

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav procesního a ekologického inženýrství

Ing. Radim Puchýř

**TERMICKÉ ZNEŠKODŇOVÁNÍ ODPADŮ
– MODELOVÁNÍ A APLIKACE**

**THERMAL TREATMENT OF WASTES
– SIMULATION AND APPLICATIONS**

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Josef Kohoutek, CSc.

Doc. Rudolf Žitný, CSc.

RNDr. Petr Žaloudík, CSc.

Datum obhajoby: 28. 2. 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

termické zneškodňování odpadů, hmotnostní a energetická bilance procesu, zplyňování odpadu a biomasy, emise oxidů dusíku

KEYWORDS

thermal treatment of wastes, mass and heat balance of process, gasification of wastes and biomass, nitrogen oxides (NO_x) emissions

Originál dizertační práce je uložen na Ústavu procesního a ekologického inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

© Radim Puchýř, 2002

ISBN 80-214-2232-7

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
3 CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE	6
4 HLAVNÍ OBLASTI ŘEŠENÍ	6
4.1 Programový systém pro termické zneškodňování odpadů <i>TDW</i>	6
4.1.1 <i>Typické zapojení spaloven průmyslových odpadů a jejich modelování</i>	8
4.1.2 <i>Aplikace programového systému <i>TDW</i></i>	10
5 ŘEŠENÍ SPECIFICKÝCH PROBLÉMŮ Z OBLASTI TERMICKÉHO ZNEŠKODŇOVÁNÍ ODPADŮ	12
5.1 Predikce emisí oxidů dusíku (NO_x) u hořáků spalovacích zařízení	12
5.1.1 <i>Matematický model pro predikci koncentrace emisí NO_x</i>	13
5.1.2 <i>Predikce emisí oxidů dusíku s využitím <i>CFD</i></i>	13
5.2 Zplyňování odpadu a biomasy	15
5.2.1 <i>Matematické modelování procesu zplyňování</i>	15
5.2.2 <i>Reakce probíhající při zplyňování</i>	16
5.2.3 <i>Zjednodušený model pro zplyňování ve fluidním reaktoru (rovnovážný)</i>	17
5.2.4 <i>Kinetický model fluidního reaktoru</i>	19
6 ZÁVĚR	19
7 LITERATURA	20

1 ÚVOD

Rozvoj průmyslu a současný způsob života společnosti je spojen s velkým nárůstem tvorby odpadů jak průmyslových tak komunálních. Vznikající množství odpadů začíná být problémem, a proto se hledají metody, jak tento odpad znovu využít nebo účinně zneškodnit resp. zpracovat.

Zařízení pro zneškodňování odpadů jsou neustále středem zájmu příslušných orgánů státní správy a veřejnosti a jejich konstrukce a dopady jejich provozu na životní prostředí se pečlivě sledují. V současné době nabývá tato oblast oprávněného významu, neboť hospodárný a především ekologický provoz těchto zařízení je prioritní.

Předkládaná práce představuje přehled problémů, teoretických a výpočtových (softwarových) nástrojů pro řešení dané problematiky a dílčích výsledků resp. aplikací v této oblasti.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Řešení procesů pro zneškodňování odpadů vyžaduje globální přístup. Důraz je přitom kladen na skutečnost, aby primárně bylo dosaženo bezpečného zneškodnění odpadu za dodržení legislativních podmínek a zároveň se v co největší míře využil energetický potenciál obsažený v odpadu. Nedodržení legislativních podmínek na provoz zařízení pro zneškodňování odpadů má většinou za následek nařízené odstavení a tím zároveň uzavření výroby.

Současný přístup k návrhu procesu lze přibližně shrnout do dvou fází:

1. Ve stadiu návrhu procesu a uspořádání aparátů lze pomocí bilančních programů provést hmotnostní a energetickou bilanci navrženého procesu.
2. Následuje fáze detailního návrhu jednotlivých aparátů. Tato fáze je již plně závislá na zkušenostech a znalostech projektanta, na jeho subjektivních schopnostech a dovednostech.

Na základě výše uvedeného lze konstatovat: Pokud první fázi nazveme analýzou a druhou fází detailním návrhem, potom zcela chybí fáze syntézy, která by zahrnovala určité optimalizační procedury, a jejímž výsledkem by byly provozní podmínky a základní rozměry jednotlivých zařízení, dávající projektantovi jakési vodítko před detailním návrhem. Vzhledem k tomu, že se v naprosté většině případů jedná o specifické a svým způsobem jedinečné aplikace, je velmi obtížné navrhnout technicky a ekonomicky optimální uspořádání linky ještě před použitím detailních výpočtů. Dalším problémem je, že navržené řešení musí být dostatečně „robustní“, aby linka mohla bezpečně pracovat při jistých provozních stavech, daných nehomogennou složením odpadu v čase, plynulostí dávkování apod.

3 CÍL DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem dizertační práce je provést rozbor problematiky, popsat základní postupy návrhu a výpočtů zařízení pro termické zneškodňování odpadů a posoudit možnosti modelování v této oblasti. Dalším cílem je sestavení a ověření matematických modelů vybraných aparátů pro termické zneškodňování odpadů. Tyto modely by měly být schopny simulovat různé provozní stavy a poskytovat účinný nástroj při navrhování nových popř. rekonstrukci provozovaných linek pro termické zpracování odpadů.

