



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

EFEKTIVNÍ A EKOLOGICKÉ SPALOVÁNÍ BIOMASY

THE EFFECTIVE AND ECOLOGICAL BURNING OF BIOMASS

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Michal Špiláček

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

BRNO 2018

KLÍČOVÁ SLOVA

Modelování, CFD, biomasa, rošt, spalování, oxidy dusíku

KEYWORDS

Modelling, CFD, biomass, grate, combustion, nitrogen oxides

MÍSTO ULOŽENÍ ORIGNINÁLU DIZERTAČNÍ PRÁCE

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno

ISBN (80-214-doplň redakce)

ISSN (1213-4198)

OBSAH

ÚVOD.....	5
CÍLE PRÁCE.....	6
1 SPALOVÁNÍ BIOMASY	7
1.1 Základy spalování	7
1.2 Dynamika spalování.....	7
2 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ.....	8
2.1 Spalovací komora.....	8
3 MATEMATICKÝ MODEL.....	9
3.1 Zkoumaná geometrie.....	9
3.2 Přenos tepla	9
3.3 Proudění tekutin	10
3.4 Transport chemických látek	10
3.4.1 Ohřev a sušení paliva.....	10
3.4.2 Pyrolýza	10
3.4.3 Hoření dřevěného uhlí	10
3.4.4 Hoření prchavé hořlaviny	11
3.4.5 Popis transportu chemických látek	12
3.5 Pohyb paliva na roštu.....	12
4 VSTUPY MODELU	13
4.1 Palivo a spalovací vzduch	13
4.2 fyzikální veličiny a funkce	14
5 VÝSLEDKY.....	16
5.1 Numerický model.....	16
5.1.1 Teplotní pole	17
5.1.2 Rychlostní pole.....	18
5.1.3 Koncentrace	18
5.2 Úprava geometrie.....	20
ZÁVĚR.....	23
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	25

ÚVOD

Význam biomasy jako paliva neustále narůstá [1]. Malá a středně velká zařízení pro spalování biomasy využívají výhod decentralizovaného systému a představují majoritní podíl mezi zařízeními pro spalování biomasy [2]. To převážně kvůli bohatým a jednoduše přístupným zdrojům biomasy v rozvojových zemích, kde chybí finance nebo infrastruktura pro budování velkých zdrojů. Zde představuje podíl biomasy na produkci energie okolo 35 % [3]. V rozvinutých zemích představuje biomasa směr, jak zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energie v energetickém mixu, a to převážně za účelem snižování environmentálních dopadů plynoucích ze spalování fosilních paliv.

Malé a střední zařízení ale nejsou schopny dosáhnout stejné účinnosti při kontrole emisí jako zařízení velká, které mají možnost lepší kontroly díky délce setrvání spalin ve spalovacím zařízení a také možnost (legislativní povinnost [2]) instalace podpůrných systému specializovaných na snižování emisí.

Nejhůře jsou na tom v tomto ohledu malá zařízení. Doba pro kontrolu spalovacího procesu je minimální a instalace dalších zařízení neekonomická. Nejlepším způsobem, jak předcházet emisím, je tak vědomé spalování biomasy s nízkým potenciálem pro tvorbu škodlivých emisí, jako je dřevní štěpka. Středně velká zařízení jsou na tom lépe, protože ač se zařízení na snižování škodlivých emisí omezují – převážně z ekonomických důvodů – na odlučovače úletu, délka setrvání spalin v zařízení dovoluje omezené zásahy ve spalovacím procesu, které zásadně ovlivňují složení spalin a množství emisí. Zde je, mimo používání biomasy s nízkým emisním potenciálem, možné řídit spalování a rozdělení spalovacího vzduchu pro lepší kontrolu emisí. Jeden z nejdůležitějších faktorů zde je využívání sekundárního vzduchu, což je zásadní technologie pro snižování emisí a efektivitu spalování.

Tato práce se proto zabývá spalováním biomasy obecně a zaměřuje se na spalování biomasy na roštu, což je nejstarší průmyslovou technologií produkce tepla, která se dnes používá skoro exkluzivně pro spalování biomasy [4] nebo odpadů, s výjimkou malých zařízení na spalování uhlí. Spalování biomasy na roštu minimalizuje dopady velkého rozsahu vlastností energetické biomasy, protože je málo citlivé na výkyvy v obsahu vody, výhřevnosti, velikosti částic a její složení. Zkoumané experimentální zařízení je roštové s tepelným výkonem 110 kW, které využívá pro spalování primární a sekundární vzduch.

Ale návrh spalovacího zařízení je komplexní úloha, u které velké množství proměnných, veličin a stále se vyvíjejících požadavků na spalovací zařízení prakticky nedovoluje vytvořit vhodný design a vhodný návrh je potom výsledkem mnoha a mnoha let postupných a dílčích změn, které jsou testovány na postavených a funkčních spalovacích zařízeních. V současné době je ale možné využít možnosti počítačového modelování, které jako metoda inženýrské praxe je dnes dostupnější než kdy dříve, a s jeho pomocí předpovídat chování navrhovaných systémů a optimalizovat systémy stávající. Hlavním smyslem této práce je tudíž navrhnout model zkoumané spalovací komory a získané výsledky porovnat se skutečným měřením a zhodnotit stávající řešení komory.

CÍLE PRÁCE

Cílem práce je vytvoření počítačového modelu spalovacího procesu za účelem zvýšení účinnosti spalovacího zařízení a snížení produkovaných škodlivých emisí. Počítačový model bude ověřován pomocí experimentálních výsledků ze spalovacího zařízení a může být využit pro navržení změn na tomto zařízení.

Dílčí cíle práce jsou následující:

- Vypracování rešerše o spalování rostlinné biomasy na nepohyblivém roštu. Získání poznatků o průběhu tohoto procesu a jeho produktech, a to především o tvorbě emisí oxidů dusíku. Získání poznatků o efektivní redukci těchto emisí.
- Vytvoření počítačového modelu spalovacího procesu, který bude průběžně ověřován a zpřesňován měřeními na experimentálním zařízení.
- Návrh změn spalovacího zařízení a procesu na základě experimentů a počítačového modelu.

1 SPALOVÁNÍ BIOMASY

1.1 ZÁKLADY SPALOVÁNÍ

Vlivy na spalování biomasy je možné rozdělit do 4 skupin: fyzikální, chemické, teplotní a minerální [3]. Spalování biomasy má silnou paralelu ve spalování uhlí a není důvod nevyužívat tyto znalosti při zkoumání spalování biomasy.

Fyzikální vlastnosti biomasy mají obrovské rozpětí hodnot a patří mezi ně hustota, porozita a aktivní plocha. Tyto závisí na rostlinném druhu, zatímco sypná hmotnost, velikost částic a jejich tvar závisí na metodě přípravy paliva.

Mezi důležité chemické vlastnosti biomasy patří prvkové složení, analýza pyrolýzních produktů, spalné teplo, teplota začátku pyrolýzy, výhřevnost prchavé hořlaviny a výhřevnost dřevěného uhlí.

Teplotní vlivy představují měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost a emisivita. Tyto navíc závisí na vlhkosti paliva. Teplotní degradaci biomasy se uvolňují páry, prchavá hořlavina a vzniká dřevěné uhlí a popel. Prchavá hořlavina se pak dále dělí na plyny a dehty. Mezi plyny patří lehké uhlovodíky, oxid uhelnatý a vodík.

1.2 DYNAMIKA SPALOVÁNÍ

Pro přesnější popis průběhu hoření biomasy, jenž bere v potaz počáteční stav paliva a detailní chemii přeměn, kterými původní palivo projde v průběhu hoření, je potřeba znát dynamiku celého procesu. Tato je značně složitá a vyžaduje jistá zjednodušení.

Celý proces hoření se skládá z dějů, jež probíhají zároveň (paralelně), nebo na sebe navazují (probíhají sériově). Tyto děje jsou buď fyzikální, nebo chemické. Fyzikální děje představují míchání spalovacího vzduchu a paliva a přenos tepla a látky. Chemické děje představují veškeré exotermické a endotermické děje, které se při spalování vyskytují.

Celková doba hoření je tak dána součtem trvání obou druhů dějů a v potaz se musí brát i jejich sériovost nebo paralelnost.

Podle toho, který z těchto dějů probíhá rychleji, se pak spalování dělí na kinetické, nebo difúzní. Pokud je doba chemických reakcí podstatně delší, než je doba fyzikálních dějů, jako se tak děje například při spalování plynu, jedná se o **kinetické spalování**. V opačném případě, kdy je spalování řízené fyzikálními ději, protože ty chemické jsou nesrovnatelně kratší, se jedná o **difúzní spalování**. Difúzní spalování představuje hoření pevných nebo kapalných paliv.

Při spalování biomasy na roštu probíhá jak difúzní spalování ve vrstvě paliva, tak kinetické spalování plynů nad touto vrstvou. Průběh kinetického a difúzního spalování se od sebe zásadně liší a je potřeba znát jejich teoretický popis.

