

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA ENERGETIKY

**Návrh prototypového zařízení pro výzkum spalování paliv
ve fluidní vrstvě a snižování emisí těžkých kovů**

**Design of a Prototype Device for Study of the
Combustion of Fuels in the Fluidized Bed and Reduction
of Heavy Metals Emissions**

Student:

Bc. Jadlovec Marek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Jadlovec**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh prototypového zařízení pro výzkum spalování paliv ve fluidní vrstvě a snižování emisí těžkých kovů**
Design of a Prototype Device for Study of the Combustion of Fuels in the Fluidized Bed and Reduction of Heavy Metals Emissions
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Práce se zaměřuje na konstrukční návrh a realizaci laboratorního systému pro studium hoření práškových paliv ve fluidní vrstvě a efektivitu sorpčních vlastností alternativních koksů. Požadavky jsou následující:

1. Vypracujte rešerši zaměřenou na problematiku spalování paliv ve stacionární fluidní vrstvě a odstraňování těžkých kovů ze spalin.
2. Proveďte výpočet a konstrukční návrh fluidního spalovacího zařízení laboratorního měřítka, které bude umožňovat (i) snímání parametrů spalovacího procesu (teploty, tlaky a koncentrace složek spalin) a (ii) testování filtrů s aktivním koksem umístěných do odvodu spalin. Požadavkem je regulovatelnost toku a teploty spalovacího vzduchu (až do 450 °C), udržení konstantní teploty ve spalovacím prostoru (~700 °C) a mobilita zařízení.
3. Proveďte provozní zkoušky zrealizovaného zařízení prokazující jeho funkčnost.
4. Sumarizujte výsledky práce a předložte návrh budoucí výzkumné činnosti vztahující se k zrealizovanému experimentálnímu zařízení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- BASU, Prabir. *Combustion and gasification in fluidized beds*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006. ISBN 0-8493-3396-2.
- GLASSMAN, Irvin a Richard A. YETTER. *Combustion*. 4th ed. Burlington: Elsevier, c2008. ISBN 978-0-12-088573-2.
- LACKNER, Maximilian, Arpád PALOTÁS a Franz WINTER. *Combustion: from basics to applications*. Weinheim: Wiley-VCH, c2013. ISBN 978-3-527-33376-9.
- SAZIMA, Miroslav, Vladimír KMONÍČEK a Jiří SCHNELLER. *Teplo*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00043-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018




doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21.5.2018

.....

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21.5.2018


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Marek Jadlovec

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Dr. Tyrše 3104, 738 01 Frýdek-Místek

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Stanislavu Honusovi, Ph.D. a Ing. Ondřeji Němčkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, stejně jako všem ostatním, kteří mi byli nápomocni při psaní této diplomové práce

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JADLOVEC, M. Návrh prototypového zařízení pro výzkum spalování paliv ve fluidní vrstvě a snižování emisí těžkých kovů. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra Energetiky, 2018, 66 s. Vedoucí práce: HONUS, S.

Diplomová práce se zabývá návrhem prototypového zařízení pro výzkum spalování paliv ve fluidní vrstvě a snižování emisí těžkých kovů. V úvodu jsou popsány jevy spojené s fluidizací, typy fluidních kotlů, vliv těžkých kovů na organismus a principy čištění spalin od těžkých kovů.

Následně je v práci popsán výpočet, návrh a výroba spalovacího zařízení, které je předmětem této práce. Závěrečná část obsahuje poznatky z pilotního testu zařízení a sumarizaci celé práce.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

JADLOVEC, M. Design of a Prototype Device for Study of the Combustion of Fuels in the Fluidized Bed and Reduction of Heavy Metals Emissions. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2018, 66 p. Thesis head: HONUS, S.

This diploma thesis is focused on design of a prototype device for study of the combustion of fuels in fluidized bed and reduction of heavy metals emissions. The introduction describes phenomena associated with the fluidized bed, types of fluid boiler, the effect of heavy metals on human organism.

After that, the thesis describes the calculation, design and production of the combustion equipment, which is the subject of this work. The final part contains the findings from the pilot test of the equipment and the summary of the whole work.

KLÍČOVÁ SLOVA

- fluidní kotel
- adsorpce
- emise těžkých kovů

KEYWORDS

- fluidized bed boiler
- adsorption
- heavy metals emissions

Obsah

1	Úvod	8
2	Teorie fluidního jevu	9
2.1	Fluidizace	9
2.2	Fluidní vrstva	9
2.3	Základní typy fluidních vrstev	10
2.4	Charakteristické pojmy fluidní vrstvy	12
2.5	Charakterizace tvaru a velikosti částice (Geldartovo rozdělení částic).....	15
2.6	Historie fluidní techniky	16
2.7	Koncepce fluidních kotlů	16
2.7.1	Fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou	17
2.7.2	Fluidní kotel s expandující fluidní vrstvou	19
2.7.3	Fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou	20
2.8	Paliva spalovaná ve fluidních ohništích	21
2.8.1	Spalování pevných paliv.....	21
2.8.2	Spalování kapalných paliv	21
2.9	Výhody a nevýhody fluidního spalování	21
2.9.1	Výhody fluidního spalování	21
2.9.2	Nevýhody fluidního spalování.....	22
3	Adsorpce.....	23
4	Záchyt těžkých kovů na sorbentech	25
4.1.1	Sorbenty na bázi vápníku.....	25
4.1.2	Sorbent na bázi aktivního uhlí	25
4.1.3	Sorbenty na bázi úletového popílku	25
5	Vliv těžkých kovů na životní prostředí.....	26
6	Návrh a výpočet prototypového zařízení	28
6.1	Stanovení postupu výpočtů rychlostí ve fluidní vrstvě	28
6.1.1	Minimální rychlost fluidace vzhledem k vstupním parametrům U_{mf}	29
6.1.2	Stanovení minimální rychlosti bublinkující fluidní vrstvy.....	30

6.1.3	Stanovení mezní rychlosti bublinkující fluidní vrstvy	31
6.1.4	Přechod bublinkující fluidní vrstvy na turbulentní.....	32
6.2	Samotný výpočet fluidizačních rychlostí	32
7	Návrh a realizace prototypového fluidního zařízení	37
7.1	Volba základních rozměrů.....	39
7.2	Konstrukce fluidního zařízení	40
7.3	Konstrukce rámu.....	46
7.4	Přídavná zařízení	47
7.4.1	Doprava vzdušiny.....	47
7.4.2	Přídavný zdroj tepla	47
7.4.3	Spojovací trubice.....	50
7.4.4	Další vybavení fluidního zařízení.....	50
7.5	Analýza spalin.....	52
8	Sestavení laboratorního zařízení.....	54
9	Provozní zkouška.....	56
9.1	Vstupní palivo a inertní materiál	56
9.2	Popis zkoušky a měřených veličin.....	57
9.3	Výsledky testu.....	58
10	Závěr	59

Seznam použitých veličin

A^d	Popel bezvodý	%
A^r	Popel původní	%
Ar	Archimédovo kritérium	-
C^r	Uhlík původní	%
C_1	Konstanta zpřesňující výpočet Reynoldsova kritéria	-
C_2	Konstanta zpřesňující výpočet Reynoldsova kritéria	-
c_p	Měrná tepelná kapacita	kJ/kg·K
d	Střední průměr částice	m
d_p	Průměr částice ve fluidní vrstvě	m
Fe	Fedorovo kritérium	-
F_w	Síla působící na částici	N
g	Gravitační konstanta	m/s ²
H^r	Vodík původní	%
h_f	Výška fluidní vrstvy	m
m_g	Množství plynu	mol/g
m_z	Hmotnost částice	kg
N^r	Dusík původní	%
N_A	Avogadrova konstanta	1/mol
Q_i^r	Výhřevnost původní	MJ/kg
Q_s^{daf}	Spalné teplo původní	MJ/kg
Re	Reynoldsovo kritérium	-
S^r	Síra původní	%
Sp	Specifický povrch	m ² /g
$t_{m\check{e}knutí}$	Teplota měknutí	°C
U_{mb}	Minimální rychlost fluidace pro bublikující vrstvu	m/s
U_{mf}	Minimální rychlost fluidace	m/s
V^{daf}	Prchavá hořlavina	%
W^r	Voda původní	%
w_n	Rychlost nosného média	m/s
w_{opt}	Optimální rychlost	m/s
w_{rel}	Relativní rychlost částice	m/s
\dot{w}_z	Rychlost částice derivovaná podle času	m/s ²
w_z	Rychlost částice	m/s
α	Souč. přestupu tepla	W/m ² · K
λ	Souč. tepelné vodivosti	W/m · K
ε	Mezerovitost	-
Δp	Tlaková ztráta	Pa
ρ_g	Hustota nosného média	kg/m ³
ρ_n	Hustota nosného média	kg/m ³
ρ_p	Hustota zrn ve fluidní vrstvě	kg/m ³
ρ_z	Hustota zrn ve fluidní vrstvě	kg/m ³
η_n	Dynamická viskozita nosného média	Pa·s

ν	Kinematická viskozita nosného média	m^2/s
σ	Plocha, ktorou zaujímá jedna molekula plynu na povrchu látky	m^2
ψ	Konstanta zohľadňujúci Reynoldsovo kritérium	-

1 Úvod

S postupnou expanzí populace jsou kladeny stále větší požadavky na energetické zdroje, a to jak z pohledu efektivity, tak snižování produkce různých škodlivých látek. K této oblasti se váže předložená diplomová práce.

Jejím hlavním cílem je představit návrh a realizaci laboratorního spalovacího zařízení s fluidní vrstvou, které je určeno pro výzkum možnosti snižování produkce těžkých kovů ve spalínách, a to s využitím alternativních sorbentů. Práce se konkrétně zaměřuje na problematiku spalování paliv ve fluidní vrstvě a odstraňování těžkých kovů, dále provedení výpotut a konstrukčního návrh fluidního spalovacího zařízení v laboratorním měřítku. Dále provést provozní zkoušky zrealizovaného zařízení prokazující jeho funkčnost a v poslední řadě sumarizovat výsledky práce a předložit návrh budoucí činnosti vztahující se k zrealizovanému zařízení.

Teoretická část se věnuje popisu fluidizačního jevu, fluidní vrstvy, historii fluidní techniky, koncepci fluidních kotlů, a dále popisu principu adsorpce, a zpřísnění emisních limitů těžkých kovů. V neposlední řadě se zabývá popisem principů sloužících k odstraňování těžkých kovů ze spalín a dále jaký vliv má účinek těžkých kovů na lidský organismus.

Praktická část je zaměřena na výpočty potřebné ke stanovení prahových rychlostí fluidace, z důvodu zvolení správného dmychadla k tvorbě fluidní vrstvy s konstrukčním návrhem celého zařízení, a to včetně závěsného rámu. Pro tento návrh byl použit program Autodesk Inventor 2017.

Realizace fluidního zařízení je popsána v kapitole následující. Zahrnuje popis a instalace potřebných doplňků jako je dmychadlo, frity, topná tělesa a osazení zařízení termočlánky a vstupními otvory pro zabudování analyzátoru spalín.

Následující kapitola obsahuje popis pilotních testů při spalování černého uhlí, a to z hlediska dosažení potřebné spalovací teploty, optimální proudění vzdušiny a požadavů na spalovací proces.

2 Teorie fluidního jevu

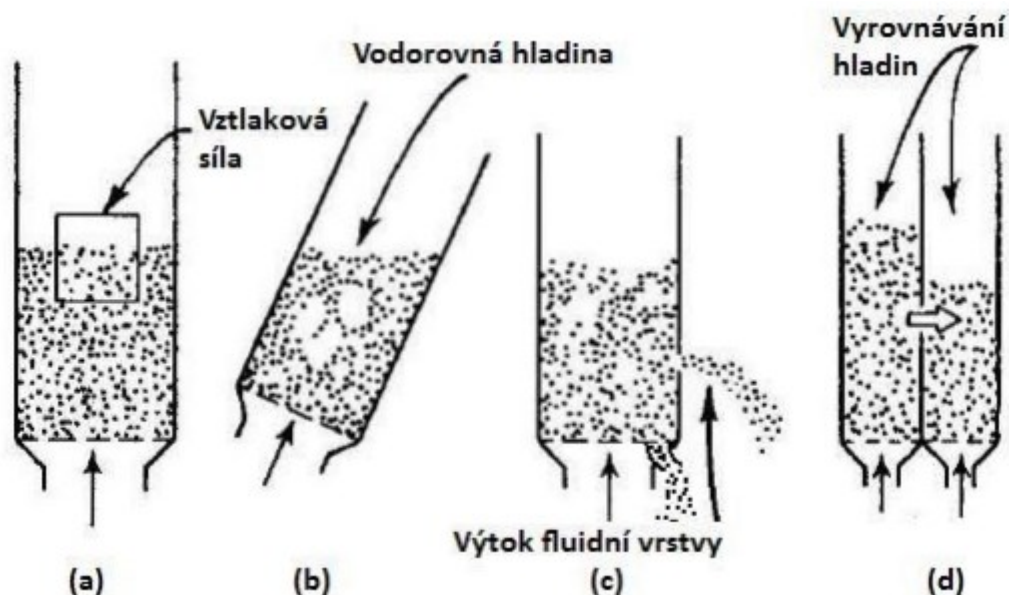
Diplomová práce se zaměřuje na návrh spalovacího zařízení se stacionární fluidní vrstvou. Tato kapitola se zaměřuje na teoretické popisy fluidizačních jevů, a vymezení charakteristických pojmů užívaných v oblasti fluidní vrstvy. V kapitole je rovněž shrnut historický vývoj fluidní techniky a rozdělení fluidních kotlů včetně definování výhod a nevýhod spalování ve fluidních ohništích.

2.1 Fluidizace

Fluidizace je děj, při kterém proudící plyn spolu s pevnými částicemi vytváří suspenzi, přičemž směr proudění je ve svislém směru od povrchu země. Veškerý povrch pevných částic je v dokonalém styku s proudícím médiem, a tak dochází k intenzivnějšímu sdílení tepla. Děj probíhá ve spalovací (fluidizační) komoře, pod níž je umístěna průchozí přepážka (rošt, fritá), přes kterou prochází fluidizační médium. V průmyslu se tato technika využívá převážně pro třídění zrnitého materiálu, sušení, spalování práškových hmot anebo v chemických reaktorech při katalytické reakci. V oblasti energetiky se fluidní technika převážně využívá pro spalování méně kvalitních typu uhlí. [1]

2.2 Fluidní vrstva

Fluidní vrstva vzniká pomocí pevných částic (např. písku), které jsou umístěny na propustné přepážce, přes kterou prochází médium a tím uvádí částice do pohybu. Jednou ze základních vlastností fluidní vrstvy je její pohyblivost, díky které se chová jako reálná kapalina. Jedním z hlavních důvodů, proč se využívá např. spalování ve fluidní vrstvě je, že dochází k dokonalému promísení pevných částic v médiu a tím pádem intenzivnějšímu přestupu tepla a hmoty. Jelikož se tvar hladiny fluidní vrstvy blíží reálné kapalině, předpokládáme, že fluidní vrstva má shodné vlastnosti jako reálná kapalina (viz. Obr.2.1). Na tělesa ponořená do fluidní vrstvy působí vztahová síla (viz. Obr.2.1 (a)). Že se fluidní vrstva chová jako reálná kapalina vypovídá Obr.2.1 (b), z kterého vyplývá, že hladina fluidní vrstvy je vždy kolmá k tíhové síle, tudíž je vodorovná. V závislosti na vlastní hustotě tělesa ponořeného do fluidní vrstvy se může těleso buďto vznášet, plavat anebo klesnout až k přepážce. Díky hydrostatickému tlaku, který působí na stěny fluidní komory lze obsah fluidní vrstvy vypouštět buď ze dna nádoby, anebo z její boční stěny (viz Obr.2.1 (c)). [1]



Obr. 2.1 Vlastnosti fluidní vrstvy [1]

2.3 Základní typy fluidních vrstev

Fluidní vrstvy lze rozdělit na základě parametrů, které je přímo ovlivňují, a to jsou viskozita a rychlost protékajícího média, výška a tvar fluidní vrstvy a konstrukce roštu. Jak v praxi, tak v odborné literatuře se můžeme setkat s několika typy fluidních vrstev, které dělíme na rovnoměrné (viz Obr. 2.2 (a,b,c)) a nerovnoměrné (viz Obr. 2.2 (d,e,f,g,h)). [1]

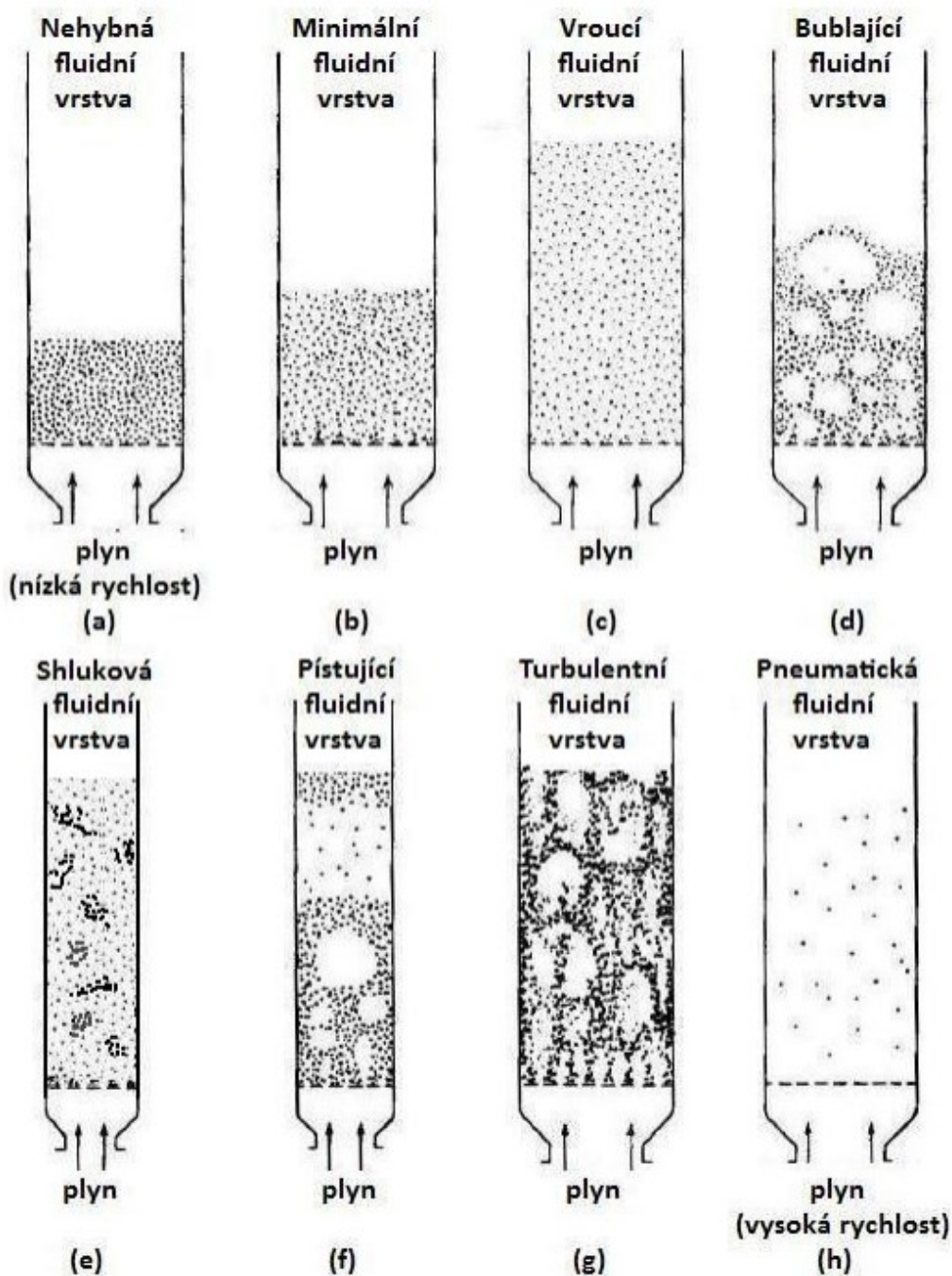
Obr. 2.2 (a) popisuje nehybnou fluidní vrstvu, kdy médium procházející přes přepážku nemá dostatečnou rychlost na to, aby přivedla pevné částice zrnitého materiálu do vznosu. V tomto případě médium pouze proteče kolem zrnitého materiálu a nezpůsobí žádnou reakci. [1]

