

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra fyziky
Obor: Aplikovaná elektrotechnika



**Gazifikace a pyrolýza odpadních látek s
využitím termického plazmatu**

**Gasification and pyrolysis of waste
materials using thermal plasma**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Jakub Pilař
Vedoucí práce: Mgr. Alan Mašláni, Ph.D.
Rok: 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pilař** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **474462**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra fyziky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Gazifikace a pyrolýza odpadních látek s využitím termického plazmatu

Název bakalářské práce anglicky:

Gasification and pyrolysis of waste materials using thermal plasma

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se se zdroji termického plazmatu a jejich využitím pro zpracování organických látek, zejména různých druhů odpadů.
2. Zpracujte originální data z jednoho z experimentů na ÚFP, zahrnující charakteristiku zdroje plazmatu, časový průběh procesu gazifikace (pyrolýzy) a popis plynných a pevných produktů reakce.
3. Na tomto konkrétním případě popište výhody a nevýhody tohoto přístupu k zpracování odpadů, v porovnání s klasickými metodami jako např. spalování.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Heberlein J, Murphy A, 2008. Thermal plasma waste treatment. J. Phys. D: Appl. Phys. 41(053001)
- [2] Fabry F, Rehmet C, Rohani V, Fulcheri L, 2013. Waste gasification by thermal plasma: A review. Waste Biomass Valor, Vol. 4, 421–439
- [3] Hrabovský M., van der Walt, I.J., Plasma Waste Destruction, In Handbook of Thermal Science and Engineering, Springer Nature, 1st Edition 2018
- [4] Pfender E, Boulos M, Fauchais P, Thermal Plasmas Fundamentals and Applications, New York-London: Plenum Press 1994

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Mgr. Alan Mašláni, Ph.D., Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

prof. Ing. Stanislav Pekárek, CSc., katedra fyziky FEL

Datum zadání bakalářské práce: **19.01.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Mgr. Alan Mašláni, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....
Jakub Pilař

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Mgr. Alanovi Mašlánimu, Ph.D. za cenné připomínky, rady, přívětivé vedení a angažovanost při spolupráci s katedrou, dále pak panu prof. Ing. Stanislavu Pekárkovi, CSc. za poskytnutí možnosti psát tuto práci a odborné postřehy týkající se věcného obsahu. V neposlední řadě srdečně děkuji své rodině a blízkým za neustálou podporu a důvěru při studiu.

Jakub Pilař

Název práce:

Gazifikace a pyrolýza odpadních látek s využitím termického plazmatu

Autor: Jakub Pilař

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Druh práce: Bakalářská práce

Veřejná práce: Mgr. Alan Mašláni, Ph.D.

Ústav fyziky plazmatu AV ČR

Konzultant: prof. Ing. Stanislav Pekárek, CSc.

katedra fyziky FEL

Abstrakt: Tato práce je zaměřena na popis zpracování odpadu formou gazifikace a pyrolýzy v plazmovém reaktoru. Teoretická část se nejprve zabývá problematikou nakládání s odpady, včetně stručné statistiky o odpadech a jejich rozdělení, dále pak popisem plazmatu, jeho forem, charakteristik a základního chování v elektromagnetickém poli. Následně jsou vysvětleny metody generování plazmatu, zejména termického, včetně zdrojů tohoto typu plazmatu a jejich vzájemných rozdílů. Teoretická část končí popisem laboratorního vybavení používaného na Ústavu fyziky plazmatu, konkrétně zařízení PLASGAS (plazmový zplyňovací reaktor) a vnitřními reakcemi, které probíhají v reakční komoře. Během experimentu byl připravený materiál (simulovaný nemocniční odpad) zpracován za několika různých počátečních a provozních podmínek, konkrétně se jednalo o gazifikaci, částečnou pyrolýzu a pyrolýzu. Z naměřených dat byla provedena analýza, zejména elektrických veličin a složení výstupních produktů. Získané znalosti jsou využity pro výpočet účinností jednotlivých reakcí. Nakonec jsou diskutovány energetické bilance a potenciál technologie v porovnání s konvenčními metodami nakládání s odpady.

Klíčová slova: plazma, termické plazma, plazmový hořák, plazmový reaktor, odpad, nebezpečný odpad, nemocniční odpad, energetická účinnost

Title:

Gasification and pyrolysis of waste materials using thermal plasma

Author: Jakub Pilař

Abstract: This thesis is focused on the description of plasma waste treatment in the form of gasification and pyrolysis in a plasma reactor. The theoretical part first concerns itself with the issues of waste management, including brief statistics about waste, its categories and their division, further a description of plasma, its forms, characteristics and basic behavior in the electromagnetic field. Subsequently methods of plasma generation are explained, with a focus on the thermal, including the sources of specific types of plasma and their mutual differences. The theoretical part ends with a description/overview of the laboratory equipment used by the Institute of Plasma Physics, specifically with the PLASGAS apparatus (plasma gasification reactor) and the inner reactions that occur in the reaction chamber. During the experiment material samples (simulated medical waste) were processed under several different initial and operating conditions, specifically gasification, partial pyrolysis and pyrolysis. Using the measured data, analyses were performed, particularly of electrical quantities and composition of output products. This attainment is used to calculate the efficiency of individual reactions. Finally energy balances were discussed and the technology was compared to conventional methods of waste management.

Key words: plasma, thermal plasma, plasma torch, plasma reactor, waste, hazardous waste, medical waste, energy efficiency

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých zkratk | xi |
| Seznam obrázků | xii |
| Úvod | 1 |
| 1 Odpady | 3 |
| 1.1 Definice a uvedení do problematiky | 3 |
| 1.2 Rozdělení odpadů | 3 |
| 1.3 Odpadové hospodářství | 4 |
| 1.3.1 Problémy energetického využívání odpadů | 5 |
| 1.4 Bilance produkce odpadů v ČR v roce 2019 | 5 |
| 1.5 Nebezpečné odpady | 6 |
| 1.5.1 Radioaktivní odpad | 7 |
| 1.5.2 Odpad z chemického průmyslu | 7 |
| 1.5.3 Nemocniční odpad | 7 |
| 2 Plazma | 9 |
| 2.1 Definice a základní vlastnosti | 9 |
| 2.2 Netermické plazma | 11 |
| 2.3 Termické plazma | 12 |
| 2.3.1 Plazmové zpracování odpadu | 14 |
| 3 Plazmový hořák a reaktor | 19 |
| 3.1 Zdroje termického plazmatu | 19 |
| 3.1.1 Plynem stabilizovaný hořák | 20 |
| 3.1.2 Vodou stabilizovaný hořák | 21 |
| 3.1.3 Hybridní hořák | 21 |
| 3.2 Plazmový reaktor | 23 |
| 3.2.1 Gazifikace | 25 |
| 3.2.2 Pyrolýza | 26 |
| 4 Metodika a materiál | 29 |
| 4.1 Simulovaný nemocniční odpad | 29 |
| 4.2 Počáteční podmínky experimentu | 33 |
| 4.3 Očekávaný průběh | 34 |
| 5 Výsledky experimentu | 35 |
| 5.1 Doplnující úvodní informace o výsledcích | 35 |
| 5.2 Vstupní plyny | 36 |
| 5.3 Teploty v reaktoru | 37 |
| 5.4 Charakteristika plazmatronu | 38 |
| 5.5 Popis výstupních produktů reakcí | 41 |
| 5.5.1 Plynné složky | 41 |
| 5.5.2 Pevné složky | 42 |
| 5.6 Energetické bilance | 43 |
| 5.6.1 Elektrická energie | 43 |
| 5.6.2 Výhřevnost | 44 |
| 5.6.3 Účinnost energetické přeměny | 45 |

| | | |
|-------|---|-----------|
| 5.7 | Diskuze | 47 |
| 5.7.1 | Výsledky | 47 |
| 5.7.2 | Experiment | 49 |
| 5.7.3 | Komplikace a nedostatky | 50 |
| 5.7.4 | Porovnání s konvenčními prostředky nakládání s odpady | 50 |
| 5.7.5 | Potenciál plazmového zpracování odpadu | 51 |
| | Závěr | 53 |
| | Reference | 55 |
| | Přílohy | 59 |
| A | Materiál pro SNO | 59 |

Seznam použitých zkratek

| | |
|-------------|--|
| ČOV | Čističky odpadních vod |
| DC | Stejnoseměrný (<i>Direct-current</i>) |
| EP | Energetická přeměna |
| G | Gazifikace (<i>Gasification</i>) |
| ON | Odpady nebezpečné |
| OO | Odpady ostatní |
| P | Pyrolýza (<i>Pyrolysis</i>) |
| p.p. | Počáteční podmínky |
| P2G | Power to gas |
| POH | Plán odpadového hospodářství |
| PP | Částečná pyrolýza (<i>Partial pyrolysis</i>) |
| PT | Plazmatron (<i>Plasma torch</i>) |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| PVE | Přečerpávací vodní elektrárny |
| reg | Regulační |
| s | Srovnávací |
| SNO | Simulovaný nemocniční odpad |
| TAP | Tuhé alternativní palivo |
| TKO | Tuhý komunální odpad |
| UV | Ultrafialové (<i>Ultraviolet</i>) |

Seznam obrázků

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Schéma oběhového hospodářství [12] - upraveno | 5 |
| 1.2 | Produkce nebezpečných odpadů v krajích České republiky [6] | 6 |
| 1.3 | Skladování radioaktivního odpadu [23] | 7 |
| 2.1 | Netermické plazma - ukázka [32] | 11 |
| 2.2 | Teploty elektronů a těžkých částic v plazmatu v závislosti na tlaku [34] - upraveno | 13 |
| 2.3 | Zjednodušený princip teplotního přenosu při ohřevu letící částice plazma- tem [25] - upraveno | 13 |
| 2.4 | Termické plazma - ukázka [35] | 14 |
| 2.5 | Porovnání vysušeného kalu s nevylohouvatelnou struskou [38] | 15 |
| 2.6 | Zplyňovací zařízení v Dubé firmy Millenium Technologies a.s. [39] | 16 |
| 2.7 | Schéma plazmového zplyňovacího zařízení firmy Millenium Technologies a.s. [38] - upraveno | 16 |
| 3.1 | Schéma plynem stabilizovaného plazmového hořáku [41] - upraveno | 20 |
| 3.2 | Schéma vodou stabilizovaného plazmového hořáku [42] - upraveno | 21 |
| 3.3 | Schéma hybridního plazmového hořáku [44, 45] - upraveno | 22 |
| 3.4 | Hybridní plazmatron vyvinutý a používaný na ÚFPAV [44] | 22 |
| 3.5 | Provozní režimy DC ¹ typů obloukových plazmových hořáků [45] - upraveno | 23 |
| 3.6 | Schéma reaktoru PLASGAS [44] - upraveno | 24 |
| 3.7 | Komponenty laboratorního zařízení (1) | 24 |
| 3.8 | Komponenty laboratorního zařízení (2) | 25 |
| 3.9 | Uhlíkaté nanočástice po pyrolýzní reakci | 27 |
| 4.1 | Složení nemocničního odpadu [51] - upraveno | 29 |
| 4.2 | Biomasa a plasty pro vzorek SNO | 31 |
| 4.3 | Textilie pro vzorek SNO - chirurgický plášť a jednorázové prostěradlo . . . | 31 |
| 4.4 | Guma pro vzorek SNO | 31 |
| 5.1 | Charakteristika důležitých dodávaných plynů | 36 |
| 5.2 | Průběhy naměřených teplot konkrétních termočlánků | 37 |
| 5.3 | Průběh napětí | 38 |
| 5.4 | Průběh elektrického proudu | 38 |
| 5.5 | Průběh příkonu | 39 |
| 5.6 | Průběh argonu v hořáku | 39 |
| 5.7 | Ukázka změny průchodu elektrického oblouku skrze rotující anodu [44] . . . | 41 |

¹Stejnosměrný (*Direct-current*)

Úvod

Lidstvo se už od počátku svojí existence muselo naučit vynakládat s odpady. První zlom přišel zhruba v roce 10 000 př. n. l., kdy lidé upustili od kočovného života a usadili se, což mělo za následek kumulování odpadu. Vzhledem k omezeným možnostem a zvyklostem museli dlouhá staletí obyvatelé přebývat ve špíně a odpadcích, to předcházelo tomu, že některé komunity začaly vytvářet základní kameny odpadového hospodářství, které se vyvíjí dodnes. [1]

V dnešní době masivního technologického vývoje nám již v cestě nestojí pouhé organické odpady, se kterými se příroda nebo živé organismy snadno vypořádají. V oblasti odpadů nyní čelíme větším hrozbám, než si umíme představit. V první řadě proto, že máme neustále více odpadů umělých a syntetických, v druhé řadě proto, že dochází k vysokému nárůstu produkce odpadů nebezpečných, radioaktivních a infekčních. [2]

Obzvlášť této druhé skupině odpadů budeme věnovat pozornost, neboť je rizikem pro samotné zdraví člověka a zvířat a pro ekologii Země. Jeho množství totiž začíná převyšovat kapacitu pro jeho zpracování a bezpečné udržení. S nebezpečným a infekčním odpadem je třeba nakládat velmi šetrně při jeho odstranění, případně využití. Existují ale zařízení, sice technologicky a energeticky náročná, avšak velice efektivní při zpracování nebezpečných odpadů, a tím jsou reaktory s plazmovými hořáky. Jejich největší výhodou je úplné rozložení vstupního materiálu na základní atomy a částice látek. U anorganických látek se rozklad provádí za účelem výroby amorfních, nerozspustných látek nebo sklovité hmoty s vysokou odolností. Další možností může být vyseparování konkrétního prvku (např. železa) z velkého objemu materiálového vzorku. Organické látky tvoří po rozkladu plazmatem velmi jednoduché prvky, které se při ochlazení slučují na plynnou složku tzv. syntézního plynu (především vodík a oxid uhelnatý, stopové oxid uhličitý či metan) a zbytkovou pevnou složku popílku sazí (čistý uhlík). K tomuto rozkladu dochází vlivem velmi vysokých teplot vyvolaných hořákem v reaktoru, čímž se zároveň zbavíme veškerých druhů nebezpečných a potenciálně rizikových látek. Díky extrémním termochemickým reakcím uvnitř plazmového reaktoru se mimo reakční agregát nedostávají žádné toxické nebo škodlivé zplodiny a materiály, takže zpracování je vysoce ekologické.

Výstupní syntézní plyn (zvaný syngas) má široké využití v oblasti rafinérií, paliva, spalovacích systémech, výroby vodíku, hnojiv či jiného chemického využití, uhlíkaté saze kupříkladu pro výrobu stavebních materiálů, silnic, pneumatik nebo zkoumání a strukturování nanočástic. [3, 4]

Vysokou cenu za takto efektivní vynaložení s odpadem tvoří energetická náročnost, protože zařízení spotřebuje spoustu elektřiny, toho lze však využít u strategie stabilizace rozvodné sítě, jako tomu je např. u přečerpávacích vodních elektráren. To pouze za předpokladu, že by k plazmovému zplyňování a pyrolýze nedocházelo výhradně při vědeckých experimentech, ale u případných komerčních společností, kde by ke zpracovávání mohlo docházet nepřetržitě.

Kapitola 1

Odpady

V této kapitole se velmi stručně seznámíme s problematikou odpadů, popíšeme si jak se definují, rozdělují a klasifikují v závislosti na závažnosti jejich výskytu. Představíme si základy odpadového hospodářství a členské státy Evropské unie, od kterých bychom se v nakládání s odpady mohli něco přiučit. Vysvětlíme problémy tkvějící ve spalování odpadu jakožto energetického využívání odpadních materiálů a shrneme, jak jsme si jako Česká republika vedli s odpady v roce 2019. Více se zaměříme na podskupinu odpadů nebezpečných a tu se pokusíme rozdělit na některé vybrané toky.

1.1 Definice a uvedení do problematiky

Slovem odpad by se daly označit veškeré vedlejší produkty lidské výroby a spotřeby, dnes zákon definuje odpad jako každou movitou věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl či povinnost se jí zbavit. [5]

Odpad produkují veškeré sféry lidského výskytu, od průmyslu, přes zemědělství, dopravu, stavebnictví až po domácnosti. Neustálý nárůst celosvětové populace, produkce a konzumu s sebou přináší též hrozbu nekontrolovatelného šíření odpadů do dalších odlehklých koutů světa, kde by nadále způsobovaly znečištění prostředí, podzemních vod, ovzduší a trvalé následky v podobě nenapravitelných škod. Takto je tomu do jisté míry i doposud, spousta lidí má ale mylnou představu o tom, že odpady nepředstavují závažné téma a není třeba jim věnovat zvýšenou pozornost. [6]

Poslední dobou je kladen neustále větší důraz na to, aby byl odpad více využíván, a to především kvůli jeho roustocí produkci a omezenosti přírodního bohatství. To je přirozeně způsobeno zvyšováním populace a požadavkem na lidský komfort, především v ekonomicky vyspělejších zemích. Mimo to je dnes samozřejmostí vysoká poptávka po energii včetně garance její dostupnosti. Pro odpadové hospodářství to ale může znamenat změnu hrozby v příležitost. [4]

1.2 Rozdělení odpadů

Odpady se dají řadit do spousty skupin v závislosti na požadovaném klíči jeho rozdělení. Dle vybraných toků odpadů ho můžeme kategorizovat na odpad komunální (dále jen TKO), živnostenský, elektronický, těžební, zemědělský, zdravotnický, radioaktivní, stavební, demoliční suť atd. [5, 7]

Konkrétnější rozdělení odpadů z výrobních a zpracovávajících činností by mohlo obsahovat odpady z těžby nerostných surovin či ropy, dále máme odpady z dopravy, z prů-

myslových činností, jinou možností členění na již konkrétnější typy mohou být odpady biologicky rozložitelné, autovraky, odpady z obalů a spousty dalších. [1, 5]

Jmenovat bychom mohli nespočet skupin, do kterých se odpady rozdělují. Nás však bude zajímat jedno hlavní majoritní rozdělení a sice rozdělení legislativní. To všechny odpady jednoznačně člení na odpady nebezpečné (ON) a odpady ostatní (OO), přičemž se mohou vyskytnout případy odpadů, které se v soupisu ON nevyskytují, ale byly klasifikovány jako nebezpečné kupříkladu kvůli jejich znečištění po nehodě nebo kontaminaci, smísení s toxickými či infekčními látkami apod. O tom, zda je odpad považován za nebezpečný, rozhoduje § 6 zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů. [8, 9]

1.3 Odpadové hospodářství

Vzhledem k tomu, že je třeba se k vypořádání s odpady stavět zodpovědně, musí existovat něco jako integrovaný systém odpadového hospodářství, který by se měl snažit maximalizovat využitelnost odpadů libovolným způsobem a minimalizovat jeho produkci a hromadění.