4 HLAVNÍ OBLASTI ŘEŠENÍ

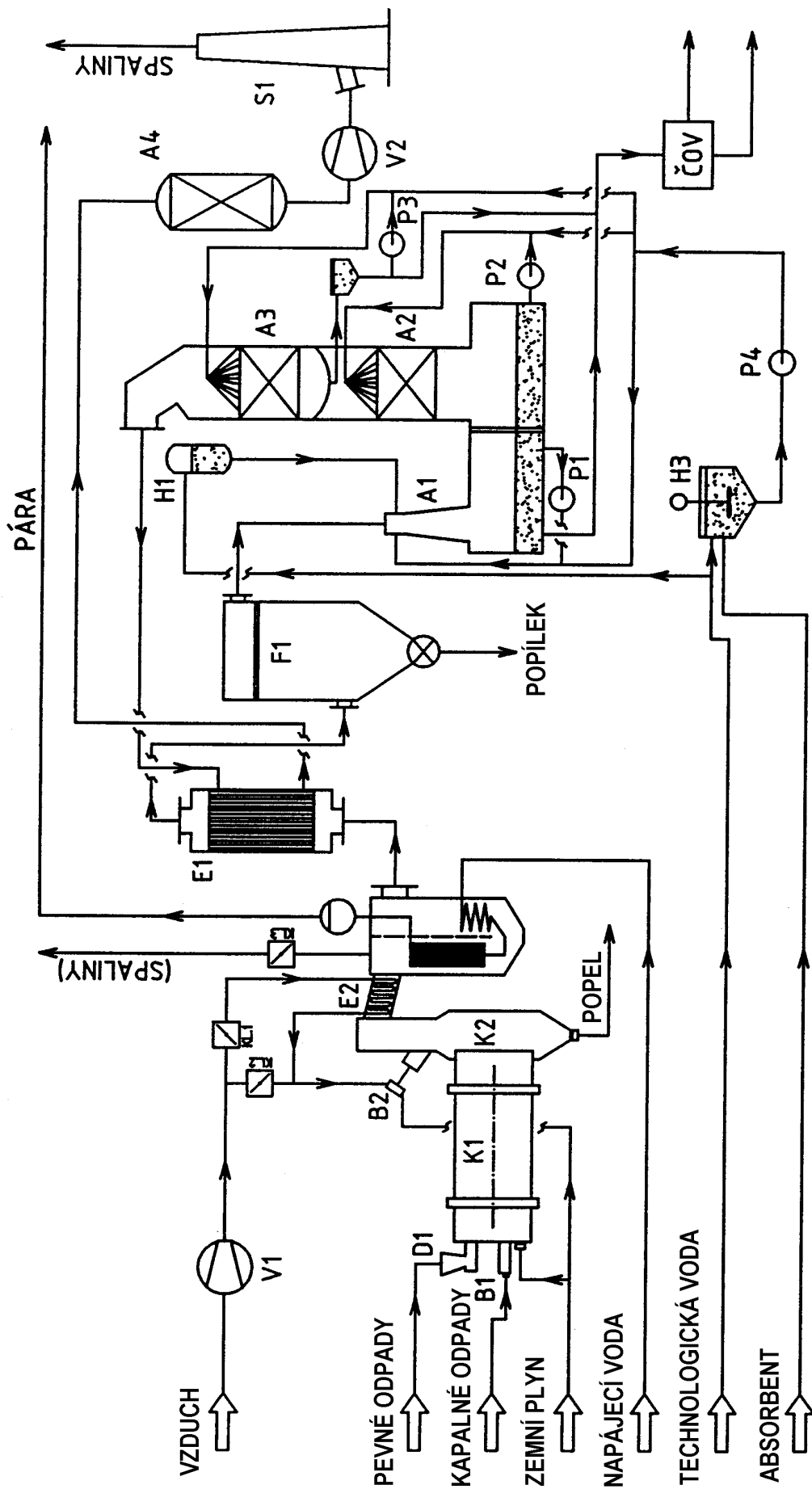
Dizertační práce se zabývá v současné době aktuální a velmi sledovanou problematikou termického zneškodňování resp. zpracování odpadů. Je zaměřena zejména na možnosti modelování a aplikace. Vzhledem k tomu že termické zneškodňování odpadů ve většině případů probíhá ve spalovnách odpadů jedná se převážně o řešení těchto zařízení. Příklad spalovny pro termické zneškodňování průmyslových (a v případě potřeby i komunálních) odpadů je uveden na obr. 1. Spalovnu lze rozdělit na čtyři základní systémy:

- část pro přípravu, zpracování a dávkování odpadů (zařízení D1)
- hlavní část pro termické zpracování odpadů (rotační pec K1 s hořákem B1, dohořivací komora K2 s hořákem B2)
- systém pro využití tepelné energie spalin (výměník tepla pro předehřev spalovacího vzduchu E2, kotel na odpadní teplo, výměník tepla E1 pro ohřev spalin před adsorberem)
- systém pro čištění spalin (filtr F1, třístupňová mokrá vypírka A1, A2, A3 a adsorber A4)

Dále spalovna obsahuje řadu aparátů resp. dílčích systémů (ventilátory V1, V2, čerpadla P1 až P4, čistírnu odpadních vod ČOV, nádrže H1, H2 komín S1 atd.).

4.1 Programový systém pro termické zneškodňování odpadů *TDW*

Jako příspěvek a efektivní „nástroj“ řešení technologie spaloven byl vytvořen rozsáhlý programový systém *TDW* (*Thermal Disposal of Wastes*), který umožňuje provádět hmotnostní a energetické bilance linek pro termické zneškodňování odpadů. Lze jej úspěšně využít při výběru optimální varianty uspořádání celé linky nebo simulaci různých provozních režimů. Tento systém je otevřený a je neustále doplňován o nové modely podle potřeb průmyslové praxe.



Obr. 1 Schéma spalovny průmyslových odpadů o kapacitě 10kt/rok

4.1.1 Typické zapojení s paloven průmyslových odpadů a jejich modelování

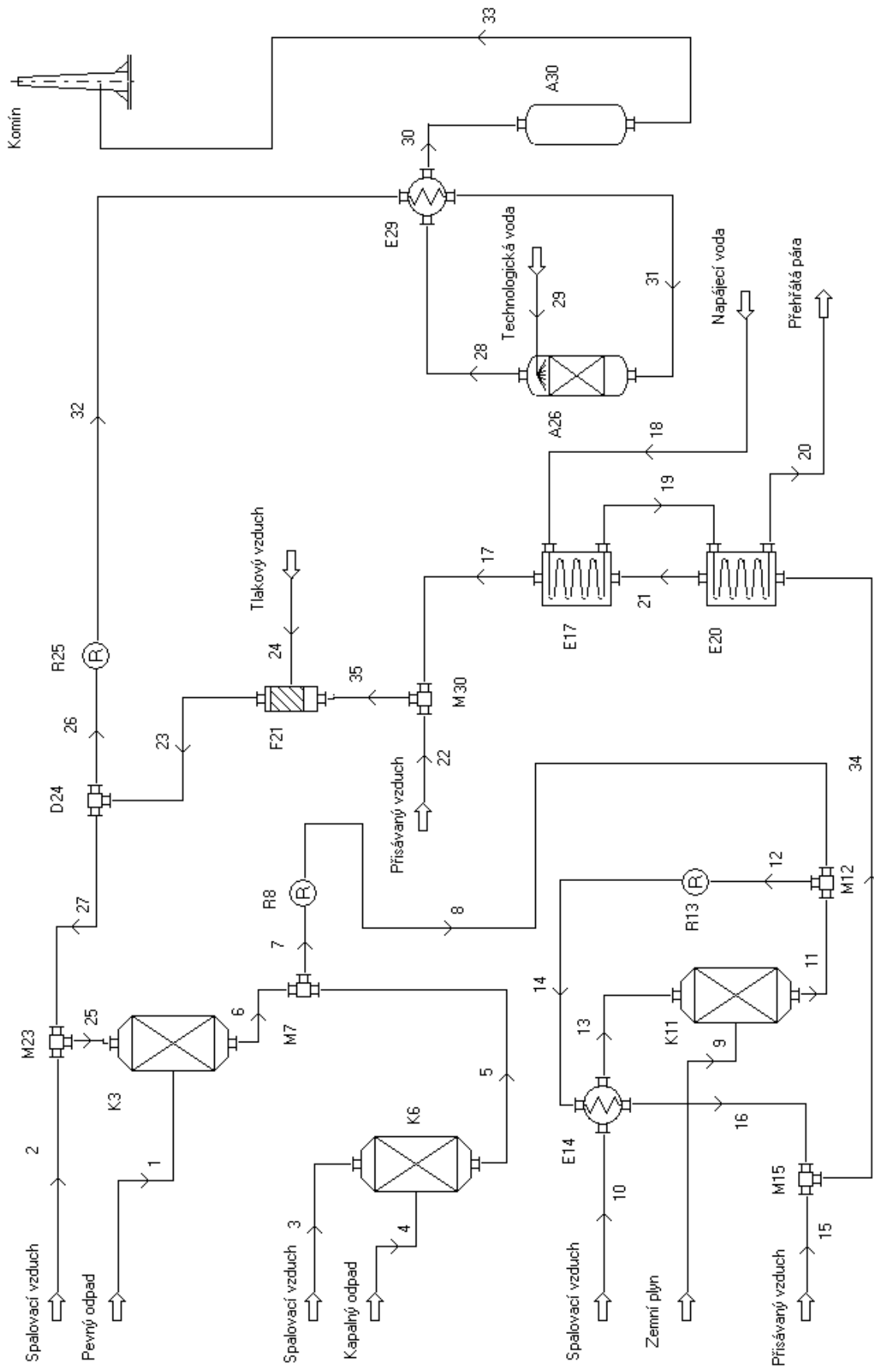
Spalovnu průmyslových odpadů (viz obr. 1) můžeme považovat za ukázkový příklad demonstrace výhod modelování a jeho podpory simulačními programovými systémy, jako je např. *TDW* [1 až 7]. Uživatelský manuál k tomuto systému je uveden v [8]. Používané modely jednotlivých aparátů v programovém systému jsou založeny na příslušných rovnicích hmotnostní a tepelné bilance, které lze nalézt v dostupné literatuře např. [9 až 15]. Jejich formulace a podrobný popis je uveden v [16].