S postupným nárůstem rychlosti proudícího média dochází k nadnesení veškerých částic zrnitého materiálu. Tento stav nazýváme jako minimální fluidní vrstva (viz. Obr. 2.2 (b)). [1]

V oblasti energetiky hlavně při spalování uhlí, se nejčastěji využívá principu vroucí fluidní vrstvy (viz. Obr. 2.2 (c)) a to hlavně z důvodu stálosti její hladiny, která je dobře měřitelná a má vlastnosti vroucí kapaliny. [1]

První z řady nerovnoměrných fluidních vrstev je vrstva bublající (viz Obr. 2.2(d)), která je charakterizovaná bublinami, jež procházejí fluidní vrstvou. Tyto bubliny mají nepravidelnou velikost, přičemž jejich průměr je menší než průměr spalovací komory. Tato vrstva je v praxi nežádoucí, jelikož díky bublinám nedochází k dokonalému přestupu tepla mezi pevnými částicemi a médiem. [1]

Shluková fluidní vrstva (viz Obr. 2.2(e)), je charakterizována malou střední koncentrací částic. [1]



Obr. 2.2 Tvary fluidní vrstvy [1]

Dalším typem je pístující fluidní vrstva (viz Obr. 2.2(f)), která se nejčastěji vyskytuje ve fluidních komorách s menším průměrem a vysokou výškou fluidní vrstvy. Tento typ fluidní vrstvy se řadí mezi bublající. Bubliny, které vznikají ve spod komory, postupně nabývají na objemu a mohou nabýt až velikosti průměru fluidní komory. [1]

Předposlední typ fluidní vrstvy je turbulentní fluidní vrstva (viz Obr. 2.2(g)), která vznikne navýšením vstupní rychlosti fluidizačního média, a to až na takovou úroveň, že dochází k turbulentnímu proudění. [1]

Pneumatická fluidní vrstva (viz Obr. 2.2(g)), je poslední z řady fluidních vrstev, kde rychlost fluidního média dosahuje nejvyšších hodnot. Rychlost média je tak vysoká, že suspenze, vzniklá z pevných částic a média je transportována do cyklonového odlučovače, kde dojde k odloučení pevných částic, které poté putují zpátky do fluidní komory. [1]

2.4 Charakteristické pojmy fluidní vrstvy

Pojmy, které charakterizují fluidní vrstvu jsou tlaková ztráta fluidní vrstvy, prahová rychlost fluidace, prahová rychlost úletu částic, expanze fluidní vrstvy, mezerovitost fluidní vrstvy a velikost a tvar částic.

Relativní rychlost únosu částice w_{rel} m/s se stanoví z následujícího vztahu:

$$w_{rel} = w_n - w_z \text{ m/s (2.1),}$$

kde síla působící na každou částici se vypočítá jako:

$$F_w = 3 \cdot \pi \cdot \eta_n \cdot d \cdot w_{rel} = 3 \cdot \pi \cdot \eta_n \cdot d \cdot (w_n - w_z), \quad (2.2)$$

kde:

F_w – síla působící na částici (N),

η_n – viskozita nosného média (Pa·s),

d – střední průměr částice (mm),

w_{rel} – relativní rychlost částice (m/s),

w_n – rychlost nosného média(m/s),

w_z – rychlost částice (m/s).

Jednou z dalších veličin, které slouží pro posouzení stavu a rovnovážnosti fluidní vrstvy je její tlaková ztráta. V obecném výpočtu tlakové ztráty se používá vzorec bez zahrnutí mezerovitosti. V klasickém výpočtu dosazujeme výšku fluidní vrstvy h_f , hustotu nosného média ρ_n , mezerovitost ε , a hustotu zrn obsažených ve fluidní vrstvě ρ_z .

Konečný výpočet Δp je následující:

$$\Delta p = hf \cdot (\rho_z - \rho_n) \cdot (1 - \varepsilon), \quad (2.3)$$

Pro aerodynamický výpočet fluidní vrstvy je nutné zahrnout charakteristický pohyb zrna ve fluidní vrstvě, a proto je nutné vybrat vhodnou rovnici, která počítá s jeho hmotností a středním průměrem zrna.

Můžeme zvolit například tuto rovnici:

$$m_z \cdot \dot{w}_z = \psi \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{(w_n - w_z)}{2} - \rho_n - \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot (\rho_z - \rho_n) \cdot g, \quad (2.4)$$

kde:

m_z – hmotnost částice (kg),

\dot{w}_z – rychlost částice derivovaná podle času (m/s),

w_n – rychlost nosného média (m/s),

d – průměr částice (mm),

ρ_z – hustota částice (kg/m³),

ρ_n – hustota nosného média (kg/m³),

g – gravitační konstanta (m/s²),

ψ – konstanta zohledňující Reynoldsovo kritérium (–).

Tyto vztahy jsou uvedeny v literatuře. Může se jednat o odvození dle Christova, Erguna apod., které se liší v empirickém odvození, ale ve výsledku popisují shodně daný stav ve vrstvě.

Z rovnice 2.4 můžeme odvodit rovnici pro výslednou rychlost zrn ve vrstvě:

$$w_{wz} = w_{n\text{ mezní}} = \sqrt{\frac{4}{3 \cdot \psi}} \cdot g \cdot d \cdot \frac{\sigma_z - \sigma_n}{\sigma_n}, \quad (2.5)$$

kde:

ψ – konstanta zohledňující Reynoldsovo kritérium (–),

g – gravitační konstanta (m/s^2),

d – průměr částice (mm),

σ_z – normálové napětí na zrno (Pa),

σ_n – normálové napětí na nosné médium (Pa).

Rychlost fluidizace pak závisí na Fedorovu kritériu pro známé vlastnosti zrn:

$$Fe = d^3 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot g}{3 \cdot \nu^2} \cdot \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_n} - 1 \right)}, \quad (2.6)$$

kde:

ν – kinematická viskozita zrn,

d – průměr částice (mm),

g – gravitační konstanta (m/s^2),

σ_z – normálové napětí na zrno (Pa),

σ_n – normálové napětí na nosné médium (Pa).

Pomocí tohoto kritéria můžeme stanovit Reynoldsovo kritérium a zpětně pak dopočítat námi požadované veličiny:

$$Re = \frac{w_{opt} \cdot d}{\nu} = 0,19 \cdot Fe^{1,56} \quad (2.7)$$

Odtud je pak možno vyjádřit požadovanou rychlost w_{opt} m/s. [5,6]

2.5 Charakterizace tvaru a velikosti částice (Geldartovo rozdělení částic)

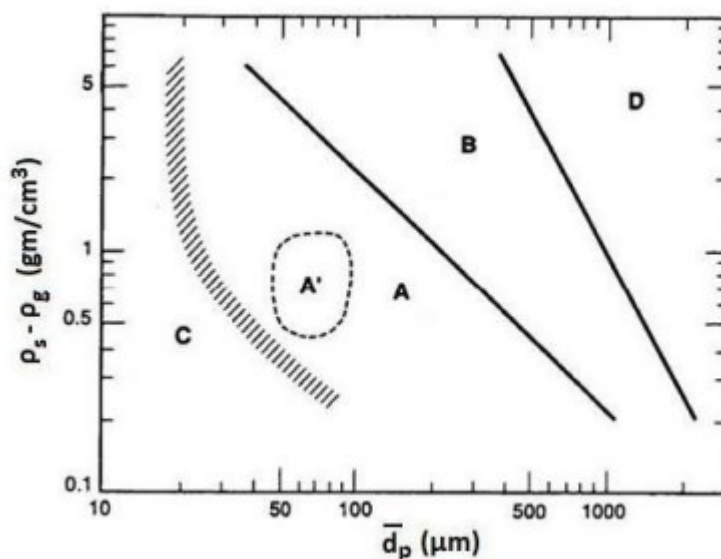
Dle profesora Dereka Geldarta se rozdělují částice pohybující se ve fluidní vrstvě do čtyř kategorií: od A až D. Hlavními parametry rozdělení částic do daných skupin je velikost částice d_p a rozdíl hustot částic ρ_s . Rozdělení je patrné na Obr. 2.3.

Skupinu **A** tvoří materiály s malou velikostí částic a hustotou do $1,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Použití takovýchto materiálů je vhodnější než u skupiny C, jelikož tyto částice vytvářejí snadněji fluidní vrstvu a při zvýšené rychlosti nad prahovou rychlost se jedná o bublající fluidní vrstvu. Jedním z příkladů je fluidní katalytické krakování.

Skupina **B** vytváří bublající fluidní vrstvu okamžitě při prahové rychlosti fluidace. Částice mají velikost od 40 do 500 (μm) a hustotu $1,4 - 4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Do skupiny **C** jsou převážně zahrnuty velmi jemné materiály, jako jsou mouka, škrob apod. Fluidace takového typu materiálu je velice obtížná z důvodu kohezní síly mezi částicemi, která převyšuje silové účinky proudící tekutiny.

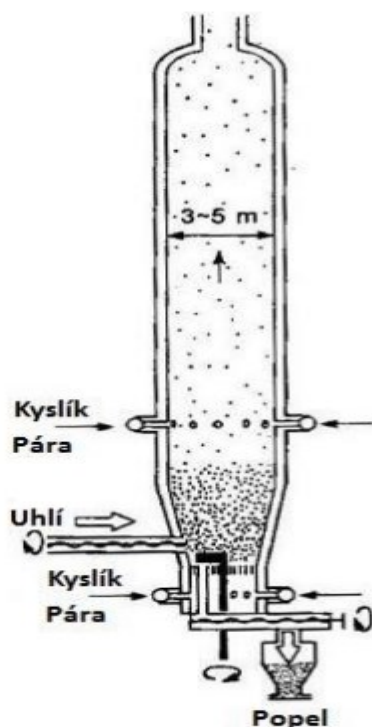
Ve skupině **D** jsou obsaženy materiály s částicemi o velikosti v řádech milimetrů. V důsledku velké velikosti částic je fluidace velice obtížná. Jako příklad zde lze uvést sušení obilí, pukání kukuřice nebo pražení kávových zrn. [1]



Obr. 2.3 Geldartovo rozdělení částic [1]

2.6 Historie fluidní techniky

První vývoj fluidní techniky se datuje již do dvacátých let 20. století, kdy byl první reaktor s fluidní vrstvou vyvinut německým chemikem Fritzem Winklerem (viz Obr. 2.4).



Obr. 2.4 Winklerův fluidní reaktor na zplyňování uhlí [1]

Jednalo se o reaktor na zplyňování uhlí. Největší rozvoje dosáhla fluidní technika během 2. světové války, kdy byla velká poptávka po pohonných hmotách jako jsou benzín a nafta. Tato poptávka měla za následek, že se v USA a v Německu začal vyrábět vysoce kvalitní benzín ze zemního plynu pomocí Fischer-Tropschovy reakce. V roce 1942 byl postaven první reaktor pro fluidní katalytické krakování (FCC) ropy v rafinerii Standard Oil (dnes ExxonMobil) v Baton Rouge v USA. Fluidní technika má velice široké uplatnění, a to jak v průmyslu, tak v hutnictví i energetice. Jedním z příkladů využití fluidní techniky v průmyslu je pražení pyritu pro výrobu kyseliny sírové. [1]

2.7 Koncepce fluidních kotlů

Návrh a realizace fluidních kotlů je vždy závislá na účelu použití daného kotle. Fluidní kotle z pohledu charakteristiky fluidní vrstvy rozdělujeme do tří kategorií. První z nich je fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou, dále s expandující fluidní vrstvou a poslední typ je fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou. Fluidní kotle se dále rozlišují dle teplotní úrovně, a to na kotle se škvárovým procesem a kotle s bezškvárovým procesem. Přechod mezi těmito procesy je okolo teploty 1000 °C ve fluidní vrstvě. [2]

2.7.1 Fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou

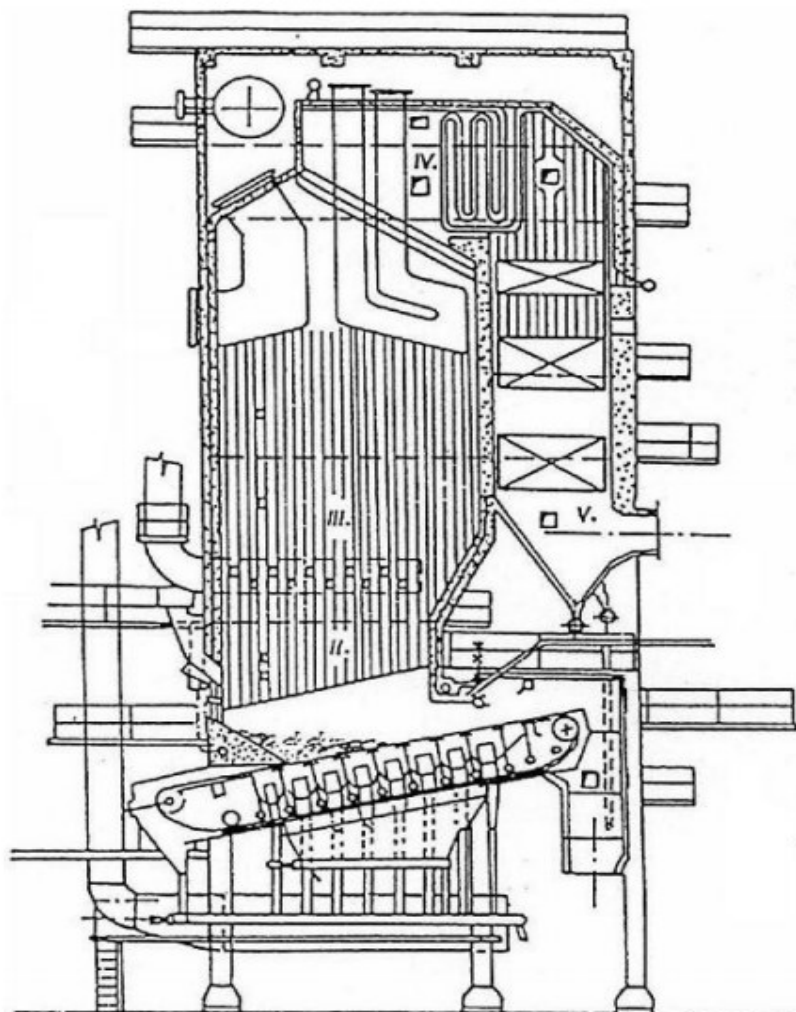
Fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou je typický svou zřetelnou hladinou a velkým úletem pevných částic z fluidní vrstvy. Tyto částice se odvádějí buďto do předem připravených zásobníků, nebo se vracejí zpět do fluidní vrstvy. Takovýto typ kotle dokáže pracovat ve dvou režimech: spalovacím nebo zplyňovacím. Rozdíl mezi těmito procesy je součinitel přebytku vzduchu α , s kterým kotel pracuje. [2]

U spalovacího režimu, kdy kotel pracuje s přebytkem spalovacího vzduchu $\alpha > 1$ se fluidní vrstva tvoří 95–98 % inertním materiálem a 2–5 % palivem. Teplota fluidní vrstvy se pohybuje mezi 850–900 °C. Samotná regulace se zajišťuje pomocí teplosměnných ploch, které jsou umístěny uvnitř fluidní vrstvy. [2]

V případě zplyňovacího kotle, kdy se přebytek spalovacího vzduchu volí $\alpha < 1$, je fluidní vrstva tvořena z 80 % inertním materiálem a z 20 % palivem. V důsledku „nedokonalého“ spalování se z fluidní vrstvy uvolňují plyny (v největším zastoupení CO), které se postupně spolu se sekundárním vzduchem, který je do kotle přiváděn, spalují až ve II. stupni kotle. [2]

Posledním typem fluidních kotlů se stacionární fluidní vrstvou je kotel škarující. V České republice tento kotel nese název IGNIFLUID (viz Obr. 2.5) a spalují se v něm převážně černé, kaloricky kvalitní typy uhlí. Částice uhlí o maximální granulometrii 20 mm vstupují do fluidní vrstvy s parametry $\alpha < 1$ a teplotou v rozsahu 1100–1200 °C, kde dochází k jejich odplynění a vzniklý plyn putuje nad fluidní vrstvou, kde spolu se sekundárním vzduchem vyhořívá při teplotě 1200–1300 °C. Zbylé neodplyněné částice a popeloviny, které se při těchto teplotách spečou, dopadají vlivem gravitační síly dolů na rošt, a ten je postupně vynáší ven z kotle. Jednou z předností tohoto typu kotle je, že při odstavení dokáže kotel pracovat v mnohahodinové rezervě. [2]