Jak bylo již řečeno, v dnešní době se klade značný důraz na snížení tvorby odpadů a maximalizaci jeho následného využití. V České republice jsou hlavní předpisy pojednávající o odpadovém hospodářství, resp. o nakládání s odpady, shrnuta zákonem č. 541/2020 Sb. [10]

Budoucí záměry v oblasti odpadů a jejich zpracování stanovuje Plán odpadového hospodářství České republiky (POH ČR), jejich uskutečňování je popsáno skrze Hodnotící zprávy, nebo také Plnění nařízení vlády o Plánu odpadového hospodářství ČR. To zahrnuje průběžnou evidenci s cílem získat detailní informace o vytváření a zpracování odpadů. Bez těchto dat by nebylo možné rozvíjet strategii oběhového (viz obrázek 1.1) a odpadového hospodářství a provádět legislativu z pohledu Ministerstva životního prostředí. [6]

Základními body POH ČR jsou: [11]

1. *Předcházet vzniku odpadů a snižovat jejich měrnou produkci.*
2. *Minimalizovat nepříznivé účinky jejich vzniku, zejména na lidské zdraví a životní prostředí.*
3. *Udržet rozvoj společnosti a přiblížit se k evropské „recyklační společnosti“.*
4. *Maximalizovat využití odpadů jakožto nahrazení primárních zdrojů a přejít na hospodářství oběhové.*

Existují státy, kde je již téměř všechen odpad maximálně využíván pro různorodé účely, nejvýznamnějšími evropskými představiteli jsou Švýcarsko, Německo, Belgie, Holandsko, Švédsko nebo Dánsko. Obvykle bývá zvykem, že s rostoucí ekonomickou vyspělostí státu klesá ukládání odpadů na skládkách a roste podíl recyklace a energetického využívání odpadu. Do některých z těchto států se odpady za účelem zpracování dokonce dovážejí, pro přepravu nebezpečných odpadů se však jedná o velkou investici, protože náklady na přepravu těchto odpadů jsou extrémně velké a často ekonomicky nepřijatelné. Spousta jednotek pro nakládání s odpady ale nemá dostatečnou kapacitu pro pojetí takového množství materiálu, takže celoevropská politická snaha míří k minimalizaci přeshraniční dopravy odpadů. [2, 13]



Obrázek 1.1: Schéma oběhového hospodářství [12] - upraveno

1.3.1 Problémy energetického využívání odpadů

Typickým majoritním příkladem energetického využití odpadů jsou spalovny. Ty spoléhají na hořlavost odpadních produktů, které ale obvykle nemají dostatečnou výhřevnost pro ohřev páry roztáčející turbínu generující elektřinu, a tak je zapotřebí dodávat ještě jiné palivové zdroje. Další stinnou stránkou spalování je množství vyprodukovaných zplodin a odpadních plynů, které mohou obsahovat nebezpečné látky, takže je nutné je efektivně čistit, ať už filtrací, praním či kalením. Složení výstupních spalin závisí na složení původního odpadu, může se jednat o stopy oxidu siřičitého, dibenzofuranů a dioxinů, oxidů dusíku nebo kyseliny chlorovodíkové, která vzniká zejména při obsahu PVC¹ v prvotní surovině. Další problém spalování TKO jsou vedle produkce popílku korozivní účinky na spalovací zařízení alkalickými kovy. Odpadní teplo z procesu spalování lze sice využít k vytápění nebo v kogeneračních jednotkách, ale provoz je sám o sobě vysoce nákladný. Kvůli těmto komplikacím je více než evidentní, že samotné spalovny nejsou odpovědí pro budoucnost energetiky využívající odpadů jako energetického zdroje. [14, 15, 16]

1.4 Bilance produkce odpadů v ČR v roce 2019

Celková produkce odpadů v roce 2019 činila 37,4 milionů tun veškerých odpadů, přičemž nebezpečné odpady tvořily 1,8 milionů tun, tedy necelých 5 %. Materiálově se znovu využilo 84,5 % celkového odpadu, energeticky zhruba 3,5 %. Problém nastává při pohledu na produkci a využitelnost komunálních odpadů. Z celého objemu výroby zastává pro rok 2019 komunální odpad 15,7 %, což je přibližně 5,9 milionů tun. V přepočtu na obyvatele je to 3,5 tuny odpadu na jednotlivce, přičemž TKO tvoří odhadem průměrně 551 kg na osobu (přes 1,5 kilogramu TKO denně). Bude-li nás zajímat, jak je to s využíváním TKO, zjistíme, že recyklací a kompostováním se odbavilo 41 % a v zařízeních pro energetické využívání odpadu, ať už pro formu tepelné či elektrické energie, se zpracovalo 12 %. První příčku zastávalo skládkování s celými 46 %, což je pro představu o 22 % více, než je průměr Evropské unie. Retrospektivní ohled nás ale jistí, že u nás dochází k jistým pokrokům, neboť v roce 2009 na skládkách skončilo celých 64 % TKO. [17, 18]

¹Polyvinylchlorid

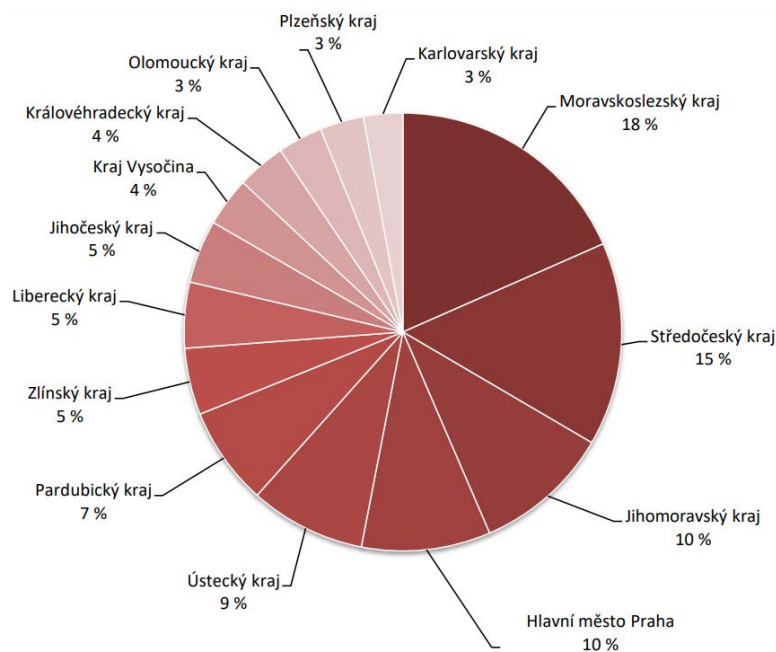
1.5 Nebezpečné odpady

Jako nebezpečný odpad je klasifikován odpad, který má jednu či více rizikových vlastností, shrnuté v nařízení Komise (EU) č. 1357/2014 ze dne 18. prosince 2014. [19]

Stručně řečeno, je to jakákoliv kombinace odpadů představující vysoké momentální nebo v budoucnu potenciální riziko pro zdraví lidí nebo živých organismů, a to z důvodů toxicity, žíravosti, infekčnosti, výbušnosti, vysoké hořlavosti, schopnosti oxidace nebo uvolňování škodlivých a nebezpečných látek, dráždivosti, karcinogenních vlivů a jiných hrozeb. [20]

Lze jmenovat nespočet průmyslových a jiných činností, při kterých vznikají nebezpečné odpady, mezi ty nejrozšířenější patří chemický průmysl, výroba syntetických vláken, pesticidů, barev, nátěrů, baterií, akumulátorů, léčiv, plastových výrobků, rafinerie a ropný průmysl včetně výroby ropných produktů, kovodělný průmysl zpracovávající a upravující kovy a různé typy ocelí, využívání hnojiva a odpadních olejů, úpravy textilu nebo v neposlední řadě např. provoz jaderné elektrárny nebo nemocnice. [13]

Pokud bychom vybírali nebezpečný odpad z úvodního rozdělení v kapitole *Rozdělení odpadů*, zařadili bychom sem bez pochyby odpady zdravotnické (nemocniční), radioaktivní a odpady z chemického průmyslu.



Obrázek 1.2: Produkce nebezpečných odpadů v krajích České republiky [6]

Stojí za zmínku, že nejvyšší zastoupení v celorepublikové produkci nebezpečného odpadu zastával v roce 2019 Moravskoslezský kraj s téměř pětinou celkové poměrné produkce, jak je vidět i na obrázku 1.2. Příčinou může být infrastruktura průmyslu a množství zdejšího nerostného bohatství, které se zde těží. Navzdory zlepšování stavu místního životního prostředí, financování ekologických opatření a šetrnějšímu přístupu se dodnes jedná o jednu z nejzatíženějších oblastí České republiky. Nejproblémovějšími regiony jsou zde Ostravsko, Karvinsko a Třinecko. Moravskoslezský kraj je celorepublikovým jádrem těžkého průmyslu, hutnictví a černouhelné produkce již od 19. stol. Další odvětví přispívající produkci nebezpečných odpadů je v kraji chemický a farmaceutický průmysl, výroba dopravních prostředků a těžba jiných nerostných surovin. [21]

1.5.1 Radioaktivní odpad

Za radioaktivní odpady jsou považovány popel, škvára či jiná struska obsahující radioaktivní nuklidy. Ty mohou pocházet z uhlí a obsahovat velký podíl především částic vyzařujících α -záření. Významný podíl na tvorbě radioaktivního odpadu má uran, hojně využívaný v jaderných elektrárnách jako zdroj paliva pro generování energie. Není-li tento odpad termicky zpracován, je nutné ho skladovat v bezpečné vzdálenosti, ideálně v uzavřených uměle vytvořených jeskyních stovky metrů pod povrchem Země, jak je vidět na obrázku 1.3. [22]



Obrázek 1.3: Skladování radioaktivního odpadu [23]

1.5.2 Odpad z chemického průmyslu

Význačné vlastnosti odpadů z anorganických chemických výrob jsou vysoká reaktivnost, hořlavost nebo toxicita. Tyto chemické odpady často vznikají při výrobě polymerů (pryže, plastu, kaučuku) a mohou být ve formě všech skupenství. Z tohoto důvodu jsou kladeny zvláštní požadavky na technologii a konstrukci pecí, ve kterých dochází k případnému spalování takového typu odpadu. [24]

Významné jsou v této skupině odpady z termoplastů, které mají podobu koženky nebo plastické kůže, ta se následně zpracovává v kožedělnictví pro výrobu peněženek, bot nebo umělých opasek. Vedle odpadních odřezků ze syntetické kůže jsou problematické především prach vzniklý broušením tohoto materiálu, kaly nebo znečištěná a nebezpečná rozpouštědla. [24]

Petrochemický průmysl může odpady z chemického průmyslu rozšířit o kaly biologického původu z čističek (zejména odpadních vod), kaly vzniklé destilací či odstředěním v mazutových nádržích, odpady vzniklé zpracováním nebo distribucí ropy a ropných produktů, dehet atd. [24]

1.5.3 Nemocniční odpad

Dle legislativy je nemocniční odpad definovaný jako libovolný tuhý odpad, vyprodukovaný v nemocničních a obecných zdravotních budovách či v laboratořích fungujících v těchto zařízeních. Z hlediska rozdělení se odpad z nemocnic řadí mezi odpady speciální. Je tedy klasifikován mezi potenciálně hazardní odpady a vyžaduje zvláštní přístup při jeho zpracování včetně jeho hermetické izolace po celou dobu manipulace až do jeho zpracování.

Je mírně znepokojivé, že dle [19] je odpad z nemocnic zahrnován do odpadu komunálního, tedy směšného a odděleně sbíraného odpadu pocházejícího mimo jiné i z domácností. [25]

Běžnými prvky v nemocničním odpadu bývá buničinná vata, chirurgické obvazy, pooperační odpad, injekční stříkačky a ostatní umělohmotné pomůcky, textilie ve formě jednorázových prostěradel, chirurgických plášťů nebo roušek, tekutiny a části těla pacientů a jiný klinický a patologický odpad. Vzhledem k potřebě tento odpad spálit, aby nepředstavoval potenciální hrozbu, byly zjištěny orientační hodnoty výhřevností různých typů nemocničního odpadu v závislosti na charakteru zdravotnického zařízení, kde tento odpad vznikl. Více informací o výhřevnosti se nachází v kapitole *Výhřevnost*. [24]

| Typ zdravotnického zařízení | Výhřevnost odpadu [MJ·kg ⁻¹] |
|----------------------------------|--|
| Fakultní nemocnice | 11,70 |
| Dermatologická oddělení | 10,45 |
| Operační a porodnické sály | 9,40 |
| Porodnické a všeobecné nemocnice | 8,78 |

Tabulka 1.1: Výhřevnost některých typů nemocničního odpadu [24]

Existuje mnoho pokročilých zemí, kde se již zavedly speciální předpisy včetně pravidel, jak systémově nakládat s nemocničními odpady, včetně nutnosti příslušných školení. Rozvojové země tento systém a instrukce však postrádají, a proto zde nejsou dodržena bezpečnostní opatření, není k dispozici vhodné vybavení a celý systém hospodaření s odpady z nemocnic je problémový a neefektivní. Mezi kritické země patří např. Írán, Indie nebo Čína. Dochází sice k vydávání nových nařízení ohledně nakládání s nemocničním odpadem a k budování příslušné regulace včetně probíhajících kontrol a vedení, realizace je však komplikovaná a ve spoustě případů špatná nebo nefunkční. [25]

Kapitola 2

Plazma

Nemohli bychom začít rozebírat problematiku zdrojů plazmatu a plazmového zpracování odpadů, pokud bychom se s plazmatem jako takovým alespoň trochu neseznámili. Tato stručná kapitola slouží především k osvětlení toho, co pro nás plazma představuje a jak se dá rozdělovat. Ne všechny druhy plazmatu totiž vykazují podobné chování, vyjma disociace atomů nebo molekul. Dozvíme se, proč je rozhodující charakteristickou veličinou pro vlastnosti plazmatu jeho termodynamická teplota a ukážeme, jak se teorie plazmatu prolíná s teorií elektromagnetického pole. V závěru kapitoly se zmíníme o možnosti energetického způsobu využívání plazmatu pro zpracování odpadních látek, vyjmenujeme některé z předních společností věnujících se plazmovému zpracování odpadů a srovnáme efektivitu tohoto přístupu s dosud konvenčním spalováním.

2.1 Definice a základní vlastnosti

Plazma je dnes již široce známý pojem, nejsnáze definovatelný jako čtvrté skupenství hmoty nebo ionizovaný plyn. Tento pojem je řeckého původu a poprvé jej použili Lewi Tonks a Irving Langmuir v roce 1929 ve své práci „Oscillations in Ionized Gases“. V doslovném překladu znamená plazma stvoření, výtvor nebo obecně něco tvarovaného. K objevu plazmatu došlo však již dříve vědcem Williamem Crookesem v roce 1879. Za neutrálních podmínek může plazma představovat libovolnou hmotu tvořenou spoustou volných elektronů, iontů a jiných nabitých částic, splňuje-li určitá kritéria. Tato kritéria lze vysvětlit na následující úvaze. [4, 26]

V závislosti na tepelné kinetické energii a vazebných silách částic v dané látce hovoříme o jejím momentálním stavu neboli skupenství. K jednotlivým přeměnám mezi těmito skupenstvími dochází pro stálý tlak při konstantní teplotě, přičemž dochází k uvolňování (resp. pohlcování) energie ve formě tepla, zvané latentní teplo. Pro pevné látky, kapaliny a plyny se jedná o změny, které pouze ovlivňují kinetickou energii částic a jejich vzájemnou vazebnou energii. Dodáme-li dostatek energie molekulární nebo atomové látce (většinou plynu), může docházet k odtržení elektronů z atomů a molekul – dojde k ionizaci – jednotlivé částice atomů překonají svou kinetickou energii vazebnou a při dostatečném počtu volných nabitých částic vzniká plazma. Přestože plazma obsahuje spoustu elektricky nabitých částic, makroskopicky se plazma jeví jako neutrální. Tento stav nazýváme kvazineutralitou. Poměrné zastoupení ionizovaných částic n_i [m³] ku celkovému počtu částic ($n_i + n_n$) [m³] vyjadřuje tzv. stupeň ionizace α (n_n je počet neutrálních částic). [13, 26]

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_n} \quad (2.1)$$

V případě termodynamické rovnováhy popisuje přímý poměr ionizovaných a neutrálních částic Sahova rovnice (2.2). [26]

$$\frac{n_i}{n_n} = 2,405 \cdot 10^{21} T^{\frac{3}{2}} \frac{1}{n_i} e^{-\frac{U}{kT}} \quad (2.2)$$

kde T [K] je termodynamická teplota plazmatu, U [J] je ionizační energie, potřebná k odtržení jednoho elektronu a k [J·K⁻¹] je Boltzmannova konstanta.

Se zvyšujícím se stupněm ionizace jsou Coulombovské síly stále dominantnější, neboť na každou částici nesoucí elektrický náboj působí elektromagnetické síly, vyvolané ostatními nabitými částicemi a vnějším elektromagnetickým polem. Těmto společným mezičásticovým silám se přezdívá kolektivní jevy (collective phenomena), ty způsobují, že jednotlivé částice jsou ovlivňovány vedle vzájemných kolizí především vlivem okolního elektromagnetického pole. S rostoucím počtem ionizovaných částic ubývá srážek mezi ionty, neboť kolektivní jevy probíhají podstatně rychleji než vzájemné kolize. [13]

Pohybové rovnice jednotlivých částic lze vyjádřit spojením první věty impulsové z mechaniky a vztahem pro Lorentzovu sílu:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{p} = \mathbf{F}^{(e)} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E} + q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.4)$$

kde $\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}$ [kg·m·s⁻¹] je hybnost částice, \mathbf{F} [N] je síla působící na částici, q [C] je elektrický náboj částice, \mathbf{v} [m·s⁻¹] je rychlost této částice, \mathbf{E} [V·m⁻¹] je intenzita elektrického pole a \mathbf{B} [T] je magnetická indukce.