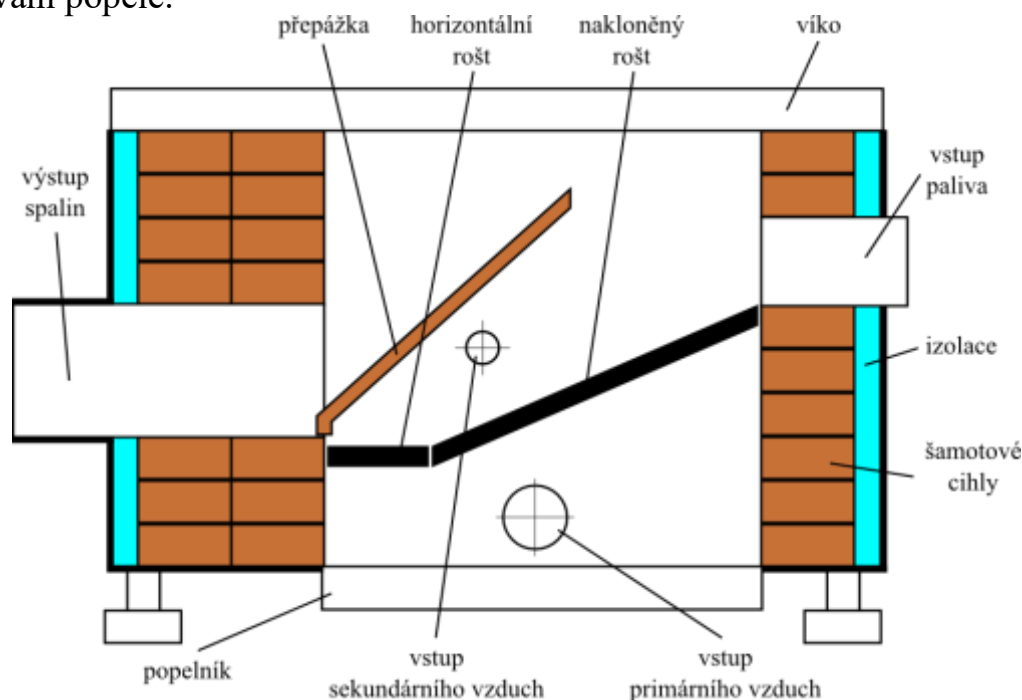
U **kinetického spalování** je rychlost chemických reakcí nejvíce ovlivněna (i) koncentrací reagujících látek, (ii) teplotou, (iii) tlakem (iv) katalyzátory.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

2.1 SPALOVACÍ KOMORA

Spalovací komora o nominálním výkonu 110 kW je určena ke spalování dřeva, především štěpky a další podobné biomasy. Důležitou vlastností těchto paliv je vysoký obsah prchavé hořlaviny. Konstrukce této komory dovoluje lepší kontrolu nad spalováním vloženého paliva pomocí několika stupňů přívodu spalovacího vzduchu. Spalování probíhá na šikmém pevném roštu. Za tímto roštem (po směru postupu paliva) je vodorovný otočný rošt pro odstraňování zbylého popele. Pro výzkumné účely bylo na komoře provedeno několik modifikací, které dovolují měření a změnu okrajových podmínek spalování.

Komora je vyrobena ze silné vrstvy šamotových cihel pro akumulaci tepla, a tím pádem stabilní teplotu uvnitř komory. Cihly jsou obehnány vrstvou izolační vaty a celá komora je oplechovaná. Vrch komory má odnímatelné víko pro jednoduchý přístup do komory pro případ údržby a úprav. V jedné stěně jsou nad roštem servisní dvířka pro okamžitý přístup do komory. V komoře je také instalována obrátová přepážka, která pomáhá usměrňovat proudění plynů. Pod roštem je malý poklop pro odstraňování popele.



Obr. 1 Schéma zplyňovací komory

Palivo se přivádí do komory zezadu nad rošt šnekem. Palivo následně klouže po roštu vlivem gravitace a nově přivedeného paliva. Zde probíhají všechny kroky spalování, jako je ohřívání, sušení, pyrolýza a hoření pyrolýzních produktů při protisměrném spalování na roštu. Prchavá hořlavina a další produkty pyrolýzy jsou pak vedeny pomocí přepážky podél zbytku paliva a pomáhají jeho ohřívání a sušení. Na konci přepážky se otáčejí a je k nim zaveden sekundární spalovací vzduch. Poté je plyn přiveden do trysky, jež ústí do ohříváče vody.

Přívod primárního spalovacího vzduch je umístěn pod roštem pomocí dvou oddělených otvorů, kdy jeden je zaslepen, a jeho průtok je regulován pomocí klapky. Toto umožňuje ovlivňovat rychlost sušení a stechiometrické poměry při spalování.

Přívod sekundárního spalovacího vzduchu je umístěn nad roštem pod obratovou přepážkou. Je regulován pomocí klapky, a může tak ovlivňovat dohořívání produktů spalování a tvorbu emisí.

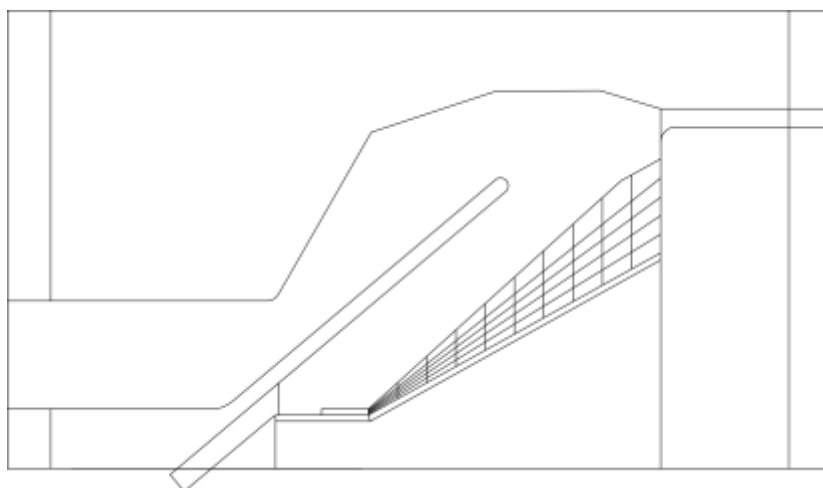
Přívod terciálního spalovacího vzduchu je umístěn ve trysce, která spojuje zplyňovací komoru a ohříváč vody. Jsou to čtyři oddělené otvory, kdy dva jsou v horní části trysky a zbylé dva v její dolní části. Použití terciálního vzduchu může poskytovat ještě vyšší kontrolu nad spalováním a tvorbou emisí. V současné době je přívod terciálního vzduchu zaslepen.

3 MATEMATICKÝ MODEL

Pro řešení této úlohy byl použit software COMSOL 5.1.145 [5] s moduly **CFD**, **Heat Transfer** a **Chemical Reaction Engineering**. Bylo tak provedeno na základě zhodnocení fyzikálních dějů potřebných pro popis modelu a schopnostech softwaru.

3.1 ZKOUMANÁ GEOMETRIE

Všechny zjištěné skutečnosti z předchozích výzkumů [6], [7] musely být vzaty v úvahu, když se vytvářela geometrie pro zde prezentovaný model. Hlavní změna je způsob přívodu spalovacího vzduchu, která nejenže snížila vstupní rychlosti vzduchu do spalovací komory, ale také dovolila řešit dříve nesymetrickou úlohu jako symetrickou, jak je vidět na Obr. 2.



Obr. 2 Upravená geometrie

3.2 PŘENOS TEPLA

Teplotní pole v řešeném problému nepředstavuje pouze Fourierova rovnice vedení tepla (kondukce), ale vzhledem k proudění tekutin a vysoké teplotě, se zde budou uplatňovat i mechanismy přenosu tepla prouděním (konvekce) a zářením (radiace).

Komora je také zvenku ochlazována přirozenou konvekcí na vertikálních a horizontálních stěnách.

Vedení tepla v pevných látkách se uplatňuje v tenké vrstvě oplechování, vrstvě izolační vlny, šamotových cihel a horizontálního roštu. Vedení tepla v plynech se týká volného proudu plynů a spalin a pro nakloněný rošt a vrstvu paliva se uvažuje vedení tepla v porézní vrstvě [8].

3.3 PROUDĚNÍ TEKUTIN

Proudění v modelu je rozděleno na dvě hlavní oblasti. V oblasti volného proudu plynů se uvažuje výskyt turbulentního proudění, a objemy vrstvy paliva a nakloněného roštu protéká laminární proudění, protože u porézních materiálů se nepředpokládá, že by mohlo Reynoldsovo číslo překročit mez potřebnou pro rozvinutí turbulentního proudění.

3.4 TRANSPORT CHEMICKÝCH LÁTEK

3.4.1 Ohřev a sušení paliva

Tyto procesy probíhají pouze ve **vrstvě paliva**. Ohřev paliva se řídí podle rovnic přenosu tepla v porézní vrstvě. To znamená teplem z chemických reakcí, radiací ze spalovací komory a prouděním horkých plynů nad vrstvou paliva. Souběžně s ohřevem probíhá i sušení paliva v podobě odpařování vody. Proces odpařování palivo ochlazuje a je možné ho popsat pomocí rovnice [9]:

$$m_{H_2O} = 2,822 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - \varepsilon_p) \cdot \rho_{wet} \cdot Y_{H_2O}^k \cdot V_k \cdot e^{\left(-\frac{10\,584}{T}\right)} \cdot |T - 475|^7 \quad (2.1)$$

Kde m_{H_2O} [kg/(m³s)] je rychlost uvolňování vody, ε_p [-] je porozita, ρ_{wet} [kg/m³] je hustota, Y_{H_2O} [kg/kg_{pal}] je korigované množství vody v palivu, V_k [-] je korekce na objem a T [K] je teplota.