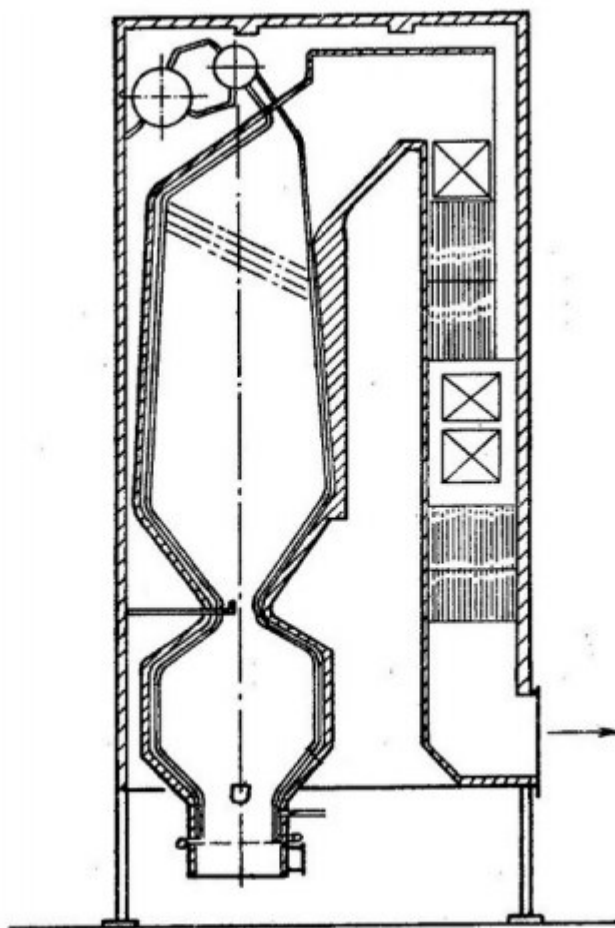
S postupným využíváním těchto typů kotlů se ukázalo, že spalování paliva ve stacionární fluidní vrstvě s sebou nese řadu nevýhod jako je vyšší tvorba emisí CO, složitější regulace teploty fluidní vrstvy, či velký úlet pevných částic z fluidní vrstvy. [2]



Obr. 2.5 Schéma fluidního kotle typu IGNIFLUID [2]

2.7.2 Fluidní kotel s expandující fluidní vrstvou

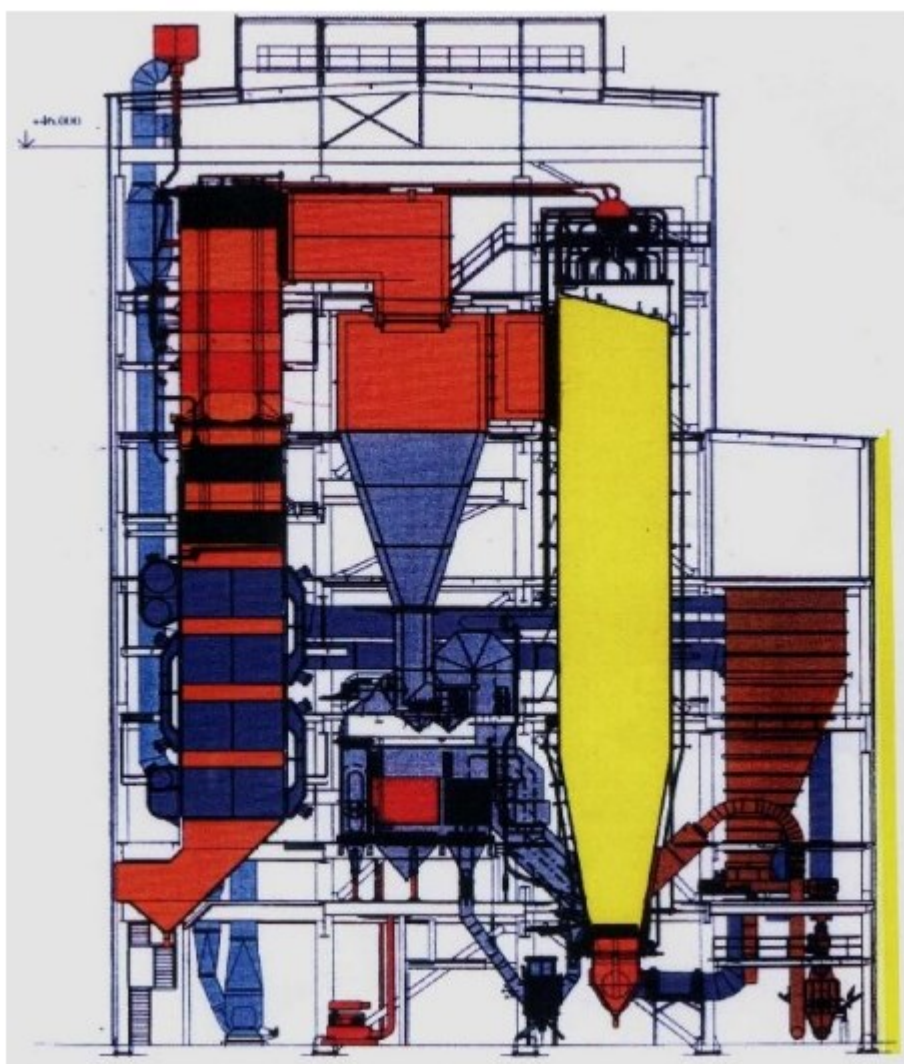
Typickou vlastností expandující fluidní vrstvy je její cirkulace mezi roštem a koncem ohniště. Z toho vyplývá, že veškerá cirkulace probíhá vně fluidní komory, proto se těmto kotlům též říká „kotle s vnitřní cirkulací“. V České republice je tento typ zastoupen systémem DUKLAFLUID, který je rozřazen do dvou typů dvoustupňového fluidního ohniště. Jeden z nich má fluidní ohniště připojeno k boku spalovací komory, a v druhém z případů je ve spodní části umístěn zplyňovací reaktor a až nad ním spalovací komora (viz Obr. 2.6). Tyto komory jsou od sebe odděleny zúženým prostorem. Největší výhodou kotlů DUKLAFLUID je možnost spalování uhlí s vyšším obsahem popelovin a s nízkou výhřevností (od 5 MJ/kg). Další výhodou je možnost spalování hlušiny i tekutých odpadů, zároveň kotle DUKLAFLUID stejně jako kotle IGNIFLUID dokáží při odstávce přejít do mnohahodinové rezervy. [2,3]



Obr. 2.6 Schéma kotle DUKLAFLUID druhého typu [3]

2.7.3 Fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou

Pro fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou je typické, že dochází k cirkulaci paliva, inertu a aditiva mezi spalovací komorou a cyklónovým odlučovačem. Cirkulující fluidní vrstva se charakterizuje rozdílnými vlastnostmi než předchozí fluidní vrstvy, a to převážně menší granulometrií paliva, vyšší rychlostí fluidace a není zde pevně stanovena hladina fluidní vrstvy. Částice paliva, které odletí ze spalovací komory, jsou v cyklónovém odlučovači odloučeny od spalin a putují zpátky do spalovací komory. Tímto je zajištěno lepší prohoření paliva a snižuje se mechanický nedopal. Jednou z výhod cirkulující fluidní vrstvy je možnost využít suché aditivní metody k odsíření spalin. [3]



Obr. 2.7 Schéma cirkulujícího kotle K12 v ENERGETICE Třinec

2.8 Paliva spalovaná ve fluidních ohništích

Fluidní technika má velice důležité a podstatné zastoupení v energetickém mixu státu, a to převážně z důvodu velkého rozsahu spalovaného materiálu. Lze zde spalovat paliva s nízkou výhřevností, odpad vznikající při těžbě černého uhlí a zároveň také komunální odpad anebo kapalný odpad. [3]

2.8.1 Spalování pevných paliv

Mezi pevná paliva spalovaná ve fluidních kotlích se řadí černé uhlí, hnědé uhlí, různé druhy biomasy a tuhý komunální odpad. Hlavní výhodou fluidního spalování je schopnost využít méněhodnotných paliv, které by jinak skončily na skládce. [3]

2.8.2 Spalování kapalných paliv

Kapalná paliva, která se spalují ve fluidní vrstvě jsou převážně silně znečištěná a mají velkou viskozitu, tudíž je není možno zpracovat v běžných hořácích. Jedná se o ropné deriváty a kapalně odpady. Největší využití je při spalování vysokoviskózních dehtů a mazutových zbytků. Kapalně odpady mají ideální možnost spálení právě ve fluidních ohništích, které dokáže spálit odpady s obsahem vody až do 80 % a to bez dávkování jiného stabilizačního paliva. Další nespornou výhodou fluidních kotlů je spalování organických sloučenin, které nelze zlikvidovat jiným způsobem. Do této kategorie patří různé organické jedy, kyanidy a fenoly. [3]

2.9 Výhody a nevýhody fluidního spalování

V této kapitole jsou popisovány výhody a nevýhody spalování ve fluidních ohništích.

2.9.1 Výhody fluidního spalování

- Pevné částice jsou dokonale promíseny a reagují tak celým svým povrchem s proudícím médiem.
- V průběhu fluidního spalování dochází k intenzivnímu přenosu tepla a hmoty mezi médiem a pevnými částicemi.
- Vzhledem k nižší teplotě spalování kolem 850 °C dochází k redukci NO_x ve spalinách.
- Možnost spalování vícero paliv najednou.

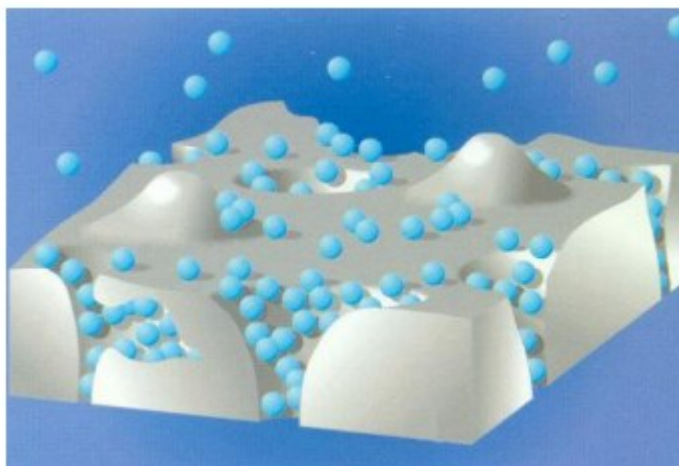
- Jednoduché konstrukční řešení celého zařízení.
- Možnost spalování nízkovýhřevných materiálů jako jsou odpady apod.
- Lze aplikovat aditivní odsíření spalin přímo ve fluidní vrstvě.

2.9.2 Nevýhody fluidního spalování

- Větší množství úletu méně hmotných částic.
- Vyšší opotřebení stěn fluidní komory z důvodu abrazních účinků pevných částic.
- Vyšší spotřeba fluidizačního média.
- Doba setrvání částice ve fluidním zařízení není díky intenzivnímu promíchávání stejně dlouhá, a tím se mění kvalita produktu.

3 Adsorpce

Pro tuto diplomovou práci je pojem adsorpce velice důležitý, a to zvlášť adsorpce plynných látek na látkách pevných, neboť navrhované zařízení je primárně určeno pro výzkum sorpce těžkých kovů obsažených ve spalinách K adsorpci dochází přiblížením molekul plynu k povrchu pevné látky a k následnému zachycení na tomto povrchu. Při tomto ději je plyn nazýván *adsorptivem* a pevná látka, na kterou se adsorptiv zachycuje se nazývá *adsorbent*.



Obr. 3.1 Adsorpce plynné látky na pevném povrchu [15]

Podle druhu vzniku se adsorbenty dělí na umělé a přírodní. Přírodní bývají převážně na bázi sloučenin křemíku, hliníku nebo se může jednat o dřevěné uhlí a saze. Uměle vyrobené jsou rezidua chemických, petrochemických či koksárenských procesů. Mezi uměle vyrobené adsorbenty patří aktivní uhlí či silikagel.

Porozita látek a stanovení specifického povrchu

Každá látka má specifický povrch, který je tvořen různými strukturami jako jsou různé záhyby, plochy, hrany a dutiny. Každá látka má jiný specifický povrch v závislosti na její struktuře. Může se tedy jednat o krystalickou látku nebo látku amorfni.

Specifickým povrchem se myslí plocha povrchu dané látky ku její hmotnosti, tudíž má jednotku m^2/g . U této veličiny rozlišujeme vnitřní a vnější plochu povrchu. Jako vnější uvažujeme veškeré nerovnosti a vnitřní pak póry a dutiny

Póry lze dělit dle velikosti:

- Makropóry $\Phi > 10^{-7}$ m
- Přechodné póry 10^{-7} m $> \Phi > 10^{-9}$ m
- Mikropóry $\Phi < 10^{-9}$ m

Velikost plochy povrchu pevných látek lze zjistit například pomocí metody adsorpce plynné fáze s využitím rovnice:

$$S_p = N_A \cdot m_g \cdot \sigma, \quad (3.1)$$

kde:

S_p – specifický povrch ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$),

N_A – Avogadrova konstanta (mol^{-1}),

m_g – množství plynu ($\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$),

σ – plocha, kterou zaujímá jedna molekula plynu na povrchu látky (m^2).

Avogadrova konstanta je známé číslo: $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Množství plynu se určí z analytických měření, kdy se nejprve určí adsorpční izoterma a poté stanoví celková plocha σ .

Naměřené hodnoty se samozřejmě mohou lišit z důvodu rozdílné velikosti pórů a velikosti molekul použitého plynu. Měření se proto opakuje vícekrát s použitím různého adsorpčního plynu z důvodu stanovení vhodného porózního materiálu pro dané medium. Čím menší je velikost molekul plynu, tím větší je výsledný specifický povrch, a tedy adsorpční vlastnosti zkoumané látky.

Důležitou vlastností sorbentů je souhrnný objem pórů na jednotku hmotnosti. Jedná se o porovnání skutečné a zdánlivé hustoty testovaného materiálu. Zdánlivá hustota látky je hmotnost objemu zrn dané látky, za předpokladu vyloučení meziprostoru mezi zrny. Pro vyplnění meziprostoru lze využít pyknometrické metody, která spočívá ve vyplnění volného prostoru rtuťí. Skutečnou hustotu dané látky zjistíme vyloučením objemu všech pórů za pomoci vhodného plynu např. hélia (neadsorbuje se, ale dobře proniká do všech pórů).

Poté lze stanovit rozměry některou z metod:

- Optickou, kdy na mikroskopickém řezu lze stanovit přesné tvary a objemy
- Rtuťovou porozimetrií, kdy velikost poloměru pórů je určována z tlaku potřebného na vyplnění jejich objemu daným množstvím rtuťi.
- Pomocí adsorpčních izoterm

Pokud tedy provedeme tento rozbor, můžeme uvažovat o vhodnosti využití daného adsorbentu pro námi požadované účely. Např. sorpci škodlivin apod. [15,16]

4 Záchyt těžkých kovů na sorbentech

Metody pro zachycování těžkých kovů (převážně rtuti) ze spalin pomocí dávkování sorbentů byly původně navrženy pro spalovny komunálního odpadu (SKO). Tyto metody se konkrétně týkají vstřikovávání aktivního uhlí do spalin a následným záchytem na tkaninových filtrech. Ovšem ne všechny metody, které jsou vhodné pro použití ve SKO lze uplatnit

i u spalování uhlí. Rozdílná účinnost záchytu je dána různou koncentrací těžkých kovů v palivu, spalovacích podmínkách a složení spalin.

4.1.1 Sorbenty na bázi vápníku

Sorbenty na bázi vápníku mají v praxi široké zastoupení zejména při zachycování rtuti ve spalovnách komunálního odpadu z důvodu vysoké účinnosti zachytávání HgCl_2 při minimálních koncentracích SO_2 a při nízkých teplotách. Mezi nejpopulárnější vápníkové sorbenty patří CaCO_3 , Ca(OH)_2 , Advacatova směs (úletový popílek + Ca(OH)_2) a modifikovaná Advacatova směs (úletový popílek + Ca(OH)_2 + povrchově aktivní látka). Ovšem na základě studie Ghorishe a Gulletta (1998) bylo prokázáno, že Ca(OH)_2 a modifikovaná Advacatova směs mají přibližně stejnou adsorpční kapacitu.

4.1.2 Sorbent na bázi aktivního uhlí

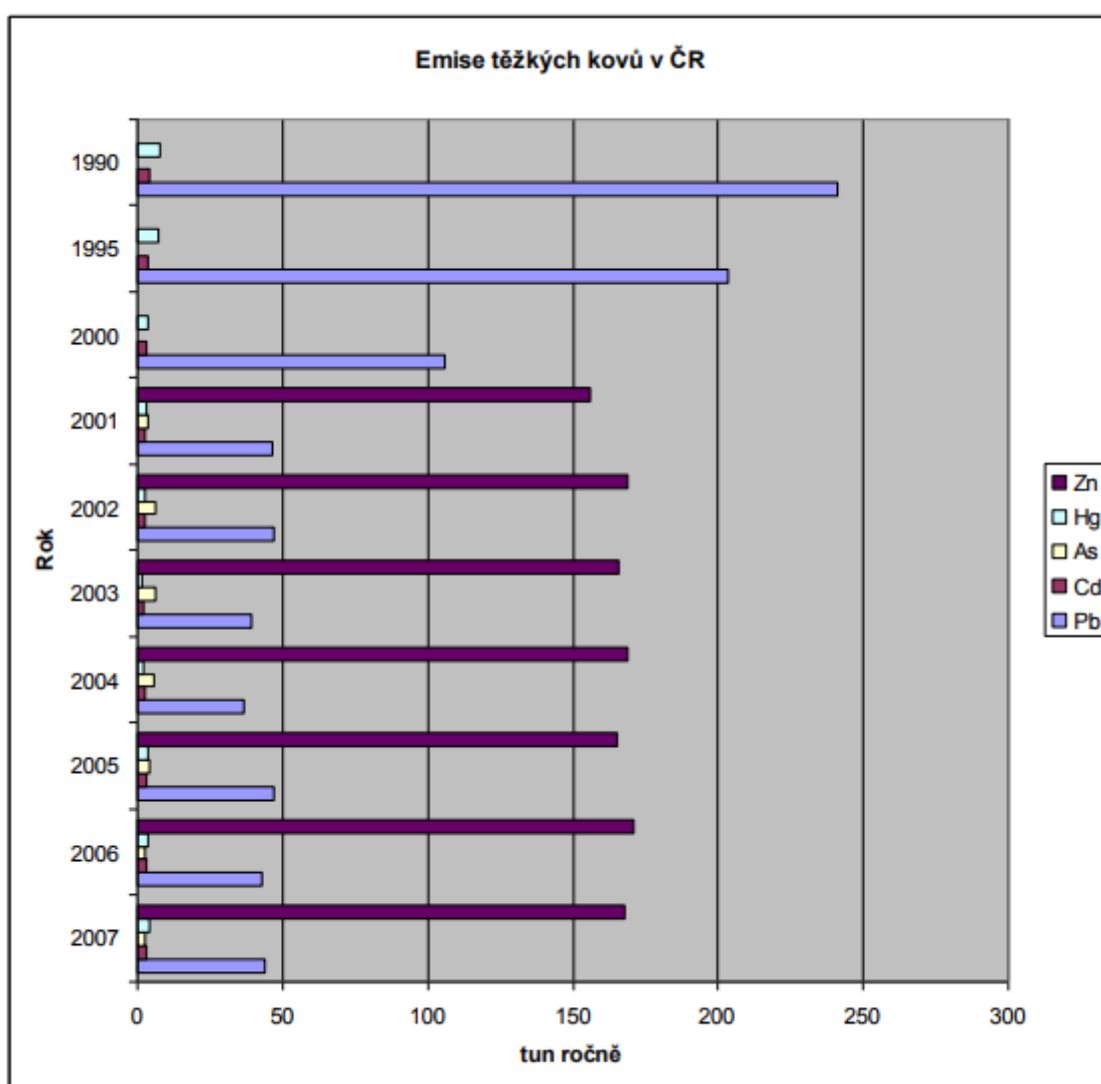
Sorbenty na bázi aktivního uhlí jsou v současnosti považovány za sorbenty s největší účinností pro záchyt rtuti. V praxi se ukázalo, že aktivní uhlí připraveno z hnědého uhlí má větší specifický povrch a vyšší obsah chlóru, než uhlí vyrobeno z uhlí černého. Proto se aktivní uhlí vyrobeno z hnědého uhlí považuje za lepší sorpční materiál. Jsou zde také dvě možnosti pro zvýšení účinnosti těchto sorbentů. První z nich je aktivace uhlí pomocí páry, a druhou z možností je nasycení aktivního uhlí sírou, chlórem nebo jódem. V současnosti je k dispozici široká škála laboratorně a komerčně vyráběného aktivního uhlí. Mezi ty nejdostupnější řadíme: WPL, BPL (Calgon), Kuraway-GW, DY (Dongyang), FGD (Norit), PC-100 (Norit) aj., aktivní uhlí CB-II (Sutcliffe) nebo HGR (Calgon) jsou pak ještě nasycená sírou.