Po spojení vztahů 2.3 a 2.4 získáme:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{p} = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.5)$$

Detailnější popis plazmatu by vyžadoval hlubší teoretický rozbor a jeho případná analýza simultánní výpočet N nelineárních diferenciálních pohybových rovnic pro N počet částic. Pro obecný a jednoduchý popis principu chování elektromagnetického pole i v souvislosti s plazmatem postačí vyjádření Maxwellových rovnic pro intenzitu elektrického pole \mathbf{E} a magnetickou indukci \mathbf{B} . [26]

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.9)$$

kde ρ [C·m⁻³] je celková hustota elektrického náboje, \mathbf{J} [A·m⁻²] je celková hustota elektrického proudu, ϵ_0 [F·m⁻¹] je permitivita vakua a μ_0 [H·m⁻¹] je permeabilita vakua. [26]

Rozlišujeme 2 druhy plazmatu v závislosti na dosahované teplotě, konkrétně nízkoteplotní a vysokoteplotní plazma. Nízkoteplotní plazma se pohybuje v rozsahu tisíců až desetitisíců °C, při vyšších teplotách plazmatu (až v řádu 10⁶ °C) se jedná již o plazma

vysokoteplotní. Přestože na Zemi se s plazmatem setkáváme jen úzce v podobě ohně, polární záře či při uměle vytvořených podmínkách, odhaduje se, že plazma tvoří naprostou většinu (více než 99 %) hmoty ve vesmíru. [27]

Dalším (pro nás důležitějším) rozdělením plazmatu je na netermické a termické. Oba tyto druhy jsou podkategorií nízkoteplotního plazmatu. V kapitolách *Netermické plazma* a *Termické plazma* se budeme věnovat rozdílům a charakteristikám těchto dvou druhů plazmatu. Dále také uvedeme, čím pro nás tyto druhy plazmatu dokáží být užitečné a stručně se seznámíme se současnými aplikacemi v technických oborech.

2.2 Netermické plazma

Přestože všechny druhy plazmatu vykazují podobné chování z pohledu rozkladu atomů a ionizace částic, zásadně se liší svou teplotou a energií. Netermické (též netermální) plazma je charakteristické tím, že v podstatě neprodukuje teplo, makroskopická teplota netermického plazmatu se navzdory vysoké teplotě elektronů blíží teplotě okolí, řádově 30-60 °C. Přesto se jeho chování a vliv na látky odvíjí především od aplikovaného množství. Přes svou nízkou teplotu obsahuje vysoce reaktivní látky v podobě molekul (plynu), elektricky nabitých částic, fotonů a radikálů (částice s jedním či více nepárovými elektrony). [28]

Charakteristickou vlastností netermického plazmatu je, jak již bylo naznačeno, tepelná nerovnováha elektronů a ostatních těžkých částic. Elektrony jsou velmi lehké v porovnání s ostatními ionty, atomy a molekulami, a tak je snadné je efektivně urychlovat vnějším elektrickým polem, přičemž mohou dosahovat teploty až 250 tisíc °C. Oproti termickému plazmatu je generování netermického plazmatu jednodušší a méně nákladné, protože spousta dnešních zařízení umožňuje procesy provádět při pokojových teplotách a atmosférickém tlaku, což má za následek i rychlé spínání a vypínání zdroje. [29]

Mezi nejčastější způsoby výroby tohoto typu plazmatu patří dielektrický bariérový výboj, korónový výboj či pulzní koróna, vysokofrekvenční (radiofrekvenční) plazma, ionizující záření nebo vystavení vzduchu silnému UV¹ záření s vysokou energií, lze též využít mikrovlnné trouby. [28, 29, 30]

Nejhojnějšího využití má díky svým vlastnostem netermické plazma v oblasti potravinářského průmyslu, sterilizace, zdravotnických aplikací při léčbě poranění, srážení krve nebo rakoviny, kontroly a čištění ovzduší a vody či v oblasti výzkumu polovodičových nanokrystalů účelných pro fotovoltaiku, výrobu displejů, součástek pro mikroelektroniku, nanoobvodů nebo dokonce v oblasti letectví a kosmonautiky. Příklad netermického plazmatu využívaného pro účely sterilizace je znázorněn na obrázku 2.1. [27, 28, 30, 31]



Obrázek 2.1: Netermické plazma - ukázka [32]

¹Ultrafialové (*Ultraviolet*)

2.3 Termické plazma

Zajímavější pro námi požadované účely je termické (též termální) plazma rozkládající veškeré chemické vazby. Na rozdíl od netermického plazmatu vykazují všechny částice uvnitř generovaného plazmového plamene (částice, ionty, atomy, molekuly) téměř stejných teplot, díky čemuž má tento typ plazmatu značnou entalpii, hustotu rozložení energie, teplotu a intenzitu. Charakteristická je vysoká rychlost konvekce tepla, distribuce reaktantů, dosažení ustálených stavů a ukončení generace plazmatu pro účely získání metastabilních stavů nebo disekvilibriálních složení. Díky vysoké hustotě a energii aktivních částic dovoluje termické plazma vyvolat reakce, které by za normálních podmínek nebylo možné provádět a rapidně zvyšuje rychlost těchto i ostatních reakcí. Mezi další neopomenutelné výhody patří, že instalované zařízení je pro dané množství hmotnostního/objemového průtoku zpracovávaného materiálu skladnější a nabízí možnost zpracování (nejen) teplotně vysoce odolných látek, a to i bez přístupu oxidantů. [14, 25, 33]

Teplotní rozdíl mezi elektrony a těžkými částicemi může být velmi malý, ale nikdy nebývá nulový. K dosažení termodynamické rovnováhy obvykle dochází přenášením energie z elektronů na těžké částice pomocí elastických kolizí. Distribuce energie jedné kolize z elektronu na těžkou částici lze popsat vztahem 2.10. [34]

$$E_{kolize} = \frac{3}{2}k \cdot (T_e - T_h) \cdot \frac{2m_e}{m_h} \quad (2.10)$$

kde T_e [K] a T_h [K] jsou teploty elektronu a těžké částice, m_e [kg] a m_h [kg] jsou hmotnosti elektronu a těžké částice a k [J·K⁻¹] je Boltzmannova konstanta.

Pro termické plazma, resp. teploty jeho vnitřních částic můžeme psát vztah:

$$\frac{T_e - T_h}{T_e} = \frac{3\pi \cdot m_h}{32 \cdot m_e} \left(\frac{e\lambda_e \mathbf{E}}{\frac{3}{2}kT_e} \right)^2 \quad (2.11)$$

kde \mathbf{E} [V·m⁻¹] je intenzita elektrického pole, e [C] je elementární náboj, λ_e [nm] je střední volná dráha elektronů, tedy průměrná vzdálenost, kterou elektron urazí mezi jednotlivými kolizemi. [34]

Nyní vyjdeme z předpokladu, že střední volná dráha elektronů je úměrná převrácené hodnotě tlaku, tedy čím vyšší je tlak, tím častěji dochází ke kolizím mezi částicemi. [34]

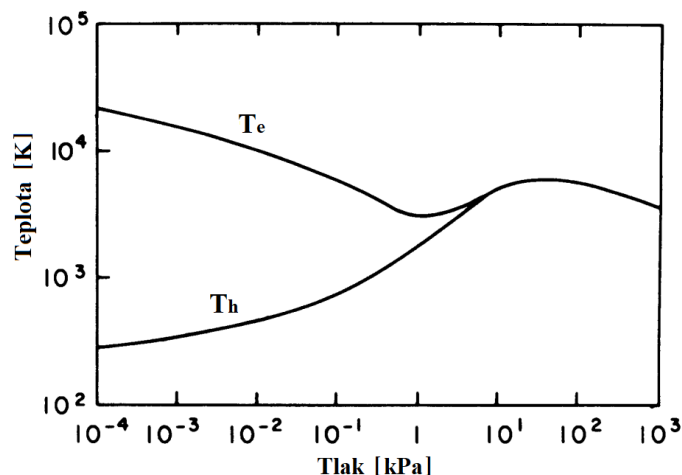
$$\lambda_e \sim \frac{1}{p} \quad (2.12)$$

kde p [Pa] je tlak v termickém plazmatu.

Díky této úvaze můžeme prohlásit, že rovnice 2.11 je úměrná kvadrátu podílu intenzity elektrického pole a tlaku. [34]

$$\frac{T_e - T_h}{T_e} = \frac{\Delta T}{T_e} \sim \left(\frac{E}{p} \right)^2 \quad (2.13)$$

Pro dosažení kinetické rovnováhy v termickém plazmatu hraje tedy podíl intenzity elektrického pole a tlaku v plazmatu zásadní roli. Chceme, aby ΔT , tedy rozdíl teplot elektronů a těžkých částic, byl minimální, tedy aby byl minimální podíl E/p . Je-li tento podíl dostatečně malý, může nastat kinetická rovnováha. Obvykle tlak v termickém plazmatu v lokální termodynamické rovnováze přesahuje 10⁴ Pa. Pokud by tomu tak nebylo, začaly by klesat teploty těžkých částic a plazma by z termodynamické rovnováhy vypadlo, jak je vidět na obrázku 2.2. [34]



Obrázek 2.2: Teploty elektronů a těžkých částic v plazmatu v závislosti na tlaku [34] - upraveno

Vztah E/p lze upravit pomocí Ohmova zákona v diferenciálním tvaru a Daltonova zákona, tedy nahrazením tlaku vztahem pro hustotu částic v plazmatu. [34]

$$\mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E} \quad (2.14)$$

$$p = \sum_r n_r k T \quad (2.15)$$

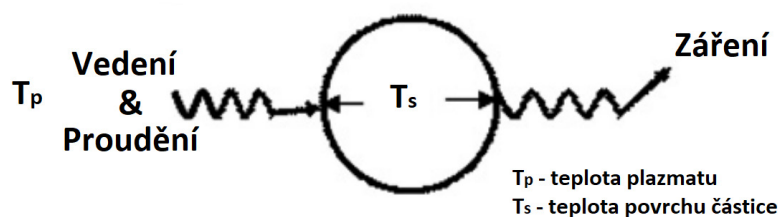
kde \mathbf{J} [$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$] je hustota elektrického proudu, γ [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$] je měrná elektrická vodivost, n_r [m^{-3}] je hustota částic v plazmatu, k [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$] je Boltzmannova konstanta a T [K] je termodynamická teplota za předpokladu, že plazma je v termodynamické rovnováze. [34]

Obecně lze tedy psát:

$$\frac{\Delta T}{T_e} \sim \left(\frac{\mathbf{E}}{p}\right)^2 = \left(\frac{\mathbf{J}}{\gamma \cdot \sum_r n_r k T}\right)^2 \quad (2.16)$$

Index r v rovnicích 2.15 a 2.16 znamená dílčí částice v plazmatu (tedy elektrony, ionty, neutrály).

Pro účely této práce nás zajímá, jakým způsobem interaguje termické plazma s částicemi pevných látek, např. s malým kusem materiálu pocházejícího z nemocničního odpadu. Esenciální a zjednodušený princip přenosu energie na jednotlivé částice formou přímého kontaktu částic s plazmatem lze znázornit obrázkem 2.3.



Obrázek 2.3: Zjednodušený princip teplotního přenosu při ohřevu letící částice plazmatem [25] - upraveno

Výsledný tepelný výkon, který můžeme uvažovat při ohřívání a rozkládání částice, je dán rozdílem výkonu tepelné výměny mezi plazmatem a částicí a vyzářeného ztrátového výkonu sáláním částice do okolí. Vztah popíšeme rovnicí 2.17. [25]

$$Q = \alpha A (T_p - T_s) - \sigma \epsilon A (T_s^4 - T_a^4) \quad (2.17)$$

kde α [$\text{W}\cdot\text{K}\cdot\text{m}^{-2}$] je koeficient přestupu tepla mezi plazmatem a částicí, A [m^2] je obsah plochy částice, T_p [K] je termodynamická teplota plazmatu, T_s [K] je teplota povrchu uvažované částice, T_a [K] je teplota stěny reaktoru, σ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$] je Stefanova-Boltzmannova konstanta a ϵ [-] je emisivita částice.

Rovnice je samozřejmě zjednodušeným ukazatelem vzájemného chování plazmatu a částic, a to především v počátečních fázích reakce. Velice rychle totiž dochází k odpaření částicového obalu, respektive k jeho přeměně na obal plynný, který přenosu tepla zabraňuje, čímž soustavu ovlivňuje a mění. [25]

Značnou nevýhodou technologií termického plazmatu je (hlavně z finančního pohledu) vstupní forma dodávané energie, a sice energie elektrická. Ta je na trhu velmi drahá a může působit komplikace u strategií projektů komerčního využívání této technologie a tvořit tak silnou bariéru mezi technologickými plány a následnou realizací. [14]

Velmi hojně využívanými aplikacemi termického plazmatu jsou plazmové nástřiky (např. vrstvou korundu – oxidu hlinitého), zpracování odpadů, metalurgie, řezání, sváření a tavení plechů a kovových materiálů, syntéza jemných prášků aj. Termické plazma při procesu plazmového nástřiku je na obrázku 2.4. [14, 25]



Obrázek 2.4: Termické plazma - ukázka [35]

2.3.1 Plazmové zpracování odpadu

Na způsoby nakládání s odpady pomocí plazmových technologií bylo už od počátku nahlíženo velice skepticky, protože se v raných fázích výzkumu a vyvíjení plazmových hořáků a reaktorů začal šířit názor o jejich nespolehlivosti. Dopomohl tomu také zarputilý přístup vědců a vynálezců prosazujících a vyzdvihujících tento přístup k nakládání s odpady, který přesahoval možnosti tohoto zařízení při uvážení provozu mimo laboratorní podmínky. [14]

V poslední době ale dosahují plazmové metody zpracování odpadů neustálého pokroku a je potřeba klást velký důraz na prosazení této metody, protože s každou dekádou rostou problémy související s odpady, jejich nakládáním a šetrným odstraněním. Již dnes

existují už řadu let pracující plazmové reaktory sloužící k průmyslovému a energetickému využití odpadu, nabízející významné výhody. Je tomu tak např. u společností InEnTec nebo PEAT, společnosti jako Alter NRG, CHO-Power, Advanced Plasma Power, Hitachi Metals Ltd., Plasco Energy group Inc, EnviroParks Limited, Sunbay Energy Corporation, Green Power Systems a spousta jiných jsou aktivními dodavateli zařízení na plazmové zplyňování odpadů. Faktum je, že při řízených procesech rozkladu může vybraný tok odpadů nabídnout kvalitní cenné produkty, užitečné napříč odvětvími spolu s přínosem jejich likvidace, a to především odpady s vysokým zastoupením organických materiálů (TKO, TAP², nemocniční odpad atd.) Hlavní příležitostí je především možnost téměř stoprocentní přeměny vstupních složek s nízkou (často i zápornou) hodnotou ve vysoce kvalitní produkty, hojně využitelné jak v oblasti energetiky, tak chemickém, stavebním, či automobilovém průmyslu. [14, 25, 36]

Velká část jednotek pro plazmové zpracování odpadů leží v Japonsku, nejvýznamnější z nich se nachází ve městě Utashinai. Jedná se o zařízení s hrubou produkcí elektrické energie o výkonu 7,9 MW (4,1 MW čistého výkonu), které je schopné pojmout až 183 tun TKO denně. [37]

Samostatný TKO má odhadované měrné spalovací teplo v rozmezí 5-10 MJ·kg⁻¹, chceme-li spalovat tento odpad konvenčně, tedy v kotli spojeném s parní turbínou, bude elektrická účinnost v průmyslovém měřítku vlivem nízké energetické bilance od 18 do 22 %. V tepelných elektrárnách s jedním Carnotovým cyklem se obecně účinnost přeměny pohybuje v rozmezí 30-40 %, může se blížit k 60 %, je-li cyklus kombinovaný s plynovou turbínou. Pokud bychom odpad zplyňovali pomocí plazmatu, získáme zhruba 80 % původní chemické energie v podobě syntézního plynu, což může ve výsledku při spojení s elektrárnou při kombinovaném cyklu s plynovou turbínou dosáhnout na účinnost přesahující 46 %. [36]

V České republice však také již existují firmy, které se zabývají problematikou plazmového zpracování odpadů. Jedním z velkých představitelů je např. firma Millenium Technologies a.s., která momentálně nabízí možnost vysokoteplotního zplyňování kalů z ČOV³. Součástí systému je sušárna, která vysuší kal s 65-75% obsahem vody na granulát s obsahem vody méně než 10 %. Ten je potom možné zpracovávat v plazmovém reaktoru a získávat tak syntézní plyn a nevylohouvatelnou strusku, kterou je bezpečné použít např. ve stavebnictví. Porovnání kalu po vysušení a strusky po vylouhování při procesu plazmového zpracování zachycuje obrázek 2.5. Reálnou podobu plazmového systému provozovaného v Dubé na Českolipsku firmou Millenium Technologies a.s. lze vidět na obrázku 2.6. [38]



Obrázek 2.5: Porovnání vysušeného kalu s nevylohouvatelnou struskou [38]

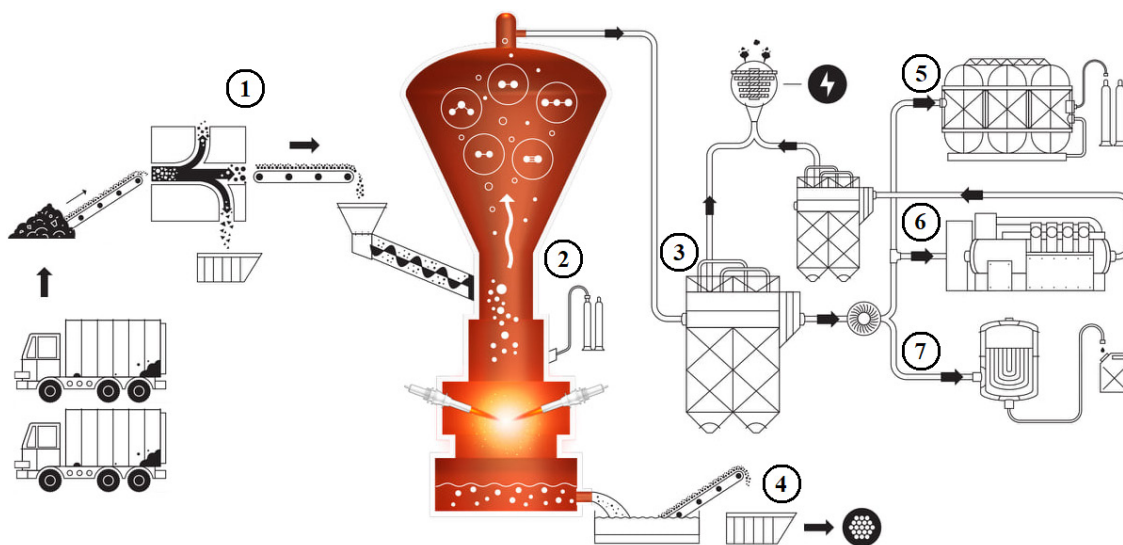
²Tuhé alternativní palivo

³Čističky odpadních vod



Obrázek 2.6: Zplyňovací zařízení v Dubé firmy Millenium Technologies a.s. [39]