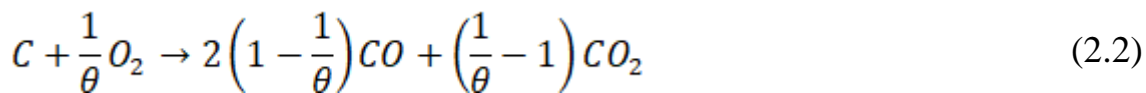
Sušení paliva neprobíhá v celé doméně paliva, ale kvůli snížení náročnosti výpočtu pouze v části, která koresponduje s hořením proti směru proudu spalovacího vzduchu.

3.4.2 Pyrolýza

V modelu se předpokládá, že se veškerá prchavá hořlavina uvolní v předem definované oblasti, jejíž výběr odpovídá teorii. Uvolňované látky jsou CO, O, C₂H₆, HCN a NH₃. Uvolňování dalších uhlovodíků (např. CH₄) se neuvažuje a produkce nižších uhlovodíků je důsledkem rozkladu C₂H₆.

3.4.3 Hoření dřevěného uhlí

Zjednodušeně je možné říct, že při hoření dřevěného uhlí vzniká pouze oxid uhličitý a oxid uhelnatý. Tyto budou vznikat podle rovnice [10]:



Kde θ [-] je stechiometrický poměr.

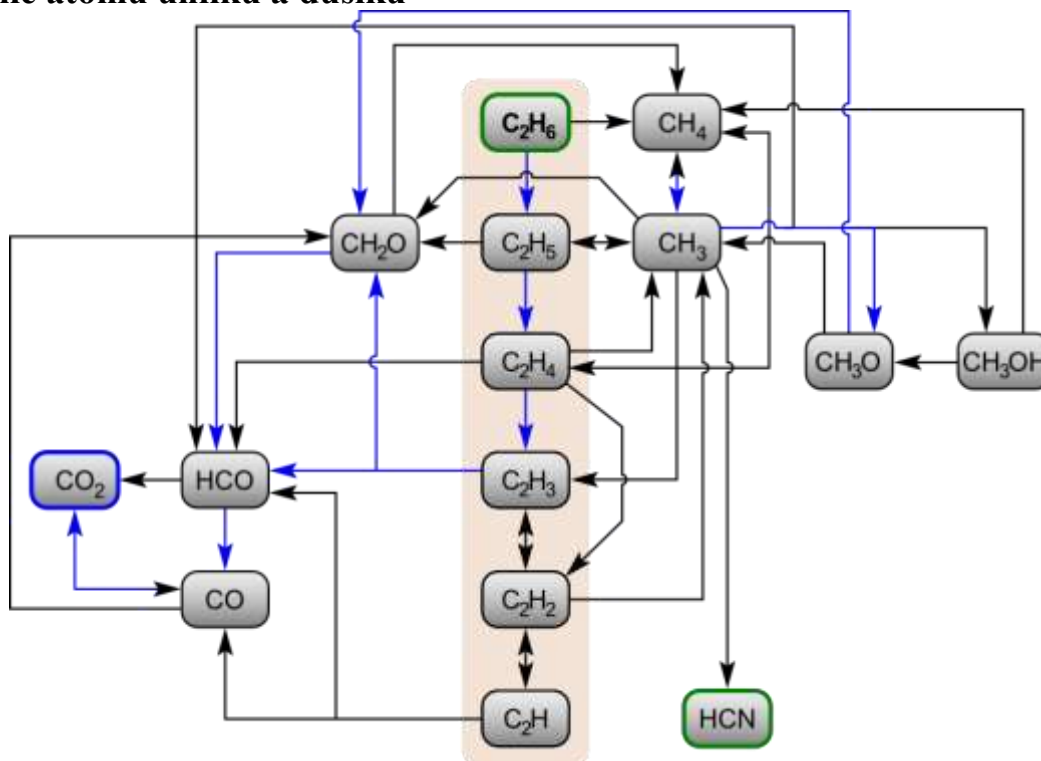
Vzhledem k neměnným rozměrovým vlastnostem částice použitými v modelu se uvažuje se stále stejnou rychlostí hoření a uvolňování oxidů uhlíku až do doby, dokud se nespálí všechnen pevný uhlík obsažený v palivu.

3.4.4 Hoření prchavé hořlaviny

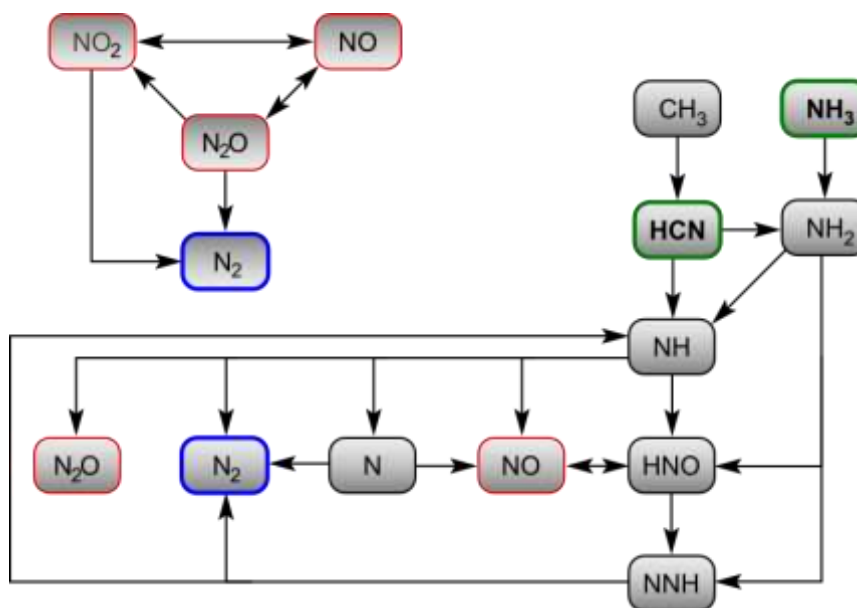
Tento proces jako jediný probíhá jak ve **vrstvě paliva**, tak ve **volném proudu plynů**. Celý model spalování použitý pro tuto práci vychází z modelu pro spalování metanu označený jako GRIMECH 3.0 [11]. Redukce v takto složitém modelu byla provedena za pomoci jiného skeletálního mechanismu [12], který je výsledek citlivostní analýzy jiných skeletálních mechanismů. Také byla přidána reakce pro produkci NNH, což je důležitý meziprodukt při tvorbě oxidů dusíku [13].

Výsledný model obsahuje stejných 5 prvků, jako GRIMECH, ale namísto s 53 sloučeninami a 325 chemickými rovnicemi pracuje s 34 sloučeninami a 121 chemickými rovnicemi. Níže jsou blíže vizualizovány základní procesy.

Chemie atomu uhlíku a dusíku



Obr. 3 Řetězec chemických sloučenin s atomem uhlíku



Obr. 4 Řetězec chemických sloučenin s atomem dusíku

Voda

Jako finální vedlejší produkt výše vyobrazených přeměn je voda, respektive radikál OH, přes který veškerá voda z reakcí vzniká několika různými mechanismy.

Výše uvedené mechanismy mají zásadní vliv na dynamiku procesu, který je schopný produkovat oxid uhelnatý, dehty a hlavně oxidy dusíku.

3.4.5 Popis transportu chemických látek

Transport chemických látek se řídí převážně oblastí, ve které probíhá: volný proud plynů, nebo porézní vrstva. Pro každou oblast se počítá difuzivita zvláště ze základní předpokládané hodnoty $1e-5$.

3.5 POHYB PALIVA NA ROŠTU

Pohyb paliva se realizuje tak, že je vrstva paliva rozdělena na diskrétní sekce, které se nepohybují a představují různé stupně vyhoření paliva. Stupeň vyhoření paliva je v každé sekci konstantní, ale pro každou sekci jiný a odvíjí se od původního stavu paliva – množství vody (vlhkost) a množství prchavé (CO , O , C_2H_6 , HCN , NH_3) a pevné (C) hořlaviny. Stupeň vyhoření také závisí na čase τ [s], po který palivo na roštu setrvává. Tento čas se uvažuje konstantní a rovnoměrně rozdělený mezi všechny sekce. Množství vlhkosti, prchavé a pevné hořlaviny, které se uvolnily ze sekce paliva, se určí jako objemová integrace za čas a o toto množství se sníží jednotlivé složky paliva v další sekci.

Poslední předpoklad je, že vrstvu paliva je možné uvažovat za porézní, pokud jsou částice paliva teplotně tenké [14]. Vzhledem k tomu, že uvažovaným palivem jsou **smrkové piliny**, které jsou rozměrově od velmi jemného prachu po jednotky milimetrů, a jejich modelování na jednotlivé částice není kvůli náročnosti výpočtu, který by byl tímto zapříčiněn, možné, musí být uvažovány za teplotně tenké.

Tímto způsobem je zajištěn proces, který napodobuje pohyb paliva na roštu.