4.1.3 Sorbenty na bázi úletového popílku

Z důvodu vysokých nákladů na skladování popílku s vysokým obsahem uhlíku vznikl počátkem 90. let nápad použít tento popílek pro záchyt rtuti. Byly prováděny testy, kdy se úletový popílek dávkoval před odlučovač tuhých částic. Účinnost takového sorbentu roste s povrchovou plochou, obsahem nedopalu v úletovém popílku, koncentrací rtuti ve spalinách a s poklesem teploty spalin. [12,13,14]

5 Vliv těžkých kovů na životní prostředí

V ČR se uhlí podílí zhruba z 60 % na výrobě tepla a elektrické energie, přičemž uhlí obsahuje celou řadu těžkých kovů (arsen, kadmium, rtuť, olovo, zinek, nikl, chrom apod.). Tyto kovy se mohou vyskytovat v různých chemických vazbách, které se dostanou spolu s palivem do spalovacího procesu. Pokud nejsou tyto prvky nijak odstraněny, jsou emitovány do okolí v plynném skupenství, ve formě aerosolů, vázány na částice prachu, odchází v popelu anebo jsou vypouštěny do odpadní vody, kde mohou tvořit ještě toxičtější sloučeniny. Tyto sloučeniny jsou nebezpečné jak pro lidský organismus, tak pro životní prostředí. Proto je potřeba s takovým materiálem patřičně nakládat, a to i nad rámec platné legislativy. Emise těžkých kovů není v ČR úplně zanedbatelná, jak lze vidět na grafu 5.1.



Graf 5.1 Emise vybraných těžkých kovů v ČR, dle hodnot ČHMÚ [11]

Těžké kovy mají tendenci se v lidském organismu usazovat a hromadit, stejně jako v ostatních živých organismech, přes které potravním řetězcem přijímáme další množství těžkých kovů. Jedním z příkladů je katastrofa, která se stala v Íránu, kdy se z kontaminovaného obilí otrávil přes 10 000 lidí a 3 000 lidí dokonce zemřelo. Zásadním problémem je fakt, že toxicita těchto kovů spočívá především v dlouhodobé expozici organismu malým dávkám. Je prokázán výrazně škodlivější účinek než například při expozici koncentrované škodliviny za kratší časovou periodu. Při určitých koncentracích pak byla prokázána toxicita pro organismus, ovlivnění centrální nervové soustavy, změna genetického kódu, vliv na plodnost, vliv na vznik karcinomů apod. Rtuť se velmi lehce po expozici či pozření váže na methalloprotein, podobně jako třeba kadmium a ukládá se v lidském těle. Toxicita těchto prvků zůstává stejná i za předpokladu, že se sloučí s jinými, méně nebezpečnými látkami obsaženými v emisích, případně se zoxidují nebo naváží na tuhé částice. [10]

6 Návrh a výpočet prototypového zařízení

Tato kapitola se již vztahuje k návrhu laboratorního zařízení pro výzkum sorpce těžkých kovů při spalování různých paliv ve fluidní vrstvě. Cílem je vypočítat potřebnou rychlost fluidizačního média, která zajistí dosažení prahu vnosu a spalování paliva ve fluidní vrstvě.

Jako inertní médium pro fluidní vrstvu byl zvolen sklářský písek (typové označení ST 54), neboť tento typ byl již vyzkoušen a osvědčil se. Pro výpočet fluidace je nutné znát hodnoty vybraných vlastností písku. Jejich souhrn je následující:

Velikost středního zrna	0,23 mm
Vyplavitelné látky	0,3 %
Ztráta žíháním	0,22 %
Sypná hmotnost	1,5 kg/l
Bod tání	1780 °C
Hustota	2650 kg/m ³
Spékavost	1560 °C
Vlhkost v suchém stavu (max.)	0,2 %
Vlhkost v mokřém stavu (max.)	8,0 %
pH	8 [25]

Tab. 6.1 Specifikace sklářského písku ST 54

V našem případě, kdy střední velikost zrn činí 0,23 mm a hustota 2650 kg/m³, se dle Geldartova rozdělení (viz kap. 2.5) řadí do kategorie „**B**“. Tato klasifikace je pro výpočet velice důležitá z důvodu zvolení správných rovnic pro samotný výpočet

6.1 Stanovení postupu výpočtů rychlostí ve fluidní vrstvě

Dle dosavadních výzkumů máme na výběr z celé řady výpočtů pro stanovení parametrů fluidní vrstvy. Výpočet zvolený pro tento případ by měl být neoptimálnější z pohledu použitých materiálů a velikosti spalovací komory. Tyto výpočty by měly zaručovat stabilitu fluidní vrstvy při spalování, což je velice důležité z důvodu nasimulování co nejuvěrnějších podmínek, které odpovídají současným spalovacím jednotkám používaných v energetice.

6.1.1 Minimální rychlost fluidace vzhledem k vstupním parametrům U_{mf}

Minimální rychlost fluidace je minimální rychlost fluidizačního média, při kterém se fluidní vrstva začíná chovat jako kapalina a určí se z rovnice:

$$U_{mf} = \frac{Re_{mf} \cdot \eta}{d_p \cdot \rho_g}, \quad [\text{m/s}] \quad (6.1)$$

kde:

Re – Reynoldsovo číslo (–),

η – dynamická viskozita (Pa·s),

d_p – průměr částice (mm),

ρ_g – hustota média (kg/m³).

Reynoldsovo číslo je vyjádřeno:

$$Re = \frac{U_{mf} \cdot d_p \cdot \rho_g}{\eta} = \sqrt{(C_1^2 + C_2 \cdot Ar)} - C_1, \quad [-] \quad (6.2)$$

kde:

U_{mf} – minimální rychlost fluidace (m/s),

d_p – průměr částice (mm),

ρ_g – hustota média (kg/m³),

η – dynamická viskozita (Pa·s).

Konstanty C_1 a C_2 jsou hodnoty získané empirickým měřením z experimentů, popsaných v literatuře Grace [17]. Viz tabulka 6.2:

Author	C_1	C_2
Wen and Yu (1966)	33,7	0,0408
Richardson (1971)	25,7	0,0365
Saxena and Vogel (1977)	25,28	0,0571
Babu et al. (1978)	25,25	0,0651
Grace (1982)	27,2	0,0408

Tab. 6.2 Přehled konstant C_1 a C_2 a jejich zpřesnění, dle jednotlivých autorů

V našem případě byly zvoleny nejnovější hodnoty konstant: $C_1 = 27,2$ a $C_2 = 0,0408$.

Pro výpočet parametrů fluidní vrstvy se zavádí Archimedovo číslo Ar , které se v hydromechanice využívá pro rozložení nehomogenních roztoků. Toto číslo popisuje rozdílné hustoty mezi dvěma body roztoku, který je v tomto případě tvořen směsí vzduchu a písku.

Archimedovo číslo je vyjádřeno následujícím vztahem:

$$Ar = \frac{\rho_g(\rho_p - \rho_g) \cdot g \cdot d_p^3}{\eta^2}, \quad [-] \quad (6.3)$$

kde:

ρ_g – hustota média (kg/m^3),

ρ_p – hustota zrn (kg/m^3),

d_p – průměr částice (mm),

g – gravitační konstanta (m/s^2)

η – dynamická viskozita ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

6.1.2 Stanovení minimální rychlosti bublinkující fluidní vrstvy

Výpočet probublávání fluidní vrstvy je z velké části závislý na kategorizaci použitého materiálu (sklopísek ST 54). Jak je uvedeno v kapitole výše tento materiál odpovídá skupině „B“ v Geldartově rozdělení. Tato skupina charakterizuje materiály jako je písek a jim podobné. [4]

Pro bublinkující fluidní vrstvu je potřeba ověřit podmínku, že součin hustoty a střední velikosti částic je v rozhraní:

$$0,05 \leq \rho_p \cdot d_p \leq 0,7, \quad [-] \quad (6.4)$$

kde:

ρ_p – hustota zrn (kg/m^3),

d_p – průměr částice (mm).

V tomto případě:

$$\rho_p \cdot d_p = 2650 \cdot 0,00023 = 0,6095 \quad [-] \quad (6.5)$$

Tudíž je podmínka splněna a je potřeba provést kontrolní výpočet, v opačném případě by platilo, že je minimální rychlost rovna:

$$U_{mb} = U_{mf} , \quad [m/s] \quad (6.6)$$

Hledanou rychlost U_{mb} lze získat ze vzorové rovnice:

$$U_{mb} = \frac{2300 \cdot \rho_g^{0,33} \cdot \eta^{0,52} \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot U_{mf}}{d_p^{0,8} \cdot (\rho_p - \rho_g)^{0,93}} , \quad [m/s] \quad (6.7)$$

kde:

U_{mf} – minimální rychlost fluidace (m/s),

ρ_g – hustota média (kg/m³),

ρ_p – hustota zrn (kg/m³),

d_p – průměr částice (mm),

g – gravitační konstanta (m/s²)

η – dynamická viskozita (Pa·s).

6.1.3 Stanovení mezní rychlosti bublinkující fluidní vrstvy

Mezní rychlost bublinkující fluidní vrstvy U_t je hraniční rychlost mezi bublající fluidní vrstvou a turbulentní. Určí se z rovnice:

$$U_t = \frac{\eta}{d_p \cdot \rho_g} \cdot \left(\frac{Ar}{18} \right) , \quad [m/s] \quad (6.8)$$

Kde:

η – dynamická viskozita (Pa·s),

d_p – průměr částice (mm),

ρ_g – hustota média (kg/m³),

Ar – Archimédovo číslo (-).

Člen $\left(\frac{Ar}{18}\right)$ se mění v závislosti na Reynoldsově čísle:

$\left(\frac{Ar}{18}\right)$ platí v případě $0 \leq Re \leq 0,4$ (Stokesův zákon),

$\left(\frac{Ar}{7,5}\right)^{0,666}$ platí při $0,4 < Re \leq 500$ (Přechodový stav),

$\left(\frac{Ar}{0,33}\right)^{0,5}$ platí v případě $500 < Re$ (Newtonův zákon).

6.1.4 Přechod bublinkující fluidní vrstvy na turbulentní

Se stoupající rychlostí fluidizačního média (vzduchu) se médium blíží směrem k přechodové oblasti, kde postupně dosahujeme rychlosti počátku turbulentní fluidace. Fluidní vrstva se po dosažení této rychlosti ustálí v dané výšce, a to i nehlédě na navýšení rychlosti nosného média. Tento stav platí až do doby, kdy rychlost proudění vzroste až do výše, při které dochází k plnému přechodu na turbulentní fluidaci. [4]

U spalovacích komor s malými rozměry se stanoví fluidizační rychlost z empirických vztahů:

Pro nízké teploty:

$$u_c = 7\sqrt{\rho_p \cdot d_p} - 0,77, \quad [\text{m/s}] \quad (6.9)$$

Pro oblast vysokých teplot (500 – 900 °C):

$$u_c = 3\sqrt{\rho_p \cdot d_p} - 0,17, \quad [\text{m/s}] \quad (6.10)$$

kde:

ρ_p – hustota zrn (kg/m^3),

d_p – průměr částice (mm).

6.2 Samotný výpočet fluidizačních rychlostí

V této kapitole jsou za pomoci rovnic odvozených v přechodých kapitolách zjištěny rychlosti, které musí být dosaženy pro zajištění dostatečně kvalitní fluidní vrstvy. Výpočty jsou provedeny pro teploty 500–900 °C, tedy v rozsahu, ve kterém je plánováno spalovací komoru zařízení provozovat.

Teplota T [°C]	500	600	700	800	900
Hustota ρ_g [kg/m ³]	0,45	0,39	0,35	0,325	0,29
Měrná tep. kap. c_p [kJ/kg·K]	1092	1115	1135	1154	1170
Dynamická viskozita η [Pa·s]	$3,26 \cdot 10^{-5}$	$3,92 \cdot 10^{-5}$	$4,18 \cdot 10^{-5}$	$4,45 \cdot 10^{-5}$	$4,71 \cdot 10^{-5}$

Tab. 6.3 Fyzikální vlastnosti vzduchu v závislosti na teplotě

Výpočet pro 500 °C:

Výpočet Archimedova kritéria:

$$Ar = \frac{\rho_g(\rho_p - \rho_g) \cdot g \cdot d_p^3}{\eta^2} \quad [-] \quad (6.11)$$

$$Ar = \frac{0,451(2650 - 0,451) \cdot 9,81 \cdot 0,00023^3}{0,0000326^2} = 134,2 \quad (6.12)$$

Výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \sqrt{(C_1^2 + C_2 \cdot Ar)} - C_1 \quad [-] \quad (6.13)$$

$$Re = \sqrt{(27,2^2 + 0,0408 \cdot 134,2)} - 27,2 = 0,1005 \quad (6.14)$$

Výpočet minimální rychlosti fluidace:

$$U_{mf} = \frac{Re_{mf} \cdot \eta}{d_p \cdot \rho_g} \quad [\text{m/s}] \quad (6.15)$$

$$U_{mf} = \frac{0,1005 \cdot 0,0000326}{0,00023 \cdot 0,451} = 0,0316 \text{ m/s} \quad (6.16)$$

Výpočet minimální rychlosti počátku probublávání fluidní vrstvy:

$$U_{mb} = \frac{2300 \cdot \rho_g^{0,33} \cdot \eta^{0,52} \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot U_{mf}}{d_p^{0,8} \cdot (\rho_p - \rho_g)^{0,93}} \quad [\text{m/s}] \quad (6.17)$$

$$U_{mb} = \frac{2300 \cdot 2650^{0,33} \cdot 0,0000326^{0,52} \cdot (2650 - 0,451) \cdot 0,0316}{0,00023^{0,8} \cdot (2650 - 0,451)^{0,93}} = 0,2842 \text{ m/s} \quad (6.18)$$

Výpočet mezní rychlosti bublinkující vrstvy:

$$U_t = \frac{\eta}{d_p \cdot \rho_g} \cdot \left(\frac{Ar}{18}\right) \quad [\text{m/s}] \quad (6.19)$$

$$U_t = \frac{0,0000326}{0,00023 \cdot 0,451} \cdot \left(\frac{134,2}{18}\right) = 2,343 \text{ m/s} \quad (6.20)$$

Výpočet rychlosti, kdy dojde k přechodu z bublinkující na turbulentní fluidní vrstvu:

$$u_c = 3\sqrt{\rho_p \cdot d_p} - 0,17 \quad [\text{m/s}] \quad (6.21)$$

$$u_c = 3\sqrt{2650 \cdot 0,00023} - 0,17 = 2,172 \text{ m/s} \quad (6.22)$$

Výpočet pro 600 °C:

Výpočet Archimedova kritéria:

$$Ar = \frac{0,39(2650-0,39) \cdot 9,81 \cdot 0,00023^3}{0,0000392^2} = 80,3 \quad (6.23)$$

Výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \sqrt{(27,2^2 + 0,0408 \cdot 80,3)} - 27,2 = 0,0601 \quad (6.24)$$

Výpočet minimální rychlosti fluidace:

$$U_{mf} = \frac{0,0601 \cdot 0,0000392}{0,00023 \cdot 0,39} = 0,0263 \text{ m/s} \quad (6.25)$$

Výpočet minimální rychlosti počátku probublávání fluidní vrstvy:

$$U_{mb} = \frac{2300 \cdot 2650^{0,33} \cdot 0,0000392^{0,52} \cdot (2650-0,39) \cdot 0,0263}{0,00023^{0,8} \cdot (2650-0,39)^{0,93}} = 0,2481 \text{ m/s} \quad (6.26)$$

Výpočet mezní rychlosti bublinkující vrstvy:

$$U_t = \frac{0,0000392}{0,00023 \cdot 0,39} \cdot \left(\frac{80,3}{18}\right) = 1,95 \text{ m/s} \quad (6.27)$$

Výpočet rychlosti, kdy dojde k přechodu z bublinkující na turbulentní fluidní vrstvu:

$$u_c = 3\sqrt{2650 \cdot 0,00023} - 0,17 = 2,172 \text{ m/s} \quad (6.28)$$

Výpočet pro 700 °C:

Výpočet Archimedova kritéria:

$$Ar = \frac{0,35(2650-0,35) \cdot 9,81 \cdot 0,00023^3}{0,0000418^2} = 63,35 \quad (6.29)$$

Výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \sqrt{(27,2^2 + 0,0408 \cdot 63,35)} - 27,2 = 0,04747 \quad (6.30)$$

Výpočet minimální rychlosti fluidace:

$$U_{mf} = \frac{0,04747 \cdot 0,0000418}{0,00023 \cdot 0,35} = 0,02465 \text{ m/s} \quad (6.31)$$