Schéma zapojení spalovny odpadů (dle obr. 1) generované tímto programem je znázorněno na obr. 2. Reálná spalovna obsahuje navíc (jak již bylo uvedeno výše) zařízení na přípravu a skladování odpadu (drtiče, zásobníky), pomocná zařízení pro přípravu technologických médií (příprava napájecí vody, absorpčního činidla apod.), čistírnu odpadních vod a měřicí a regulační systémy.

Spalovací jednotka se skládá z rotační pece a dohořivací komory se stabilizačními hořáky (viz obr. 2). Pro efektivnější provoz bylo navrženo řešení s vratnými spalinami (proud 27), které se před vstupem do rotační pece směšují se spalovacím vzduchem ve směšovači M23. Varianty s vratnými spalinami mají řadu výhod, např. snižují celkový objem výstupních spalin až o třetinu, při smíchání se spalovacím vzduchem zvyšují jeho teplotu, tudíž se nemusí předehtřívát, a výstupní spaliny se lépe čistí, protože škodliviny jsou koncentrovanější. Za uzel, kde se směšují spaliny z rotační pece (aparát K3) se spalinami z pomocného olejového hořáku (aparát K6), je zařazen regulátor (fiktivní aparát R8), který nastavuje optimální množství kapalného odpadu do hořáku tak, aby byla dosažena nastavená teplota spalin v místě jeho umístění (tj. R8). Dále je v lince zařazen plynový hořák (aparát K11), který v reálné spalovně bývá umístěn v dohořivací komoře. Potřebné množství zemního plynu stanovuje regulátor (R13) tak, aby byla dosažena požadovaná teplota spalin v místě tohoto regulátoru. Spalovací vzduch do plynového hořáku je předehtříván ve výměníku (E14) spalinami. Směšovač (M15) simuluje přísávání falešného vzduchu do spalinového tahu.

Směs přisátého vzduchu se spalinami vstupuje do kotle na odpadní teplo, který je simulován dvěma aparáty - výparníkem (E17) a přehřívákem páry (E20). Přehřívák páry je ve spalinovém tahu předřazen výparníku. Spaliny z výparníku kotle postupují do tkaninového filtru (F21), kde se odloučí prachové částičky.

Za filtrem je zařazen dělič spalin (D24) pro oddělení vratných spalin. Za děličem je zařazen regulátor (R25), který řídí smyčku recyklu spalin a ukončuje iterační výpočet. Za tímto regulátorem je zařazen výměník tepla s křížovým prouděním (E29), který ochlazuje spaliny před vstupem do vypírky (A26) a zároveň ohřívá výstupní spaliny, které vystupují z vypírky nasycené vodní parou (teplota cca 60 až 65°C). V tomto výměníku (E29) se spaliny ohřejí na teplotu 85 až 95°C a postupují dále do adsorpční věže (radiální adsorbér se sypaným ložem z aktivního uhlí). Z adsorpční věže již vyčištěné spaliny vstupují do komína.



Obr. 2 Schéma spalovny odpadů

4.1.2 Aplikace programového systému TDW

Vytvoření matematických modelů [16] a následně rozsáhlého simulačního softwarového systému patří k hlavním výstupům předkládané práce a podrobnější popis lze nalézt v [8].

Schéma zapojení spalovny odpadů (viz např. obr. 2) dává představu o typech aparátů, které jsou k dispozici a je možné je použít pro návrh obdobných linek pro termické zneškodňování odpadů anebo pro jiné účely, jako např. spalování biomasy a alternativních paliv [3].

Za hlavní výsledky simulačních výpočtů lze označit hmotnostní a tepelnou bilanci všech zapojených aparátů a podrobná data o všech technologických resp. procesních proudech (teplota, objemový a hmotnostní průtok, složení). Z takto získaných dat je již možné navrhnout rozměry aparátů, dimenzovat potrubí atd.

Parametr	Jednotka	Hodnota
množství spalovaného odpadu	kg.h ⁻¹	1429
teplota spalin z rotační pece	°C	780
teplota spalin z II. stupně spalování	°C	900
teplota spalin v dohořivací komoře	°C	950
teplota spalin za parním kotlem	°C	220
teplota napájecí vody	°C	115
tlak napájecí vody	kPa	250
teplota vyrobené páry	°C	400
tlak vyrobené páry	kPa	4000
teplota výstupních spalin z vypírky	°C	60

Tab. 1 Základní parametry spalovny

Složka	ODPAD A [%hm.]	ODPAD B [%hm.]	ODPAD C [%hm.]	ODPAD D [%hm.]
C	52,92	34,44	66,00	49,51
H	3,65	3,07	12,37	3,43
S	0,78	0,37	0,41	0,06
N	0,00	3,04	0,82	1,12
O	1,93	2,44	2,80	2,61
Cl	0,60	0,00	0,08	0,11
Hořlavina	59,88	43,36	82,48	56,84
Popel	14,11	8,82	2,00	18,50
H ₂ O	26,01	47,82	15,52	24,66
Vlhký	100,00	100,00	100,00	100,00

Tab. 2 Elementární složení pevného odpadu

PROVOZNÍ ÚDAJE SPALOVNY (výpočet proveden programem TDW)				
	ODPAD			
	A	B	C	D
teplota spalin na výstupu z rotační pece [°C] (proud 6)	780	780	780	780
teplota spalin z pomocného olejového hořáku (K6) [°C] (proud 5)	1715	1673	1743	1709
teplota spalin za směšovačem M7 [°C]	900	900	900	900
teplota spalin z plynového hořáku [°C] (proud 11)	1863	1778	1862	1851
teplota spalin za směšovačem M12 [°C]	950	950	950	950
teplota spalovacího vzduchu při vstupu do rotační pece [°C] (proud 25)	80	81	81	80
teplota spalovacího vzduchu při vstupu do plynového hořáku [°C]	200	200	200	200
teplota spalin na vstupu do přehříváku [°C]	935	930	939	934
teplota spalin za přehřívákem [°C]	834	830	836	833
teplota spalin za parním kotlem [°C]	220	220	220	220
množství popela z rotační pece [kg.h ⁻¹]	206	128	31	265
spotřeba zemního plynu [m _N ³ .h ⁻¹]	139	98	202	131
množství napájecí vody [kg.h ⁻¹]	13318	8421	20800	12352
množství přehřáté páry [kg.h ⁻¹]	12806	8097	20000	11877
teplota vratných spalin [°C]	206	192	208	200
objem vratných spalin [m _N ³ .h ⁻¹]	8457	5465	12991	7875
spotřeba vody do vypírky [kg.h ⁻¹]	2931	1214	3896	2713
objem výstupních spalin [m _N ³ .h ⁻¹]	29012	17903	43818	27000
Pozn.:	<ul style="list-style-type: none"> • Přebytek spalovacího vzduchu pro spalování zemního plynu: $\alpha = 1,05$. • Vratné spaliny tvoří 25% ze vstupního proudu do děliče. • Mezi výsledky jsou pro přehlednost uvedeny i některé vstupní parametry zásadního významu. 			

