491	498	8993	0,94	0,96	1,00
double knee – unif (2.1)	9298	500	8798	0,27	0,71	0,53
long knee (3.0)	10123	502	9622	0,71	0,82	1,00
short knee (4.0)	8270	501	7769	0,68	0,73	1,00
straight (1.0)	9959	497	9463	0,65	0,79	1,00
straight – unif (1.1)	8759	501	8259	0,27	0,70	0,52
tdm (5.0)	11836	500	11336	0,63	0,64	0,94
tdm – unif (5.1)	9780	501	9279	0,76	0,72	0,98

5.3 Citlivostní analýza – studie sítě

Pro CFD simulace zahrnuje studie sítě vliv sítě – diskretizované reprezentace výpočetního prostoru. Tento výzkum je klíčový, protože přesnost a efektivita simulací CFD závisí často právě na kvalitě a konfiguraci sítě. Tento proces zahrnuje analýzu vlivu různých hustot sítě na přesnost simulace, upřesňování nebo zhrubování sítě k pozorování variací ve výsledcích. Hodnocení typů sítí zahrnuje různé typy sítí (strukturované nebo nestrukturované) k určení jejich vhodnosti pro konkrétní simulační scénáře s ohledem na kompromisy mezi přesností a výpočetní efektivitou.

Studie nezávislosti sítě určuje bod, kdy další zdokonalení sítě nezvyšuje přesnost simulace, stanoví rovnováhu mezi výpočetními náklady a spolehlivostí výsledků. V podstatě komplexní studie sítě zajistí, že výsledky CFD jsou spolehlivé a smysluplné. Umožňuje výzkumníkům a inženýrům přizpůsobit sítě konkrétním požadavkům simulace, optimalizovat výpočetní zdroje a věrně zobrazit zkoumané fyzikální jevy.

Model se dvěma koleny se stal základním etanolem pro naladění požadované kvality sítě v dalších výpočtech. Ve všech zde uvedených modelech je použita polyhedrální síť se zjemněnými prismatickými buňkami směrem ke stěnám. V tabulce 3 jsou zaznamenány výsledky z jednotlivých vytvořených sítí. Hodnocených proměnných zde několik, jelikož běžně používaná tlaková ztráta (rozdíl tlaku) je v tomto případně zcela nedostatečná, protože výsledky všech variant jsou si velice podobné. Jsou tedy použity kromě běžně sledovaných proměnných další proměnné.

Tabulka 3 Výsledky výpočtů pro citlivostní analýzu

varianta	Rozdíl tlaku [Pa]	UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]	Mean AWA MZV	Mean AWA VM	Mean MWA MZV	Mean MWA VM
	vstup - výstup	z4	z4	z4	z4	z4	z4	z4
dk-A	10047	0,43	0,73	0,74	-6,44	22,32	-21,43	38,97
dk-B	9769	0,62	0,76	1,00	-6,41	17,06	-13,41	23,29
dk-C	9674	0,70	0,79	1,00	-6,44	14,24	-10,15	17,62
dk-D	9567	0,66	0,78	1,00	-6,43	15,54	-10,52	18,85
dk-E	9547	0,85	0,86	1,00	-6,44	11,23	-8,54	13,17
dk-F	9864	0,70	0,80	1,00	-6,45	15,48	-10,37	18,32
dk-G	9456	0,73	0,79	1,00	-6,45	14,59	-9,48	17,71
dk-H	9167	0,97	0,96	1,00	-6,45	8,68	-6,40	9,32
dk-I	9755	0,93	0,93	1,00	-6,46	9,53	-7,10	9,45

Porovnání jednotlivých výsledků zde není triviální záležitostí a nelze jednoznačně říci, kde dochází k bodu zlomu, tzn. která ze sítí je nejvhodnější pro řešení daného problému. Proto se přistoupilo k hodnocení jednotlivých kritérií, na jejichž základě se dále postupovalo ve výběru.

V každé jednotlivé proměnné je vypočítána průměrná hodnota ze všech variant. Následně se počítá procentuální odchylka od tohoto průměru. A tyto hodnoty se seřadí od nejmenší odchylky po největší (lze i obráceně, míří se na střední hodnotu – ta bude nejbližší nule) a každé variantě se přiřadí body od jedné do devíti (je devět variant). Tento postup je proveden u všech proměnných. Následně se sečtou body pro každou variantu, což je možné vidět v tabulce 4. A vypočítá se průměrné bodové hodnocení, což je v tomto případě 40 bodů.

Tabulka 4 Bodové hodnocení jednotlivých variant

varianta	počet bodů [-]	Odchylka od střední hodnoty [-]
dk-A	36	10
dk-B	40	0
dk-C	48	-20
dk-D	44	-10
dk-E	42	-5
dk-F	29	27,5
dk-G	40	0
dk-H	44	-10
dk-I	37	7,5

Seřazením variant podle počtu bodů se dospěje k závěru, že velice blízko středních hodnot jsou tři varianty, uvedené v tabulce 5, kde je zároveň zavedeno poslední kritérium, jež taktéž hraje důležitou roli, a to je velikost výpočetní sítě, od které se odvíjí časová

náročnost pro získání výsledků. Tyto tři hodnoty nejsou zvoleny náhodně. Při seřazení hodnot se postupovalo tak, že krajní hodnoty dostaly opět nejvíce bodů (v tomto případě čtyři), další varianta blíže ke střední hodnotě dostala tři body atd., z čehož vyšly právě tyto tři varianty nejlépe.

Tabulka 5 Velikost výpočetní sítě vybraných variant

varianta	velikost výpočetní sítě [-]
dk-B	618712
dk-E	1761122
dk-G	4784063

Je tedy vidět, že varianta „dk-E“ je kompromisem vypočítaných hodnoty na základě zvolené sítě a následně zvolenou střední cestou na základě velikosti sítě. Proto se nadále uvažuje zvolený typ polyhedrální sítě s velikostí buněk na povrchu a v objemu, jako nejvhodnější pro řešení uvedených geometrií.

5.4 Geometrické úpravy

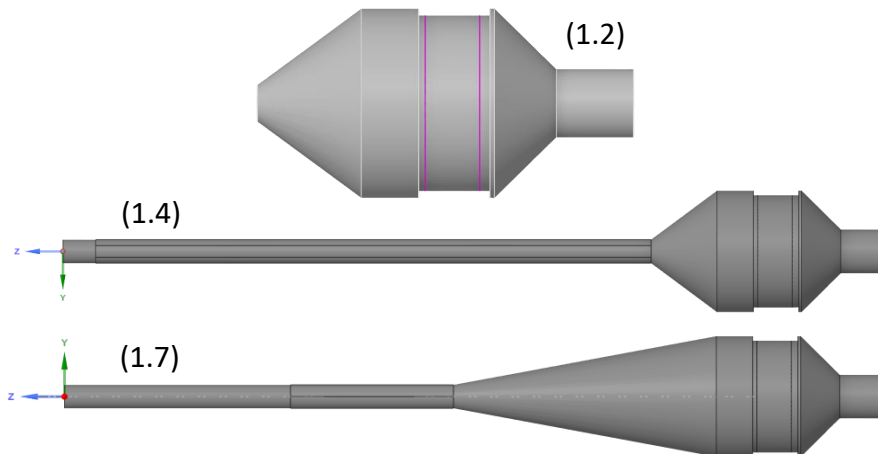
Uvažované geometrie v předchozí kapitole jsou základní návrhy bez jakýchkoliv úprav. Po analýze těchto geometrií se přistoupilo k dalším úpravám designu. Tato kapitola je rozdělena do pěti podkapitol podle jednotlivých variant z předchozí kapitoly 5.2.

5.4.1 Varianta „straight“

Jedná se o nejjednodušší variantu nejen z pohledu konstrukce, ale i z pohledu proudění, jelikož proud zde není usměrněný žádnými koleny, tzn. není ovlivněn žádnými úplavy atd. Odstraněním rovného potrubí před katalyzátorem se zjistí chování proudění pouze v části rozšíření před konvertorem a v něm samotném. Tato geometrická úprava (1.2) je vidět na následujícím obrázku 26 nahoře. V této variantě se uvažuje, že se jedná o čistou variantu bez potrubí. A v tomto případě bude zásadní roli v proudění hrát právě vstupní rychlostní profil. Další z uvedených úprav je uprostřed obrázku 26. Jedná se o variantu „straight rctf 2“ (1.4), která oproti původní variantě obsahuje vnitřní vestavby. Tyto vestavby jsou rovné plechy umístěné podél od středu až k obvodu. Jejich počet je šest, tzn. jsou umístěny po 60°. Poslední z variant je varianta „straight half cone rect cls“ (1.7) umístěná na témže obrázku dole. Tato varianta je kombinací změny vstupního kužele do samotného katalyzátoru s dříve zmíněnými podélnými plechy, které v tomto případě jsou kratší než v předchozí geometrii.

Na původní variantu „straight“ (1.0) byl použit vestavěný modul v ANSYS Fluent nesoucí název „Gradient-Base Optimizer“, což je optimalizační nástroj implementovaný rovnou v řešiči ANSYS Fluent. Tento nástroj upravuje síť tak, aby zajistil dosažení nastavených parametrů. To znamená, že běží výpočet a geometrie se upravuje automaticky. Jedná se o časově a výpočetně náročnou záležitost, která poukázala na fakt,

že problémové místo v konstrukci je právě napojení mezi rovnou trubkou a kónusem, rozšířením na průměr katalyzátoru. Proto vznikla poslední zobrazená varianta (1.7) na obrázku 26. Tento typ úpravy se nadále rozšiřoval a v různých ručně vytvořených variantách testoval, kdy se například v celé délce rovné části vytvořil právě již zmíněný kónus. Další navazující varianta rozšiřovala právě tento dlouhý kónus o rovnou část, aby se zjistil vliv vstupu rovnou do kónusu.



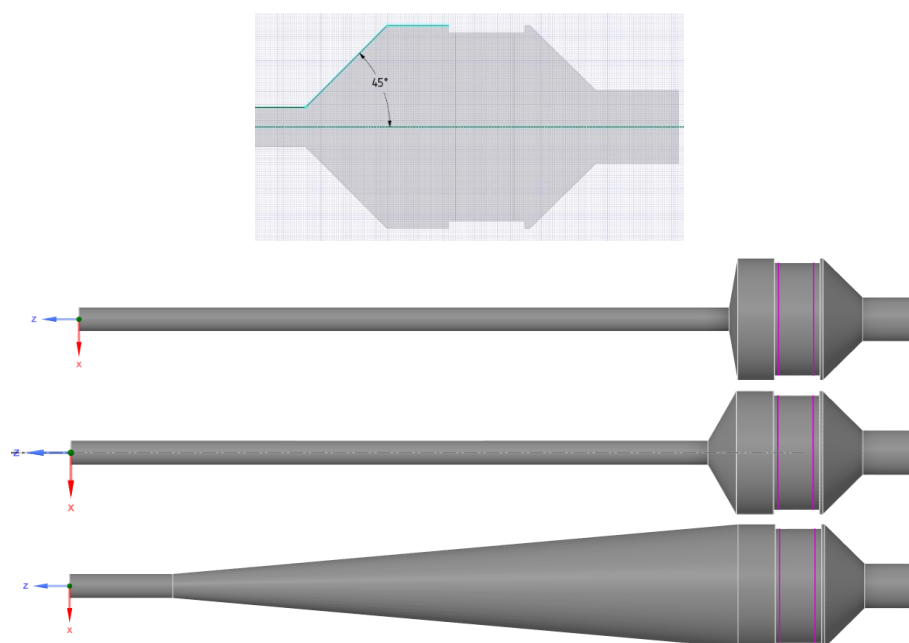
Obrázek 26 Varianty „straight“: nahoře úprava „plain (1.2)“, uprostřed úprava „straight rctf 2 (1.4)“, dole úprava „straight half cone rect cls (1.7)“

Výsledky upravených geometrií varianty „straight“ jsou v tabulce 6. Z výsledků je vidět, že vestavby ve variantách „rctf“ (1.3) a (1.4) nepříznivě ovlivňují rozprostření proudu, jelikož proudu je zabráněno rotovat, tudíž nemá možnost po vstupu do rozšířené části potrubí se rozprostřít a je tedy usměrněn pouze na střední část katalyzátoru. To samé se stane u varianty „half cone“ (1.5), kdy je změněná rozšiřující se část, tzn. je delší tak, jak je vidět na obrázku 26 dole. Při základní variantě (1.5) bez vnitřních vestaveb došlo ke zlepšení proudové situace. Nicméně při použití jakéhokoliv usměrňovače, v tomto případě se dá říci narovnávače, dochází opět ke zhoršení UI (varianty (1.6) a (1.7)). Při nahrazení rovného potrubí o konstantním průměru dlouhým kónusem, který začíná na vstupu do modelu, varianty „straight cone“ (1.8) a (1.9) došlo k razantnímu zlepšení UI, snížení tlakové ztráty a zároveň výbornému poměru ploch. Přidáním rovného potrubí před tento kónus, varianty s „longer“ (1.10) a (1.11) nedošlo k žádné změně, tudíž se dá říci, že nezáleží na chování proudu před tímto kónusem.

Tabulka 6 Výsledky rozšiřujících úprav varianty "straight"

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
plain (1.2)	5519	501	5019	0,57	0,72	0,95
straight rctf 1 (1.3)	16981	502	16478	0,28	0,71	0,53
straight rctf 2 (1.4)	15852	501	15351	0,28	0,71	0,53
straight half cone (1.5)	5580	502	5078	0,87	0,85	0,99
straight half cone rect (1.6)	10841	510	10331	0,55	0,66	1,00
straight half cone rect cls (1.7)	10628	504	10124	0,58	0,69	0,99
straight cone (1.8)	3155	502	2653	0,97	0,97	1,00
straight cone – unif (1.9)	1443	501	942	0,97	0,97	1,00
straight cone longer (1.10)	3945	503	3442	0,98	0,98	1,00
straight cone longer – unif (1.11)	2655	502	2153	0,98	0,98	1,00

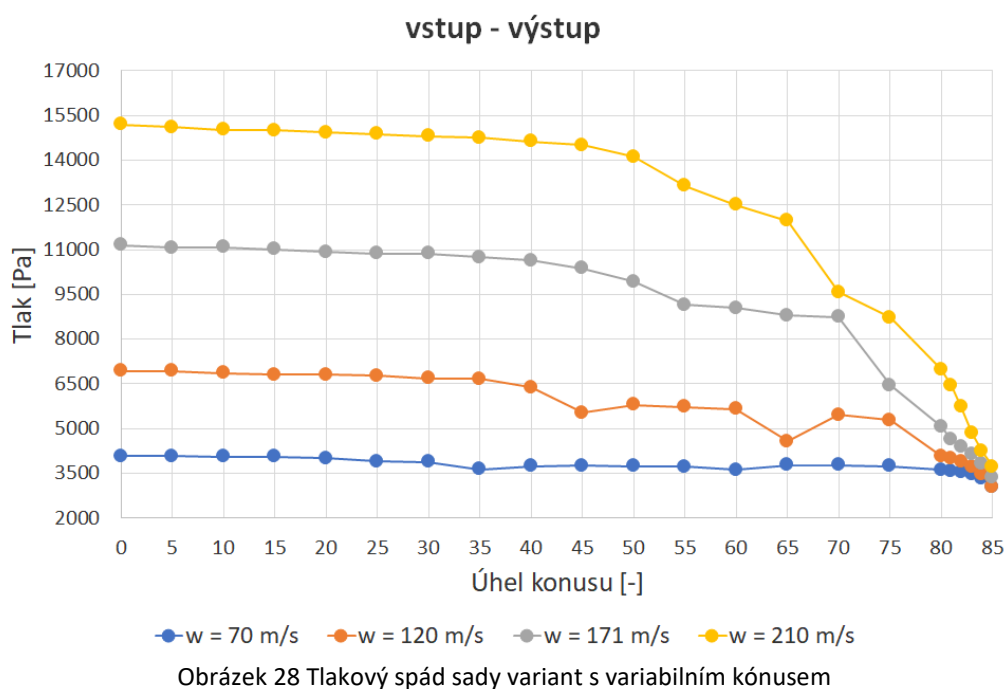
Jelikož předchozí přístup je lehce chaotický, není jednoznačné, kdy kónus již funguje dobře a kdy ne. Je tedy potřeba přistoupit k systematictějšímu řešení této problematiky. Jak je vidět na obrázku 27 nahoře, tak k popisku jednotlivých variant slouží právě úhel od osy ke zkosení. Na ilustrativním příkladu je úhel 45° v horní části obrázku. Na druhém řádku téhož obrázku je úhel 10° , následuje úhel 30° a poslední z uvedených je 85° , což je největší uvažovaný úhel. Nejmenší úhel se uvažuje 0° , následuje krok po 5° až do úhlu 80° , od kterého je krok 1° až do zmíněných 85° . Tyto geometrie jsou počítány i s jinými rychlostmi, než jaké jsou zmíněny v kapitole 4.4, jelikož se zjišťuje i vliv právě tohoto parametru. Mění se tedy axiální rychlost. Výpočty jsou provedeny s těmito axiálními rychlostmi $70 [m/s]$, $120 [m/s]$, $171 [m/s]$ a $210 [m/s]$. Rotace se uvažuje nadále stejná tak, jak je uvedeno na řádce (5-1).



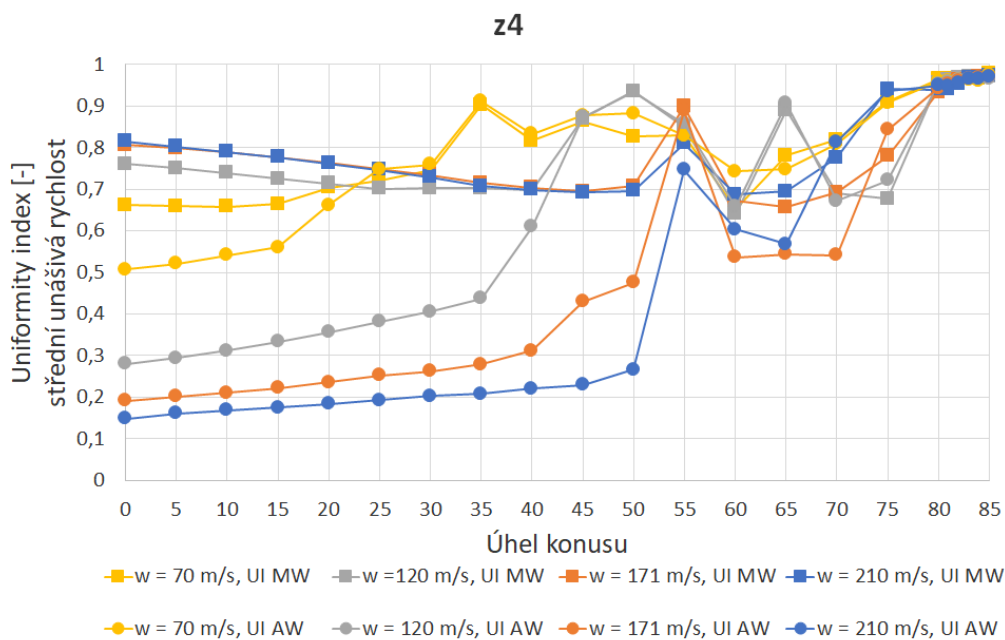
Obrázek 27 Ilustrativní náčrty různých úhlů kónusu varianty "straight"

Předchozí výsledky jsou zapsány v tabulkách, které mají zpřehlednit jednotlivá data. U této sady výsledků je však získán tak rozsáhlý soubor dat, že je lepší a názornější vynést výsledky do přehledných grafů, jedná se konkrétně o obrázky 28 až 30.

První ze zmíněných obrázků, obrázek 28, obsahuje tlakovou ztrátu mezi vstupem a výstupem. Na svislé ose je vynesena tlaková ztráta, horizontální osa obsahuje úhel kužele od 0° do maximálních 85° . Trend chování u všech rychlostí je jednoznačný, a to že při zvětšování úhlu dochází zároveň i ke zvětšování průřezu a zmenšování tlakové ztráty. Při maximálním úhlu je u všech rychlostí téměř identická tlaková ztráta. U minimální rychlosti nedochází k výraznému poklesu tlaku, jelikož při této rychlosti dochází k efektivnímu vyplnění celého průřezu ve všech variantách.

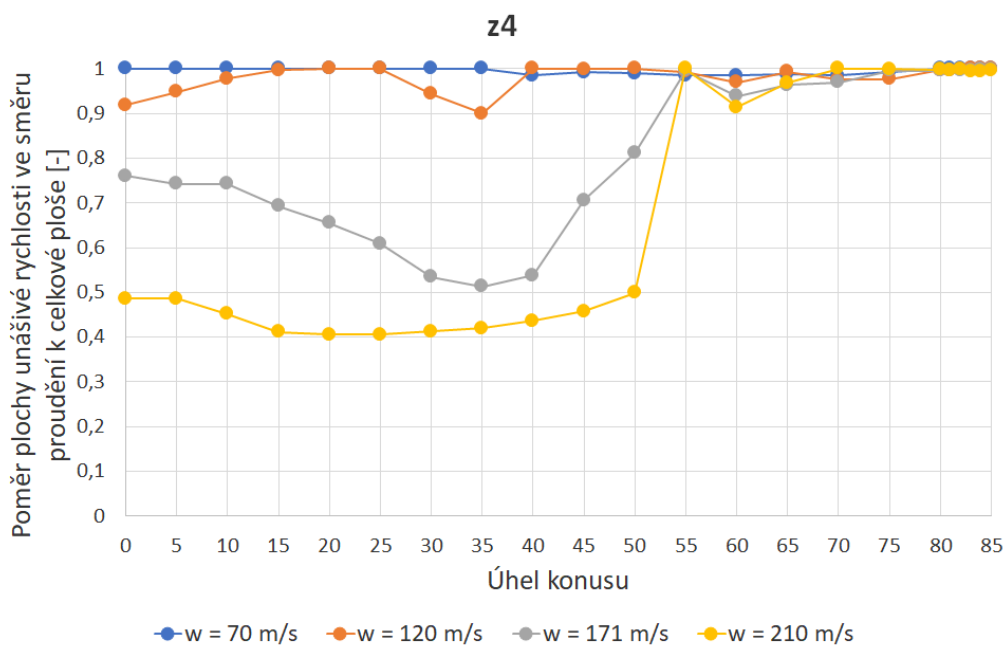


Obrázek 29 vyobrazuje UI střední unášivé rychlosti vážený jak plochou, tak i hmotnostním tokem. Rozdíl v zobrazení je pouze ve značce, jelikož jedna barva odpovídá vždy dané rychlosti. Závěr v této části lze udělat takový, že pro zaručené dosažení požadovaného UI nad hodnotu 0,94 [—] lze dosáhnout s touto geometrií při úhlu kužele nad 80° bez toho, aniž by bylo potřeba přihlížet k rychlostem v daném rozsahu. Dále je jednoznačně vidět, že použití hodnot UI vážených hmotnostním tokem je bezpečnější přístup při vyhodnocení, jelikož jsou vždy nižší než vážené plochou. Tím je jednoznačně zajištěno dosažení požadované hranice UI.



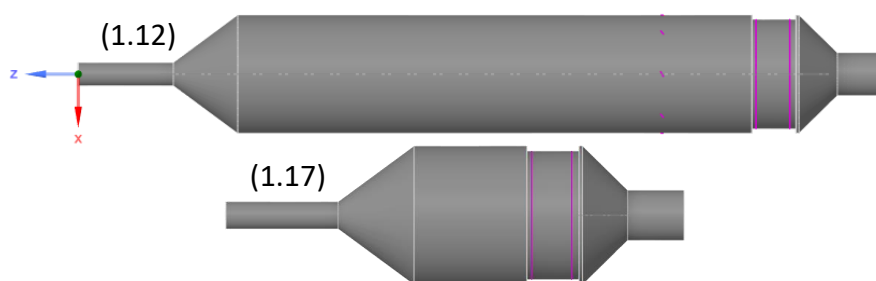
Obrázek 29 UI sady variant s variabilním kónusem

Poslední z uvažovaných veličin, které se považují za důležité sledovat, je poměr celkové plochy k ploše proudu směřující do katalyzátoru. Pro varianty „straight“ s variabilním úhlem kuželu jsou tyto výsledky na obrázku 30. Je vidět, že při nejnižší počítané rychlosti se dosahuje požadovaného poměru téměř při použití všech úhlů kužele, nicméně u ostatních variant toto neplatí. Zaručené hodnoty se dosahuje u všech variant v případech od úhlu 80°, stejně jako u UI. Nicméně je potřeba říci, že ne vždy toto platí. Nejhorší poměry ploch jsou u nejvyšší rychlosti, a to z důvodu velké kinetické energie proudu, jež potřebuje hodně prostoru na rozšíření skrz celý průřez.



Obrázek 30 Poměr ploch sady variant s variabilním kónusem

Vzhledem k výsledkům z předchozích výpočtů se dospělo k názoru, že dobré výsledky nejsou dosahovány pouze vhodným tvarem difuzoru, ale že se jedná i o vliv většího průměru potrubí. Ten může pozitivně ovlivnit proudění tím, že ho zpomalí a dovolí dobré promíchání (distribuci). Proto vznikla další sada derivátů varianty „straight“ nesoucí názvy „straight lh“ (1.12) až (1.17). Některé z těchto variant jsou na obrázku 31. Je vidět, že došlo blízko ke vstupu k rozšíření na průměr, který odpovídá vstupu do samotného konvertoru, tzn. že se zásadně zpomalí proud, sníží se tlaková ztráta a tekutina má dostatek času vyplnit celý průřez rovnoměrně. Z obrázku je vidět, že variant je napočítáno více, pro zjištění, jaká délka velkého rovného potrubí je potřeba k tomu, aby proudění na vstupu do katalyzátoru zůstalo rovnoměrné. Varianta 1 (1.12) má délku širokého potrubí 1611 [mm], následuje varianta 2 (1.13) s délkou 1500 [mm], další varianty mají vždy kratší délku rozšířené části o 300 [mm], tzn. poslední varianta 6 (1.17) má délku velkého potrubí pouze 300 [mm].



Obrázek 31 Ilustrační zobrazení variant "straight lh"

Výsledky variant „straight lh“ (1.12) až (1.17) jsou v tabulce 7. Výsledky jsou poměrně jednotvárné a závěry z nich jsou jednoduché. V případě rovného potrubí a rychlosti 171 [m/s] platí, že stačí mít pouze 600 [mm] dlouhé potrubí o průměru katalyzátoru a dosahuje se požadovaných parametrů UI a poměru ploch. V případě nejpřísnějších požadavků na $UI > 0,97$ je potřeba 1200 [mm] dlouhého potrubí.

Tabulka 7 Výsledky úprav "straight lh"

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
straight lh 1 (1.12)	5444	503	4941	0,97	0,98	1,00
straight lh 2 (1.13)	5396	503	4893	0,97	0,98	1,00
straight lh 3 (1.14)	5471	502	4969	0,97	0,97	1,00
straight lh 4 (1.15)	5437	502	4935	0,96	0,97	1,00
straight lh 5 (1.16)	5429	502	4927	0,95	0,96	1,00
straight lh 6 (1.17)	6396	502	5894	0,69	0,74	0,95

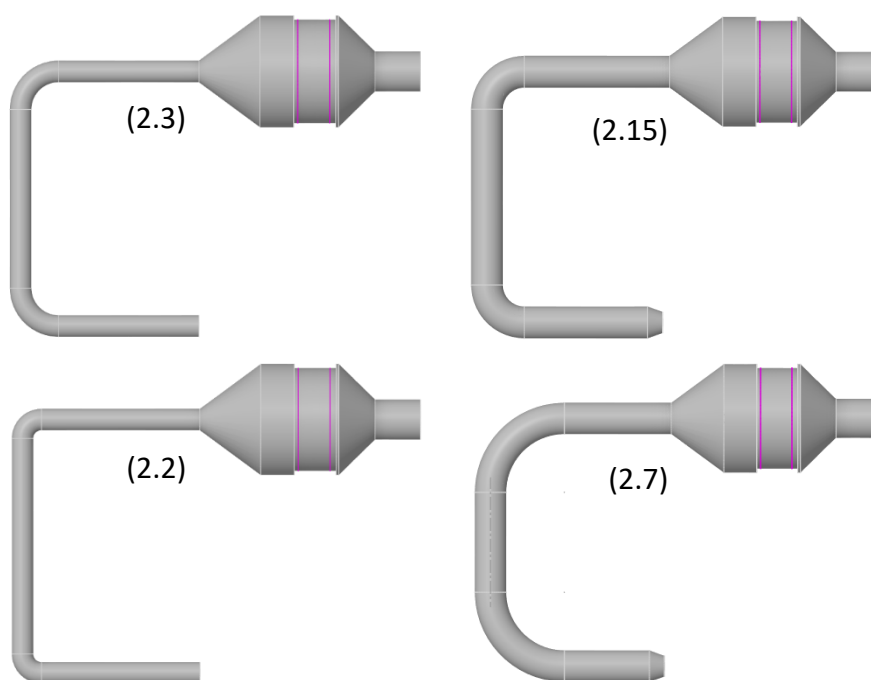
Varianta „straight“ je základní variantou, která se zkoumala. Výzkum měl být pravděpodobně proveden více systematicky, tzn. simulace by se měly provést nejdříve s touto variantou a následně jít do dalších geometrických úprav. To se však z časových

důvodů nestalo, takže následující varianty kopírují geometrické změny zde ukázané. Dá se to však brát jako potvrzení toho, zda jsou výsledky reálné.

Výsledky této varianty jsou jednoznačné. Varianty „straight lh“ (1.12) až (1.15) dosahují velice dobrých výsledků. Obdobné výsledky dosahují varianty s úhlem kónusu nad 80° , nicméně tyto varianty jsou s přihlédnutím ke konstrukčnímu řešení poměrně složitě vyrobitelné. Proto výsledky s přídomkem „lh“ se uvažují jako nejvhodnější řešení.

5.4.2 Varianta „double knee“

Varianta „double knee“ (2.0) obsahující dvě 90° kolena, která je uvedena v úvodní části této kapitoly na obrázku 24 je uvažována jako základní varianta, která se nadále upravovala a modifikovala pro dosažení co nejrovnoměrnějšího rozložení proudového pole. První z úprav, zde uvedených, jsou změny poloměru kolena. Původní poloměr kolena $250 [mm]$ je upraven na poloviční hodnotu, a na čtvrtinovou hodnotu. Tyto hodnoty jsou tedy konkrétně v případě polovičního poloměru $125 [mm]$, čtvrtinový poloměr je $62,5 [mm]$. Několik těchto úprav je vidět na obrázku 32. Kromě poloměru kolena se ještě zjišťoval vliv změny průměru potrubí na hodnotu $106,5 [mm]$, což odpovídá jeden a půl násobku původního průměru. Tato změna průměru zajišťuje menší tlakovou ztrátu, ale komplikuje napojení na stávající konstrukci kvůli dalšímu rozšiřujícímu nátrubku hned za vstupem. Další změny průměrů v takto malém rozsahu se neuvažovaly. Vlevo nahoře na již zmíněném obrázku je varianta (2.3) s polovičním poloměrem kolena a původním průměrem potrubí. Vpravo nahoře je varianta (2.15) s větším průměrem potrubí a poloviční velikostí poloměru kolena. Vlevo dole je varianta (2.2) s nejmenším poloměrem kolena a původním průměrem potrubí. Vpravo dole je varianta (2.7) s původním poloměrem kolena a větším průměrem kanálu.



Obrázek 32 Ilustrační zobrazení variant „double knee“ s menšími poloměry a průměry potrubí

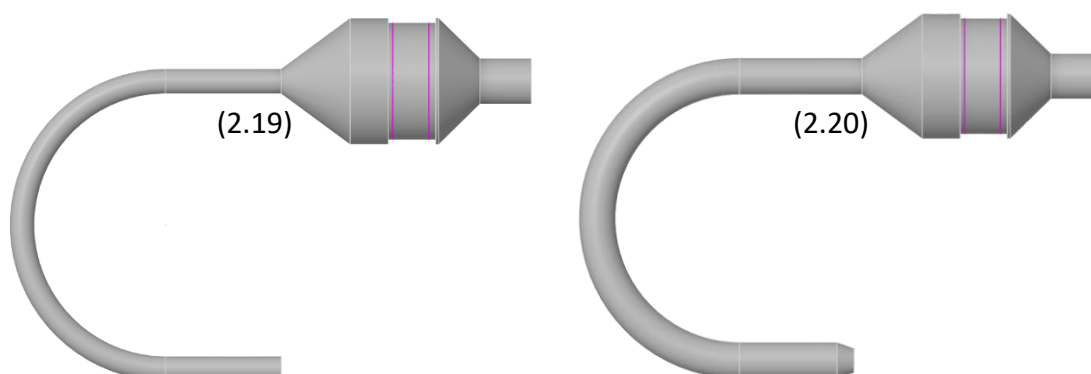
Varianta se dvěma koleny je nejběžněji používaným typem potrubí v SCR systémech, proto je na této geometrii vytvořeno nejvíce modifikací a následně je nejvíce rozvíjena. V úvodní části studie je zjišťován vliv velikosti kolen a jejich poloměr na proudovou situaci. Poté změny rychlostí a následně i změna průměru potrubí. Výsledky vlivu zmenšení poloměru kolen a zároveň vliv na rychlost jsou uvedeny v tabulce 8. Je vidět, že jakýkoliv zásah do vstupní rychlosti negativně ovlivní UI. Změna tlaku je dle očekávání nižší u menších rychlostí a vyšší u vyšší rychlosti, než je původně uvažovaná 171 [m/s]. Vliv menšího zaoblení kolen je opět negativní, a to z důvodu tvorby větších úplavů za nimi. Obecně se dá říci, že při zvětšení průměru na jeden a půl násobek původního průměru dojde k tomu, že rychlost 70 [m/s] se stane vždy nejlepší z variant, jelikož je proudění relativně pomalé, je ale zároveň roztočené a dojde tedy k dostatečně dobrému rozložení před vstupem do katalyzátoru. Při zvyšujících se rychlostech dochází ke zhoršení UI, poměru ploch, a i tlakovým ztrátám. Dalo by se očekávat, že původní varianta „double knee“ (2.0) by měla mít horší vlastnosti než varianta „double knee 1,5D v171“ (2.9), jelikož došlo ke zvětšení průměru, a tudíž by mělo proudění být uklidněnější, stabilnější a celkově lépe distribuované. Nicméně výsledky toto nepoukazují. Závěr je takový, že základní varianta „double knee“ (2.0) má natolik náhodně správně zvolené parametry, že jakýkoliv menší zásah způsobí zhoršení proudové situace. Závěr je tedy takový, že zmenšením poloměru kolen dochází, logicky, k negativnímu ovlivnění proudění.

Tabulka 8 Výsledky variant „double knee“ s menšími poloměry a průměry potrubí

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
double knee r/4 (2.2)	10950	496	10454	0,80	0,80	1,00
double knee r/2 (2.3)	9988	496	9492	0,70	0,71	1,00
double knee (2.0)	9491	498	8993	0,94	0,96	1,00
double knee v70 (2.4)	3813	85	3728	0,78	0,71	0,99
double knee v120 (2.5)	6280	246	6034	0,69	0,73	0,99
double knee v210 (2.6)	14750	746	14004	0,25	0,72	0,49
double knee 1,5D v70 (2.7)	2276	85	2191	0,89	0,87	1,00
double knee 1,5D v120 (2.8)	2982	248	2734	0,69	0,72	0,97
double knee 1,5D v171 (2.9)	3914	500	3414	0,82	0,80	0,99
double knee 1,5D v210 (2.10)	5212	752	4460	0,77	0,73	0,99
double knee 1,5D r/4 v70 (2.11)	2353	85	2268	0,93	0,93	1,00
double knee 1,5D r/4 v120 (2.12)	3225	247	2978	0,69	0,71	1,00
double knee 1,5D r/4 v171 (2.13)	5063	499	4565	0,63	0,71	1,00
double knee 1,5D r/4 v210 (2.14)	6816	750	6066	0,60	0,73	1,00
double knee 1,5D r/2 v70 (2.15)	2289	85	2203	0,93	0,93	1,00
double knee 1,5D r/2 v120 (2.16)	2949	247	2702	0,69	0,71	1,00
double knee 1,5D r/2 v171 (2.17)	4215	499	3716	0,65	0,72	1,00
double knee 1,5D r/2 v210 (2.18)	5380	752	4628	0,76	0,74	0,99

Vliv na proudění není pouze při zmenšení poloměru kolena, ale i při jeho jakémkoliv změně, přistoupilo se i ke zvětšení poloměru kolena. Nicméně násobku dvou není možné

dosáhnout, jelikož je nezbytné zachovat umístění vstupního potrubí, takže se zvolil poloměr takový, aby se vstupní a výstupní potrubí napojila jedním velkým obloukem, což je znázorněno na obrázku 33. Použitý poloměr v tomto případě odpovídá hodnotě 419 [mm]. Tato geometrie (2.19) je na obrázku vlevo. Stejně jako v předchozím odstavci, tak i zde je testován kromě uvedené změny poloměru i vliv změny průměru potrubí na již použitou hodnotu 106,5 [mm], což je vidět na obrázku vpravo (2.20).



Obrázek 33 Ilustrační zobrazení variant „double knee“ s větším poloměrem a průměrem potrubí

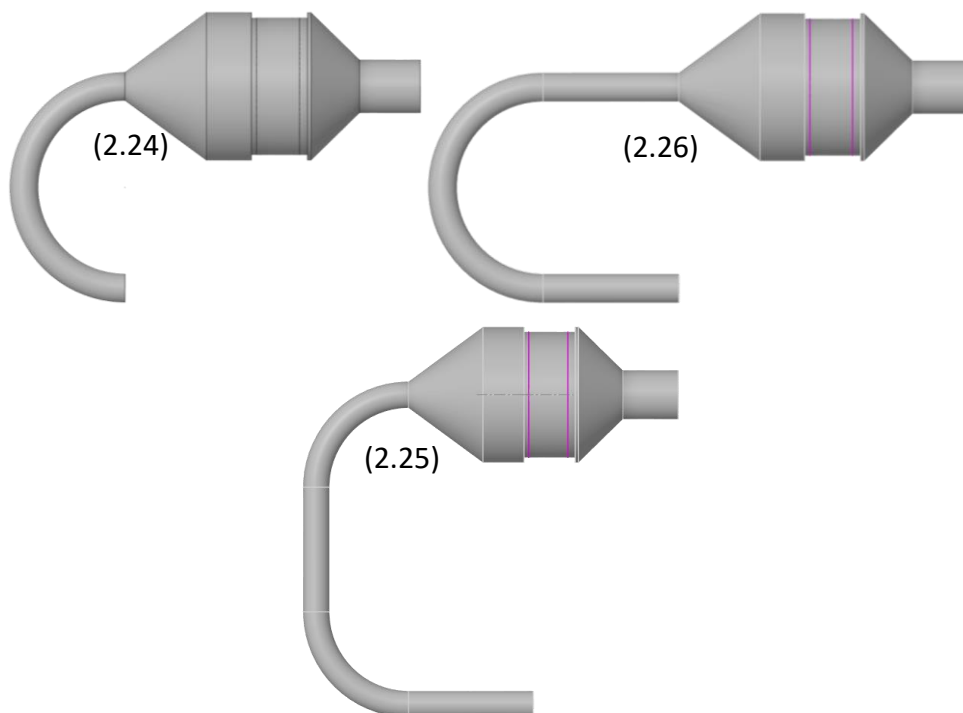
Vliv zvětšení poloměru kolen je pomocí dat ukázán v tabulce 9. Zvětšením poloměru v základní variantě dojde, opět, ke zhoršení UI a zvýšení tlakové ztráty. Nicméně zůstává zachován poměr ploch, tzn. je vidět že proudění není rovnoměrné. Zde je dokázáno tvrzení, že poměr ploch a UI spolu nesouvisí a je potřeba sledovat oba faktory. Zvětšení poloměru potrubí a zmenšení rychlosti (2.20) je opět pozitivní a dosahuje se dobrých výsledků. To neplatí pro rychlost 120 [m/s] (2.21), kdy došlo oproti variantě (2.22) s axiální rychlostí 171 [m/s] k poklesu všech sledovaných veličin. Změna velikosti potrubí o malou hodnotu nemá zásadní vliv na proudění. Varianta „double knee 1,5D 2r v171“ (2.22) dosahuje v této sadě variant nejlepších výsledků. Vliv velikosti poloměru zaoblení je viditelnější a jeho zvětšení je pozitivní krok, zmenšení ovlivňuje proudění negativně, nicméně výsledky z proudění s použitím většího zaoblení ukazují na nestabilní proudění, které je lehce ovlivnitelné i relativně malými změnami rychlostí.

Tabulka 9 Výsledky variant „double knee“ s větším poloměrem a průměrem potrubí

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
double knee 2r (2.19)	10407	496	9911	0,58	0,75	1,00
double knee 1,5D 2r v70 (2.20)	2252	85	2167	0,93	0,92	1,00
double knee 1,5D 2r v120 (2.21)	2974	248	2726	0,70	0,72	0,98
double knee 1,5D 2r v171 (2.22)	3719	500	3219	0,95	0,95	1,00
double knee 1,5D 2r v210 (2.23)	4891	752	4139	0,85	0,84	1,00

Varianta s velkým rádiem kolena popsaná v předchozím textu je inspirací pro další sadu variant tak, jak jsou popsány v následujícím obrázku 34. První z navazujících úprav (2.24) je vlevo nahoře. Tento model obsahuje pouze původní kolena, tzn. odstranily se rovné úseky vstupního potrubí. Tato varianta by se dalším vývojem pravděpodobně brzy

transformovala do varianty „short knee“ (4.0), která je popsána v kapitole 5.4.4. Vpravo nahoře je varianta (2.26), ve které je odstraněný prostřední rovný člen potrubí. Poslední z variant (2.25) uvedených v obrázku 34 je úprava, kdy je odstraněná pouze rovná část přímo před samotným katalyzátorem. Tyto úpravy si dávají za úkol zhodnotit vliv jednotlivých částí potrubí na proudovou situaci.



Obrázek 34 Varianty "double knee" s vynechanými částmi potrubí

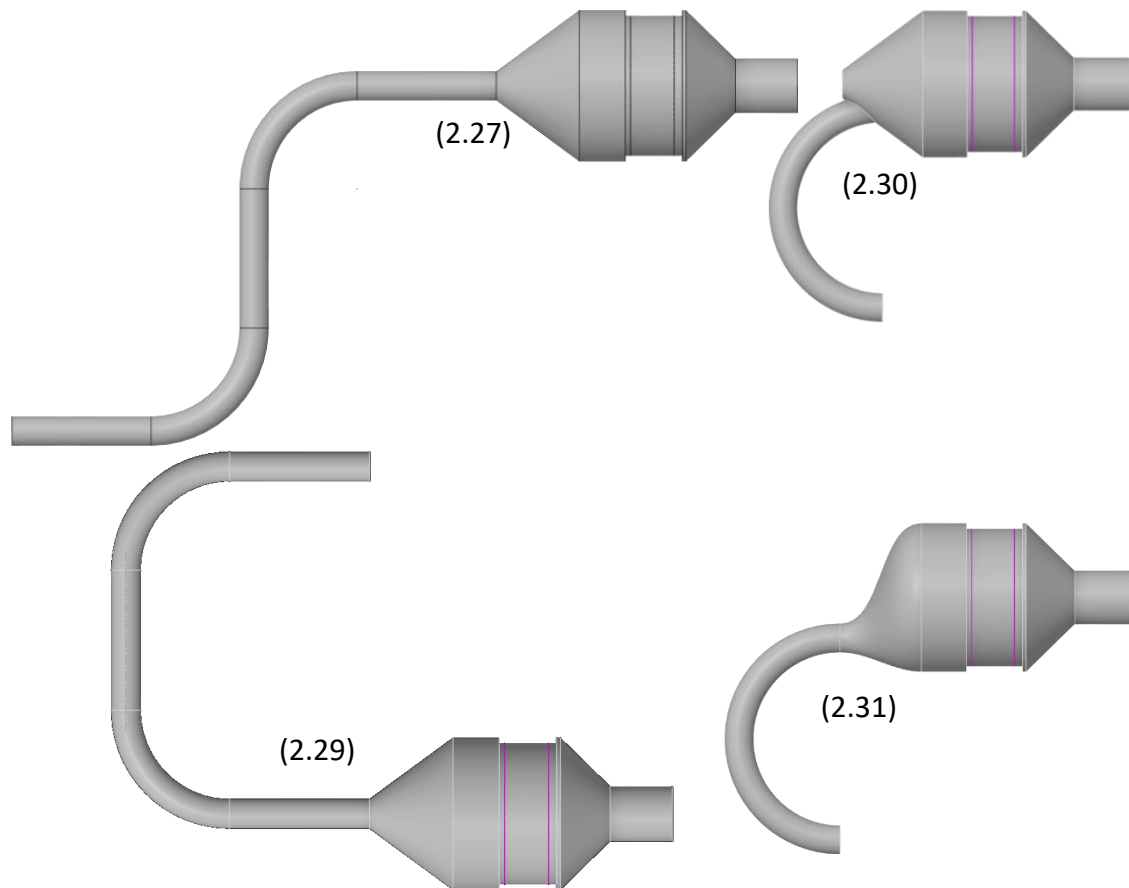
Vliv jednotlivých částí potrubí v této variantě je možné vidět v tabulce 10. Odstraněním rovných částí vznikne krátká varianta, která téměř odpovídá variantě „short knee“ (4.0), jak je řečeno výše. Odstraněním prostřední rovné části se přibližuje geometrie (2.26) již uvedené „double knee 2r“ (2.19), je vidět, že původně zvolený rádius je vzhledem k průměru zvolený vhodně, jelikož nedojde k tak velkému zhoršení situace jako v předchozí variantě. Nicméně je vidět, že jakýkoliv zásah do základní geometrie negativně ovlivňuje proudění, což opět poukazuje na fakt, že základní varianta (2.0) byla zvolena velice vhodně, ač náhodně, a jedná se o nestabilní geometrické rozložení.