Schéma na obrázku 2.7 popisuje obecný model procesu přeměny odpadu plazmatem na využitelné látky. Bod 1 označuje dopravu a upravení odpadního paliva, to zahrnuje vytrídění od materiálů s nízkou energetickou hodnotou, jako jsou kovové či skleněné části, popel nebo suť. Dále může být materiál rozmělněn nebo vysušen. Bod 2 představuje zpracování odpadu v plazmovém reaktoru. Bod 3 reprezentuje především čištění a chlazení plynu, jsou odstraněny kyselé plyny (jako sulfan nebo chlorovodík), tuhé nečistoty a nadbytečná vlhkost. Čtvrtým a posledním bodem části zpracování odpadu je vypuštění roz-tavených anorganických materiálů v podobě strusky, která po ochlazení není nebezpečná a lze ji následně materiálově využít. Získaný syntézní plyn lze nadále široce využívat jak pro energetické, tak pro chemické účely. Bod 5 reprezentuje separaci vodíku, bod 6 může představovat jednostupňovou nebo kombinovanou výrobu elektřiny a tepla, bodem 7 je míněna případná výroba syntetických motorických paliv. [38]



Obrázek 2.7: Schéma plazmového zplyňovacího zařízení firmy Millenium Technologies a.s. [38] - upraveno

Stojí proto silně za zvážení, zda by se nevyplatilo do této technologie a jejího rozšíření v oblasti zpracování odpadů investovat, zejména v tuzemsku, neboť je pouhou otázkou času, kdy se i v České republice striktně omezí ukládání odpadu na skládkách, které už i v zahraničních regionech dosahují limitů své kapacity a dochází zde k neustálému zavádění přísnějších předpisů týkajících se ukládání odpadů na skládky. To bude mít v případě náhlých omezení dopad na každého občana, protože by to způsobilo prudký nárůst nákladů na zpracování odpadů a zvýšil by se fixní poplatek za místní vývoz, nejvýrazněji v hustě osídlených oblastech, jako jsou velká města. [14]

Zatím jsou jako proveditelné a životaschopné technologie potvrzené systémy pro plazmovou vitrifikaci (zeskelnatění nebo vypálení amorfního nekrytalického materiálu vlivem tepelné přeměny) nebezpečných odpadů. Systémy zpracovávající TKO jsou z pohledu průmyslové realizace a životaschopnosti více než komplikované, výstupní syntézní plyn je potřeba dále čistit, a to především od kontaminujících prvků jako je chlor, rtuť, olovo, kadmium, zinek nebo síra. To pro nás ale znamená velkou výzvu v oblasti energetiky, vývoje, logistiky a odpadového hospodářství, protože díky stávajícím podmínkám, expanzivnímu výzkumu a šíření plazmových technologií víme, že plazmové zplyňování odpadů bude významným prvkem přispívajícím energetice obnovitelné energie. Otázkou pouze zůstává, za jak dlouho se k tomu dopravujeme. [36]

Kapitola 3

Plazmový hořák a reaktor

V této kapitole detailně rozebereme konkrétní příklady zdrojů termického plazmatu, popíšeme si jejich strukturu, ujasníme, v čem se jednotlivé typy liší, a jaké tyto odlišnosti přináší výhody či nevýhody. Popíšeme, jak probíhá generování plazmatu v jednotlivých DC zdrojích, ukážeme si, jak takové zdroje mohou vypadat. Seznámíme se se soustrojím plazmového reaktoru a představíme si fotografie reálné podoby jednotlivých částí zařízení v laboratoři na Ústavu fyziky plazmatu. Nakonec vysvětlíme, jaké reakce mohou při provozu uvnitř reakční komory probíhat a jaký mají tyto reakce vliv na zpracovávaný materiál a jeho budoucí podobu a složení.

3.1 Zdroje termického plazmatu

Plazma se dá zpravidla vytvářet jak DC, tak střídavými nebo pulzními výboji. Většinou tento charakter závisí na konstrukci hořáku nebo na požadované aplikaci plazmatu. Existují též technologická řešení, která nevycházejí z elektřiny, nýbrž z chemických a jiných termodynamických procesů, jako např. dodáváním potřebné energie plamenem nebo adiabatickou kompresí plynu. Samotné plazma je též důležité pro řízení teploty, iniciaci a udržování procesu. [15, 40]

Nejběžnějším zdrojem termického plazmatu bývají DC plazmové hořáky. Ty disponují oproti ostatním způsobům nižším generováním šumu, jednodušším ovládním a regulací nebo větší stabilitou chodu. Případné jsou též zdroje střídavých a přechodných oblouků, plazmy na principu indukce laserem, mikrovlnných a radiofrekvenčních výbojů. Odlišnosti můžeme nalézt také v charakteru používaných elektrod, jedním (a běžnějším) z principů totiž je, že jsou obě elektrody součástí konstrukce hořáku a proud plazmatu putuje až za výstupní trysku, kdežto v některých aplikacích může být jednou z elektrod opracovávaný materiál, tomuto aparátu se říká zařízení s přeneseným obloukem (využívá se ho především v účelných aplikacích). Vzhledem k širokému zastoupení DC plazmatronů (bez přeneseného oblouku) na poli výskytu a využití se omezíme na studium tohoto typu hořáku. [25, 40]

Je třeba se také obeznámit s důležitými handicapy DC plazmových hořáků oproti jiným typům. Navzdory převaze DC plazmatronů mezi systémy zpracovávajících odpadní (a jiný) materiál jsou tyto technologie mírně problémové po technické a finanční stránce. Mezi zásadní problémy patří malá životnost elektrod vlivem citlivosti zařízení a DC proudu (odhadem 300 až 500 hodin), vyšší senzitivita komponent hořáku včetně elektronických částí způsobující výskyt případných poruchových stavů a vysoké fixní a provozní náklady vlivem potřeby častých revizí nebo oprav a komplikovanost napájení plazmatronu kvůli usměrňování proudu. [25]

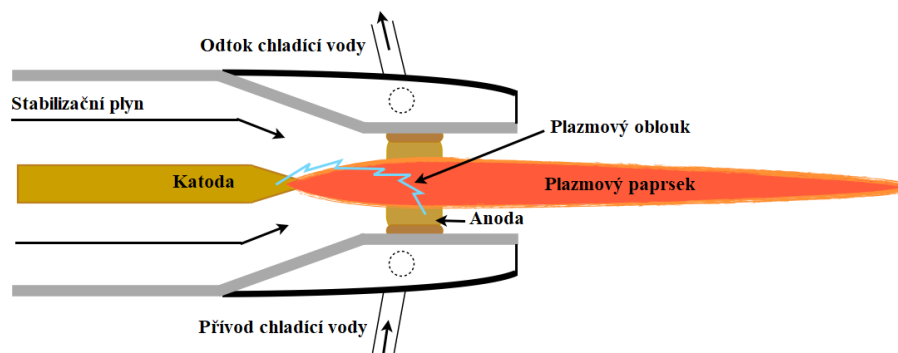
Princip DC plazmového hořáku tkví ve vytvoření permanentního elektrického oblouku, tekoucím skrze stabilizační komoru s médiem mezi elektrodami. Dochází k elektrickému rozkladu plynného nebo kapalného média na plazma, které má tepelnou i elektrickou vodivost srovnatelnou s vodivostí kovů, vytváří se tak vodivá cesta mezi elektrodami. Zároveň proud je anodou odváděn pryč, paprsek plazmatu putuje z plazmatronu dál a umožňuje tak jeho technické využití. Stabilizační médium a energie by měly být kontinuálně udržovány, aby se ionizované částice neměnily zpět na neutrální plyn. Plazmatron je v průběhu reakce potřeba dostatečně chladit, aby nedošlo k destrukci, především aktivních částí hořáku. Aby byl celý tento proces možný, musí přijít prvotní silný impuls, v našem případě přivedení velkého napětového skoku, který reakci započne. [4, 25, 33]

Výkony plazmových hořáků běžně dosahují od jednotek kW do jednotek MW, důkazem toho jsou plazmatrony od Americké společnosti Westinghouse ze 70. let, která vyrábí hořáky již od 5 kW a od kupříkladu Francouzské společnosti Europlasma z 90. let zhotovující plazmatrony až do 4 MW. [25]

Ústav fyziky plazmatu disponuje vlastním návrhem hybridního plazmatronu s maximálním příkonem kolem 160 kW. Technologie DC plazmatronů je více, počínaje od jejich návrhu až po volbu stabilizačního média, které většinou tvoří buď plyn nebo voda.

3.1.1 Plynem stabilizovaný hořák

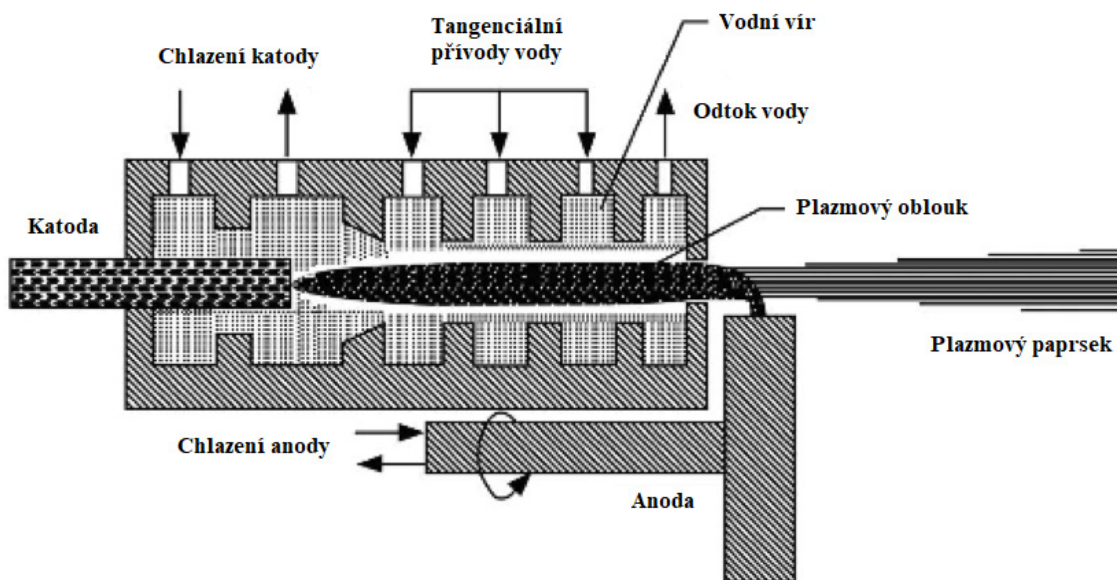
Nejběžnější způsob vytváření plazmového paprsku elektrickým plazmatronem je pomocí rozkladu plynu vyvoláním vnějšího elektrického pole. Obvykle se kanálky v konstrukci hořáku přivádí voda, ale její přívod je pouze za účelem chlazení, nikoliv stabilizace plazmatu, jako tomu je např. u vodou stabilizovaných a hybridních hořáků. Nejčastějšími používanými neutrálními plyny za účelem ionizace bývají vzduch, argon nebo dusík, protože nejsou příliš drahé a jsou snadno dostupné. Použijeme-li např. samotný vzduch při aplikaci plazmatronu pro zplyňování, náklady na vstupní plyn jsou pochopitelně minimální, nicméně výstupní syntézní plyn je zředěn značným množstvím dusíku, který přispívá k tvorbě nežádoucích oxidů dusíku. Obsahuje-li stabilizační plyn páry kyslíku, urychluje se tím oxidace a eroze elektrod. U argonu tomu tak není, ale argonové plazma má malou entalpii, nízkou tepelnou vodivost a přenosovou kapacitu, tudíž i schopnost přenášet energii na zpracovávaný materiál. Bývají též případy, kdy stabilizační plyn tvoří vodní pára, k jejímu vytvoření ale dochází externě mimo hořák, takže tento typ nelze považovat za hořák stabilizovaný vodou, který popisujeme v kapitole *Vodou stabilizovaný hořák*. Schéma a princip plynem stabilizovaného hořáku je na obrázku 3.1. [15]



Obrázek 3.1: Schéma plynem stabilizovaného plazmového hořáku [41] - upraveno

3.1.2 Vodou stabilizovaný hořák

Jiný princip generování plazmatu je pomocí ionizace kapalné vody, která se skládá primárně z kyslíku a vodíku. Velkou výhodou tohoto způsobu je rozklad vody na molekuly hydroxyly a kyslíku, což jsou aktivní molekuly z hlediska rozkladu škodlivin při plazmové reakci. Tyto molekuly velice efektivně neutralizují potenciálně nebezpečné, toxické a těkavé látky. To přináší velký užitek zejména při pyrolýze zpracovaných materiálů a odpadů, viz kapitola *Pyrolýza*.



Obrázek 3.2: Schéma vodou stabilizovaného plazmového hořáku [42] - upraveno

Na obrázku 3.2 je schéma vodou stabilizovaného plazmového hořáku, ve kterém je horké obloukové plazma obklopeno rotujícím vírem kapalné vody, která chladí hořák a vytváří stabilizované prostředí pro plazma. K vyvinutí tohoto typu plazmového hořáku došlo na Ústavu fyziky plazmatu, kde se úspěšně a hojně využíval především pro aplikace plazmových nástřiků. Největším problémem tohoto hořáku byla uhlíková katoda, která rychle podléhala erozi. Z tohoto důvodu byl používán katodový posuvný systém, který erodující katodu postupně zasouval do hořáku. Tímto vlivem udávala životnost (provozuschopnost) plazmatronu délka katody (neboli čas jejího uhoření). Anodovou část tvořil disk z mědi, který se díky rotaci při procesu generování plazmatu neopotřeboval tak rychle.

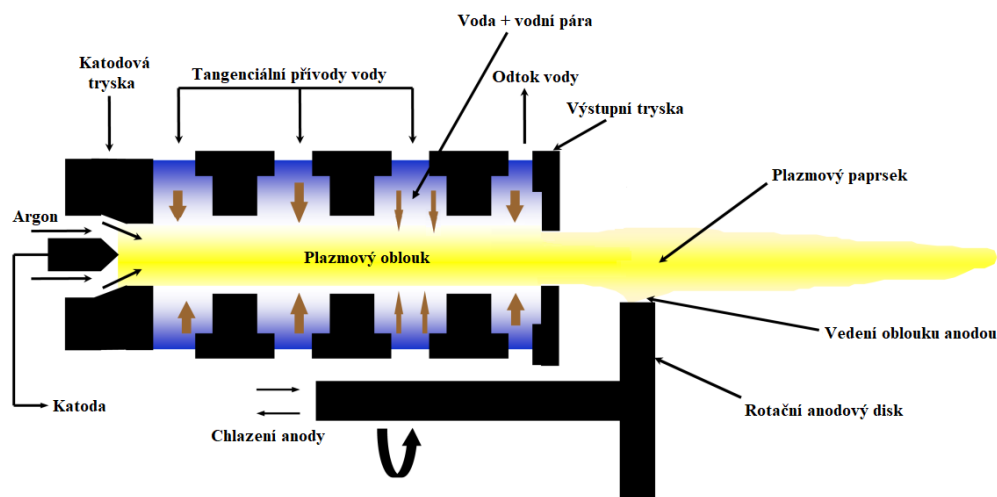
3.1.3 Hybridní hořák

Ústav fyziky plazmatu dokázal po letech výzkumu vyvinout novou verzi plazmatronu (tzv. hybridního plazmatronu), který vznikl úpravou hořáku stabilizovaného vodou. Hlavní motivací pro jeho vývoj byly právě komplikace týkající se životnosti a průběžného posuvu katody. Paprsek plazmatu se u hybridního plazmatronu stabilizuje jak pomocí plynného média (argonu), tak pomocí kapalné vody. Přestože plazma je stabilizováno prostřednictvím argonu i vody, právě argon plní též významnou roli pro ochranu a snížení opotřebení katody, zatímco voda má stejnou úlohu jako u vodou stabilizovaného plazmatronu, jak je naznačeno na obrázku 3.3. Reálná podoba hybridního plazmatronu je vidět na obrázku 3.4. Následující experimentální část byla prováděna s tímto typem plazmového hořáku.