4 VSTUPY MODELU

4.1 PALIVO A SPALOVACÍ VZDUCH

Hrubý rozbor [% _{hm}]				
		r	d	daf
Voda celková	W	11,0	-	-
Popel	A	0,47	0,53	
Hořlavina	h	88,5	99,5	100
- prchavá	v	74,1	83,2	83,7
- neprchavá	nv	14,5	16,3	16,4
Prvkový rozbor [% _{hm}]				
Uhlík	C	44,6	50,1	50,3
Vodík	H	5,46	6,13	6,16
Kyslík	O	38,4	43,1	43,4
Dusík	N	0,11	0,12	0,12
Teplota deformace		1 044 °C		
Teplota měknutí		1 052 °C		
Teplota tání		1 257 °C		
Teplota tečení		1 264 °C		

Tab. 1 Složení referenčního paliva [15]

Množství paliva bylo převzato z předchozí práce [16], kde byl experimentálně určen hmotnostní průtok paliva o vlhkosti 54,5 % jako 0,00986 kg/h. Odsud bylo přepočítáno množství paliva na změřenou vlhkost 5,86 % jako 0,00476 kg/s. A ze známého množství paliva a jeho porozity je možné určit délku setrvání paliva v jednom sloupci, což je čas, který je potřeba k naplnění objemu prvního sloupce jako 57,1 s. Dále bylo určeno množství hořlaviny v palivu a její podíl na tvorbě jednotlivých složek prchavé hořlaviny. Toto množství muselo být potom ještě zkorigováno na objem, hustotu a porozitu.

Korigovaná složka hořlaviny	Podíl v palivu [kg/kg _{pal}]
Y _C	0,21910
Y _{CO}	0,24223
Y _{NH3}	0,00083
Y _{HCN}	0,00083
Y _O	0,27408
Y _{C2H6}	0,33455
Y _{H2O}	0,05860

Tab. 2 Korigovaná hořlavina a obsah vody v palivu

Množství spalovacího vzduchu bylo spočítáno podle obvyklých stechiometrických rovnic a bylo určeno jako 0,0544 kg/s.

4.2 FYZIKÁLNÍ VELIČINY A FUNKCE

Pro volný proud plynů je jediná hodnota, kterou je potřeba zadat, aby bylo možné počítat **přenos tepla**, tepelná vodivost jednotlivých složek směsi plynů, které byly převzaty z materiálové knihovny programu COMSOL 5.2 [17]. Pro výpočet celkové tepelné vodivosti směsi byly použity pouze hlavní složky plynu: molekulární dusík a kyslík, vodní pára, oxid uhličitý a argon.

Veličina	Fáze paliva		
	Vlhké (wet)	Suché (dry)	Dřevěné uhlí (char)
Porozita	0,4	0,35	0,3
Podíl matrice	0.6	0.65	0.7
Tepelná vodivost	0,18	0,18	0,084
Měrná tepelná kapacita	1 600	1 600	1 000
Hustota	402	365	208

Tab. 3 Hodnoty teplotních veličin vrstvy paliva

Při procesu hoření se palivo postupně mění, a z tohoto důvodu se uvažují změny v palivu, které jej postupně přemění z vlhkého přes suché, až do konečné fáze dřevěného uhlí. Palivo tvoří pevnou matici porézní vrstvy. V každé fázi musí mít matrice zadané hodnoty pro tepelnou vodivost, měrnou tepelnou kapacitu, hustotu a podíl místa, které matrice vyplňuje. Pro plyn proudící porézní vrstvou platí stejné hodnoty, jako pro volný proud plynů.

Pro ostatní pevné látky jsou veličiny vedení tepla zadány následovně:

Veličina	Litina [5]	Šamot [18]	Vlna [19]
Tepelná vodivost	50	1,8	0,038
Hustota	7 000	2 050	23
Měrná tepelná kapacita	420	800	1 800

Tab. 4 Hodnoty veličin vedení tepla v pevných látkách

Kromě zdroje tepla z chemických reakcí, pro které se rozdíl entalpií určují z polynomu NASA formátu, je potřeba zadat hodnoty pro výparné teplo vody [20], výparné teplo dehtů a rozdíl entalpií [21] pro hoření dřevěného uhlí produkující oxid uhličitý a oxid uhelnatý.

Pro **proudění plynů** se viskozita opět určuje pro 5 hlavních složek plynu. Množství vzduchu na primární a sekundární spalovací vzduch je v poměru 40/60. To znamená 0,0218 kg/s a 0,0326 kg/s. Laminární proudění ve vrstvě paliva potom potřebuje mít zadány porozitu [22] a permeabilitu:

Veličina	Fáze paliva			Rošt
	Mokrý	Suchý	Dřevěné uhlí	
Porozita	0,4	0,35	0,3	0,242
Permeabilita	1e-10	1e-10	1e-10	1e-12

Tab. 5 Hodnoty porozity a permeability vrstvy paliva a roštu

Pro výpočet **transportu chemických látek** je nutné znát počáteční i okrajové podmínky pro molární koncentrace látek ve směsi plynu. Tyto odpovídají molárním koncentracím těchto látek ve vzduchu. Většina je tudíž nula a je uvažováno, že vzduch je složen z molekulárního dusíku, molekulárního kyslíku, vodní páry, oxidu uhličitého a argonu. Pro vzduch o 200 °C je to potom:

Složka suchého vzduchu	Hmotnostní podíl [-]
Dusík	0,75500
Kyslík	0,23170
Oxid uhličitý	0,00043
Argon	0,01287
Suma	1

Tab. 6 Hmotnostní podíly složek vzduchu

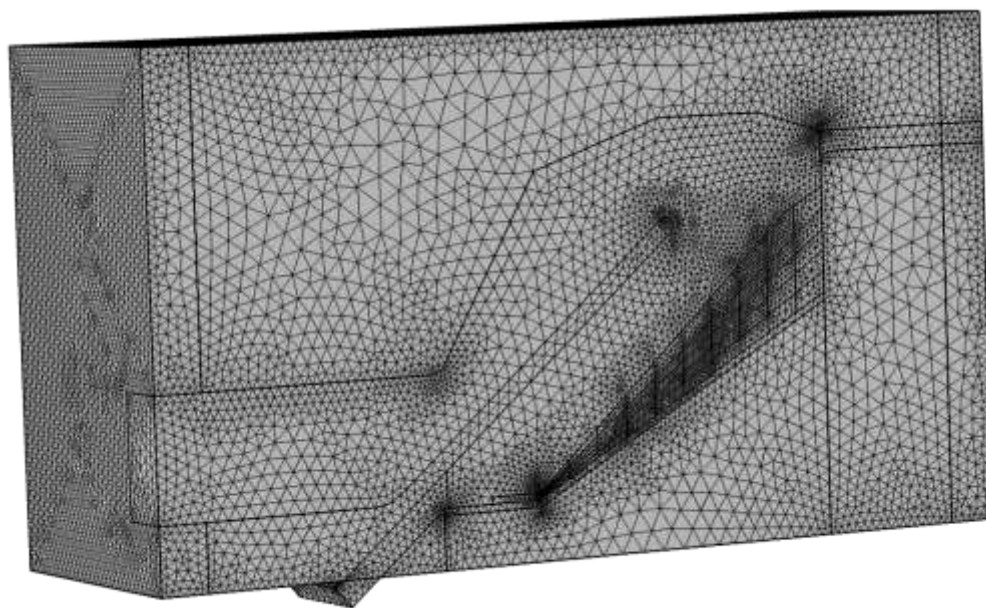
Všechny ostatní chemické sloučeniny se potom buď uvolňují z paliva, nebo jsou produktem chemických přeměn.

5 VÝSLEDKY

5.1 NUMERICKÝ MODEL

Úloha byla počítána na PC sestavě se dvěma procesory Intel Xeon E-2620 v4 (2,10 GHz) a 256 GB RAM běžící pod Windows 10 (verze 1803). Řešení bylo provedeno na výpočetní síti (mesh), která plně využívala možnosti paměti RAM sestavy a je vidět na Obr. 5. Výsledná úloha nakonec pracovala se 3 049 038 stupni volnosti a 2 090 114 vnitřním stupni volnosti.

Výslednou kvalitu meshe je možné považovat, vzhledem k celkové kvalitě jednotlivých elementů, za dostačující.



Obr. 5 Ukázka použité výpočetní síť

Samotný výpočet byl rozdělen pro snížení náročnosti na paměť RAM do kroků, které v každé iteraci postupně řešily v následujícím pořadí teplotní pole, rychlostní pole, koncentraci radikálů a koncentraci stabilních sloučenin. Jako radikály se uvažovaly sloučeniny, které mají vysoké hodnoty rychlosti chemických reakcí nebo mohly dále reagovat za vzniku stabilnější sloučeniny. Vzhledem k nejednoznačnosti toho, která sloučenina může být považována za radikál, nebyly tyto rozděleny do více skupin.