Tabulka 10 Výsledky variant "double knee" s vynechanými částmi potrubí

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
double knee no straight (2.24)	8227	501	7727	0,58	0,72	0,99
double knee no end (2.25)	9716	496	9220	0,54	0,71	0,90
double knee no mid (2.26)	8924	497	8426	0,80	0,86	1,00

Obrázek 35 obsahuje poslední sadu geometrických úprav, které jsou bez zásadního ovlivnění vnější zástavby varianty „double knee“. Vlevo nahoře na tomto obrázku je varianta (2.27), která je vytvořena na základě změny umístění katalyzátoru a zjištění

potenciálního vlivu rozdílného zahnutí kolena v potrubním traktu. Vlevo dole obsahuje varianta (2.29) pouze otočenou základní variantu o 180° , kdy se rotovala celá doména. V tomto případě se hledal potenciální vliv rotujícího vstupního profilu na rozdílně zatočené potrubí. Vpravo nahoře (2.30) i dole (2.31) jsou extrémní varianty vytvořené na základě minimalistického provedení tak, aby potrubí zabralo co nejméně místa. Nástupcem těchto variant je varianta „tdm“ (5.0) popisovaná v kapitole 5.4.5.



Obrázek 35 Doplnující úpravy vstupního potrubí varianty „double knee“

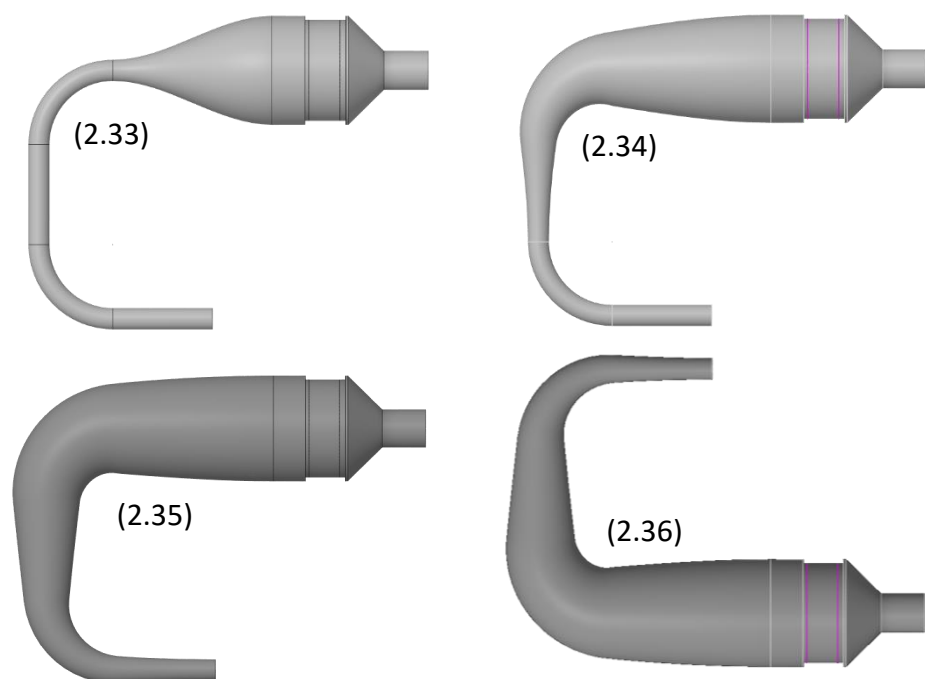
Výsledky geometrických úprav vyobrazených nejen na obrázku 35 jsou v tabulce 11. Varianty „twisted“ (2.27) a (2.28), vlevo nahoře na obrázku 35, mají první z kolien otočené o 180° proti původní geometrii. Vliv na proudění je negativní, tzn. změna umístění úplavu zhoršilo nejen tlakovou ztrátu o 10 %, ale i UI. Otočením celé výpočtové domény o 180° vznikla varianta „double knee rot“ (2.29), zobrazená vlevo dole na obrázku 35, a výsledky jsou v tomto případě téměř shodné se základní variantou, takže ačkoliv proudění je roztočené stále stejným směrem, není zásadně ovlivněno směrem, kterým je následně usměrněno. Další geometrické úpravy (2.30) až (2.32) pracují s variantou bez rovných částí potrubí a dále se snaží rozvíjet tento koncept, nicméně nepříliš úspěšně. Je vidět, že UI se v každém případě zlepšilo, ale došlo ke zvýšení tlakové ztráty. Vzhledem ke geometrické složitosti modelů nejde o úspěšné řešení a další vývoj v této oblasti není proveden.

Tabulka 11 Výsledky doplňujících úprav vstupního potrubí varianty „double knee“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
double knee twisted (2.27)	10307	499	9808	0,74	0,81	1,00
double knee twisted - unif (2.28)	9330	500	8830	0,27	0,70	0,53
double knee rot (2.29)	9716	498	9218	0,88	0,90	1,00
double knee no straight rtr down (2.30)	8589	498	8091	0,59	0,70	0,97
double knee no straight rtr down upr conus (2.31)	8046	501	7545	0,64	0,82	0,89
double knee no straight swipe (2.32)	9483	504	8979	0,64	0,69	1,00

Předešlé úpravy varianty „double knee“ se zabývají změnou samotného potrubí bez úpravy rozšiřované části před samotným katalyzátorem. Zkoumá se na nich vliv jednotlivých prvků v potrubí a změna samotného průměru. Jak je zmíněno v předchozí kapitole 5.4.1 věnující se pouze rovnému potrubí, tak při použití optimalizačního nástroje se začal měnit právě vstupní kónus do komory katalyzátoru. Tuto hypotézu potvrzuje i předešlý výzkum. Výsledky z něj dávají jednoznačný směr, kterým se mají další geometrické úpravy ubírat. Problém je jen v tom, že tyto úpravy mají větší nárok na zastavěné místo, jelikož se mění vnější průměr potrubí.

Na obrázku 36 jsou uvedené další navrhované geometrické úpravy varianty „double knee“. Jedná se o první ze sady změn týkajících se vstupního kónusu do samotného katalyzátoru. Tyto varianty jsou inspirované studií provedené na variantě s rovným potrubím. Na obrázku vlevo nahoře je varianta (2.33), kde se odstranila poslední rovná část a potrubí o malém průměru 71 [mm] se spojilo pomocí modelovacího programu ANSYS Space Claim Design Modeler (SCDM) tak, aby hladce navazovala na větší průměr na vstupu do katalyzátoru. To je důvod, že kónus nevznikl rotací přímky, ale křivky. Další varianta (2.34) vpravo nahoře je vytvořená obdobně, rozdíl je v tom, že kónus nahrazuje již i střední rovnou část potrubí. Změna průměru je zde logicky pozvolnější. Poslední dvě varianty v dolní části obrázku jsou stejného designu, rozdíl je pouze v natočení o 180°. Varianta (2.35) v tomto případě je vlevo dole a kónus začíná již na vstupu do modelu, tzn. všechny části potrubí jsou již rozšiřovány a dochází k pozvolnému zvětšování průměru. Vpravo dole je varianta (2.36), kde se znovu zjišťoval vliv rozdílné umístění kolen, tak jako v předchozím případě, kde se již podobný vliv testoval.



Obrázek 36 Úvodní varianty s upraveným tvarem vstupního kónusu typu „double knee“

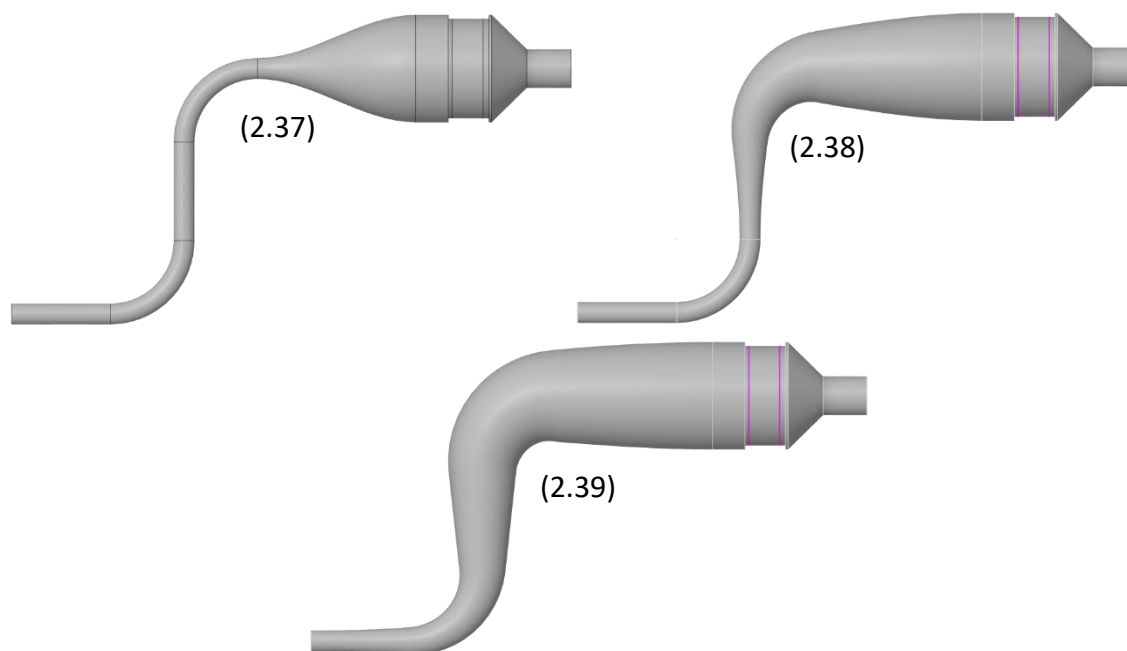
Vliv změny upraveného vstupního kónusu do katalyzátoru je možné vidět v tabulce 12. Rozšíření kuželu až na začátek poslední rovné části (2.33) před konvertorem má negativní vliv na výsledky jak z pohledu tlakové ztráty, která je vyšší o 5 %, ale hlavně se razantně snížila hodnota UI. Plynulé prodloužení kuželu až na začátek prostřední rovné části se značně sníží tlaková ztráta, jak oproti původní variantě (2.0), tak i variantě „double knee 1/3 cone“ (2.33), a zároveň se oproti této variantě zvýší UI. Oproti původní variantě (2.0) je lehce nižší a nedosahuje požadované hranice. Prodloužení kuželu (2.35) až na začátek vstupu do domény dále snižuje tlakovou ztrátu a pozitivně ovlivní UI, nicméně je to stále hodnota pod původní hodnotou základní varianty (2.0). Dochází však ke stabilizaci proudění, tzn. není ovlivněno malými zásahy do geometrie, což je zásadní zlepšení tohoto geometrického principu.

Tabulka 12 Výsledky variant s upraveným tvarem vstupního kónusu typu „double knee“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
double knee 1/3 cone (2.33)	9965	500	9464	0,58	0,68	0,97
double knee 2/3 cone (2.34)	4637	501	4135	0,87	0,82	1,00
double knee cone (2.35)	3991	502	3489	0,88	0,87	1,00
double knee cone rot (2.36)	3995	502	3493	0,88	0,87	1,00

Kromě aplikace vlivu delšího kužele na klasickou „double knee“ (2.0) geometrii, kdy obě kolena jsou zahnutá stejným směrem, je nezbytné zjistit i vliv na ostatní řešené geometrie. Na obrázku 37 jsou zachyceny na ukázkou tři varianty typu „double knee twist“, kde vlevo nahoře je varianta (2.37) s kónusem, který nahrazuje poslední rovný úsek před vstupem do katalyzátoru. Tento tvar kužele nemá přímkový profil, ale obdobný tvar, jak

je diskutováno v předešlé sadě variant k obrázku 36. Vpravo nahoře je varianta (2.38) s delším kuželem, který nahrazuje jak střední část rovného potrubí, tak i druhé koleno a poslední část rovného úseku. Poslední varianta (2.39) na obrázku má rozšiřující průměr potrubí již od vstupní části.



Obrázek 37 Varianty sady „double knee twist“

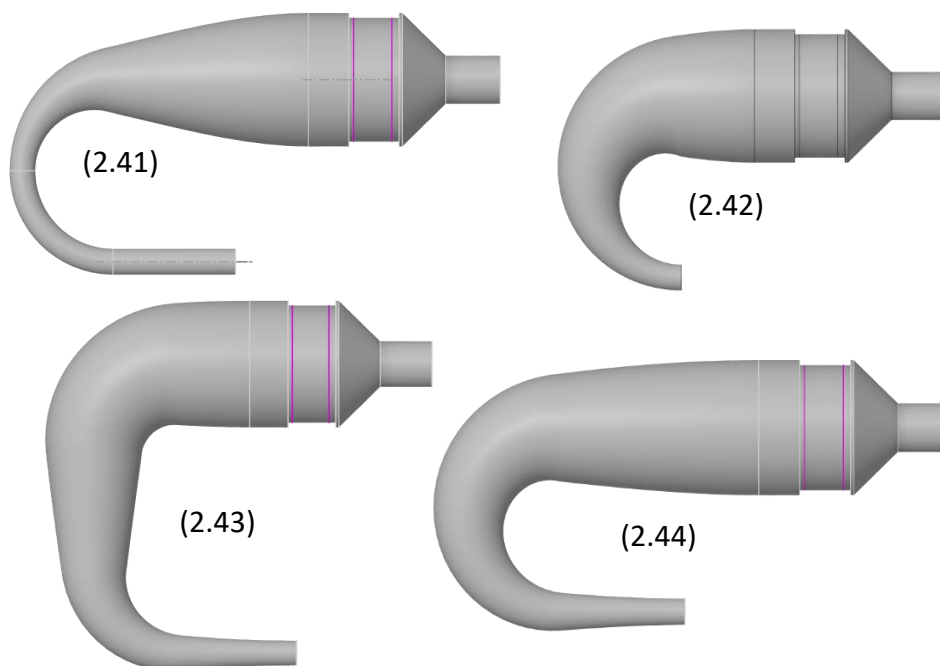
Výsledky variant „double knee twist“ s různě dlouhými kužely jsou uvedeny v tabulce 13. Při porovnání výsledků s neotočeným prvním kolenem je vidět, že nedošlo k zásadní změně UI ani tlaku. Pouze u nejkratšího kužele (2.37) došlo k poklesu, což je způsobeno právě tím, že došlo ke změně úplavu. Toto chování je obdobné jako u variant (2.27) a (2.28) bez změn kónusu. Při delším kuželu dochází k tomu, že úplavy již nejsou tak markantní, a proto neovlivňují zásadně proudění.

Tabulka 13 Výsledky variant sady „double knee twist“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
double knee 1/3 cone twisted (2.37)	9205	512	8693	0,46	0,70	0,88
double knee 2/3 cone twisted (2.38)	4620	501	4119	0,89	0,86	1,00
double knee cone twisted (2.39)	4000	501	3499	0,85	0,83	1,00

Následuje studie geometrických úprav variant vyobrazených na obrázcích 34 a 35. Na varianty (2.24) až (2.26) je aplikována právě již několikrát zmíněná geometrická úprava pomocí postupného rozšiřování potrubí. Obrázek 38 obsahuje ukázkou několika vybraných variant úprav geometrií (2.41) až (2.44) pomocí postupného rozšiřování průměru potrubí, což, jak výsledky ukazují, je správnou cestou pro zlepšení rozložení proudu na vstupu do konvertoru. Zde uvedené varianty pouze reprezentují navržené varianty, jichž bylo mnohem více, nicméně není nezbytné je zde všechny vyobrazovat. Výsledky však, stejně

jako u dalších sad výpočtů, obsahují všechny počítané varianty. Změny se týkají především různých délek kónusů.



Obrázek 38 Geometrické úpravy kónusu aplikované na varianty se zkráceným vstupním potrubím

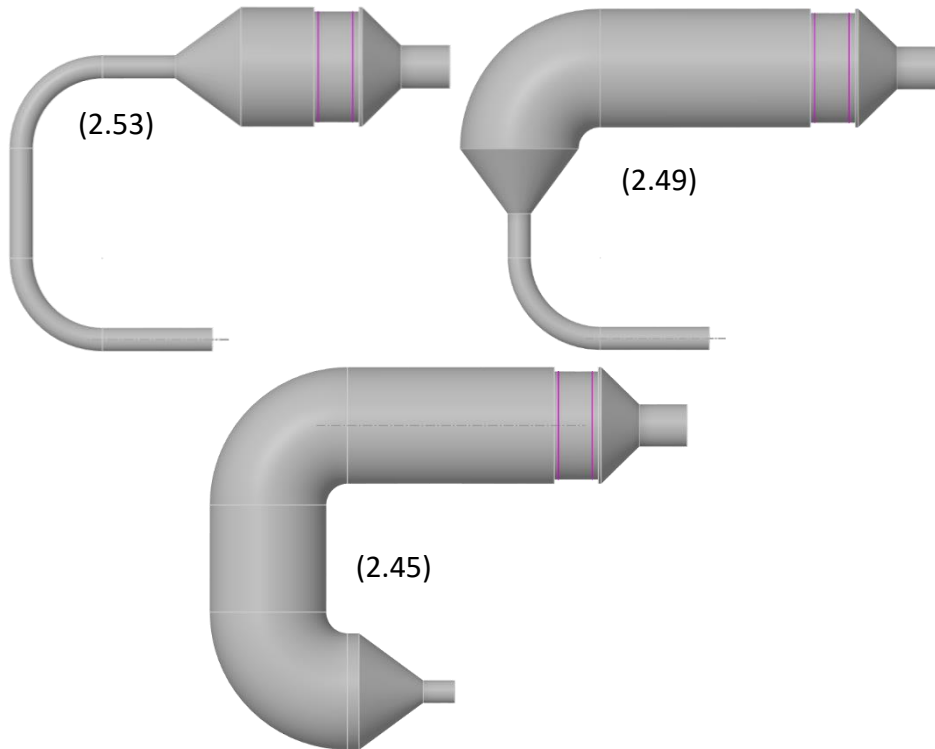
Výsledky sady variant „double knee“ s upravenými vstupními kužely před katalyzátorem s vynechanými jednotlivými rovnými částmi vstupního potrubí jsou uvedeny v tabulce 14. Výsledky je možné porovnat s výsledky z tabulky 10. Pokud se budou porovnávat pouze ty varianty, kdy kužel nahrazuje celé potrubí, tak došlo ve všech variantách ke zlepšení jak UI, tak i tlakové ztráty. Zároveň je vidět, že odstraněním částí nedochází k výraznému ovlivnění sledovaných parametrů, tudíž lze usoudit, že se jedná o stabilní geometrickou variantu. Při použití pouze kratšího kónusu je vidět že rovná část potrubí stále značně ovlivňuje proudění, ačkoliv v jedné situaci došlo ke zlepšení. Nicméně druhý model poukazuje na zhoršení, proto nelze považovat tento přístup k řešení za vhodný kvůli nestabilitě a nestálosti výsledků.

Tabulka 14 Výsledky geometrických úprav kónusu aplikované na varianty se zkráceným vstupním potrubím

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
double knee 1/3 cone no end (2.40)	8654	512	8141	0,50	0,66	0,84
double knee 1/3 cone no mid (2.41)	5829	502	5326	0,91	0,90	1,00
double knee cone no straight (2.42)	5135	503	4631	0,84	0,80	1,00
double knee cone no end (2.43)	4142	501	3641	0,84	0,81	1,00
double knee cone no mid (2.44)	4103	501	3602	0,86	0,84	1,00

Tento postupný vývoj variant se nakonec ubírá stejným směrem jako v případě rovného potrubního systému. A to tak, že se zvětší průměr potrubí na průměr katalyzátoru dříve než těsně před konvertorem. Tato sada variant (2.45) až (2.54) je

vyobrazená na obrázku 39. Modely jsou vytvořené tak, že každá jednotlivá část potrubí je postupně nahrazována právě velkým průměrem potrubí pro zjištění vlivu jednotlivých modifikací a je jednoznačně možné určit, kdy dojde k bodu zlomu a není potřeba již dělat velký průměr potrubí dále. Modifikace vlevo nahoře (2.53) tedy obsahuje jen poloviční nahrazení posledního rovného úseku. Úprava vpravo nahoře (2.49) nahrazuje poslední rovný úsek a druhé koleno. Poslední ukázková varianta (2.45) uvedená na obrázku má v celé délce velký průměr.



Obrázek 39 Ilustrační zobrazení variant „double knee lh“

Modifikace variant „double knee lh“ (2.45) až (2.54) vycházejí ze získaných výsledků pro varianty pouze s rovným potrubím, které jsou probrány v předchozí podkapitole 5.4.1. Výsledky z této varianty jsou zapsány v tabulce 15. Varianta první (2.45) uvažuje začátek rozšíření téměř okamžitě u vstupu, celková délka trubky velkého průměru je 1810 [mm]. Druhá varianta (2.47) má délku velkého průměru 1180 [mm]. Třetí varianta (2.49), má délku velkého potrubí 1043 [mm]. Čtvrtá varianta (2.51) má délku 449 [mm] a poslední, varianta číslo pět (5.53), má pouze délku 225 [mm] velké trubky. Mezi první (2.45) a druhou (2.47) variantou je poměrně velký rozdíl v délce, což je způsobeno prvním kolenem a krátkou rovnou částí uprostřed, mezi koleny. Výsledky poukazují na fakt, že čím delší je potrubí o velkém průměru, tím lepší vlastnosti lze očekávat. Při zkracování trubky velkého průměru dochází ke zhoršení UI, zvyšování tlakové ztráty a v poslední variantě u rovnoměrného vstupního profilu i ke zhoršení poměru ploch. Je vidět, že varianty dva (2.47) a tři (2.49), díky malému rozdílu vzdálenosti mezi nimi dosahují téměř totožných výsledků, což znamená, že geometrická úprava je málo náchylná na malé geometrické změny délky. U prvních třech variant (2.45) až (2.50) navíc změna rychlostního profilu

nijak zásadně neovlivňuje vlastnosti proudění, takže i tomuto vlivu odolávají dobře tyto geometrické úpravy.

Tabulka 15 Výsledky variant „double knee lh“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
double knee lh 1 (2.45)	6857	502	6354	0,96	0,96	1,00
double knee lh 1 - unif (2.46)	5675	502	5173	0,93	0,93	1,00
double knee lh 2 (2.47)	8100	502	7598	0,93	0,93	1,00
double knee lh 2 - unif (2.48)	8070	501	7569	0,85	0,83	1,00
double knee lh 3 (2.49)	7967	502	7465	0,84	0,86	1,00
double knee lh 3 - unif (2.50)	7225	501	6724	0,82	0,81	1,00
double knee lh 4 (2.51)	9810	501	9309	0,76	0,77	0,99
double knee lh 4 - unif (2.52)	9704	509	9195	0,52	0,72	0,96
double knee lh 5 (2.53)	9895	499	9396	0,88	0,88	1,00
double knee lh 5 - unif (2.54)	9118	496	8622	0,32	0,72	0,56

Varianty typu „double knee“ odpovídají nejběžněji používanému geometrickému uspořádání používaného v SCR systémech. Je zde uvedeno několik desítek různých geometrických modifikací, kde se testuje vliv těchto úprav na proudovou situaci. Je paradoxní, že základní varianta (2.0) dosahuje výjimečných výsledků, nicméně je vidět, že jakýkoliv malý zásah razantně negativně ovlivní proudění. Proto se jedná o velice labilní geometrii. Některé výše zmíněné úpravy začínají připomínat další základní varianty (3.0) a (4.0), což jen potvrzuje fakt, že tyto základní varianty jsou zvoleny správně, jelikož jsou všechny navzájem provázané.

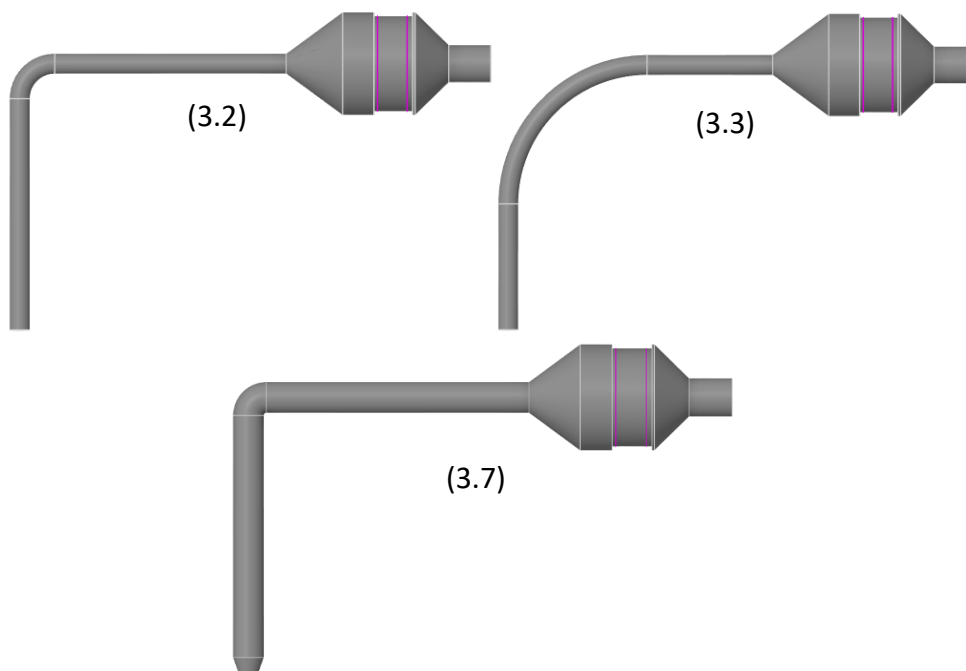
Dobrych výsledků je dosaženo pomocí úpravy (2.35) vstupního kužele, jež nahradil celou trubku. Tato geometrická úprava (2.35) se zdá být logická, jelikož plynule dovoluje proudění se rozprostřít. Tím se dosahuje nízkých tlakových ztrát, nicméně se jedná o technicky složitý systém z pohledu konstrukce. Nejlepší variantou je „double knee lh 1“ (2.45). Jedná se o design konstrukčně jednodušší, a tudíž i výrobně ekonomičtější. Výsledky dosahují požadované kvality na UI a poměru ploch, navíc se dosáhlo snížení tlakové ztráty, za cenu jen lehce vyšší ceny potrubí.

5.4.3 Varianta „long knee“

Další základní variantou je zjednodušená předchozí geometrie tak, že je zde pouze jedno koleno a prodloužené dvě rovné části. Jedná se o variantu „long knee“ (3.0). Popis původní varianty (3.0) je provedený v kapitole 5.2 společně s výsledky. Následující vývoj zde uvedený kopíruje geometrické modifikace podobně, jako tomu je u varianty „double knee“, pro ověření získaných poznatků.

První z modifikací (3.1) až (3.22), které jsou zde uvedeny, jsou změny velikosti oblouku a průměru potrubí. Změna rádia je o polovinu, případně o čtvrtinu, oproti

původnímu poloměru. Stejně tak se přistoupilo ke zvětšení poloměru na dvojnásobnou hodnotu, což v předchozím případě bohužel vzhledem ke geometrii nešlo, nicméně v tomto případě se jedná skutečně o dvojnásobnou hodnotu. Změna průměru potrubí je opět v této fázi pouze jeden a půl násobkem původního průměru, a to na hodnotu 106,5 [mm]. Kromě změny geometrie jsou provedeny výpočty s různými vstupními axiálními rychlostmi. Původní vstupní axiální rychlost je 171 [m/s]. Výpočty jsou provedeny s jednou vyšší rychlostí 210 [m/s] a dvěma menšími rychlostmi 70 [m/s] a 120 [m/s]. Nástin jednotlivých geometrií je možné vidět na obrázku 40, kde jsou zobrazeny pouze tři geometrie (3.2), (3.3) a (3.7), ale obsahují téměř všechny možné modifikace této varianty v rámci výše zmíněných úprav.



Obrázek 40 Ilustrační zobrazení variant „long knee“ s různými poloměry a průměry potrubí

Výsledky první sady variant zjišťující vliv rozdílných poloměrů kolena, vlivu změny vstupních axiálních rychlostí a většího průměru potrubí je možné vidět v tabulce 16. Jako první zajímavý fakt je potřeba podotknout, že všechny varianty dosahují velice dobrých výsledků, co se týká poměru ploch, což znamená že na vstupu do katalyzátoru je velice malá část zpětného proudění, malé odchylky od hodnoty 1 jsou pravděpodobně způsobeny numerickými chybami.

Vliv změny poloměru kolena při původní rychlosti je očekávaný. Menší poloměr znamená ostřejší přestup, čímž vznikne větší úplav za kolenem a dojde ke zvýšení tlakové ztráty, a horší distribuci proudu za kolenem, jelikož úplav „ucpe“ trubku a dovolí spalinám proudit pouze přes její část, čímž dochází k nerovnoměrnému proudění před vstupem do katalyzátoru. Tento jev není tak znatelný u většího poloměru, kde došlo ke snížení tlakové ztráty a malému zlepšení UI. Změna rychlosti se opět projevuje dle očekávání ve dvou případech ze tří, při rychlosti 120 [m/s] došlo ke zlepšení situace, tzn. snížení tlakové ztráty a zlepšení UI. U vyšší rychlosti došlo ke zvýšení tlakové ztráty a zhoršení UI,

což je způsobeno větším třením na stěnách vlivem rychlosti a větším úplavem za kolenem. Minimální rychlost se chová neočekávaně, došlo sice ke snížení tlakové ztráty, ale nedosáhlo se nejvyššího UI u této sady geometrií. Tento fakt je, pravděpodobně, způsoben tím, že celý proud vstupující do difuzoru, mění místo dopadu na katalyzátor, jelikož sám o sobě rotuje, tzn. nemá stabilní pozici a negativně ovlivňuje UI. Ačkoliv jsou všechna data brána ze statistického vyhodnocení, tak tyto hodnoty jsou nicméně zatíženy touto „chybou“. K tomuto jevu došlo i u dalších dvou variant v této sadě a to u „long knee 1,5D v120“ (3.16) a „long knee 1,5D 2r v120“ (3.20).

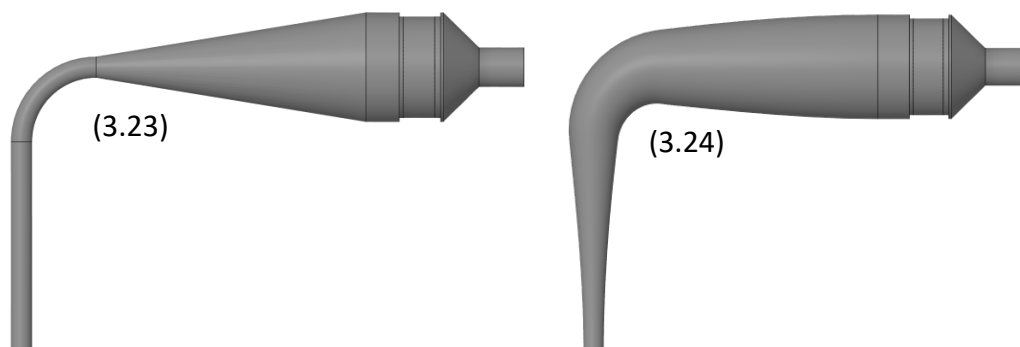
Zvětšení průměru potrubí má obecně pozitivní vliv na proudění, jelikož je menší tlaková ztráta a vyšší UI. Změna poloměru kolena nemá zásadní vliv na proudovou situaci v uvedených geometriích. Jediný zásadní vliv je u maximální rychlosti a dvou nejmenších poloměrů, kdy došlo ke zhoršení. Jinak se jedná o poměrně stabilní geometrický model.

Zvětšením průměru potrubí se dosáhlo lepších výsledků. Tento design obecně dosahuje stabilnějších výsledků bez zásadního vlivu poloměru kolen a změny rychlostí, s přihlédnutím k maximální rychlosti je již nad běžný rámec rychlostí v SCR systémech.

Tabulka 16 Výsledky variant „long knee“ s různými poloměry a průměry potrubí

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
long knee (3.0)	10123	502	9622	0,71	0,82	1,00
long knee r/4 (3.1)	10639	497	10142	0,67	0,80	1,00
long knee r/2 (3.2)	10126	497	9629	0,58	0,76	0,99
long knee 2r (3.3)	9727	498	9230	0,78	0,86	1,00
long knee v70 (3.4)	3769	86	3683	0,78	0,71	0,99
long knee v120 (3.5)	6132	248	5884	0,85	0,85	1,00
long knee v210 (3.6)	13175	750	12425	0,64	0,74	0,97
long knee 1,5D r/4 v70 (3.7)	2336	85	2251	0,91	0,91	1,00
long knee 1,5D r/4 v120 (3.8)	2969	247	2721	0,82	0,75	0,99
long knee 1,5D r/4 v171 (3.9)	4372	499	3873	0,79	0,76	0,99
long knee 1,5D r/4 v210 (3.10)	5849	752	5097	0,80	0,80	1,00
long knee 1,5D r/2 v70 (3.11)	2276	85	2190	0,88	0,85	1,00
long knee 1,5D r/2 v120 (3.12)	2814	247	2567	0,85	0,77	0,99
long knee 1,5D r/2 v171 (3.13)	3997	501	3496	0,85	0,81	0,99
long knee 1,5D r/2 v210 (3.14)	5227	754	4473	0,84	0,85	1,00
long knee 1,5D v70 (3.15)	2239	85	2154	0,92	0,91	1,00
long knee 1,5D v120 (3.16)	2990	248	2742	0,68	0,71	0,97
long knee 1,5D v171 (3.17)	3918	501	3417	0,81	0,75	0,99
long knee 1,5D v210 (3.18)	4804	752	4052	0,93	0,94	1,00
long knee 1,5D 2r v70 (3.19)	2270	85	2185	0,86	0,82	0,99
long knee 1,5D 2r v120 (3.20)	3006	248	2758	0,67	0,71	0,97
long knee 1,5D 2r v171 (3.21)	3821	501	3320	0,79	0,73	0,98
long knee 1,5D 2r v210 (3.22)	4711	752	3959	0,89	0,87	1,00

Další zkoumanou geometrickou úpravou u geometrie s jednou změnou směru proudu je změna úhlu vstupního difuzoru. Na obrázku 41 jsou vyobrazeny dvě počítané varianty. První (3.23) z nich je protažení kužele až na výstupní část z kolene, takže difuzor je poměrně jednoduchého tvaru. Vpravo na témže obrázku je již složitější geometrická úprava (3.24), kde konstantní rozšiřování průřezu kanálu probíhá od samého začátku domény, takže probíhá i v rámci kolene, proto je tato varianta mnohem složitější. Tyto varianty vychází, z již předchozích uvedených, kde se proudění jednoznačně stabilizovalo a zlepšily se sledované proudové parametry s těmito úpravami. Proto je obdobný princip aplikován na tuto variantu (3.0).



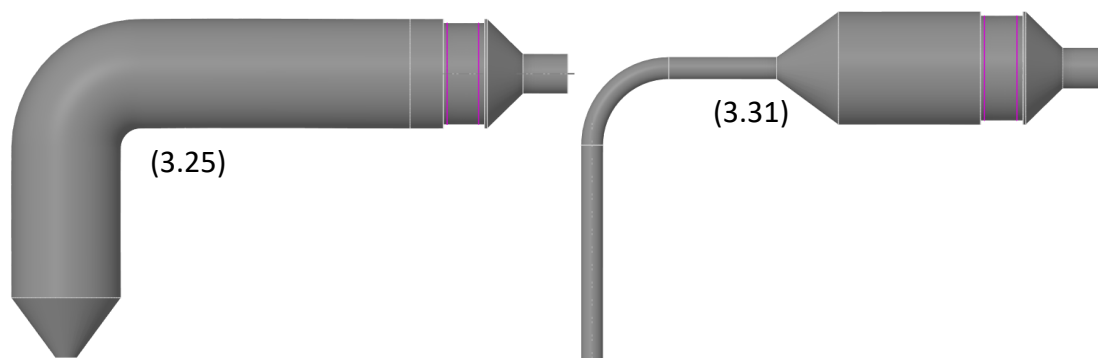
Obrázek 41 Úvodní varianty s upraveným tvarem vstupního kónusu typu „long knee“

Výsledky jsou jednoznačné. Změna vstupního difuzoru pozitivně ovlivňuje proudění na vstupu do katalyzátoru, což je možné vidět v tabulce 17. Protažení kužele pouze na konec kolene (3.23) zlepšuje UI a snižuje tlakovou ztrátu, nicméně nedosahuje se požadovaných hodnot. Výrazně lepší variantou je „long knee cone“ (3.24), u níž se již UI velice blíží k požadované hranici 0,94 [–]. Tlaková ztráta je taktéž nižší než u původní varianty.

Tabulka 17 Výsledky variant s upraveným tvarem vstupního kónusu typu „long knee“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
long knee 1/2 cone (3.23)	8857	503	8355	0,83	0,84	0,99
long knee cone (3.24)	3690	502	3188	0,92	0,91	1,00

Další z geometrických úprav je zásadní změna průměru potrubí, tak jako tomu je v předchozích kapitolách 5.4.1 a 5.4.2. Jedná se o geometrické úpravy typu „lh“ (3.25) až (3.34), které jsou na obrázku 42. Je navrženo celkově pět různých variant, kdy se mění délka potrubí velké části. První varianta (3.25) má délku velkého potrubí 1909 [mm], následuje varianta dva s 1559 [mm] (3.27), a dále 1409 [mm] (3.29), 814 [mm] (3.31) a nejkratší varianta pět (3.33) má pouze 463 [mm]. Dále se kromě délky trubky původního průměru změnil i vstupní profil, aby se ukázal vliv na danou geometrii. Profil „unif“ má konstantní rychlost po celém vstupním průřezu. Tento profil má odpovídající hmotnostní tok rotujícího vstupního profilu.



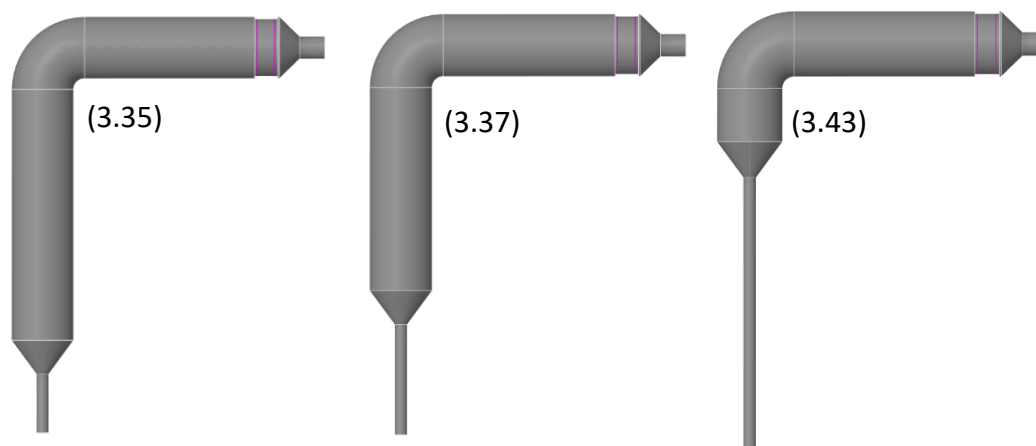
Obrázek 42 Ilustrační zobrazení variant „long knee lh“

Tabulka 18 obsahuje výsledky variant „long knee lh“ (3.25) až (3.34). Všechny varianty dosahují maximálně možných hodnot u poměru plochy, proto tento parametr není dále diskutován. U prvních dvou variant (3.25) a (3.27) je vidět, že se dosáhlo požadované maximální hodnoty UI a klesla tlaková ztráta. Varianta tři (3.29) stále dosahuje velice dobrých hodnot UI, ale pohybuje se v dolní požadované hranici. Varianty 4 (3.31) a 5 (3.33) již nedosahují požadovaných hodnot UI. Při pohledu na porovnání vstupních profilů je vidět, že první tři varianty (3.25) až (3.30) vykazují velice dobrou stálost čili nejsou ovlivněné zcela rozdílným vstupním profilem. Proto lze uvažovat variantu 1 (3.25) a 2 (3.27) za aktuálně nejvhodnější.

Tabulka 18 Výsledky variant typu „long knee lh“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
long knee lh 1 (3.25)	5615	502	5113	0,96	0,97	1,00
long knee lh 1 - unif (3.26)	5502	503	4999	0,98	0,98	1,00
long knee lh 2 (3.27)	6293	504	5789	0,95	0,95	1,00
long knee lh 2 - unif (3.28)	5755	502	5252	0,98	0,98	1,00
long knee lh 3 (3.29)	6839	501	6338	0,93	0,94	1,00
long knee lh 3 - unif (3.30)	6003	502	5501	0,94	0,95	1,00
long knee lh 4 (3.31)	8935	501	8434	0,81	0,79	1,00
long knee lh 4 - unif (3.32)	8691	502	8189	0,77	0,74	1,00
long knee lh 5 (3.33)	9111	500	8611	0,77	0,74	0,99
long knee lh 5 - unif (3.34)	8192	496	7696	0,92	0,92	1,00

V případě varianty „double knee“ (2.0) je poměrně problematické pracovat s různými změnami délky velkého průměru potrubí. Proto se tato varianta řešila tak, jak je uvedeno v kapitole výše. Varianta „long knee“ (3.0) přímo vybízí k tomu, aby se na ní nadále prováděly další geometrické úpravy v tomto stylu. To je možné vidět na obrázku 43. Rovná část před difuzorem u základní varianty, a koleno mají velký průměr potrubí. V tomto případě se mění pouze počáteční rovná část potrubí tak, aby se zjistil vliv na proudění. Varianta 1 (3.35) má délku první rovné části o velkém průměru 1500 [mm], varianta 2 (3.37) má délku 1200 [mm]. Takto pokračuje snižování délky této široké trubky až na délku 300 [mm], což je varianta 5 (3.43).



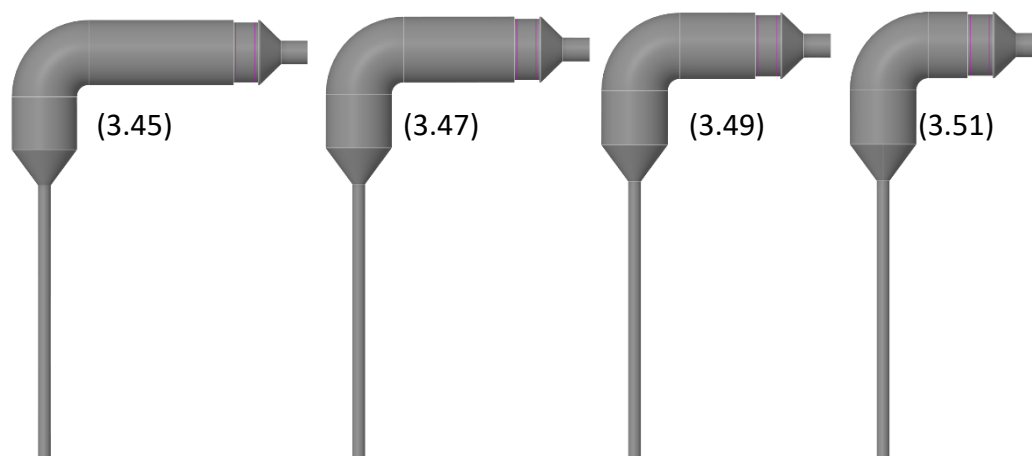
Obrázek 43 Ilustrační zobrazení variant „long knee lh str“

Výsledky modifikací (3.35) až (3.44) je možné vidět v tabulce 19. Výsledky všech těchto variant jsou srovnatelné z pohledu UI a poměru ploch. Varianty se liší rozdílnými tlakovými ztrátami, které jsou dané změnou geometrie, a rozdílnými třecími ztrátami.

Tabulka 19 Výsledky variant „long knee str“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
long knee lh str 1 (3.35)	4782	503	4279	0,96	0,97	1,00
long knee lh str 1 - unif (3.36)	5820	503	5318	0,98	0,99	1,00
long knee lh str 2 (3.37)	5719	503	5216	0,97	0,98	1,00
long knee lh str 2 - unif (3.38)	6348	502	5846	0,98	0,99	1,00
long knee lh str 3 (3.39)	7810	502	7307	0,98	0,99	1,00
long knee lh str 3 - unif (3.40)	6506	503	6004	0,98	0,99	1,00
long knee lh str 4 (3.41)	8627	500	8127	0,98	0,98	1,00
long knee lh str 4 – unif (3.42)	7131	503	6628	0,98	0,99	1,00
long knee lh str 5 (3.43)	7979	503	7476	0,98	0,98	1,00
long knee lh str 5 - unif (3.44)	8399	501	7898	0,97	0,97	1,00

Výsledky předchozích modifikací poukázaly na fakt, že vstupní rovný díl zásadně neovlivňuje proudění před katalyzátorem. Takže další logický postup je upravit druhou rovnou část, jež se nachází před katalyzátorem. Geometrické úpravy je možné vidět na obrázku 44. Varianta 1 (3.45) má délku rovné části 816 [mm], dále varianta (3.47) má 616 [mm], pokračuje 416 [mm] (3.49) a poslední varianta 4 (3.51) má délku 216 [mm]. Varianta „long knee lh str 5“ (3.43) má délku 1016 [mm].



Obrázek 44 Sada varianty „long knee lh krt“

Vliv zkrácení rovné trubky před katalyzátorem v případě varianty 1 (3.45) a 2 (3.47) je minimální. Stále se dosahuje téměř maximálních hodnot UI, změna tlakové difference je minimální a poměr ploch je pořád na maximální možné hranici. Není zde vidět ani změna parametrů při rozdílném použití profilu. Následující varianty (3.49) až (3.52) začínají však být negativně ovlivněny příliš krátkým potrubím o velkém průměru, proto se jejich výsledky zhoršují a nespĺňují požadované parametry. Nicméně stále jde o mnohem lepší výsledky, než je u základní varianty (3.0). Výsledky zde diskutované jsou zaznamenané v tabulce 20.