Výpočet minimální rychlosti počátku probublávání fluidní vrstvy:

$$U_{mb} = \frac{2300 \cdot 2650^{0,33} \cdot 0,0000418^{0,52} \cdot (2650 - 0,35) \cdot 0,02465}{0,00023^{0,8} \cdot (2650 - 0,35)^{0,93}} = 0,2323 \text{ m/s} \quad (6.32)$$

Výpočet mezní rychlosti bublinkující vrstvy:

$$U_t = \frac{0,0000418}{0,00023 \cdot 0,35} \cdot \left(\frac{63,35}{18}\right) = 1,8275 \text{ m/s} \quad (6.33)$$

Výpočet rychlosti, kdy dojde k přechodu z bublinkující na turbulentní fluidní vrstvu:

$$u_c = 3\sqrt{2650 \cdot 0,00023} - 0,17 = 2,172 \text{ m/s} \quad (6.34)$$

Výpočet pro 800 °C:

Výpočet Archimedova kritéria:

$$Ar = \frac{0,325(2650 - 0,325) \cdot 9,81 \cdot 0,00023^3}{0,0000445^2} = 51,9 \quad (6.35)$$

Výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \sqrt{(27,2^2 + 0,0408 \cdot 51,9)} - 27,2 = 0,0389 \quad (6.36)$$

Výpočet minimální rychlosti fluidace:

$$U_{mf} = \frac{0,0389 \cdot 0,0000445}{0,00023 \cdot 0,325} = 0,0232 \text{ m/s} \quad (6.37)$$

Výpočet minimální rychlosti počátku probublávání fluidní vrstvy:

$$U_{mb} = \frac{2300 \cdot 2650^{0,33} \cdot 0,0000445^{0,52} \cdot (2650 - 0,325) \cdot 0,0232}{0,00023^{0,8} \cdot (2650 - 0,325)^{0,93}} = 0,2199 \text{ m/s} \quad (6.38)$$

Výpočet mezní rychlosti bublinkující vrstvy:

$$U_t = \frac{0,0000445}{0,00023 \cdot 0,325} \cdot \left(\frac{51,9}{18}\right) = 1,7167 \text{ m/s} \quad (6.39)$$

Výpočet rychlosti, kdy dojde k přechodu z bublinkující na turbulentní fluidní vrstvu:

$$u_c = 3\sqrt{2650 \cdot 0,00023} - 0,17 = 2,172 \text{ m/s} \quad (6.40)$$

Výpočet pro 900 °C:

Výpočet Archimedova kritéria:

$$Ar = \frac{0,29(2650 - 0,29) \cdot 9,81 \cdot 0,00023^3}{0,0000471^2} = 41,343 \quad (6.41)$$

Výpočet Reynoldsova čísla:

$$Re = \sqrt{(27,2^2 + 0,0408 \cdot 41,343)} - 27,2 = 0,031 \quad (6.42)$$

Výpočet minimální rychlosti fluidace:

$$U_{mf} = \frac{0,031 \cdot 0,0000471}{0,00023 \cdot 0,29} = 0,0219 \text{ m/s} \quad (6.43)$$

Výpočet minimální rychlosti počátku probublávání fluidní vrstvy:

$$U_{mb} = \frac{2300 \cdot 2650^{0,33} \cdot 0,0000471^{0,52} \cdot (2650 - 0,29) \cdot 0,0219}{0,00023^{0,8} \cdot (2650 - 0,29)^{0,93}} = 0,2061 \text{ m/s} \quad (6.44)$$

Výpočet mezní rychlosti bublinkující vrstvy:

$$U_t = \frac{0,0000471}{0,00023 \cdot 0,29} \cdot \left(\frac{41,343}{18} \right) = 1,6219 \text{ m/s} \quad (6.45)$$

Výpočet rychlosti, kdy dojde k přechodu z bublinkující na turbulentní fluidní vrstvu:

$$u_c = 3\sqrt{2650 \cdot 0,00023} - 0,17 = 2,172 \text{ m/s} \quad (6.46)$$

V následující tabulce 6.4 je uveden souhrn všechny vypočtených hodnot, z niž vyplývá, že s rostoucí teplotou se snižují rychlosti potřebné pro vytvoření fluidní vrstvy.

Teplota T [°C]	500	600	700	800	900
Archimédovo kritérium Ar [-]	134,2	80,3	63,35	51,9	41,343
Reynoldsovo číslo Re [-]	0,1005	0,0601	0,04747	0,0389	0,031
Minimální rychlost fluidace U_{mf} [m/s]	0,0316	0,0263	0,02465	0,0232	0,0219
Min. rychlosti počátku probublávání fluidní vrstvy U_{mb} [m/s]	0,2842	0,2481	0,2323	0,2199	0,2061
Mezní rychlosti bublinkující vrstvy U_t [m/s]	2,343	1,95	1,8275	1,7167	1,6219
Rychlost přechodu z bubl. na turb. vrstvu u_c [m/s]	2,172	2,172	2,172	2,172	2,172

Tab. 6.4 Souhrn vypočtených hodnot

7 Návrh a realizace prototypového fluidního zařízení

Na základě výpočtů, kdy byly zjištěny potřebné rychlosti pro fluidaci a dostupností horkovzdušných dmychadel bylo navrženo prototypové fluidní zařízení tak, aby byly splněny právě vypočtené rychlosti v závislosti na průtoku vzduchu a rozměrech kanálu. Důkladnější popis rozměrů je popsán v kapitole 7.1. Koncepční návrh zařízení je na obrázku 7.1.

Při koncepčním návrhu se vycházelo ze základních požadavků na zařízení kladených, a sice zajistit:

- požadované množství a teplotu spalovacího/fluidizačního vzduchu,
- potřebnou teplotu ve spalovacím prostoru,
- možnost optické kontroly spalovacího prostoru,
- přívod paliva,
- chlazení a odvod vzniklých spalin,
- čištění spalin od pevných částic,
- možnost vložení vzorku aktivního koksu do spalinové cesty,
- měření teplot, tlaků, průtoků a koncentrací ve vybraných měřících bodech.

Zajištění uvedených požadavků je představeno v následujících kapitolách.

Popis schématu:

1 – Horkovzdušné dmychadlo

2 – Příkladné zdroje tepla

3 – Frita

4 – Fluidní vrstva

5 – Příklad paliva

6 – Termočlánky

7 – Vstupy pro termočlánky

8 – Vstupy pro analyzátor spalin

9 – PID regulátor

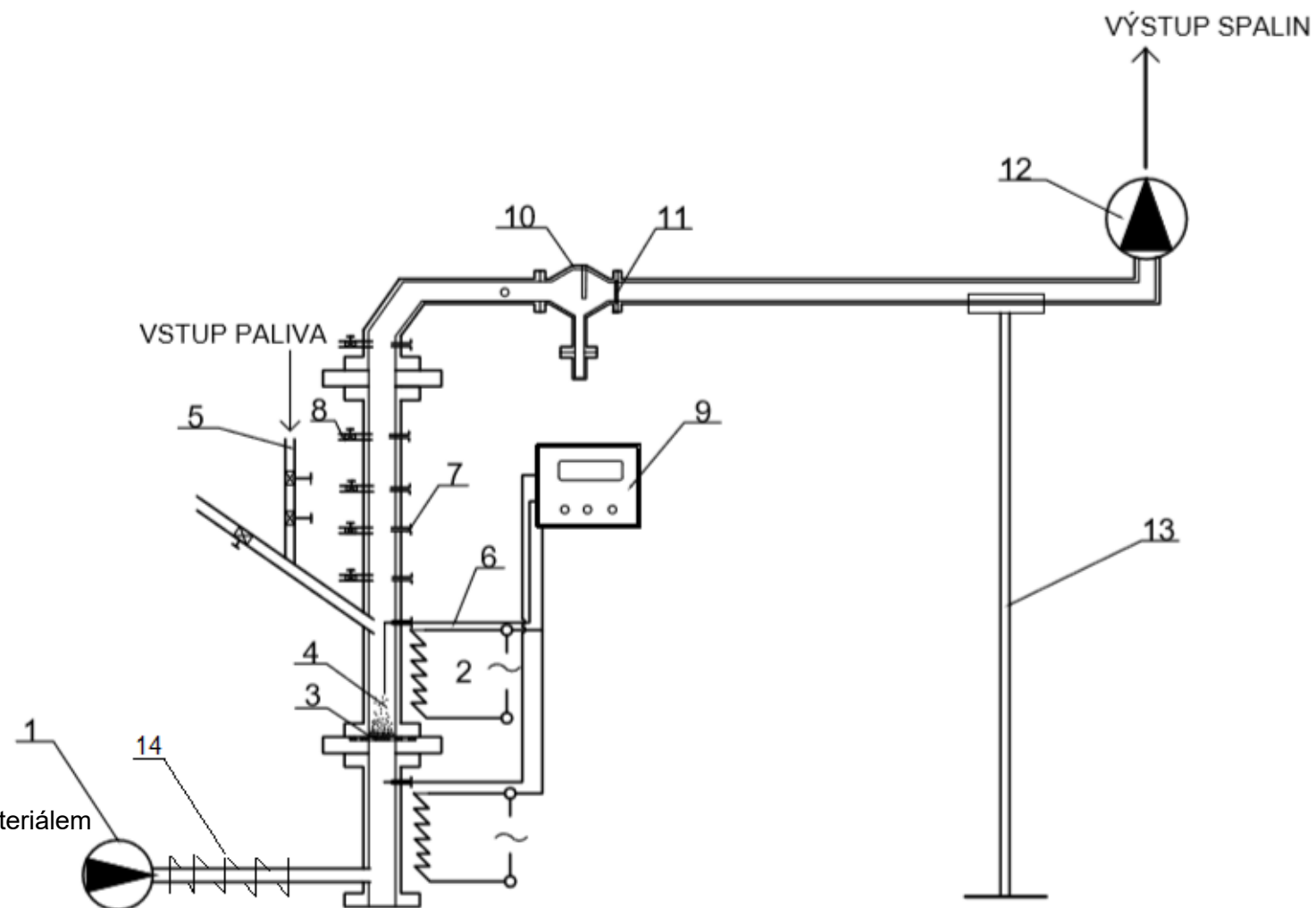
10 – Gravitační odlučovač částic

11 – Výřez na umístění filtru s aktivním materiálem

12 – Odtah spalin

13 – Podpěra

14 – Pásový ohříváč



Obr. 7.1 Schéma laboratorního zařízení

7.1 Volba základních rozměrů

Při volbě základních rozměrů byl brán v potaz fakt, aby zařízení bylo co nejmobilnější a přitom splňovalo veškeré technické požadavky, které na něj byly kladeny. Tloušťka plechu 1,5 mm byla zvolena z důvodu kompromisu mezi zajištěním dostatečné pevnosti zařízení a dobou, během které dojde k nahřátí kovu na požadovanou teplotu. Tato tloušťka byla zvolena již ve spodní části spalovacího zařízení, kde dochází k přechodu z trubkové části na část čtvercovou a pokračuje po celé výšce spalovacího zařízení až k poslední části, tudíž spalínovodu (viz obr. 7.7). Vnitřní rozměr kanálu 40 mm byl zvolen s ohledem na dodržení potřebných rychlostí k vytvoření fluidní vrstvy.

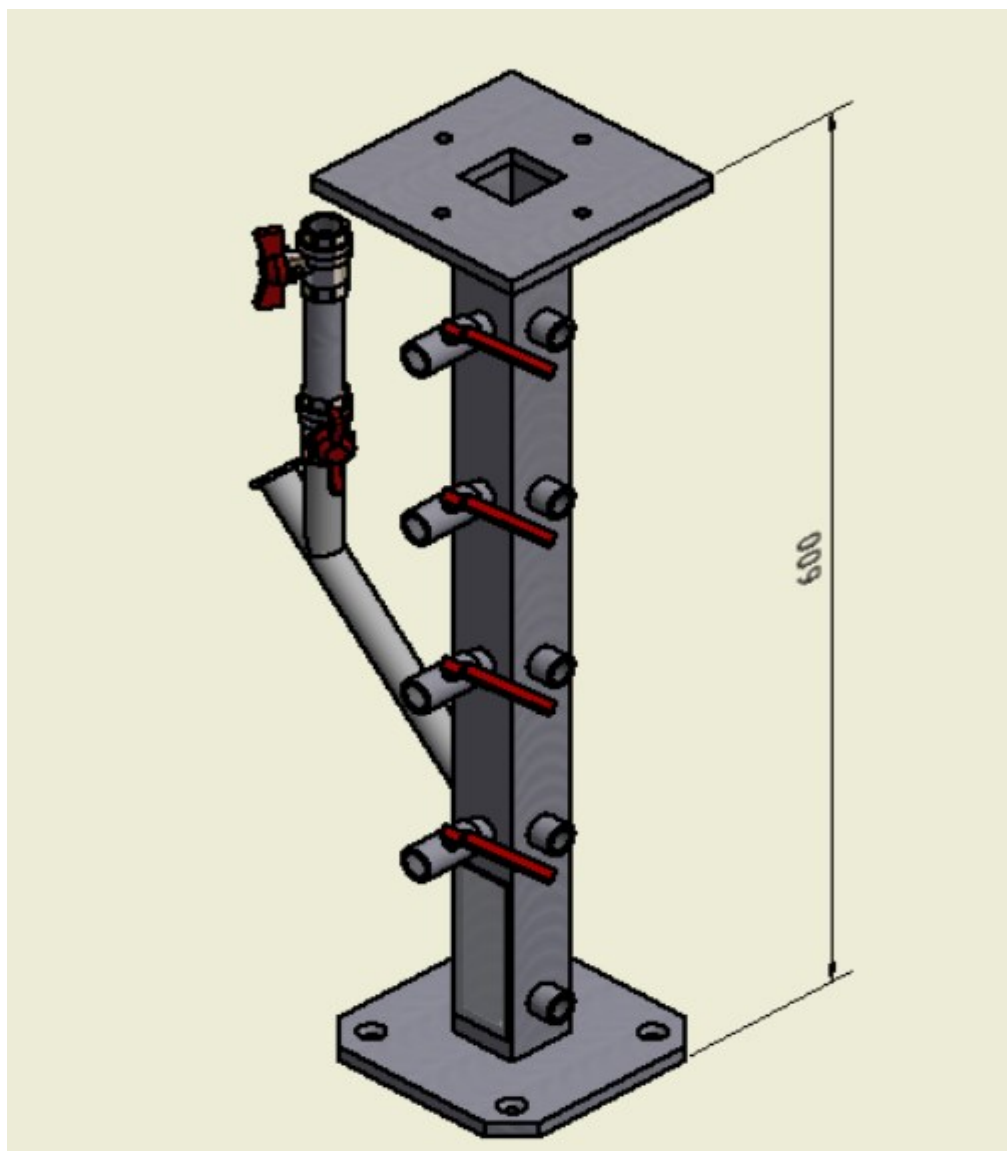
Výška středové části zařízení byla zvolena 600 mm a to z toho důvodu, aby byla zajištěna výška fluidní vrstvy, prostor pro spálení a dostatečný prostor pro umístění bočního přívodu paliva.

Rozměry hliníkového rámu, který nese fluidní zařízení (viz obr. 7.9) byly zvoleny hlavně s ohledem na pohodlné umístění veškerého vybavení, které je potřeba obsluhovat. Například horní dřevěná deska je umístěna ve výšce 800 mm, aby byl zajištěn snadný přístup k ovládání dmychadla a pásového ohříváče. Spodní kovová deska fluidního zařízení, která je spojena s hliníkovým rámem je umístěna ve výšce 1,2 m, a to hlavně z toho důvodu, aby byla fluidní vrstva ve výšce, ve které je jednoduché ji opticky zkontrolovat nebo snadno manipulovat s topným tělesem, které je právě na této desce položeno. Horní část celého zařízení, tedy spalínovod s odlučovačem a chladicí zónou je umístěn ve výšce 2 m a to ze stejného důvodu jako u předchozích pozic. Délka vrchní části byla zvolena tak, aby byl zajištěn odvod spalin z místnosti a rovněž aby mohla být pod horní rameno umístěna podpěra, která snižuje namáhání šroubů držících spalínovod.

7.2 Konstrukce fluidního zařízení

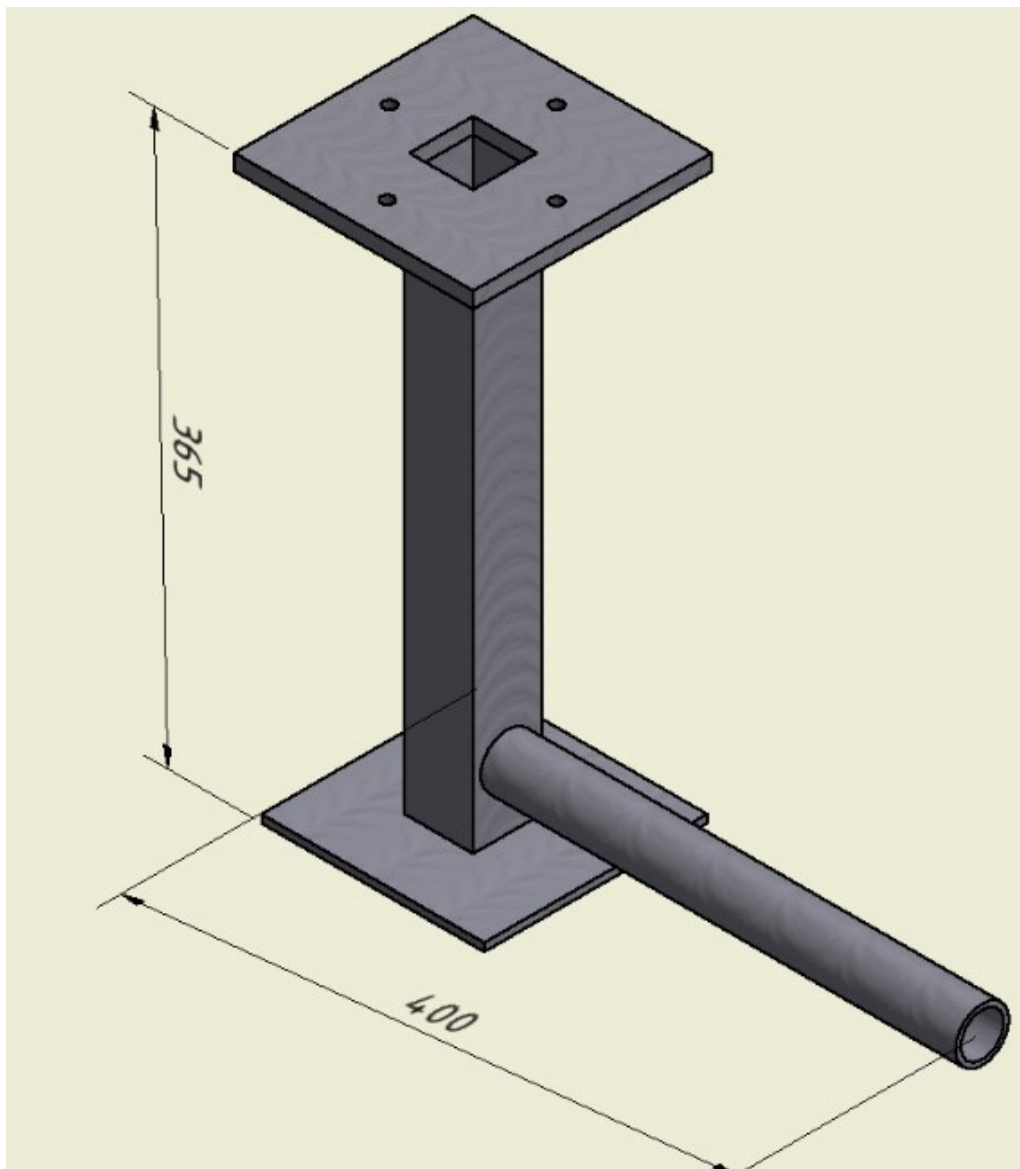
Fluidní zařízení bylo vyrobeno z žáruvzdorné nerezové oceli třídy 17 255 o tloušťce plechu 1,5 mm a vnitřním rozměru strany čtverce kanálu 40 mm. Tato ocel by měla bezpečně snést teploty až do 1000 °C, tedy teploty přesahující provozní teplotu zařízení. Veškerý postup návrhu prototypového zařízení je popsán v této kapitole. Celé zařízení bylo vymodelováno v programu Autodesk Inventor.