Vzhledem k vysoké nelinearitě a množství rovnic, se kterými model pracuje, bylo pro dosažení konvergence výpočtu využito tzv. rampování, kdy se vybrané hodnoty postupně zvyšují o zvolené násobky, dokud se nedosáhne násobku jedné (100 %), který odpovídá finálnímu („skutečnému“) stavu. V tomto případě byly rampovány pomocí oddělených parametrů hodnoty pro:

- okolní teplotu
- množství tepla uvolněné chemickými reakcemi a odparem
- rychlost chemických reakcí
- množství vody v palivu

- množství hořlaviny v palivu

Prezentované výsledky jsou pro ustálené proudění a nemohou tak replikovat výkyvy v koncentracích a teplotách, které byly naměřeny při předchozích experimentech [7], ale hlavně jsou pro 100% hodnoty všech parametrů, kromě toho, který ovlivňuje množství hořlaviny v palivu – release_S. U tohoto parametru se nepodařilo překročit hodnotu 10 %, po které již nedocházelo k úspěšné konvergenci výpočtu. K tomuto s největší pravděpodobností došlo kvůli jemnosti použité meshe, protože změny ostatních hodnoty či parametrů neměly na konvergenci úlohy vliv. Artefakty koncentrací a teplot začaly primárně vznikat ve vrstvě paliva, pro kterou byla z tohoto důvodu použita nejjemnější mesh. Toto pomohlo při nižších hodnotách release_S. Při vyšších hodnotách se artefakty opět objevily. Výpočet se tak zarazil na výpočetním výkonu počítačové sestavy, na které byla úloha řešena, protože ani výpočet na meshi, který plně využíval paměť RAM s kapacitou 256 GB, nedokázal řešení pro 100 % release_S konvergovat.

Při zjemňování meshe roste při výpočtu náročnost na paměť RAM, a pokud by náročnost na paměť byla vyšší než instalovaná RAM v počítačové sestavě, začnou se data namísto do RAM ukládat na pevný disk (tzv. swapping). Časy, potřebné k přístupům k datům, se u pevných disků a RAM nedají srovnávat, a jakmile se začne swapovat na pevný disk, časová náročnost výpočtu mnohonásobně naroste [23].

Jemnější meshe by se dalo dosáhnout, kdyby se místo direct solveru, který má vysoké nároky na paměť, využil iterativní solver. Nakonec ale bylo rozhodnuto využít direct solver PARDISO, který je oproti iterativnímu solveru mnohem robustnější, a to ve smyslu mnohem menší náchylnosti k nestabilitě výpočtu vlivem samotného nastavení solveru. Iterativní solvery je nutné dlouze a jemně ladit pro každou úlohu zvlášť, a pro úlohy kombinující vícero fyzikálních procesů toto platí dvojnásob [24]. Samotná příprava modelu a výpočetní strategie zabrala mnoho měsíců, i když nebylo nutné ladit iterativní solvery.

Z výše zmíněných důvodů tak není možné přímo srovnávat dosažených výsledků s výsledky experimentálního měření, a nejde tak navržený model spalování ani přímo verifikovat. Ale podařilo se uskutečnit výpočet pro stav, ve kterém jsou odpovídající hodnoty ovlivňující fyzikální procesy, takže je možné, při použití dalších předpokladů, výsledky v omezené míře využít a interpretovat.

5.1.1 Teplotní pole

Teplotní pole má zásadní vliv na všechny ostatní výsledky, a protože výsledek nebylo možné získat pro skutečný stav ve spalovací komoře, jsou tak negativně ovlivněny i výsledky pro rychlostní pole a koncentrace sloučenin.

I když samotný výsledek teplotního pole neukazuje skutečný stav, je z něj možné odvodit důležitý závěr ohledně chování paliva ve spalovací komoře. Ze získaných výsledků je jasně vidět, že je palivo s cca 6% obsahem vody vysušeno mnohem dříve, než model předpokládá, a že charakter sušení je od roštu nahoru. Pro palivo s větším obsahem vody, jaký byl u experimentálního měření, by byl tvar sušení

podobný a pouze posunutý doleva a s tím rozdílem, že by tepelné záření proudů spalin vysušilo palivo i z horní části. Tomu odpovídá i plamen, který byl v komoře vyfocen. Stejně by ale vypadal plamen, kdyby u paliva docházelo k tzv. lavinování, což je stav, kdy nové palivo vstupující do komory netlačí palivo před sebou dále do komory, ale nasouvá se nad něj a kumuluje se do výšky, dokud neztratí pevnost a nezasype palivo v komoře, čímž vytvoří jeho horní vrstvu, která se musí opět celá vysušit, než opětovně zahoří. Toto bude mít vliv jak na časový průběh emisí, tak na průběh teplot. Lavinováním je možné vysvětlit některé výkyvy v koncentracích měřených emisí.

To znamená, že použitý předpoklad pro pohyb paliva na roštu neodpovídá realitě a pro další výzkum je potřeba definovat posun paliva po roštu, který by zjištěným skutečnostem lépe odpovídal, tj. pracoval s kombinací hoření jak po směru, tak i proti směru proudění vzduchu.

5.1.2 Rychlostní pole

Rychlostní pole je ovlivněno jak teplotním polem, které nedosahuje předpokládaných teplot okolo 900 °C, ale pouze lokálně 500 °C, tak menším objemem plynů proudících v komoře. Oboje by mělo za následek zvětšení objemu spalin, a tím pádem vyšší rychlosti. Tyto by ale neměly vliv na vznik a pozici dvou vírů, které v komoře vznikly, ale jen na jejich tvar.

První z těchto dvou vírů jde vidět nad přepážkou v komoře. Druhý vír je možné identifikovat v horní části trysky, což je oblast, která podle výsledků vypadá stejně jako oblast, kde se vyskytuje vír první.

Výskyt vírů v komoře byl v průběhu výzkumu komory považován za vhodný zdroj turbulence, ale ze získaných výsledků se vyvodilo, že jsou problematické vzhledem k produkci škodlivých emisí.

5.1.3 Koncentrace

Níže jsou komentované koncentrace pro vybrané sloučeniny, které byly v modelu počítány. Vybrána byla molekula kyslíku pro svoji celkovou důležitost ve spalovacím procesu a dále byly vybrány produkty hoření uhlíku, kaskáda přeměny C_2H_6 po C_2H_2 kvůli identifikaci problémových míst spalování prchavé hořlaviny a oxidy dusíku.

Jejich absolutní hodnota není důležitá kvůli desetinným hodnotám prchavé hořlaviny, pro kterou byly tyto výsledky získány, a není ani možné vzhledem k nelineárnímu charakteru a počtu rovnic řídících výsledné koncentrace jejich hodnoty pro 100 % množství prchavé hořlaviny odhadovat. Ale při předpokladu, že fyzikální procesy odpovídají skutečnosti, by mělo skutečnosti odpovídat i rozložení koncentrací.

O₂

U koncentrace molekuly kyslíku je ve výsledcích vidět její spotřeba v místě hoření prchavé hořlaviny a dřevěného uhlí. Nejvýraznější jsou ale oblasti dvou vírů

nad přepážkou v a trysce komory, kde je množství kyslíku nižší. Vzhledem ke složitosti použité chemie se nedá jednoduše rozhodnout, jestli se jedná o příčinu, nebo důsledek výsledných koncentrací v těchto oblastech.

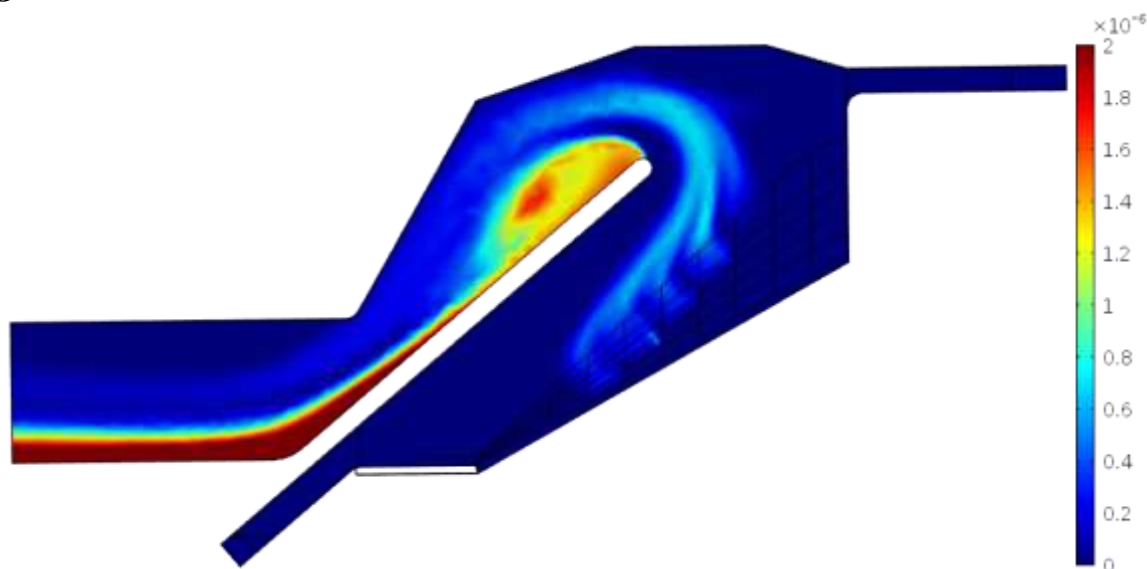
CO

Oxid uhelnatý se objevuje tam, kde se dá předpokládat, že by se měl objevit. Uvolňuje se z oblastí se zadaným uvolňováním prchavé hořlaviny a dřevěného uhlí a po styku se sekundárním spalovacím vzduchem se jeho koncentrace neustále snižuje. Nižší koncentrace nad třetím sloupcem paliva zprava bude způsobena vysokou koncentrací vody, která má zásadní vliv na rychlost jeho přeměny podle použitého reakčního mechanismu. Nemělo by to mít vliv na jeho rychlost přeměny v oxid uhličitý. Vír nad přepážkou má na jeho koncentraci vliv.