Tabulka 20 Výsledky sady variant „long knee krt“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
long knee lh krt 1 (3.45)	7962	503	7459	0,97	0,98	1,00
long knee lh krt 1 - unif (3.46)	8377	501	7876	0,96	0,97	1,00
long knee lh krt 2 (3.47)	7958	502	7455	0,97	0,97	1,00
long knee lh krt 2 - unif (3.48)	8275	501	7773	0,96	0,96	1,00
long knee lh krt 3 (3.49)	9424	502	8923	0,85	0,85	1,00
long knee lh krt 3 - unif (3.50)	8334	501	7833	0,96	0,96	1,00
long knee lh krt 4 (3.51)	9264	502	8762	0,94	0,93	1,00
long knee lh krt 4 - unif (3.52)	7423	500	6922	0,91	0,89	1,00

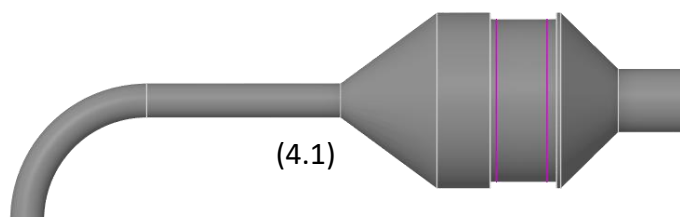
Varianta „long knee“, neboli potrubní systém s jedním kolenem, katalyzátorem a dvěma rovnými potrubími je další ze základních variant v SCR systémech. V této kapitole je uvedený postup zpracování a vylepšování varianty tak, jak šel v čase. Výsledky potvrzují to, co se zjistilo z výzkumné činnosti předchozích geometrií. A to, že změnou úhlu kužele, difuzoru, lze dosáhnout lepších výsledků. Nejlepších výsledků v rámci zadaných parametrů se dosahuje tím, že se razantně zvýší průřez kanálu (na velikost samotného katalyzátoru). Potřebná délka velkého potrubí pro dosažení požadovaných hodnot UI je cca 1310 [mm] i s kolenem (v případě „long knee lh krt 2“ (3.47)). Je vidět, že rozšíření potrubí je potřeba provést už před kolenem, aby se dosáhlo požadovaných hodnot. Porovnáním variant „long knee lh krt 4“ (3.51) a „long knee lh 4“ (3.31) je vidět, že zásadní pro proudění je

zahrnout do úprav i samotné koleno, které má veliký vliv na samotné proudění před katalyzátorem. Srovnatelné jsou varianty „long knee lh krt 4“ (3.51) a „long knee lh 3“ (3.29), kde je rozdíl pouze v délce rovných částí a výsledky jsou si velice podobné.

5.4.4 Varianta „short knee“

Další základní variantou uvedenou v kapitole 5.3 je jedna z menších variant „short knee“ (4.0), což je v podstatě varianta „long knee“ (3.0) se zkrácenými rovnými úseky. Později zmiňovaná geometrická úprava v této kapitole bude opět velice blízká tomu, co se ukázalo v předchozích variantách. To je z důvodu, že všechny varianty jsou si velice podobné a vzájemně provázané, za určitých malých změn. Stále platí, že vstupní profil je roztočený podle dříve zmíněné funkce a axiální rychlost je $171 [m/s]$. Ostatní nastavení jsou stejná jako u předešlých variant.

První z geometrických modifikací základní varianty je varianta „short knee rvrs“ (4.1), což znamená převrácené uspořádání potrubí, tzn. vstup je do kolena a teprve poté následuje rovná část. To je možné vidět na obrázku 45.



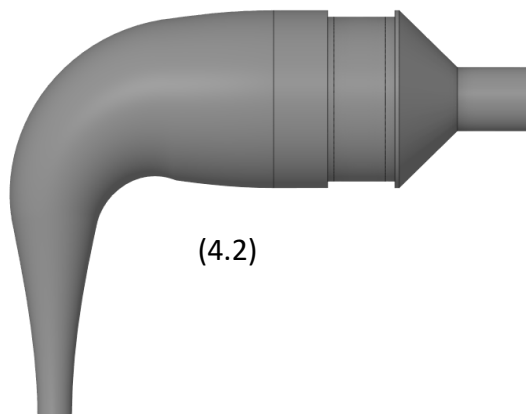
Obrázek 45 Varianta „short knee rvrs“ (4.1)

Porovnání výsledků základní (4.0) a modifikované varianty (4.1) je možné vidět v tabulce 21. Je zde zřejmé zhoršení všech parametrů, tzn. od tlakové ztráty až po poměr ploch. Je zajímavé, že UI vážený hmotnostním tokem je téměř identický, nicméně vážený plochou je mnohem horší. V tomto případě hraje pravděpodobně hlavní roli fakt, že proudění vchází rovnou do kolena, kde není ze začátku nijak usměrněno a proudění je tedy značně nestabilní.

Tabulka 21 Výsledky varianty „short knee rvrs“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
short knee (4.0)	8270	501	7769	0,68	0,73	1,00
short knee rvrs (4.1)	9446	499	8948	0,29	0,72	0,54

Další z modifikací je možné vidět na obrázku 46. Jedná se o variantu (4.2) vycházející z typu „cone“, kdy se potrubí od vstupní části postupně rozšiřuje až do průměru samotného katalyzátoru, jde v podstatě o difuzor. Tato varianta je inspirována výsledky z předešlých simulací.



(4.2)

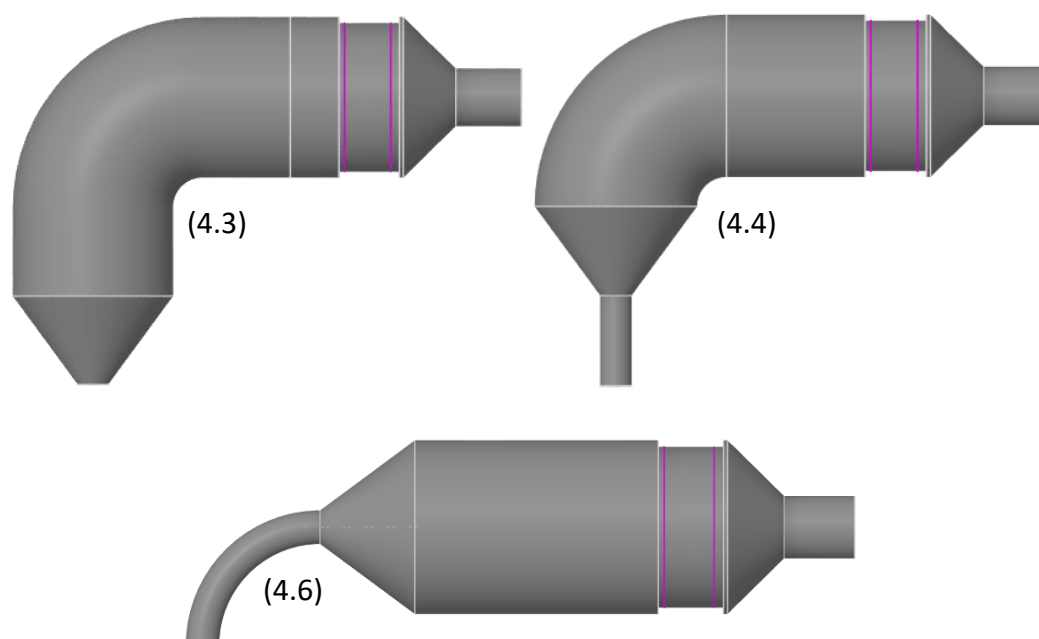
Obrázek 46 Varianta „short knee cone“ (4.2)

Výsledky této varianty (4.2) jsou zapsané v tabulce 22. Je vidět, že došlo k razantnímu zlepšení všech proudových sledovaných ukazatelů. Snížila se tlaková ztráta, což je důsledkem snížení rychlosti spalin. To je žádoucí jev, jelikož není potřeba velkých rychlostí na vstupu do kanálku katalyzátoru, aby dobře proběhly chemické reakce. Dále je zachován poměr ploch. Hodnota UI je vyšší, avšak není dosaženo požadovaných hodnot.

Tabulka 22 Výsledky varianty „short knee cone“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
short knee cone (4.2)	4827	501	4326	0,90	0,87	1,00

Z předešlého postupu jednotlivých prací provedených na daných geometriích vyplývá, že dalším logickým postupem v aplikaci modifikací je použití rozšířeného potrubí v celém systému, tzv. modifikace „lh“. V případě „short knee“ (4.0) jsou vytvořeny varianty tak, jak jsou zobrazené na obrázku 47. Varianta 1 (4.3) má délku velkého potrubí 909 [mm], číslo 2 (4.4) má 705 [mm] a poslední varianta (4.5) má délku velkého potrubí pouze 312 [mm]. Varianta „rvrs lh“ (4.6) má délku rovného potrubí 517 [mm].



Obrázek 47 Ilustrativní obrázky sady variant „short knee lh“

Výsledky variant „short knee lh“ (4.3) až (4.6) jsou v tabulce 23. Je vidět, že i v případě takto krátké domény lze dosáhnout požadovaných hodnot UI, pokud se přistoupí k zásadní změně průměru potrubí. Nicméně je potřeba stále dostatečně dlouhé trubky, protože kratší délka negativně ovlivňuje UI. Poměry ploch jsou u všech variant na velice dobré úrovni. U varianty „rvrs lh“ (4.6) téměř nedošlo ke změně tlakového spádu, což je způsobeno ponecháním kolena na malém průměru 71 [mm]. To způsobí uhnutí proudu, který při vstupu do velkého kanálu není rovnoměrně distribuovaný, a v části za zaústěním se vytvoří velký úplav. UI se oproti původní variantě „rvrs“ (4.1) zvýšilo, avšak nedostatečně.

Tabulka 23 Výsledky variant „short knee lh“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
short knee lh 1 (4.3)	5692	502	5191	0,95	0,95	1,00
short knee lh 2 (4.4)	5715	501	5213	0,90	0,88	0,99
short knee lh 3 (4.5)	5257	501	4756	0,83	0,75	1,00
short knee lh rvrs (4.6)	9333	503	8830	0,67	0,73	1,00

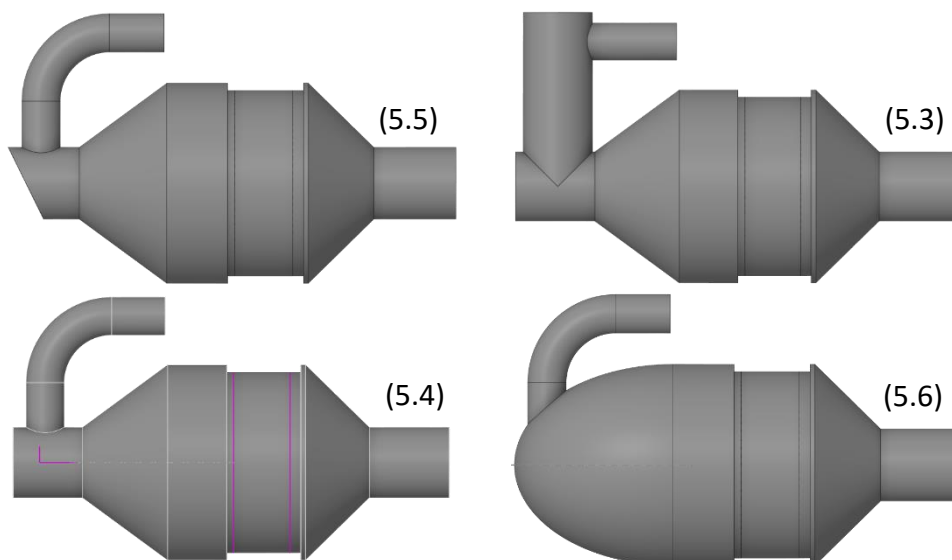
Varianta „short knee“ (4.0) je náročnou variantou, jelikož se jedná o velice malou doménu, potažmo o malý geometrický model. Rychlosti jsou zde velké a není příliš prostoru s proudem něco udělat, tak aby nedošlo k velké tlakové ztrátě (použití rozdělovacích desek by fungovalo pravděpodobně velice dobře, ale tlaková ztráta by vystřelila do neúnosných hodnot). Postupným vývojem, popsáním výše v textu, se dospělo opět k variantě, která přináší uspokojivé výsledky. Jedná se opět, jako v předchozích případech o variantu, kdy se zvětší vnější průměr potrubí na průměr katalyzátoru. Tato varianta (4.3) je zobrazená na obrázku 47 vlevo nahoře. Varianta (4.3)

dosahuje nízkých tlakových ztrát, požadovaných hodnot UI a poměru ploch, který je taktéž nezbytný parametr.

5.4.5 Varianta „tdm“

Jedná se v pořadí již o pátou variantu, která se uvažuje jako varianta základní. Varianta „tdm“ (5.0), jak je popsáno výše, vychází z kontejnerových kogeneračních jednotek, proto je nejkompaktnější. Jelikož je snaha zachovat umístění katalyzátoru vůči vstupu, je poměrně náročné změnit geometrii tak, aby se dospělo k požadovaným hodnotám.

Na následujícím obrázku 48 jsou vyobrazené některé modifikace varianty „tdm“ (5.0). Konkrétně se jedná o varianty „vstb cut half“ (5.5) vlevo nahoře, „tdm tupo big“ (5.3) vpravo nahoře, „tdm vstb“ (5.4) vlevo dole a „tdm sphere“ (5.6) vpravo dole. U prvních třech je snaha zachovat vnější rozměry co nejpřesněji. Varianta „tdm bpss“ (5.2) obsahuje na vstupu do difuzoru další vnitřní trubku, ta má za úkol proud rozprostřít i v horní části (ve stejném směru jako je vstupní část).



Obrázek 48 Ilustrativní obrázky sady variant „tdm“

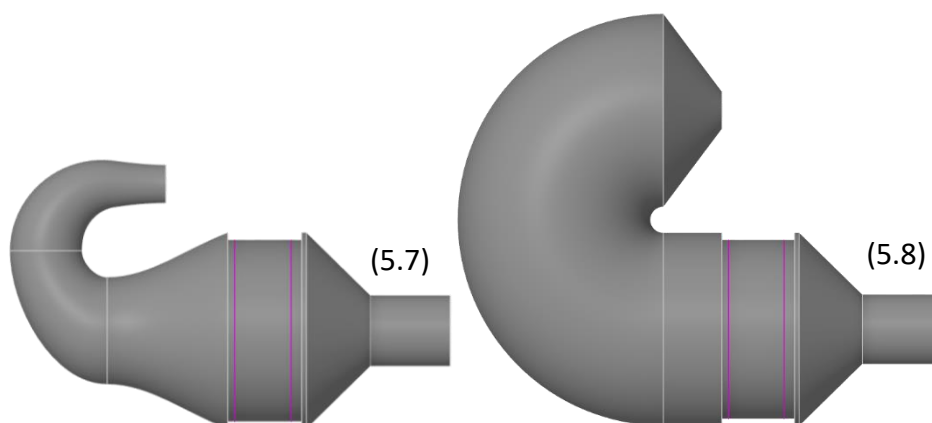
Výsledky předešlých variant jsou uvedené v tabulce 24. Základní varianta a modifikace „tupo big“ (5.3) a „cut half“ (5.5) mají problematickou vstupní část do katalyzátoru, jelikož nedojde k otočení proudu. Proud je kvůli své dynamice proudu usměrňován pouze do spodní části (v opačném směru, než je ve vstupní části). Proto se přistoupilo k variantě „bpss“ (5.2) a „vstb“ (5.4), v nichž jsou použity vnitřní vestavby, tudíž aplikací by se nezasáhlo do okolní konstrukce. Nicméně ani těmito variantami se nedosáhlo uspokojivých výsledků. Opět je možnost sáhnout po osvědčených rozdělovacích (klapkových) stěnách, čímž by se však zvýšila tlaková ztráta nad nepřijatelnou mez. Důsledky na poměr ploch a UI lze pouze domýšlet, nicméně by se dalo očekávat zlepšení obou ukazatelů při správném umístění a designu desek.

Z tabulky je vidět, že žádná ze zde uvedených variant (5.0) až (5.6) se ani zdaleka nepřibližuje požadavku na hodnotu UI. Tlaková ztráta je u každé modifikace nižší než u původní varianty (5.0). Poměr ploch je dostačující pouze u třech variant (5.1) až (5.3). Dvě z nich mají vnitřní vestavby (5.2) a (5.4), které jsou potenciálním problémem, jelikož spaliny stále mohou obsahovat malé částičky, jež běžně působí abrazivně. Problém by však nebyly jen malé částičky, ale i DEF, které se do těchto systémů vstříkují. Tato kapalina způsobuje při nesprávném odpařování lokální usazeniny.

Tabulka 24 Výsledky sady variant „tdm“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
tdm (5.0)	11836	500	11336	0,63	0,64	0,94
tdm – unif (5.1)	9780	501	9279	0,76	0,72	0,98
tdm bpss (5.2)	10243	498	9745	0,72	0,73	0,99
tdm tupo big (5.3)	9164	503	8661	0,63	0,66	0,99
tdm vstb (5.4)	9320	500	8820	0,80	0,72	0,98
tdm cut half (5.5)	7762	500	7261	0,54	0,66	0,96
tdm sphere (5.6)	8382	508	7874	0,37	0,68	0,82

Další úpravou je, logicky vzhledem k výsledům předchozích variant, varianta (5.7) se změnou difuzoru. Tato varianta (5.7) je vidět na obrázku 49 vlevo. Je vidět, že geometrie je to poměrně složitá jak na vymodelování, tak i potenciálně na výrobu. Jedná se o zdeformovanou verzi „short knee“, jelikož je zde vstup ještě blíže k samotnému katalyzátoru. Na témže obrázku vpravo je varianta navazující, modifikace „lh“ (5.8). Tyto varianty vždy obsahují změnu velikosti potrubí, což je problém, jelikož koleno nelze s tímto poloměrem ohnout, jak je potřeba. Proto, jak je vidět na obrázku, se udělala půlka anuloidu, čímž se posunul vstup.



Obrázek 49 Varianta „tdm cone“ (5.7) a „tdm lh“ (5.8)

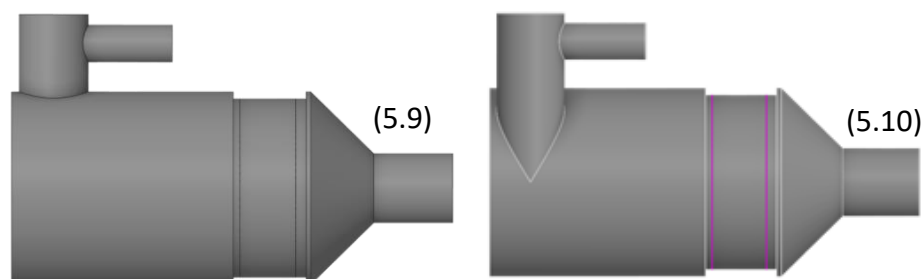
Výsledky výše popsaných modifikací varianty „tdm“ (5.7) a (5.8) jsou popsány v tabulce 25. Obě varianty dosahují nižších tlakových ztrát než základní varianta. Pomocí změny kónusu (5.7), je dosaženo nejnižší tlakové ztráty ve variantách „tdm“. Poměr ploch

dosáhl maxima. Ukazatele hodnoty UI se drží na nízkých hodnotách a nedosahují požadovaných hodnot.

Tabulka 25 Výsledky varianty „tdm cone (5.7)“ a „tdm lh (5.8)“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
tdm cone (5.7)	4990	503	4487	0,69	0,65	1,00
tdm lh (5.8)	8129	501	7628	0,73	0,76	1,00

Modifikace „lh“ je možné uchopit i jinak, než jak je ukázáno výše. Lze je brát jako inspiraci a nedržet se standardů, které jsou v předchozích variantách zavedené. V případě varianty „tdm“ jsou zde uvedeny dvě varianty „tupo bigst“ (5.9). V obou je aplikován princip velkého průměru trubky na části potrubí. Rozdíl ve variantách je v zaústění vstupní trubky, varianta „tang“ (5.10) má tangenciální zaústění, jak je vidět na obrázku 50 vpravo.



Obrázek 50 Varianty „tdm tupo bigst“

Výsledky modifikované varianty „tdm“ (5.9) a (5.10) pomocí velkého průměru trubky jsou uvedeny v tabulce 26. Obě varianty (5.9) a (5.10) dosahují lepších tlakových ztrát oproti původní variantě. Varianta bez tangenciálního zaústění (5.9) navíc dosáhla požadavku na poměr ploch. Nicméně ani u jedné varianty není dosaženo požadovaného UI, ačkoliv varianta „tdm tupo bigst“ (5.9) se přiblížila k požadovaným hodnotám v těchto geometriích nejvíce.

Tabulka 26 Výsledky variant „tdm tupo bigst“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
tdm tupo bigst (5.9)	8321	501	7820	0,87	0,85	0,99
tdm tupo bigst tang (5.10)	8888	502	8386	0,73	0,85	0,94

V této podkapitole je popsána varianta „tdm“, jež je inspirována kontejnerovým typem kogeneračních jednotek, které obecně mají problém s prostorem, proto se uvažuje vstup do modelu velice blízko k samotnému katalyzátoru. Tento fakt má za následek to, že není jednoduše uchopitelné, jak dosáhnout požadovaných limitů UI, poměru ploch a tlakové ztráty. Nejlepší varianta (5.9) se opět inspirovala výše uvedenými úspěchy, a je v ní aplikován velký průměr trubky před samotným katalyzátorem. V případě této varianty je potřeba přistoupit k dalším úpravám, nicméně je dosažen dílčí úspěch. Tlaková ztráta

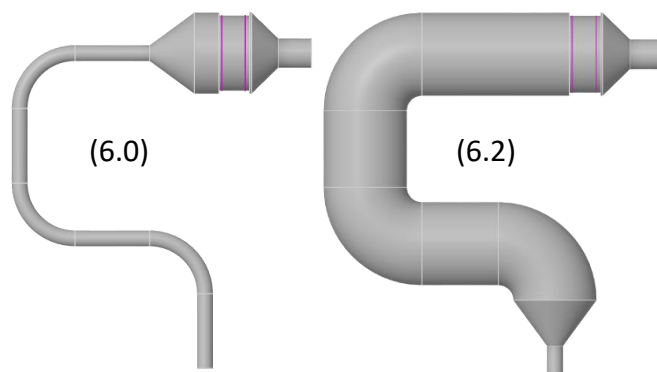
je snižena, poměr ploch a UI jsou zvýšené oproti původní variantě. Proto se tato varianta uvažuje za výslednou.

5.4.6 Varianta „triple knee“

Základní varianty uváděné v kapitolách 5.4.1 až 5.4.5 jsou vzájemně propojené, jak je vidět v předchozím textu. Stačí malá změna geometrie a jednotlivé geometrie se prolínají a doplňují. Co kdyby se ale naopak rozšířila nejběžněji používaná varianta (2.0)?

Varianta značená „triple knee“ (6.0) je rozšířením základní varianty „double knee“ (2.0) o další koleno. Okrajové podmínky zůstávají stále stejné, nicméně model je rozšířený. Jak tato doména vypadá, je možné vidět na obrázku 51 vlevo. Vpravo na témže obrázku je aplikace principu „lh“ (6.2) na tuto geometrii, s tím že jsou dále opět uvedené výsledky s rozdílným poměrem dlouhé trubky vůči původnímu malému potrubí.

Tento model je speciální v tom, že výpočty jsou provedeny jednak pomocí klasicky používaného rotujícího profilu, tak i rovnoměrného profilu. Ale zároveň se aplikoval, i další profil. Jedná se o deformovaný rotující profil. Tento profil je pravděpodobně nereálný, jelikož je pokřivený podle osy tak, že v jedné části rotuje rychleji a v následující buňce vedle mnohem pomaleji. Tento profil má za úkol vnést do výpočtů náhodný vliv proudění, za účelem zjištění stability navrhované varianty. Varianta „triple knee lh 2“ (6.5) odpovídá variantě „double knee lh 1“ (2.45), ale je přidáné jedno koleno navíc spolu s rovnou částí před ním. Tím je možné zjistit, jak ovlivní proudění přidání dalšího členu před samotný model základní varianty (2.0). Stejně tak platí, že „triple knee lh 3“ (6.8) odpovídá „double knee lh 3“ (2.49) a varianty s označením 4 (6.11) a (2.51) taktéž.



Obrázek 51 Ilustrativní zobrazení variant „triple knee“

Výsledky variant (6.0) až (6.13) se třemi kolennými jsou vidět v tabulce 27. Z výsledků je vidět, že postupná změna malého potrubí za velký průměr potrubí má pozitivní vliv na všechny sledované ukazatele. Zdeformovaný profil u většiny variant však vykazuje horší výsledky než běžně uvažované rozumně vypadající vstupní profily, nicméně výsledky nejsou výrazně jiné. Lze z toho tedy vyvodit stabilitu geometrických řešení. Varianta (6.0) bez úprav je srovnatelná se základní variantou (2.0) se dvěma kolennými, s přihlédnutím k větší tlakové ztrátě právě kvůli přidání kolenu a třecím ztrátám. Zásadní rozdíl

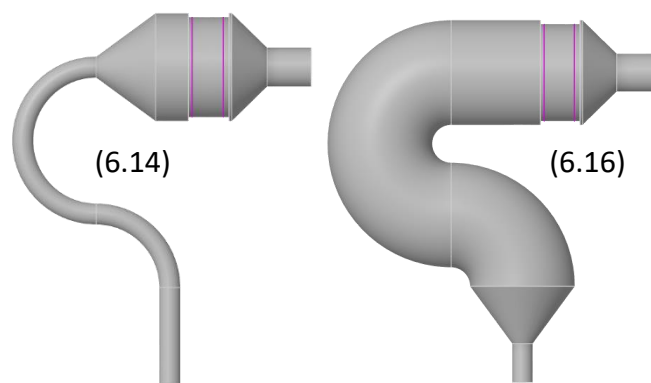
v hodnotách existuje, ale jak je okomentováno výše, základní varianta (2.0) vykazuje nezvykle vysoké hodnoty UI, ale je velice nestabilní.

Nejlepších výsledků se dosahuje u varianty „lh 1“ (6.2), jelikož je zde největší podíl velkého potrubí. Druhá varianta (6.5), jež má odpovídající variantu s dvěma koleny, má již nižší hodnoty UI, nicméně poměr ploch je stále v pořádku. V tomto případě je UI lehce nižší pro rotující profil, než u „double knee lh 1“ (2.45), ale vyšší pro rovnoměrný profil, takže průměrně se dá uvažovat, že hodnoty navzájem odpovídají. Při porovnání zbývajících variant, jež mají odpovídající protějšek u dvou kolen, jsou výsledky téměř totožné. Je tedy vidět, že navržené řešení je velice stabilní a dosahuje, i při různých vstupních profilech, standartní výsledky a zároveň sledované veličiny nejsou příliš zatížené geometrií vstupního potrubí před sledovanou doménou.

Tabulka 27 Výsledky variant „triple knee“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
triple knee (6.0)	11997	496	11501	0,33	0,75	0,56
triple knee - def. prf. (6.1)	12198	500	11698	0,29	0,72	0,54
triple knee lh 1 (6.2)	6316	502	5814	0,98	0,98	1,00
triple knee lh 1 – unif (6.3)	5688	502	5187	0,98	0,99	1,00
triple knee lh 1 - def. prf. (6.4)	8589	502	8087	0,91	0,90	1,00
triple knee lh 2 (6.5)	7922	501	7420	0,94	0,94	1,00
triple knee lh 2 – unif (6.6)	6644	501	6143	0,98	0,99	1,00
triple knee lh 2 - def. prf. (6.7)	8752	502	8249	0,91	0,90	1,00
triple knee lh 3 (6.8)	9733	503	9230	0,84	0,87	1,00
triple knee lh 3 – unif (6.9)	8796	501	8295	0,83	0,82	1,00
triple knee lh 3 - def. prf. (6.10)	10595	501	10094	0,83	0,83	1,00
triple knee lh 4 (6.11)	11259	500	10759	0,77	0,72	1,00
triple knee lh 4 – unif (6.12)	11037	510	10527	0,52	0,73	0,96
triple knee lh 4 - def. prf. (6.13)	12657	506	12150	0,57	0,72	0,96

Další geometrické úpravy varianty „triple knee“ je možné vidět na obrázku 52. Tyto varianty (6.14) a (6.16) jsou zkrácenými předchozími modifikacemi tak, že jsou odstraněny rovné úseky v potrubí. Obdobný postup prací je provedený i u předchozí varianty v podkapitole 5.4.2, kde se taktéž zjišťoval vliv této změny geometrie. Varianta (6.14) uvedená na obrázku vlevo je obdobou varianty „double knee no straight (2.24)“, jež se prodloužila o další koleno a rovnou část. Stejně jako v předchozím případě jsou simulace provedeny i s deformovaným profilem.



Obrázek 52 Varianty „triple knee short (6.14)“ a „triple knee short lh (6.16)“

Výsledky předchozích dvou zkrácených variant jsou v tabulce 28. Krátká varianta (6.14) s původním průřezem potrubí nedosahuje požadovaných hodnot. Tyto hodnoty odpovídají velice přesně variantě s dvěma koleny v krátké verzi, tzn. přidáním dalšího členu nedošlo k zásadní změně. Změnila se pouze tlaková ztráta dle očekávání. Zvětšením průměru potrubí se však dosáhlo opět kvalitních výsledků ve všech sledovaných faktorech. Změna vstupního profilu na „rozbitý“ profil negativně ovlivní jak tlak, tak i UI, ale poměr ploch zůstává zachovaný. Hodnoty jsou nižší než u rovnoměrného profilu, ale i tak jsou na velice dobré úrovni, což by pro neočekávané situace a přechodové stavy znamenalo, že i v těchto případech by nenastaly zásadní problémy.

Tabulka 28 Výsledky variant „triple knee short“ a „triple knee short lh“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
triple knee short (6.14)	9818	506	9312	0,60	0,75	0,98
triple knee short - def. prf. (6.15)	11556	507	11050	0,44	0,68	0,96
triple knee short lh (6.16)	6365	501	5864	0,97	0,98	1,00
triple knee short lh - def. prf. (6.17)	8583	501	8082	0,87	0,85	1,00

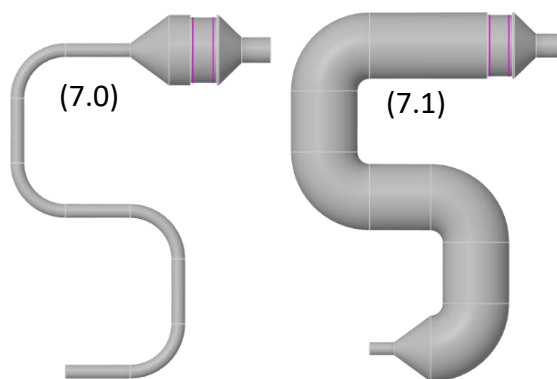
Varianta „triple knee“ je vytvořena na základě toho, že potrubní systémy jsou složité a mohou obsahovat značné množství kolen pro změnu směru. Výsledky zde opět hovoří zcela jasně. Zvětšením průměru potrubí se dosáhne zlepšení všech sledovaných faktorů, ale i to má svou hranici. Je zde vidět, že není potřeba mít velké potrubí v celé délce. Při porovnání výsledků třech kolen a dvou kolen, je vidět že stačí mít pouze dvě poslední kolena zvětšená a postačuje to k dosažení požadovaných hodnot. Co se stane, když se doména ještě zvětší?

5.4.7 Varianta „quadro knee“

Další a poslední geometrická úprava je varianta se čtyřmi koleny, která je v poslední části ještě lehce rozšířena o další kolena, ale to je již pouze okrajová záležitost. Tato varianta vznikla ze stejného důvodu jako varianta se třemi koleny. Přidalo se tedy ještě

jedno koleno, aby se zjistil vliv na proudění před katalyzátorem a zároveň pro ověření platnosti principů zjištěných u základních variant.

Varianta se čtyřmi koleny je vyobrazená na obrázku 53, ve variantě s původním malým průměrem vlevo (7.0), a s velkým průměrem trubky vpravo (7.1). Je tedy vidět, že je opět, jako v předchozí kapitole, přidáno koleno a rovná část k předešlé variantě („triple knee“ (6.0)). Tím je opět rozšířen výpočetní model o další část, která může mít potenciální vliv na celkovou proudovou situaci před katalyzátorem. Platí obdobný princip geometrické podobnosti jako v předchozí kapitole a to tak, že „quadro knee lh 2“ (7.3) je rozšířenou variantou „triple knee lh 1“ (6.2), „quadro knee lh 3“ (7.5) je rozšířená „triple knee lh 2“ (6.4) atd., což zajišťuje porovnatelnost výsledků a možnost vyhodnocení vlivu rozšíření geometrie.



Obrázek 53 Varianta „quadro knee“ a sada „quadro knee lh“

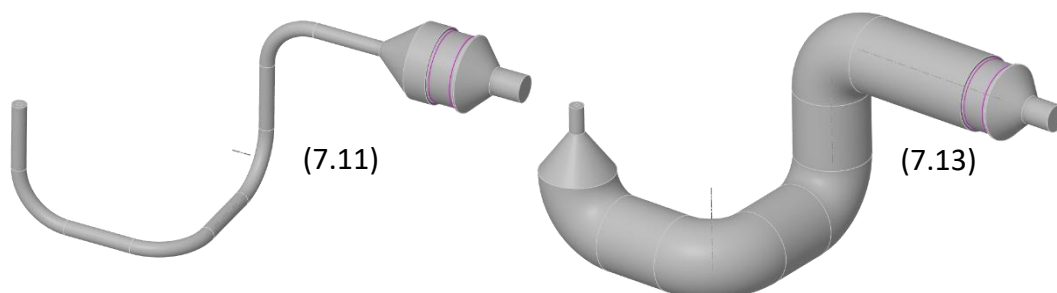
Výsledky variant (7.0) až (7.10) z obrázku 53 popsané výše jsou uvedené v tabulce 29. Počáteční varianta (7.0) s původním průměrem potrubí má obdobné hodnoty jako varianta pouze se třemi koleny s původním potrubím (6.0). Výsledky jsou téměř totožné. Varianta 1 (7.1) dosahuje nejlepších hodnot při obou vstupních profilech. Dosahuje se nízké tlakové ztráty, vysokých hodnot UI a stejně tak poměru ploch. Výsledky druhé varianty (7.3) se shodují s těmi odpovídajícími pro „triple knee“ (6.2) pro roztočený profil. U rovnoměrného profilu jsou výsledky nejednoznačné, ale třetí varianta (7.5) opět odpovídá výsledky variantě (6.5). Výsledky čtvrté varianty (7.7) se však již rozcházejí pro rotující vstupní profil, kdy se dosahuje lepších výsledků ve variantě se čtyřmi koleny (7.7) oproti třem (6.8), ale pro rovnoměrný profil jsou výsledky shodné. Nejlepší z uvedených variant je číslo 3 (7.5), jelikož potvrzuje informace získané z varianty „triple knee“ a „double knee“ a to, že stačí rozšířit potrubí před druhým kolenem na velký průměr a dosáhne se požadovaného efektu, ušetří se za materiál, oproti celému potrubí, a výsledky nejsou ovlivněny.

Tabulka 29 Výsledky varianty „quadro knee“ a sady „quadro knee lh“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
quadro knee (7.0)	13443	497	12945	0,31	0,72	0,55
quadro knee lh 1 (7.1)	6307	503	5804	0,98	0,98	1,00
quadro knee lh 1 – unif (7.2)	6029	505	5525	0,98	0,98	1,00
quadro knee lh 2 (7.3)	7939	504	7434	0,96	0,97	1,00
quadro knee lh 2 - unif (7.4)	7254	503	6751	0,91	0,91	1,00
quadro knee lh 3 (7.5)	9020	502	8518	0,97	0,97	1,00
quadro knee lh 3 - unif (7.6)	8801	501	8300	0,98	0,98	1,00
quadro knee lh 4 (7.7)	11648	504	11145	0,94	0,94	1,00
quadro knee lh 4 - unif (7.8)	10163	501	9662	0,85	0,83	1,00
quadro knee lh 5 (7.9)	13155	501	12653	0,66	0,74	0,96
quadro knee lh 5 - unif (7.10)	12393	509	11883	0,51	0,73	0,97

Geometrie (7.0) až (7.10) mají v podstatě rovinné uspořádání. Nicméně takovéto rozmístění nemusí být vždy použitelné, jelikož potrubní systémy jsou přizpůsobené okolní zástavbě a musí se vyhýbat okolním zařízením – obzvláště v případě kontejnerových kogeneračních jednotek, ale i v jiných aplikacích.

Jde tedy o to, že potrubí mohou nabývat různých tvarů a je potřeba zjistit, zda výsledky zjištěné v kapitolách výše nejsou zatíženy chybou uvažování pouze ve 2D. Následující sady variant proto uvažují změny směru potrubí ve 3D, tak jak ukazuje obrázek 54. Jednotlivá označení vždy odpovídají geometrickým variantám z předchozích výpočtů „quadro knee“, tzn. že „quadro knee 3Dv1 lh 3“ (7.17) má stejné délky jednotlivých částí potrubí jako „quadro knee lh 3“ (7.5), nicméně kolena jsou pootočená tak, jak je vidět na již zmíněném obrázku.



Obrázek 54 Sada variant „quadro knee 3Dv1“

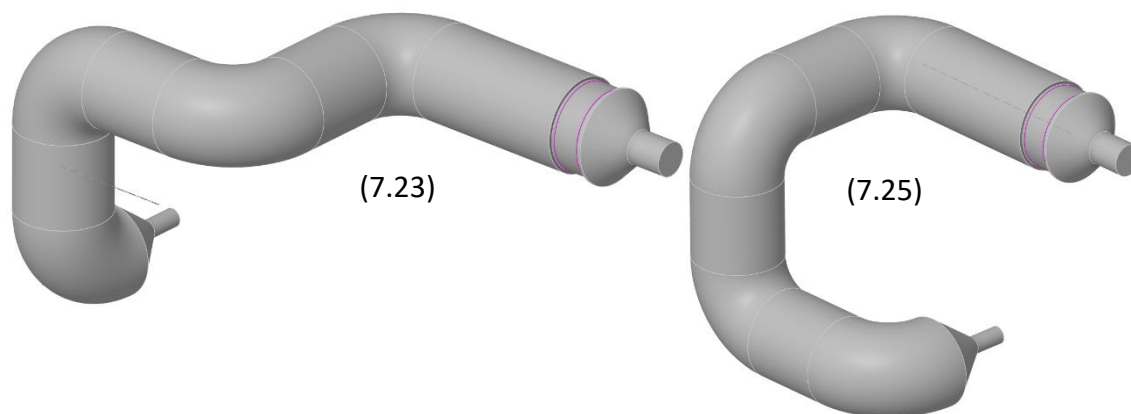
Výsledky první sady variant pootočených kolena do 3D prostoru se čtyřmi koleny jsou v tabulce 30. Výsledky jsou obdobné jako v předchozím případě se čtyřmi koleny v případě rotujícího profilu. Nicméně je vidět, že rovnoměrný vstupní profil zde ve čtyřech případech z pěti ((7.14), (7.16), (7.20) a (7.22)) má nižší hodnoty UI, a tlaková ztráta je nižší. Při porovnání rovnoměrného vstupního profilu v této sadě výpočtů a té předchozí je vidět, že dochází k rozporu u modifikace číslo 3 (7.17), jež má být obdobou varianty „double knee“

(2.45). Je tedy vidět, že profil s konstantní vstupní rychlostí je značně ovlivněn směrem jednotlivých kolen.

Tabulka 30 Výsledky variant „quadro knee 3Dv1“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
quadro knee 3Dv1 (7.11)	13471	498	12973	0,30	0,72	0,54
quadro knee 3Dv1 unif (7.12)	11739	500	11239	0,31	0,72	0,56
quadro knee 3Dv1 lh 1 (7.13)	6347	503	5844	0,98	0,98	1,00
quadro knee 3Dv1 lh 1 - unif (7.14)	5625	503	5122	0,97	0,97	1,00
quadro knee 3Dv1 lh 2 (7.15)	7858	505	7353	0,98	0,98	1,00
quadro knee 3Dv1 lh 2 - unif (7.16)	6967	502	6465	0,89	0,89	1,00
quadro knee 3Dv1 lh 3 (7.17)	9909	502	9407	0,88	0,88	1,00
quadro knee 3Dv1 lh 3 - unif (7.18)	8475	502	7973	0,91	0,90	1,00
quadro knee 3Dv1 lh 4 (7.19)	10857	502	10356	0,92	0,92	1,00
quadro knee 3Dv1 lh 4 - unif (7.20)	9632	502	9129	0,83	0,83	1,00
quadro knee 3Dv1 lh 5 (7.21)	13325	502	12823	0,63	0,72	0,99
quadro knee 3Dv1 lh 5 - unif (7.22)	11953	501	11452	0,73	0,71	0,99

Přechozí sada variant (7.11) až (7.22) vnesla do výpočtů další dimenzi tím, že jsou kolena ohnuta jiným směrem než pouze v ploše. Výsledky jasně ukazují, že tato změna dokáže ovlivnit proudění v potrubí a tím i sledované veličiny. Proto jsou zde ukázány výsledky dalších výpočtů. Geometrie se změnila dle obrázku 55. Stále platí, že kolena mají různé směry, nicméně jedná se pouze o pootočení předešlé geometrie v jednom kolenu. Výpočty jsou prováděny již pouze s variantou „lh“, což znamená, že se nepočítá základní varianta s malým potrubím, ale počítá se od největšího a postupně se ubírá množství velkého průměru potrubí.



Obrázek 55 Ilustrativní zohrazení variant „quadro knee 3Dv2“ a „3Dv3“

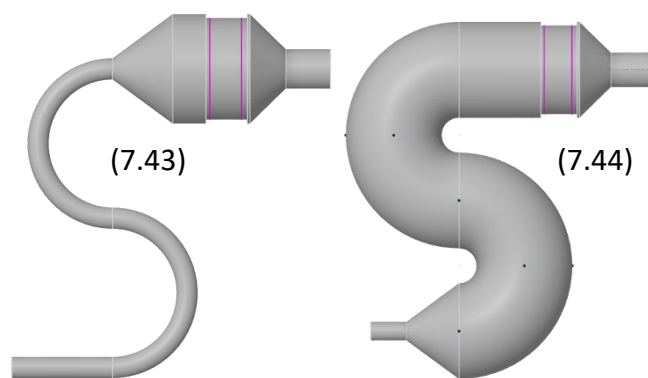
Výsledky pootočených 3D variant jsou v tabulce 31. První varianty (7.23) a (7.25) odpovídají předešlým výsledkům a dosahují velice dobrých hodnot ve sledovaných ukazatelích. Počítané varianty mají výsledky poměrně nestabilní, ačkoliv v některých případech jsou sledované hodnoty UI na vysoké úrovni, tak pouze změnou profilu, či

tvarem potrubí dochází k nerovnoměrným výsledkům. Pokud by se vzaly průměrné hodnoty u variant s označením tři (7.31) až (7.34), tak stále dosahuje požadovaných hodnot, což je změna oproti předešlým výpočtům (7.17) a (7.18). Poslední z modifikací (7.39) až (7.42) nesplňují požadavky, což je obdobné jako u všech předešlých výpočtů.

Tabulka 31 Výsledky variant „quadro knee 3Dv2“ a „3Dv3“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
quadro knee 3Dv2 lh 1 (7.23)	6385	502	5882	0,98	0,98	1,00
quadro knee 3Dv2 lh 1 - unif (7.24)	6047	503	5545	0,98	0,98	1,00
quadro knee 3Dv3 lh 1 (7.25)	6353	503	5850	0,98	0,98	1,00
quadro knee 3Dv3 lh 1 - unif (7.26)	5873	502	5371	0,97	0,98	1,00
quadro knee 3Dv2 lh 2 (7.27)	7879	501	7378	0,97	0,98	1,00
quadro knee 3Dv2 lh 2 - unif (7.28)	7052	502	6550	0,91	0,90	1,00
quadro knee 3Dv3 lh 2 (7.29)	8156	503	7652	0,98	0,98	1,00
quadro knee 3Dv3 lh 2 - unif (7.30)	7094	502	6591	0,94	0,94	1,00
quadro knee 3Dv2 lh 3 (7.31)	9854	502	9352	0,88	0,88	1,00
quadro knee 3Dv2 lh 3 - unif (7.32)	8311	503	7808	0,97	0,97	1,00
quadro knee 3Dv3 lh 3 (7.33)	9900	502	9398	0,88	0,88	1,00
quadro knee 3Dv3 lh 3 - unif (7.34)	8540	502	8038	0,93	0,93	1,00
quadro knee 3Dv2 lh 4 (7.35)	10976	502	10474	0,92	0,92	1,00
quadro knee 3Dv2 lh 4 - unif (7.36)	10135	500	9634	0,96	0,96	1,00
quadro knee 3Dv3 lh 4 (7.37)	11564	500	11064	0,96	0,96	1,00
quadro knee 3Dv3 lh 4 - unif (7.38)	9873	503	9371	0,77	0,81	1,00
quadro knee 3Dv2 lh 5 (7.39)	13214	502	12712	0,64	0,70	0,99
quadro knee 3Dv2 lh 5 - unif (7.40)	12036	503	11534	0,60	0,73	0,97
quadro knee 3Dv3 lh 5 (7.41)	12919	499	12420	0,82	0,82	1,00
quadro knee 3Dv3 lh 5 - unif (7.42)	11995	501	11494	0,72	0,74	1,00

Pro zajímavost jsou zde uvedeny i výpočty ve 2D bez rovných úseků potrubí. Tyto geometrie je možné vidět na obrázku 56. Geometrie vlevo (7.43) navazuje na již předešlé výpočty a je možné tedy zjistit vliv delšího potrubí. Geometrická úprava vpravo (7.44) je dalším krokem ve snaze o vylepšení proudové situace a dosažení požadovaných hodnot UI a poměrů ploch na základě předchozích výsledků.