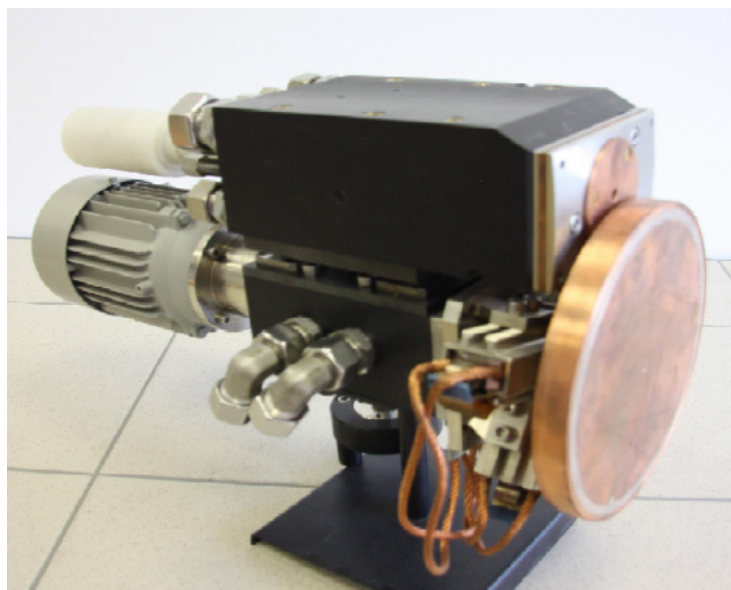
Díky této konfiguraci bylo možné použít katodu z wolframu, která má dostatečnou životnost díky svojí stabilitě, robustnosti a ochraně argonem. Wolframová katoda by se totiž

při použití ve vodou stabilizovaném hořáku rychle opotřebovala vlivem oxidace a vzhledem k její vysoké ceně by toto bylo finančně nevhodné. Obvykle bývá legována 2 % oxidů prvků, jakou jsou např. lanthan nebo thorium. Lanthan má tu výhodu, že je velmi univerzální pro různé aplikace a také usnadňuje zapalování a zlepšuje emisi. Thorium je radioaktivní, tedy se stoupajícím obsahem thoria v elektrodě se vedle zapalovacích vlastností, trvanlivosti a proudové zatížitelnosti zvyšuje i radioaktivita elektrody. Jedná se o záření α -částic, které mohou při usazení v plicích způsobit i rakovinu. Proto je při manipulaci s těmito elektrodami třeba dbát zvláštní zřetel na bezpečnost práce. Wolframové katody s příměsí bývají zpravidla broušené do špičky. [43]

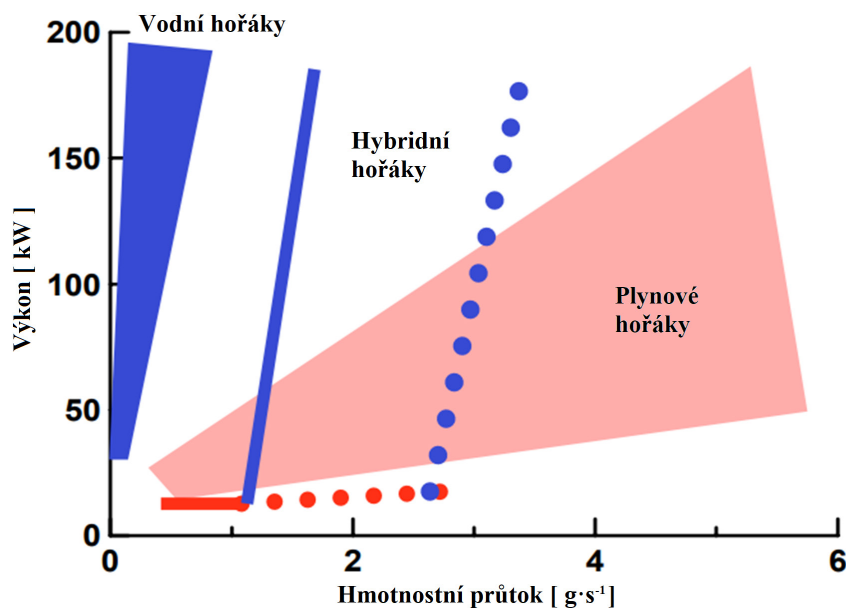
Návrh anody zůstal u měděného disku, u kterého také došlo ke zkoušení různých příměsí pro vylepšení atributů. Nyní je používán disk s 1% obsahem stříbra, čímž se snižuje opotřebení a opálení anody. Tento materiál se ukázal jako vhodný kompromis při ohledu na finance a životnost anody, proto je používán dodnes. Jiné zkoušené alternativy materiálů kotouče namísto mědi bylo železo či nikl, tyto kovy se však po testování nezačali příliš uplatňovat.



Obrázek 3.3: Schéma hybridního plazmového hořáku [44, 45] - upraveno



Obrázek 3.4: Hybridní plazmatron vyvinutý a používaný na ÚFPAV [44]



Obrázek 3.5: Provozní režimy DC typů obloukových plazmových hořáků [45] - upraveno

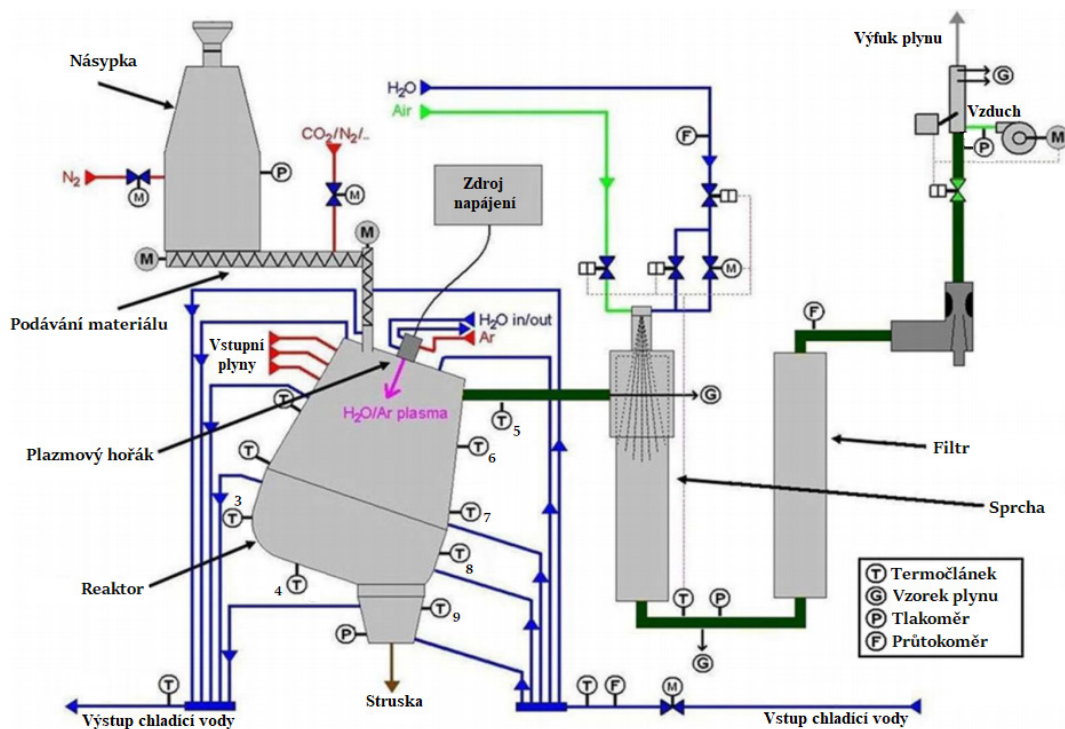
Kromě vyřešení problému s katodovou částí se také ukázalo, že hybridní plazmatron má i jiné výhody. Na obrázku 3.5 je vidět jedna ze základních předností tohoto plazmatronu. V porovnání s plynem stabilizovanými hořáky mohou hybridní hořáky za stejných hmotnostních průtoků stabilizačního média dosahovat značně vyšších výkonů a dovolují vyšší hmotnostní průtoky na rozdíl od vodou stabilizovaných hořáků. Mohou tak pracovat ve velkém rozsahu režimů, včetně těch, které jsou nedosažitelné pro plynem i vodou stabilizované hořáky.

3.2 Plazmový reaktor

Agregát plazmového reaktoru přezdívaného PLASGAS (Plasma gasification reactor) na Ústavu fyziky plazmatu je komplexní zařízení sloužící ke zpracování (nejen) odpadních látek. Ty jsou dávkovány podávací násypkou do reakční komory, ke které je přiveden plazmový hořák. Stěny reaktoru jsou vyrobené z vysoce žáruvzdorného materiálu, který je schopen vydržet extrémní teploty. Vyzdívka je tvořená tlustou keramickou vrstvou, která je silně odolná proti vysokým teplotám, ale při rychlých teplotních změnách by tato vyzdívka mohla popraskat a ztratit svou izolační schopnost. Z tohoto důvodu je třeba reaktor před experimentem postupně dostatečně vyhřát topným tělesem, obvykle na hodnotu 800 až 900 °C. Tento výhřev probíhá zhruba 24 hodin.

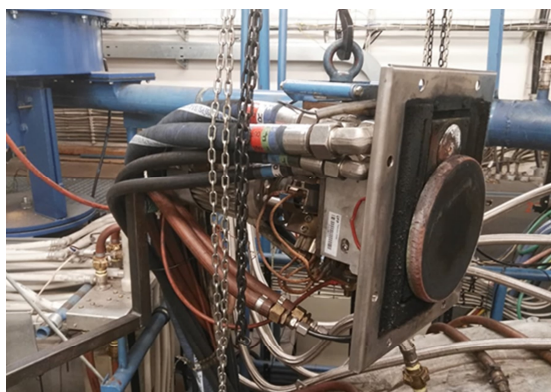
Při provozu dochází uvnitř reaktoru k alotermálním termochemickým reakcím, což znamená, že do systému je externě dodáváno teplo. Reakce na jednu stranu komplikují spolehlivou regulaci entalpie v reaktoru, která je do omezené míry nejnáze stabilizovatelná pomocí elektrických veličin, zejména výsledné elektrické energie. Na druhou stranu tyto reakce zapříčiní úplné rozložení materiálů na jednotlivé atomy, které potom v závislosti na podmínkách v reaktoru (teplota, tlak, doba setrvání) rekombinují a umožňují tak získat užitečné látky z odpadních materiálů. Typickými produkty jsou syntézní plyn nebo vodík, které z reaktoru přechází do tzv. sprchy, která průtokem vody horký plyn rychle zchladí. Díky tomuto ochlazení nedochází k dalším reakcím a složení plynu zůstává zachováno. Pevné částice uhlíku jsou zachytávány ve filtru, relativně čistý syntézní plyn pokračuje buď do spalovacího hořáku nebo tlakových lahví. [4, 33, 46]

Schéma reaktoru PLASGAS je na obrázku 3.6. Toto schéma stručně vystihuje uspořádání a propojení jednotlivých částí zařízení. Slouží také k ukázce, kde se nachází jednotlivé termočlánky, abychom dokázali určit, které křivky v následujících grafech jednotlivých teplot odpovídají konkrétním čidlům. Fotografie reálné podoby laboratorních komponent zobrazují obrázky 3.7 a 3.8



Obrázek 3.6: Schéma reaktoru PLASGAS [44] - upraveno

V reaktoru může docházet k několika různým reakcím. Mezi 2 základní, dalo by se říci okrajové reakce, patří plazmové zplyňování (tzv. gazifikace) a pyrolýza. Ostatní typy reakcí jsou jejich částečnou kombinací a dílčí hodnoty jejich počátečních a koncových podmínek (především poměrných zastoupení plynných a pevných složek) leží v rozmezí počátečních a koncových podmínek zplyňování a pyrolýzy. Na reakci má vliv samozřejmě i teplota, ta nám ale reakci nedefinuje v rozmezí popsaných okrajových podmínek, tedy okrajových reakcí popsaných detailněji v kapitolách *Gazifikace* a *Pyrolýza*.



(a) Hybridní plazmový hořák zavěšený nad reaktorem na ÚFP AV ČR



(b) Reaktor PLASGAS na ÚFP AV ČR

Obrázek 3.7: Komponenty laboratorního zařízení (1)



(a) Filtr pro zachytávání pevného uhlíku

(b) Chladicí komora plynů - tzv. sprcha

Obrázek 3.8: Komponenty laboratorního zařízení (2)

3.2.1 Gazifikace

První důležitou reakcí, kterou je třeba zmínit, je tzv. gazifikace, jinými slovy plazmové zplyňování. Jedná se o proces, kdy se při vhodně nastavených p.p.¹ rozkládá přiváděný materiál, kombinovaně doprovázený exotermickými a endotermickými reakcemi. Díky extrémním podmínkám a okolním teplotám (kolem 850 až 1400 °C) uvnitř reakční komory dochází k rozložení materiálu na jednotlivé částice. Po následném ochlazení těchto částic vznikají molekuly jednoduchých sloučenin, především oxid uhelnatý, vodík, zbytkově metan nebo oxid uhličitý. Všeobecně obsah syntézního plynu závisí vedle zpracovávaného materiálu a teploty uvnitř reaktoru také na rychlosti a typu dodávaných plynů nebo době zdržení v reaktoru. Zplyňovací proces a reakce je zapotřebí sledovat, aby bylo možné regulovat tepelný (resp. elektrický) výkon nebo rychlost podávání materiálu pro zajištění optimálního chodu zařízení a reakcí. Je důležité si tento proces neplést se spalováním, ke kterému dochází v tepelných elektrárnách při Rankinově parním oběhu, i když se jedná o jeho vyšší stupeň. Při spalování totiž vzniká velké množství oxidu uhličitého, ten je v tomto případě nežádoucí. Kvůli své nízké energetické hodnotě snižuje oxid uhličitý kvalitu syntézního plynu na výstupu reakce, proto je třeba ho co nejefektivněji eliminovat. [47]

Na řadě je uvést proč je pro gazifikaci vhodné využít právě vlastností plazmatu. Chceme-li zplyňovat materiál bez plazmatu, hlavním faktorem ovlivňujícím teplotu je přiváděný kyslík, který má za následek vyšší tvorbu oxidu uhličitého. Teplo a energie dodávaná plazmovým hořákem je však závislá především na elektrických parametrech, do komory je možné přivádět místo samotného kyslíku pro oxidační reakce přímo oxid uhličitý. Celkový dodávaný objem kyslíku musí být dopředu spočítán a v průběhu reakce korigován, abychom materiál nespalovali, ale zplyňovali.

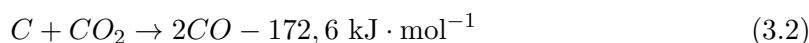
¹Počáteční podmínky

Díky uzavřenosti systému, minimálnímu výtěžku přebytečných látek a zabránění vzniku dioxinů, furanů, polycyklických uhlovodíků a oxidů dusíku je tento způsob nakládání s odpadem velice šetrný k životnímu prostředí a byl potvrzen jako jeden z nejefektivnějších a nejekologičtějších způsobů nakládání s odpady vůbec. Zároveň mají oba hlavní výstupní produkty vysokou hodnotu a jsou využitelné nejen pro energetické účely, ale také pro výstavbu a chemický průmysl (např. k výrobě syntetických látek nebo kapalného paliva Fischer-Tropschovou syntézou). Příklady reakcí (včetně potřebných energií), které mohou po dobu provozu probíhat v reaktoru, jsou znázorněny rovnicemi 3.1 až 3.4. [13, 15, 24, 37, 47, 48]

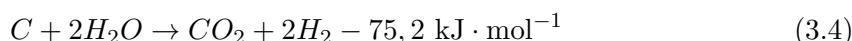
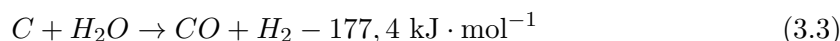
1. Rozklad přiváděného oxidu uhličitého:



2. Zplyňování uhlíku v koksovém zbytku za pomoci oxidu uhličitého:



3. Voda, resp. vodní pára reaguje podobně:



3.2.2 Pyrolýza

Pyrolýza se od gazifikace liší zásadním způsobem z hlediska výskytu oxidačních činidel při reakci a konečných získaných produktech, což má za následek, že na rozdíl od gazifikace je čistě endotermní. Přírodně se jedná o základní reakci, která trvá prvních pár okamžiků při zahájení spalování nebo gazifikace. Složité řetězce sloučenin z uhlíku, kyslíku a vodíku se při reakci rozpadají (zhruba okolo teplot 350 až 550 °C) na molekuly plynu, dehet a pevný uhlík. Průmyslově je pyrolýza využívána již od 19. století. Tehdy sloužila pro výrobu parafinů, olejů, pohonných hmot aj. Konvenčně je celý pyrolýzní proces rozdělen do několika stádií, které se liší hlavně teplotou, řádově od 150 °C do 600 °C a více, kdy dochází k ukončování reakce a tvorbě finálních produktů. Někdy může reakce probíhat až do 700-800 °C, v plazmovém reaktoru se pyrolýzní teploty blíží teplotám gazifikačním. [15, 49]

Díky rovnici 3.1 můžeme dojít k úvaze, že vzhledem k nižšímu přísunu oxidu uhličitého do reaktoru po čas reakce bude k pyrolýznímu procesu potřeba méně energie v porovnání s gazifikací (při které je oxid uhličitý hlavním zdrojem kyslíku), tedy i odebíraný příkon plazmatronem bude nižší, o čemž se přesvědčíme v kapitole *Počáteční podmínky experimentu*.

Se vznikem nových metod výroby se od pyrolýzy v minulosti upustilo, neboť s sebou přinášela vznik nežádoucích toxických, karcinogenních a těkavých látek, které bylo obtížné zneškodnit. V dnešní době však máme k dispozici spoustu pokročilých technologií, které umožňují pyrolýzu provádět bezpečně a ekologicky. Jednou z metod je právě pyrolýza plazmovým hořákem, při které nedochází ke vzniku kapalných produktů nebo koksu a zvyšuje se tím výtěžek pevného uhlíku z organických materiálů společně s produkcí syntézního plynu, kterého je však méně než při metodě plazmového zplyňování (jeho množství je dáno obsahem kyslíku ve vstupujícím materiálu, plynu a plazmatu). [49, 50]

Při účelné pyrolýze pro výtěžek uhlíku můžeme v ideálním případě obdržet uhlíkaté nanostruktury (nanočástice či nanotrubičky) nebo tzv. funkční saze. Jedná se o velmi vzácný

druh uhlíku, který je možný upravovat nastavováním provozních a počátečních podmínek experimentu. Unikátní případ tvořila pyrolýza metanu (popsaná rovnicí 3.5) na Ústavu fyziky plazmatu, při které se velká část uhlíkatých sazí nanasla již v reaktoru na okolní stěny. Za účelem sběru tohoto uhlíku a následného vyčištění reaktoru bylo odmontováno vrchní víko, k čemuž dochází jen velmi výjimečně, obvykle v řádu několika let. Pohled na usazené nanočástice zachycuje obrázek 3.9.

4. Pyrolýza metanu:



(a) Komora reaktoru po pyrolýze

(b) Detail na usazený uhlík

Obrázek 3.9: Uhlíkaté nanočástice po pyrolýzní reakci

Kombinaci gazifikace a pyrolýzy bychom mohli označit jako částečnou pyrolýzu, která vykazuje svými výsledky a p.p. vlastnosti obou těchto přístupů. Jinými slovy se jedná o plazmové zplyňování s nižším přísunem kyslíku dodávaného do reakční komory a o pyrolýzu s nižším ziskem pevné výstupní složky a vyšším zastoupením syntézního plynu. Z pohledu optimalizace materiálových výnosů není tato metoda vhodná, ale může být užitečná pro zušlechťování některých produktů nebo pro studii chování konkrétních látek za odlišných podmínek.