Prvním krokem bylo navržnutí prostřední části fluidního zařízení, tedy prostor spalovací komory, kde je umístěn průzor s žáruvzdorným sklem. Po výšce prostoru jsou vstupy pro termočlánky, případně odběrové sondy, pro které byly použity kulové ventily s pákou (3/8", závit vnitřní/vnitřní, materiál nerez AISI 316). Z boční strany je umístěn přívod paliva, který je zajištěn trubkou o rozměrech 21,4x200 s dvěma ventily pro zabránění přísátí falešného vzduchu a tím ochlazení spalovacího prostoru. Sestava střední části spalovací komory je zobrazena na obrázku 7.2.



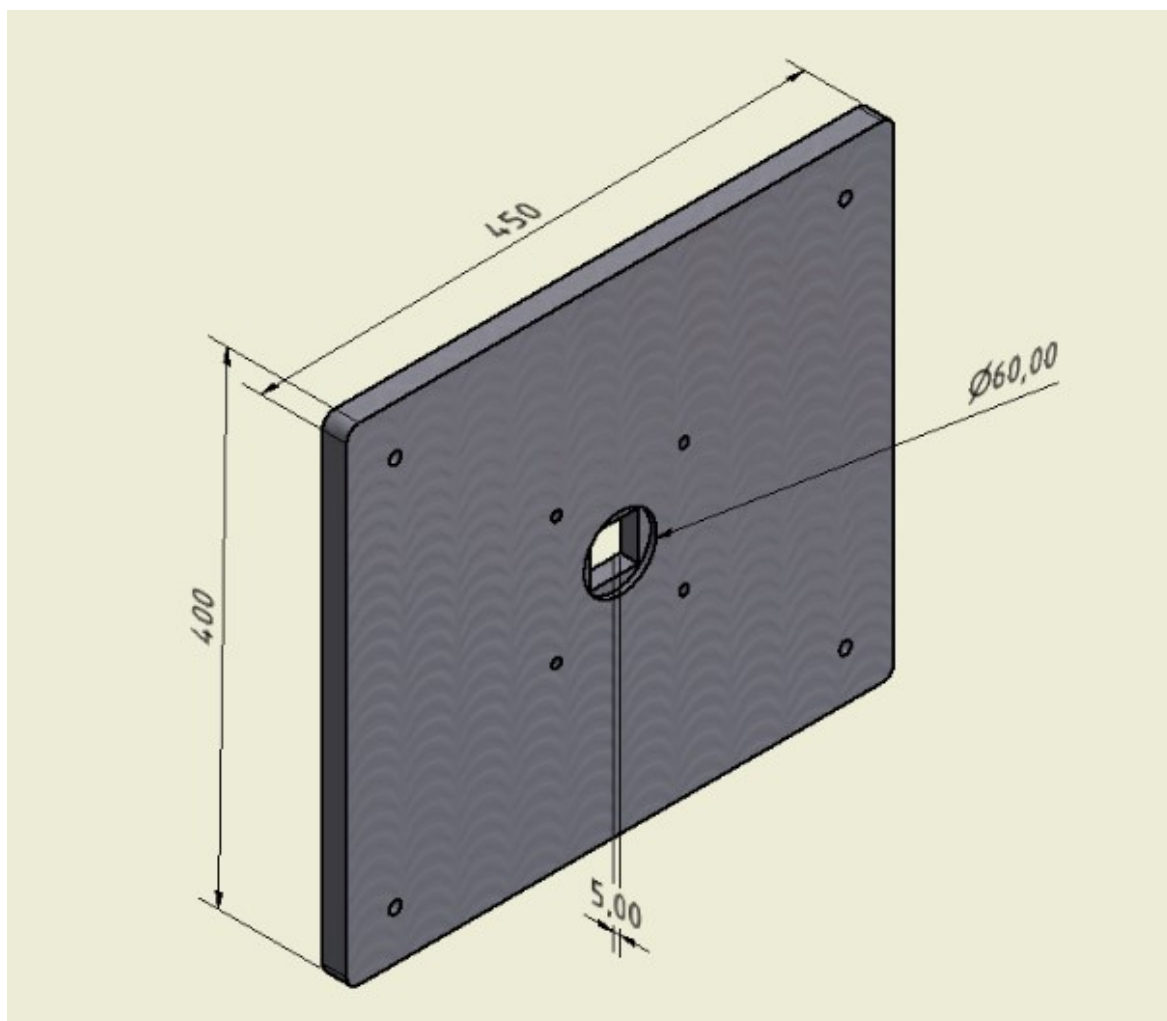
Obr. 7.2 Střední část spalovací komory

Dalším krokem bylo sestavení spodní části fluidního zařízení s přivodním potrubím vzduchu a podpěrou na které je posazeno jedno topné těleso (jeho specifikace viz kap.7.4.2). Tato sestava je zobrazena na obrázku 7.3.



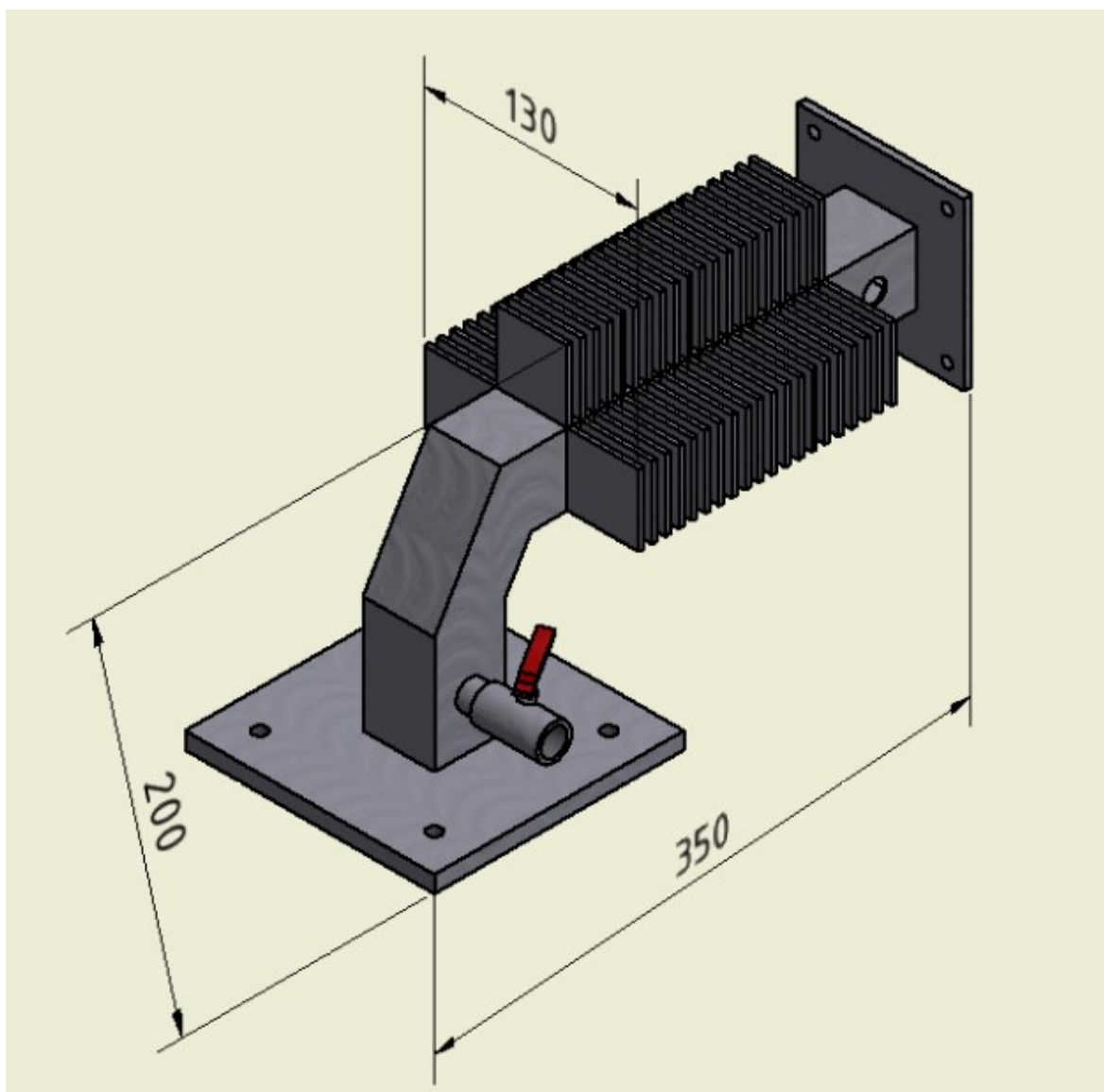
Obr. 7.3 Spodní část fluidního zařízení

Na obrázku 7.4 je zobrazena spodní velká kovová deska, která slouží pro upevnění fluidního zařízení na kovový rám a rovněž je v této desce vyfrézován otvor pro umístění frity (rozměry výřezu 60x5). Tato deska slouží jako spojovací kus pro střední a spodní část fluidního zařízení.

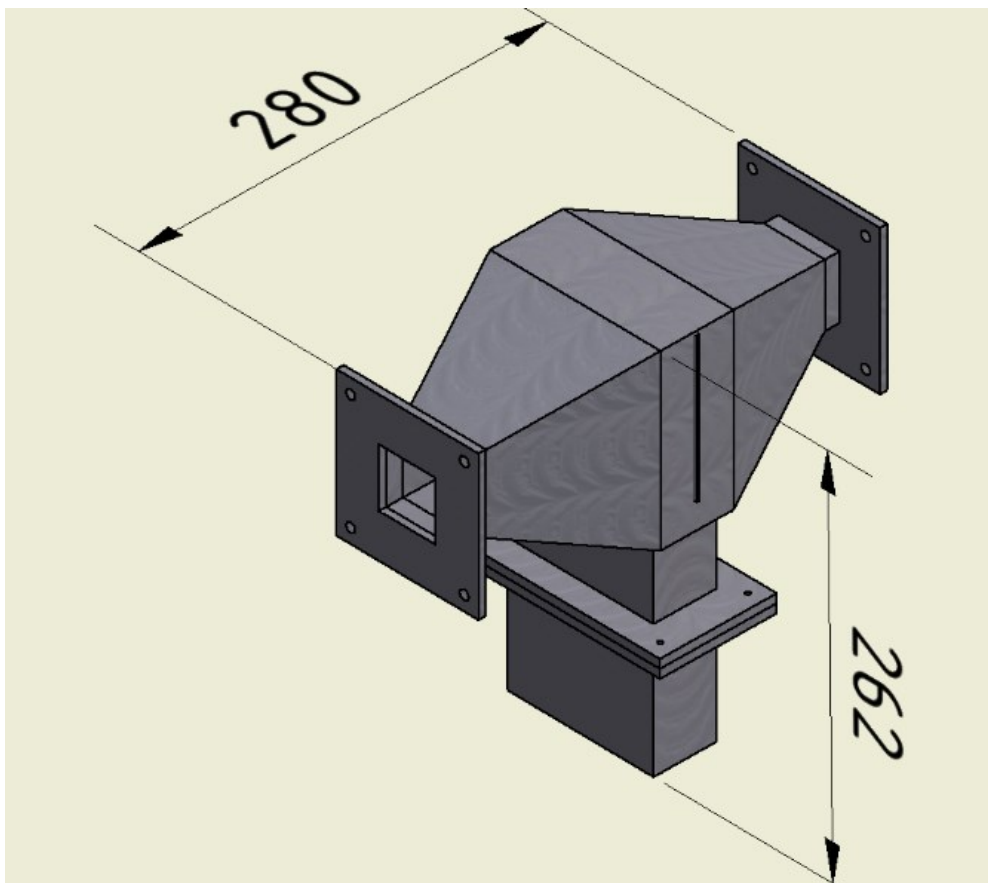


Obr. 7.4 Spodní kovová deska s výřezem pro fritu

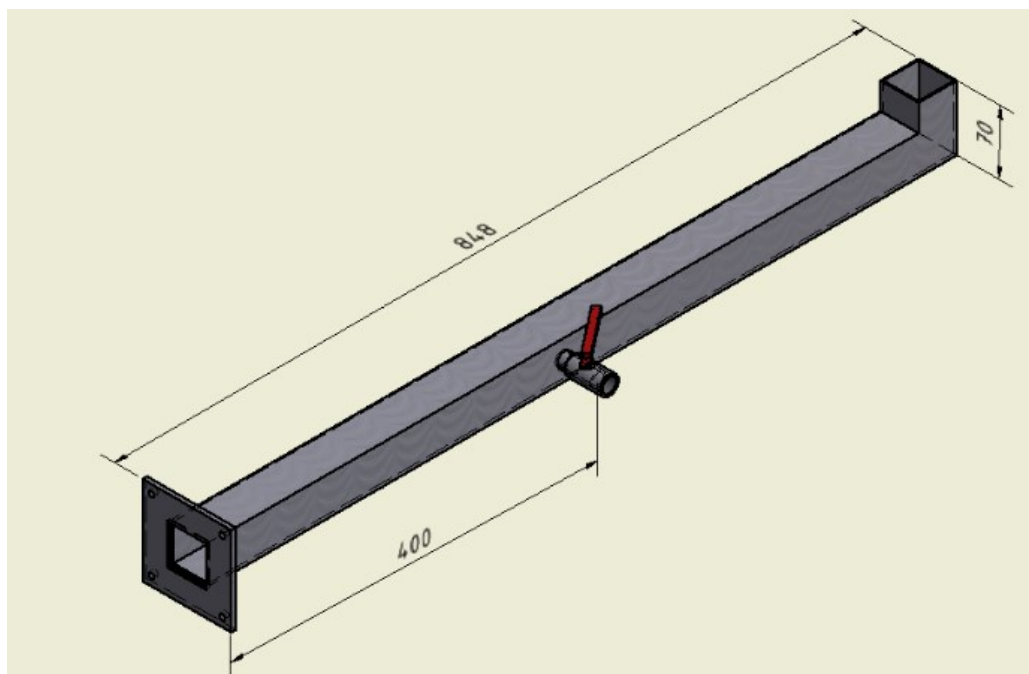
Následoval návrh horní části zařízení, která je („sériově“) tvořena chlazenou zónou, odlučovačem pevných částic a spalínovodem, který slouží k odvodu spalin. Na vybraných místech jsou opět kulové ventily s pákou (3/8", závit vnitřní/vnitřní, materiál nerez AISI 316), které slouží pro vložení odběrové sondy spalin, případně Prandtlovy trubice. Uvnitř odlučovače pevných částic je umístěna deska, která by měla sloužit pro odloučení pevných částic, které by následně měly spadnout do výsyvky. Ve spojovacích přírubách mezi odlučovačem pevných částic a spalínovodem je vyfrézován otvor, který slouží pro umístění tkaninového filtru s aktivním alternativním koksem pro záchyt těžkých kovů. Všechny tři tyto části jsou zobrazeno na obrázcích 7.5, 7.6, 7.7.