Obrázek 56 Varianta „quadro knee short“ a „quadro knee short lh“

Výsledky krátkých variant, uvedených v předchozím odstavci, jsou v tabulce 32. Porovnáním této krátké varianty (7.43) s variantou se dvěma koleny (2.24) se dojde k závěru, že se proudová situace zhoršila ve všech ohledech po přidání dalších kolen. Zvýšila se tlaková ztráta v důsledku nárůstu sekundárního proudění a třením v potrubí. Snížila se hodnota UI a poměr ploch, což je způsobené právě přidáním kolen a úplavy za nimi, jež negativně ovlivňuje rozprostření proudu v potrubí. Varianta (7.44) s větším potrubím dosáhla výborných výsledků a ve všech sledovaných parametrech dosahuje požadovaných hodnot.

Tabulka 32 Výsledky varianty „quadro knee short“ a „quadro knee short lh“

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
quadro knee short (7.43)	10782	496	10286	0,51	0,69	0,84
quadro knee short lh (7.44)	6371	502	5869	0,94	0,94	1,00

Poslední z geometrických úprav, které jsou v této kapitole uvedené, jsou pouze rozšířením geometrie se čtyřmi koleny. Na výsledcích výše je ukázáno, že geometrie s větším průměrem posledních dvou kolen (2.0), (7.32) atd. dosahují velice dobrých výsledků z pohledu sledovaných parametrů. Rozšíření o další koleno, či dvě, nemá podle dosavadních výsledků zásadní vliv. Nicméně je tento závěr potřeba ještě prověřit, proto jsou zde uvedeny výsledky s dalšími koleny, a to s počtem 6 (7.45) až (7.48), 8 (7.49) až (7.52) a 10 (7.53) až (7.56). Jeden typ variant má umístěná kolena v ploše, tzn. 2D rozmístění a druhý ve 3D. Dále jsou zde ukázány výsledky porovnávající dva používané profily.

Tabulka 33 Výsledky variant s více koleny

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
quadro knee lh 2D 6kl (7.45)	12852	502	12350	0,92	0,91	1,00
quadro knee lh 3D 6kl (7.46)	12860	502	12358	0,91	0,90	1,00
quadro knee lh 2D 6kl - unif (7.47)	10543	502	10041	0,98	0,98	1,00
quadro knee lh 3D 6kl - unif (7.48)	11229	502	10727	0,92	0,92	1,00
quadro knee lh 2D 8kl (7.49)	15551	502	15050	0,97	0,97	1,00
quadro knee lh 3D 8kl (7.50)	15605	502	15103	0,95	0,95	1,00
quadro knee lh 2D 8kl - unif (7.51)	13455	502	12953	0,98	0,98	1,00
quadro knee lh 3D 8kl - unif (7.52)	13782	502	13280	0,91	0,91	1,00
quadro knee lh 2D 10kl (7.53)	17730	502	17228	0,97	0,97	1,00
quadro knee lh 3D 10kl (7.54)	18035	502	17533	0,94	0,93	1,00
quadro knee lh 2D 10kl - unif (7.55)	16355	501	15854	0,98	0,98	1,00
quadro knee lh 3D 10kl - unif (7.56)	16695	502	16192	0,91	0,91	1,00

Tlaková ztráta se u všech variant chová podle očekávání, přidáním většího počtu kolen se zvýší tlakové ztráty vlivem úplavů a tření v potrubí. U rovnoměrných vstupních profilů je opět dle očekávání nižší tlaková ztráta oproti odpovídajícím variantám s rotujícím profilem. Všechny varianty taktéž dosahují maximálního požadovaného poměru ploch, což znamená, že nedochází ke zpětnému proudění před katalyzátorem.

Značné rozdíly jsou však v hodnotách týkajících se UI. Průměrná hodnota i medián všech hodnot v této sadě dosahuje požadovaného kritéria $UI \geq 0,94 [-]$, avšak je vidět, že to neplatí pro všechny hodnoty v tabulce uvedené výše. Nelze ani obecně říci, že v případě 2D geometrií jsou výsledky lepší a dosahují požadovaného kritéria. Totéž nejde tvrdit ani o 3D variantách. Stejně tak nejde zobecnit výsledky pro rotující profil, či rovnoměrně rozložený vstupní profil.

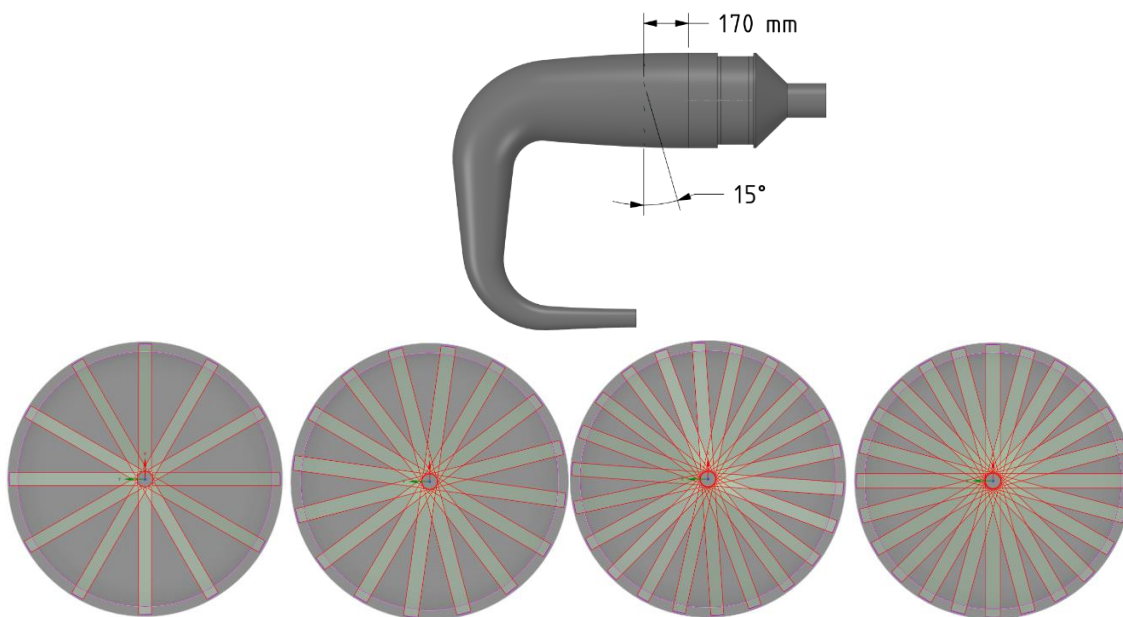
Výsledky 2D variant ((7.47), (7.48), (7.51) a (7.55)) s rovnoměrným profilem dosahují velice dobrých výsledků. Výsledky 3D variant (7.46) až (7.56) již nedosahují požadovaných hodnot UI, z toho lze tedy vyvodit, že směr kolen v potrubí zásadně ovlivňuje proudění v potrubí při rovnoměrném vstupním profilu. Takovéto závěry nelze uvést pro rotující profil, protože ve variantě s šesti koleny (7.45) a (7.46) se nedosahuje požadovaného UI, ale přidáním dalších dvou ((7.49) a (7.50)) a čtyř kolen ((7.53) a (7.54)) se, paradoxně, zlepšila proudová situace a dosahuje se požadovaného UI. Pro toto chování neexistuje jednoznačné vysvětlení, je však možné usoudit, že přidáním kolen k variantě „double knee“ (2.45) se může ovlivnit proudění, nicméně čistě statisticky vzato se stále dosahuje požadovaných hodnot, proto lze považovat řešení za dostatečné a konečné.

5.5 Vnitřní vestavby – usměrnění proudu lopatkami

Aplikace vnitřních vestaveb pro usměrnění proudu je již popsána na SCR systému „A“ v publikaci [107]. V tomto případě je však přístup poněkud odlišný. Varianta, na které

jsou vnitřní vestavby aplikovány, je znázorněná v horní části obrázku 57. Jedná se o variantu „double knee cone“ (2.35). Tato varianta je zvolena z toho důvodu, že to byla v danou chvíli nejlepší varianta z navržených, a proto se přistoupilo ke snaze o její další zlepšení. Na této variantě jsou zakresleny dvě kóty, které se týkají právě umístění lopatek, jež slouží jako vnitřní vestavby pro usměrnění proudu. Vzdálenost lopatek je vždy 170 [mm] od původního rozšířeného potrubí, jež následně navazuje na katalyzátor. Dále se mění úhel natočení lopatek, což je v tomto případě znázorněno úhlem 15° , a jedná se o pravou variantu, tzn. vzdálenější bod lopatky, při pohledu ve směru proudění, je vpravo. Dá se to také říci tak, že jsou lopatky natočeny po směru hodinových ručiček. Rozměr každé z lopatek je 170×20 [mm].

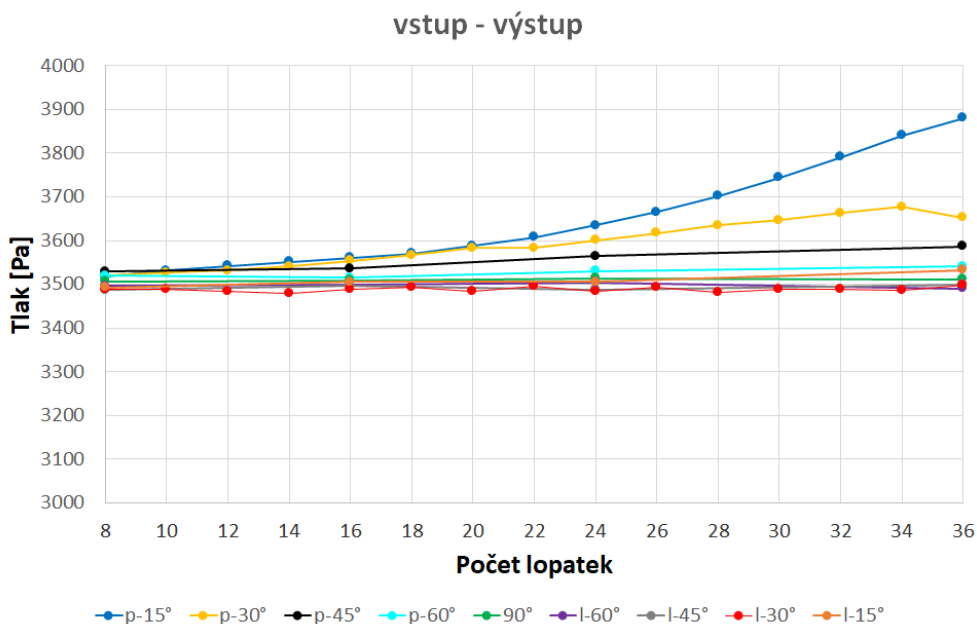
Kromě úhlu lopatek a jejich směru natočení, od 15° vpravo do 15° vlevo, se taktéž měnil počet těchto lopatek. Čtyři vybrané varianty je možné vidět na obrázku 57 dole. Na těchto obrázcích je vidět, že není možné z tohoto pohledu rozhodnout o směru natočení, proto je potřeba doplňující komentář u každé varianty. Některé varianty jsou napočítány komplexně tak, že se přidávají vždy pouze dvě lopatky po obvodu, některé jsou vypočítané v „hrubší síti“, tzn. mají větší skoky v počtu lopatek.



Obrázek 57 Zobrazení umístění lopatek ve variantách „mix“

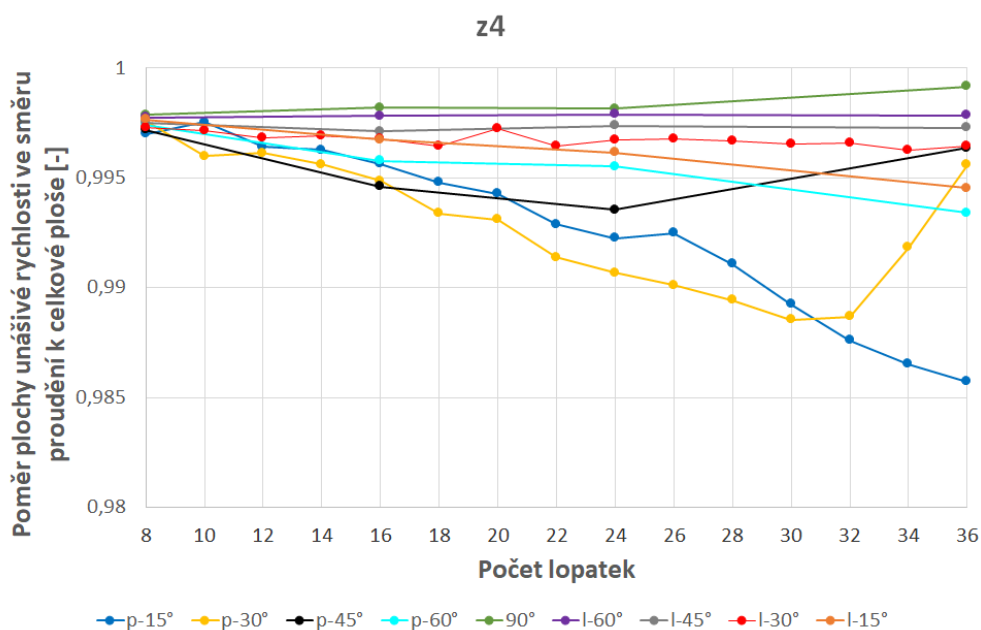
Všechna předchozí data jsou zde uvedena v tabulkách, jelikož by docházelo k problematickému zobrazení pomocí grafů, které jsou však obecně přehlednější. Názvosloví jednotlivých variant a jejich proměnné by však zapříčinily problematické zobrazení. To však v tomto případě neplatí, proto výsledky uvedené v této kapitole jsou vyneseny do následujících grafů, které dají jednoznačně přehlednější výsledky.

Obrázek 58 obsahuje rozdíl tlaků na vstupu a výstupu do modelu na svislé ose. Vodorovná osa obsahuje počet lopatek od hodnoty 8 po maximální počet 36. Na těchto výsledcích je vidět, že varianty natočení vpravo mají obecně větší tlakové ztráty než lopatky natočené vlevo. Tento vliv je způsobený tím, jak je proud roztočený již na vstupu do modelu.



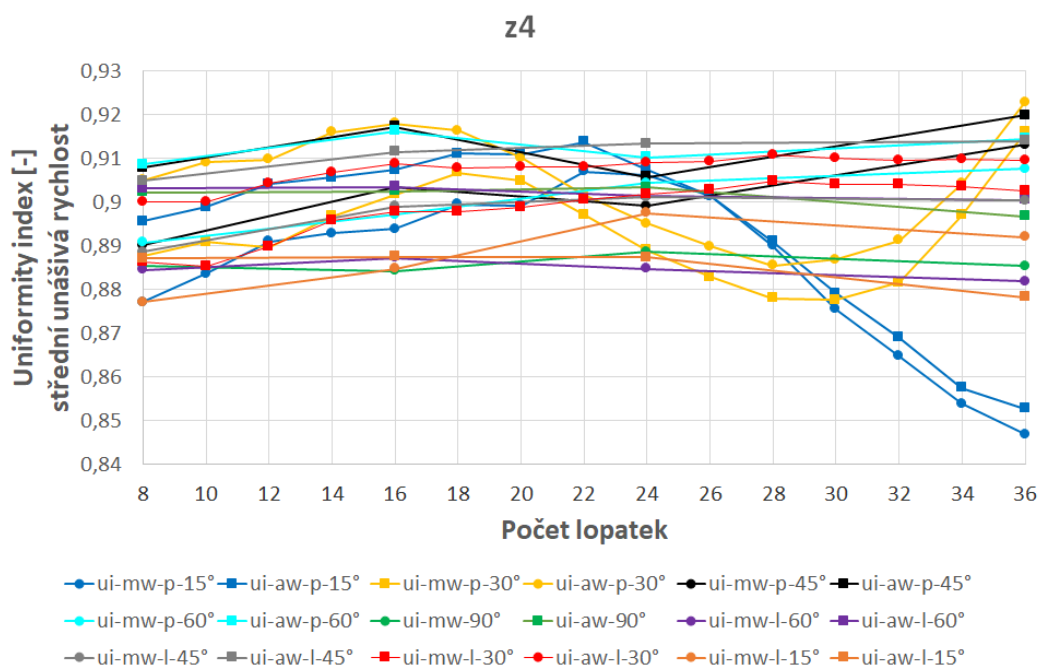
Obrázek 58 Tlakový spád variant „double knee cone“ s různými natočeními lopatek

Na následujícím obrázku 59 jsou vyobrazeny výsledky poměru ploch, což byla jedna z proměnných, která se i u předešlých variant sledovala. Jedná se o označení proměnné A_c/A_{flow} . Na první pohled je vidět, že varianty natočené vpravo pro nejnižší úhly 15°, 30° a 45° dosahují nejhorších hodnot, tzn. v těchto případech dochází před vstupem do katalyzátoru ke zpětnému proudění. Následně to znamená, že katalytická vložka není využita celá a může to znamenat horší účinnost celého katalytického systému. Avšak, při bližším pohledu na hodnoty, jež jsou vyneseny na svislé ose, je vidět, že rozdíly sice existují, ale jsou poměrně malé. Varianty otočené vlevo dosahují lepších výsledků i v tomto případě.



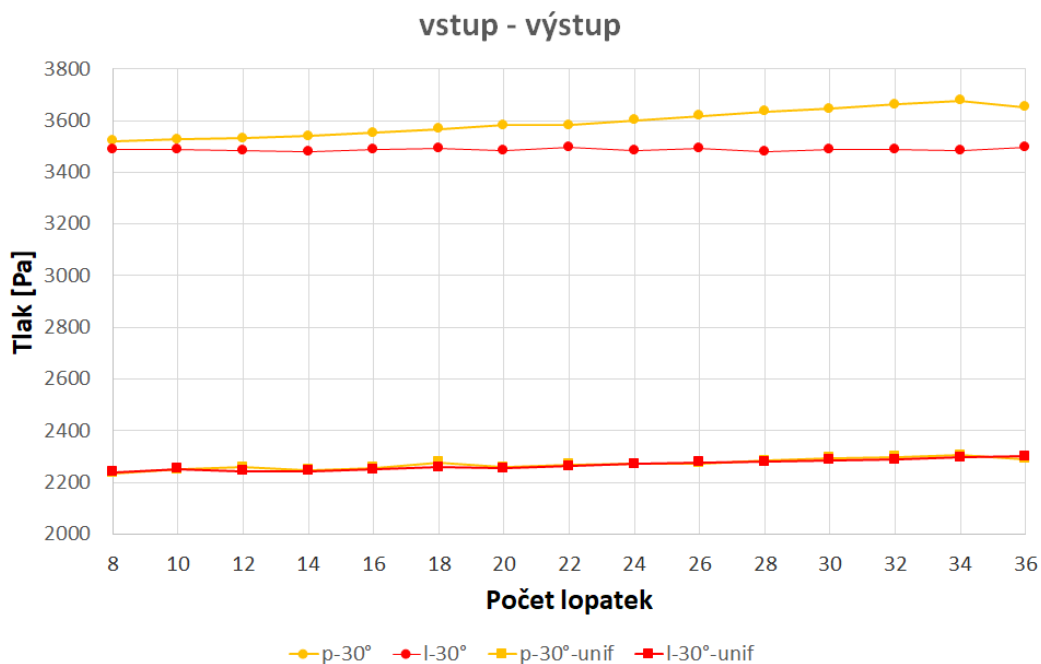
Obrázek 59 Poměr ploch variant „double knee cone“ s různými natočeními lopatek

Poslední dvě proměnné, které jsou sledovaným ukazatelem vhodnosti řešení jsou indexy jednotvárnosti střední unášivé rychlosti. Zde se o nich taktéž mluví v množném čísle, jelikož se rozdělují na dva podle způsobu vážení hodnot. První z nich je vážený plochou, což na obrázku 60 jsou křivky s jednotlivými body znázorněnými pomocí čtverců. Hodnoty vážené hmotnostním tokem jsou zobrazeny pomocí kruhů. Původní varianta „double knee cone“ má $UI_{aw} = 0,88 [-]$ a $UI_{mw} = 0,87 [-]$. Při konzervativním postupu se přihlédne vždy k nižší hodnotě indexu, aby se zaručila bezpečnost přístupu. Proto nelze jednoznačně říci, že se vždy uvažuje kupříkladu vážení pomocí plochy, jak je vidět z obrázku. Nicméně lze obecně říci, že při použití 16 – 24 kusů lopatek se dosahuje nejvyšších hodnot. Největší změny v průběhu množství lopatek, je vidět u pravých variant natočení lopatek pro úhly 15° a 30° , kde při zvyšování počtu dochází k radikálním změnám. Stejně tak obecně platí, že použitím pouze 8 lopatek nedojde ke změně UI. Varianty, které v tomto případě vychází nejlépe, jsou natočení lopatek vlevo o úhel 30° a natočení lopatek vpravo o úhel 60° , obojí pro 24 kusů lopatek. Zlepšení je však v řádu jednotek procent.



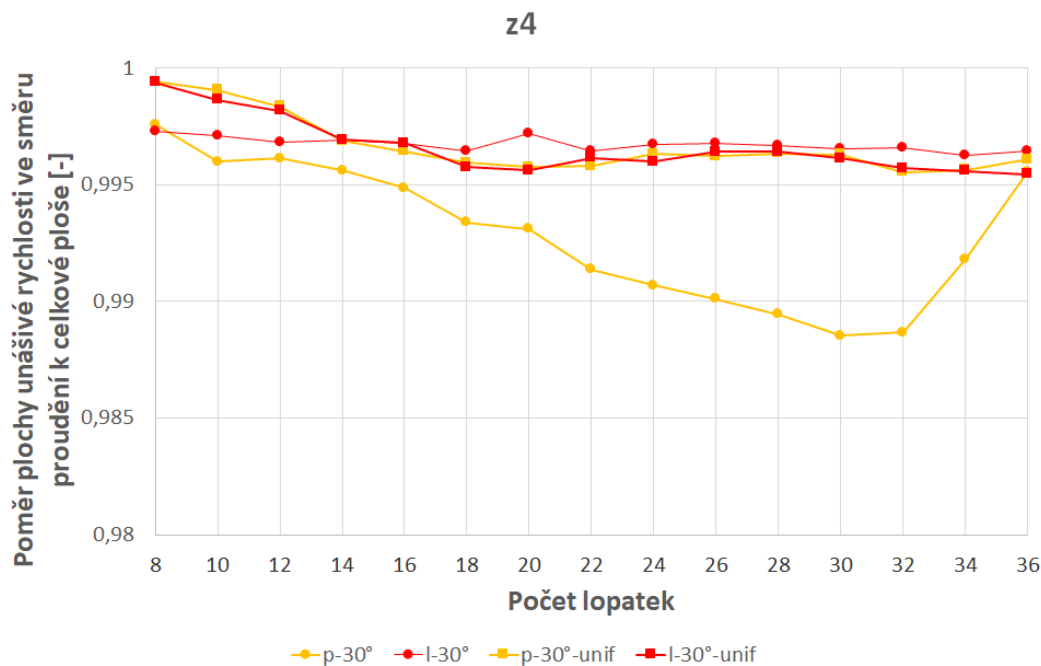
Obrázek 60 UI variant „double knee cone“ s různými natočeními lopatek

Předchozí výpočty jsou provedeny pouze pomocí roztočeného proudu. Proto je zde navazující studie s rovnoměrným vstupním profilem, kde se zjišťuje vliv rozdílného profilu. Na obrázku 61 je znázorněná tlaková ztráta jednotlivých variant. Dle očekávání mají uniformní profily nižší ztrátu, což je způsobeno menším třením na stěnách a menšími zavířeními (úplavy) za kolena. Další zajímavý fakt je ten, že tlaková ztráta je pro oba druhy lopatek, s uniformním vstupním profilem, téměř totožná. To znamená, že natočení lopatek nemá zásadní vliv na tlakovou ztrátu.



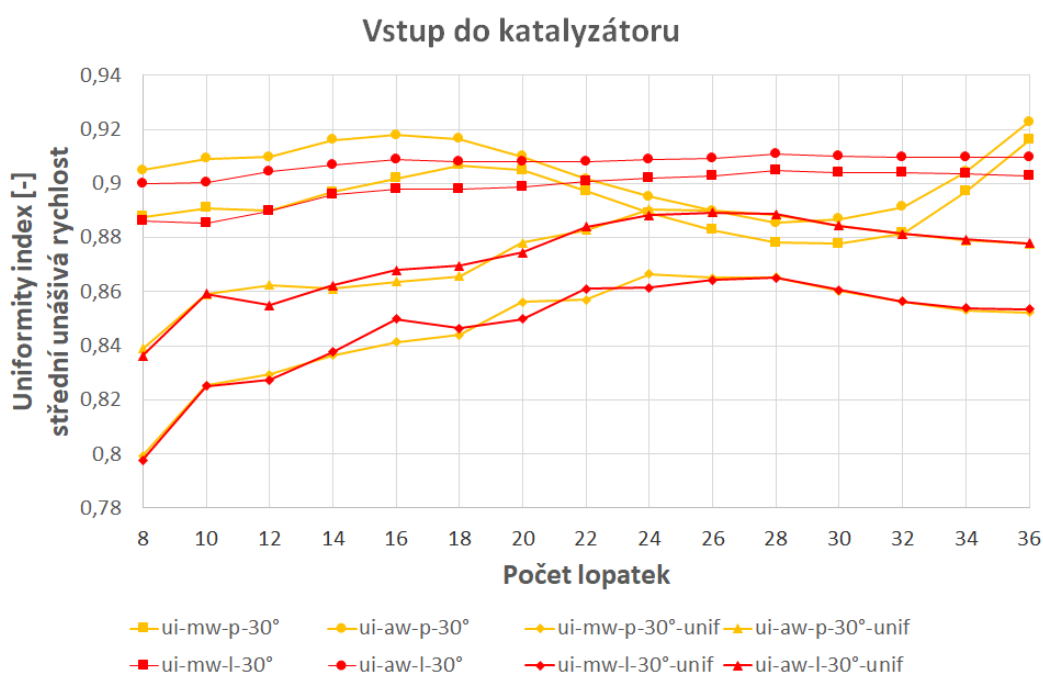
Obrázek 61 Tlakový spád variant „double knee cone“ s vestavbami natočenými vlevo a vpravo

Jako další proměnná používaná k popisu variant je již několikrát zmíněný poměr ploch. Pro tuto sadu variant jsou výsledky znázorněny na obrázku 62. Zde lze znovu uvést, že pro rovnoměrně rozložený vstupní profil platí téměř totožné hodnoty, takže opět směr natočení lopatek nehraje roli na poměr ploch. Pro roztočený profil je však tento rozdíl markantní u lopatek natočených po směru hodinových ručiček. Tento fakt je již vidět na předchozím obrázku 59.



Obrázek 62 Poměr ploch variant „double knee cone“ s vestavbami natočenými vlevo a vpravo

Poslední ze sledovaných hodnot je index jednotvárnosti. Výsledky porovnávající různé typy vážení hodnoty unášivé rychlosti a vstupní profily jsou na obrázku 63. Výsledky s roztočeným vstupním profilem jsou již popsány výše. Závěry týkající se rovnoměrného vstupního profilu jsou obdobné, jak již bylo zmíněno. Při aplikaci rovnoměrného vstupního profilu nezáleží na tom, zda jsou vestavby natočeny po směru hodinových ručiček, či proti. V této sadě výsledků lze říci, že vážení hmotnostním tokem je konzervativnější, proto se jedná o sledovanou proměnou. Je vidět, že přidáváním lopatek do proudu se zlepšuje UI až do počtu lopatek 26, 28 načež dojde opět k poklesu. Pro roztočený proud a natočení lopatek vlevo to platí taktéž, ale pro lopatky natočené vpravo se dosahuje maximálních hodnot s menším počtem lopatek, konkrétně 16, anebo s maximálním počítaným počtem 36. Tato hodnota se však neuvažuje za proveditelnou, jelikož se, podle dostupných dat, dá dosáhnout stejných hodnot s daleko menším množstvím vestaveb.



Obrázek 63 UI variant „double knee cone“ s vestavbami natočenými vlevo a vpravo

Aplikací tohoto typu vestaveb v dané geometrii lze dosáhnout zlepšení sledovaného indexu jednotvárnosti, při správně zvoleném počtu lopatek a jejich správném natočení. Z výsledků lze tedy doporučit použití 16 kusů lopatek, s úhlem natočením více jak 30° včetně. Toto neplatí pro extrémní variantu úhlu natočení 90°, která v podstatě znamená, že lopatky neusměrňují proud, tzn. jsou ve směru proudění. Nejedná se tedy o „mixér“, ale spíše o „narovnávač“ proudu. Vliv lopatek je však, podle získaných výsledků, funkcí rychlostního profilu, jež se ideálně nemění během chodu zařízení. Výsledky porovnání rychlostních profilů ukazují na to, že při rovnoměrném vstupním profilu je potřeba větší počet lopatek, než doporučovaných 16 kusů, ale stále platí, že i tímto počtem se zlepší proudová situace.

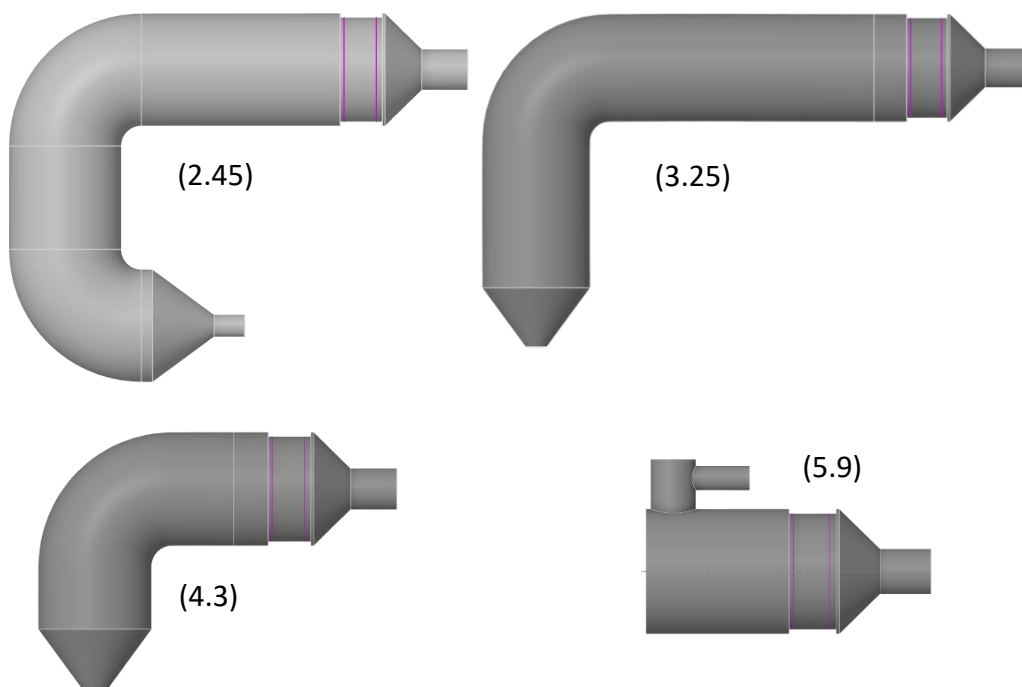
Obecný závěr je ten, že vestavbami lze skutečně zlepšit proudovou situaci. Zde aplikované vnitřní lopatky, natočené ať už po směru hodinových ručiček, či proti, lze

použít obecně v kanálech kruhového průřezu. Avšak jakékoliv vnitřní vestavby v proudu spalin mohou způsobovat i negativní vlivy. Ať už se jedná o zvýšenou cenu zařízení, tak i problém, kupříkladu, s usazováním močoviny a jejích dalších produktů, které se běžně vyskytují, což je možné vidět na obrázku 5. Vestavby taktéž obecně negativně ovlivňují tlakovou ztrátu a podíl unášivé rychlosti do katalyzátoru. Jediný parametr, který zvyšují, je index jednotvárnosti, ale i v tomto případě se nedosahuje požadovaných hodnot $UI \geq 0,94 [-]$. Proto nelze na základě těchto výsledků doporučit použití tohoto typu usměrňovačů, jelikož se jejich použitím nedosáhne požadovaného efektu.

5.6 Vybrané varianty

Na základě předešlého textu a uvedených výsledků se v této části opakují nejlepší geometrické varianty. Tato kapitola se zaměřuje na detailní přehled a shrnutí těch geometrických variant, které jsou identifikovány jako vhodné v kontextu daného výzkumu.

Výsledky této kapitoly poskytují ucelený pohled na nejlepší geometrické varianty a poslouží jako základní referenční bod pro další části výzkumné práce. Tyto geometrické konfigurace jsou dále implementovány a zkoumány v následujících fázích výzkumu s cílem prozkoumat a potvrdit jejich efektivitu a aplikovatelnost v daném kontextu. Zvolené geometrické úpravy jsou na obrázku 64.



Obrázek 64 Vybrané varianty

Výsledky jednotlivých základních a vybraných variant jsou systematicky zaznamenány a prezentovány v tabulce 34. Celkově lze konstatovat, že navržené geometrické úpravy v každém sledovaném případě přinášejí zlepšení proudové situace v rámci sledovaných parametrů na příslušné ploše. Ve všech případech došlo současně ke

snížení tlakové ztráty, především v důsledku změny rychlosti v potrubí. Napříč všemi případy je však problematické tvrdit, že byly dosaženy požadované hodnoty UI, které slouží jako klíčový parametr. I přes výrazné zlepšení v několika aspektech nedosahuje nejkratší varianta, kde je vstupní potrubí umístěno velmi blízko katalyzátoru ("tdm" (5.0)), po změně geometrie požadovaných hodnot $UI \geq 0,94 [-]$. V tomto případě je tedy nezbytné přistoupit k dalším úpravám, jako je například implementace rozdělovací desky.

Rozdělovací deska by mohla potenciálně zvýšit tlakovou ztrátu, ale zároveň by přispěla k vylepšení distribuce spalin. Je však důležité poznamenat, že existence potenciálního problému spočívá v možném ucpávání děr usazeninami z DEF. Tato úvaha je v současné době nedotažená do konce.

Tabulka 34 Výsledky základních a vybraných variant

varianta	Tlak [Pa]			UI MZV AW [-]	UI MZV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
double knee (2.0)	9491	498	8993	0,94	0,96	1,00
double knee lh 1 (2.45)	6857	502	6354	0,96	0,96	1,00
long knee (3.0)	10123	502	9622	0,71	0,82	1,00
long knee lh 1 (3.25)	5615	502	5113	0,96	0,97	1,00
short knee (4.0)	8270	501	7769	0,68	0,73	1,00
short knee lh 1 (4.3)	5692	502	5191	0,95	0,95	1,00
tdm (5.0)	11836	500	11336	0,63	0,65	0,94
tdm tupo bigst (5.9)	8321	501	7820	0,87	0,85	0,99

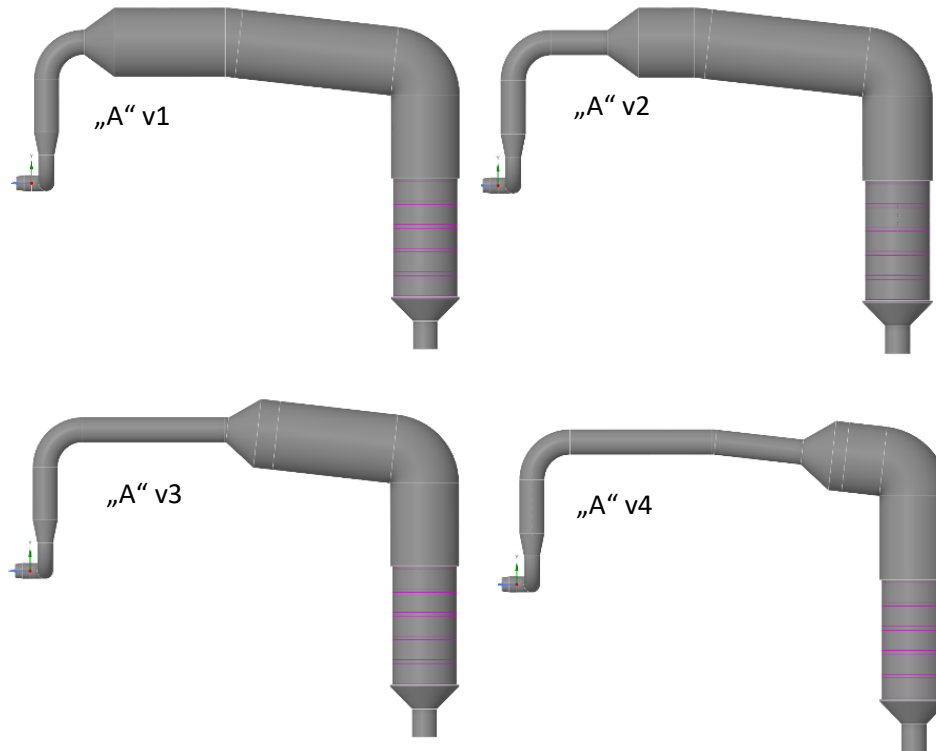
Změna geometrie vychází ve všech případech ze stejného principu, konkrétně z rozšíření průměru potrubí vedoucího ke katalyzátoru. Očekávalo se, že tato modifikace povede ke snížení tlakové ztráty, avšak zlepšení proudové situace nebylo předem zřejmé. Jak lze pozorovat, jedná se však o správný krok pro dosažení žádoucích efektů. Potenciální problematický aspekt spočívá v nárůstu potřeby prostoru pro instalaci SCR technologie, což souvisí s vyššími náklady na pořízení z důvodu zvýšeného množství použitého materiálu. Ovšem tyto dva negativní faktory jsou výrazně vyváženy markantním zlepšením distribuce spalin na vstupu do katalyzátoru.

Následujícím krokem ve výzkumu bude aplikace rozšíření průměru potrubí na původní variantu SCR systému „A“ a následné vstřikování DEF do spalinového proudu. Tím se ověří, zda kapky skutečně následují proud a dochází k jejich rovnoměrné distribuci. Dalším zkoumaným tématem je úvaha o tom, zda existují místa pro vstřikování, která jsou jednoznačně účinnější než jiná. Stejně tak se zvažuje otázka, zda existují místa, nevhodná pro vstřikování DEF.

5.7 Aplikace geometrických úprav na model systému „A“

Jak již bylo řešeno výše, je žádoucí aplikovat geometrické úpravy typu „lh“ na SCR systém „A“, ze kterého vychází celý zde uvedený výzkum. V dřívějším textu se poukazovalo

na to, že existují jisté vzdálenosti, jež je potřeba dodržet pro velký průměr potrubí. Jedná se však o doporučení, pro další ověření těchto předpokladů je opět vytvořeno několik geometrických modifikací systému „A“. Tím je snaha zajistit ověření, zda platí dané vzdálenosti velkého průměru potrubí, které je potřeba dodržet. Znázornění jednotlivých geometrií je na obrázku 65. Zde jsou zobrazeny čtyři různé geometrické modifikace s tím, že základní varianta je na obrázku 20. Vlevo nahoře je „A“ v1, vpravo nahoře „A“ v2, vlevo dole „A“ v3 a vpravo dole „A“ v4.



Obrázek 65 Geometrické modifikace systému „A“

Výsledky základní varianty a jejích derivátů jsou uvedeny v tabulce 35. Základní varianta dosahuje požadovaného poměru ploch na vstupu do katalyzátoru, ale hodnoty UI nejsou uspokojivé. Tato varianta je zároveň etalonem při porovnání tlakových poměrů jednotlivých variant. Z ostatních výsledků je vidět, že všechny navržené geometrické úpravy dosahují požadavku na zachování tlakové ztráty při rotujícím vstupním profilu. Je zároveň vidět, že v tomto případě je tlaková ztráta vždy vyšší u rovnoměrných vstupních profilů, což je způsobeno většími úplavy, jež se tvoří za jednotlivými koleny. Dále poměr ploch unášivé rychlosti ku ploše průřezu kanálu je uspokojivý u všech geometrických variací. Hodnoty indexu jednotvárnosti jsou taktéž velice vysoké pro všechny varianty.

Tabulka 35 Výsledky geometrických modifikací systému „A“

varianta	Tlak [Pa]			UI MYV AW [-]	UI MYV MW [-]	Ac/Aflow [-]
	vstup	výstup	rozdíl	z4	z4	z4
„A“	5889	514	5375	0,80	0,82	1,00
„A“ v1	5421	503	4918	0,98	0,98	1,00
„A“ v1 - unif	6169	503	5666	0,96	0,96	1,00
„A“ v2	5657	503	5155	0,98	0,98	1,00
„A“ v2 - unif	6001	503	5499	0,98	0,99	1,00
„A“ v3	5628	503	5126	0,97	0,97	1,00
„A“ v3 - unif	5930	502	5428	0,98	0,98	1,00
„A“ v4	5683	503	5181	0,96	0,96	1,00
„A“ v4 - unif	5972	502	5470	0,97	0,97	1,00

Z uvedených výsledků je vidět, že malou změnou vnější geometrie lze dosáhnout velice uspokojivých výsledků, které nebylo možné dosáhnout v případě změn vnitřních vestaveb, což je možné vidět v publikaci [107]. Ukázalo se, že výzkum provedený na modelových situacích je aplikovatelný na reálnou geometrii, pro kterou jsou navrhované změny zamýšlené. V případě přestavby zařízení „A“ je doporučeno aplikovat geometrickou modifikaci číslo čtyři, jelikož nejméně mění potrubí, a i přesto dosahuje požadovaných výsledků.

Pro zajímavost je ještě potřeba uvést několik faktů. Prvním z nich je, že je nezbytné si vždy uvědomovat natočení samotného modelu v souřadném systému. V tabulce 35 je možné si všimnout toho, že proměnné se oproti předchozím variantám lehce změnily. Došlo k záměně „UI MZV MW“ a „UI MZV AW“ za „UMI MYV MW“ a „UI MYZ AW“, a to z důvodu právě změny lokace katalyzátoru. Programy na vyhodnocení je potřeba taktéž podle těchto změn upravit.

Druhá zajímavost je, že výpočty byly provedeny i alternativním nastavením porézní zóny, kdy se dosáhlo tlakového rozdílu vstup – výstup $\Delta p \sim 192000$ [Pa]. Výsledky jsou v těchto výpočtech u všech variant téměř totožné, tzn. při použití rozdělovacích desek, jež by enormně zvýšily tlakovou ztrátu, by došlo ke zlepšení i u základní varianty.

5.8 Uvažované trysky a frakce kapek

Vstřikování kapiček do potrubí SCR systému představuje klíčový prvek celého procesu, neboť DEF je potřebný pro iniciování chemických reakcí nezbytných k redukci NO_x . Velikost těchto kapiček sehrává klíčovou roli, a proto je nezbytné pečlivě zjišťovat jejich rozměry. Tento úkol není triviální a vyžaduje experimentální přístup, neboť je nemožné přesně stanovit velikost kapiček pouze na základě výpočtů. Zatímco výpočty v ANSYS Fluent dokáží modelovat rozpadající se struktury proudu na DPM, fungování tohoto modelu zůstává nejisté.

Existuje nepřeberné množství druhů trysek a jejich konstrukcí. V tomto kontextu byly uvažovány dva typy trysek. První z nich vyžaduje dodatečný stlačený vzduch, zatímco

druhý funguje bez tohoto druhého média. Tryska se stlačeným vzduchem má mít větší atomizující efekt, nicméně bez doložených informací od prodejce se jedná pouze o příslib. Obě trysky byly podrobeny měření pomocí laserové anemometrie. Trysku pracující s tekutinou a stlačeným vzduchem, je možné vidět na obrázku 66.



Obrázek 66 Fotografie trysky

Hodnotícím kritériem je velikost kapiček a jejich hmotnostní zastoupení, jelikož se uvažuje, že kapičky o menším průměru se rychleji vypařují. Lepších výsledků dosahuje tryska se stlačeným vzduchem. Tento očekávaný závěr představuje vítané potvrzení pochopení požadovaného chování těchto systémů, zejména vzhledem k nedostatku předešlých zkušeností. Z tohoto důvodu se nadále uvažuje použití tohoto typu trysky, a to s maximálním hmotnostním tokem, který byl změřen. Měření proběhlo pro objemové toky 1 [l/h], 2 [l/h], 3 [l/h] a 4 [l/h]. Maximální hodnota je zvolena s ohledem na běžné využití tohoto objemového průtoku při provozu SCR systému „A“. Obrázek 67 zachycuje výstupní místo trysky s rozstříkem kapiček. Pro zajímavost je dobré zmínit, že na záznamu z videa, jsou vidět i pulzy čerpadla, jak v pravidelných, velice rychlých cyklech pumpuje tekutinu.



Obrázek 67 Obraz z měření trysky

Výsledky z experimentální studie jsou uvedené v levé části tabulky 36. V prvním sloupci jsou uvedené průměry jednotlivých kapek, další obsahuje množství a třetí procentuální zastoupení. V druhé polovině tabulka obsahuje již použitá data ve výpočtech. Je vidět, že došlo ke sloučení alespoň dvou frakcí kapek, jelikož numerické výpočty s tolika různými frakcemi kapek by způsobilo značné prodloužení výpočetního času. První sloupec pravé půlky obsahuje průměr kapek, který je vypočítán podle procentuálního zastoupení jednotlivých kapek, z nichž je složený. Druhý obsahuje součet počtu zastoupených kapek a poslední sloupec zobrazuje hmotnostní tok jednotlivých kapiček. V podstatě první a poslední sloupec v pravé polovině tabulky obsahuje esenciální data pro výpočet. K tomu, aby bylo možné kompletně zadat vstřík do modelu, je potřeba přidat místo a směr vstříku, rychlost, teplotu a vstříkovací časy.