Tab. 3 Výsledky výpočtu spalovny pomocí programového systému TDW

Využití programového systému *TDW* lze stručně demonstrovat na příkladu spalovny průmyslových odpadů popsané výše a znázorněné na technologických schématech na obr. 1 a 2. Požadované základní parametry, které jsou důležité pro hmotnostní a tepelnou bilanci, jsou uvedeny v tab. 1 a tab. 2.

Vybrané hlavní výsledky simulačních výpočtů jsou stručně shrnuty v tab. 3. Vzhledem k tomu, že složení odpadů v jednotlivých variantách bylo různé (tedy i výhřevnost odpadu a množství vzniklých spalin), je kvalitativní zhodnocení obtížné. Aby byla zachována jistá souvislost mezi jednotlivými variantami, bylo nastavení jednotlivých aparátů (tj. přebytek vzduchu pro spalování, tepelné ztráty, teploty spalin ve zvolených místech atd.) i množství spalovaného odpadu stejné.

5 ŘEŠENÍ SPECIFICKÝCH PROBLÉMŮ Z OBLASTI TERMICKÉHO ZNEŠKODŇOVÁNÍ ODPADŮ

Termické zneškodňování odpadů patří k velmi účinným metodám v oblasti zpracování odpadů. Tyto procesy vystavují odpad vysokým teplotám za řízených podmínek (doba zdržení, teplota, turbulence a množství kyslíku) a tím dojde k jeho zneškodnění spálením. Nezbytnou součástí každého spalovacího zařízení je hořákový systém. Konstrukce hořáků je velmi rozmanitá, liší se podle výrobce, použití a účelu. Vlastní konstrukční řešení hořáků je *know-how* výrobce a rozhodujícím způsobem ovlivňuje tvorbu emisí oxidů dusíku (NO_x). Problematice predikce emisí dusíku je věnována kapitola 5.1.

Pokud termické zneškodňování odpadů nebo jiných spalitelných látek probíhá za podmínek bez přebytku vzduchu, přechází proces do pyrolýzního režimu, kdy ze spalovacího prostoru odchází produkty nedokonalého spalování. Energetický obsah produktů odcházejících ze spalovacího prostoru, spočívající jak ve zjevném teple tak v přítomnosti produktů nedokonalého spalování (především lehké uhlovodíky a CO), lze využít v dohořívacím stupni ke snížení spotřeby přídavného paliva.

Zplyňovací proces je alternativou děje nedokonalého spalování, který je veden za řízeného přebytku (resp. nedostatku) kyslíku (buď ze vzduchu nebo čistého kyslíku) a přídavku vodní páry se záměrem částečnou oxidací dosáhnout převedení paliva v pevné formě do plynného, kaloricky využitelného produktu.

Takto vzniklý syntézní plyn může být dále energeticky nebo chemicky využíván. Zplyňovat lze např. biomasu, ale i uhlí, odpady a další substráty. Kapitola 5.2 je věnována problematice zplyňování.

5.1 Predikce emisí oxidů dusíku (NO_x) u hořáků spalovacích zařízení

Emise oxidů dusíku spolu s oxidem siřičitým patří mezi nejzávažnější škodlivé složky spalin. Označení NO_x se vztahuje na velkou skupinu oxidů dusíku N_2O , NO,

NO₂ a N₂O₅. V exhalacích ze spalovacích procesů jsou NO_x převážně ve formě oxidu dusnatého (NO) (cca 90%), což je zcela neškodný plyn. V atmosféře za přítomnosti kyslíku a působením slunečního záření se mění na NO₂, který má hnědou barvu, je jedovatý, dráždí sliznici, způsobuje dýchací potíže a poškození plic.

5.1.1 Matematický model I pro predikci koncentrace emisí NO_x

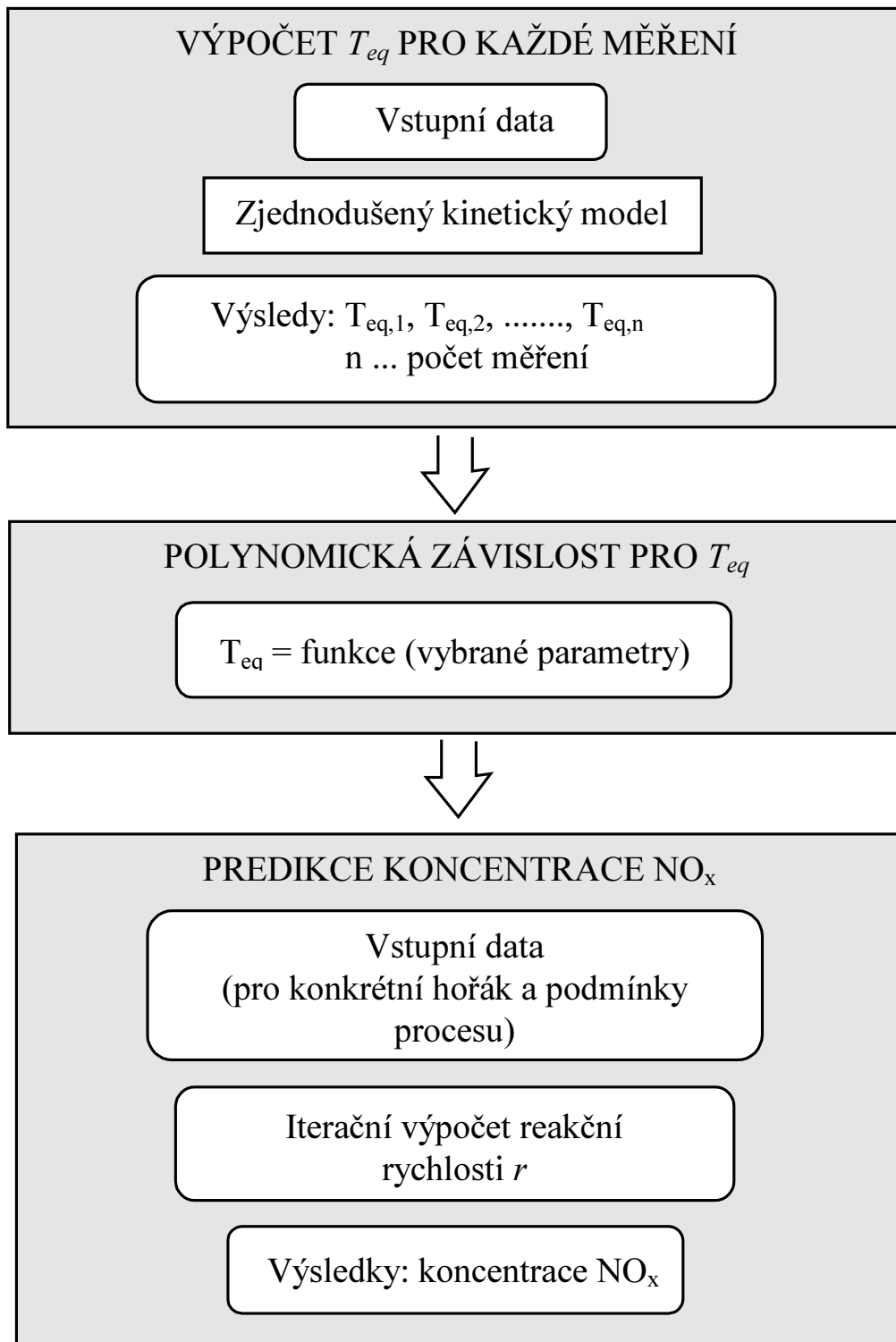
Pro predikci složení spalin lze vytvářet různé matematické modely. Pro některé složky spalin, jako například CO₂ nebo SO₂, lze použít jednoduché stechiometrické modely. Tyto modely se vyznačují dobrou shodou teorie se skutečností a běžně se používají (proto jsou zařazeny v programovém systému *TDW*). Jiná situace nastává u oxidů dusíku. Zde je třeba používat složitější modely využívající teorie reakční kinetiky.