Obr. 7.5 Chlazená zóna fluidního zařízení

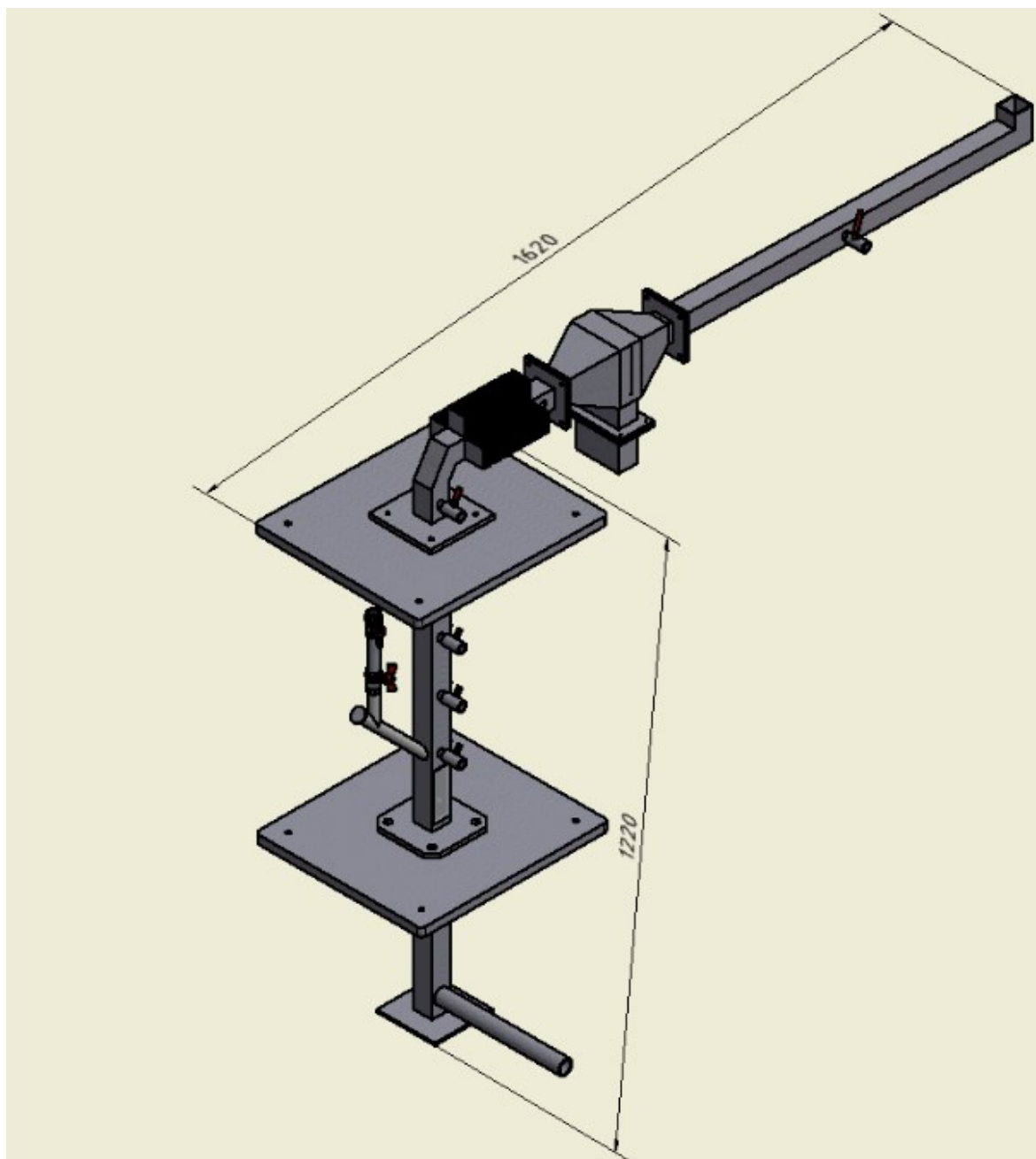


Obr. 7.6 Odlučovač pevných částic fluidního zařízení



Obr. 7.7 Spalinovod fluidního zařízení

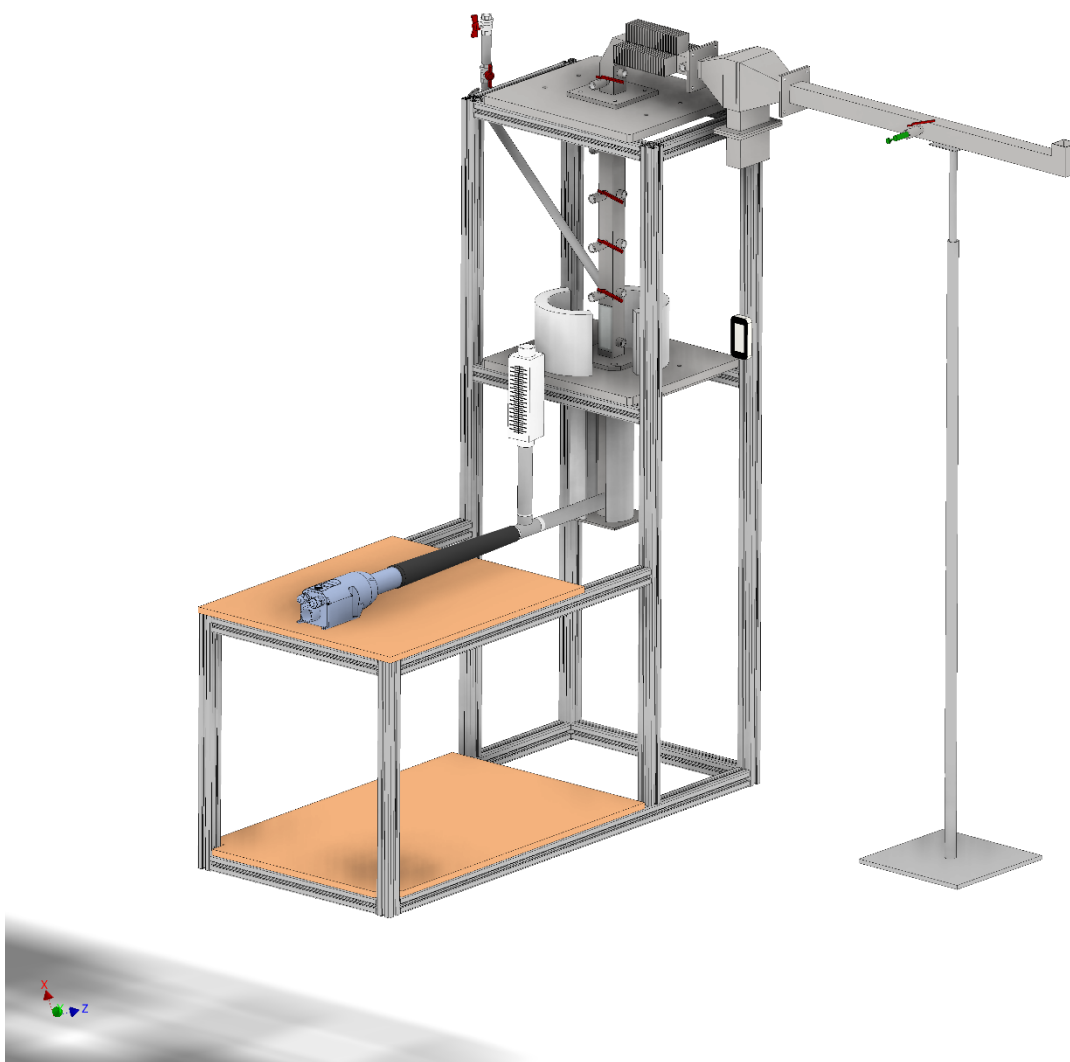
Po vymodelování veškerých částí bylo přikročeno k sestavení celého fluidního zařízení, které je prezentováno na obrázku 7.8. Po zvolení veškerých přídatných komponent bylo fluidní zařízení posazeno a upevněno na závěsný rám a doplněno o všechny nezbytné komponenty.



Obr. 7.8 Konstrukce fluidního zařízení

7.3 Konstrukce rámu

Pro konstrukci rámu byly zvoleny hliníkové profily z důvodu nízké měrné hmotnosti, a tudíž jednoduché manipulovatelnosti. Mobilitu zařízení zajišťují přídatná kolečka. Tato konstrukce byla zvolena také z důvodu zkušeností z předešlých zařízení, u kterých byl tento profil použit a osvědčil se. Rozměry rámu jsou 1640x1340x580 mm.



Obr. 7.9 Konstrukce rámu s veškerým vybavením

7.4 Přídavná zařízení

Fluidní spalovací zařízení bylo vybaveno potřebnými přídavnými zařízeními, které zajišťují správnou funkčnost. Tyto přídavné zařízení jsou popsány v následujících kapitolách.

7.4.1 Doprava vzdušiny

Na základě analytického výpočtu (viz kap.6.2) bylo zvoleno horkovzdušné dmychadlo **LEISTER MISTRAL 6 SYSTÉM** o výkonu 6500 W umožňující průtok vzduchu v rozmezí 100–400 l/min. Největší výhodou tohoto dmychadla je, že kromě dopravy vzduchu, disponuje možností elektrického ohřevu, a to až na teplotu 650 °C (krok po 5 °C). Dmychadlo je zároveň vybaveno regulací výkonnosti od 1–100 % (krok po 5 %). Tyto regulační možnosti eliminovaly možné problémy s dalším zapojením ohříváče vzduchu, což snížilo finanční náklady.



Obr. 7.10 Horkovzdušné dmychadlo LEISTER MISTRAL 6 SYSTÉM [18]

7.4.2 Přídavný zdroj tepla

Fluidní zařízení bylo vybaveno dvěma keramickými žebrovanými topnými tělesy OMEGALUX CRWS [23], které byly umístěny ve dvou pozicích viz obr. Specifikace těchto ohříváčů poskytuje tabulka 7.1. Oba ohříváče byly napojeny na PID regulátory pro zajištění dvoupolohové regulace umožňující dosažení požadované teploty ve spalovacím prostoru. Připojené termočlánky jsou typu K.

Ohříváč	Výkon [W]	Napětí [V]	Rozměr A [cm]	Rozměr B [cm]	Rozměr C [cm]
Horní	650	120	15	23	13
Spodní	300	60	30	10	5

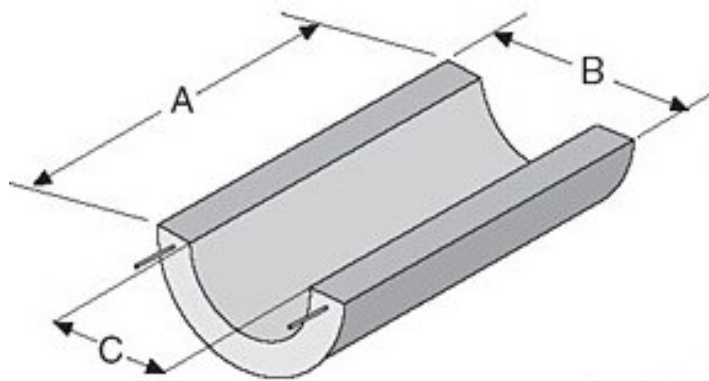
Tab. 7.1 Specifikace keramických žebrovaných topných těles



Obr. 7.11 Spodní ohříváč



Obr. 7.12 Horní ohříváč



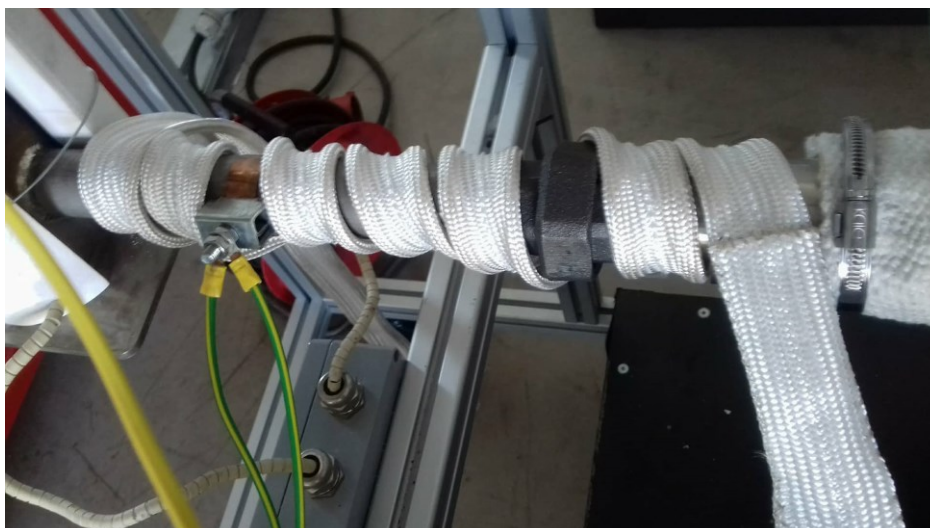
Obr. 7.13 Rozměry keramického žebrovaného topného tělesa

Jako další zdroj tepla byl použit pásový ohříváč ISOPAD T7000 s možností nastavení teploty od 100 do 1000 °C. Ohříváč je vybaven teplotní sondou PT100. [24]

Teplotní rozhraní	100–1000 °C
Spínací schopnost	Relé 10 A
Provozní napětí	230V AC (+10/-15 %), 47–60 Hz
Třída ochrany	II / IP65
Rozměry	55x80x160mm (šroubové spojení 185mm)

Tab. 7.2 Specifikace pásového ohříváče ISOPAD T7000

Výtopný pás byl umístěn za spojovací trubicí v místě trubkového přívodu vzduchu do spodní části spalovacího zařízení.



Obr. 7.14 Pásový ohříváč umístěný za spojovací trubicí

7.4.3 Spojovací trubice

Pro spojení horkovzdušného dmychadla se spodní části fluidního zařízení bylo potřeba najít vhodnou spojovací trubici. Byl zvolen tkaninový kompenzátor o DN50 a $L=450$ mm a teplotní odolnosti do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, viz Obr. 7.15.



Obr. 7.15 Spojovací tkaninová trubice

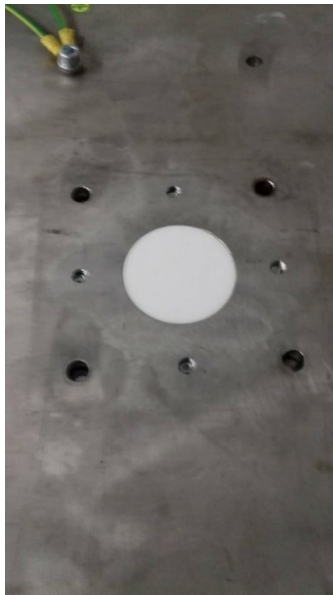
7.4.4 Další vybavení fluidního zařízení

Fluidní zařízení je vybaveno 8-mi vstupy pro termočlánky, které mohou být zapojeny do datalogru Testo 176 T4 pro okamžité zjištění teploty v jednotlivých bodech spalovacího procesu. Dále je na zařízení instalováno 5 ventilů pro vstup analyzátoru spalin.



Obr. 7.16 4-kanálový datalogger Testo 176 T4 [19]

Ve spodní desce (viz obr. 7.17) je vyfrézován otvor pro uložení frity o průměru 60 mm a tloušťce 5 mm a pórovitosti 100–160 μm . Pro správnou funkčnost fluidní vrstvy je potřeba vybrat správný rošt, a to především s ohledem na velikost pórů tak aby částice nepropadly skrz do spodní části zařízení.



Obr. 7.17 Frita vložena do výřezu ve spodní desce viz obr. 7.1

V místě fluidní vrstvy je vyřezán otvor pro žáruvzdorné sklo, které je odolné až do teplot 1400 °C. Sklo slouží pro vizuální kontrolu fluidní vrstvy a samotného procesu spalování.



Obr. 7.18 Otvor ve spodní části reaktoru pro vizuální kontrolu

7.5 Analýza spalin

Pro potřeby měření koncentrací vybraných složen ve spalinách je k analyzační box TESTO 350, který v praxi splňuje veškeré potřebné parametry jako je snadná manipulace a precizní měřicí schopnosti.

Zařízení obsahuje řídicí jednotku, která ovládá analyzační box a zobrazuje naměřené hodnoty, dále analyzační box, který je z robustního pouzdra, které chrání veškerou sensoriku, čerpadla a vyhodnocovací pamětovou elektroniku před případným poškozením. Pro napájení je využito li-onového akumulátoru, který udrží zařízení vchodu pro mnoho hodin nezávisle na síti. Ve spodní části je umístěna schránka pro uložení elektrochemických senzoru pro měření složení plynu (specifikace viz tab.7.3), čerpadlo naměřeného plynu, které dopravuje plyn k sensorům. V této části je také čerpadlo čistého vzduchu a čerpadlo kondenzátu, které jej přečerpává do jímky kondenzátu. Pro odběr spalin je připojena sonda o délce 335 mm a tloušťce 8mm. Sonda je odolná vůči teplotám 1100 °C.



Obr. 7.19 Analyzátor spalin TESTO 350 [20]

Složka	Měřicí rozsah senzorů	Přesnost senzoru	Měřítka	Čas reakce
O₂	0 až 25 Obj.%	±0.2% (0 to 25 Obj.% O ₂)	0.01 Obj.% O ₂	20 s
CO	0 až 10000 ppm	±5 ppm CO (0 až 199 ppm CO) ±5% (200 až 2000 ppm CO) ±10% (2001 až 10000 ppm CO)	1 ppm	40 s
NO	0 až 4000 ppm	±5 ppm NO (0 až 99 ppm NO) ±5% (100 až 1999.9 ppm NO) ±10% (2000 až 4000 ppm NO)	1 ppm	30 s
NO₂	0 až 500 ppm	±5 ppm NO ₂ (0 až 99.9 ppm NO ₂) ±5% (100 až 500 ppm NO ₂)	0.1 ppm	40 s
SO₂	0 až 5000 ppm	±5 ppm SO ₂ (0 až 99 ppm SO ₂) ±5% (100 až 2000 ppm SO ₂) ±10% (2001 to 5000 ppm SO ₂)	1 ppm	30 s
CO₂	0 až 50 Obj.%	±0.3 Obj. % CO ₂ + 1% z mv (0 až 25 Vol.% CO ₂) ±0.5 Obj. % CO ₂ + 1.5% z mv (>25 až 50 Obj.% CO ₂)	0.01 Obj.% (0 až 25 Obj.%) 0.1 Obj.% (>25 Obj.%)	10 s

Tab. 7.3 Technické specifikace elektrochemických senzorů, které jsou součástí analyzačního boxu Testo 350

8 Sestavení laboratorního zařízení

Sestavení jednotlivých komponent tvořících zařízení proběhlo v zimním semestru akademického roku 2017/2018 v místnosti D101 v budově CPIT. V první řadě bylo potřeba umístit spalovací zařízení dovnitř hliníkového rámu a to tak, že se dvě největší desky spojily s rámem pomocí osmi šroubů M10. Do spodní desky se do předem vyfrézovaného otvoru umístila fritra. Následně bylo potřeba spojit jednotlivé díly zařízení k sobě, a to pomocí šroubů M8. V dalším kroku bylo zapojení dmychadla, dvou topných těles a dvou termočlánku do elektrické skříně s PID regulátory. V neposlední řadě bylo dmychadlo spojeno se vstupem do spalovacího zařízení pomocí tkaninové trubice, která byla upevněna kovovými objímkami. Na přívodní potrubí ve spodní části byl nainstalován pásový ohříváč pro zajištění potřebné teploty. Pro snadnější manipulaci jsou jednotlivé části spalovacího zařízení odděleny a spojeny s nosnými deskami samostatně. Tedy každá část je připevněna samostatně, kdy v případě výměny není potřeba rozebrat celé zařízení, ale pouze jednotlivý segment.



Obr. 8.1 Prototypové fluidní zařízení s vybavením

Z důvodu zajištění dostatečné teploty při spalovacím procesu a jako bezpečnosti ochrana byl zvolen izolační materiál ve formě minerální vaty značky SIBRAL s vysokou teplotní odolností. Základní údaje tohoto materiálu jsou uvedeny níže [25]:

Hustota	$\rho = 130 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Souč. tepelné vodivosti	$\lambda = 0,06 + 2,25 \cdot 10^{-4}(t_{stř} - 300) \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$
pro $t_{stř} = 235 \text{ (}^\circ\text{C)}$	$\lambda = 0,015375 \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$
pro $t_{stř} = 474 \text{ (}^\circ\text{C)}$	$\lambda = 0,09915 \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$
Měr. Tepelná kapacita	$c_p = 1,07 \text{ (kJ/kg} \cdot \text{K)}$
Teplota měknutí	$t_{měknutí} = 1260 \div 1400 \text{ (}^\circ\text{C)}$
Souč. přestupu tepla na vnitřní straně	$\alpha = 70 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$
Souč. přestupu tepla na vnější straně	$\alpha = 12 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$

Tab. 8.1 Specifikace minerální vaty SIBRAL

9 Provozní zkouška

Provozní zkouška byla provedena dne 10.5.2018 v budově CPIT v areálu Vysoké školy báňské – Technické univerzity v Ostravě.