Tabulka 36 Experimentální data vstříkovaných kapiček

Výsledky experimentu			Vstupní data do výpočtů		
D [μm]	počet [–]	zastoupení [%]	$\varnothing D$ [m]	zastoupení [%]	\dot{m} [kg/s]
15	3491	13,13	0,00001797	32,50	0,00036006
20	5127	19,29			
25	4220	15,87	0,00002713	27,72	0,00030709
30	3127	11,76			
35	2326	8,75	0,00003730	16,31	0,00018066
40	1987	7,47			
45	1576	5,93	0,00004715	10,47	0,00011598
50	1185	4,46			
55	996	3,75	0,00005707	6,49	0,00007185
60	706	2,66			
65	542	2,04	0,00006703	3,52	0,00003897
70	371	1,40			
75	279	1,05	0,00007717	1,94	0,00002147
80	214	0,81			
85	122	0,46	0,00008869	1,06	0,00001171
90	83	0,31			
95	54	0,20			

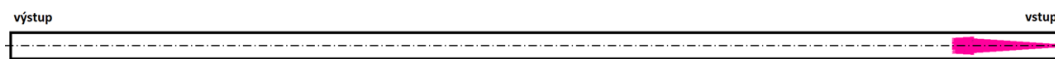
Tato podkapitola přibližuje data použitá v numerických výpočtech, které jsou součástí navazujícího výzkumu dále v tomto textu. Jsou zde uvedena naměřená data a stejně tak z nich používané hodnoty ve výpočtech. Data byla experimentálně získána z reálného měření, proto vstupní parametry do výpočtů jsou uvažovány jako reálné a ověřené.

5.9 Vypařování vstříkovaných kapek

Vypařování kapek je proces, při kterém se kapalina mění z kapalné fáze na plynnou fází tím, že absorbuje teplo ze svého okolí. Tento jev je součástí fyzikálních změn skupenství a je zásadní v různých odvětvích vědy a techniky.

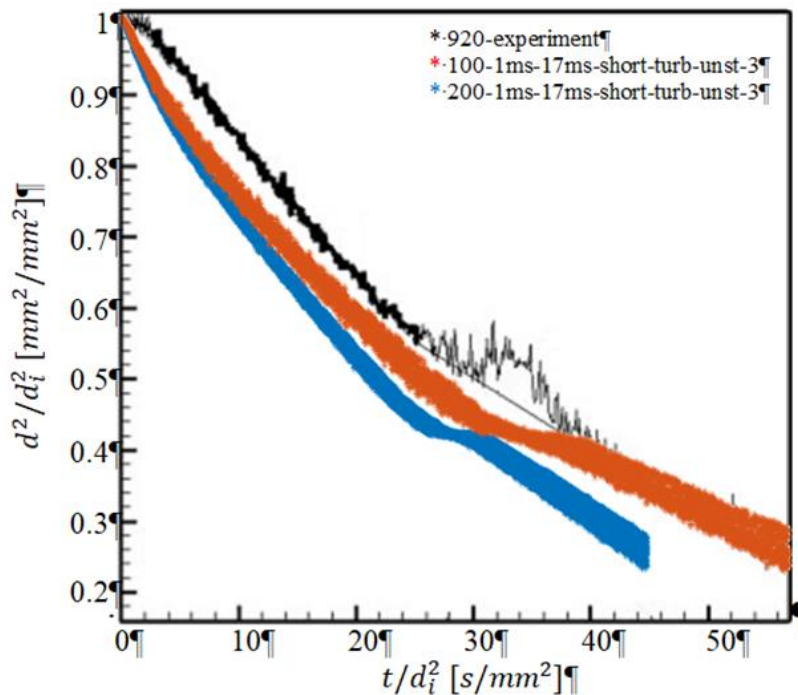
Proces vypařování kapek může probíhat při různých teplotách a tlacích, v závislosti na vlastnostech kapaliny a okolních podmínkách. Když je kapalina vystavena dostatečnému teplu, částice v kapalině získávají dostatek energie na to, aby překonaly intermolekulární síly a přešly do plynné fáze. Vědecký a inženýrský výzkum se zabývá studiem podrobností tohoto procesu, včetně vlivu různých faktorů na rychlost vypařování, tvorbu aerosolů a dalších aspektů. Tato studie se zaměřuje pouze na samotný výpar, konkrétně, zda implementovaný model v ANSYS Fluent je funkční a odpovídá reálnému procesu.

Tato studie je publikovaná v [108], stejně tak celý proces aplikace tohoto modelu do praktického využití v následujících výpočtech. Model pro ověření a vyzkoušení funkčnosti vypařovacího modelu je jednoduchá trubka se vstupem a výstupem, viz obrázek 68. Trubka má kruhový průřez, aby co nejvíce připomínala počítané potrubí. Růžový kužel na pravé straně u vstupu znázorňuje vstříkovací místo. Délka trubky se měnila podle velikosti kapiček tak, aby se zcela dosáhlo vypaření kapek. Výpočet probíhal s horkým médiem tak, jako všechny ostatní simulace. V tomto případě se jednalo o teplotu 573 [K]. Kapky byly složeny z vody a močoviny podle poměru DEF.



Obrázek 68 Geometrie submodelu pro ověření funkčnosti vypařování

Obrázek 69 zobrazuje výsledky experimentu provedeného Wangem [69] a výsledky z provedených simulací. Křivka získaná experimentem ukazuje zřetelnou změnu zakřivení, kterou způsobuje odlišná hlavní složka kapičky. Tento efekt je pozorován i v simulacích. Průměr kapky v experimentu činí 920 [μm]. Takto velké kapky není možné vypařovat v tunelu, proto byl experiment proveden na stacionární kapičce. Simulace nebyly provedeny obdobným způsobem. Reálné aplikace jsou omezeny dobou setrvání kapiček v kanálu. Simulace byly provedeny v jednoduchém potrubí, aby se co nejvíce přiblížily reálnému využití. I když se experimenty mohou zdát odlišné, výsledky ukazují na obdobné chování, i když je velikost kapiček odlišná.



Obrázek 69 Porovnání experimentu a výpočtů

Cílem této studie bylo ukázat možnost simulací vypařování a aplikace modelů vypařování ve volném proudu horkého vzduchu. Simulace se provedly s turbulentními i laminárními modely proudění, jelikož bylo potřeba provést porovnání s experimentem, kde se očekávalo velice pomalé proudění v okolí kapičky. Použití modelu vypařování není běžnou záležitostí, proto bylo potřeba ověřit jeho správnou funkčnost a pochopit princip fungování a nastavení. Simulace skutečného technického problému je relativně složitá, a proto byl vytvořen jednoduchý submodel trubky s jednoduchým vstřikováním kapiček.

Výsledky simulací nelze přímo porovnávat s experimenty, protože velikosti kapek se liší od kapek ve zkoumaných experimentech (a také ve skutečných aplikacích), ale jejich trend chování je podobný. Lze tedy usoudit, že je možné důvěřovat simulacím a tyto modely v systému ANSYS Fluent lze aplikovat na reálný systém SCR. Pro dosažení relevantních výsledků je nutné uvažovat turbulentní proudění a vypařování částic simulovat pomocí nestacionárního přístupu.

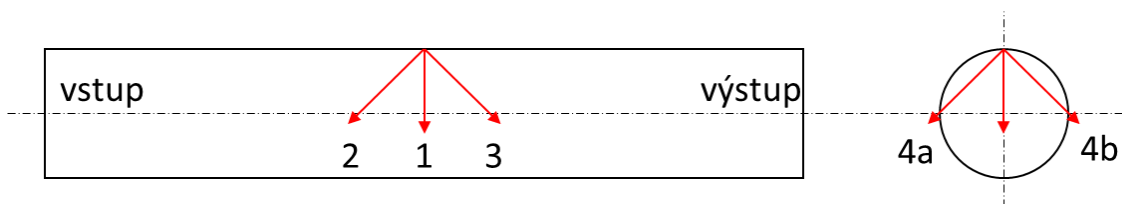
5.10 Vstřikovací místa

Další otázkou, kterou se tento text zabývá, je snaha o zjištění, zda existují vhodná místa pro vstřikování DEF. Otázku lze i obrátit a řešit úlohu z pohledu, zda jsou nějaká místa zcela nevhodná pro vstřikování AdBlue®. Vhodné místo pro vstřikování do výfukového potrubí závisí na různých faktorech, včetně konkrétního návrhu systému (geometrického rozložení), typu systému vstřikování (typ trysky a výsledná velikost kapiček). Výpočty jsou provedeny ve verzi Fluent R2021R1 (R211) a Fluent R2023R1 (R231).

Cílem správně zvoleného místa vstřiku je rovnoměrné rozptýlení DEF, jelikož díky tomu se dosáhne efektivní redukce NO_x . Volba místa vstřikování by měla podporovat důkladné míšení s výfukovými plyny a zabránit nerovnoměrnému rozložení, čehož lze dosáhnout buď velice dobře navrženým systémem (místem vstřiku), nebo se dá přistoupit k méně hospodárnému způsobu, což jest více vstřikovacích míst. Tímto přístupem se však zvyšuje riziko usazenin v potrubí, potenciálnímu úniku amoniaku (anglicky „ammonia slip“) a úniku neodpařeného DEF.

Amoniak je stejně jako NO_x emise a je tudíž potřeba kontrolovat jeho únik, avšak močovina v tekuté fázi není sledována za katalyzátorem, jelikož se nejedná o emisi. Očekává se tedy, že všechna tekutá fáze se odpaří už před samotnou katalytickou vložkou, nebo při vniknutí do kanálků, které mají vysoké teploty a proudění v nich je pomalé, což dopomůže k přeměně fáze. Ve výpočtech je tento děj zachycen pomocí okrajové podmínky „Porous Jump“ (změna porosity), která je nastavená na vstupu do katalyzátoru (to je jedním z důvodů, proč vyhodnocovací plocha je těsně před samotným katalyzátorem). Tato okrajová podmínka je obdobou okrajové podmínky „Interior“ (vnitřní okrajová podmínka), nicméně v „Porous Jump“ lze nastavit více vlastností. V tomto případě je použita podmínka „Trap“ (zachycení), která funguje tak, že jakmile se kapička dotkne této plochy, dojde okamžitě k jejímu odpaření, což simuluje úvahu 100% odpaření celé tekuté fáze.

V jakékoliv geometrii existuje potenciálně nekonečné množství vstřikovacích míst a v každém místě stejně tolik směrů, jimiž lze tekutinu do proudu vypouštět. To je důvod, proč nelze přistoupit ke komplexnímu řešení problému a je potřeba vhodně vytipovat několik míst, která se očekávají jako vhodná k otestování. Většina vstřikovacích míst má i několik směrů (každý separátně počítaný). Logika volby vstřikovacích směrů je znázorněná na obrázku 70. Zjednodušeně lze říci, že vstřik (1) je kolmý ke směru proudu spalin, číslo (2) je natočený o 45° [–] proti směru hlavního proudu spalin, vstřik (3) o 45° [–] po směru proudu. Další dva vstřiky jsou (4a) a (4b), jež jsou o 45° [–] pootočené ke stěně. Z toho lze tedy usoudit, že z jednoho vstřikovacího místa lze mít až pět potenciálních variant vstřiku. V následujících výpočtech je tedy každý samotný vstřik značený separátní číslovkou a nejsou značeny tak, jak je to zde na příkladu poukázáno.

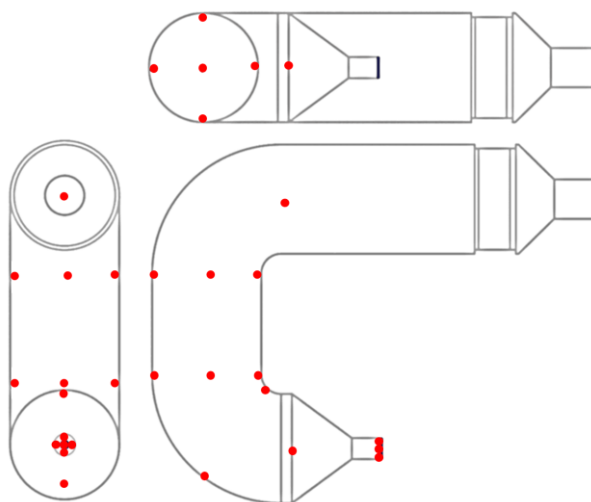


Obrázek 70 Ilustrace logiky tvorby vstřikovacích poloh

Simulace zahrnují "pouze" odpařování DEF a konverzi této sloučeniny na kyselinu isokyanatou ($HNCO$), což je meziprodukt mezi močovinou a amoniakem. Rozložení této kyseliny je jedním ze sledovaných parametrů v této části studie. Dále se sleduje koncentrace (množství) kapiček před vstupem do katalyzátoru. Větší množství samotných kapiček by znamenalo potenciální problém s usazeninami. Dobře navržený systém zajistí

odpaření AdBlue® před vstupem do samotného katalyzátoru, aniž by bral v úvahu odpařování v kanálech (zde se používá podmínka "Trap").

Geometrické varianty, jež jsou zvolené jako nejlepší možné úpravy základních variant v kapitole 5.6, jsou ty, kde se řeší vhodná místa vstřiku. První z variant zde uvedených, je varianta „double knee lh“. Na obrázku 71 jsou červenými tečkami vyobrazená místa, kde se uvažují potenciální místa vstřiku. Podle výše uvedené logiky je vytvořeno 49 různých variant vstřiků. Toto množství výpočtů je nepublikovatelné v této části. Proto jsou všechny výsledky uvedeny v příloze. V úvodní části jsou vysvětleny jednotlivá data na krátkém příkladu a následně se text pouze odkazuje na tabulky v příloze.



Obrázek 71 Vstřikovací místa varianty "double knee lh"

V průběhu dlouhodobého výzkumu došlo k jistému vývoji v simulacích. Zásadní změnou, která se odehrála v oblasti týkající se SCR systémů, je další z možností, jak simulovat chování kapiček na stěně. Kromě nejjednoduššího přístupu odrazu „Reflex“, která kapičku pouze odrazí pod stejným úhlem dále do proudu, se běžně používá „Wall Jet“, který je popsán v kapitole 4.4. Dalším již zavedeným přístupem je „Wall film“, nicméně až od verze ANSYS Fluent 2023R1 je možné využití stochastického Kuhnkeho modelu. Tento model je již také uvedený v kapitole 4.4 a uvažuje se jako aktuálně nejvhodnější variantou, jak řešit chování kapek na stěně. Nicméně návod oficiální dokumentace ANSYS Fluent stále doporučuje využít v této aplikaci okrajovou podmínku „Wall Jet“ [88], navíc tato okrajová podmínka byla během vývoje tohoto výzkumu použita ve většině případů. Až s příchodem nové verze a článku od Bai a spol. [95] se přistoupilo k ověření pomocí okrajové podmínky „Wall Film“.

Použití okrajové podmínky „Wall Film“ však vyžaduje ještě další změnu v geometrii modelu. Ačkoliv se dosud pracovalo s horkými spaliny, tak stěny se uvažovaly pouze jako jednoduché plochy. Varianty s označením R211 jsou počítány s jednoduchou stěnou. Ale při aplikaci kapalinového filmu dochází k lokálnímu velkému vychlazení stěny modelované pouze okrajovou podmínkou, což není zcela reálná záležitost. Proto se stěna začala modelovat tak, že se do modelu vložil další objem (kov – „solid“) reprezentující

stěnu. Tyto varianty jsou označovány jako „Wall Film“ a zároveň jsou to ty, jež jsou počítány ve verzi R231. Díky tomuto objemu dochází k přenosu tepla i napříč stěnou a při dopadu většího množství kapiček se místo nevychladí, jelikož je tomuto místu dodáváno teplo z okolí. V případě, že na místo dopadá enormní počet kapek, přesto dojde k vychlazení, čímž se tvoří rozsáhlý kapalinový film o velké výšce. Varianta je proto jednak nevhodná, ale hlavně zvolený model „Wall Film“ přestává fungovat, jelikož, jak je popsáno výše, je v tomto případě dovoleno mít maximální výšku pouze 500 [μm].

První z výsledků zde uvedených se vstřikováním AdBlue® do proudu horkých spalin je možné vidět v tabulce 37. Jedná se o variantu „double knee lh v01“. Tato varianta je jednou z nejlépe zdokumentovaných variant, což je vidět v tabulce, jelikož prošla několika výpočty. Výpočty jsou zkombinovány z různých přístupů chování kapek na stěně a to s „Wall Jet“ a „Wall Film“. Jelikož se následně jedná pouze o vybrané geometrie, tak výsledky již neobsahují tlakové ztráty, poměry ploch unášivého proudu a ani indexy jednotvárnosti unášivých rychlostí. Jsou vyhodnocovány pouze koncentrace kapiček (DPM) a index jednotvárnosti vážený hmotnostním tokem střední hodnoty hmotnostní frakce tekutiny kyseliny isokyanaté (CONH).

Hodnoty, kterých je vhodné docílit, jsou složitě definovatelné. Je snaha o minimalizaci množství kapiček na vstupu do katalyzátoru, tzn. dosáhnout co nejmenší koncentrace kapiček, viz levá strana tabulky 37. Tento parametr je však problematický, jelikož může docházet k hromadění kapiček v nějaké části geometrie a dojde k negativnímu ovlivnění koncentrace na sledované ploše. Tento děj nelze podchytit v žádné variantě s okrajovou podmínkou „Wall Jet“, jelikož zde jsou kapky vždy nějakým způsobem zpět odraženy do proudu spalin. Ve variantách, kde se může tvořit film („Wall Film“), se tento děj může zachytit. Proto je potřeba kromě sledování tohoto parametru sledovat i samotné chování kapiček v modelu. Druhým sledovaným parametrem je opět UI, kde se cílí na maximální přiblížení hodnotě 1 [–], tyto hodnoty jsou na pravé straně téže tabulky

Z tabulky 37 je vidět, že varianta „double knee lh v01“ dosahuje v obou sledovaných parametrech požadovaných hodnot ve všech verzích výpočetního programu, a zároveň i s různým ošetřením chování kapiček na stěnách. Proto se dá usoudit, že toto místo vstřiku je vhodné a lze ho doporučit. Nicméně je potřeba zvážit i lokaci samotnou, jelikož výpočty nezohledňují potenciální technickou proveditelnost. Vstřikovací místo této varianty je umístěné na samotném vstupu tekutiny do modelu, tzn. ihned za potenciálním turbodmychadlem a přímo uprostřed kanálu. Jednalo by se tedy o velké vysazení do kanálu, kde by vznikala úplav a zvyšovala by se pravděpodobně tlaková ztráta. Teoreticky je tato lokalita vhodná, ale z praktického pohledu ne.

Tabulka 37 Výsledky varianty „double knee lh v01“ se vstřikováním AdBlue®

Koncentrace DPM [kg/m ³]		UI MWA Mean Mass Fraction CONH (plyn) [-]	
Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif	Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif
1,7E-08	1,1E-07	1,00	0,97
Wall Film R211	Wall Film R211 - unif	Wall Film R211	Wall Film R211 - unif
0,0E+00	0,0E+00	1,00	1,00
Wall Jet R231	Wall Jet R231 - unif	Wall Jet R231	Wall Jet R231 - unif
9,2E-08	0,0E+00	1,00	0,96
Wall Film R231	Wall Film R231 - unif	Wall Film R231	Wall Film R231 - unif
0,0E+00	0,0E+00	1,00	1,00

Tabulky P 1 až P 4 v příloze obsahují výsledky všech vypočtených variant s geometrií „double knee lh“. Varianta jedna je již popsána v odstavci výše. Viz výtah v tabulce 37. V těchto čtyřech tabulkách jsou obsažené výsledky všech počítaných variant. Varianta „double knee lh“ byla první počítanou variantou s „Wall Jet“ ve verzi R211, a vůči těmto výsledkům jsou nastavené limitní požadavky na splnění koncentrace kapiček na vstupu do katalyzátoru. Konkrétní hodnota koncentrace je $0,00000025 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. Porovnávaly se tedy výsledky těchto variant a vzalo se v úvahu, že více jak 50 % variant je nevhodných. Další sledovanou proměnnou je UI, avšak zde jsou hodnoty uvažovány po vzoru dříve uvedených článků, a cílí se na hodnotu $UI \geq 0,94 \text{ [-]}$.

Výpočty nejsou podloženy experimenty přímo vázanými na tyto simulace. Je potřeba vzít v úvahu právě výzkum provedený Bai a spol. [95], který pojednává o funkčnosti právě ošetření chování kapiček na stěnách pomocí „Wall Film“ přístupu ve verzi R231 (2023R1). Na tomto základě a dříve definovaných limitech se řeší funkční varianty právě vůči výsledkům v tabulce P 4 z přílohy. Aby byla varianta považována za vhodnou, musí obstát v každém režimu proudění, což znamená, že v obou případech vstupních počítaných profilů musí dosahovat požadovaných hodnot. Za těchto podmínek dojde k vyřazení variant 13, 15, 18, 19, 21, 23, 36 a 45. Dále varianty 14 – 17 jsou speciální, jelikož v tomto případě se vypouští částice podél stěny, tzn. vstřikovací bod je na stěně a v částice jsou podstatně vstřikovány po směru proudění na tyto stěny. Tím dojde k velké koncentraci kapiček na stěně a tvorbě kapalinového filmu, který přesahuje dovolenou výšku. Tím se tedy tyto čtyři diskvalifikují, ačkoliv některé z nich splňují požadovaná kritéria.

Varianty 2 až 5, 7 a 8 jsou obdobou varianty 1, tzn. jsou umístěny velice blízko vstupu, jejich lokalita se mění velice málo a jejich aplikace ve výpočtech je spíše testovacího rázu. Z výsledků plyne, že umístění vstřiku v okolí vstupu dosahuje velice dobrých výsledků u variant s možností tvorby kapalinového filmu na stěnách. Na výsledcích je zároveň vidět, že ne všechny varianty jsou vypočítány v novější verzi výpočetního programu, právě z důvodu nevhodnosti umístění, tak jako u varianty 1, proto se tyto varianty nadále neuvažují za potenciálně vhodné.

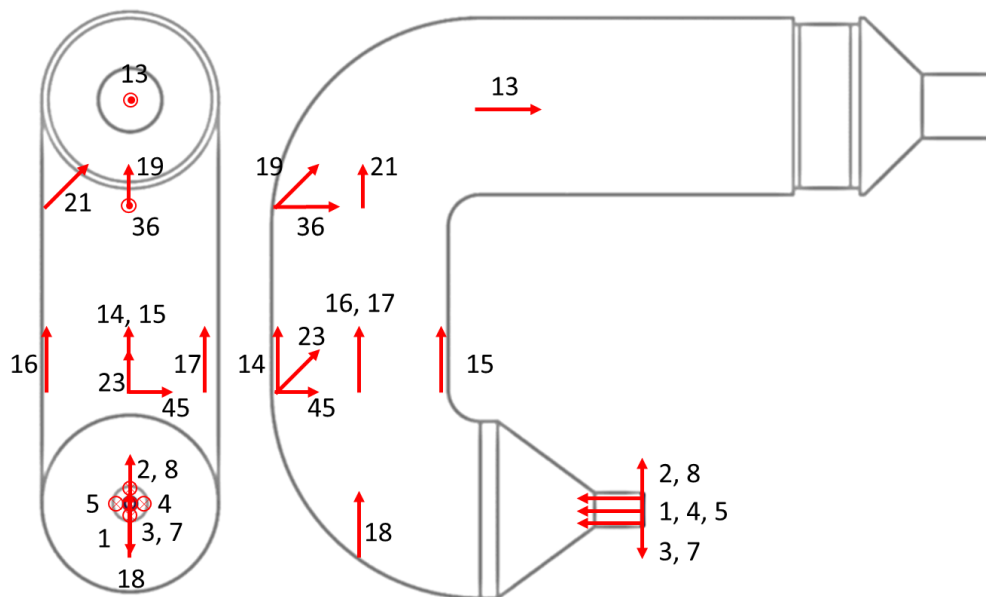
Dále lze výsledky rozdělit na další dvě skupiny. První ze skupin se označí jako *DBZ* obsahuje varianty 1, 20, 22, 24, 27 – 30, 33, 35, 37, 39, 47 a 49. Druhá skupina označená jako *DBY* jsou varianty 6, 11, 12, 25, 26, 31, 32, 34, 38, 40 – 44, 46, 48, 50 a 51. Tyto dvě skupiny jsou velice blízce provázané, jelikož výsledky z jedné skupiny jsou spojené s těmi z druhé.

Skupina variant *DBZ* obsahuje varianty, jež splňují požadavky jak při aplikaci „Wall Film“ na stěně ve verzi R231, tak i „Wall Jet“ na stěnách ve verzi R211, tzn. výsledky ukazují, že pokud jsou splněny požadované podmínky v nižší verzi s doporučeným ošetřením chování kapiček na stěnách, tak se obdobných výsledků dosáhne aplikací ve verzi R231 při použití „Wall Film“.

Skupina variant *DBY* obsahuje varianty, kde jsou splněny sledované ukazatele ve variantách s „Wall Film“ verze R231, avšak u variant „Wall Jet“ nikoliv. Tyto výsledky tedy poukazují na fakt, že ačkoliv vstřikovací místa varianta podle výzkumu Bai. a spol [95] jsou doporučitelná, tak aplikací podmínky „Wall Jet“ kapiček na stěnách ne.

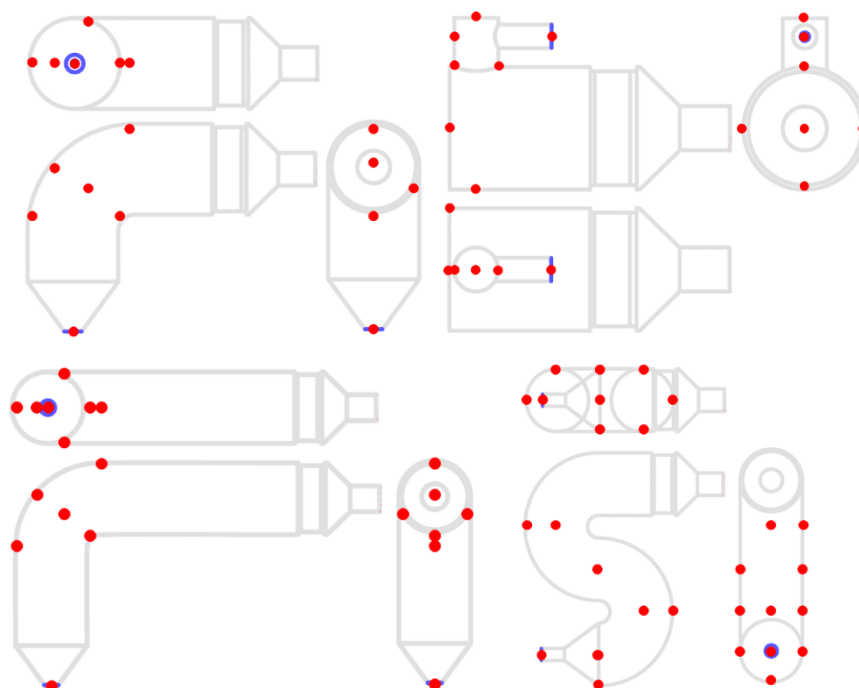
Závěr z těchto dvou skupin je tedy takový, že lze využít výsledky provedené v programu ANSYS Fluent R211 s aplikací „Wall Jet“ na stěnách, což je doporučený model pro ošetření chování kapiček na stěnách. Podle nastavených kritérií je tento přístup možný a dosahuje se obdobných výsledků jako při použití „Wall Film“ ve verzi ANSYS Fluent R231. Verze programu R211 je mnohem konzervativnější, a podle dostupných dat je doporučeno k využití mnohem menší množství vstřikovacích míst. Takže při provedení výpočtů pouze v R211 (s ošetřením stěn „Wall Jet“) a splnění požadovaných kritérií je velice vysoká pravděpodobnost, že obdobných výsledků se dosáhne i ve verzi R231 s „Wall Film“ ošetřením stěn. Dokonce při nesplnění požadovaných kritérií, je stále vysoká pravděpodobnost, že by varianta byla vyhovující. Poměr jednoznačně potvrzených variant je 14 ku 18 variantám, jež jsou skrytě vyhovující, avšak jsou označeny jako nevhodné.

Podle článku Bai a spol. [95] je doporučeno, a ověřeno, používat „Wall Film“ ve verzi R231 a novější stochastický Kuhnkeho model. Na základě toho jsou skupiny variant *DBZ* a *DBY* označeny jako vyhovující a doporučitelné. Tyto výsledky tedy dávají vhodná místa a směry vstřiku. Následující obrázek 72 obsahuje místa vstřiků a směrové vektory nevhodných variant, jež jsou popsány výše. Z tohoto obrázku je jednoznačně vidět, že jsou zde uvedeny zejména vektory směřující po proudu. Obecně jde tedy shrnout závěr v tomto případě tak, že je doporučeno umisťovat vstřik co nejdále od katalyzátoru a směřovat vstřikovací trysku směrem proti očekávanému směru proudění. Tímto postupem se obecně zajistí delší setrvání tekutiny v horkých spalinách, což pozitivně ovlivní vypařování.



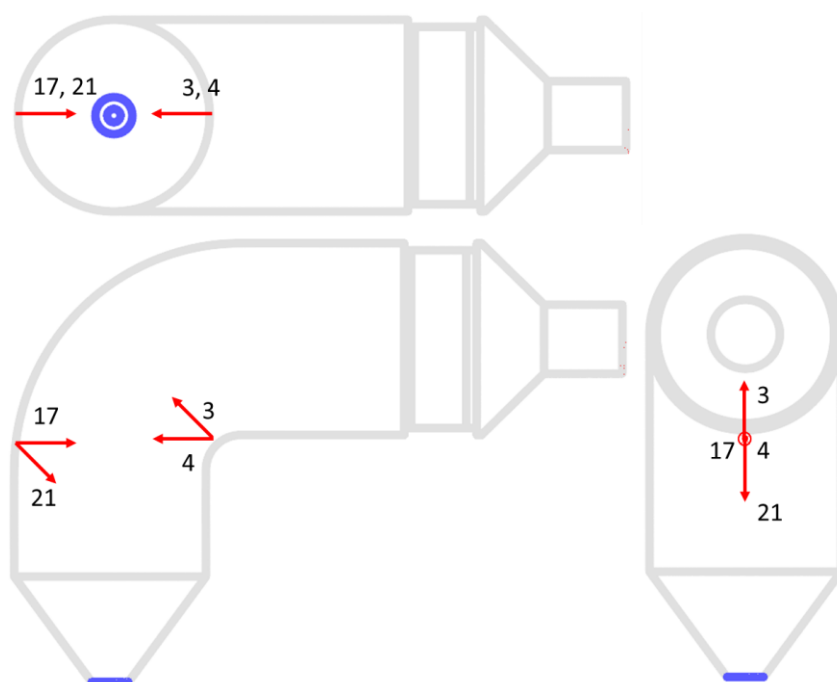
Obrázek 72 Místa vstřiku a jejich směry nevhodných variant „double knee lh“

V příloze uvedené tabulky P 5 a P 6 obsahují výsledky z výpočtů geometrické varianty „short knee lh“ v několika variantách podle míst vstřiků a směrů vstřikovaného média. Obrázek 73 vlevo nahoře zobrazuje tuto geometrii s naznačenými místy vstřikování. Variant vypočítaných na této geometrii je méně než v předchozím případě, nicméně je snaha o postihnouti obdobných reprezentativních míst pro ověření, zda platí předešlé výsledky. Stejně jako v předchozím případě platí stejná kritéria na požadovanou variantu, s tím, že musí být splněna obě zároveň. Výpočty jsou opět provedeny s více typy nastavení úlohy. První z nich jsou výpočty počítané pomocí „Wall Jet“ ošetření kapiček na stěnách ve verzi R211. Výpočty jsou nadále provedeny i pomocí „Wall Film“ modelu ve verzi R231.



Obrázek 73 Vstřikovací místa ostatních počítaných variant

Vychází se z předpokladu, že se uvažují výsledky z verze ANSYS Fluent 2023R1 jako správné. V tomto případě lze doporučit pouze čtyři varianty. Jedná se tedy o varianty 3, 4, 17 a 21, ty jsou zobrazené na obrázku 74. Všechny zbývající varianty nesplňují buď jeden, nebo oba dva předpoklady. Navíc tyto čtyři varianty spadají do obdobné skupiny jako u „double knee lh“ *DBY*, čili výsledky ve verzi R211 se neshodují s těmi v R231, tzn. opět dochází k tomu, že výsledky s „Wall Jet“ jsou mnohem přísnější. Na obrázku 74 jsou vidět doporučená místa, společně s jejich doporučeným směrem rozstříku a číslem odpovídající varianty. Tato varianta je poměrně malá, oproti variantám „long knee“, „double knee“ a „quadro knee short“, takže je poměrně komplikované doporučit místa vstříku. Je vidět, že vhodná místa jsou před koleny na vnitřní a vnější straně kolena a směr vstříkování je buď kolmo do proudu, nebo proti proudu. Obdobné závěry vychází i z předchozí varianty.



Obrázek 74 Doporučená místa vstříku u varianty "short knee lh"

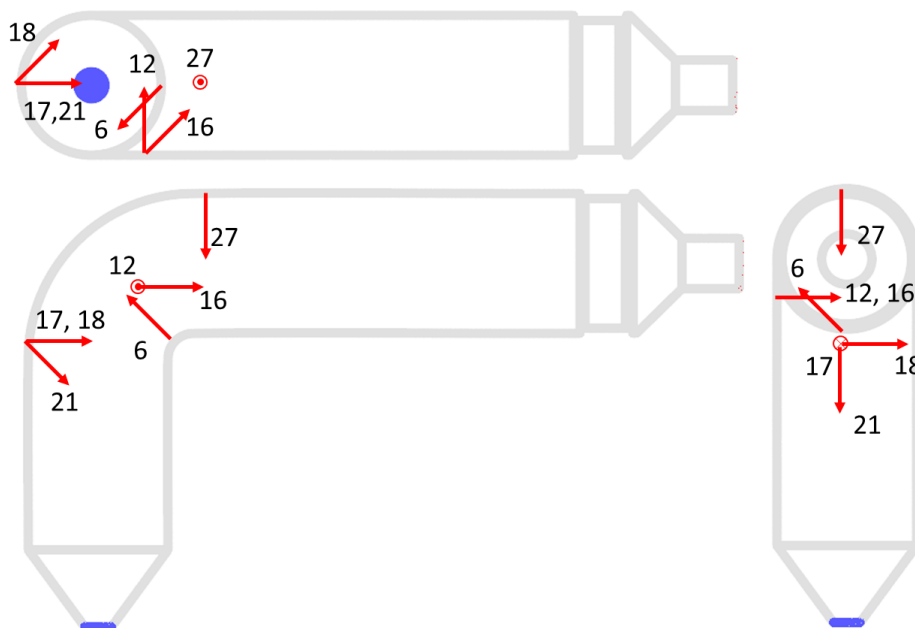
Další detailně počítanou variantou je geometrie „tdm“. Výsledky z těchto výpočtů jsou uvedeny v příloze v tabulce P 7 a P 8. Opět je provedeno několik výpočtů s různými místy a směry vstříků, jež jsou vyobrazené vpravo nahoře v obrázku 73. Při použití stejného přístupu jako v předchozích případech lze uvést následující závěry. Většina variant nedosahuje požadavků na vypaření kapalné fáze před vstupem do katalytické vložky. Tento problém je způsobený krátkou vzdáleností mezi vstupem a katalyzátorem, což je hlavní negativní vlastnost systému.

Na základě výsledků lze uvést perspektivní pouze varianty 1, 2, 3 a 4. V těchto čtyřech případech platí, že se dosahuje nízké koncentrace kapiček, dle nastavené hranice, a zároveň je velice dobré rozložení frakce *CONH*. Tyto vybrané varianty vstříků jsou umístěné ve vstupní části modelu, tzn. proud strhává kapičky a vzhledem ke geometrii vstupní části dochází k tomu, že kapičky dopadají na stěnu, která je proti vstupu

do modelu. Kapičky se v tomto případě neodráží, a vzniká zde kapalinový film o velké tloušťce, čímž se narušuje podstata použitého modelu, a proto výsledky nejsou relevantní. Proto i tyto varianty je potřeba diskvalifikovat.

Ve skutečnosti by pravděpodobně docházelo ke stékání tekutiny po stěně dolů do většího potrubí, kde by kapičky byly buď strhávány proudem spalin a následně usměrňovány rovnou na katalytickou vložku, nebo by se v dolní části tvořila zvětšující se kaluž. K odpaření kapalinového filmu by s největší pravděpodobností nedocházelo, jelikož by se stěna lokálně vychlazovala pomocí stále přiváděného AdBlue®. Nicméně toto chování je pouze předpoklad, jelikož tyto uvažované fyzikální jevy jsou komplikované na modelování.

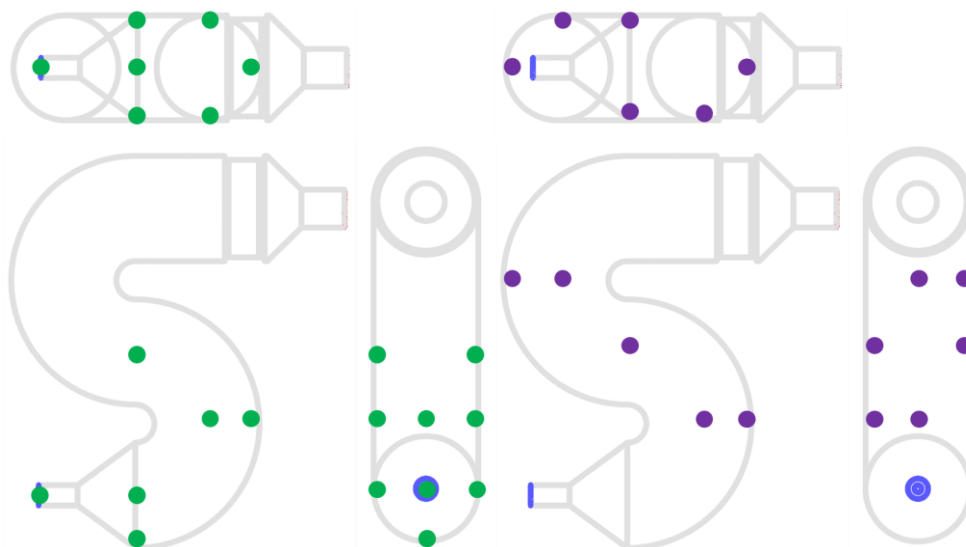
Další studie je provedena na geometrii „long knee lh“, ta je uvedena na obrázku 73 vlevo dole, kde jsou vyznačená i počítaná místa vstřiků. Výsledky vázané k těmto výpočtům jsou uvedeny v příloze v tabulce P 9. Z těchto dat je na první pohled patrné, že výpočty jsou provedeny pouze ve verzi R211, čili uvažuje se pouze použití modelu „Wall Jet“ k ošetření chování kapiček na stěnách. Hodnocení výsledků zde vychází ze základů položených a zjištěných na variantě „double knee lh“. To tedy znamená, že pokud varianty vyhoví ve verzi R211, očekává se, že výsledky jsou obdobné i v novější verzi. Požadavků na výsledky dosahují varianty 6, 12, 16 – 18, 21 a 27. Jak již bylo popsáno výše u varianty „double knee lh“, je možné, že některé varianty by při použití kapalinového filmu na stěnách v nové verzi taktéž obstály. Umístění a směry vstřiků vhodných variant jsou na obrázku 75. Opět platí, že u většiny vhodných variant jsou kapičky vstřikovány kolmo ke směru proudění, případně proti proudu. Výjimku v tomto případě tvoří varianta 16, která směřuje po proudu. V tomto případě jde pravděpodobně o specifickou anomálii způsobenou úplavem za kolenem. Dojde k tomu, že částice se dostanou do úplavu a opět dochází k prodloužení doby setrvání (částice nejsou strženy proudem rovnou do katalyzátoru).



Obrázek 75 Doporučená místa vstřiku u varianty „long knee lh“

Poslední výpočty, jež se týkají vstřikování kapiček do navrhnutého SCR systému, jsou provedené na geometrii „quadro knee short“. Tato varianta je uvedena na obrázku 73 vpravo dole, spolu s počítanými místy vstřiku. Výsledky jsou uvedeny v příloze v tabulce P 10, stejně jako v předchozím případě jsou výpočty provedeny pouze ve verzi R211.

Výsledky v této sadě výpočtů jsou opět založeny na obdobném systému hodnocení jako v předchozím případě, jež vychází z výsledků varianty „double knee lh“ v úvodní části této kapitoly. Při splnění požadovaných parametrů je v tomto případě nadpoloviční většina počítaných variant označena jako vhodná. Jedná se o varianty 1 – 11, 13 – 17 a 22 – 24. Umístění vstřikovacích míst doporučených i nedoporučených je možné vidět na obrázku 76. Je vidět, že některá místa se překrývají. Například v prvním kolenu na vnější straně je pouze jedna varianta, která vstříkuje směrem proti proudu, označena jako doporučitelná, ale zbývající vstřiky v tomto místě jsou nevhodné, tzn. toto místo je nestabilní a není vhodné. Uprostřed téhož kolena je opět označeno jedno místo vstřikování na obou stranách. To je způsobeno tím, že je-li vstřík namířen směrem po proudu, dochází k nevhodné distribuci částic a nesplňují se kritéria. To samé je v místě mezi prvním a druhým kolenem, jež zcela otáčí proud. Jako zcela nevhodná jsou místa vstřiku v polovině druhého kolena, ať už na vnější straně, nebo uprostřed, a to v jakémkoliv směru vstřiku – tato místa jsou příliš blízko k samotné vložce katalyzátoru.



Obrázek 76 Vhodná (vlevo) a nevhodná (vpravo) místa vstřiku varianty „quadro knee short lh“

Volba vhodného vstřikovacího místa je důležitým bodem návrhu SCR systému. Ačkoliv se to z laického pohledu může zdát jako banální záležitost, vzhledem k tomu, že se vstříkuje poměrně malé množství AdBlue® do těchto systémů, tak je i tento bod velice důležitý a nelze zanedbat vhodnost místa a směr vstřikované kapaliny.

Z výsledků zde prezentovaných je nejdůležitější tento závěr: Je potřeba zajistit co nejdelší setrvání vstřikovaných částic v proudu horkých spalín pro zajištění odpaření co největšího množství DEF před vstupem do katalyzátoru.

Spolu s tímto požadavkem je potřeba zajistit i kvalitní distribuci odpařené močoviny, potažmo již amoniaku. Tento parametr je však zajištěný ve většině případů již tím, že se zajistí maximální doba setrvání a zároveň, že proudění tento požadavek na distribuci (zajištění co nejvyššího UI) již splňuje samo o sobě.

Jak popisují dva předchozí odstavce, že je obecně problematické řešit SCR systémy s malým potrubním systémem před samotným katalyzátorem. V tomto případě se jedná o geometrie typu „tdm“ a „short knee“. V obou případech je doba setrvání částic mnohem menší než v ostatních třech případech, a proto je problematické dosáhnout požadovaných parametrů na systém. V případě „short knee“ se dají najít vhodná místa, avšak dá se předpokládat, že záleží na režimu proudění (vyšší rychlost by mohla být problematická, při nižších rychlostech by, logicky, doba setrvání kapiček rostla a zvýšil by se jejich odpar). V případě „tdm“ zde není uvedené jediné vhodné řešení. V případě vstřikování DEF blízko konvertoru dochází k tomu samému jako u „tdm“, čili není možné odpařit tekutinu před vstupem do katalyzátoru, což platí u všech ostatních variant.

Obecně lze však doporučit, s přihlédnutím na proveditelnost instalace trysky, lokaci v koleni, na vnitřních a vnějších stranách kolen, a to co nejdále od samotného katalyzátoru. Je nutno směřovat trysky proti směru předpokládaného proudění, případně kolmo do proudu.

5.11 Aplikace chemických rovnic do modelu

Technologie selektivní katalytické redukce byla poprvé patentována v roce 1957 a byla široce využívána po desetiletí v uhelných elektrárnách a dalších stacionárních průmyslových zařízeních využívajících spalování. SCR se poprvé stala mobilní technologií v roce 2004 a byla integrována do pohonných dieselových motorů. Poté, co Japonsko zavedlo přísnější emisní normy pro vozidla, začala společnost Nissan používat SCR u svých dieselových vozidel. Trvalo nějaký čas, než SCR předstihla předchozí technologii omezování emisí a než se močovina (DEF) začala distribuovat a být k dispozici pro dieselová vozidla po celém národním území. SCR je nyní preferovanou technologií. [109]

V SCR systémech jsou chemické rovnice klíčové pro popis reakcí, které vedou k redukci oxidů dusíku na neškodlivé látky, jako je dusík a voda. V rámci SCR procesu jsou často používána redukční činidla, jako je amoniak nebo močovina. Tyto látky reagují s NO_x za přítomnosti katalyzátoru, což vede ke snížení škodlivých emisí. Chemické rovnice poskytují úplnější porozumění těmto procesům a umožňují navrhovat a vylepšovat SCR systémy pro dosažení maximální účinnosti při minimalizaci negativních vlivů na životní prostředí.

ANSYS Fluent není, podle oficiální podpory tohoto programu, schopný modelovat SCR technologii. Ani další program v balíčku ANSYS zaměřeny čistě na chemii, ANSYS

Chemkin, nemá v předpřipravených modelech téměř žádné ověřené modely. Fluent obsahuje jeden model použitelný při vypařování kapiček AdBlue® tak, že z močoviny proběhne transformace na amoniak. Chemkin obsahuje jeden model, připravený podle článku Chatterjee a spol. [110]. V tomto případě však model nezohledňuje NO_2 , proto je potřeba vytvořit vlastní model. Oficiální komunikací s podporou ANSYS se získalo jednoznačné odpovědi, pro řešení tohoto problému je nejvhodnější přistoupit k použití konkurenčního programu AVL, jež se používá právě k řešení SCR technologií. A to i přesto, jak je uvedeno v prvním odstavci této kapitoly, že technologie SCR je známá již od roku 1957. [109]

5.11.1 Uvažované chemické rovnice

Počet chemických reakcí v SCR katalyzátoru může být velmi rozsáhlý, závisí to na konkrétním prostředí, podmínkách a použitém redukčním činidle (např. amoniak nebo močovina). Vzhledem k složitosti chemických procesů v SCR je obtížné přesně odhadnout počet reakcí, protože mohou být zapojeny různé reakční mechanismy a vedlejší procesy.