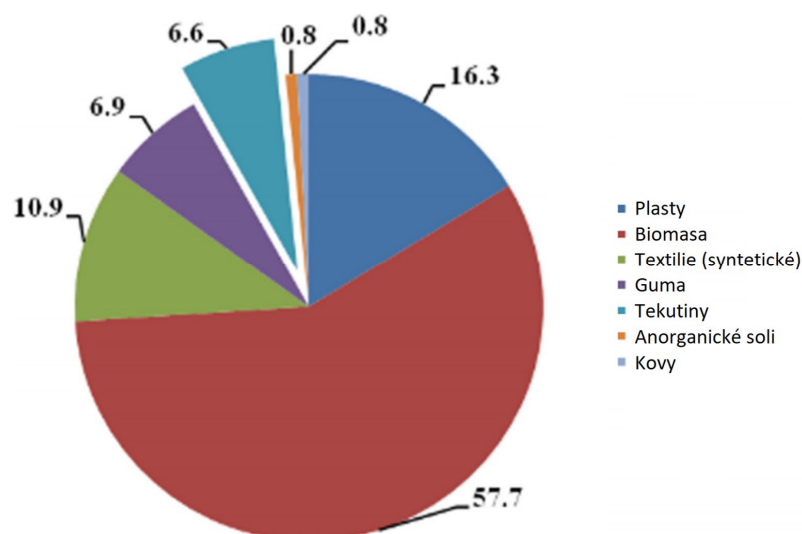
Kapitola 4

Metodika a materiál

V této kapitole uvedeme postup přípravy experimentu, především testovaného vzorku, který činil simulovaný nemocniční odpad (dále jen SNO). Popíšeme si poměrné zastoupení materiálů v tomto vzorku a jaké konkrétní předměty mohou tento materiál zastupovat. Též se obeznámíme s p.p. pro dílčí části experimentu, který rozdělíme na tři části v závislosti na probíhajících reakcích. Z p.p. uvedeme jmenovitě vstupní látky, palivový vzorek SNO a elektrický příkon. V kapitole *Výsledky experimentu* se přesvědčíme o tom, jak markantní vliv budou mít tyto p.p. na přeměnu zpracovávaného materiálu a poměrná zastoupení výstupních složek plynného syntézního plynu a pevného uhlíku. V závěru kapitoly nastíníme přibližný odhad a požadavky na průběh experimentu.

4.1 Simulovaný nemocniční odpad

Odpad z nemocnic patří v porovnání s ostatními skupinami odpadů mezi velmi rizikové. Vedle potenciálních ostrých a chemických částí v něm mohou být infekční látky např. z tělních tekutin pacientů, na injekčních jehlách či jiných použitých zdravotních pomůckách. Nádoby a pytle, ve kterých se skladuje a převáží, musejí být co nejlépe uzavřeny, aby se co nejvíce zabránilo možnému úniku a šíření případných nakažlivých a nebezpečných látek. Takové odpady jsou z materiálového a recyklačního ohledu nepoužitelné. Nemocniční odpad může mít využití pouze v jedné oblasti, a to při tepelném energetickém zpracování.



Obrázek 4.1: Složení nemocničního odpadu [51] - upraveno

Jelikož je nemyslitelné v laboratorních podmínkách pracovat s reálným nemocničním odpadem, bylo pro experiment potřeba připravit svůj vlastní simulovaný vzorek.

Při volbě materiálů a poměrů jsme vyšli z následujících údajů, obdržených ze studie [51]. Poměrné materiálové zastoupení v simulovaném nemocničním odpadu je naznačeno v obrázku 4.1 nebo včetně příkladných předmětů v tabulce 4.1.

| Materiál | Zastoupení [%] | Typické složky |
|-----------------------|----------------|---|
| Textilie (syntetické) | 10,9 | Jednorázová prostěradla, osušky, chirurgické pláště, chirurgické čepice, masky, chirurgické roušky, stehy |
| Biomasa | 57,7 | Všechny typy obvazů z bavlněné gázy, savé bavlněné kuličky, bavlněné tampony, různé zdroje papíru, břišní pásy |
| Plasty | 16,3 | Jednorázové injekční stříkačky, infuzní sety, všechny typy tekutých léčivých přípravků v plastových sáčcích (lahve), drenážní vaky, zařízení na podtlakovou drenáž, všechny typy plastových kanyl, katétrů a roubíků, všechny typy plastových sáčků, jednorázové plastové misky |
| Guma | 6,9 | Gumové chirurgické rukavice, gumové zátky všech typů lahví na tekuté léky |
| Tekutiny | 6,6 | Voda, tělní tekutiny pacientů (včetně krve), lékařské tekutiny, (čistící roztoky) |
| Anorganické soli | 0,8 | Sádrové obvazy, všechny typy tekutých léčiv v ampulích |
| Kovy | 0,8 | Čepele chirurgických nožů, jehly, hliníková těsnění lahví lékařských tekutin |

Tabulka 4.1: Zjednodušená tabulka složení nemocničního odpadu

Rozhodli jsme se, že kovy a anorganické soli pro směs vzorku zanedbáme, neboť jejich zastoupení ve směsi je minimální (méně než 1 %). Podobně si můžeme dovolit opomenout tekutiny, protože by bylo nemožné připravit dostatečně homogenní směs, a také proto, že se většina tekutin většinou skládá z vody, která pro experiment nehraje příliš zásadní roli. Simulovaný odpad jsme tedy připravili suchý, a proto jsme provedli úpravy v procentuálním zastoupení při zanedbání výše uvedených látek. Fotografie použitých materiálů zastupujících jednotlivé části SNO¹ pro zpracování v plazmovém reaktoru jsou na obrázcích 4.2, 4.3 a 4.4.

¹Simulovaný nemocniční odpad



(a) Buničinná vata

(b) Injekční stříkačky

Obrázek 4.2: Biomasa a plasty pro vzorek SNO**Obrázek 4.3:** Textilie pro vzorek SNO - chirurgický plášť a jednorázové prostěradlo

(a) Silikonové rukavice

(b) Technická zátka

Obrázek 4.4: Guma pro vzorek SNO

Při míchání a drcení 50 kg vzorku odpadu jsme vycházeli z tabulky 4.2 (pro zlepšení homogenity celého vzorku směsi jsme připravovali 5×10 kg a každý pytel s odpadem následně zvážili).

| Materiál | 1 pytel (cca 10 kg) [kg] | Poměrné zastoupení [%] | Na 50 kg vzorku [kg] |
|-------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|
| Biomasa | 6,285 | 62,86 | 31,425 |
| Plasty | 1,775 | 17,75 | 8,875 |
| Textilie | 1,187 | 11,87 | 5,935 |
| Guma (silikonová) | 0,501 | 5,01 | 2,505 |
| Guma (technická) | 0,250 | 2,50 | 1,250 |
| Celkem | 9,998 | 100 | 49,990 |

Tabulka 4.2: Konkrétní teoretické hmotnosti jednotlivých materiálů ve vzorku

Po přípravě pěti částí vzorku SNO a následném zvážení jsme obdrželi konkrétní hodnoty hmotností jednotlivých pytlů, ty jsou shrnuty v tabulce 4.3.

| Pořadí připraveného pytle | Skutečná přiměřená hmotnost [kg] |
|---------------------------|----------------------------------|
| 1. | 10,28 |
| 2. | 10,10 |
| 3. | 9,96 |
| 4. | 9,98 |
| 5. | 10,02 |

Tabulka 4.3: Hmotnosti připravených pytlů vzorku,
Pozn.: Hmotnost samotného pytle je vždy odečtena.

Prakticky se hmotnosti mohou mírně lišit, protože váha se kterou jsme pracovali měří s přesností na 2 desetinná místa kilogramu (10 gramů). Průměrně by se tedy zastoupení prakticky blížilo hodnotám v tabulce 4.4.

| Materiál | 1 pytel (cca 10 kg) [kg] | Poměrné zastoupení [%] | Na 50 kg vzorku [kg] |
|-------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|
| Biomasa | 6,29 | 62,9 | 31,43 |
| Plasty | 1,78 | 17,8 | 8,88 |
| Textilie | 1,19 | 11,9 | 5,94 |
| Guma (silikonová) | 0,50 | 5,0 | 2,51 |
| Guma (technická) | 0,25 | 2,5 | 1,25 |
| Celkem (skutečně) | - | - | 54,34 |

Tabulka 4.4: Konkrétní praktické hmotnosti jednotlivých materiálů ve vzorku

Je potřeba si uvědomit, že hodnoty v tabulce 4.4 jsou pouze orientační, a že odpadu bylo připraveno o zhruba třetinu kilogramu více, než jsme plánovali, konkrétně 50,34 kg.

4.2 Počáteční podmínky experimentu

Celý experiment byl rozdělen do sedmi časových intervalů, popisujících různé p.p. a různé probíhající reakce popsané v *Gazifikace* a *Pyrolýza*. Tyto intervaly jsou naznačeny v tabulce 4.5.

| Dílčí část experimentu | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Začátek | 14:31 | 14:39 | 14:49 | 14:58 | 15:35 | 16:02 | 16:14 |
| Konec | 14:39 | 14:49 | 14:58 | 15:35 | 16:02 | 16:14 | 16:27 |
| Doba trvání experimentu [h] | 0,13 | 0,17 | 0,15 | 0,62 | 0,45 | 0,20 | 0,22 |

Tabulka 4.5: Rozdělení experimentu na dílčí časové intervaly

Pro každý časový interval se lišily vstupní p.p., tedy i charakter probíhajících reakcí, nejdůležitějšími parametry pro naše úvahy bude množství vstupního oxidu uhličitého, elektrický příkon plazmatronu a jeho účinnost. Tyto p.p. zobrazuje tabulka 4.6.

| Dílčí část experimentu | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. |
|--|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Palivo [$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$] | 5,0 | 10,0 | 9,6 | 6,4 | 4,7 | 4,3 | 3,2 |
| Vstupní CO_2 [$\text{litr}\cdot\text{min}^{-1}$] | 164 | 164 | 164 | 54 | 22 | 0 | 0 |
| Příkon plazmového hořáku [kW] | 138 | 138 | 138 | 118 | 107 | 99 | 99 |
| Elektrická účinnost plazmového hořáku [%] | 52 | 66 | 66 | 54 | 50 | 50 | 46 |
| Vstup H_2O do plazmového hořáku [$\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$] | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 | 28 |
| Vstupní Ar do plazmového hořáku [$\text{litr}\cdot\text{min}^{-1}$] | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Vstupní Ar do reaktoru [$\text{litr}\cdot\text{min}^{-1}$] | 102 | 99 | 100 | 110 | 110 | 114 | 110 |

Tabulka 4.6: Počáteční podmínky dílčích částí experimentu

Pokud bychom na základě údajů v tabulce 4.6 chtěli klasifikovat jednotlivé reakce probíhající v reaktoru, mohli bychom říci, že dílčí části 1., 2. a 3. reprezentují plazmové zplyňování (gazifikaci), části 4. a 5. částečnou pyrolýzu a části 6. a 7. téměř úplnou pyrolýzu. Téměř proto, že do reaktoru jde ještě částečně kyslík získaný z paliva a z vody z plazmatu, takže není úplně možné přísunu kyslíku kompletně zabránit. Názornější ukázka zmíněné klasifikace přijde v kapitole *Vstupní plyny*.

V průběhu experimentu se dařilo SNO dávkovat pouze průměrným hmotnostním průtokem cca 5,9 kg, což při necelých dvou hodinách provozu znamená, že jsme nezpracovali ani čtvrtinu připraveného vzorku. Tyto komplikace byly způsobené strukturou a lehkostí materiálu, který nebylo snadné podavačem dopravit do reakční komory. Množství spotřebovaného materiálu odvíjí též množství výstupních složek a velmi výrazně může ovlivnit finální účinnost tohoto procesu. Předpokládáme, že čím méně SNO zpracujeme, tím bude účinnost EP^2 nižší, protože na vstupu mají materiály značně menší energetickou hodnotu než na výstupu.

²Energetická přeměna

Můžeme si také povšimnout výkyvů v elektrické účinnosti plazmatronu, která již výrazně klesá od konce části plazmového zplyňování a postupně se pořád snižuje až do konce experimentu, kdy docházelo k pyrolýze. Přesný jmenovitý výkon hořáku není známý, neboť je závislý na spoustě dílčích faktorech (zejména elektrických, tepelných a chemických). Můžeme ale předpokládat, že snižováním příkonu se od jmenovitého výkonu posouváme dále (vlivem poklesu účinnosti) a hořák je z tohoto ohledu mírně předimenzovaný, neboť obvykle dosahují plazmatrony účinnosti kolem 60-80 %. [15]

4.3 Očekávaný průběh

Při experimentu byl očekáván následující průběh:

- 1) Předehřátí reaktoru plazmovým hořákem na 1300 °C
- 2) Zapálení plazmatronu, zahájení dávkování oxidu uhličitého, zahájení dávkování odpadu (ideální hmotnostní průtok odpadu bylo v tomto případě 8 kg za hodinu)
- 3) Regulace plazmatronu tak, aby v reaktoru byla průměrná teplota 1200 °C
- 4) Chlazení výstupního plynu na 600 °C

Kapitola 5

Výsledky experimentu

Poslední a zároveň nejdelší kapitola má za úkol shrnout výsledky analýzy dat získaných z experimentu na Ústavu fyziky plazmatu a následné výpočty sloužící k bilanci jednotlivých reakcí. Seznámíme se s prvkovým zastoupením v připraveném vzorku SNO. Detailně popíšeme časové průběhy měřených veličin a na grafech vysvětlíme, k čemu v konkrétních časech docházelo, přičemž budeme komentovat patřičné souvazečnosti. Ukážeme si množství obdržených dat ohledně výstupních produktů reakcí a pokusíme se tato data detailně interpretovat. Následně se pokusíme vypočítat, jak hospodárné a účinné jsou prováděné reakce. To provedeme odhadem dílčích příkonů a energií uložených v plynech ve formě jejich výhřevností, též se pokusíme do výpočtu zahrnout energii původního materiálu odhadem jeho možné výhřevnosti. Na konci této kapitoly obdržené souhrnné výsledky řádně prodiskutujeme a provedeme poměrné srovnání jednotlivých reakcí mezi sebou. Též nastíníme, jak je to se skutečnou náročností prováděných experimentů na Ústavu fyziky plazmatu AV ČR a odhalíme skrytý potenciál technologie plazmového zplyňování, které je předmětem této bakalářské práce.

5.1 Doplnující úvodní informace o výsledcích

Samotný experiment a měření nám umožnilo získat spoustu dat z jeho průběhu. Jelikož plazmatron na Ústavu fyziky plazmatu je hybridní, je potřeba abychom do něj kromě elektřiny přiváděli mimo jiné i vodu a inertní plynný argon pro umožnění ionizace a generování samotného plazmatu. Voda je též přiváděna do plazmatronu a reaktoru za účelem chlazení. Větší množství argonu je během experimentu přiváděno do reaktoru, a to kvůli dvěma hlavním důvodům vysvětleným dále v kapitole *Vstupní plyny*. Vzhledem k enormnímu množství dat naměřených během doby experimentu nebudeme pro jednotlivé charakteristiky přikládat tabulky hodnot, nýbrž zhotovené grafy.

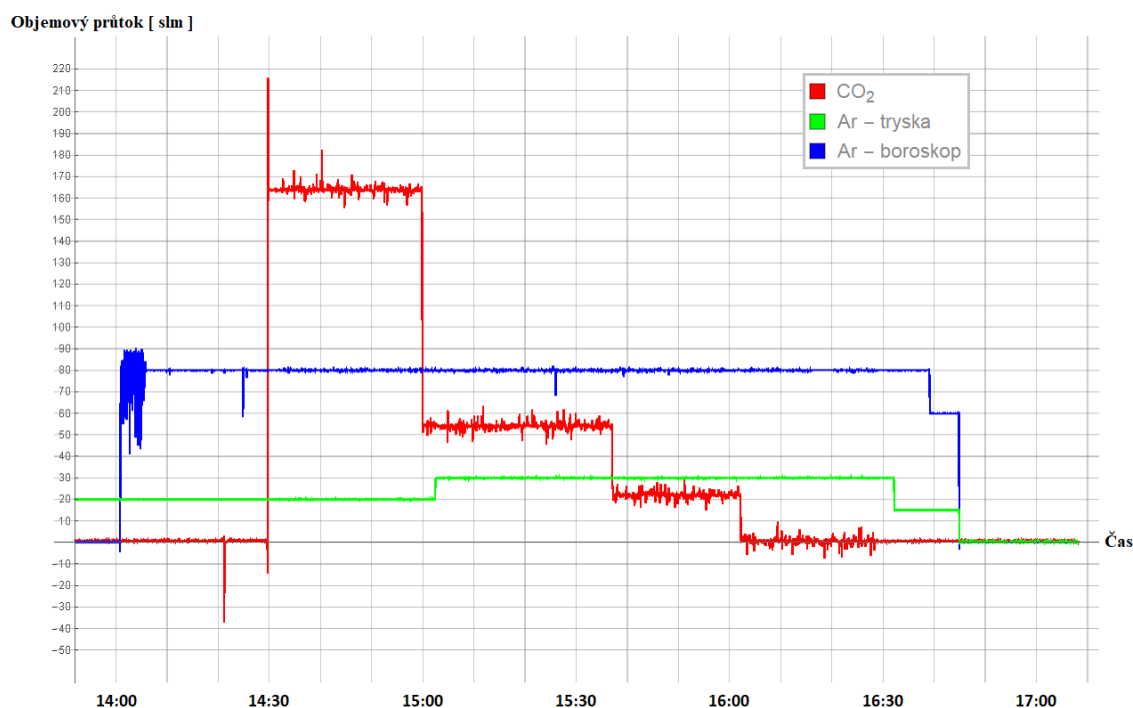
Po realizaci experimentu byla též provedena expertýza připraveného materiálového vzorku, která odhalila látkové zastoupení chemických prvků v SNO. Tento poměr je zachycen v tabulce 5.1. Jedná se o vzorek obsahující stopové množství síry a chlóru (v řádu stovek *mg* na *kg* vzorku) a zanedbatelné množství jiných prvků.

| Chem. prvek | Hmotnostní poměr [%] |
|-------------|----------------------|
| C | 67,8 |
| H | 10,4 |
| N | 0,7 |
| O | 16,4 |

Tabulka 5.1: Poměrné zastoupení chemických prvků v suchém vzorku SNO

5.2 Vstupní plyny

Obrázek 5.1 představuje přiváděný oxid uhličitý a argon do plazmového reaktoru. Jedná se o grafické znázornění důležitých vstupních plynů po dobu celého experimentu. Důvodem, proč je přívod argonu rozdělen na dvě části, je následující. Větší podíl tvoří proud argonu, kterým je chlazen tzv. boroskop uvnitř reaktoru. Jedná se o zařízení, které umožňuje nahlédnout dovnitř reakční komory po čas experimentu a sledovat případné dění jednotlivých reakcí. Pokud bychom jej tímto způsobem nechladili, optika a kovová konstrukce boroskopu by se poškodila vlivem vystavení extrémní teplotě a chemickým látkám. Menší část přiváděného argonu dovnitř reaktoru slouží k ofukování okolí výstupní trysky plazmatronu, aby se minimalizoval zpětný tok plazmatu a částic, zejména těch, které mohou při ulpění na anodu negativně ovlivnit její vlastnosti, jak se dovíme i v kapitole *Charakteristika plazmatronu*.