Jednoduchý matematický model pro predikci koncentrace emisí oxidů dusíku založený na ekvivalentní teplotě tvorby NO_x je popsán v [17]. *Ekvivalentní teplota* (T_{eq}) tvorby emisí je hypotetická teplota, která leží v intervalu mezi adiabatickou teplotou spalování a teplotou spalin na výstupu ze spalovací komory. Podle tohoto modelu se předpokládá, že emise NO_x vznikají při této teplotě. Matematický model přitom využívá experimentální data zjištěná na zkušebním zařízení. Údaje z těchto měření slouží k sestavení funkční závislosti pro výpočet ekvivalentní teploty tvorby emisí oxidů dusíku. Příklad této závislosti je uveden v [17]. Celý postup výpočtu je znázorněn na obr. 3. Tento model je neustále vyvíjen, zpřesňován a doplňován o nové funkční závislosti pro výpočet ekvivalentní teploty tvorby emisí dusíku pro další typy hořáků.

5.1.2 Predikce emisí oxidů dusíku s využitím CFD

Softwarové systémy na bázi *CFD* (Computational Fluid Dynamics) doplňují tradiční testování a experimentování. Se vzrůstajícími možnostmi výpočetní techniky se používají pro modelování složitých systémů v energetice, procesním a chemickém průmyslu, v technice životního prostředí atd. Např. softwarový systém FLUENT obsahuje modely, se kterými je možné simulovat děje v reálné spalovací komoře a s použitím tzv. *NO_x Module* i predikovat tvorbu emisí NO_x.

Model spalování vytvořený systémem FLUENT je komplexní, zahrnuje v sobě dílčí modely pro chemické reakce, přenos tepla a turbulenci spalin. Lze také zadat okrajové podmínky, které se budou blížit skutečným podmínkám v provozu, což u jednoduchého modelu není možné. Proto je nutné pro správné nastavení modelu mít přesná experimentální data, jejichž získání je v některých případech obtížné. Vytvořený model byl rovněž využit ve výzkumu predikce koncentrace emisí NO_x [18].



Pozn.: Vybrané parametry na nichž ekvivalentní teplota T_{eq} závisí jsou např. teplota předehřátého vzduchu, adiabatická teplota spalování, přebytek vzduchu, konstrukční parametr hořáku atd.

Obr. 3 Zjednodušený algoritmus pro výpočet koncentrace NO_x

5.2 Zplyňování odpadu a biomasy

Záměrem zplyňování je uskutečnit dílčí oxidací spalitelných podílů za přítomnosti vodní páry tak, aby teplo uvolněné oxidací postačovalo rovněž na průběh dalších konverzních reakcí, jejichž výsledkem bude plyn vykazující kalorický obsah v důsledku přítomnosti dodatečně spalitelných látek (CO, H₂, uhlovodíky). Proces zplyňování je obvykle využíván pro konverzi tuhých paliv (například tlakové zplyňování hnědého uhlí). Zplyňováním těžkých ropných nebo dehtových zbytků lze získat syntézní plyn sloužící k výrobě vodíku, metanolu apod. [19]. Proces zplyňování je v posledním období aplikován často i na zpracování biomasy a odpadů.

5.2.1 Matematické modelování procesu zplyňování

Reakční systém při zplyňování paliv, odpadu nebo biomasy je systémem vytvářejícím mnohasložkovou soustavu, přičemž mezi těmito složkami může probíhat poměrně značný počet reakcí. K matematickému modelování procesu zplyňování lze přistupovat ze dvou hledisek. Lze v zásadě použít jednak modely využívající předpoklad rovnovážného stavu, jednak modely využívající kinetický popis probíhajících dějů. Obě cesty mají své přednosti a úskalí.

Použití modelu založeného na předpokladu dosažení rovnovážného stavu vede k relativně jednoduššímu matematickému aparátu. V těchto modelech jsou jednak respektovány zákony hmotnostní a tepelné bilance podle stechiometrie probíhajících reakcí, současně se však uvažuje termodynamické omezení průběhu reakcí, které se mohou maximálně k rovnováze přiblížit. Protože je obecně známo, že řada reakcí, ačkoliv je termodynamicky možná, neproběhne z kinetických důvodů, zavádí se i v tomto případě parametr označující tzv. přiblížení k rovnováze. Volba tohoto parametru může vycházet buď ze zkušeností získaných průběhy reakcí v určitém systému (v organické technologii se jedná například o popis procesu parního reformování metanu, kde se běžně hodnota tzv. „teplotního přiblížení k rovnováze“ používá). Pokud není dostatek dat o průběhu hodnoceného procesu, může subjektivní zavedení korekčních hodnot „přiblížení k rovnováze“ buď zkreslit výsledky výpočtu nebo naopak výsledky výpočtu pomocí rovnovážného modelu přiblížit pozorované skutečnosti. Z toho důvodu je nezbytné, aby vývoj matematického aparátu pro popis průběhu chemických dějů byl konfrontován s experimentálními daty. Rovnovážný model neřeší kinetiku procesu, nicméně je vhodný pro vytvoření hmotnostní a energetické bilance procesu a umožňuje i navrhnout základní rozměry zařízení.

Kinetický model aplikuje pro popis probíhajících dějů zákonitosti pro průběh chemických reakcí. Ačkoliv je zřejmé, že kinetický přístup je exaktnější než aplikace modelu rovnovážného, vede tento postup k vytvoření dosti komplikovaného systému diferenciálních rovnic. Nevýhodou však je nutnost zavést do kinetických rovnic řadu parametrů (například rychlostní konstanty, aktivační energie reakcí apod.), které nejsou přímo dostupné. V literatuře je ke

komplikovanějším systémům, mezi něž zplyňování odpadu a biomasy patří, publikováno nedostatečné množství informací. Je potřebné respektovat skutečnost, že výsledky měření zjištěné na určitém druhu zařízení za podmínek, v nichž se uplatňují různé makrokinetické vlivy, nelze přenášet na odlišné reakční systémy. Za takového stavu je pak nutné do kinetických vztahů dosazovat hodnoty řady parametrů, které jsou zatíženy subjektivním přístupem. Tyto zásahy potom mohou smazat exaktnost základního kinetického přístupu. Proto vyvíjený matematický kinetický model musí být rovněž soustavně konfrontován s experimentálními výsledky.