SCR reakce obvykle zahrnují několik kroků, včetně advekce částic plynu, absorpce částic na povrchu katalyzátoru, advekce redukčního činidla, a následné reakce na povrchu katalyzátoru. Experimentální a teoretický výzkum v oblasti SCR se snaží lépe porozumět těmto procesům a zlepšovat katalyzátory tak, aby byly účinnější a splňovaly přísné emisní normy. Celkově lze říci, že SCR reakce jsou velmi komplexní a mohou zahrnovat mnoho různých reakcí a meziproductů, což činí tuto oblast výzkumu a vývoje fascinující a náročnou zároveň.

Chemické reakce v katalyzátorech probíhají na povrchu katalyzátoru. To znamená, že interakce mezi reaktanty (oxidy dusíku a redukčním činidlem) a aktivními místy katalyzátoru, kde dochází k reakcím, jsou omezeny na povrch materiálu. Povrchová reaktivita je klíčovým faktorem ovlivňujícím efektivitu SCR procesu. Větší povrch katalyzátoru může poskytnout více aktivních míst pro reakce, což může vést k větší účinnosti odstranění oxidů dusíku ze spalin.

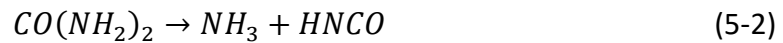
Vzhledem ke složitosti těchto chemických reakcí a v podstatě jejich neznalosti, z důvodu vzniku různých meziproductů, je potřeba k této problematice v tomto případě přistoupit zjednodušeně. Jelikož katalytická vložka je modelována jako porézní médium, přistoupí se k řešení chemických reakcí objemově. Nicméně většina výzkumů, jak je již zmíněno v kapitole 2.4.2, zabývajících se danou problematikou, se věnuje právě tomu, jak probíhají chemické pochody na povrchu. Není možné bez vlastního experimentálního zařízení a zázemí, které by bylo určeno pouze na tento výzkum, jednoduše převést povrchové reakce na objemové. Navíc většina publikovaných článků nedává dostatečné množství konkrétních informací o tom, jak chemické rovnice probíhají (rychlost reakcí, aktivační energie atd.).

Důležité informace, které lze využít jako výchozí, však existují a jsou sepsané v publikacích od Chatterjee a spol. [111], [112]. V těchto dvou publikacích jsou popsány

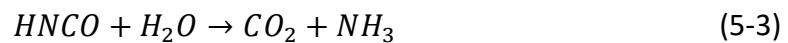
jednoduché rovnice, které probíhají v katalyzátorech, a zároveň jsou zde výsledné hodnoty, které jsou nezbytné pro výpočty v ANSYS Fluent.

Chemické rovnice, které se uvažují v těchto dvou článcích, jsou rovnice (5-4) až (5-7). Rovnice (5-2) a (5-3) se vztahují k AdBlue®, kdy se močovina v této tekutině rozkládá na amoniak potřebný ke katalytickým reakcím a oxid uhličitý.

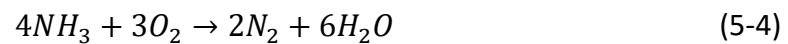
Když se DEF vstříkne do horkých spalin, dojde k vypařování vody a močovina, se podle rovnice (5-2) rozkládá za působení tepla na amoniak a kyselinu isokyanatou.



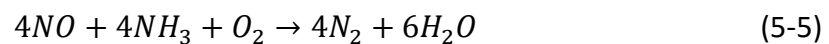
Kyselina isokyanatá reaguje s vodní párou a hydrolyzuje na oxid uhličitý a amoniak podle rovnice (5-3).



Rovnice na řádce (5-4) popisuje oxidaci amoniaku, čímž vzniká vodní pára a čistý dusík.



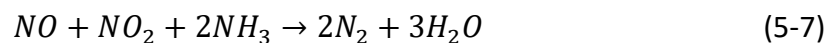
„Standardní“ SCR reakce je na řádce (5-5), kde probíhá reakce mezi oxidem dusnatým, amoniakem a kyslíkem, za vzniku dusíku a vodní páry.



Oxid dusnatý může reagovat i s kyslíkem, tak jak je popsáno na řádce (5-6), čímž vznikne oxid dusičitý.



Poslední uvažovanou reakcí je tzv. „rychlá SCR reakce“, ta je zaznamenána na řádce (5-7). Zde dochází k reakci mezi oxidem dusnatým, oxidem dusičitým a amoniakem, za vzniku vodní páry a dusíku. Touto reakcí se uzavře celý cyklus a na výstupu, při splnění všech podmínek, se očekávají výstupní spaliny bez emisí v podobě oxidů dusíku.



Chatterjee a spol. [111] se ve svém článku z roku 2005 zaměřují převážně na katalyzátory založené na bázi vanadu a titanu, což je právě ten samý typ, jako je uvažovaný v tomto výzkumu, jelikož je aplikovaný v SCR systému „A“, viz kapitola 5.1. V tomto článku provádějí experimentální studii, již porovnávají s jimi vytvořeným modelem. Výsledky z obou studií jsou ve velice dobré shodě. V příloze přikládají své výsledky pro jejich model. Ve druhé studii Chatterjee a spol. [112] rozšiřují svou předchozí studii o katalyzátory

obsahující zeolit. Nicméně dávají výsledky do porovnání i s katalyzátory založenými na vanadu a titanu, jako v předchozí studii. V této studii jsou již uvedeny všechny rovnice, jež jsou výše popsány na řádcích (5-4) až (5-7). Stejně jako v předchozím případě se jejich model shoduje velice dobře s experimenty a v příloze opět přikládají data k jejich modelům.

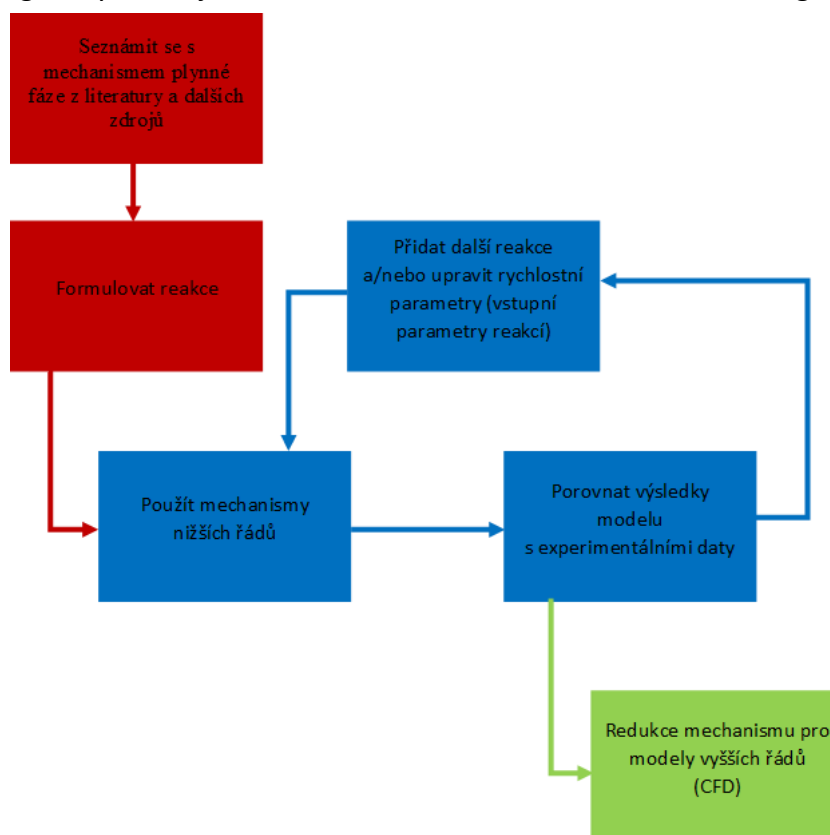
Teoretická podstata fungování chemických rovnic, a jejich přidání do modelu při výpočtech v ANSYS Fluent, je zde zajištěna pomocí modelu „Species Model“, který zajišťuje právě změny jednotlivých chemikálií. V tomto případě je použit doporučený model „Finite-rate/No TCI“, kde je kinetika s konečnou rychlostí zahrnuta výpočtem chemických zdrojových členů pomocí obecných výrazů pro rychlosti reakcí, aniž by se explicitně snažila vzít v úvahu efekty turbulentních fluktuací na výpočty zdrojových členů. Tento přístup je doporučen pro laminární proudění, kde je formulace přesná, nebo pro turbulentní proudění s komplexní chemií. Jelikož zde se uvažuje v porézní zóně laminární proudění, tak je tento model zvolený jako vhodný. Jedním z členů, který je řešený v těchto rovnicích je dopředná rychlost reakce, která se v tomto modelu řeší pomocí Arrheniovy rovnice, která je v obecném tvaru zapsána vztahem (5-8). [88]

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{\frac{-E_r}{RT}} \quad (5-8)$$

Zde platí, že $k_{f,r}$ je rychlost reakce, A_r je pre-exponenciální faktor, T je termodynamická teplota, β_r teplotní exponent, E_r je aktivační energie a R je univerzální plynová konstanta. Tento zápis pro výpočet používá ANSYS Fluent. [88] Pre-exponenciální faktor je veličina, jejíž jednotka se mění podle typu a tvaru rovnice, ve které se zrovna nachází. Na řádce (5-8) má rozměr frekvence [s^{-1}], nicméně v člancích od Chatterjee a spol. je možné dohledat, že může nabývat i jiných rozměrů.

Problém nastává při aplikaci hodnot z článku od Chatterjee a spol. [112], jelikož jejich rovnice pro rychlost reakcí jsou rozdílné oproti té, jež je zapsaná na řádce (5-8). Nejde o to, že by to byly zcela jiné rovnice, všechny zmíněné jsou Arrheniovým zápisem, nicméně autoři článku používají různá rozšíření této rovnice tak, aby došlo ke shodě s jejich experimentem. V tomto případě se opět naráží na problém s vlastním experimentem a tím, že je problematické nalézt potřebná data pro výpočet.

V návodu ANSYS Chemkin je dostupný vývojový diagram, jak postupovat v případě, že se zavádí nový postup pro chemické výpočty. Tento diagram je v reprodukované verzi možné vidět na obrázku 77. Z této analýzy lze dedukovat, že proces v podstatě spočívá ve volbě čísel metodou náhodného výběru, která má za cíl dosáhnout požadovaných výsledků podle experimentálních dat. Náhodnost tohoto výběru lze minimalizovat pomocí postupné iterace výpočtů, zejména díky pečlivému inicializačnímu výběru čísel na počátku iterativního procesu. To tedy znamená, že lze využít čísla z experimentů a studií provedených Chatterjee a spol. a pokračovat dále v této studii. [111] [112]



Obrázek 77 Schéma vytváření reakčního mechanismu [113]

5.11.2 Experiment provedený na SCR systému „A“

Během práce na tomto výzkumu se provedl experiment na SCR systému „A“, který je zaměřený na sběr dat týkajících se emisí výfukových plynů před a po aplikaci močoviny (DEF). Hlavním zájmem bylo sledování změn v množství emisí v závislosti na variabilním množství vstřikovaného AdBlue®. Tímto způsobem se získaly relevantní informace o vlivu močoviny na chemické složení výfukových plynů, což umožnilo analyzovat efektivitu procesu SCR při různých podmínkách vstřikování. Měření probíhalo na vstupu a výstupu z katalytické vložky, což poskytlo důležité údaje pro porozumění celkovému chování emisí v průběhu experimentu.

Experiment se provedl pomocí spektrometru pro Fourierovu transformaci infračerveného záření (FTIR) typu CX4000 od společnosti Gasmeter. Tento přístroj se použil k měření emisí NO_x a amoniaku, stejně jako dalších emisí výfukových plynů. V tabulce 38 je uveden pouze oxid uhelnatý, ale data jsou dostupná i pro metan, formaldehyd a další. Taktéž se použil paramagnetický analyzátor kyslíku typu PMA10 od společnosti M&C k měření zbytkového kyslíku ve výfukových plynech, protože FTIR nemůže měřit pouze molekuly kyslíku. Oba přístroje jsou integrovány do jednoho systému propojeného vyhřívanými výfukovými trubkami. Tyto trubky jsou vyhřívány na 180 [°C], aby se zabránilo kondenzaci vodní páry ve výfukových plynech. Měřicí komora FTIR je taktéž vyhřívána na 180 [°C].

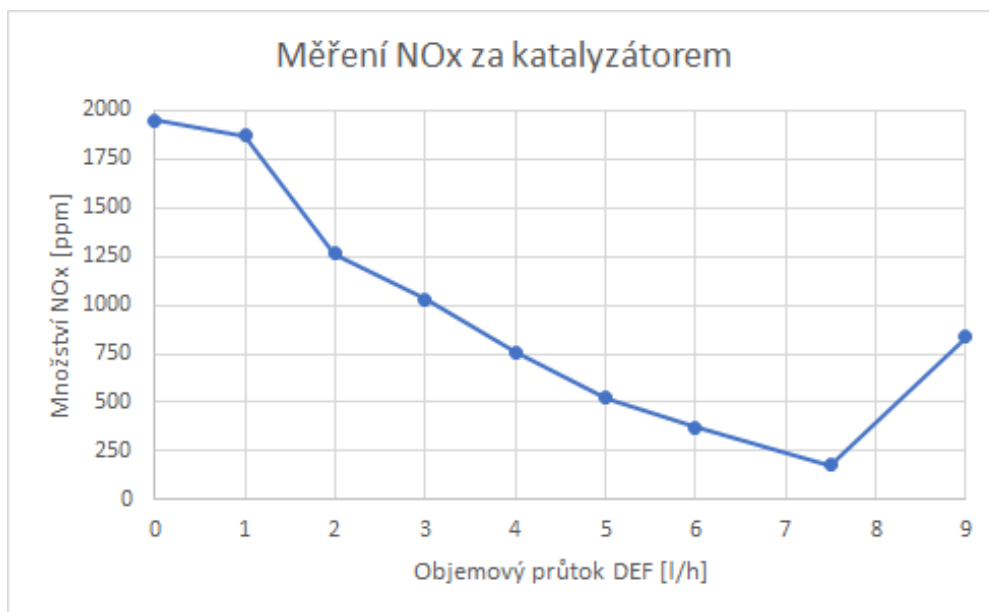
Tabulka 38 obsahuje data z měření provedené na SCR systému „A“. Měření probíhalo kontinuálně a výsledné hodnoty, zde uvedené, jsou průměrnou hodnotou za časový úsek. Měření označené „před katalyzátorem“ je provedené před katalyzátorem. Měření „za katalyzátorem“ na výstupu z katalyzátoru, který obsahuje jak vložku pro SCR, tak i pro redukci ostatních emisí.

Z výsledků je vidět, že měření před katalyzátorem a za katalyzátorem bez vstřikování AdBlue® má identické množství NO_x , avšak mění se poměr NO/NO_2 , což je způsobené vložkou pro redukci uhlovodíků a oxidu uhelnatého. Zvyšování vstřikovaného množství má jednoznačné pozitivní vliv na výsledné množství výstupních emisí NO_x až do hodnoty 7,5 [l/h]. Pro 9 [l/h] je však již jednoznačně vidět, že dochází k nevyužití celého vzniklého amoniaku, a zároveň se již nezmenšuje množství emisí, ale naopak se zvyšuje. Proto byl experiment v tomto bodě přerušen.

Tabulka 38 Měření před a za katalyzátorem

-		H_2O [% vol]	CO_2 [% vol]	O_2 [% vol]	CO [ppm]	NO [ppm]	NO_2 [ppm]	NH_3 [ppm]	NO_x [ppm]
před	0 [l/h]	5,6	7,0	10,9	95,8	1857,7	89,7	0,8	1947,4
za	0 [l/h]	5,3	6,7	11,2	16,6	1742,9	208,0	0,4	1950,9
	1 [l/h]	5,4	6,8	11,2	17,7	1707,8	163,1	0,3	1870,9
	2 [l/h]	5,8	6,9	11,1	18,2	1161,5	106,1	0,3	1267,5
	3 [l/h]	6,0	7,0	11,1	18,8	937,8	90,9	0,2	1028,7
	4 [l/h]	6,2	7,0	11,0	18,9	684,6	72,9	0,2	757,5
	5 [l/h]	6,1	7,0	11,0	17,5	470,7	51,6	0,3	522,2
	6 [l/h]	6,2	7,1	10,9	16,8	331,8	38,3	0,3	370,1
	7,5 [l/h]	6,4	7,1	10,9	15,3	166,3	12,0	1,7	178,3
	9 [l/h]	6,1	7,0	10,9	17,0	762,9	71,4	10,2	834,3

Tato data jsou ještě pro přehlednost uvedena na obrázku 78. Z dat je dále vidět to, že výše popsané rovnice fungují, jelikož redukcí oxidů dusíku vzniká vodní pára, jejíž množství se zvyšuje s rostoucím množstvím vstřikované kapaliny, a zároveň to platí i pro oxid uhličitý. Množství kyslíku stejně tak ubývá, jelikož se účastní redukčního procesu. Tzn. výše popsané rovnice v základu odpovídají realitě, nicméně jejich meziprodukty jsou neznámé. Toto měření neodhaluje podstatu a kinetiku chemických rovnic, ale řeší pouze množství jednotlivých složek.

Obrázek 78 Výsledky měření NO_x za katalyzátorem

Data z provedeného experimentu před katalyzátorem se uvažují jako vstupní data pro CFD simulaci. Dále je snaha dosáhnout naměřených dat ve výpočtech pomocí správného nastavení požadovaných parametrů (aktivační energie, rychlost reakce atd.). Tato data se uvažují z článků od Chatterjee a spol. [111] [112]. Nicméně vzhledem k lehce rozdílnému přístupu se očekává, že bude potřeba použítá data upravit, aby se dosáhlo požadovaných výsledků, čímž se dodržuje postup uvedený v obrázku 77.

5.11.3 CFD výpočty chemických reakcí na submodelu

Aplikace chemických rovnic v numerických simulacích je poměrně složitou záležitostí, která není běžně používaná. Proto není lehké tyto výpočty připravit a nastavit. Navíc důvěryhodnost těchto výpočtů, s nimiž není dostatek zkušeností, není jednoznačná. Informace získané z provedeného experimentu a z odborných článků dávají dobrý základ pro správné nastavení modelu. Navíc technická podpora ANSYS Fluent dopomohla k pochopení problematiky chemie v CFD a poukázala, jakým směrem se ubírat.

I tak je vhodné k této problematice přistoupit s největší opatrností a postupnými kroky. Ty v tomto případě jsou provedeny na submodelu, který má velice jednoduchou geometrii. Ta je vidět na obrázku 79. Jedná se o trubku, která je složená ze tří objemů, s tím že prostřední z nich, je porézní zónou, která imituje samotnou katalytickou vložku. Nastavení kromě běžných okrajových podmínek obsahuje i zavedení chemických rovnic (5-2) až (5-7). K těmto rovnicím je potřeba doplnit i požadované stechiometrické parametry, pre-exponenciální faktor a aktivační energii.



Obrázek 79 Submodel chemických reakcí

Jsou vytvořeny dvě varianty, které jsou na tomto modelu počítány. Ani jedna z nich neobsahuje všechny dříve zmíněné jevy (kapičky, Wall Film, rotující vstupní profil). Jedná se pouze o základní výpočet, kdy nedochází ani k odparu AdBlue®, ale je do výpočtu přivedený rovnou na vstupu amoniak, který je hlavním redukčním činidlem v reakcích. Rozdíl v jednotlivých variantách je patrný z tabulky 40, která je okomentována níže. Výsledky obdržené z výpočtů je možné vidět v tabulce 39. Chemické rovnice (5-4) až (5-7) probíhají pouze v části katalytické vložky.

V tabulce 39 jsou uvedeny pouze výsledky, jež lze označit za zajímavé. Hodnoty se odečítají na čtyřech plochách, na vstupu (kontrola nastavení hodnot), na vstupu do porézní zóny (porézní – vstup), výstupu z porézní zóny (porézní – výstup) a výstupu. Z výpočtů lze získat i další chemické sloučeniny, jako je právě močovina či kyselina isokyanatá, ale výpočty neobsahují vypařování kapiček DEF, tak tyto hodnoty jsou nulové. Tím se v podstatě deaktivují první rovnice (5-2) a (5-3). Zároveň proto nedochází ke generování CO_2 , proto v tabulce jsou tyto hodnoty konstanty. V případě varianty 1 je vidět, že téměř nedochází k chemickým reakcím a redukce NO_x je minimální. Proto je vytvořená varianta 2, která má změněné parametry pro chemické reakce. Došlo k pozitivnímu ovlivnění. Je vidět, že se více NO_x zredukovalo na dusík, avšak nedochází k celkové redukci, tzn. na výstupu je stále velké množství NO_x .

Tabulka 39 Zastoupení jednotlivých chemických sloučenin v submodelu

-		vstup	porézní - vstup	porézní - výstup	výstup
varianta 1	NH_3 [ppm]	1900,0	1900,0	1900,0	1900,0
varianta 2		1900,0	1900,0	1877,5	1877,5
varianta 1	CO_2 [%]	7,0	7,0	7,0	7,0
varianta 2		7,0	7,0	7,0	7,0
varianta 1	H_2O [%]	5,6	5,6	5,6	5,6
varianta 2		5,6	5,6	5,6	5,6
varianta 1	N_2 [ppm]	0,0	0,0	0,0	0,0
varianta 2		0,0	0,0	18,5	18,5
varianta 1	NO [ppm]	1857,8	1857,8	1856,9	1856,9
varianta 2		1857,8	1857,8	1852,2	1852,2
varianta 1	NO_2 [ppm]	89,7	89,7	91,1	91,1
varianta 2		89,7	89,7	98,2	98,2
varianta 1	O_2 [%]	10,9	10,9	10,9	10,9
varianta 2		10,9	10,9	10,9	10,9

Jak je již zmíněno výše, tak v tabulce 40 lze nalézt rozdíly mezi variantou 1 a 2. První varianta obsahuje hodnoty z článků od Chatterjee a spol. [111] [112], druhá varianta obsahuje již hodnoty mnohem nižší. Tyto hodnoty jsou zvoleny s ohledem na to, že je snaha zvýšit produkci dusíku z chemických rovnic, což logicky znamená, že je potřeba tyto dvě hodnoty snížit ve všech chemických reakcích. Nicméně výsledky v předchozí tabulce poukazují na fakt, že ani takto radikální změna (ve většině případů o několik řádů) nepřinesla očekávané výsledky a stále není zajištěn hladký průběh všech chemických reakcí.

Tabulka 40 Hodnoty zadané do výpočtů submodelu

-		A_r	E_r
varianta 1	rovnice (5-2)	1,00E+15	1000
varianta 2		1,00E+15	1000
varianta 1	rovnice (5-3)	250000	6,22E+07
varianta 2		250000	6,22E+07
varianta 1	rovnice (5-4)	3,32E+13	1,78E+08
varianta 2		100	100
varianta 1	rovnice (5-5)	323,6	4,87E+07
varianta 2		100	100
varianta 1	rovnice (5-6)	6478	3,10E+07
varianta 2		100	100
varianta 1	rovnice (5-7)	5,33E+08	1,13E+08
varianta 2		100	100

Výsledky poukazují na jednoznačné stanovisko. Model je funkční, dochází k redukci NO_x , čili chemické rovnice uvedené do modelu jsou funkční a lze s nimi pracovat. Problém nastává při kvantitativním hodnocení, jelikož nedochází k dostatečné redukci emisí NO_x . Tento problém je pravděpodobně možné odstranit vhodnou volbou parametrů chemických rovnic, tímto směrem je již v této kapitole učiněný pokus, jež dopadl dle očekávání – došlo k vyšší redukci emisí. Dalším krokem je aplikace tohoto nastavení do celého modelu systému „A“, jež bude obsahovat již všechny dříve ukázané modely, čímž se stane nejkompaktnější simulací.

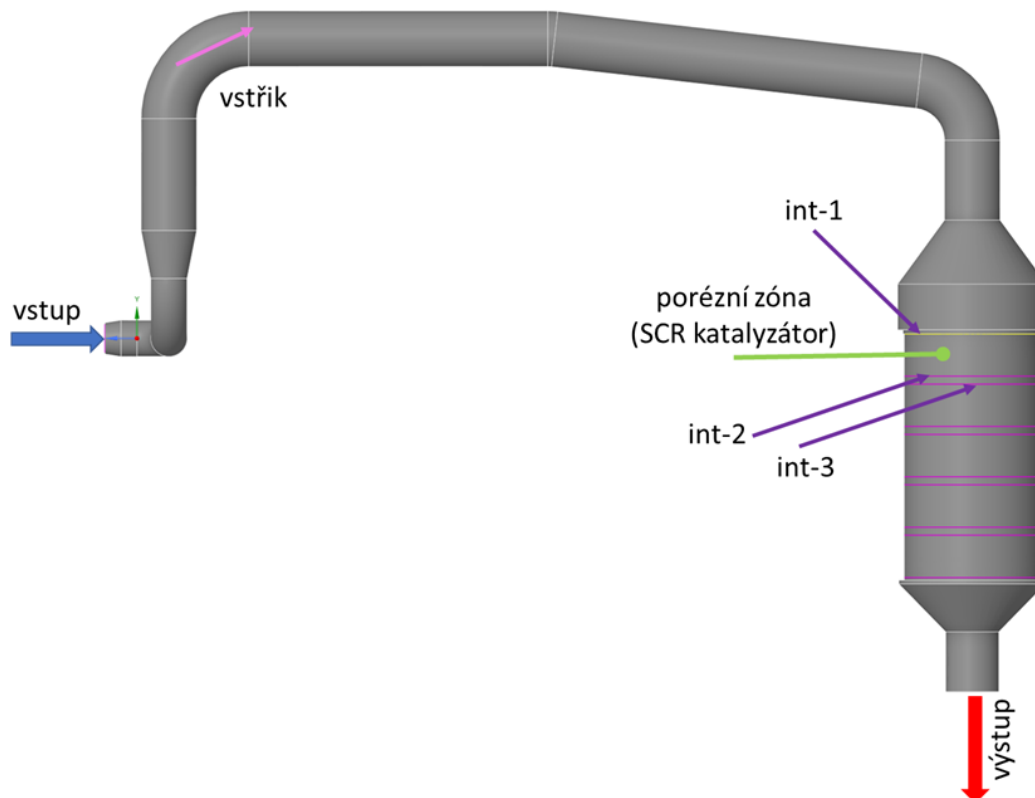
5.11.4 Aplikace chemických reakcí do SCR systému „A“

Předchozí podkapitola obsahuje aplikaci chemických rovnic do malého submodelu, který má za úkol rychlé provedení výpočtu a rychlou změnu ve výpočtu v případě nenadálých komplikací, které se běžně vyskytují při aplikaci nových modelů do výpočtu. Výsledky poukázaly na fakt, že model je funkční a lze ho aplikovat.

Model SCR systému „A“ je původní geometrií a jsou do ní nyní aplikovány všechny předchozí zmíněné modely. Aplikované modely tedy jsou: turbulentní model $k - \omega SST$, porézní médium (zóna), vstřikovávání kapiček AdBlue®, vypařování této tekutiny a následné chemické procesy. Geometrický model je možné vidět na obrázku 80. Je zde zachycený

vstup v levé části a výstup v pravé dolní. V pravé části obrázku je vidět umístění SCR katalyzátoru, je to první část katalyzátoru, další části již obsahují oxidační katalytické vložky pro redukci dalších emisí. Vstřikovací místo, tryska, je umístěná v levé horní části obrázku, což je třetí koleno od vstupu do zobrazeného modelu.

Vyhodnocení sledovaných hodnot, v tomto případě již pouze chemické složení, je na vstupu, výstupu a na třech řezech. První z těchto řezů „int-1“ je na vstupu do SCR katalytické vložky, druhý „int-2“ je na výstupu z této vložky. Třetí sledovaný řez „int-3“ je na vstupu do následující vložky.



Obrázek 80 Model SCR systému „A“ a vyhodnocovací plochy

Stejně jako v předchozím případě, submodelu, je napočítáno více variant. Rozdíl v nastavení výpočtů je uvedený v tabulce 42. Výsledky ze všech variant jsou uvedeny v tabulce 41. Výsledky poukazují na to, že v prvních dvou variantách nedochází k redukci NO_x . Kapičky se vypařují a dochází ke konverzi močoviny na amoniak, v druhé variantě intenzivněji nežli v první. Avšak je vidět, že na výstupu je velké množství amoniaku, což je nežádoucí jev. Znamená to tedy, že se amoniak neúčastní chemických reakcí, jež mají za úkol redukovat NO_x . Třetí varianta je však odlišná, je vidět že dochází ke značné redukci množství NO , avšak roste množství NO_2 . To je způsobeno tím, že probíhají chemické reakce (5-2) až (5-6), kdy dochází k celkovému vyčerpání množství NO , které je nezbytné pro redukci NO_2 , podle rovnice (5-7).

Tabulka 41 Zastoupení jednotlivých chemických sloučenin v systému „A“

-		vstup	int-1	int-2	int-3	výstup
varianta 1	$HNCO$ [ppm]	0,0	332,3	325,3	324,7	287,5
varianta 2		0,0	125,1	127,0	126,8	99,0
varianta 3		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
varianta 1	N_2 [ppm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
varianta 2		0,0	0,0	0,2	0,1	0,1
varianta 3		0,0	193,1	243,6	244,0	244,6
varianta 1	NH_3 [ppm]	0,0	165,7	168,1	168,0	182,3
varianta 2		0,0	123,6	140,0	140,5	212,6
varianta 3		0,0	60,9	0,0	0,0	0,0
varianta 1	$CO(NH_2)_2$ [ppm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
varianta 2		0,0	219,0	186,8	184,2	75,4
varianta 3		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
varianta 1	H_2O [%]	5,6	5,8	5,8	5,8	5,8
varianta 2		5,6	5,8	5,8	5,8	5,8
varianta 3		5,6	5,8	5,8	5,8	5,8
varianta 1	CO_2 [%]	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
varianta 2		7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
varianta 3		7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
varianta 1	NO_2 [ppm]	89,7	89,6	92,4	92,3	92,2
varianta 2		89,7	89,6	91,4	91,3	91,3
varianta 3		89,7	2339,4	2927,8	2927,6	2927,8
varianta 1	NO [ppm]	1857,8	1852,7	1850,9	1850,9	1851,0
varianta 2		1857,8	1852,7	1851,6	1851,6	1851,7
varianta 3		1857,8	384,2	0,0	0,0	0,0
varianta 1	O_2 [%]	10,9	10,9	10,9	10,9	10,9
varianta 2		10,9	10,9	10,9	10,9	10,9
varianta 3		10,9	10,8	10,7	10,7	10,7

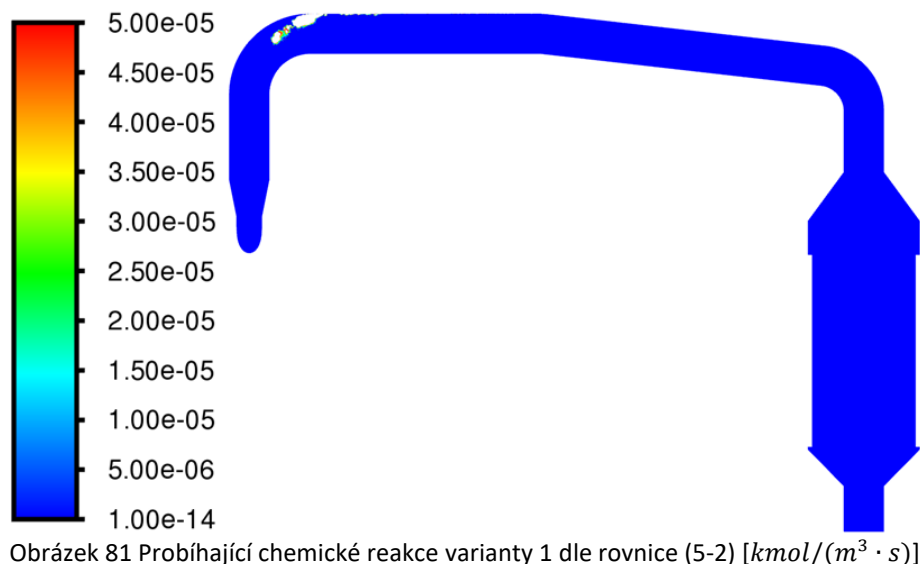
Výsledky poukazují na to, že je velice důležitá volba parametrů chemických reakcí. Nastavení těchto hodnot je v tabulce 42. První varianta opět obsahuje data z měření provedené ve výzkumu Chatterjee a spol. [111] [112] U těchto dat se očekává, že při jejich použití budou chemické rovnice fungovat a výsledky z výpočtu a experimentu si budou navzájem rovny. Druhá varianta je inspirována z výsledků získaných na submodelu, kde se nedospělo k příliš uspokojivým výsledkům, nicméně je vidět, že tam chemické reakce probíhají. Proto jsou zde zvoleny ještě extrémnější hodnoty než v předchozím případě, aby se dosáhlo požadovaných výstupních hodnot, jež mají být srovnatelné s měřením. Výsledky však nejsou stále odpovídající experimentu. To je způsobeno nevhodnou volbou (nepochopením rovnice (5-8)) zadávaných parametrů chemických rovnic. Aplikací správné logiky, jak volit jednotlivé hodnoty pro chemii, vznikla varianta 3. V té je vidět, že se zvolil velký pre-exponenciální faktor a malá aktivační energie. Čili podle rovnice (5-8) dojde při těchto vstupních datech pro chemii k velice rychlým reakcím, jež budou v podstatě

probíhat téměř instantně. Což, jak ukazují data v tabulce 41, opravdu platí, až do takové míry, že nestihne dojít ke všem reakcím.

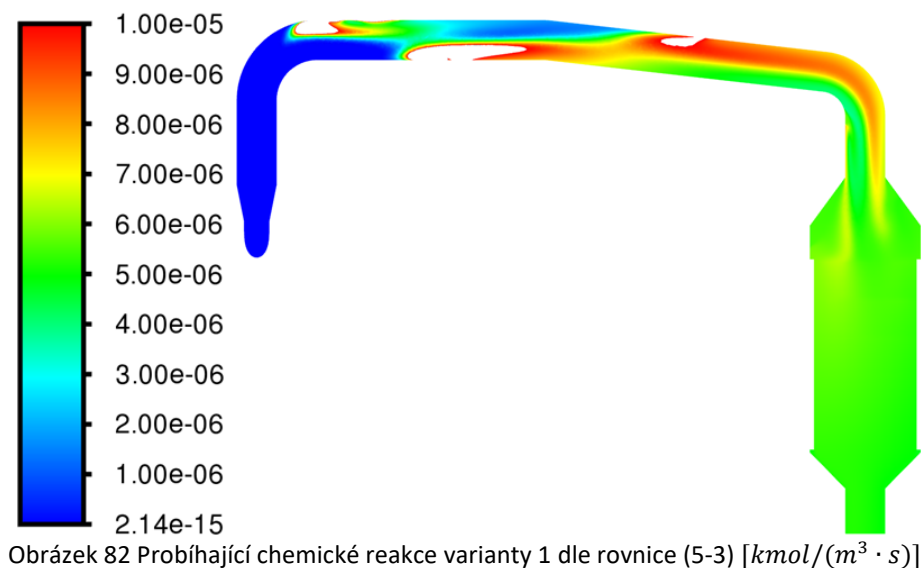
Tabulka 42 Hodnoty zadané do výpočtů systému „A“

-		A_r	E_r
varianta 1	rovnice (5-2)	1,00E+15	1000
varianta 2		10	10
varianta 3		1,00E+30	10
varianta 1	rovnice (5-3)	250000	6,22E+07
varianta 2		10	10
varianta 3		1,00E+30	10
varianta 1	rovnice (5-4)	3,32E+13	1,78E+08
varianta 2		10	10
varianta 3		1,00E+30	10
varianta 1	rovnice (5-5)	323,6	4,87E+07
varianta 2		10	10
varianta 3		1,00E+30	10
varianta 1	rovnice (5-6)	6478	3,10E+07
varianta 2		10	10
varianta 3		1,00E+30	10
varianta 1	rovnice (5-7)	5,33E+08	1,13E+08
varianta 2		10	10
varianta 3		1,00E+30	10

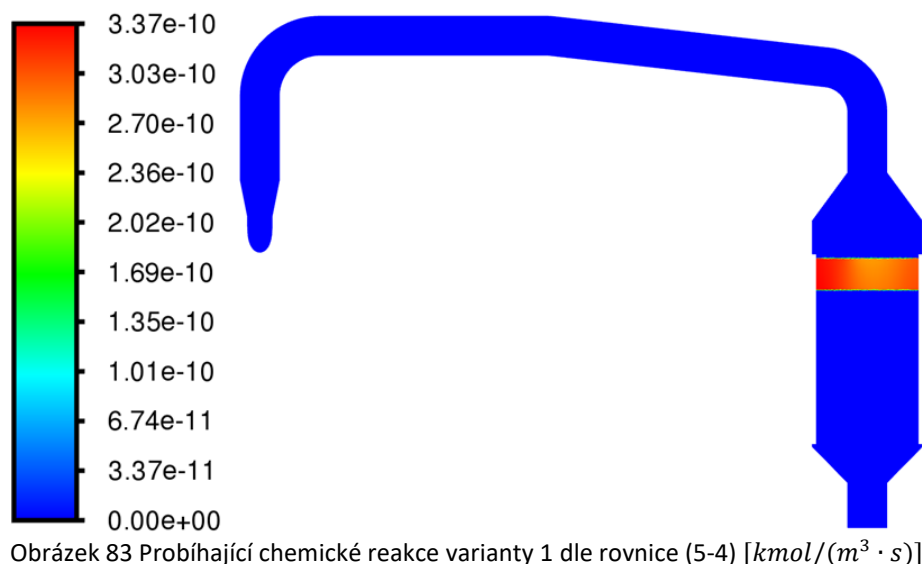
Obrázek 81 zachycuje řez středem katalyzátoru a zároveň středem přívodního potrubí, které obsahuje již vstříkované kapky. Obrázky 81 až 83 zobrazují proměnné „Kinetic Rate of Reaction“, což je proměnná, jež určuje, jak rychle která reakce v daném místě probíhá. Na první zmíněném obrázku je chemická reakce uvedená na řádku (5-2), čili první ze všech uvedených a je vidět, že rozpad močoviny na její dva produkty je velice intenzivní právě v části vstříku. Zároveň je zde vidět, že většina vstříkované tekutiny je tlačena na stěnu, což je způsobeno proudem spalin a velká část této tekutiny se přesouvá do kapalinového filmu v této části stěny.



Obrázek 82 zobrazuje reakci na řádku (5-3), tedy přeměnu kyseliny isokyanaté na amoniak a oxid uhličitý. Zde reakce probíhá již ve zbytku domény. Je však vidět, že tato reakce probíhá i za katalyzátorem, tzn. reakce není dostatečně rychlá. Produkty vzniklé za katalyzátorem jsou již nežádoucí, jelikož amoniak je další ze sledovaných emisí a vzniká únik amoniaku, který se má účastnit redukce NO_x . V případě třetí varianty dojde ke konverzi velice rychle a nedochází k obdobnému jevu jako na tomto obrázku, tzn. není nebezpečí úniku amoniaku.

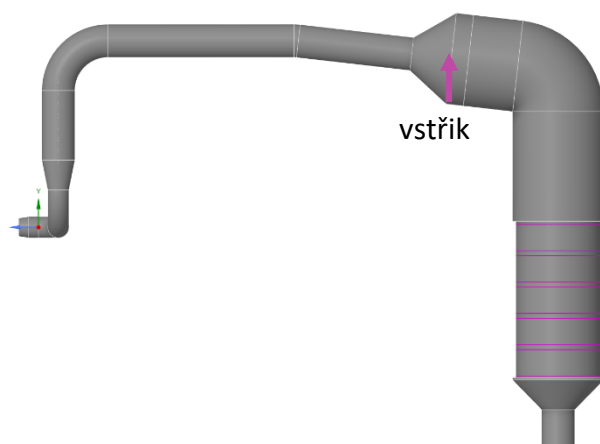


Poslední z uvedených výsledků zachycuje reakce na obrázku 83, jež odpovídá reakci na řádku (5-4). Obdobných výsledků se však dosáhne pro všechny ostatní reakce uvedené v kapitole 5.11.1, rozdíl je pouze ve škále. Je tedy vidět, že reakce probíhají pouze v katalyzátoru, což se děje i ve skutečném katalyzátoru. V případě třetí varianty dochází k tomu, že všechny reakce uvnitř katalyzátoru proběhnou velice rychle, a to hned v prvních několika buňkách první porézní zóny, jež reprezentují katalytickou vložku.



Potenciální problém při výpočtech systému „A“, který může mít negativní vliv na získané výsledky, je samotné chování SCR systému. Na obrázku 81 je vidět, že chemické reakce rozpadu močoviny jsou lokalizované pouze v jedné části modelu, což koresponduje s tím, jak se v proudu chovají vstřikované kapičky. Tyto kapičky jsou vrženy na stěnu, kde formují kapalinový film, který se neodpařuje, jelikož dochází k lokálnímu vychlazení. Velikost tohoto kapalinového filmu by při delším výpočtu, ačkoliv se jedná o stacionární zkonvergovaný výpočet, pravděpodobně dosáhla nad limitní výšku 500 [μm].

Aplikace chemie do základního systému „A“ ukázala funkčnost použitých nastavení. V dalším kroku se přistoupí k aplikaci vstřikování a chemie do nejlepší navržené geometrické úpravy „A“ v4, viz obrázek 84. Místo vstřiku vychází ze závěrů uvedených v kapitole 5.10.



Obrázek 84 Umístění vstřiku v modelu „A“ v4

Výsledky z výpočtů se vstřikováním pro systém „A“ a „A“ v4 jsou uvedené v tabulce 43. Nově uvedené výsledky jsou pouze koncentrace na vstupu do katalyzátoru a UI frakce $HNCO$. Obě tyto sledované hodnoty jsou v obou variantách totožné. Z těchto výsledků vychází, že varianta „A“ v4 je lepší z proudového hlediska.

Tabulka 43 Hodnoty výsledků proudění případové studie systému „A“

proměnná	plocha	varianta	
		„A“	„A“ v4
Tlak [Pa]	vstup - výstup	5375	5181
UI MYV AW [-]	z4	0,80	0,96
UI MYV MW [-]	z4	0,82	0,96
Ac/Aflow [-]	z4	1,00	1,00
Koncentrace DPM [kg/m ³]	z4	0,00	0,00
UI MWA Mean Mass Fraction HNCO (plyn) [-]	z4	1,00	1,00

Tyto dva výpočty jsou provedeny s chemickými rovnicemi. Výsledky obou simulací jsou uvedeny v tabulce 44. Nastavení chemických rovnic a jejich parametrů je v obou případech totožné. Hodnoty jsou nastavené podle varianty 3 v tabulce 42.

Na vstupu do katalyzátoru je ve variantě „A“ v4 větší množství N_2 , to je způsobeno intenzivnějším odpařováním vstřikovaného AdBlue®. Je to důsledek více reakcí rovnic (5-2) až (5-4), kdy z $HNCO$ vznikne více CO_2 a NH_3 a následně amoniak reaguje s kyslíkem za vzniku dusíku a vodní páry. Výsledné množství oxidů dusíku je v obou variantách stejné, jelikož v obou variantách se spotřebuje veškeré množství NO pomocí rovnic (5-5) a (5-6), a nezbyde dostatečné množství pro redukci NO_2 pomocí rovnice (5-7).

Tabulka 44 Hodnoty výsledků chemie případové studie systému „A“

-		vstup	int-1	int-2	int-3	výstup
„A“	$HNCO$ [ppm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
„A“ v4		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
„A“	N_2 [ppm]	0,0	193,1	243,6	244,0	244,6
„A“ v4		0,0	325,1	501,2	500,7	498,7
„A“	NH_3 [ppm]	0,0	60,9	0,0	0,0	0,0
„A“ v4		0,0	214,7	0,0	0,0	0,0
„A“	$CO(NH_2)_2$ [ppm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
„A“ v4		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
„A“	CO_2 [%]	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
„A“ v4		7,0	7,1	7,1	7,1	7,1
„A“	H_2O [%]	5,6	5,8	5,8	5,8	5,8
„A“ v4		5,6	5,8	5,9	5,9	5,9
„A“	NO_2 [ppm]	89,7	2339,4	2927,8	2927,6	2927,8
„A“ v4		89,7	1941,0	2927,7	2927,7	2927,5
„A“	NO [ppm]	1857,8	384,2	0,0	0,0	0,0
„A“ v4		1857,8	643,7	0,0	0,0	0,0
„A“	O_2 [%]	10,9	10,8	10,7	10,7	10,7
„A“ v4		10,9	10,7	10,7	10,7	10,7

Výsledky uvedené v této podkapitole ukazují, že je jednoznačně možné zahrnout i chemické procesy do CFD výpočtů. Tyto komplexní výpočty jsou časově náročnější, jelikož množství aplikovaných submodelů ve výpočtu je výpočetně náročné. Proto je doporučeno tyto komplexní výpočty dělat až jako poslední krok výzkumu. Je vidět, že redukční rovnice fungují, ačkoliv se nedosáhlo stejných výsledků, jako při použití doporučených hodnot z článků. Při aplikaci vhodných hodnot je vidět, že reakce probíhají, i když neodpovídají výsledkům z experimentu.

Komplexní výpočty v ANSYS Fluent jsou možné, jak ukazují výsledky v této kapitole, nicméně výsledky z nich jsou stále nejisté a je potřeba velice opatrného přístupu k nastavení výpočtů. V této kapitole se očekávalo, že dojde k nastavení konstant potřebných k chemickým reakcím podle dat získaných z experimentu. V tomto systému však dochází k nestabilitě výpočtů, neboli je zde problém v chování kapalinového filmu, který se zde formuje a je velice složité ho podchytit. Je možné nadále pracovat s různými čísly týkající se chemie. Jednalo by se o tvorbu velkého množství variant, kde by se měnily pre-exponenciálními faktory a aktivační energie jednotlivých chemických rovnic v nastavení modelu. Tento postup by dával smysl, kdyby byl potenciální zájem ze strany provozovatele SCR systému „A“, jelikož by se díky zjištění vhodných hodnot nastavil základní výpočet. Následně by se daly provádět zpřesňující výpočty (různé geometrické modifikace, vstřikovací místa atd.), čímž by se dalo dosáhnout vylepšení systému z komplexního hlediska.