Testy byly realizovány s cílem ověření provozu zařízení z hlediska spalovacího procesu, dosažení požadovaných teplot a potvrzení celkové funkčnosti.

9.1 Vstupní palivo a inertní materiál

Pro jeden test bylo použito černé uhlí o celkové hmotnosti 6 g. Jeho rozbor je včetně použitých analytických metod uveden v tabulce 9.1. Tento rozbor byl proveden v Oddělení chemických služeb v Elektrárně Třebovice. Jako inertní materiál fluidní vrstvy byl použit sklářský písek o hmotnosti 60 g. Parametry písku jsou uvedeny v kapitole 6 (tabulka 6.1).

Použité metody	Měřený parametr	Složení	Nejistota měření
SOP č.P 01 (ČSN 44 1377)	Voda veškerá	$W^r = 0,8$ (%)	2% rel.
SOP č.P 06 (ASTM D 7582)	Popel původní	$A^r = 20$ (%)	1% rel.
SOP č.P 06 (ASTM D 7582)	Popel bezvodý	$A^d = 20,16$ (%)	1% rel.
SOP č.P 05 (ČSN ISO 1928)	Spalné teplo v hořlavině	$Q_s^{daf} = 34,53$ (MJ/kg)	0,5% rel.
SOP č.P 05 (ČSN ISO 1928)	Výhřevnost původní	$Q_i^r = 26,49$ (MJ/kg)	3,5% rel.
SOP č.P 03 (ČSN ISO 562)	Prchavá hořlavina	$V^{daf} = 27,2$ (%)	1% rel.
SOP č.P 07 (ČSN ISO 19579)	Síra původní	$S^r = 0,38$ (%)	3% rel.
SOP č.P 12 (ČSN ISO 29541)	Uhlík původní	$C^r = 68,344$ (%)	0,5% rel.
SOP .P 12 (ČSN ISO 29541)	Vodík původní	$H^r = 3,821$ (%)	2% rel.
SOP č.P 12 (ČSN ISO 29541)	Dusík původní	$N^r = 1,072$ (%)	3% rel.
	Zrnitost	$\sigma = < 3000$ (μm)	

Tab. 9.1 Parametry použitého paliva

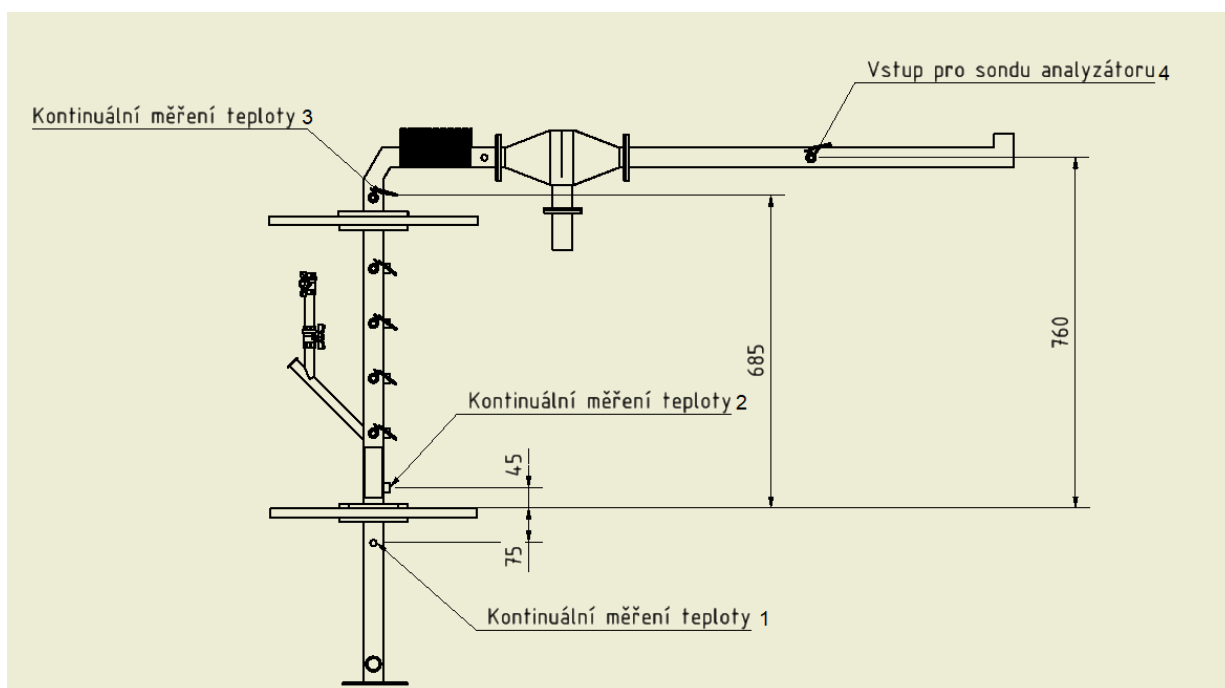
9.2 Popis zkoušky a měřených veličin

Před samotným experimentem byl spalovací prostor vyhřát na teplotu 650 °C, přičemž z důvodu ověření správné funkčnosti ohřivačů a PID regulátoru byla tato teplota po dobu 15 min. ponechána. Dvoupolohová regulace fungovala správně – hodnoty teploty se od požadavku 650 °C odchylovaly max. o 5 °C, což lze považovat za přijatelné. Během nahřívání byl spalovací prostor zaizolován vatou SIBRAL a výkon elektrických ohřivačů nabýval hodnot 300 W (spodní ohřivač) a 650 W (horní ohřivač).

V průběhu konání experimentu činila okolní teplota 25 °C a barometrický tlak byl 100 850 Pa. Dmychadlo bylo nastaveno na 15% výkonnost, což odpovídá 145 l/min průtoku vzduchu.

Při samotné zkoušce zařízení (tedy při spalování paliva) byly měřeny koncentrace O₂, NO, NO₂, SO₂ a CO ve spalinách a také teploty ve vybraných místech zařízení. Uvedené veličiny byly kontinuálně měřeny po dobu dvou minut a ve dvousekundových intervalech ukládány jejich hodnoty do paměti přístrojů. Získaná data, která jsou dále diskutována, byla zprůměrována.

Pro analýzu spalin byl využit analyzátor Testo 350 (popis viz. kapitola 7.8) a teploty byly snímány pomocí termočlánků PT 100. Pozice měřících míst je znázorněna na obrázku č.1.



Obr.9.1 Pozice měřících míst

9.3 Výsledky testu

Po 18 sekundách od přivedení paliva (6 g) do prostoru fluidní vrstvy došlo k jeho zapálení. Teplota ve spalovacím prostoru vzrostla z 650 na 852 °C (měřící bod 2 – viz schéma na obrázku 9.1). Průběh hoření trval 21 sekund a fluidní vrstva byla stabilní a nevykazovala známky turbulentního proudění. Teplota v měřícím bodu 1 se v průběhu hoření zvýšila nepatrně – z 520 na 525 °C. V bodě 3 teplota vzrostla o 80 °C (z 270 na 350 °C).

Průměrné koncentrace vybraných složek spalin jsou shrnuty v tabulce 9.2 (měřící bod 4). Z koncentrace kyslíku (10,3 %) vyplývá, že ke spalování docházelo s poměrně vysokým přebytkem vzduchu dosahujícím hodnoty téměř 2. Ve spalinách bylo relativně velké množství CO (479 ppm). Jednou z hlavních příčin je nedostatečná teplota pro jeho dospálení na CO₂. Možností, jak koncentraci CO snížit, je vložení dalšího zdroje tepla, a to nad elektrický ohříváč, který je umístěn v úrovni spalovacího prostoru – tím se zabezpečí prostor s teplotou. Zastoupení NO_x činilo 304,7 ppm, z čehož 303,5 ppm tvořil NO a nepatrný zbytek NO₂. Koncentrace SO₂ byla zastoupena v 63,8 ppm. Při budoucích testech se předpokládá, že produkce SO₂ bude podstatně eliminována díky dávkování vápence. Průměrná teplota spalin (bod 4) činila 107,7 °C.

Složka	O ₂ [%]	CO [ppm]	NO [ppm]	NO ₂ [ppm]	SO ₂ [ppm]
Zastoupení	10,30	479,0	303,5	1,2	63,8

Tab. 9.2 Objemové zastoupení vybraných složek ve spalinách

Z uvedené zkoušky vyplývá, že zařízení je z hlediska provozu vhodné, neboť docházelo ke spalovacímu procesu, fluidní vrstva byla stabilní a bylo dosaženo požadovaných teplot v reakčním prostoru. Budou však uvedeny úpravy pro eliminaci některých složek emisí, jak je výše uvedeno.

10 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo provést výpočet, konstrukční návrh a provozní zkoušky laboratorního spalovacího zařízení s fluidní vrstvou, které je určeno pro výzkum sorpce těžkých kovů ve spalinách.

Teoretická část diplomové práce se zaměřuje na popis fluidní vrstvy a fluidní techniky včetně historie fluidního spalování. V kapitole č. 2 je popsáno Geldartovo rozdělení částic, které je nezbytné pro zvolení správného materiálu pro tvorbu fluidní vrstvy. V této kapitole jsou rovněž popsány výhody a nevýhody fluidního spalování. Součástí je rovněž popis principu adsorpce a odstraňování těžkých kovů ze spalin pomocí různých metod.

Nejpodstatnější část předložené práce začíná kapitolou sedmou, kde je prezentován výpočet potřebných fluidizačních rychlostí pro stanovení optimálního stavu fluidní vrstvy. V této kapitole je rovněž specifikován inertní materiál, který je použit pro vytvoření fluidní vrstvy. Na tuto kapitolu navazuje část popisující konstrukční návrh experimentálního zařízení včetně charakteristiky veškerého vybavení, které bylo potřeba nainstalovat pro zprovoznění zařízení a dosažení požadovaných podmínek ve spalovacím prostoru. Také je zde specifikován materiál, který byl použit pro izolaci celého zařízení. Veškerý konstrukční návrh včetně výskresové dokumentace byl zhotoven v programu Autodesk Inventor 2017. V kapitole č. 9 je pak popsán průběh pilotní provozní zkoušky zařízení, včetně výsledků analýzy spalin.

Po výsledcích našich testů bylo zjištěno, že je potřeba umístit nad horní ohřivač další ohřivací segment pro dodatečné spálení CO. V budoucnu je plánováno, že budou na navrženém a zrealizovaném zařízení testována různá paliva s odlišnou výhřevností, granulometrií, složením apod. Dominantně se však plánovaná činnost bude týkat testování různých druhů alternativních sorbentů (např. aktivovaných pyrolýzních koksů), a to zejména z hlediska zachytu rtuti a arsenu.

Seznam literatury

- [1] KUNII, Daizo a Octave LEVENSPIEL. Fluidization engineering. 2nd ed. Boston [u.a.]: Butterworths, 1990. ISBN 04-099-0233-0.
- [2] ČECH, Bohumír. Diagnostické metody měření spalinových traktů a jejich aplikace u kotlů s fluidní vrstvou. 1998. Doktorská disertační práce.
- [3] NOVOTNÝ, Pavel a Ludvík FIALA. Spalování paliv a odpadů ve fluidní vrstvě. Praha: SNTL, 1977.
- [4] YANG, W., C., DEKKER, M. Handbook of Fluidization and Fluid particle Systems. New York, 2003, 1868 p. ISBN 082470259.
- [5] BASU, P. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. CRC press, 2006, 496 p. ISBN 08-4933396-2.
- [6] BASU, P. Biomass gasification and pyrolysis. Academic press, 2010, 552 p. ISBN: 97-800809616-20.
- [7] Zákony pro lidi - Sbírka zákonů ČR v aktuálním konsolidovaném znění [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415#cast8>
- [8] Institute for Energy Economics & Financial Analysis - Accelerating the transition to a diverse, sustainable and profitable energy economy : Institute for Energy Economics & Financial Analysis. Institute for Energy Economics & Financial Analysis - Accelerating the transition to a diverse, sustainable and profitable energy economy : Institute for Energy Economics & Financial Analysis[online]. Copyright © 2018 Institute for Energy Economics [cit. 30.03.2018]. Dostupné z: <http://ieefa.org/>
- [9] [online]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/transparency/regcomitology/index.cfm>
- [10] BENCKO, V. a kol. Toxické kovy v životním a pracovním prostředí člověka. Grada publishing, 2005, 288 s. ISBN 80-7169-150-1.
- [11] Portál ČHMÚ : Home. Portál ČHMÚ : Home [online]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/>
- [12] Ghorishi, S. B., Sedman, C. B.: Low concentration mercury sorption mechanisms and control by calciumbased sorbents : Application coal-fired processes. Journal of the Air and Waste Management Association, 48, (12), 1998, s. 1191-1198.
- [13] [online]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz>
- [14] Page Redirection [online]. Copyright © [cit.12.12.2017]. Dostupné z: <http://gse.vsb.cz/2005/LI-2005-2-27-42.pdf>

[15] Vítá vás Portál moderní fyziky. | Portál moderní fyziky [online]. Copyright © [cit.20.01.2018].

Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/ostatni/BET.pdf>

[16] BARTOVSKÁ, L., ŠIŠKOVÁ, M. Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav. VŠCHT Praha, 2005. 244 s. ISBN 80-7080-579-1.

[17] GRACE, J., R. Contacting modes and behaviour classification of gas—solid and other two-phase suspensions. Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 64, p.p. 353 – 363, 1986. DOI 10.1002/5450640301

[18] WELDPLAST ČR/SK s.r.o. - svařování plastů a aplikace horkého vzduchu od LEISTER PROCESS TECHNOLOGIES. WELDPLAST ČR/SK s.r.o. - svařování plastů a aplikace horkého vzduchu od LEISTER PROCESS TECHNOLOGIES [online]. Copyright © 2010 WELDPLAST ČR s.r.o. [cit. 14.02.2018]. Dostupné z: <http://www.weldplast.cz/>

[19] Měřicí přístroje ZAM - SERVIS - TESTO [online]. Dostupné z: <http://www.zam-servis-testo.cz/>

[20] Rent a Testo 350 Advanced Combustion Efficiency Analyzer from RaecoRents.com | RAECO Rents. Rent Environmental Monitoring, Industrial Hygiene & Safety Instruments | RAECO Rents [online]. Copyright © Raeco Rents, LLC. [cit. 30.03.2018]. Dostupné z: <https://www.raecorents.com/testo-350-engine-kit-for-combustion-system-compliance-testing-and-troubleshooting/>

[21] GLASSMAN, Irvin a Richard A. YETTER. *Combustion*. 4th ed. Burlington: Elsevier, c2008. ISBN 978-0-12-088573-2

[22] LACKNER, Maximilian, Arpád PALOTÁS a Franz WINTER. *Combustion: from basics to applications*. Weinheim: Wiley-VCH, c2013. ISBN 978-3-527-33376-9.

[23] CRWS Series Semi-Cylindrical Ceramic Heaters . OMEGA Engineering | Termočlánky, Tlakové snímače, Průtokoměry, PID regulátory[online]. Copyright ©Copyright 1995 [cit. 13.05.2018].Dostupné: <https://www.omegaeng.cz/pptst/CRWS.html>

[24] Temperaturregler Serie T-7000: HENNLICH. Armaturen, Dichtungen, Düsen, Elektrowärme, Federn, Filter, Pumpen - HENNLICH[online]. Dostupné z: <https://www.hennlich.at/produkte/elektrowaerme-begleitheizungen-temperaturregler-nicht-ex-temperaturregler-236/temperaturregler-serie-t-7000.html>

[25] NĚMČEK, Ondřej. Distribuce arsenu a rtuti při spalování ve fluidní vrstvě[online]. Ostrava, 2013 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/101242>.
Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

Seznam obrázků

- Obr. 2.1 Vlastnosti fluidní vrstvy
- Obr. 2.2 Tvary fluidní vrstvy
- Obr. 2.3 Geldartovo rozdělení částic
- Obr. 2.4 Winklerův fluidní reaktor na zplyňování uhlí
- Obr. 2.5 Schéma fluidního kotle typu IGNIFLUID
- Obr. 2.6 Schéma kotle DUKLAFLUID druhého typu
- Obr. 2.7 Schéma cirkulujícího kotle K12 v ENERGETICE Třinec
- Obr. 3.1 Adsorpce plynné látky na pevném povrchu
- Obr. 7.1 Schéma laboratorního zařízení
- Obr. 7.2 Střední část spalovací komory
- Obr. 7.3 Spodní část fluidního zařízení
- Obr. 7.4 Spodní kovová deska s výřezem pro fritu
- Obr. 7.5 Chlazená zóna fluidního zařízení
- Obr. 7.6 Odlučovač pevných částic fluidního zařízení
- Obr. 7.7 Spalinovod fluidního zařízení
- Obr. 7.8 Konstrukce fluidního zařízení
- Obr. 7.9 Konstrukce rámu s veškerým vybavením
- Obr. 7.10 Horkovzdušné dmychadlo LEISTER MISTRAL 6 SYSTÉM
- Obr. 7.11 Spodní ohřívač
- Obr. 7.12 Horní ohřívač
- Obr. 7.13 Rozměry keramického žebrovaného topného tělesa
- Obr. 7.14 Pásový ohřívač umístěný za spojovací trubici
- Obr. 7.15 Spojovací tkaninová trubice
- Obr. 7.16 4-kanálový datalogger Testo 176 T4
- Obr. 7.17 Frita vložena do výřezu ve spodní desce viz obr. 7.1
- Obr. 7.18 Otvor ve spodní části reaktoru pro vizuální kontrolu
- Obr. 7.19 Analyzátor spalin TESTO 350 [20]
- Obr. 8.1 Prototypové fluidní zařízení s vybavením
- Obr. 9.1 Pozice měřících míst

Seznam tabulek

Tab. 6.1 Specifikace sklářského písku ST 54

Tab. 6.2 Přehled konstant C1 a C2 a jejich zpřesnění, dle jednotlivých autorů

Tab. 6.3 Fyzikální vlastnosti vzduchu v závislosti na teplotě

Tab. 6.4 Souhrn vypočtených hodnot

Tab. 7.1 Specifikace keramických žebrovaných topných těles

Tab. 7.2 Specifikace pásového ohříváče ISOPAD T7000

Tab. 7.3 Technické specifikace elektrochemických senzorů, které jsou součástí analyzačního boxu Testo 350

Tab. 8.1 Specifikace minerální vaty SIBRAL

Tab. 9.1 Parametry použitého paliva

Tab. 9.2 Objemové zastoupení vybraných složek ve spalinách

Seznam grafů

Graf 5.1 Emise vybraných těžkých kovů v ČR, dle hodnot ČHMÚ

Seznam příloh

Příloha č. 1 Sestava prototypového fluidního zařízení