5.2.2 Reakce probíhající při zplyňování

Při zplyňování probíhá řada chemických reakcí [20], z nichž mezi nejdůležitější patří:

- spalování hořlaviny s kyslíkem
- konverze uhlíku s parou (reformování)
- reakce mezi plynnými produkty vzniklými spalováním a reformováním

Reakce spalování hořlaviny s kyslíkem

Jedná se o exotermické reakce mezi uhlíkem, vodíkem, eventuálně dalšími komponentami hořlaviny, při nichž dochází k uvolňování tepla. Spalování uhlíku z hořlaviny je reprezentováno exotermickými reakcemi:



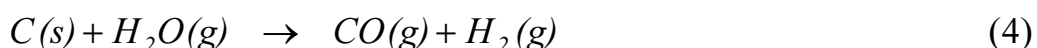
Přítomný vodík může reagovat s kyslíkem za vzniku vodní páry:



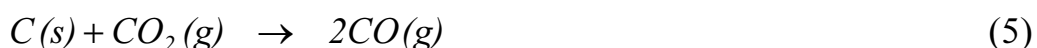
Dále může reagovat se sírou, chlórem, částí dusíku vázaného v hořlavině, chlórem a fluorem za vzniku fosfanu, amoniaku a halogenovodíků. Přítomná síra může přecházet reakcí s kyslíkem do formy oxidů síry, převážně SO_2 .

Reakce konverze uhlíku s parou (reformování)

Hlavní reakcí, která spotřebovává teplo (endotermní reakce), je reformování uhlíku vodní parou:

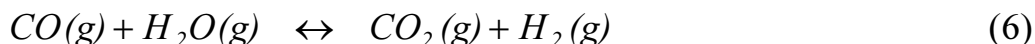


Současně může docházet i k reakci mezi CO_2 , CO a uhlíkem, která je označována jako Boudouardova reakce:



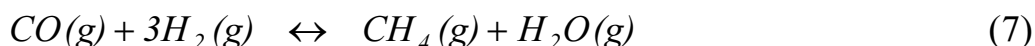
Reakce mezi plynnými produkty vzniklými spalováním a reformováním

Mezi plynnými produkty vzniklými spalováním a reformováním se uplatňuje vratná reakce vodního plynu ("*Water-gas shift*" reakce), při které je oxid uhelnatý převáděn účinkem vodní páry na oxid uhličitý za současné tvorby vodíku:



Jedná se o reakci exotermickou, jejíž tepelné zabarvení není výrazné.

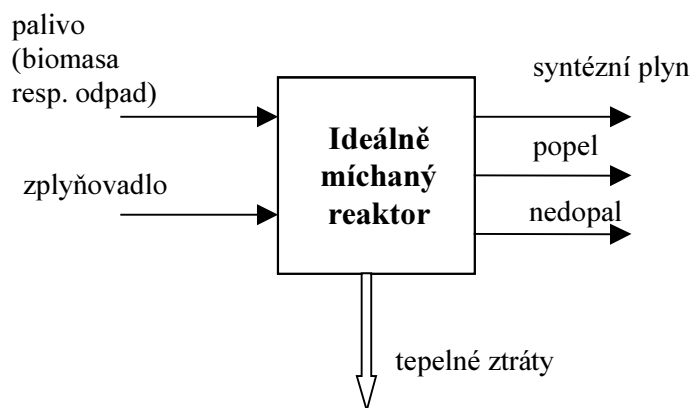
V systému obsahujícím CO a H₂ se uplatňuje reakce vedoucí k vytvoření metanu (metanizační reakce), která je silně exotermická (pro dosažení únosné rychlosti však vyžaduje zvýšený tlak a katalytický kontakt):



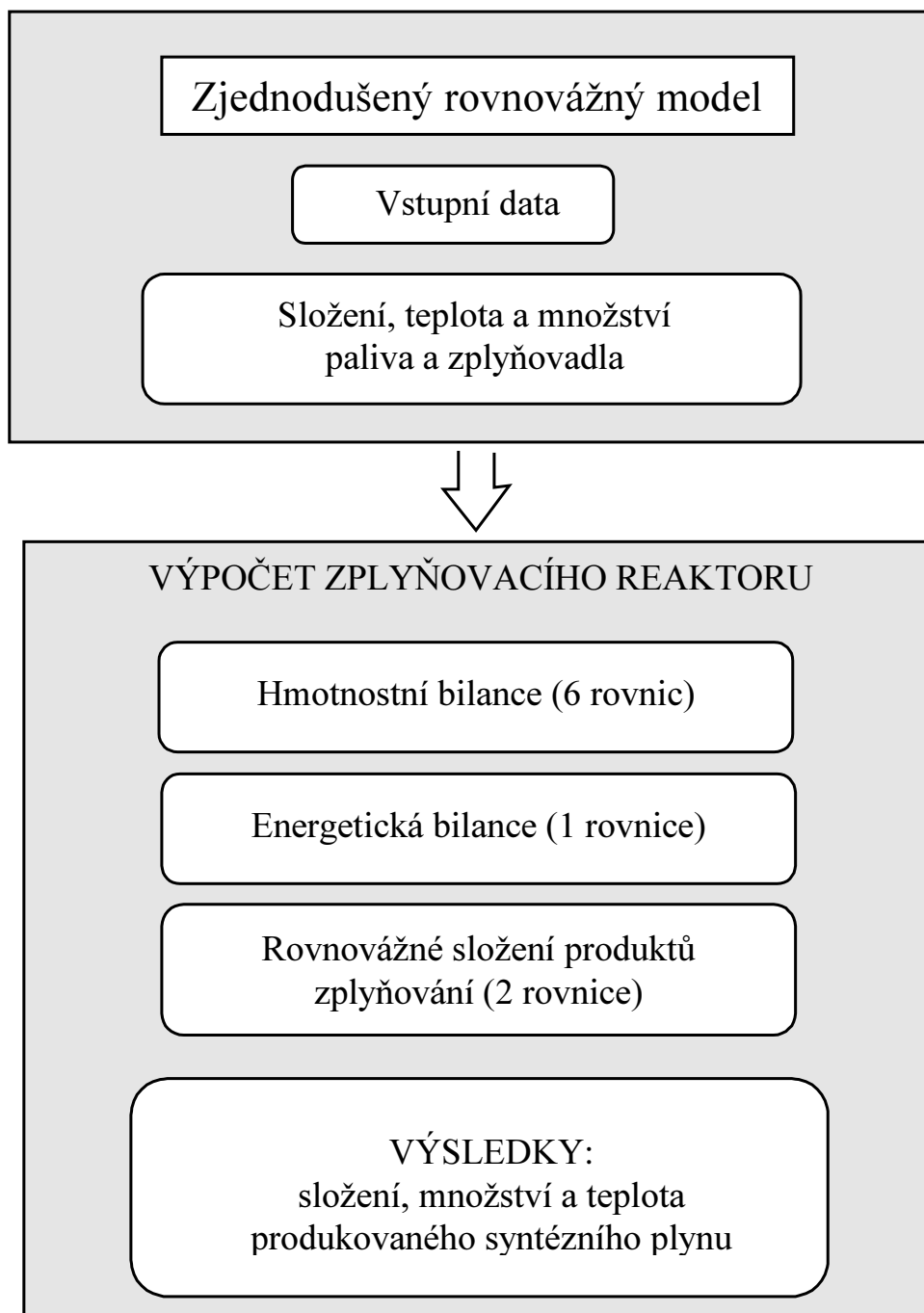
5.2.3 Zjednodušený model pro zplyňování ve fluidním reaktoru (rovnovážný)

Reaktor s fluidním ložem lze modelovat jako ideálně míchaný průtočný reaktor (*CSTR - Continuously Stirred Tank Reactor*). Model reaktoru předpokládá ideální tokové podmínky, tzn. promíchávání je tak intenzivní, že koncentrace a teplota látek vystupujících z reaktoru je rovna průměrné koncentraci a teplotě v reakčním prostoru uvnitř reaktoru. V reálném reaktoru se však tokové podmínky liší od zjednodušující modelové představy.