6 Zhodnocení výzkumu

V této kapitole se uvedou kritickým pohledem dosažené výsledky, zanalyzuje se jejich relevance a proběhne diskuze o celkovém přínosu tohoto výzkumu. V průběhu této kapitoly se provede systematické zhodnocení výzkumu a postupů, které se zvolily, a proběhne diskuze o případných omezeních a výzvách, kterým tento výzkum čelil. Je snaha objektivně posoudit výsledky a identifikovat oblasti, kde lze dosavadní práci dále zdokonalit.

Dále zde proběhne reflexe relevance výsledků, s důrazem na to, jak práce přispívá k rozvoji a posuzování poznatků v dané oblasti. Očekává se, že tato kapitola poskytne ucelený pohled na výzkum, jehož cílem bylo nejen generovat nová data, ale také přispět k vědeckému poznání a zároveň ověřit funkčnost běžně používaného výpočetního programu.

Každá jednotlivá část výzkumu byla vždy uzavřena na konci dané kapitoly, či podkapitoly, zde uvedené informace pouze shrnují tyto již přednesené informace do uceleného celku, jež lokalizuje tato data na jedno místo a v co nejhustší formě.

6.1 Závěry výzkumu

V úvodní části jsou uvedené základní geometrické modely, jež odpovídají běžně navrhovanému rozložení SCR systémů z pohledu potrubního systému. Je zde uvedeno pět základních variant a několik rozšiřujících. Tyto varianty prošly analýzou pro zjištění stávajícího stavu a dospělo se k závěru, že pouze jeden jediný návrh odpovídá požadavkům na rozložení proudového pole před vstupem do katalyzátoru. Tento návrh je však svým způsobem anomálie, jelikož jakákoliv změna modelu negativně ovlivní tento pozitivní výsledek. Proto ani tento návrh nelze považovat za stabilní a bylo nezbytné provést vylepšení i této konstrukce.

První z variant (1.0), jež se modifikovala, je varianta s rovným potrubím, nesoucí název „straight“. Na této variantě bylo aplikováno velké množství modifikací bez valného úspěchu. Konstrukční změny nebyly zprvu prováděny příliš systematicky, avšak to se změnilo při aplikaci rozdílného úhlu kónusu, který spojuje vstup a vložku katalyzátoru. Z této části vyšlo najevo, že při úhlu 80° a více se dosahuje velice dobrých výsledků i při různých vstupních rychlostech, což zaručuje univerzální použitelnost. Druhý potenciální přístup, jak dosáhnout požadovaných hodnot, je zvětšení průměru potrubí před samotným katalyzátorem. Výsledky poukazují na to, že je potřeba zvětšit potrubí přibližně o 900 – 1200 [mm] před vložkou katalyzátoru, aby se dosáhlo žádoucích hodnot rozložení unášivé rychlosti.

Druhá řešená varianta je nazvaná „double knee“ (2.0). Jedná se o variantu se dvěma koleny. Tento konstrukční koncept je jedním z nejběžnějších rozložení, i když ne vždy dochází k takto symetrickému rozložení kolen a rovných částí. Základní varianta (2.0) dosahuje velice dobrých výsledků, což je způsobeno náhodně příznivou konfigurací,

kteřou naruší jakýkoliv, i malý zásah do modelu, tzn. úkolem zde bylo najít stabilní konstrukční řešení. Na této variantě (2.0) bylo aplikováno opět velké množství geometrických úprav. Tyto úpravy ukázaly obdobné výsledky jako v předchozím případě. Prodloužení kónusu, který v tomto případě má velice složitou geometrii, má pozitivní vliv na rozložení proudu před katalyzátorem. Avšak tato varianta (2.35) se vyhodnotila jako nevhodná, jelikož výroba takovéto geometrie není triviální, a tudíž by se jednalo o ekonomicky drahé řešení. Mnohem vhodnější přístup je opět pomocí rozšíření potrubí na velký průměr, jež odpovídá průměru katalyzátoru. V tomto případě se dosáhlo požadovaných hodnot u varianty (2.45) s nejdelším velkým potrubím. Délka potrubí o velkém průměru je přibližně 1810 [mm].

Varianta „long knee“ (3.0) je třetí řešený model v řadě. Jedná se o variantu s jedním kolenem a dvěma delšími rovnými potrubími. I v této variantě se ukázalo, že aplikace pomalu rozšiřujícího se kuželu, potažmo difuzoru, je velice dobrým způsobem zvýšení UI. Avšak opět je tato varianta (3.24) ze zřejmých důvodů ne zcela praktická. Proto je zde opět implementováno zvětšení průměru potrubí, což je taktéž velice efektivní způsob řešení. Na této geometrii jsou taktéž testovány různé délky rovného potrubí, pro zjištění vlivu změny tohoto prvku. Výsledky jednotlivých modifikací jsou takové, že „long knee lh2“ (3.27) má velké potrubí o délce 1560 [mm], „long knee lh str 5“ (3.43) má délku 1780 [mm] a nejkratší z nich „long knee lh krt 2“ (3.47) pouze 1310 [mm]. Poslední z uvedených modifikací má poměr rovných částí potrubí přibližně 1:2, přičemž delší strana je před samotným katalyzátorem a kratší před kolenem. Z výsledků uvedených výše je vidět, že je nezbytné, aby samotné koleno bylo velkého průměru, jelikož varianty s touto geometrií obecně dosahují lepších výsledků.

Další řešená varianta je „short knee“ (4.0), která má poměrně malou doménu, tzn. je poměrně komplikované upravit proudění. V této geometrii se opět dospělo k požadovaným hodnotám na vstupu do katalyzátoru při aplikaci změny průměru potrubí na stejný jako je průměr na vstupu do katalyzátoru, což je stejný princip jako u všech předchozích variant. Modifikace „short knee lh 1“ (4.3) je tedy nejlepší z navržených možností a délka potrubí velkého průměru je přibližně 910 [mm].

Poslední ze základních variant je varianta „tdm“ (5.0), jež je nejmenší ze všech uvedených geometrií, vychází z kontejnerového uspořádání kogenerační jednotky, tzn. není zde prostor pro delší potrubí, vše musí být kompaktní. I v tomto případě se navrhlo velké množství variant, nicméně nebylo možné ani v jednom případě dosáhnout požadovaných hodnot na systém. Neblíže se požadavkům na kvalitní proudění přiblížila varianta „tdm tupo bigst“ (5.9), která má část potrubí taktéž o velkém průměru. V tomto případě se nedosáhlo plně uspokojivého konstrukčního řešení.

Na základě předchozí varianty s dvěma koleny se vytvořila rozšiřující varianta „triple knee“ (6.0), kde se přidalo další koleno. Proběhl obdobný postup jako v předchozích variantách, kdy se aplikovala změna průměru na geometrii v několika variantách. Výsledek z této části je takový, že velký průměr potrubí není potřebný v celé délce potrubí, ale stačí pouze dvě poslední kolena před katalyzátorem (6.5) tak, jak je to ve variantě „double knee“ (2.45).

Ne každý SCR systém má pouze dvě nebo tři kolena, proto se přidalo ještě jedno. Dosáhlo se opět stejného výsledku jako u třech a dvou kolen, tzn. stačí mít o velkém průměru pouze poslední dvě kolena, aby byly splněny požadavky na proudění. Všechny dosavadní modifikace jsou však pouze v ploše, a proto jsou vytvořeny i modifikace, kdy geometrie je více ve třech rozměrech. Výsledky z této části studie poukazují na to, že směr natočení kolen má vliv na rovnoměrnost proudění a již nelze jednoduše říci, že stačí pouze dvě poslední kolena o velkém průměru. V těchto případech již záleží i na charakteru vstupního profilu rychlosti a směru zahnutí kolen.

Další výzkum se okrajově zabýval potenciálními vestavbami v potrubí. Tato část výpočtů probíhala v době, kdy nejlepší varianta byla „double knee cone“ (2.35), takže tyto vestavby byly aplikovány právě v této geometrické modifikaci. Výsledky z této části výpočtů jsou takové, že žádné z připravených modifikací nejsou dostatečně dobré na to, aby stály za další výzkum a aplikaci do modelů. Důvod je ten, že vestavby, které byly vyzkoušeny, nepřinesly výrazné zlepšení proudové situace. Rozhodně by však výrazně zvýšily složitost potrubí, což není z ekonomického pohledu výhodné. Vzhledem k rešeršní práci, která na toto téma proběhla je vidět, že každý SCR systém potřebuje individuální přístup k návrhu vnitřních vestaveb, proto nelze obecně doporučit žádnou z počítaných variant.

Předchozí výsledky ukázaly, že pro zlepšení potrubního systému před SCR katalyzátorem poslouží změna průměru potrubí, aby odpovídal rozměrům vstupního dílu do katalyzátoru. V rámci původního SCR systému typu „A“ bylo zjištěno, že dosažení požadovaného rozložení proudu na vstupu do katalytické vložky vyžaduje pouze potrubí o délce přibližně 980 [mm] a o velkém průměru.

Další částí výzkumu bylo vyzkoušení funkčnosti vstřikování kapiček AdBlue® do modelu a zároveň funkce vypařování těchto kapiček, jelikož v SCR procesu se jedná o jeho nezbytnou součást. Výsledky výpočtů jsou porovnány s experimenty a závěr je takový, že modely v ANSYS Fluent jsou funkční a důvěryhodné. Na základě těchto znalostí se přistoupilo k aplikaci vstřikování do všech základních geometrií v modifikacích, kde se dosahuje nejlepších hodnot proudění. Tyto varianty jsou výše zmíněny, obecně se jedná o modifikace s přídomkem „lh“. Navrhlo se velké množství variant, s různým typem chování kapiček na stěně. V tomto případě je cílem rovnoměrná distribuce odpařené fáze močoviny a co nejmenší množství kapiček, které se lokálně nehromadí na vstupu do katalyzátoru. Obecné doporučení, na základě získaných dat v tomto případě, je umístění trysky na vnitřních nebo vnější stranách kolen, co nejdále od samotného katalyzátoru. Směr proudu vstřikované kapaliny by měl být proti směru předpokládaného proudění, případně kolmo do proudu. Je však potřeba zároveň přihlídnout k samotné konstrukci, aby vstřikovaný proud nebyl usměrněn rovnou na stěnu.

Aplikace chemických rovnic do CFD je možná, jak ukazují výsledky výše. Je však problematické správné nastavení vstupních dat pro jednotlivé chemické reakce, jelikož každý experiment odpovídá katalyzátoru, na kterém je prováděn. To je vidět na výsledcích při použití pre-exponenciálních faktorů a aktivačních energií z článků. Výzkum v této oblasti má však hodně otevřený konec, nedospělo se k jednoznačným číselným

výsledkům, které by odpovídaly provedenému experimentu. Výzkum zde pouze ukazuje na skutečnost, že lze výpočty provádět. Tzv. „nafitování“ výpočtů (nastavení výsledných hodnot výpočtu na hodnoty získané z experimentu) na experiment by znamenalo obrovské množství výpočetního času, jelikož by bylo potřeba měnit hodnoty 8 veličin (potažmo 12), jež se navzájem ovlivňují, což není triviální záležitost.

6.2 Přínos výzkumu

Metodologie hodnocení navržených geometrických variant použitá v kapitolách 5.4.1 až 5.4.7 je unikátní zejména ve využití několika faktorů najednou. Během výzkumu byla snaha sloučit několik sledovaných ukazatelů do jednoho jediného čísla, avšak to se ukázalo jako nemožné. V průběhu práce na výzkumu se zkoušelo využít rozložení rychlostí na sledovaném řezu pomocí histogramů s proměnnou rychlostí (ať už celkovou, nebo unášivou), nebo využití box plotů s týmiž proměnnými, avšak ani jedno se neukázalo jako funkční. Předložená metodologie, kdy se používá UI, poměry ploch a zároveň se porovnávají tlaky (zde je potřeba mít buď dané požadované hodnoty, nebo mít referenční variantu) je unikátním přístupem, který se ukázal v tomto případě jako funkční a je vysoce doporučený při dalších výpočtech, ať už v SCR systémech, tak i v jakýchkoliv dalších CFD výpočtech.

Možnost využití chemických rovnic týkající se SCR technologie je v ANSYS Fluent i přes nedoporučení samotných vývojářů/dodavatelů tohoto programu velkým úspěchem. Ačkoliv není výzkum v této části zcela dokončený, a to především pro nedostatek experimentálních dat, je jednoznačně vidět, že to je možné a lze tyto výpočty v závěrečné fázi prováděných studií běžně aplikovat do výpočtů. Jedná se o výpočty s víceukrokovými chemickými pochody, které nejsou zcela běžné. Na tyto výpočty je většinou doporučovaný program od společnosti ANSYS Chemkin, avšak ten není potřeba, jelikož lze rovnice potřebné pro simulaci SCR procesu aplikovat rovnou do výpočetního programu ANSYS Fluent.

Hlavním přínosem tohoto výzkumu jsou však závěry z konstrukčních modifikací, jež jsou uvedeny zejména v kapitolách 5.4.1 až 5.4.7. Závěry o tom, že je potřeba použít větší průměr potrubí, odpovídající průměru samotného katalyzátoru, jsou aplikovatelné nejen na vylepšení stávajících SCR systémů, ale mohou zejména sloužit pro nově navrhované systémy. Jedná se hlavně o případy, kdy kogenerační jednotky jsou již v provozu bez SCR technologie, a nově budou tuto technologii k provozu potřebovat, jinak by nesplňovaly emisní limity. Tyto přídavné SCR technologie se stávají více a více běžnými zejména v zahraničí, kde jsou kogenerační jednotky v provozu již několik desítek let a přísnější normy se na ně začínají taktéž vztahovat.

6.3 Výhled do budoucna

Tato kapitola slouží k nastínění dalšího potenciálního výzkumu v návaznosti na řešené téma a předložené výsledky. Na základně dosažených výsledků a analýzy

současného stavu je zde snaha identifikovat nevyřešené otázky a výzvy, které by bylo vhodné doplnit v rámci tohoto tématu. Je zde nabídnutý pohled do budoucnosti a návrh na možný směr pro další zdokonalení navrhovaných úprav a vylepšení SCR systémů.

Pro další postup je zásadní realizovat experimenty, které by validovaly teoretické výpočty provedené v této fázi. Kladně by byl ovlivněn zejména výzkum dopadů různých geometrických úprav na rozložení proudu na vstupu do katalyzátoru. Takový přístup by nejen potvrdil dosavadní výsledky, ale také by sloužil jako ověření správnosti zvolené metodiky pro hodnocení vhodných variant. Tím by byl zajištěn důkladný a komplexní pohled na problematiku, založený na kombinaci teoretických predikcí a praktických pozorování, což by přispělo k robustnosti a relevanci celkového výzkumu.

Navazujíc na doporučení ohledně vstřikovacích míst, je vhodné podniknout další experimenty, které by potvrdily výše popsané doporučení. Tyto experimenty by měly rovněž sloužit k ověření správnosti modelů, které popisují interakce kapiček s povrchem. Cílem by mělo být nejen potvrzení funkcionality těchto modelů, ale také ověření platnosti dosavadních závěrů týkajících se tohoto specifického aspektu.

Další možností rozvinutí zkoumané problematiky je závěrečná část práce, chemie. V této oblasti se dosáhlo zjištění, že ANSYS Fluent je schopný počítat i simulace chemických procesů, avšak nastavení je značně složité. Dalším krokem výzkumu by mohlo být navržení vývojového diagramu, který by upravoval jednotlivé pre-exponenciální faktory a aktivační energie aplikovaných chemických rovnic. To je komplikovaná záležitost, jelikož se tyto veličiny mezi sebou prolínají, jak ukazují výše získané výsledky. Následovala by implementace této logiky do ANSYS Fluent, buď pomocí uživatelsky definovaných funkcí, nebo pomocí programovacího jazyku Scheme či Python. Při použití výsledků z experimentů by se dal pomocí tohoto programu nastavit model chemického procesu pro daný katalyzátor, což by dalo základ pro další možné modifikace, čímž by se usnadnil celkový vývoj nových variant.

7 Závěr

Úvod práce obsahuje obecné informace týkající se ovzduší. Jsou zde osvětleny důvody, proč je důležité se tomuto tématu věnovat a jaký potenciální vliv kvalita ovzduší může mít na živé organismy. Zajímavé je, že dokonale čisté prostředí bez emisí, jak je aktuálně chápeme, nikdy na Zemi neexistovalo, jelikož částice prachu a další případné malé částice jsou všudypřítomné jak nyní, tak i historicky.

Následuje popis emisí a jak se mění limity v průběhu času, jelikož je stále větší a větší politický tlak na minimalizaci jakéhokoliv znečišťování ovzduší lidským přičiněním. Mluví se zde o zařízeních, které mají za úkol redukovat množství výstupních tuhých znečišťujících látek různých průmyslových, či energetických celků. Kapitola je zakončena další částí věnovanou emisím, a to konkrétně oxidům dusíku, které jsou obdobně problematické a jejichž vypouštění do ovzduší je taktéž nepřijatelné.

Navazující kapitola se okrajově věnuje provedené výzkumné činnosti v rámci čištění spalin při použití látkových a elektrických filtrů. Největší částí práce se pak věnuje zejména SCR systémům, jejich geometrickým úpravám a dalším aspektům, jež jsou s tímto tématem provázány. A to z důvodu aktuálnosti daného tématu a značnému potenciálu pro zlepšení.

Po krátkém úvodu do čištění spalin je přednesen obecný úvod mechaniky tekutin, jež je základem pro numerické CFD výpočty. Tato kapitola představuje zároveň i několik používaných modelů, jež jsou aplikované dále v textu v uvedených výpočtech. Stejně tak je zde uveden běžně používaný parametr pro hodnocení SCR systému – index jednotvárnosti.

SCR systémy jsou ve své podstatě velice efektivní a dokážou pracovat tak, že redukují veškeré přichozí emise. Problém nastává v obecné implementaci této technologie do reálných zařízení, která jsou běžně zatížena složitými potrubními systémy. Tvar potrubí narušuje rovnoměrné proudění před katalyzátory, jež jsou navrhovány na dokonale rovnoměrné vstupní podmínky. To je tématem řešení převážné části této práce. Usilovalo se o vytvoření obecně aplikovatelného přístupu, jak navrhnout potrubní systém před katalyzátorem tak, aby se zaručila maximální rovnoměrnost proudění. Je běžné, že katalyzátory jsou v části své plochy přetížené a zároveň částečně nevytížené (lokalita se mění, jelikož při velkém zatížení dochází k usazování meziproduktů z AdBlue® a následným ucpáváním katalyzátoru, čímž se poté změní i samotné proudění). Výsledky geometrických modifikací jsou následně implementovány do základních variant, které jsou vytipované na základě rešeršní práce týkající se běžně používaných geometrických rozložení SCR systémů.

Následující text, po zvolení nejlepších modifikací jednotlivých variant, z pohledu proudění se věnuje aplikaci vstřikování směsi močoviny a vody do těchto modelů. V této části je na začátku ověřena funkčnost použitého modelu na submodelu, a to porovnáním s experimentem. Vstupní údaje pro vstřiky jsou zadávány do výpočtů z experimentů, jež jsou provedeny na použité trysce. Tato kapitola si dala za cíl vyhodnotit obecně

doporučitelná místa, kde použít vstřikování AdBlue®. Bylo použito několik modelů chování kapiček na stěnách a provedlo se zhodnocení jednotlivých přístupů na základě odborného článku věnující se aplikaci nejnovějších možností ve výpočetním programu ANSYS Fluent. V rámci kapitoly se provedlo vyhodnocení jednotlivých výpočtů a dospělo se k několika obecně doporučitelným krokům, jak nejhodněji zvolit místo pro vstřikování AdBlue®.

Poslední část výzkumu je věnována implementaci chemických rovnic do modelu. Chemie v CFD není při simulacích čištění spalin běžnou záležitostí, jelikož se většinou řeší problémy z širšího hlediska. Vzhledem k dynamickému vývoji softwaru a hardwaru je stále častější a běžnější používat pro simulace komplexnější modely, což je zároveň i požadováno. Je potřeba tyto přístupy znát a ovládat. V této části jsou do modelu aplikovány nejběžnější chemické rovnice týkající se SCR systémů. Kapitola poukazuje na to, že je možné tento přístup již poměrně jednoduše a rychle implementovat do běžných výpočtů. Nicméně je však stále problematické vhodně zvolit parametry a konstanty potřebné do chemických rovnic.

Prvním z cílů disertační práce bylo provést simulace na jejichž základě by bylo možné navrhnout obecně doporučitelné úpravy potrubního systému před SCR katalyzátory pro zajištění jejich maximálního potenciálu. Tohoto cíle je dosaženo, jelikož se zjistilo, že pro zlepšení proudové situace stačí jednoduchý zásah do geometrie, který je obecně aplikovatelný na různé typy potrubí.

Druhým cílem bylo identifikovat na různých geometriích, zda jsou některá místa pro vstřikování DEF vhodnější než jiná. V tomto případě se taktéž dosáhlo vytyčeného cíle, jelikož výsledky poukazují na to, že skutečně existují místa obecně doporučitelná.

Třetím a poslední cílem, který si tato práce dala za úkol prozkoumat, je možnost tvorby komplexního modelu SCR systému vytvořeného v programu ANSYS Fluent. Tohoto cíle je dosaženo v poslední části zabývající se výzkumem. Na základě výsledků je vidět, že tyto simulace je možné provést, nicméně je velice komplikované zvolit parametry pro chemické reakce. Použití odborných článků nevede k uspokojivým výsledkům. Očekávalo se, že na základě provedených simulací by bylo vhodné vytvořit experiment pro ověření získaných dat. Nicméně po provedení výzkumu je potřeba přeformulovat tuto hypotézu. Experiment je stále potřeba provést, avšak na jeho základě je teprve možné vytvořit funkční výpočet. Přenesení dat z jiných experimentů není možné, jelikož veškerá data potřebná pro chemické rovnice jsou pravděpodobně vždy jednoznačně specifická pro jeden řešený katalyzátor. Je nezbytné uvažovat fakt, že každý katalyzátor (pokud se nejedná o sériovou výrobu) může být jedinečný. Tato část výzkumu má otevřený konec, jelikož je možné v tomto výzkumu nadále pokračovat.

Časový horizont tohoto výzkumu je několik let zpětně, což je v oblasti výpočtů dlouhý časový úsek, vzhledem k dynamickému vývoji softwarů a hardwaru. Za zmínku stojí kromě toho, co se týká tohoto textu, i „boom“ použití SPH výpočtů na grafických kartách. Tyto výpočty jsou mnohonásobně rychlejší a výsledky jsou srovnatelné s klasickým přístupem RANS, nicméně jejich oblasti využití se zcela nepřekrývají, takže oba typy výpočtů najdou své uplatnění. Dále je možné taktéž počítat některé výpočty v ANSYS

Fluent na grafických kartách, oproti klasickému přístupu výpočtů na procesorech. Zde jsou však velká omezení, jelikož je potřeba upravit většinu kódů samotného programu. Je tedy jen otázkou několika let, kdy se přejde pouze na výpočty na grafických kartách, jež jsou mnohonásobně rychlejší. Tento trend by znamenal, že nejpomalejší část CFD výpočtů bude práce člověka, jež bude připravovat geometrii a síť.

V této práci se dosáhlo několika zajímavých poznatků ohledně efektivních metod, které mají za potenciál výrazně ovlivnit snižování emisí. Výsledky nabízejí praktický směr pro inovativní přístup v průmyslu. Tato disertační práce může sloužit jako inspirace pro další výzkumné úsilí, které přinese prospěch udržitelnému rozvoji a ochraně našeho životního prostředí.

8 Bibliografie

- [1] OBROUČKA, Karel. *Látky znečišťující ovzduší*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. ISBN 80-248-0011-x.
- [2] online. In: Ministerstvo životního prostředí. © 2008–2023. Dostupné z: <https://www.mzp.cz/cz/ovzdusi>. [cit. 2023-05-31].
- [3] online. In: *Zákony pro lidi: Sbírka zákonů ČR v aktuálním konsolidovaném znění*. AION CS, s.r.o, © 2010–2023. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>. [cit. 2023-06-30].
- [4] online. In: Ministerstvo průmyslu a obchodu. 2023. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/aktuality/metodika---minimalni-pozadavky-na-emisni-limity-dle-urovni-emisi-spojonych-s-nejlepsimi-dostupnymi-technikami-pro-velka-spalovaci-zarizeni---243833/>. [cit. 2023-06-01].
- [5] online. In: Portál ČHMÚ : Home. 2022. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/info/limity_CZ.html. [cit. 2023-06-01].
- [6] online. In: *Zákony pro lidi: Sbírka zákonů ČR v aktuálním konsolidovaném znění*. © 2010-2023. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>. [cit. 2023-06-01].
- [7] HEMERKA, Jiří. *Odlučování tuhých částic*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN isbn80-01-02270-6.
- [8] online. In: Skupina ČEZ. 2023. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/odlucivost.html>. [cit. 2023-06-01].
- [9] online. In: Úvod | ZVVZ GROUP, a.s. ZVVZ, a.s., 2023. Dostupné z: <https://www.zvvz.cz/produkty-a-sluzby/odlucovani-a-filtrace/latkove-filtry.html>. [cit. 2023-06-01].
- [10] QI, Yin; MAN-YIN, Hu; JING, Zhang a WEN-LONG, Hou. Computer Simulation of Air Flow Distribution Characteristics in Inner Filtering Fabric Filters. online. In: *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*. IEEE, 2009, s. 419-423. ISBN 978-0-7695-3507-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CSIE.2009.309>. [cit. 2023-06-02].

- [11] ROCHA, Sandra; VIEIRA, Luiz; AGUIAR, Mônica a DAMASCENO, João. Fluid Dynamics Study of the Influence of the Position of the Feed in Fabric Filters. online. In: *10th International Symposium on Process Systems Engineering: Part A. Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, 2009, s. 1083-1088. ISBN 9780444534729. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70401-8](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70401-8). [cit. 2023-06-02].
- [12] ROCHA, S.M.S.; MARQUES, F.B.; PEREIRA, F.A.R. a RIBEIRO, D.C. Applications of CFD Techniques in the Design of Fabric Filters. online. *Chemical Engineering Transaction*. 2014, č. 39, s. 1369-137. ISSN 2283-9216. Dostupné z: <https://doi.org/10.3303/CET1439229>. [cit. 2023-06-02].
- [13] PEREIRA, Thomas; MARQUES, Felipe; PEREIRA, Fábio; RIBEIRO, Daniel a ROCHA, Sandra. The influence of the fabric filter layout of in a flow mass filtrate. online. *Journal of Cleaner Production*. 2016, roč. 111, s. 117-124. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.070>. [cit. 2023-06-02].
- [14] ROCHA, Sandra; VIEIRA, Luiz; AGUIAR, M.L. a DAMASCENO, João. Fluid Dynamics Study of the Influence of Direction of the Gas Flow in Fabric Filter. online. *Materials Science Forum*. 2010, roč. 660-661, s. 520-524. ISSN 1662-9752. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.660-661.520>. [cit. 2023-06-02].
- [15] online. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Corona_discharge. [cit. 2023-06-01].
- [16] online. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_precipitator. [cit. 2023-06-01].
- [17] online. In: Úvod | ZVVZ GROUP, a.s. GROUP, ZVVZ., 2023. Dostupné z: https://www.zvvz.cz/data/files/133/197katalog_elektricke_odlucovace_cz_web_strany.pdf. [cit. 2023-06-01].
- [18] FENG, Zhuangbo; ZHENGWEI, Long a ADAMIĄK, Kazimierz. A CRITICAL REVIEW OF MODELS USED IN NUMERICAL SIMULATION OF ELECTROSTATIC PRECIPITATORS. online. *Informatics Control Measurement in Economy and Environment Protection*. 2016, roč. 6, č. 4, s. 9-17. ISSN 2083-0157. Dostupné z: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0009.5182>. [cit. 2023-06-02].
- [19] BHASKER, C. Flow simulation in Electro-Static-Precipitator (ESP) ducts with turning vanes. online. *Advances in Engineering Software*. 2011, roč. 42,

- č. 7, s. 501-512. ISSN 09659978. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.advensoft.2011.04.002>. [cit. 2023-06-02].
- [20] HOU, Q.; GUO, B.Y.; LI, L.F. a YU, A. NUMERICAL SIMULATION OF GAS FLOW IN AN ELECTROSTATIC PRECIPITATOR. online. *Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. 2009, s. 6. Dostupné z: https://www.cfd.com.au/cfd_conf09/PDFs/207HOU.pdf. [cit. 2023-06-02].
- [21] SWAMINATHA, M.R. a MAHALAKSHM, N.V. Numerical Modelling of Flow through Perforated Plates Applied to Electrostatic Precipitator. online. *Journal of Applied Sciences*. 2010, roč. 10, č. 20, s. 2426-2432. ISSN 18125654. Dostupné z: <https://doi.org/10.3923/jas.2010.2426.2432>. [cit. 2023-06-02].
- [22] HAQUE, S.; RASUL, M.; DEEV, A.; KHAN, M. a ZHOU, J. The influence of flow distribution on the performance improvement of electrostatic precipitator. online. *ICESP*. 2006, č. , s. 10. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228849355_The_influence_of_flow_distribution_on_the_performance_improvement_of_electrostatic_precipitator. [cit. 2023-06-02].
- [23] JĘDRUSIK, Maria. Physical and numerical modelling of gas flow in electrostatic precipitator. online. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*. 2017, roč. 1, č. 2, s. 230-233. ISSN 0033-2097. Dostupné z: <https://doi.org/10.15199/48.2017.02.50>. [cit. 2023-06-02].
- [24] SULOVCOVA, Katarina; NOSEK, Radovan; JANDACKA, Jozef a HOLUBCIK, Michal. Geometrical Optimization of the Flue Gas Path with Regard to the Reduction of Particulate Matter. online. *Emission Control Science and Technology*. 2018, roč. 4, č. 1, s. 40-44. ISSN 2199-3629. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40825-018-0084-8>. [cit. 2023-06-02].
- [25] DU, Zhenyu. A Numerical Simulation for Predicting Influence of Flow Pattern in Electrostatic Precipitations on Dust Loading Centers. online. In: *2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. IEEE, 2009, s. 1-4. ISBN 978-1-4244-2901-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2009.5162226>. [cit. 2023-06-02].
- [26] online. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Catalytic_converter. [cit. 2023-07-13].
- [27] online. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023. Dostupné z:

- https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_catalytic_reduction. [cit. 2023-07-13].
- [28] online. In: Marinersgalaxy: maritime world at one place. © 2013–2023. Dostupné z: <https://marinersgalaxy.com/selective-catalytic-reduction-scr-unit-for-a-marine-propulsion-diesel-engine/>. [cit. 2023-07-16].
- [29] THARAD, Vijay. *Selective Catalytic Reduction (Nox) Emission Control Technology*. online. In: LinkedIn. 2023. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/selective-catalytic-reduction-nox-emission-control-vijay-tharad>. [cit. 2023-07-16].
- [30] ZHU, Yuanqing; ZHOU, Weihao; XIA, Chong a HOU, Qichen. Application and Development of Selective Catalytic Reduction Technology for Marine Low-Speed Diesel Engine: Trade-Off among High Sulfur Fuel, High Thermal Efficiency, and Low Pollution Emission. online. *Atmosphere*. 2022, roč. 13, č. 5. ISSN 2073-4433. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/atmos13050731>. [cit. 2023-07-16].
- [31] online. In: Welcome to FCAR Tech USA: FCAR Tech USA. USA. Dostupné z: <https://www.fcarusa.com/TechSupport/KB/scr-def-dpf-egr>. [cit. 2023-07-16].
- [32] online. In: Ship Technology: Shipping News. 2023. Dostupné z: <https://www.ship-technology.com/uncategorized/newsk-line-japan-marine-and-daihatsu-diesel-start-scr-system-tests-on-new-container-vessel/>. [cit. 2023-07-16].
- [33] online. In: CleanAirBlue. ClearAirBlue®, 2021. Dostupné z: <https://cleanairblue.com/scr-technology/>. [cit. 2023-07-16].
- [34] online. In: Your partner in SCR, catalyst: NOx treatment technology. Deutschland. Dostupné z: <https://huhes.de/application-areas/marine-nox-reduction/>. [cit. 2023-07-16].
- [35] online. In: Emissions & Silencer Technology. Emissions & Silencer Technology. Dostupné z: <http://www.emissionsandsilencers.com/silencer-and-converters/scr.html>. [cit. 2023-07-16].
- [36] online. In: BLUNOX A/S: Next generation NOx Reduction. Denmark. Dostupné z: <https://www.blunox.com/home/scr-system/system-overview.html>. [cit. 2023-07-16].
- [37] online. In: Marine Insight: The Maritime Industry Guide. Marine Insight, 2023. Dostupné z: <https://www.marineinsight.com/maritime->

- law/imo-mepc-66-nox-regulations-arguments-scr-technology/. [cit. 2023-07-16].
- [38] online. In: TEDOM - kogenerace, fotovoltaika, služby v energetice. TEDOM a.s. Dostupné z: <https://www.tedom.com/cs/aktuality/tedom-flexi-s-nizkymi-emisemi/>. [cit. 2023-07-16].
- [39] KAZDA, Jakub. *Selektivní katalytická redukce*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Michal Volf. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2019.
- [40] online. In: YANMAR. YANMAR HOLDINGS CO., LTD. Dostupné z: https://www.yanmar.com/global/about/technology/technical_review/2017/1005_4.html. [cit. 2023-07-16].
- [41] online. In: IndiaMART: Indian Manufacturers Suppliers Exporters Directory, India Exporter Manufacturer. India: IndiaMART InterMESH Ltd., © 1996-2023. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/selective-catalytic-reduction-10683297197.html>. [cit. 2023-06-01].
- [42] COBB, David; GLATCH, Lisa; RUUD, John a SNYDER, Scott. Application of selective catalytic reduction (SCR) technology for NOx reduction from refinery combustion sources. online. *Environmental Progress*. 1991, roč. 10, č. 1, s. 49-59. ISSN 02784491. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ep.670100116>. [cit. 2023-06-01].
- [43] online. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_catalytic_reduction. [cit. 2023-06-01].
- [44] online. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/AdBlue>. [cit. 2023-06-01].
- [45] STEIN, Marcus; BYKOV, Viatcheslav a MAAS, Ulrich. The Effect of Evaporation Models on Urea Decomposition from Urea-Water-Solution Droplets in SCR Conditions. online. *Emission Control Science and Technology*. 2017, roč. 3, č. 4, s. 263-274. ISSN 2199-3629. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40825-017-0075-1>. [cit. 2023-06-01].
- [46] XIAO, Y.; TIAN, X.; ZHOU, P. a ZHANG, W. Study on evaporation and decomposition process of urea water solution in selective catalytic reduction system. online. *Materials Research Innovations*. 2014, roč. 18, č. 2, s. 2-908-2-913. ISSN 1432-8917. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000533>. [cit. 2023-06-01].

- [47] LI, Mao; YAN, Hongjie a ZHOU, Jiemin. Numerical Simulation and Optimization of Flow Field in the SCR Denitrification System. online. In: *2009 International Conference on Energy and Environment Technology*. IEEE, 2009, s. 415-418. ISBN 978-0-7695-3819-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICEET.2009.565>. [cit. 2023-06-02].
- [48] MI, Jia; PITSKO, Dan a HASKEW, Tim. CFD Applications on Selective Catalytic NOx Reduction (SCR) Systems. online. In: *Volume 1: Fora, Parts A, B, C, and D*. ASME/ED, 2003, s. 2139-2146. ISBN 0-7918-3696-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/FEDSM2003-45436>. [cit. 2023-06-02].
- [49] HONG, Wen; DING, Hao a HUANG, Yue. Numerical Simulation and Optimization of the Flow Field in the SCR System. online. *Advanced Materials Research*. 2013, roč. 860-863, s. 1464-1469. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.1464>. [cit. 2023-06-02].
- [50] MEHDI, Ghazanfar; ZHOU, Song; ZHU, Yuanqing; HUSSAIN, Shafquat a HUSSAIN, Arif. A CFD analysis of static mixer to study its impacts on SCR performance in marine diesel engine. online. In: *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. IEEE, 2019, s. 1-6. ISBN 978-1-5386-9509-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICOMET.2019.8673421>. [cit. 2023-06-02].
- [51] TAN, Ligang; FENG, Pengfei; YANG, Shubao; GUO, Yage; LIU, Shaochun et al. CFD studies on effects of SCR mixers on the performance of urea conversion and mixing of the reducing agent. online. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2018, roč. 123, s. 82-88. ISSN 02552701. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.11.003>. [cit. 2023-06-02].
- [52] XU, Zhengxin; LIU, Jingping a FU, Jianqin. Experimental investigation on the urea injection and mixing module for improving the performance of urea-SCR in diesel engines. online. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2018, roč. 96, č. 6, s. 1417-1429. ISSN 00084034. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/cjce.23082>. [cit. 2023-06-02].
- [53] QU, Litao; LI, Chao; HE, Fengyuan; QI, Xiaohui; YU, Honghai et al. Study on Flow Field Optimization of SCR Denitrification Reactor Based on CFD Numerical Simulation Technology. online. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, roč. 242. ISSN 1755-1315. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/242/4/042009>. [cit. 2023-06-02].
- [54] MEHDI, Ghazanfar; ZHOU, Song; ZHU, Yuanqing; SHAH, Ahmer a CHAND, Kishore. Numerical Investigation of SCR Mixer Design Optimization

- for Improved Performance. online. *Processes*. 2019, roč. 7, č. 3. ISSN 2227-9717. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/pr7030168>. [cit. 2023-06-02].
- [55] KURZYDYM, Damian; KLIMANEK, Adam a ŻMUDKA, Zbigniew. Experimental research and CFD analysis of flow parameters in a SCR system for the original part and WALKER's replacement. online. *Combustion Engines*. 2019, roč. 179, č. 4, s. 13-20. ISSN 2300-9896. Dostupné z: <https://doi.org/10.19206/CE-2019-402>. [cit. 2023-06-02].
- [56] HOLTZ, Dorian; GIEROW, Conrad; BANK, Robert; KADAU, Dirk a SOPPELSA, Flavio. CFD simulation of particle deposition in exhaust gas treatment systems. online. In: SIEBENPFEIFFER, Wolfgang (ed.); SIEBENPFEIFFER, Wolfgang. *Heavy-Duty-, On- und Off-Highway-Motoren 2019*. Proceedings. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, s. 69-82. ISBN 978-3-658-31370-8. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-658-31371-5_6. [cit. 2023-06-02].
- [57] SMITH, Henrik; LAUER, Thomas; SCHIMIK, Viktor a GABEL, Klaus. Evaluation and Prediction of Deposit Severity in SCR Systems. online. *SAE International Journal of Engines*. 2016, roč. 9, č. 3, s. 1735-1750. ISSN 1946-3944. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0970>. [cit. 2023-06-02].
- [58] DE RUDDER, Korneel. Tier 4 High Efficiency SCR for Agricultural Applications. online. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*. 2012, roč. 5, č. 1, s. 386-394. ISSN 1946-3928. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2012-01-1087>. [cit. 2023-06-02].
- [59] XU, Lifeng; WATKINS, William; SNOW, Rachel; GRAHAM, George; MCCABE, Robert et al. Laboratory and Engine Study of Urea-Related Deposits in Diesel Urea-SCR After-Treatment Systems. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2007-01-1582>. [cit. 2023-06-02].
- [60] SCHABER, Peter; COLSON, James; HIGGINS, Steven; THIELEN, Daniel; ANSPACH, Bill et al. Thermal decomposition (pyrolysis) of urea in an open reaction vessel. online. *Thermochimica Acta*. 2004, roč. 424, č. 1-2, s. 131-142. ISSN 00406031. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2004.05.018>. [cit. 2023-06-02].
- [61] SCHABER, Peter; COLSON, J.; HIGGINS, S.; DIETZ, E.; THIELEN, D. et al. Study of the urea thermal decomposition (pyrolysis) reaction and importance to cyanuric acid production. online. *American Laboratory*. 1999, roč. 16, č. 31, s. 13-21. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283950273_Study_of_the_ure

- a_thermal_decomposition_pyrolysis_reaction_and_importance_to_cyanuric_acid_production. [cit. 2023-06-02].
- [62] BRACK, Wolfgang; HEINE, Barbara; BIRKHOLD, Felix; KRUSE, Matthias; SCHOCH, Günter et al. Kinetic modeling of urea decomposition based on systematic thermogravimetric analyses of urea and its most important by-products. online. *Chemical Engineering Science*. 2014, roč. 106, s. 1-8. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.11.013>. [cit. 2023-06-02].
- [63] YAO, Jie; ZHONG, Zhaoping a ZHU, Lin. Porous Medium Model in Computational Fluid Dynamics Simulation of a Honeycombed SCR DeNOx Catalyst. online. *Chemical Engineering & Technology*. 2015, roč. 38, č. 2, s. 283-290. ISSN 09307516. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ceat.201400127>. [cit. 2023-06-02].
- [64] SHIN, Sang; SKAU, Karl; MENON, Mohan; MAROOR, Sreekumar a SPATENKA, Stepan. A modelling approach to kinetics study and novel monolith channel design for selective catalytic reduction (SCR) applications. online. *Chemical Engineering Research and Design*. 2019, roč. 142, s. 412-428. ISSN 02638762. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.12.029>. [cit. 2023-06-02].
- [65] BALETA, Jakov; MARTINJAK, Matija; VUJANOVIĆ, Milan; PACHLER, Klaus; WANG, Jin et al. Numerical analysis of ammonia homogenization for selective catalytic reduction application. online. *Journal of Environmental Management*. 2017, roč. 203, s. 1047-1061. ISSN 03014797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.103>. [cit. 2023-06-02].
- [66] KIM, Joo; RYU, Seung a HA, Ji. Numerical Prediction on the Characteristics of Spray-Induced Mixing and Thermal Decomposition of Urea Solution in SCR System. online. In: *ASME 2004 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*. ASMEDC, 2004, s. 165-170. ISBN 0-7918-3746-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/ICEF2004-0889>. [cit. 2023-06-02].
- [67] UM, Hyung; KIM, Daehee a KIM, Keon. Numerical study on the design of urea decomposition chamber in LP SCR system. online. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2019, roč. 11, č. 1, s. 307-313. ISSN 20926782. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.06.005>. [cit. 2023-06-02].
- [68] ABU-RAMADAN, Ehab; SAHA, Kaushik a LI, Xianguo. Modeling of the Injection and Decomposition Processes of Urea-Water-Solution Spray in

- Automotive SCR Systems. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1317>. [cit. 2023-06-02].
- [69] WANG, Tae; BAEK, Seung; LEE, Seung; KANG, Dae a YEO, Gwon. Experimental investigation on evaporation of urea-water-solution droplet for SCR applications. online. *AIChE Journal*. 2009, roč. 55, č. 12, s. 3267-3276. ISSN 00011541. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/aic.11939>. [cit. 2023-06-02].
- [70] BIRK HOLD, Felix; MEINGAST, Ulrich; WASSERMANN, Peter a DEUTSCHMANN, Olaf. Modeling and simulation of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNOx-systems. online. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2007, roč. 70, č. 1-4, s. 119-127. ISSN 09263373. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2005.12.035>. [cit. 2023-06-02].
- [71] BIRK HOLD, Felix; MEINGAST, Ulrich; WASSERMANN, Peter a DEUTSCHMANN, Olaf. Analysis of the Injection of Urea-Water-Solution for Automotive SCR DeNOx-Systems: Modeling of Two-Phase Flow and Spray/Wall-Interaction. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2006-01-0643>. [cit. 2023-06-02].
- [72] BLINOV, A.; MALASTOWSKI, N. a BYKOV, A. Performance Evaluation of Static Mixers in the Urea Injection Pipe for SCR Systems. online. In: RADIONOV, Andrey A.; KRAVCHENKO, Oleg A.; GUZEEV, Victor I. a ROZHDESTVENSKIY, Yuriy V. (ed.); RADIONOV, Andrey; KRAVCHENKO, Oleg; GUZEEV, Victor; ROZHDESTVENSKIY, Yuriy. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 1465-1473. ISBN 978-3-030-22062-4. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_154. [cit. 2023-06-02].
- [73] MUNNANNUR, Achuth a LIU, Z. Development and Validation of a Predictive Model for DEF Injection and Urea Decomposition in Mobile SCR DeNOx Systems. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2010-01-0889>. [cit. 2023-06-02].
- [74] DRENNAN, Scott; KUMAR, Gaurav; QUAN, Shaoping a WANG, Mingjie. Application of Automatic Meshing to Urea-Water Injection Simulation for Engine Aftertreatment. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1057>. [cit. 2023-06-02].
- [75] WARDANA, Muhammad; SHAHARIAR, G.; OH, Kwangchul a LIM, Ocktaeck. Ammonia Uniformity to Predict NOx Reduction Efficiency in an SCR System. online. *International Journal of Automotive Technology*. 2019,

- roč. 20, č. 2, s. 313-325. ISSN 1229-9138. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0031-x>. [cit. 2023-06-02].
- [76] LUO, Zhaoyu; SUKHESWALLA, Parvez; DRENNAN, Scott; WANG, Mingjie a SENECAL, P. 3D Numerical Simulations of Selective Catalytic Reduction of NO_x With Detailed Surface Chemistry. online. In: *Volume 2: Emissions Control Systems; Instrumentation, Controls, and Hybrids; Numerical Simulation; Engine Design and Mechanical Development*. American Society of Mechanical Engineers, 2017, s. -. ISBN 978-0-7918-5832-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/ICEF2017-3658>. [cit. 2023-06-02].
- [77] LEE, Changhee. Numerical and experimental investigation of evaporation and mixture uniformity of urea–water solution in selective catalytic reduction system. online. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018, roč. 60, s. 210-224. ISSN 13619209. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.015>. [cit. 2023-06-02].
- [78] ZHANG, Chaofeng; SUN, Chuan; WU, Meiping a LU, Kai. Optimisation design of SCR mixer for improving deposit performance at low temperatures. online. *Fuel*. 2019, roč. 237, s. 465-474. ISSN 00162361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.025>. [cit. 2023-06-02].
- [79] GAO, Xiang; WANG, Ben; YUAN, Xudong; LEI, Siyuan; QU, Qinggong et al. Optimal design of selective catalyst reduction denitrification system using numerical simulation. online. *Journal of Environmental Management*. 2019, roč. 231, s. 909-918. ISSN 03014797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.060>. [cit. 2023-06-02].
- [80] BÖRNHORST, M.; KUNTZ, C.; TISCHER, S. a DEUTSCHMANN, O. Urea derived deposits in diesel exhaust gas after-treatment: Integration of urea decomposition kinetics into a CFD simulation. online. *Chemical Engineering Science*. 2020, roč. 211. ISSN 00092509. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115319>. [cit. 2023-06-02].
- [81] SADASHIVA PRABHU, S; NAYAK, Nagaraj; KAPILAN, N a HINDASAGERI, Vijaykumar. An experimental and numerical study on effects of exhaust gas temperature and flow rate on deposit formation in Urea-Selective Catalytic Reduction (SCR) system of modern automobiles. online. *Applied Thermal Engineering*. 2017, roč. 111, s. 1211-1231. ISSN 13594311. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.134>. [cit. 2023-06-02].
- [82] SAMPATH, Manoj a LACIN, Figen. CFD Study of Sensitivity Parameters in SCR NO_x Reduction Modeling. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2014-01-2346>. [cit. 2023-06-02].