CO₂

Oxid uhličitý se objevuje, podobně jako oxid uhelnatý, v předpokládaných místech, i když jeho zdroj nebude především oxidace oxidu uhelnatého, ale jiné mechanismy. Vír nad přepážkou nemá na jeho koncentraci vliv.

NO



Obr. 6 Koncentrace NO v řezu

Ve výsledcích jde vidět zvýšení koncentrace NO ve víru nad přepážkou. I když to nevypadá, že by se zvýšené koncentrace nějak promítly do koncentrace dále po proudu spalin, nějak z víru unikat musí, a to nejspíše podél stěny přepážky a dále podél stěny v trysce. Vysoký nárůst koncentrace, který lze poblíž stěny pozorovat, získané výsledky osvětlit nedokáží. Rozsah byl omezen pro lepší čitelnost.

NO₂

Koncentrace NO₂ kopírují koncentraci NO, ale jsou nižší, a rozdíl mezi koncentrací ve víru a koncentrací podél stěny přepážky a dále podél stěny v trysce již není tak velký.

C₂H₆

Pro C₂H₆ platí, že se postupně rozpadá na lehčí uhlovodíky, a protože v modelu není mechanismus, který by dovozoval jeho opětovný vznik, musí být jeho mírně zvýšené koncentrace u horní stěny trysky důsledkem víru. Tento vír má poté vliv na

koncentraci všech ostatních uhlovodíků, a to především C_2H_3 a C_2H_2 , jak je uvedeno níže.

C_2H_5

Koncentrace C_2H_5 kopíruje charakter koncentrace C_2H_6 , ale je zde patrná potřeba delšího času na rozklad této sloučeniny, což je trend, který se projevuje i u dalšího uhlovodíku, C_2H_4 .

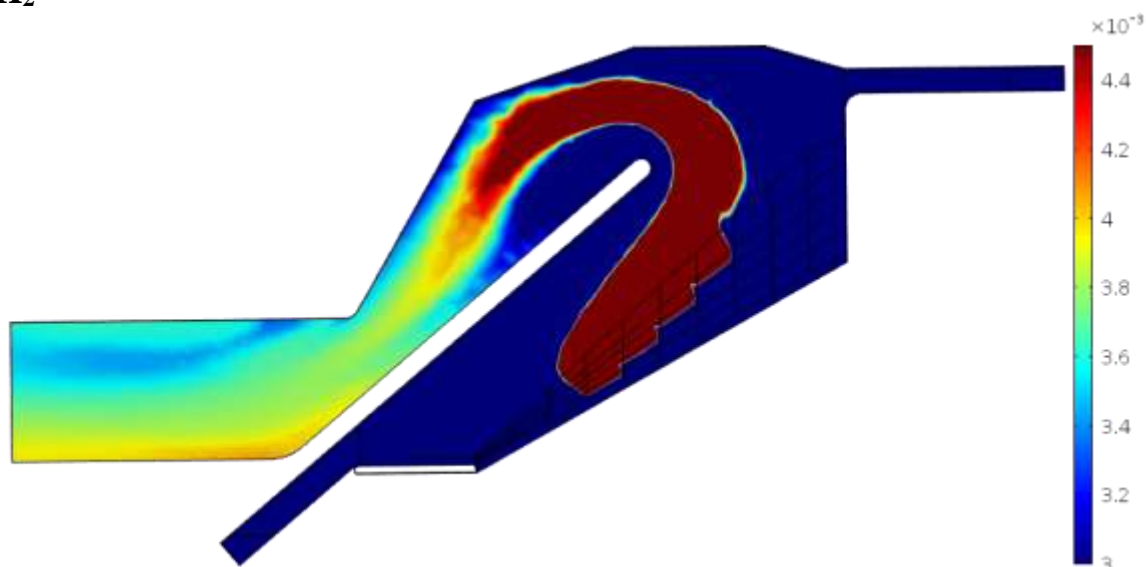
C_2H_4

Zde pokračuje trend, který je patrný i u C_2H_6 a C_2H_5 , kdy nejvyšší koncentrace se drží ve středu proudu spalin, a rozklad na lehčí uhlovodíku pokračuje ještě pomaleji než u oněch dvou zmíněných.

C_2H_3

Zde se již trend s maximální koncentrací trochu mění, protože ve víru, který se vyskytuje v trysce komory, je zřejmé zvýšení koncentrace C_2H_3 , což poukazuje na problém tohoto místa, kde by se mohly rekombinovat dehty.

C_2H_2

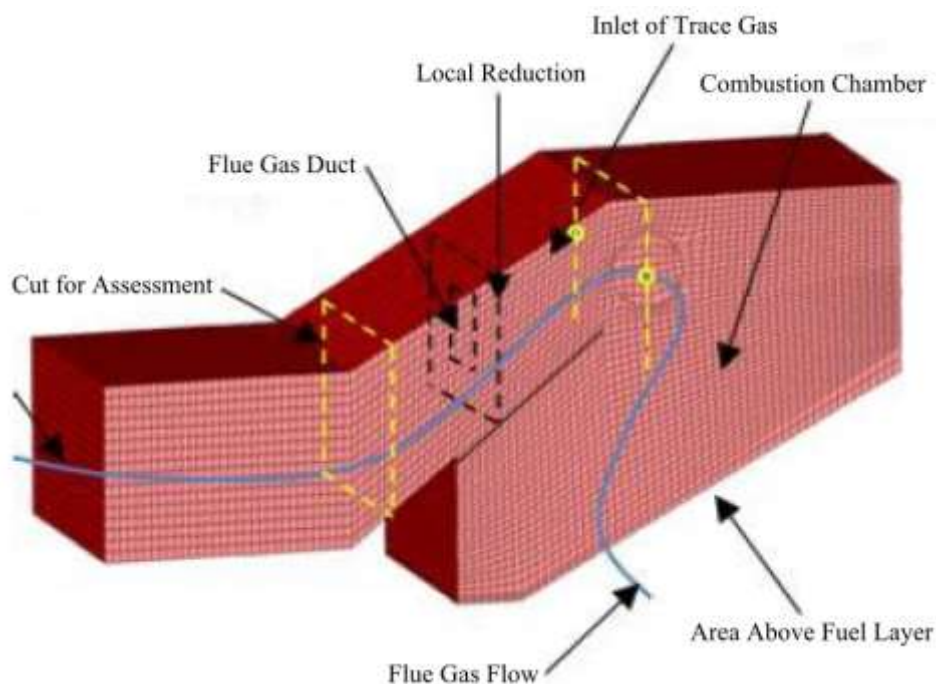


Obr. 7 Koncentrace C_2H_2 v řezu

Koncentrace acetyleny ukazuje jak maximální koncentraci ve středu proudu, tak vznik ve víru v trysce paliva. Navíc hodnoty koncentrace jsou druhé nejvyšší po C_2H_6 . Acetylen by tak mohl být velmi problematický uhlovodík, a to nejen z důvodu snížení účinnosti spalování chemickým nedopalem, ale také kvůli své roli ve tvorbě velmi jemných částic, protože je v současných modelech považován za jejich zárodečné jádro [25]. Rozsah byl omezen pro lepší čitelnost.

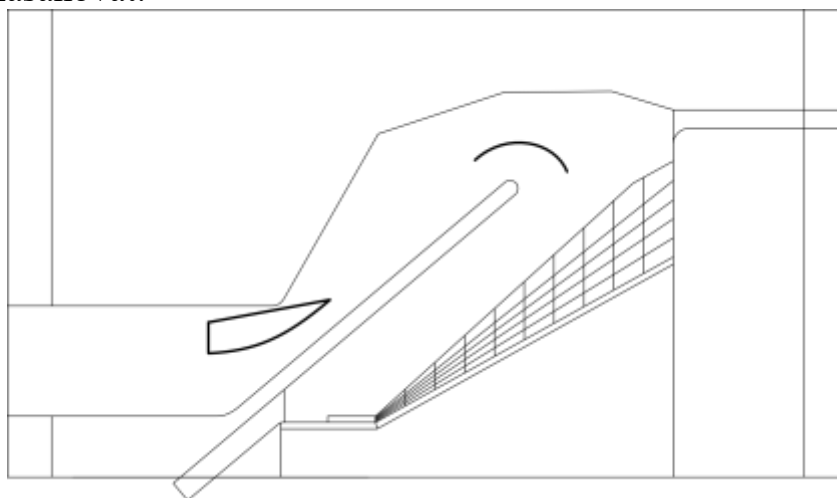
5.2 ÚPRAVA GEOMETRIE

Při předchozím výzkumu [26] se zkoumal vliv vestaveb na promíšení spalin a spalovacího vzduchu. Tento model nebral v úvahu chemické reakce a další koncentrace, které mohou mít vliv na výsledné koncentrace a složení spalin, ale pouze možnost lepšího promíšení spalovacího vzduchu a spalin zavedením clony (turbulátoru) do spalovacího kanálu, viz Obr. 8.