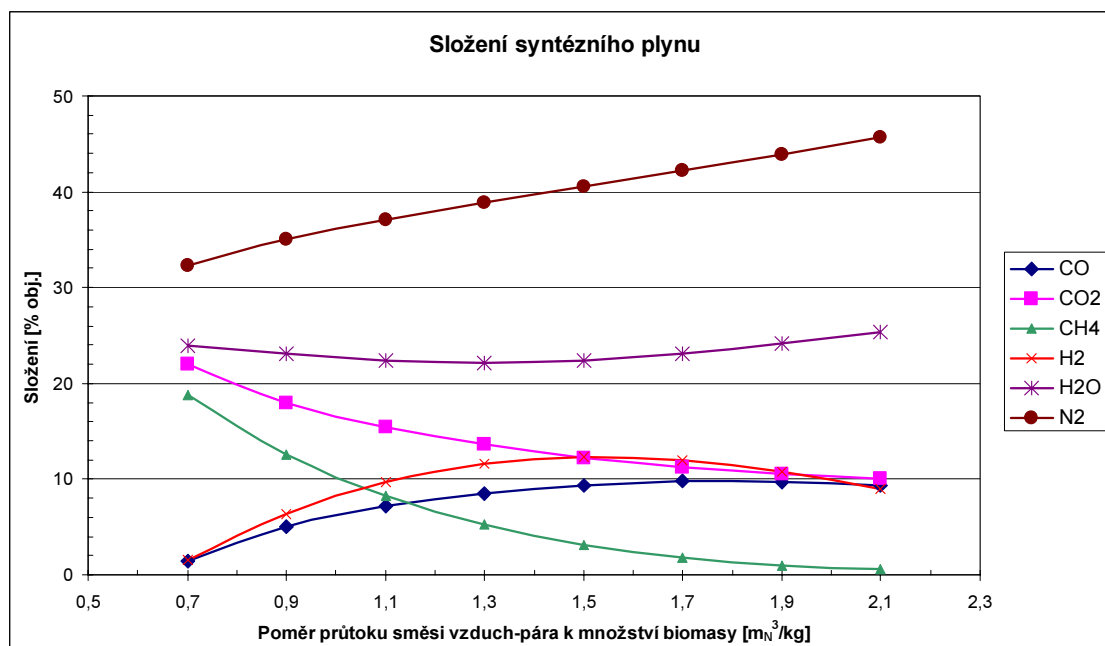
Na obr. 4 jsou schematicky znázorněny vstupní a výstupní proudy pro bilancování zplyňovacího reaktoru. Jako vstupní materiál může sloužit uhlí, biomasa a různé odpadní látky. V ustáleném stavu jsou v rovnováze vstupní proudy (palivo a zplyňovadlo) s výstupními proudy (syntézní plyn, popel a nedopal). Podrobný popis tohoto modelu (základní varianta A a její modifikace B) je uveden v [8]. Rámcový algoritmus výpočtu je schematicky znázorněn na obr. 5. Výsledky výpočtu zplyňování biomasy pomocí rovnovážného modelu pro různé množství zplyňovadla jsou znázorněny na obr. 7.



Obr. 4 Bilanční schéma pro zplyňování paliva



Obr. 5 Rámcový algoritmus výpočtu zplyňovacího reaktoru



Obr. 6 Složení syntézního plynu v závislosti na množství zplyňovadla

5.2.4 Kinetický model fluidního reaktoru

Současně s výše uvedeným rovnovážným modelem fluidního reaktoru je vytvářen kinetický model fluidního reaktoru. Tento model již zohledňuje vzájemnou rychlost probíhajících chemických reakcí. Ačkoliv je zřejmé, že kinetický přístup je exaktnější než aplikace modelu rovnovážného, vede tento postup k vytvoření dosti složitému systému diferenciálních rovnic. Určitou komplikaci působí nutnost zavést do kinetických rovnic řadu parametrů (například rychlostní konstanty, aktivační energie reakcí apod.), které nejsou běžně dostupné. Z tohoto důvodu není vývoj kinetického modelu v současné době ukončen a experimenty ověřen. Popis tohoto modelu je uveden v [8].

6 ZÁVĚR

Předkládaná dizertační práce se zabývá v současné době aktuální a velmi sledovanou problematikou termického zneškodňování resp. zpracování odpadů. Oblasti dané problematiky řešené v práci jsou zaměřeny zejména na tvorbu matematických modelů a jejich aplikaci v průmyslové praxi. Vytvořené programové systémy již byly využity pro výpočty řady zařízení pro termické zpracování odpadů, zvláště spaloven průmyslových odpadů.

Cílem dizertační práce bylo provést nejprve rozbor problematiky a popsat základní postupy a zařízení pro termické zneškodňování odpadů. Na základě těchto rozborů bylo potom možné reálně posoudit možnosti modelování v dané oblasti.

Dalším cílem bylo sestavení a ověření matematických modelů vybraných aparátů pro termické zneškodňování odpadů.

Jako příspěvek k řešení technologie spaloven byl vytvořen rozsáhlý programový systém *TDW*, který umožňuje provádět hmotnostní a energetické bilance linek pro termické zpracování odpadů. V případové studii byla demonstrována možnost aplikace tohoto systému při bilanci spalovny odpadů. Tento systém je otevřený, a je neustále doplňován o nové modely podle potřeb průmyslové praxe.

Dále byla značná pozornost věnována zplyňování paliv a odpadů. Byl sestaven matematický model zplyňovacího reaktoru využívající předpokladu dosažení rovnovážného stavu zplyňovacích reakcí. Tento model byl aplikován na případ zplyňování biomasy v různých podmínkách. Výsledky analýzy kinetických aspektů při zplyňování odpadů společně s odvozenými diferenciálními rovnicemi tvoří jádro kinetického modelu zplyňovacího reaktoru.

V oblasti predikce emisí oxidů dusíku (NO_x) byly použity dva přístupy. Jednoduchý model pro predikci koncentrace NO_x ve spalovací komoře založený na zavedení hypotetické „ekvivalentní“ teploty tvorby NO_x využívá experimentální data zjištěná na zkušebním zařízení. Údaje z měření slouží k sestavení funkční závislosti pro výpočet ekvivalentní teploty tvorby emisí oxidů dusíku. Je neustále vyvíjen a doplňován o nové funkční závislosti pro výpočet ekvivalentní teploty tvorby emisí oxidů dusíku pro další typy hořáků. Společně s využitím metodiky *CFD* patří k účinným „výpočetním nástrojům“ v oblasti hořákových systémů spalovacích komor.