- [83] NIWA, Akihiro; SAKATANI, Shogo; MATSUMURA, Eriko a KITAMURA, Takaaki. Prediction of Spray Behavior in Injected by Urea SCR Injector and the Reaction Products. online. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*. 2017, roč. 10, č. 3, s. 2017-01-2375. ISSN 1946-3960. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2017-01-2375>. [cit. 2023-06-02].
- [84] KOEBEL, Manfred a STRUTZ, Ernst. Thermal and Hydrolytic Decomposition of Urea for Automotive Selective Catalytic Reduction Systems: Thermochemical and Practical Aspects. online. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2003, roč. 42, č. 10, s. 2093-2100. ISSN 0888-5885. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ie020950o>. [cit. 2023-06-02].
- [85] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. online. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1913-6. [cit. 2022-04-26].
- [86] JOHNSON, Richard W. *The handbook of fluid dynamics*. Second edition. Editor Richard W. JOHNSON. Boca Raton: CRC Press, 2016. ISBN 0849325099.
- [87] DAVIDSON, Peter. *Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers*. kniha. Second edition. Oxford University Press, 2015. ISBN 9780198722588. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198722588.001.0001>. [cit. 2024-01-01].
- [88] Ansys Fluent Theory Guide. 2023 R1. Canonsburg PA: ANSYS, Inc., 2023. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>. [cit. 2024-01-11].
- [89] PŘÍHODA, Jaromír a LOUDA, Petr. *Matematické modelování turbulentního proudění*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03623-5.
- [90] BLEJCHAŘ, Tomáš. *Turbulence modelového proudění - CFX: učební text*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2606-6.
- [91] RUMSEY, Christopher. *The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model*. online. In: NASA. 2023. Dostupné z: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>. [cit. 2023-07-28].
- [92] NABER, J. a REITZ, R. Modeling Engine Spray/Wall Impingement. online. *JOURNAL OF ENGINES*. 1988, č. 97, s. 23. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/44547362>. [cit. 2023-08-03].

- [93] online. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Leidenfrost_effect. [cit. 2023-08-03].
- [94] O'ROURKE, P.J. a AMSDEN, A. A Particle Numerical Model for Wall Film Dynamics in Port-Injected Engines. online. In: *Journal of Engines*. 1996, s. -. ISSN 0148-7191. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/961961>. [cit. 2023-08-04].
- [95] BAI, Chuanxin; LIU, Kai; ZHAO, Tong a LIU, Jinjin. Numerical Investigation of the Heat Transfer Characteristics and Wall Film Formation of Spray Impingement in SCR Systems. online. *Applied Sciences*. 2023, roč. 13, č. 9. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app13095353>. [cit. 2023-08-04].
- [96] WELTENS, Herman; BRESSLER, Harald; TERRES, Frank; NEUMAIER, Hubert a RAMMOSER, Detlev. Optimisation of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/930780>. [cit. 2023-08-21].
- [97] SUN, Ke; ZHAO, Haiyang; ZHAO, Kui; LI, Da a BAI, Shuzhan. Optimization of SCR inflow uniformity based on CFD simulation. online. *Open Physics*. 2020, roč. 18, č. 1, s. 1168-1177. ISSN 2391-5471. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/phys-2020-0221>. [cit. 2023-08-21].
- [98] BRESSLER, H.; RAMMOSER, D.; NEUMAIER, H. a TERRES, F. Experimental and Predictive Investigation of a Close Coupled Catalytic Converter with Pulsating Flow. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/960564>. [cit. 2023-08-21].
- [99] LU, Kai; LIU, Dewen; WU, Yan; LIU, Shusen a BAI, Shuzhan. A study on the high-efficiency mixer of the SCR system. online. *Mechanics & Industry*. 2021, roč. 22. ISSN 2257-7777. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/meca/2020101>. [cit. 2023-08-21].
- [100] MCKINLEY, Thomas; ALLEYNE, Andrew a LEE, Chia-Fon. Mixture Non-Uniformity in SCR Systems: Modeling and Uniformity Index Requirements for Steady-State and Transient Operation. online. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*. 2010, roč. 3, č. 1, s. 486-499. ISSN 1946-3960. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2010-01-0883>. [cit. 2023-08-21].
- [101] CAPETILLO, Azael; IBARRA, Fernando; STEPNIIEWSKI, Dominik a VANKAN, Jo. Multiphase Modelling of SCR Systems: Using the Taguchi Method for Mixer Optimisation. online. *SAE International Journal of Engines*. 2017, roč. 10, č. 1, s. 61-71. ISSN 1946-3944. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2017-26-0113>. [cit. 2023-08-21].

- [102] VEDAGIRI, Praveena; MARTIN, Leenus a VARUVEL, Edwin. Characterization of urea SCR using Taguchi technique and computational methods. online. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021, roč. 28, č. 10, s. 11988-11999. ISSN 0944-1344. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08743-y>. [cit. 2023-08-21].
- [103] GIRARD, James; LACIN, Figen; HASS, Charles a HODONSKY, Joseph. Flow Uniformity Optimization for Diesel Aftertreatment Systems. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2006-01-1092>. [cit. 2023-08-21].
- [104] JOHANSSON, Åsa; WALLIN, Ulf; KARLSSON, Mikael; ISAKSSON, Annika a BUSH, Phillip. Investigation on Uniformity Indices Used for Diesel Exhaust Aftertreatment Systems. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2008-01-0613>. [cit. 2023-08-21].
- [105] KURZYDYM, Damian; KLIMANEK, Adam a ŽMUDKA, Zbigniew. Experimental research and CFD analysis of flow parameters in a SCR system for the original part and WALKER's replacement. online. *Combustion Engines*. 2019, roč. 179, č. 4, s. 13-20. ISSN 2300-9896. Dostupné z: <https://doi.org/10.19206/CE-2019-402>. [cit. 2023-08-21].
- [106] DUMONT, Brian a MUDRY, Robert. Computational Fluid Dynamic Modeling of Electrostatic Precipitators. online. In: *8th International Conference on Electrostatic Precipitation*. Alabama, USA, 2001, s. 26. Dostupné z: <https://www.airflowsciences.com/sites/default/files/docs/ASC-paper-for-ep2003.pdf>. [cit. 2023-08-22].
- [107] NOVÁK, Martin a MATAS, Richard. Numerical simulation of flue gas in selective catalytic reduction system. online. In: . s. 040003-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0041560>. [cit. 2023-09-26].
- [108] NOVÁK, Martin; MATAS, Richard a SEDLÁČEK, Jan. Numerical simulations of droplet evaporation in a SCR system submodel with hot air flow. online. In: . s. 020016-. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.5138628>. [cit. 2023-11-29].
- [109] PACANOWSKY, Alex. *What is Selective Catalytic Reduction?*. online. In: *Powerblanket Industrial Heating Blankets*. 2023. Dostupné z: https://www.powerblanket.com/blog/what-is-selective-catalytic-reduction/#History_of_SCR. [cit. 2023-12-14].
- [110] CHATTERJEE, Daniel; DEUTSCHMANN, Olaf a WARNATZ, Jürgen. Detailed surface reaction mechanism in a three-way catalyst. online. *Faraday Discussions*. roč. 119, č. 1, s. 371-384. ISSN 13596640. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/b101968f>. [cit. 2023-12-13].

- [111] CHATTERJEE, Daniel; BURKHARDT, Thomas; BANDL-KONRAD, Brigitte; BRAUN, Tillmann; TRONCONI, Enrico et al. Numerical Simulation of Ammonia SCR-Catalytic Converters: Model Development and Application. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2005-01-0965>. [cit. 2023-12-10].
- [112] CHATTERJEE, Daniel; BURKHARDT, Thomas; WEIBEL, Michel; NOVA, Isabella; GROSSALE, Antonio et al. Numerical Simulation of Zeolite- and V-Based SCR Catalytic Converters. online. In: . s. -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2007-01-1136>. [cit. 2023-12-10].
- [113] Chemkin-Pro Getting Started Guide. 2023 R1. Canonsburg PA: ANSYS, Inc., 2023. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>. [cit. 2024-01-11].

Autorovy publikace a aktivity

Relevantní výzkum k disertační práci

Autor je součástí výzkumného týmu, který se zabývá experimentální mechanikou tekutin a CFD v kooperaci s mnoha partnery z průmyslu a dalších výzkumných organizací zabývajících se separací a čištěním spalin. Zároveň se zúčastnil krátkodobé stáže v rámci Erasmus+ v Německu, kde proběhl experiment použitý v disertační práci. Během stáže na University of Oulu probíhaly práce na výzkumném tématu k disertační práci.

NOVÁK, Martin; MATAS, Richard; VACKOVÁ, M.; FRANK, J.; VOLF, M. et al. Numerical Simulations in Selective Catalytic Reduction Systems with an Emphasis on Injection Location. Online. MATEC Web of Conferences. 2023, roč. 383. ISSN 2261-236X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202338300017>. [cit. 2024-01-05].

NOVÁK, M. MATAS, R. Numerical Simulations in SCR systems with Emphasis on Uniform Flow at the Catalyst Inlet. In *21st Conference on Power System Engineering*. Plzeň: EDP Sciences, 2022. s. nestránkováno. ISBN: nevedeno , ISSN: 2261-236X

NOVÁK, M. MATAS, R. Numerical Simulation of Flue Gas in Selective Catalytic Reduction System. In *19th Conference on Power System Engineering*. Melville: AIP Conference Proceedings, 2021. s. nestránkováno. ISBN: 978-0-7354-4067-8 , ISSN: 0094-243X

MATAS, R. NOVÁK, M. KŇOUREK, J. Numerical Simulations of Flow in Electrostatic Precipitators. In *MATEC Web Conf. Volume 328, 2020 XXII. International Scientific Conference – The Application of Experimental and Numerical Methods in Fluid Mechanics and Energy 2020 (AEaNMiFMaE-2020)*. Piešťany: MATEC Web of Conferences, 2020. s. NESTRÁNKOVÁNO. ISBN: nevedeno , ISSN: 2261-236X

NOVÁK, M. MATAS, R. SEDLÁČEK, J. Numerical simulations of droplet evaporation in a SCR system submodel with hot air flow. In *AIP Conference Proceedings 2189*. Spojené státy americké: Západočeská univerzita v Plzni, Katedra energetických strojů a zařízení, 2019. s. NESTRÁNKOVÁNO. ISBN: 978-0-7354-1936-0 , ISSN: nevedeno

NOVÁK, M. MATAS, R. SEDLÁČEK, J. Numerical simulations of flue gas flow in a first stage filter with top inlet - Modifications of the inlet chamber inserts. In *36th Meeting of Departments of Fluid Mechanics and Thermodynamics*. MELVILLE, NY 11747-4501 US: AIP Conference Proceedings, 2017. s. nestránkováno. ISBN: 978-0-7354-1572-0 , ISSN: 0094-243X

Ostatní aktivity

KŇOUREK, J. MATAS, R. NOVÁK, M. *Simulace vícefázového proudění v potrubním systému projektu 027*. Metrostav DIZ s.r.o., 2022.

KŇOUREK, J. MATAS, R. NOVÁK, M. *Simulace vícefázového proudění v potrubním systému projektu 590*. ČEZ, a.s., 2022.

RAŠPL, R. ŠUCH, J. MATAS, R. SYKA, T. NOVÁK, M. *Ověřená technologie rychloběžného labyrintu*. 2020.

KŇOUREK, J. MATAS, R. NOVÁK, M. KŮS, M. *Analýza proudového a teplotního pole 123*. ZVVZ-Even Engineering, a.s., 2019.

KŇOUREK, J. MATAS, R. NOVÁK, M. *Analýza vícefázového proudového pole 394*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2019.

MATAS, R. NOVÁK, M. *CFD simulace segmentu redukčního štěrbinového ventilu*. 2018.

NOVÁK, M. MATAS, R. *Numerická simulace mikroturbíny pro ORC cyklus*. 2017.

Příloha č. 1

Emisní limity pro spalovací stacionární zdroje jsou popsány ve vyhlášce 415/2012 Sb. Specifické emisní limity jsou v této vyhlášce definovány podle druhu použitého paliva a zároveň i podle výkonu tepelného zdroje. S ohledem ke specifickému zaměření tohoto textu jsou zde vypsány limity přehledově pouze pro oxidy dusíku, jelikož to je hlavním řešeným tématem této práce. Ačkoliv samotné koncentrace nejsou aktuálně důležité, pro samotný výzkum, je potřeba uvést do kontextu požadované hodnoty a jejich vývoj v čase.

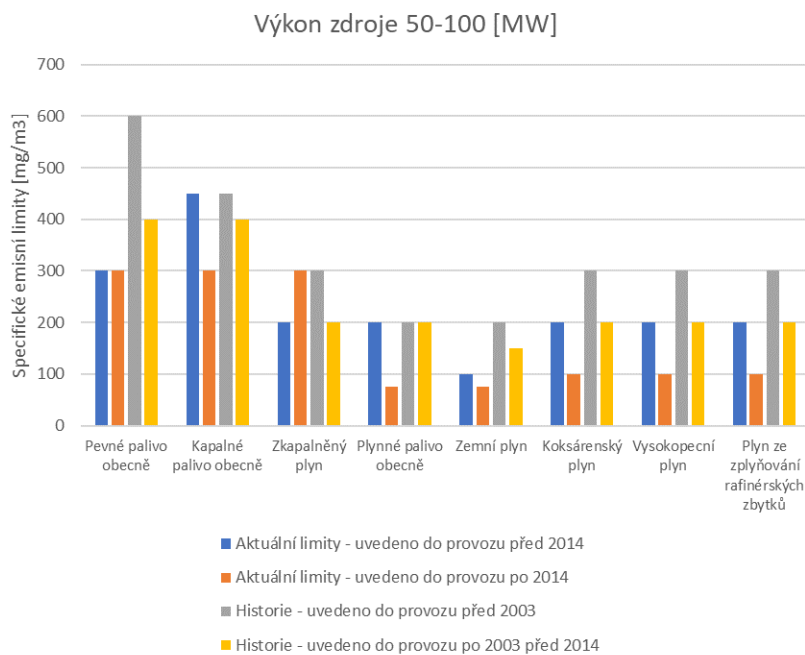
„Specifické emisní limity jsou vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu 6 % v případě pevných paliv a 3 % v případě kapalných a plyných paliv.“ [3]

„Specifické emisní limity pro plynové turbíny a pístové spalovací motory jsou vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu 15 % a nevztahují se na záložní zdroje energie provozované méně než 300 provozních hodin ročně. Specifické emisní limity pro plynové turbíny se uplatní pouze na provozní stavy, při kterých je překročeno 70 % instalovaného tepelného příkonu. Plynovým motorem se rozumí motor s vnitřním spalováním pracující na principu Ottova cyklu a využívající zážehové zapalování paliva nebo v případě dvoupalivového motoru využívající vznětové zapalování paliva.“ [3]

Obrázky P 1, P 2 a P 3 zachycují specifické emisní limity NO_x , každý z nich obsahuje čtyři sady dat, které jsou rozděleny podle časových úseků jejich platnosti. Aktuálně jsou limity rozděleny podle toho, kdy byl daný tepelný zdroj uvedený do provozu, zda to bylo před 7.1.2014 nebo později. Historicky se uvažoval mezní termín uvedení do provozu 27.11.2003. Jednotlivé obrázky jsou dle zákona rozděleny podle výkonu tepelného zdroje do třech kategorií. Menší zdroje, které se začínají více a více vyskytovat jsou uvedené dále v textu. [3]

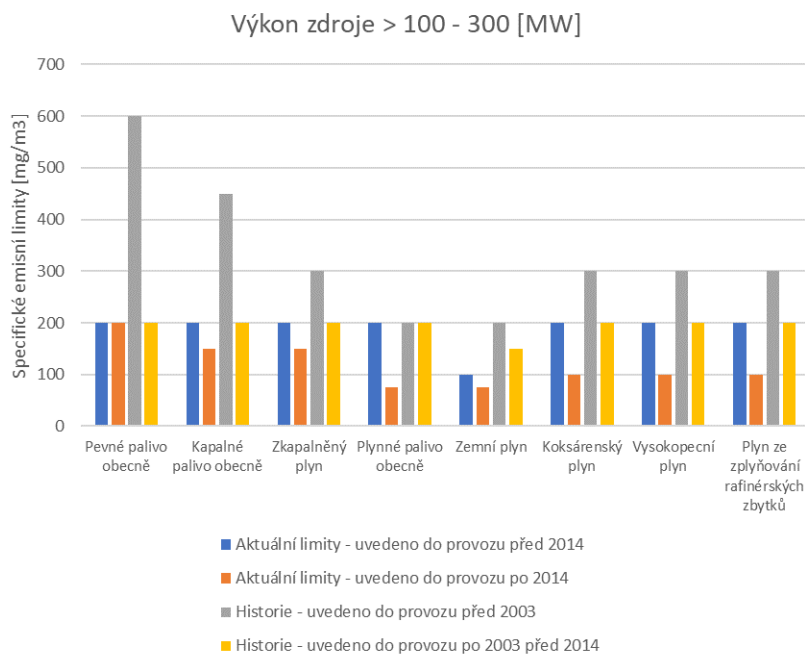
Osvědčení o akreditaci je vyžadováno u metod a postupů pro měření emisí. Kupříkladu stanovení hmotnostní koncentrace tuhých znečišťujících látek je nezbytné zajistit pomocí metody gravimetrie. To, které jednotlivé metody je nezbytné použít, je stanoveno v příloze č. 1 vyhlášky č. 415/2012 Sb. Zde je zároveň uvedeno, že pro stanovení hmotnostní koncentrace plyných znečišťujících látek je potřeba zajistit automatizovanými analyzátory pomocí spektroskopie, nebo chemiluminiscence. [3]

Emisní limity pro tepelný výkon zdroje 50 – 100 [MW] jsou na obrázku P 1. Je vidět jednoznačný trend snižování limitů. Jedinou výjimku tvoří zkapalněný plyn, kde došlo k dovolenému zvýšení maximálního limitu NO_x . Nicméně při nahlédnutí do vyhlášky je možné zjistit, že platí bližší specifikace a tento limit pro zařízení uvedené do provozu před rokem 2014 je variabilní a záleží na jejich výkonu a době provozu za rok, s čímž se u zařízení na zkapalněný plyn uvedených do provozu po roce 2014 nepočítá. [3]



Obrázek P 1 Specifické emisní limity pro výkon zdroje 50 – 100 [MW] [3]

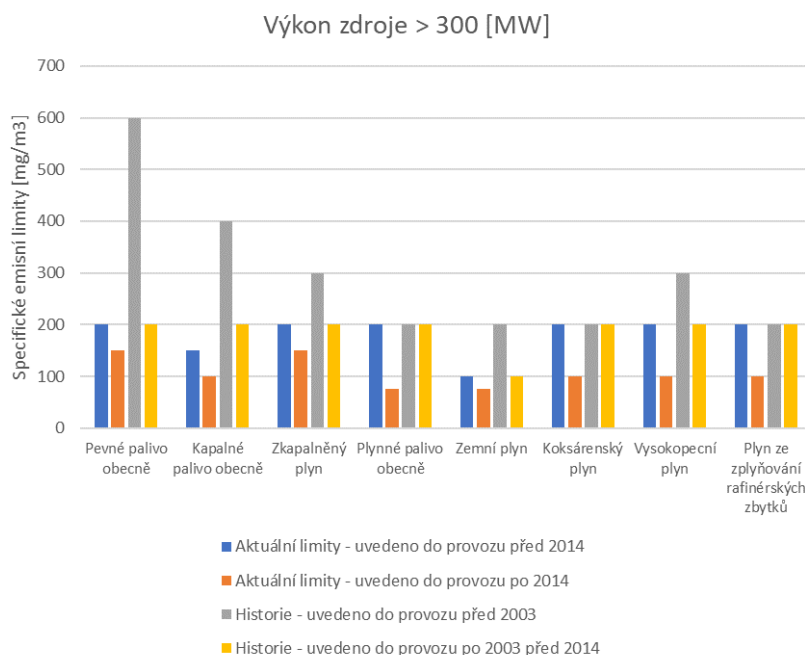
Tepelné zdroje o výkonu mezi 100 a 300 [MW] a jejich emisní limity jsou přehledně zobrazeny na obrázku P 2. Je vidět že historicky byly dovolené oxidy dusíku na násobně vyšší, než jsou nyní například u plynných či kapalných paliv. Je zároveň vidět trend snižování dovolených limitů a dá se očekávat, že v budoucnu dojde k dalšímu poklesu.



Obrázek P 2 Specifické emisní limity pro výkon zdroje > 100 - 300 [MW] [3]

Emisní limity pro zdroje o výkonech vyšší než 300 [MW] jsou zobrazeny na obrázku P 3. Trend je v tomto případě stejný jako u výkonu nižší třídy. Rozdíl je však patrný historicky u koksárenského plynu a plynu ze zplyňování rafinérských zbytků, kdy zde při

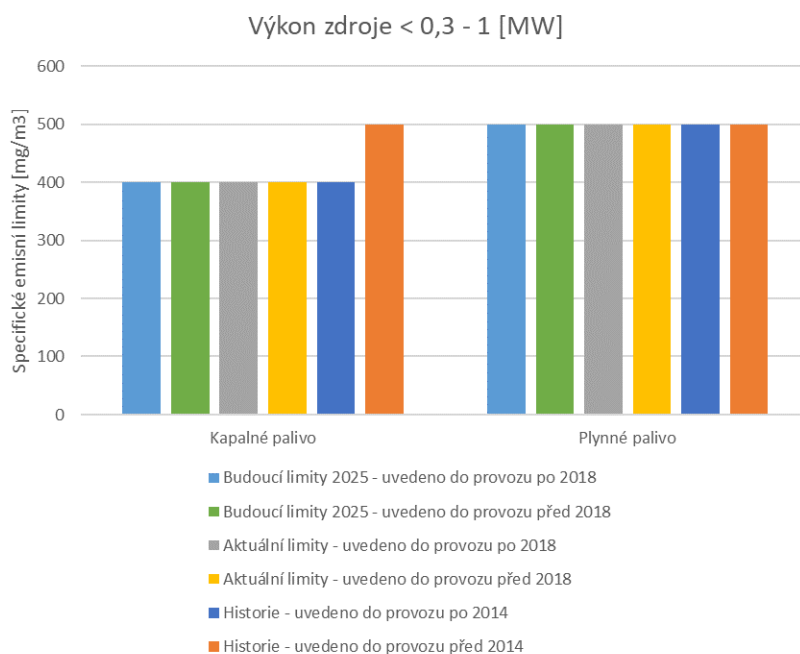
vyšších výkonech byly požadovány nižší hodnoty. Bližší informace lze nalézt ve vyhlášce č. 415/2012 Sb. [3]



Obrázek P 3 Specifické emisní limity pro výkon zdroje > 300 [MW] [3]

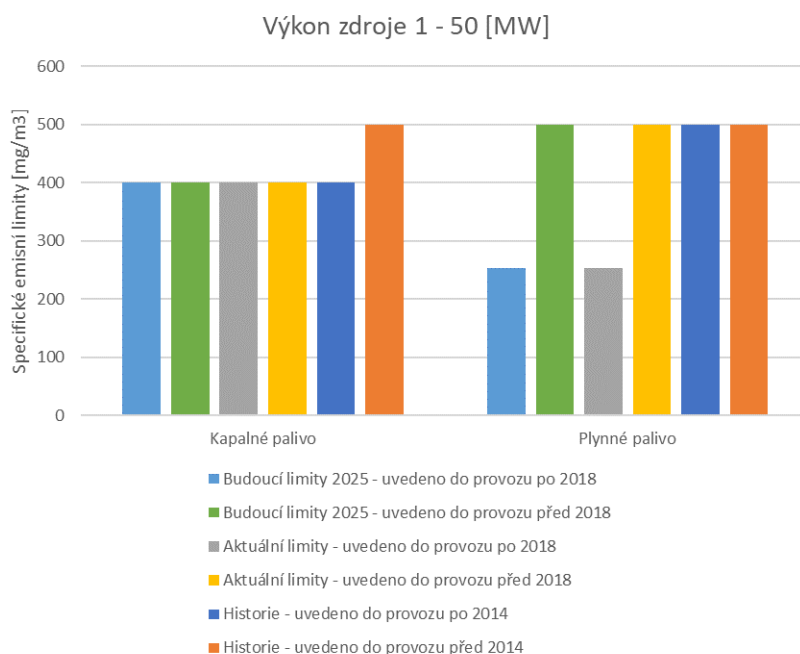
Emisní limity pro menší zdroje o výkonech mezi 0,3 [MW] a 50 [MW] jsou rozděleny podle vyhlášky 415/2012 Sb. do třech kategorií výkonů a zároveň jsou rozděleny podle typu energetického zdroje – plynové turbíny, pístové motory, kotle a teplovzdušné spalovací stacionární zdroje. Následující text se bude zabývat pouze pístovými motory, které jsou běžně používány u kogeneračních jednotek, na něž se zaměřuje následující výzkum, jelikož SCR technologie je v této oblasti hojně používána. Pro pístové motory stačí rozdělit zdroje do dvou výkonových kategorií. Emisní limity pro menší zdroje do 50 [kW] prošly značným vývojem a je vidět zpřísňující trend. Úplné změny limitů s doplňujícími informacemi lze najít ve dříve zmíněné vyhlášce. [3]

Emisní limity pro pístové motory o výkonu 0,3 až 1 [MW] je možné vidět na obrázku P 4. Je vidět, že změna proběhla historicky při změně zákona pro zdroje uvedené do provozu před rokem 2014. V roce 2025 dojde znovu ke změně a ke zpřísňení limitů, nicméně pro pístové spalovací motory se nic v oblasti limitů oxidu dusíku nezmění.



Obrázek P 4 Specifické emisní limity pro výkon zdroje < 0,3 – 1 [MW] [3]

Obdobný scénář jako v předchozím případě platí i pro zdroje s vyšším výkonem, kdy změny proběhly obdobně, nicméně došlo ke zpřísnění u plyných paliv, což platí již nyní pro zdroje uvedené do provozu po roce 2018. Budoucí limit od roku 2025 bude i v tomto případě stejný jako je doposud. Existují však výjimky, kdy jsou dovolené vyšší limity, což je možné dohledat ve vyhlášce 415/2012 Sb.



Obrázek P 5 Specifické emisní limity pro výkon zdroje 1 - 50 [MW] [3]

Z předchozího textu je vidět, že limity pro menší zdroje jsou vyšší než pro větší zdroje. To neplatí pouze u pístových motorů, které jsou zde zobrazeny, ale dá se to obecně

řící i o ostatních menších zdrojích pod 50 [MW]. Menší tepelné zdroje mají dovoleno produkovat poměrově ke svému výkonu větší množství znečišťujících látek, ale tyto zdroje zase produkují menší množství vypouštěných látek do okolí, tzn. že platí poměrové množstevní zastoupení znečištění vzhledem k velikosti zdroje.

Trend snižování emisí je jednoznačný a dá se očekávat, že se do budoucna budou znovu zpřísnovat emisní limity, proto je potřeba nadále vyvíjet další nezbytné technologie pro jejich snižování, případně na odstranění tohoto problému jako takového. Toho lze dosáhnout třeba tím, že při spalování by nebyl používán vzduch, který je nejlevnější variantou, ale rovnou čistý kyslík, tedy bez dusíku, čímž by se odstranil problém s NO_x . Tento přístup je však zatím nejen finančně, ale i energeticky reálný.

Příloha č. 2

Tabulka P 1 Výsledky variant double knee lh - Fluent verze 2021R1 – Wall Jet

	Koncentrace DPM [kg/m ³]		UI MWA Střední hodnota hmotnostní frakce CONH (plyn) [-]	
	Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif	Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif
v01	1,7E-08	1,1E-07	1,00	0,97
v02	1,5E-07	1,0E-07	0,99	0,95
v03	1,5E-07	2,3E-07	1,00	0,98
v04	4,6E-09	4,4E-07	0,99	0,95
v05	3,6E-08	6,6E-08	1,00	0,97
v06	8,0E-08	3,0E-07	1,00	0,95
v07	2,7E-07	6,7E-08	1,00	0,99
v08	5,6E-08	3,6E-07	1,00	0,97
v11	1,2E-06	2,5E-07	0,99	0,98
v12	1,5E-06	6,1E-06	0,99	0,99
v13	2,6E-08	2,1E-06	0,94	0,93
v14	7,7E-07	0,0E+00	0,96	0,76
v15	2,5E-07	6,5E-06	0,98	1,00
v16	1,2E-06	9,1E-08	0,99	0,97
v17	1,7E-07	6,8E-06	0,97	0,99
v18	9,8E-08	8,0E-08	0,99	0,98
v19	2,6E-05	2,6E-05	0,99	0,96
v20	0,0E+00	1,2E-07	0,98	0,99
v21	8,1E-07	5,6E-07	0,99	0,99
v22	2,1E-08	2,0E-07	0,99	0,97
v23	1,0E-07	2,1E-09	0,96	0,98
v24	3,7E-08	3,1E-08	0,99	0,96
v25	3,4E-06	1,0E-07	1,00	1,00
v26	3,0E-07	0,0E+00	1,00	1,00
v27	0,0E+00	9,4E-12	0,99	0,97
v28	1,6E-07	2,2E-08	0,96	0,96
v29	0,0E+00	1,1E-07	0,99	0,97
v30	2,6E-09	7,2E-09	0,99	0,97
v31	1,3E-06	1,3E-08	1,00	0,98
v32	3,8E-06	1,0E-07	0,96	0,94
v33	4,2E-09	0,0E+00	0,98	0,96
v34	3,2E-07	1,4E-11	0,99	0,99
v35	0,0E+00	2,5E-07	0,99	0,99
v36	2,9E-08	2,6E-08	0,99	0,98
v37	1,7E-07	2,2E-07	0,98	0,97
v38	2,6E-07	4,1E-08	0,99	0,98

Katedra energetických strojů a zařízení

Ing. Martin Novák

v39	0,0E+00	0,0E+00	1,00	0,97
v40	3,5E-08	1,8E-06	0,99	0,98
v41	1,1E-07	2,6E-08	0,99	0,98
v42	1,3E-08	1,1E-06	0,99	0,97
v43	8,2E-07	0,0E+00	0,99	0,99
v44	1,0E-07	3,7E-06	0,99	0,98
v45	8,0E-07	2,9E-06	0,98	0,97
v46	1,7E-07	3,2E-07	0,99	0,98
v47	6,6E-08	1,3E-07	0,99	0,97
v48	2,3E-08	5,6E-07	0,99	0,98
v49	6,2E-08	2,6E-08	1,00	0,99
v50	1,6E-07	1,9E-08	0,99	0,99
v51	3,0E-07	0,0E+00	1,00	1,00

Tabulka P 2 Výsledky variant double knee lh - Fluent verze 2021R1 – Wall Film

	Koncentrace DPM [kg/m3]		UI MWA Střední hodnota hmotnostní frakce CONH (plyn) [-]	
	Wall Film R211	Wall Film R211 - unif	Wall Film R211	Wall Film R211 - unif
v01	0,0E+00	0,0E+00	1,00	1,00
v05	0,0E+00	0,0E+00	1,00	0,98
v11	4,0E-08	1,5E-07	1,00	1,00
v12	1,9E-06	1,6E-06	0,99	0,98
v14	2,3E-07	0,0E+00	0,99	0,96
v18	1,0E-07	8,9E-08	1,00	1,00
v19	1,6E-07	1,7E-06	0,98	0,96
v21	5,3E-07	8,1E-07	0,99	0,98
v30	0,0E+00	0,0E+00	1,00	0,99
v31	6,7E-07	1,2E-07	1,00	0,97
v32	4,6E-07	4,4E-07	0,99	0,97
v36	1,5E-08	2,3E-07	0,99	0,99
v41	1,4E-07	2,4E-08	0,99	0,99
v43	6,5E-08	1,6E-08	0,99	0,99
v45	3,3E-08	5,6E-08	0,99	0,98
v50	0,0E+00	8,3E-09	0,99	0,99

Tabulka P 3 Výsledky variant double knee lh - Fluent verze 2023R1 – Wall Jet

	Koncentrace DPM [kg/m3]		UI MWA Střední hodnota hmotnostní frakce CONH (plyn) [-]	
	Wall Jet R231	Wall Jet R231 - unif	Wall Jet R231	Wall Jet R231 - unif
v01	9,2E-08	0,0E+00	1,00	0,96
v11	0,0E+00	1,3E-07	1,00	0,98
v30	8,6E-11	0,0E+00	1,00	0,99
v41	2,0E-08	1,3E-06	1,00	0,98

v50	3,0E-07	5,5E-07	0,99	0,99
-----	---------	---------	------	------

Tabulka P 4 Výsledky variant double knee lh - Fluent verze 2023R1 – Wall Film

	Koncentrace DPM [kg/m3]		UI MWA Střední hodnota hmotnostní frakce CONH (plyn) [-]	
	Wall Film R231	Wall Film R231 - unif	Wall Film R231	Wall Film R231 - unif
v01	0,0E+00	0,0E+00	1,00	1,00
v05	0,0E+00	0,0E+00	1,00	1,00
v06	0,0E+00	0,0E+00	1,00	0,99
v07	0,0E+00	0,0E+00	1,00	0,99
v08	0,0E+00	0,0E+00	1,00	0,99
v11	1,2E-08	0,0E+00	1,00	0,94
v12	5,9E-09	0,0E+00	0,99	1,00
v13	1,4E-05	2,2E-05	0,97	0,96
v14	0,0E+00	0,0E+00	0,99	0,91
v15	3,5E-07	0,0E+00	0,99	1,00
v16	7,3E-11	0,0E+00	1,00	1,00
v17	1,1E-09	8,5E-08	0,99	0,99
v18	9,8E-07	0,0E+00	1,00	1,00
v19	5,5E-08	2,4E-06	1,00	0,96
v20	7,4E-08	2,4E-07	0,99	0,99
v21	6,3E-07	1,6E-07	0,99	1,00
v22	2,4E-07	1,8E-08	0,98	0,99
v23	1,6E-08	4,3E-07	0,98	0,99
v24	3,9E-08	2,2E-08	1,00	0,99
v25	1,3E-09	0,0E+00	1,00	1,00
v26	4,7E-08	0,0E+00	1,00	0,99
v27	0,0E+00	0,0E+00	0,99	1,00
v28	4,0E-08	1,8E-08	0,99	0,98
v29	0,0E+00	0,0E+00	0,99	0,99
v30	0,0E+00	0,0E+00	1,00	0,99
v31	2,0E-09	0,0E+00	1,00	1,00
v32	6,5E-09	3,9E-08	0,99	0,99
v33	5,4E-08	0,0E+00	1,00	1,00
v34	0,0E+00	1,2E-08	1,00	1,00
v35	2,3E-08	0,0E+00	1,00	1,00
v36	9,6E-09	6,1E-07	0,99	0,99
v37	6,1E-10	1,3E-07	1,00	0,99
v38	4,6E-08	1,2E-08	0,99	0,99
v39	9,6E-08	2,5E-08	0,99	1,00
v40	2,9E-08	8,2E-08	0,99	0,99
v41	9,0E-08	8,8E-09	0,98	0,98
v42	4,5E-08	0,0E+00	0,98	0,98
v43	9,6E-09	9,4E-09	0,98	0,99

Katedra energetických strojů a zařízení

Ing. Martin Novák

v44	6,5E-12	2,7E-09	0,99	0,98
v45	2,0E-10	8,4E-07	0,98	0,98
v46	6,6E-08	2,0E-09	1,00	1,00
v47	3,5E-09	4,9E-09	0,99	1,00
v48	0,0E+00	2,1E-08	1,00	1,00
v49	2,5E-09	0,0E+00	1,00	1,00
v50	6,8E-08	1,2E-08	1,00	1,00
v51	0,0E+00	0,0E+00	1,00	1,00

Tabulka P 5 Výsledky variant short knee lh - Koncentrace DPM [kg/m3]

	Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif	Wall Film R231	Wall Film R231 - unif
v01	1,52E-05	7,82E-07	0,00E+00	0,00E+00
v02	5,97E-06		8,41E-08	0,00E+00
v03	1,10E-05		0,00E+00	0,00E+00
v04	7,36E-06		0,00E+00	0,00E+00
v05	1,44E-04		4,03E-05	0,00E+00
v06	1,80E-06		2,98E-05	0,00E+00
v07	9,15E-06		1,70E-05	0,00E+00
v08	7,93E-05		1,77E-05	0,00E+00
v09	3,26E-05		2,16E-05	0,00E+00
v10	7,77E-05		1,01E-04	5,77E-08
v11	6,08E-07		3,53E-06	0,00E+00
v12	8,50E-05		1,87E-05	0,00E+00
v13	1,77E-04		7,74E-06	0,00E+00
v14	1,11E-04		1,22E-05	1,43E-04
v15	3,34E-05		1,33E-04	0,00E+00
v16	1,79E-04		2,35E-04	0,00E+00
v17	2,89E-05		0,00E+00	0,00E+00
v18	2,14E-05		3,04E-05	0,00E+00
v19	3,80E-05		8,29E-07	0,00E+00
v20	2,23E-05		2,14E-05	0,00E+00
v21	2,12E-05		3,02E-09	0,00E+00
v22	1,65E-06		2,06E-04	8,16E-05
v23	1,68E-04		3,18E-04	4,52E-04
v24	1,67E-05		0,00E+00	3,38E-04
v25	1,19E-04		6,83E-05	4,03E-04
v26	1,39E-05		4,23E-04	5,49E-04

Tabulka P 6 Výsledky variant short knee lh - UI MWA Střední hodnota hmotnostní frakce CONH (plyn)

	Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif	Wall Film R231	Wall Film R231 - unif
v01	0,93	0,82	0,99	0,90
v02	0,65		0,84	0,98
v03	0,91		0,96	0,96

Katedra energetických strojů a zařízení

Ing. Martin Novák

v04	0,96		0,96	0,98
v05	0,59		0,90	0,99
v06	0,88		0,92	0,98
v07	0,87		0,72	0,95
v08	0,74		0,80	0,98
v09	0,92		0,88	0,99
v10	0,79		0,88	0,97
v11	0,82		0,85	0,93
v12	0,83		0,79	0,97
v13	0,85		0,85	0,99
v14	0,74		0,75	0,97
v15	0,78		0,84	0,98
v16	0,79		0,80	0,99
v17	0,98		0,94	0,99
v18	0,95		0,91	1,00
v19	0,97		0,94	1,00
v20	0,96		0,90	1,00
v21	0,93		0,94	1,00
v22	0,85		0,81	0,82
v23	0,83		0,53	0,68
v24	0,95		0,90	0,74
v25	0,88		0,89	0,75
v26	0,84		0,57	0,64

Tabulka P 7 Výsledky variant tdm - Koncentrace DPM [kg/m3]

	Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif	Wall Film R231	Wall Film R231 - unif
v01	2,10E-05	8,64E-06	0,00E+00	0,00E+00
v02	7,28E-06		0,00E+00	0,00E+00
v03	1,31E-05		0,00E+00	0,00E+00
v04	7,76E-06		0,00E+00	2,44E-07
v05	1,30E-05		4,84E-06	1,69E-06
v06	7,64E-05		2,16E-05	1,34E-05
v08	9,94E-06		6,07E-06	2,74E-07
v09	2,10E-05		2,31E-05	1,66E-06
v10	2,53E-06		2,12E-06	4,34E-06
v11	4,37E-06		3,36E-05	2,32E-05
v12	3,04E-05		8,39E-05	1,68E-05
v13	2,21E-04		6,64E-06	6,11E-05
v14	3,11E-05		8,38E-06	3,97E-05
v16	6,55E-05		2,01E-05	2,87E-04
v17	7,64E-05		2,82E-04	1,59E-04
v18	2,44E-04		7,50E-05	1,72E-04
v19	1,28E-04		6,97E-05	3,85E-04
v20	8,87E-05		1,70E-04	9,58E-04

Katedra energetických strojů a zařízení

Ing. Martin Novák

v21	5,39E-05		2,07E-04	7,70E-04
v22	1,92E-05		3,69E-09	3,03E-05
v23	2,06E-05		4,65E-06	1,16E-04

Tabulka P 8 Výsledky variant tdm - UI MWA Střední hodnota hmotnostní frakce CONH (plyn) [-]

	Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif	Wall Film R231	Wall Film R231 - unif
v01	0,94	0,97	0,97	1,00
v02	0,93		0,95	1,00
v03	0,93		0,97	1,00
v04	0,93		0,95	0,99
v05	0,94		0,93	1,00
v06	0,88		0,91	0,97
v08	0,93		0,96	0,98
v09	0,93		0,96	0,97
v10	0,94		0,95	0,98
v11	0,92		0,94	0,96
v12	0,76		0,72	0,86
v13	0,77		0,80	0,92
v14	0,73		0,73	0,86
v16	0,77		0,73	0,88
v17	0,81		0,73	0,85
v18	0,72		0,69	0,83
v19	0,71		0,67	0,86
v20	0,79		0,63	0,89
v21	0,68		0,59	0,81
v22	0,88		0,86	0,93
v23	0,89		0,88	0,88

Tabulka P 9 Výsledky variant long knee lh - Fluent verze 2021R1

	Koncentrace DPM [kg/m ³]		UI MWA Střední hodnota hmotnostní frakce CONH (plyn) [-]	
	Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif	Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif
v01	7,10E-07	2,43E-06	0,97	0,99
v02	2,37E-07	0	0,88	0,98
v03	9,61E-07		0,91	
v04	7,43E-07		0,93	
v05	2,94E-07		0,76	
v06	6,57E-08	0	0,96	0,99
v07	0,00E+00	0	0,87	1,00
v08	0,00E+00	0	0,85	0,99
v09	1,01E-07	4,46E-07	0,86	0,99
v10	5,16E-11	0	0,84	0,99
v11	5,49E-08	0	0,86	0,98

Katedra energetických strojů a zařízení

Ing. Martin Novák

v12	1,62E-07	0	0,95	0,99
v13	6,04E-07		0,94	
v14	2,23E-06		0,94	
v15	0,00E+00	0	0,93	0,99
v16	0,00E+00	0	0,96	0,97
v17	0,00E+00	0	0,96	1,00
v18	1,72E-07	0	0,96	0,99
v19	2,32E-06		0,92	
v20	3,77E-07		0,86	
v21	0,00E+00	0	0,95	1,00
v22	5,88E-08	0	0,90	0,99
v23	6,07E-08	2,51E-09	0,89	0,97
v24	2,02E-05		0,85	
v25	2,28E-05		0,87	
v26	1,35E-06		0,92	
v27	0,00E+00	0	0,97	0,98
v28	3,05E-05		0,90	
v29	3,47E-07		0,98	
v30	2,37E-08	1,12E-07	0,99	0,91
v31	1,10E-08	1,00E-07	0,96	0,93

Tabulka P 10 Výsledky variant quadro knee short lh - Fluent verze 2021R1

	Koncentrace DPM [kg/m ³]		UI MWA Střední hodnota hmotnostní frakce CONH (plyn) [-]	
	Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif	Wall Jet R211	Wall Jet R211 - unif
v01	0,00E+00	0,00E+00	1,00	0,99
v02	4,50E-08	0	1,00	1,00
v03	5,17E-10	2,33E-07	1,00	1,00
v04	1,37E-07	1,16E-08	1,00	1,00
v05	0,00E+00	0	1,00	1,00
v06	2,01E-08	3,42E-08	1,00	1,00
v07	6,61E-10	2,41E-07	1,00	1,00
v08	0,00E+00	2,36E-08	1,00	1,00
v09	4,87E-08	3,41E-11	1,00	1,00
v10	2,09E-08	0	1,00	1,00
v11	5,96E-08	6,69E-09	1,00	1,00
v12	3,80E-07		1,00	
v13	8,35E-08		1,00	
v14	2,80E-08		1,00	
v15	1,21E-07		0,99	
v16	0,00E+00		0,99	
v17	8,92E-08		1,00	
v18	3,25E-07		0,99	
v19	8,71E-07		0,99	

Katedra energetických strojů a zařízení

Ing. Martin Novák

v20	6,13E-07		1,00	
v21	8,35E-07		0,99	
v22	1,83E-09		0,99	
v23	8,22E-08		0,99	
v24	1,06E-08		0,99	
v25	4,69E-07		0,99	
v26	7,79E-07		0,96	
v27	5,62E-05		0,96	
v28	2,51E-06		0,98	
v29	2,94E-06		0,97	
v30	1,01E-06		0,92	
v31	1,03E-05		0,97	