Obr. 8 Návrh umístění turbulátoru ve spalovací komoře [26]

Interpretací výše uvedených výsledků se dá říct, že umístění turbulátoru do spalinovodu je vhodná úprava geometrie, která by zajistila dostatečné promíchání dehtů a dalších nespálených složek hořlaviny, které mají tendenci mít největší hodnoty koncentrací ve středu proudu spalin. Rozvíření proudu ovšem musí do středu proudu zasahovat.



Obr. 9 Návrh umístění vestaveb (červeně) pro eliminaci vírů v proudu spalin ve spalovací komoře

Navíc je ale možné ve výsledcích identifikovat dvě oblasti, kde se objevují v proudění víry. První je nad přepážkou a objevuje se zde zvýšená koncentrace NO a NO₂. Druhá je na začátku výstupní trysky, kde dochází k zúžení proudu spalin. Zde se objevují zvýšené koncentrace C₂H₃ a především C₂H₂, což by mohlo poukazovat na podmínky pro nežádoucí rekombinaci složek zpět v dehty a také, protože acetylen je považován za jejich zárodečné jádro [25], pro tvorbu velmi jemných částic.

Z toho plyne závěr, že i když turbulence jsou vhodné a výhodné pro efektivní spalování [26], tak víry, jejichž osa není rovnoběžná se směrem proudění, jsou

nežádoucí. K zabránění vytvoření těchto víru je možné aplikovat pasivní či aktivní úpravy.

Jako pasivní prvek by se daly využít vestavby komory, které by vedly proud spalin vhodnějším způsobem. Prvotní návrh geometrie a umístění těchto vestaveb je na Obr. 9.

Vestavba umístěná u přepážky má za úkol eliminovat horizontální vír, který u přepážky vzniká. Vestavba umístěná ve výstupní trysce komory je vybavena i žebry, které mají za úkol zmenšit, a v nejlepším případě eliminovat, vertikální víry.

Aktivní prvek eliminace těchto víru potom představuje recirkulace spalin, pro snížení parciálního tlaku vzduchu a snížení emisí oxidů dusíku, nebo přivedení terciálního vzduchu pro eliminaci dehtů. Terciální vzduch může být zaveden kolmo k ose proudu do míst vstupu spalin do trysky, a to v její horní polovině. Recirkulované spaliny mohou být zavedeny kolmo k ose proudu spalin nad přepážku.

Aktivní i pasivní prvky je možné využít i současně, ale jejich optimální tvar a umístění je již úkol pro další zkoumání, stejně jako další rozvoj modelu spalování, který bude schopen přinést přesnější výsledky.

ZÁVĚR

Práce měla za cíl vytvoření počítačového modelu spalovacího procesu za účelem zvýšení účinnosti spalovacího zařízení a snížení produkovaných emisí.

Zkoumané zařízení má nominální výkon 110 kW a je navrženo pro roštové spalování biomasy. Zařízení se skládá z hlavních částí, kterými jsou spalovací komora, ve které nedochází k ohřevu média, výměník spaliny/voda, do kterého následně ze spalovací komory proudí horké spaliny a systém pro předehřev vzduchu, který může veškerý spalovací vzduch předehřát až na 200 °C.

Za účelem vypracování modelu spalovacího procesu byla vytvořena rešerše primárně zaměřená na biomasu jako paliva, její vlastnosti ohledně složení, obsahu minerálních látek, vody, výhřevnosti a velikosti částic a vlivu těchto vlastností na spalovací proces, aby se dalo rozhodnout, co z těchto poznatků je nezbytné pro implementaci v modelu. Následně se rešerše zabývala samotným spalováním biomasy, a to jak z pohledu statiky, tak i dynamiky spalování. Hlavním zjištěním zde bylo, že dynamika spalování zásadně ovlivňuje proces hoření, a proto musí být v co nejdostupnějším detailu do modelu zapracována. Navíc, protože se jedná o roštové zařízení, kde probíhá hoření jak ve vrstvě paliva, tak ve volném proudu plynů, musí být bráno v úvahu jak difuzní, tak kinetické hoření. Dále se rešerše zabývala průběhem spalování paliva na roštu, aby se rozhodlo, jakým způsobem budou v modelu tyto procesy zadány. Bylo rozhodnuto o využití procesu hoření vrstvy paliva proti směru proudu spalovacího vzduchu. Nakonec se rešerše zabývala emisemi vznikajícími při spalování biomasy, a to s důrazem na tvorbu oxidů dusíku. Tímto byl splněn první z dílčích cílů práce.

Následně bylo rozhodnuto, že aby bylo možné zapracovat produkci emisí oxidů dusíku do modelu, musí být využit detailní model chemických procesů spalování. Jako základ těchto chemických procesů byl převzat mechanismus GRIMECH 3.0 [11], který byl pro svoji složitost zjednodušen na základě konzultace další literatury [12].

Pomocí dřívějších výzkumů [6], [26], [27], které se zabývaly prouděním plynů a možnostmi míšení různých plynů ve spalovací komoře, byla vytvořena upravená geometrie spalovací komory, která měla za účel snížit výpočetní náročnost modelu a také zlepšit proudění plynů v komoře.

Kombinací poznatků z rešerše, zredukovaného mechanismu chemických procesů, geometrie spalovací komory a předchozích experimentálních měření [7], [16], pro výkon 55 kW, byl vytvořen úplný model spalovacího procesu ve zkoumané spalovací komoře, který v sobě kombinuje základní fyzikální mechanismy proudění tekutin, přestupu tepla, transportu chemických látek a chemických reakcí těchto látek, čímž byl splněn druhý dílčí cíl práce.

Při následném numerickém výpočtu v počítačovém programu COMSOL Multiphysics [5] byly získány výsledky, jejichž interpretací byly nalezeny nedostatky u zkoumané komory, které představují dva příčné horizontální víry ve spalovací komoře, kdy první z nich se vyskytuje nad přepážkou a má negativní vliv na produkci emisí oxidů dusíku. Druhý vír je v trysce a má negativní vliv na

koncentrace dehtů (těžších uhlovodíků). Dehty mají také nejvyšší koncentrace ve středu proudu spalin, kde je snižená možnost jejich mísení se spalovacím vzduchem vzhledem k malé turbulenci. Na základě těchto výsledků byly navrženy předběžné pasivní možnosti, jak vliv těchto nedostatků snížit, což by mělo mít pozitivní vliv na efektivitu spalovacího procesu a na snížení produkce nežádoucích emisí. Tyto možnosti zahrnují dvě vestavby pro odstranění vírů v proudu spalin a jeden turbulátor pro lepší promísení proudu spalin a spalovacího vzduchu pro snížení chemického nedopalu. Možnost použití turbulátoru byla předmětem i předchozího výzkumu [26] a vhodnost jeho použití zde byla potvrzena. Dále je popsáno využití aktivních prvků, kdy je možné pro snížení emisí oxidů dusíky zavést recirkulované spaliny do víru nad přepážkou a zavedení terciálního vzduchu do víru v trysce spalovací komory. Aktivní a pasivní opatření je možné kombinovat. Výsledky dále potvrdily občasně lavinování paliva, což je problém, který je potřeba vyřešit, aby nedocházelo k náhlým negativním výkyvům v produkci škodlivých emisí. Možnosti eliminace lavinování paliva nejsou v této práci řešeny. Výsledky tohoto zkoumání tak dávají podklad pro vytvoření podmínek, které povedou k efektivnějšímu a ekologičtějším spalování biomasy ve zkoumané komoře, čímž byl splněn poslední dílčí cíl práce.

Vytvořený model má ale i zásadní nedostatek, a to, že neposkytuje přesné hodnoty koncentrací, ale pouze obecný náhled do mechanismů spalování probíhajících ve spalovací komoře, které je možné interpretovat pouze při zavedení dalších předpokladů, a to z důvodu zkoumání příliš velkého zařízení, pro který nebylo možné, kvůli omezení ze strany využití počítačové sestavy, vytvořit dostatečně jemnou výpočtovou síť. Toto je důsledkem přílišného optimismu ohledně v budoucnosti dostupné výpočetní techniky, který u autora panoval před 4 roky.

Při možnostech dalšího zkoumání je proto potřeba se tomuto optimismu vyvarovat a namísto výkonnější výpočetní techniky pro zkoumání velkých 3D modelů jsou na místě zaprvé zjednodušování použitého matematického modelu ve smyslu zachování nezbytných chemických sloučenin, a jeho případné rozšiřování podle dostupných možností, a za druhé jeho aplikaci na menší zkoumané zařízení, nejlépe osově symetrické.

Oba přístupy je možné zkombinovat a další výzkum zaměřit na modelování na zařízení TGA [25], které má ústav k dispozici a které je již v základu osazeno senzory pro měření průtoku a teploty a je k němu navíc připojeno zařízení pro měření částic a plánuje se i další rozšíření o analyzátor plynů. Toto malé, axisymetrické zařízení je tak velmi vhodným kandidátem pro další zkoumání, a navíc jsou zde i možnosti dalšího rozšiřování matematického modelu o jednoduchou tvorbu částic, protože současný model pracuje s molekulou acetyleny, která je podle současných teorií zárodečné jádro pro tvorbu velmi jemných částic [25].