7 LITERATURA

- [1] Stehlík P., Kohoutek J., Richter J., Václavek V., Puchýř R., Jegla Z., Znečišťující látky v procesním průmyslu, jejich vlastnosti a simulační výpočty, zpráva k závěrečné oponentuře projektu Copernicus, číslo smlouvy MŠMT OK 214 (1997)
- [2] Stehlík, P., Puchýř, R. and Oral, J., Simulation of Processes for Thermal Disposal of Wastes, *International Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies*, Proceedings, pp. 41 – 48, Orlando, Florida, USA (10 – 14 May 1999)
- [3] Puchýř, R., Stehlík, P., Oral, J., Simulation of Processes for Combustion of Alternative Fuels, *Proceedings of the Renewable and Advanced Energy Systems for 21st Century*, Lahaina, Maui, Hawaii (April 11-15 1999)
- [4] Puchýř, R., Oral, J., Richter, J., Stehlík, P., Programový systém *TDW* a jeho použití v oblasti návrhu zařízení pro termické zneškodňování odpadů, 25. mezinárodní konference slovenskej spoločnosti chemického inžinierstva *SSCHI'98*, Jasná (květen 1998)

- [5] Puchýř, R., Oral, J., Richter, J., Stehlík, P., Software *TDW* for Simulation of Processes for Thermal Disposal of Wastes, *13th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA '98*, Praha (srpen 1998)
- [6] Kohoutek, J., Oral, J., Hopjan, J., Seichter, P., Richter, J., Puchýř, R., Hajný, Z., Kaňa, R., Kolář, P., Martinů, P., Zneškodňování a recyklace průmyslových odpadů, zpráva k závěrečné oponentuře projektu Copernicus, číslo smlouvy MŠMT OK 213 (1997)
- [7] Stehlík, P., Puchýř, R. and Oral, J., Simulation of Processes for Thermal Treatment of Wastes, *Waste Management*, **20**, pp. 435-442 (2000)
- [8] Puchýř, R., Termické zneškodňování odpadů – modelování a aplikace, dizertační práce (*PhD Thesis*), VUT Brno - fakulta strojního inženýrství, Brno, (2002)
- [9] Kiely, G., *Environmental Engineering*, Irwin/McGraw-Hill, New York (1997)
- [10] Rédl, M., Příhoda, M., *Základy tepelné techniky*, SNTL, Praha (1991)
- [11] Bartok, W., Sarofim, A. F., *Fossil Fuels Combustion*, John Wiley & Sons Inc. New York (1991)
- [12] Hewitt, G. F., (Coordinating Editor), *Heat Exchanger Design Handbook 1998*, Begell House, Inc., New York (1998)
- [13] Holmes, G., Singh, B. R. and Theodore L., *Handbook of Environmental Management & Technology*, John Willey & Sons, New York (1993)
- [14] Perry R. H. and Chilton C. H., *Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill, Inc., New York (1997)
- [15] *VDI-Wärmeatlas*, 4th edn., VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (1984)
- [16] Puchýř, R., Termické zneškodňování odpadů a problematika emisí NO_x, *diplomová práce*, VUT Brno - fakulta strojní, Brno (1997)
- [17] Stehlík P., Kaňa R., Puchýř R., Possible Approach for NO_x Emissions Prediction in Process Industry, *Clean Air IV - Fourth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment*, Lisbon, Portugal, (July 1997)
- [18] Střasák, P., Martinů, P., Kolář, P., Stehlík, P., Puchýř, R., Využití CFD pro predikci emisí oxidů dusíku, *26. mezinárodní konference slovenskej spoločnosti chemického inžinierstva SSCHI'99*, Jasná, (květen 1999)
- [19] Kent, A. J., *Handbook of Industrial Chemistry*, Van Nostrand Reinhold Comp., New York (1974)
- [20] Purdy, M. J., Felder, R. M. and Ferrell, J. K., Coal Gasification in a Pilot Scale Fluidized Bed Reactor. 1. Gasification of a Devolatilized Bituminous Coal, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **20**, 675-682 (1981)

THERMAL TREATMENT OF WASTES – SIMULATION AND APPLICATIONS

Presented PhD thesis deals with problems from the field of thermal treatment and/or thermal processing of wastes. This is, from the environmental point of view, very important area at present. The work is aimed especially at modelling and simulation together with applications including taking into account industrial feedback. Processes of thermal treatment of wastes in various incinerators are solved.

The first (general) part of the thesis is focused on description of the field of treatment of wastes (sorting of various types of wastes, a review of ways for disposal and/or processing of wastes, properties of waste and selection of processes for their treatment accordingly etc.). Majority of this chapter is devoted to discussion of methods of thermal processing of wastes. An analysis of wastes from the point of view of their eligibility for thermal treatment processes is performed, products of incineration are described including residues' disposal and requirements on incineration plants.

The following part of thesis deals with methods of modelling and/or simulation in the field of thermal processing of wastes. Heat and mass balance is of primary importance, therefore software for simulation (which is the main product of the work within PhD studies) can be applied both for design and for operation purposes. Design of incineration plant and/or unit for the thermal treatment of wastes can be focused either on design of the process itself (incineration or gasification, heat recovery, off-gas cleaning) or on the design of equipment (design of combustion chambers based on conventional methods or computational fluid dynamics (CFD), optimisation of dimensions, design of low NO_x burners etc.).

When a new design of incineration plant is being developed or retrofit of older incinerator analysed, simulations based on heat and mass balance of the system are of primary importance. Results of simulations show potential problems in technology applied, weak point and/or bottleneck in design and potential troubles in operation. From these and other reasons a new software TDW (Thermal Disposal of Wastes) has been created. This is in fact an “open” system which is being developed and permanently updated using newly developed models of various types of equipment used in the units for thermal treatment of wastes. Software TDW was originally considered only for simulation of conventional incinerators based on combustion with excess air, however, later on models of gasification started being created. A model of gasification based on chemical equilibrium is described in the thesis as well as that based on chemical kinetics.

A part of the thesis is focused on solving specific problems of incinerators. An optimisation of rotary kiln (which is one of the mostly used equipment in units for thermal treatment of wastes) consists in finding such dimensions of the kiln so that minimum investment cost would be achieved. Another problem solved within the

thesis deals with prediction of nitrogen oxides (NOX) emissions concentration. This model is based on so called “equivalent” temperature of NOX formation which is a hypothetical value, and chemical kinetics. Experimental data from a facility for testing burners were used as input parameters for this model. The same data were utilised for simulation based on CFD. which considers models for NOX concentration evaluation as post-processing unit.

CURRICULUM VITAE

Radim Puchýř

Datum a místo

narození: 30.10. 1971 Brno

Bydliště: Veverská Bítýška

Národnost: česká

Vzdělání:

1997-2000 doktorské studium na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, obor “Konstrukční a procesní inženýrství”

1992-1997 vysokoškolské studium na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, obor “Procesní inženýrství”

1986-1990 studium na Střední průmyslové škole Břeclav

Zaměstnání a odborná praxe:

2000-dosud samostatný projektant a technolog ve firmě EVECO Brno se zaměřením na procesy termického zpracování odpadů, ochrany ovzduší a energetiku

Odborné aktivity:

Spoluřešitel řady mezinárodních projektů a národních programů, autor, resp. spoluautor publikací zahraničních i na národní úrovni.