Obrázek 5.1: Charakteristika důležitých dodávaných plynů

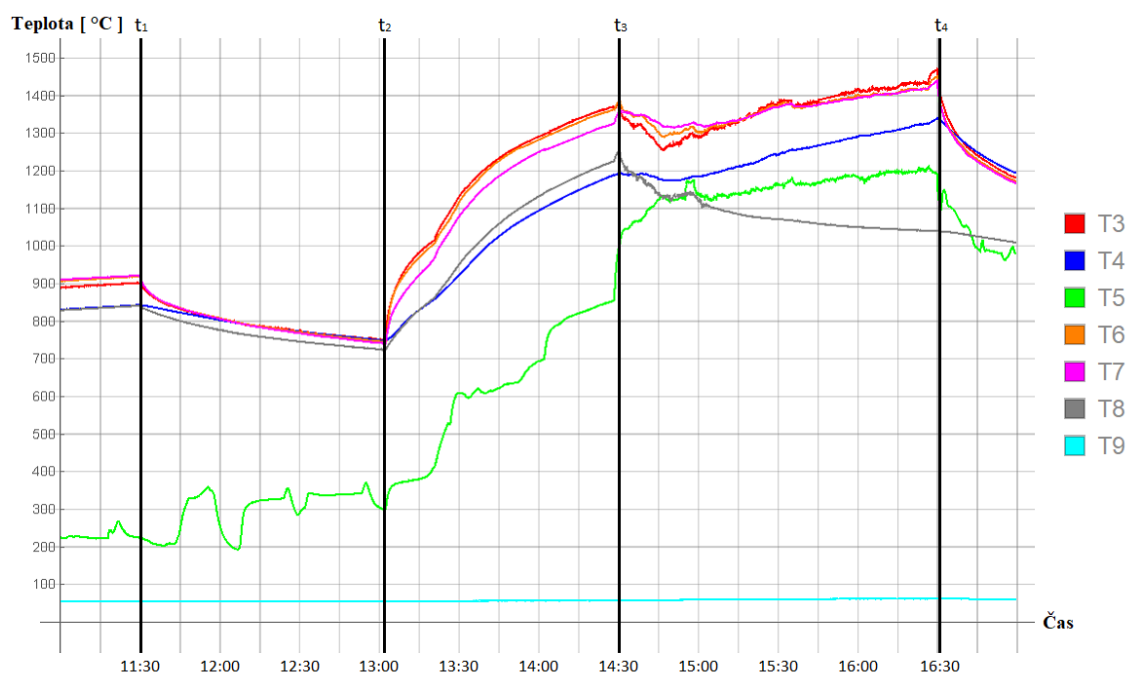
Z obrázku 5.1 je možné udělat ještě názornější úsudek, o jaké reakce se při zpracování odpadu jednalo. Víme, že plazmové zplyňování probíhá za přístupu kyslíku, což znamená, že ke zplyňování (gazifikaci) muselo docházet v prvotní části experimentu, neboť zde je přísun oxidu uhličitého nejvyšší. S postupným ubýváním kyslíku dodávaného do reaktoru přechází plazmové zplyňování v částečnou pyrolýzu, přičemž při nulovém přístupu kyslíku se dá hovořit o již zmíněné úplné pyrolýze.

Dalším důvodem, proč je třeba dodávat argon, je kromě stabilizace plazmatu, ochrany boroskopu a plazmového hořáku také kalibrace výstupních plynů. Díky tomu, že je argon inertní (tedy nereaktivní), tak víme, že přesné množství argonu, které se do reaktoru dodá, z něj následovně také vyjde.

5.3 Teploty v reaktoru

Další podstatnou vlastností ovlivňující i reakce a chování jednotlivých látek a sloučenin a následnou interakci mezi atomy a molekulami je termodynamická teplota v reaktoru, při které zplyňování či pyrolýza probíhá.

Protože uvnitř plamen plazmatu dosahuje extrémní teploty v řádu až desítek tisíc °C, nemůžeme ji měřit konvenčně pomocí termočlánku. Přestože teplotní gradient prudce klesá v závislosti na vzdálenosti od zdroje plazmatu, pořád se teplota pohybuje ve výši jednotek tisíc °C. Proto jsou instalované termočlánky rozmístěny jen v blízkosti stěn reaktoru, aby nedošlo k jejich poškození. Rozmístění termočlánků je popsáno a ukázáno na obrázku 3.6. V obrázku 5.2 jsou zaneseny 4 význačné časové body t_1 až t_4 . Na obrázcích 5.3 až 5.6 v kapitole *Charakteristika plazmatronu* si budeme moci povšimnout jistých souvisejících vysvětlených dále.

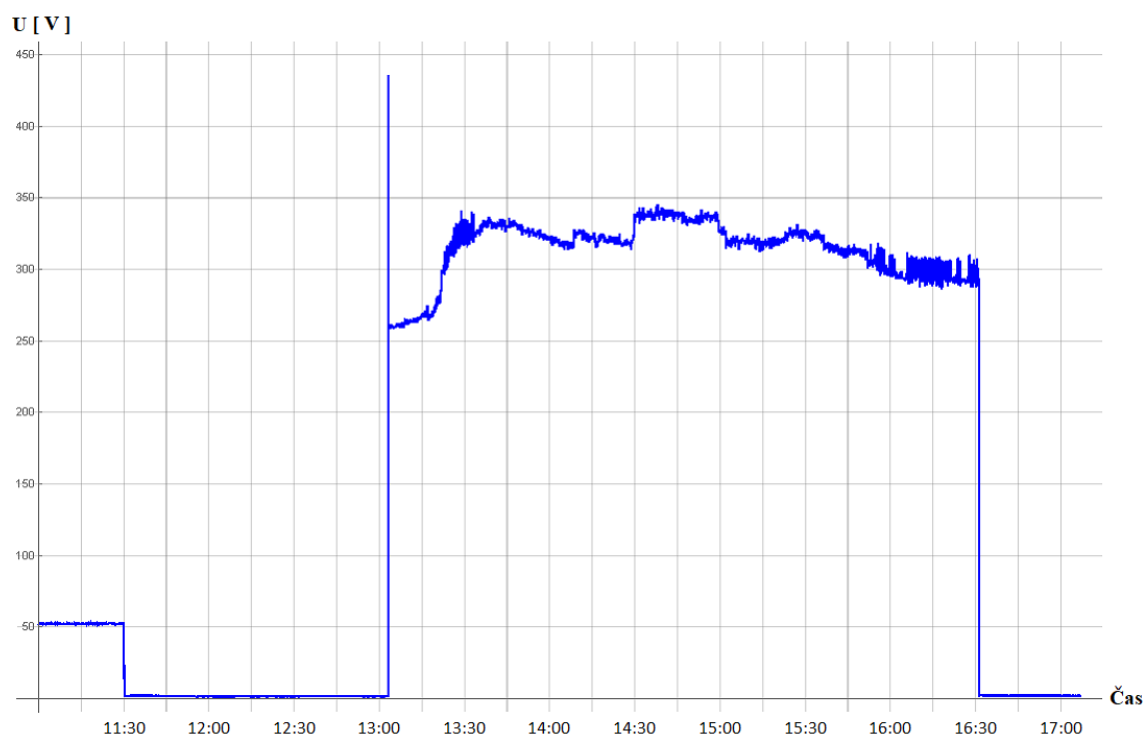


Obrázek 5.2: Průběhy naměřených teplot konkrétních termočlánků

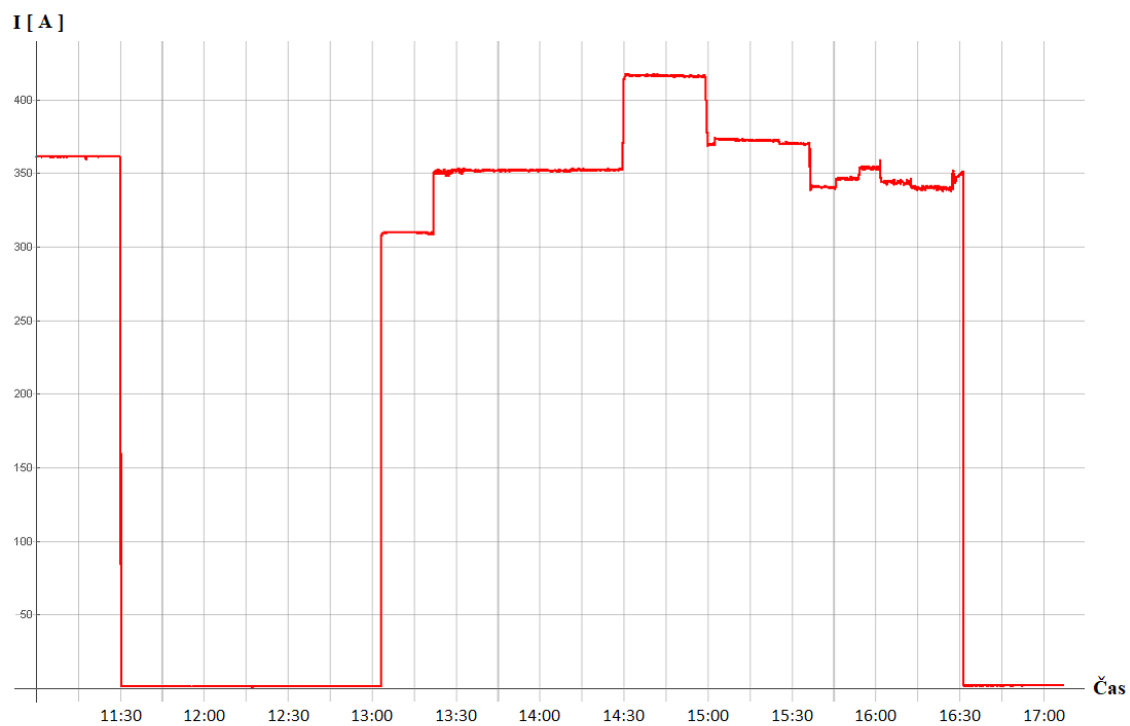
t_1 značí konec nočního výhřevu reaktoru, tzn. vypnutí elektrického proudu a pokles výkonu na nulu, proto je v grafu patrný náhlý mírný pokles až do doby t_2 . To reprezentuje moment zážehu hořáku v reaktoru, můžeme pozorovat nárůst všech teplot naměřených čidlem, vrchní křivky jsou relativně vyhlazené. Úbytek teplot v horních křivkách teplot přichází v bodě t_3 , kdy započalo podávání materiálu (simulovaného nemocničního odpadu) a oxidu uhličitého, u termočlánku T5 však pozorujeme teplotní nárůst, způsobený putováním horkého plynu přes čidlo do tzv. sprchy (chladicí části, kde se teplota plynu prudce sníží). Vzhledem k nerovnoměrnému podávání materiálu a průběhu termochemických reakcí si můžeme povšimnout, jak jsou křivky v tomto časovém intervalu zubaté a nevyhlazené. Poslední bod, označený t_4 detekuje skončení procesu podávání odpadu násypkou a přívodu elektrického proudu, takže teploty v reaktoru začnou opět klesat.

Tyto poznatky lze aplikovat pro rozbor grafů na obrázcích 5.3 až 5.6 v následující kapitole, kde si předešlé myšlenky můžeme snadno promítnout a vyhodnotit.

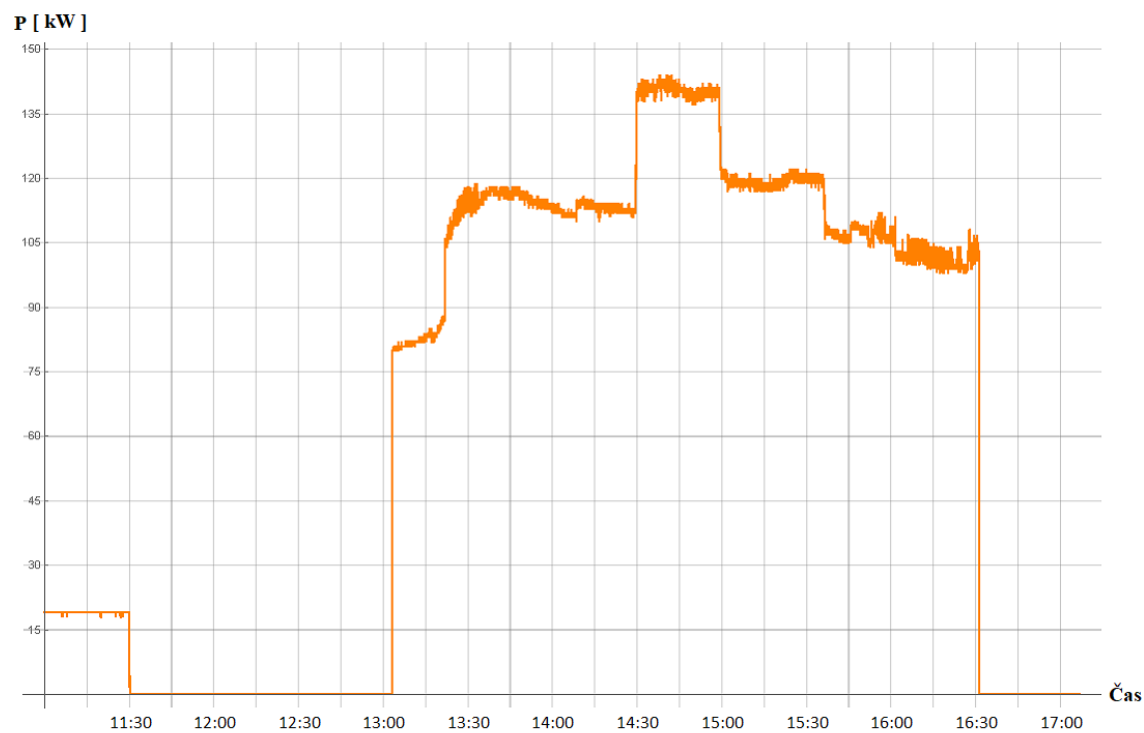
5.4 Charakteristika plazmatronu



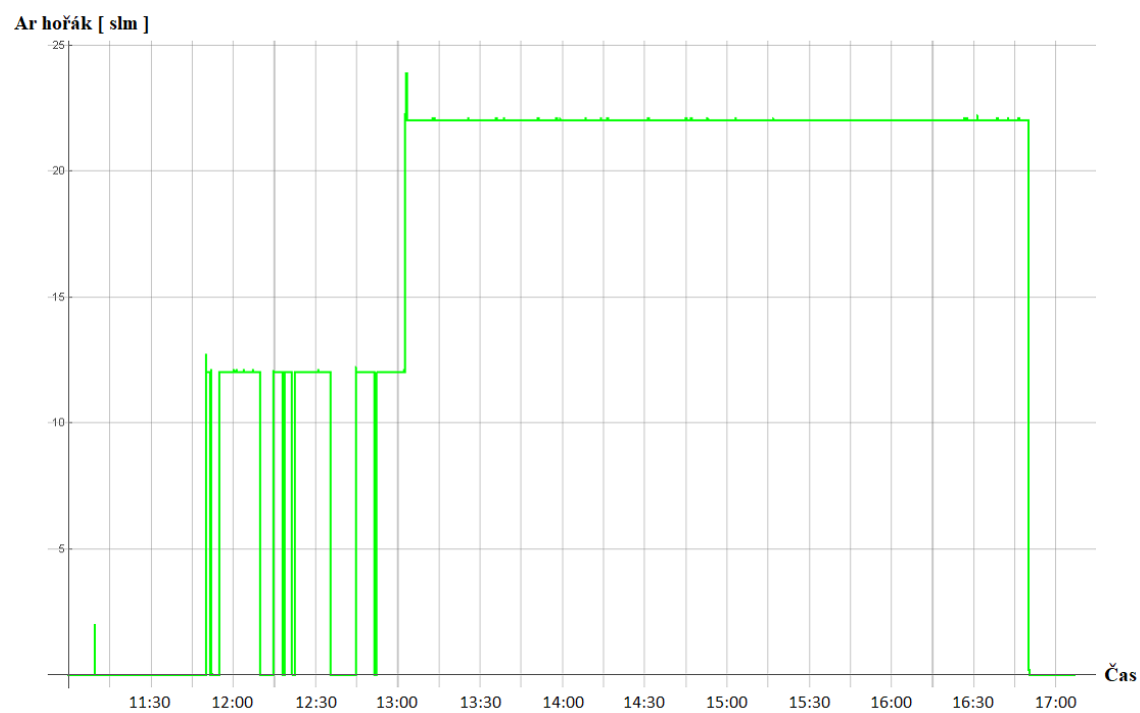
Obrázek 5.3: Průběh napětí



Obrázek 5.4: Průběh elektrického proudu



Obrázek 5.5: Průběh příkonu



Obrázek 5.6: Průběh argonu v hořáku

V závislosti na dosavadních znalostech můžeme i u ostatních grafů určit, kde se v jednotlivých charakteristikách výše vyskytují zmíněné časy t_1 až t_4 . Víme, že pokles proudu, napětí a výkonu na nulu kolem času 11:30 nám udával ukončení vyhřívání, jinými slovy čas t_1 . Po dokončení výhřevu a před zážehem hořáku a započítím experimentu (od 11:30 do 13:00) přívodem potrubí mezi hořákem a skladovací lahví chvílemi proudil plynný argon z důvodu ověření správného provozu plazmatronu. Tento děj nijak neohrožuje následující průběh experimentu, nejedná se o nic neobvyklého.

Kolem času 13:00 je patrný prudký napěťový nárůst (436 V) dlouhý pouze pár sekund, který je nezbytný pro zážeh plazmatronu, ihned po zážehu napětí klesne téměř o polovinu a ustálí se kolem hodnoty 259 V.