Na závěr lze říct, že hlavní přínos této práce je ve vytvoření modelu spalovacího procesu pracujícího s nezvykle detailní dynamikou, který sice nesplnil všechna počáteční očekávání při aplikaci na velké zařízení, ale který má potenciál pro využití na dostatečně malém zařízení a pro další rozšiřování o fyzikální mechanismy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Akční plán pro biomasu v ČR na období 2012-2020: schválený vládou ČR dne 12. 9. 2012 pod č. j. 920/12.* Praha: Ministerstvo zemědělství, 2012, 100 s. ISBN 978-80-7434-074-1.
- [2] Česká Republika. Předpis č. 165/2012 Sb. Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů
- [3] DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science.* 2004, **30**(2), 219-230. DOI: 10.1016/j.pecs.2003.10.004. ISSN 03601285.
- [4] YIN, Chungen, Lasse A. ROSENDAHL a Søren K. KÆR. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science.* 2008, **34**(6), 725-754. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.05.002. ISSN 03601285.
- [5] *COMSOL Multiphysics* [program na CD-ROM]. Ver. 5.1 for Windows 64-bit. COMSOL, Inc. (Massachusetts, USA): Burlington, 2015. Dostupné z URL <<http://www.comsol.com/>>. General-purpose platform software for modeling engineering applications. Vyžaduje Windows 7 a vyšší.
- [6] ŠPILÁČEK, Michal, Martin LISÝ a Zdenek SKALA. Numerical Study of Air Distribution in Combustion Chamber. *Applied Mechanics and Materials.* 2016, **832**, 218-223. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.832.218. ISSN 1662-7482.
- [7] ZBOŘIL, Martin. *Návrh úprav biomasového kotle pro velmi vlhká paliva.* Brno, 2014. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Martin Lisý.
- [8] BELLAIS, M. Modelling of the pyrolysis of large wood particles. PhD thesis, KTH – Royal Institute of Technology, Stockholm, 2007.
- [9] JUŘENA, Tomáš. *Numerical Modelling of Grate Combustion.* Brno, 2012. Dizertační práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Jiří Hájek.
- [10] ZHOU, H, A JENSEN, P GLARBORG, P JENSEN a A KAVALLIAUSKAS. Numerical modeling of straw combustion in a fixed bed. *Fuel.* 2005, **84**(4), 389-403. DOI: 10.1016/j.fuel.2004.09.020. ISSN 00162361.
- [11] SMITH, Gregory P., David M. GOLDEN, Michael FRENKLACH, et al. GRIMECH 3.0. Combustion.berkeley [online]. Berkeley [cit. 2017-08-05]. Dostupné z: <http://combustion.berkeley.edu/grimech/version30/files30/grimech30.dat>
- [12] LØVÅS, Terese, Ehsan HOUSHFAR, Mette BUGGE a Øyvind SKREIBERG. *Automatic Generation of Kinetic Skeletal Mechanisms for Biomass Combustion.* 2013, **27**(11), 6979-6991. DOI: 10.1021/ef400949h. ISSN 0887-0624.
- [13] KLIPPENSTEIN, Stephen J., Lawrence B. HARDING, Peter GLARBORG a James A. MILLER. The role of NNH in NO formation and control. *Combustion and Flame.* 2011, **158**(4), 774-789. DOI: 10.1016/j.combustflame.2010.12.013. ISSN 00102180.

- [14] THUNMAN, Henrik a Bo LECKNER. Influence of size and density of fuel on combustion in a packed bed. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2005, **30**(2), 2939-2946. DOI: 10.1016/j.proci.2004.07.010. ISSN 15407489.
- [15] SKÁLA, Zdeněk a Tadeáš OCHODEK. *Energetické parametry biomasy: projekt GAČR 101/04/1278*. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-214-3493-6.
- [16] KOIŠ, Jiří. *Výpočtový model kotle KWH*. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Martin Lisý.
- [17] *COMSOL Multiphysics* [program na CD-ROM]. Ver. 5.2 for Windows 64-bit. COMSOL, Inc. (Massachusetts, USA): Burlington, 2015. Dostupné z URL <<http://www.comsol.com/>>. General-purpose platform software for modeling engineering applications. Vyžaduje Windows 7 a vyšší.
- [18] Material Properties of Chamotte. *Matbase* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.matbase.com/material-categories/ceramics-and-glasses/crystalline/refractories/material-properties-of-chamotte.html#properties>
- [19] Insulation materials and their thermal properties. *GreenSpec* [online]. c2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/insulation-materials-thermal-properties/>
- [20] Enthalpy of vaporization. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Enthalpy_of_vaporization
- [21] Molar Enthalpy of Formation of Various Substances. *Ohio University* [online]. Athens (OH): Ohio University, c2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property_tables/combustion/Enth_Formation.html
- [22] IDEL'CHIK, I. E. *Handbook of Hydraulic Resistance: Coefficients of Local Resistance and of Friction*. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, Translated from Russian, 1966. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1220/ML12209A041.pdf>
- [23] COMSOL Knowledgebase. *COSMOL* [online]. c2018, [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/support/knowledgebase/866/>
- [24] Solutions to Linear Systems of Equations: Direct and Iterative Solvers. *COSMOL* [online]. c2018, November 11, 2013 [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/solutions-linear-systems-equations-direct-iterative-solvers/>
- [25] SPILACEK, M.; POLACIK, J.; POSPISIL J.; SNAJDAREK L.; SITEK, T. Fine Particles Emission from Controlled Combustion of Beech Wood in Laboratory Conditions. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*, 2018, vol. 70, p. 1945-1950. DOI: 10.3303/CET1870325; ISBN 978-88-95608-67-9; ISSN 2283-9216.

- [26] POSPÍŠIL, J.; LISÝ, M.; ŠPILÁČEK, M. Optimalization of Afterburner Channel in Biomass Boiler Using CFD Analysis. *Acta Polytechnica*, 2016, vol. 56, no. 5, p. 379-387. ISSN: 1210-2709.
- [27] LISÝ, M; ŠPILÁČEK, M; BALÁŠ, M; SKÁLA, M. Evaluation of Combustion Chamber Design Using CFD. 2018.

ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobní informace

Jméno: Ing. Michal Špiláček
Datum narození: 2. 2. 1987
Národnost: Česká
Adresa: Brožíkova 6, 792 01 Bruntál
Telefon: +420 721 527 568
E-mail: 101269@vutbr.cz

Zaměstnání a praxe

2011 – **Strojírenský technik** – FSI VUT v Brně, Odbor energetického inženýrství – tvorba, úprava a modernizace výukových podkladů
2013 – **Správa počítačové sítě**, softwaru, dat a výpočetní techniky na odboru energetického inženýrství, FSI VUT v Brně

Vzdělání

2011 – **Vysoké učení technické v Brně**, fakulta strojního inženýrství, obor Konstrukční a procesní inženýrství, doktorské studium
2009–2011 **Vysoké učení technické v Brně**, fakulta strojního inženýrství, obor Energetické inženýrství, navazující magisterské studium, zakončeno státní zkouškou, obdrženo titul inženýr
2006–2009 **Vysoké učení technické v Brně**, fakulta strojního inženýrství, obor Strojní inženýrství, zakončeno státní zkouškou, obdrženo titul bakalář
2002–2006 **Gymnázium Bruntál**, obecné vzdělání, zakončeno maturitní zkouškou

Dovednosti a znalosti

Jazyky: Angličtina: pokročilý (úroveň B2/C1)
Němčina: začátečník

IT: Microsoft Windows, Microsoft Office, AutoCAD, Inventor, Inkscape, COMSOL Multiphysics

Řidičský průkaz: Skupina B

Zájmy: Filmy, počítače a IT, hudba, četba, cestování, šerm

ABSTRAKT

Tato práce pojednává o tvorbě numerického modelu komory spalující biomasu na roštu. V rešeršní části práce jsou popsány základní vlastnosti biomasy s ohledem pro její spalování a samotný proces spalování biomasy, pro který je potřeba znát dynamiku chemických reakcí spalovacího procesu a celkový průběh spalování paliva na roštu. Popsána je také produkce škodlivých emisí, které spalováním biomasy mohou vznikat, a důraz je kladen hlavně na produkci oxidů dusíku. V další části je popsáno samotné zařízení a použitý základní matematický model, ve kterém jsou využity mechanismy přenosu tepla, proudění tekutin a transportu chemických látek. Základní matematický model je následně rozšířen na úplný matematický model určením počátečních a okrajových podmínek. Následně jsou uvedeny a okomentovány výsledky počítačové simulace vytvořeného modelu, které se týkají především produkce emisí oxidů dusíku a dehtů, a nakonec jsou tyto výsledky použity pro návrh úpravy geometrie zkoumané spalovací komory.

ABSTRACT

This work deals with the creation of a numerical model of a biomass combusting chamber on a grate. The research part of this work describes the basic properties of biomass important for its combustion and the biomass combustion process itself. For this process which it is necessary to know the dynamics of the chemical reactions and the overall mechanism of a grate combustion of fuels. It also describes the production of harmful emissions that can be generated by combustion of biomass and the emphasis is mainly on the production of nitrogen oxides. In the next part is described the combustion device itself and the basic mathematical model which incorporates the mechanisms of heat transfer, flow of fluids and transport of chemical species. The basic mathematical model is then extended to a complete mathematical model by determining the initial and boundary conditions. Subsequently, the results of the computer simulation of the mathematical model are presented and commented. The main focus are the emissions of nitrogen oxides and hydrocarbons. These results are used to design an improvement of the geometry of the combustion chamber.