Proud je z velké části manuálně regulovatelný, proto je jeho charakteristika schodovitého charakteru. Zhruba čtvrt hodiny po zážehu byl proud navýšen z 309 A na 350 A, ustálil se přibližně po 16 s. V čase t_3 (cca 14:31) byl proud opět navýšen a sice na 417 A, abychom dosáhli požadovaného příkonu kolem 140 kW, stabilizace proběhla do jedné minuty. Potom započalo podávání oxidu uhličitého a SNO násypkou do reaktoru, následovala reakce s plazmatem.

V čase 16:27 byl zastaven elektrický proud a hořák se vypnul, pokles v grafu je jednoznačný, napětí a výkon byly též nulové. Hořákem ještě přibližně 20 minut proudil argon, aby se hořák zbytečně neopotreboval a nepoškodil.

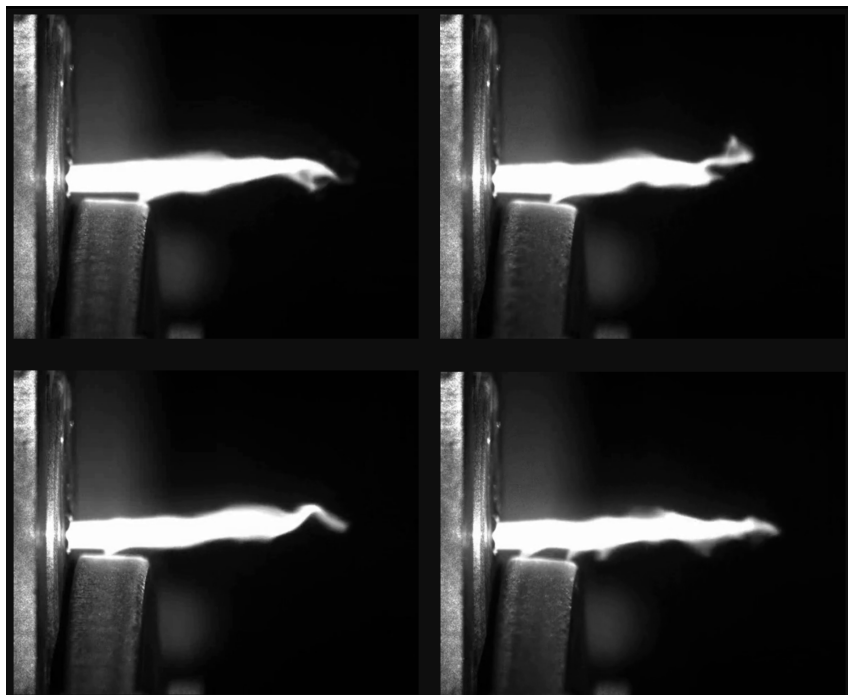
V grafu znázorňujícím napětí po čas experimentu si můžeme všimnout, že křivka není vyhlazená jako je tomu u charakteristiky elektrického proudu, což znamená, že hořák musel vykazovat časově proměnné vlastnosti.

Vysoce pravděpodobné je, že při experimentu docházelo k uvolňování částic (např. uhlíku) ovlivňujících odpor elektrod, které se střídavě nanášely a smývaly proudícím žhavým plynem a plazmatem a vytvářely tak proměnlivou vodivost. Při uvažování konstantního elektrického proudu v konečně krátkém časovém úseku vychází z Ohmova zákona v integrálním tvaru

$$\Delta U = I \cdot \Delta R, \quad (5.1)$$

kde ΔU [V] je změna napětí, I [A] je elektrický proud a ΔR [Ω] je změna elektrického odporu, že kolísání odporu elektrody se při $I = konst.$ promítne šumem na křivce průběhu napětí.

Dalším možným vysvětlením je fakt, že došlo k opotřebení elektrod hořáku, a tak se napětí nemohlo udržet na přibližně konstantních hodnotách, k čemuž by při nesymetrickém poškození zejména anodové části docházelo i kvůli tomu, že anoda při běhu hořáku rotuje kolem své osy. Elektrický oblouk generující plazma protéká skrze anodový kotouč neustále v různé vzdálenosti od výstupní trysky, vybírá si cestu nejmenšího odporu, jak je vidět i na obrázku 5.7. Tyto obrázky byly pořízeny vysokorychlostní kamerou s expoziční dobou na úrovni mikrosekund, pohyb "úchyty"oblouku k různým částem rotační anody je tedy velmi rychlý.



Obrázek 5.7: Ukázka změny průchodu elektrického oblouku skrze rotující anodu [44]

5.5 Popis výstupních produktů reakcí

Po ukončení experimentu, dílčích reakcí a ochlazení výstupní směsi lze celkový výtěžek z odpadu rozdělit na 2 části, a sice převládající plynnou část a zbytkovou pevnou část. Výsledky pro různé p.p. a vstupní parametry jsou v tabulkách 5.2, 5.3 a 5.4.

5.5.1 Plynné složky

Největší zastoupení celkových produktů reakce mají plynné složky. Ty se dají rozdělit na požadovaný syntézní plyn a ostatní plyny. Konkrétní složení syntézního plynu a jeho celkový výtěžek ze vzorku odpadu se liší v závislosti na probíhajících reakcích popsaných v *Gazifikace a Pyrolýza*.

| Dílčí část experimentu | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Ar [%] | 20,7 | 15,8 | 16,1 | 26,7 | 32,8 | 37,0 | 41,0 |
| CO [%] | 39,3 | 43,8 | 44,9 | 32,1 | 25,1 | 18,6 | 18,2 |
| H ₂ [%] | 23,9 | 32,2 | 31,2 | 33,9 | 33,7 | 35,0 | 32,9 |
| CO ₂ [%] | 15,7 | 7,3 | 6,9 | 3,6 | 2,4 | 0,9 | 1,0 |
| CH ₄ [%] | 0,2 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,4 | 0,3 | 0,2 |
| N ₂ [%] | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 3,1 | 5,6 | 8,3 | 6,8 |
| Nečistoty (hlavně NH ₃) [%] | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Poměr H ₂ /CO | 0,61 | 0,73 | 0,70 | 1,06 | 1,34 | 1,88 | 1,81 |
| Poměr CO ₂ /CO | 0,40 | 0,17 | 0,15 | 0,11 | 0,09 | 0,05 | 0,05 |

Tabulka 5.2: Poměrné zastoupení složek výstupního syntézního plynu

Z tabulky 5.2 lze učinit několik závěrů ohledně oxidu uhličitého, včetně korelace jeho poměrného obsahu na výstupu v závislosti na provozních podmínkách a dané reakci. Především v prvotních fázích reakce se zdá, že ho je ve výtěžku veškerých plynů poměrně dost (a to zejména v úvodní části gazifikace), přičemž žádoucí je ho co nejvíce rozložit. Porovnáme-li ale výstupní oxid uhličitý s výstupním oxidem uhelnatým, můžeme si povšimnout, že je ho (kromě počáteční fáze experimentu) mnohem méně, což deklaruje, že nedocházelo ke spalování, ale ke zplyňování (při nejmenším po většinu času experimentu). V části experimentu č. 1. ale ke spalování docházet mohlo, neboť výtěžek pevného uhlíku je dle výsledků záporný, jak se dozvíme i v podkapitole *Pevné složky*. Důvodem, proč tedy máme na výstupu jistý podíl oxidu uhličitého je, že nedošlo k úplnému rozložení oxidu uhličitého na vstupu (který je dodáván za účelem poskytnutí kyslíku pro reakci). Tuto myšlenku podporuje i fakt, že při pyrolýze (kdy oxid uhličitý do reaktoru nedodáváme) oxid uhličitý téměř nevzniká a i poměrově k oxidu uhelnatému je ho minimum.

Kvalita získaného syntézního plynu závisí především na poměru zastoupeného vodíku a oxidu uhelnatého v plynu, tento poměr též ovlivňuje následnou výhřevnost, popsanou v kapitole *Výhřevnost*. Vyšší hodnota tohoto poměru znamená nižší energetický užitek.

| Dílčí část experimentu | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. |
|---|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| Ar [normal m ³ ·h ⁻¹] | 6,75 | 6,60 | 6,66 | 7,27 | 7,27 | 7,52 | 7,27 |
| CO [normal m ³ ·h ⁻¹] | 12,84 | 18,32 | 18,64 | 8,74 | 5,58 | 3,78 | 3,22 |
| H ₂ [normal m ³ ·h ⁻¹] | 7,82 | 13,45 | 12,96 | 9,24 | 7,49 | 7,10 | 5,83 |
| CO ₂ [normal m ³ ·h ⁻¹] | 5,13 | 3,07 | 2,85 | 0,97 | 0,53 | 0,17 | 0,17 |
| CH ₄ [normal m ³ ·h ⁻¹] | 0,07 | 0,25 | 0,25 | 0,19 | 0,09 | 0,09 | 0,03 |

Tabulka 5.3: Celkový objemový výtěžek syntézního plynu vztahovaný na jednotku času

5.5.2 Pevné složky

| Dílčí část experimentu | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. |
|--|-------|------|------|------|------|------|------|
| Spotřebované palivo [kg] | 0,66 | 1,67 | 1,44 | 3,92 | 2,12 | 0,86 | 0,69 |
| C ve spotřebovaném palivu [kg] | 0,45 | 1,13 | 0,98 | 2,66 | 1,43 | 0,58 | 0,47 |
| Výtěžek výstupního C [kg] | -0,14 | 0,08 | 0,02 | 0,46 | 0,26 | 0,16 | 0,07 |
| Výtěžek výstupního C [kg·h ⁻¹] | -1,03 | 0,47 | 0,13 | 0,74 | 0,58 | 0,78 | 0,34 |
| Popel [kg] | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 0,01 |
| Poměr výstupní/vstupní C [%] | – | 6,9 | 2,1 | 17,2 | 18,1 | 26,7 | 15,4 |

Tabulka 5.4: Shrnutí vstupních a výstupních pevných složek

Zajímavé je si povšimnout, že v prvotní fázi experimentu dosahuje množství výstupního uhlíku záporné hodnoty. Je to způsobeno tím, že se experiment začínal s mírně nadstechiometrickými podmínkami, což jinými slovy znamená, že byl přisun oxidu uhličitého a vody o trochu vyšší, než by bylo třeba pro zplyňovací reakci, a dokázali bychom tedy

přeměnit ještě více uhlíku, než jsme přiváděli do reakční komory ve formě SNO a oxidu uhličitého. V prvotních momentech reakce se díky tomu gazifikace vzdáleně blíží spalování. Důvodem proč se toto provádí je, aby byly zajištěny stechiometrické podmínky po zbytek experimentu, především v průběhu zplyňování. Všeobecně se při pyrolýze dá (v porovnání s gazifikací) očekávat vyšší výtěžek uhlíku, ale v našem případě tomu tak není. Hlavním důvodem byl značný pokles množství podávaného paliva pro zpracování (vlivem komplikací způsobených materiálem podávacím systému), vedlejším důvodem byl nulový přísun uhlíku ve formě oxidu uhličitého.

5.6 Energetické bilance

Na základě výsledků experimentu lze vypočítat elektrickou energii dodávanou do plazmového hořáku, energii uloženou v syntézním plynu ve formě jeho objemu a výhřevnosti a diskutovat jaké reakce jsou vhodné pro konkrétní účely. V následující úvaze odhalíme skutečný potenciál této technologie.

5.6.1 Elektrická energie

Vstupní energii ve formě elektřiny lze odhadnout ze znalosti příkonu a času, po který byl tento příkon dodáván. Lze též využít znalosti, že úbytek elektrické energie je roven elektrické práci vykonané elektromagnetickým polem. Souhrnně tedy:

$$\Delta E = -W \quad (5.2)$$

$$W = \int_0^t P dt \quad (5.3)$$

kde ΔE [J] je elektrická energie, W [J] je elektrická práce a P [W] je elektrický příkon.

Přijatou elektrickou energii ve formě práce budeme pro výpočty odtud uvažovat s kladným znaménkem. Vzorec 5.3 by bylo možné použít, znali bychom konkrétní předpis funkce popisující průběh elektrického příkonu. Pro výpočet elektrické práce budeme tedy muset využít aproximace pomocí numerické integrace lichoběžníkovou metodou dle vzorce 5.4. Velikost kroku je cca 10 sekund. Při vztažení na téměř dvouhodinový experiment můžeme očekávat poměrně přesný výsledek.

$$W = \sum_{i=0}^N \left(\frac{P_{i+1} + P_i}{2} \right) \cdot (t_{i+1} - t_i) \quad (5.4)$$

Numerickou integraci budeme provádět třikrát pro jednotlivé typy reakcí. Nadále budeme pro odlišení reakcí v rovnicích používat indexy G^1 , PP^2 a P^3 .

Gazifikace:

$$\Delta E_G = W_G \doteq 300,31 \cdot 10^6 \text{ J} = 83,42 \text{ kWh} \quad (5.5)$$

Částečná pyrolýza:

$$\Delta E_{PP} = W_{PP} \doteq 843,65 \cdot 10^6 \text{ J} = 234,35 \text{ kWh} \quad (5.6)$$

Pyrolýza:

$$\Delta E_P = W_P \doteq 269,79 \cdot 10^6 \text{ J} = 74,94 \text{ kWh} \quad (5.7)$$

¹Gazifikace (*Gasification*)

²Částečná pyrolýza (*Partial pyrolysis*)

³Pyrolýza (*Pyrolysis*)

Elektrická energie odebraná plazmovým hořákem po celou dobu experimentu je téměř 400 kWh, což činí více než 200 kWh za hodinu, tento fakt dokazuje velmi vysokou energetickou náročnost této technologie.

5.6.2 Výhřevnost

Akumulovanou energii získanou ve formě výstupních produktů lze získat pomocí znalosti výhřevností jednotlivých složek a výtěžku jejich celkového objemu, případně jejich hmotnosti. Základní vztah pro výhřevnost lze psát ve tvaru:

$$H = \frac{Q}{m} = \frac{Q}{\rho V} \quad (5.8)$$

kde Q [J] je potenciálně uvolněné teplo, m [kg] je hmotnost paliva, ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] je průměrná hustota paliva a V [m^3] je celkový objem paliva, případně:

$$H' = \frac{Q}{V} \quad (5.9)$$

známe-li údaj o výhřevnosti vztažený na jednotku objemu za normálních podmínek, což bývá u plynů obvyklejší. Normálními podmínkami uvažujeme teplotu okolí 15 °C a tlak 1013,25 milibarů, tedy tlak atmosferický. [52]

Z rovnice vyjádříme teplo Q , které směs plynu dokáže uvolnit. Vzhledem k tomu, že se syntézní plyn skládá z několika dílčích sloučenin, je nutné zohlednit každou z nich zvlášť a výslednou energii posléze sečíst.

Pro názornost uvedeme tabulku 5.5 vypočítaných získaných objemů složek syntézního plynu ze znalosti objemového průtoku a doby, po kterou dílčí část experimentu probíhala z tabulek 4.5 a 5.3.

| Typ reakce | Gazifikace | Částečná pyrolýza | Pyrolýza |
|----------------------------------|------------|-------------------|----------|
| Ar [m^3] | 2,999 | 7,756 | 3,080 |
| CO [m^3] | 7,561 | 7,899 | 1,454 |
| H ₂ [m^3] | 5,230 | 9,070 | 2,682 |
| CO ₂ [m^3] | 1,623 | 0,837 | 0,072 |
| CH ₄ [m^3] | 0,089 | 0,159 | 0,024 |

Tabulka 5.5: Výtěžek plynných složek syntézního plynu

Zajímat nás budou pouze energeticky využitelné plyny, tedy oxid uhelnatý, vodík a metan, výhřevnosti těchto plynů jsou shrnuty v tabulce 5.6.

| Plyn | Výhřevnost [$\text{MJ}\cdot(\text{normal m}^3)^{-1}$] |
|-----------------|---|
| CO | 12,6 |
| H ₂ | 10,8 |
| CH ₄ | 35,9 |

Tabulka 5.6: Výhřevnosti složek syntézního plynu [53]

I když není uhlík jakožto pevný produkt reakce přímo získáván pro energetické účely, má také určitou výhřevnost, kterou můžeme započítat do celkové energie uložené ve výtěžku, chceme-li dosáhnout lepších výsledků. To má však vzhledem k předpokladu kladného výtěžku uhlíku smysl pouze pro reakci pyrolýzy a částečné pyrolýzy. Výhřevnost uhlíku je $32,8 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, tu vynásobíme hmotnostmi výtěžku pevného uhlíku z tabulky 5.4, konkrétně $0,72 \text{ kg}$ pro reakci částečné pyrolýzy a $0,23 \text{ kg}$ pro pyrolýzu úplnou. [54]

Gazifikace:

$$Q_G = \sum_{i=1}^3 H'_i \cdot V_{Gi} \quad (5.10)$$

$$Q_G = 12,6 \cdot 7,561 + 10,8 \cdot 5,230 + 35,9 \cdot 0,089 = 154,93 \text{ MJ} \quad (5.11)$$

Částečná pyrolýza:

$$Q_{PP} = \sum_{i=1}^3 H'_i \cdot V_{PPi} + H_C \cdot m_{CPP} \quad (5.12)$$

$$Q_{PP} = 12,6 \cdot 7,899 + 10,8 \cdot 9,070 + 35,9 \cdot 0,159 + 32,8 \cdot 0,72 = 226,82 \text{ MJ} \quad (5.13)$$

Pyrolýza:

$$Q_P = \sum_{i=1}^3 H'_i \cdot V_{Pi} + H_C \cdot m_{CP} \quad (5.14)$$

$$Q_P = 12,6 \cdot 1,454 + 10,8 \cdot 2,682 + 35,9 \cdot 0,024 + 32,8 \cdot 0,23 = 55,70 \text{ MJ} \quad (5.15)$$

5.6.3 Účinnost energetické přeměny

Nyní můžeme uvážit faktor, který bychom pracovně mohli nazvat jako účinnost energetické přeměny (EP) zpracování materiálového vzorku. Ten bychom definovali poměrem získané akumulované energie výstupních produktů ku dodanému příkonu plazmového hořáku, tedy:

$$\eta_{EP} = \frac{E_Z}{E_D} \quad (5.16)$$

Kde E_Z [J] je získaná energie ve formě plynu a E_D [J] je dodaná elektrická energie.

Dosadíme-li jednotlivé vypočítané energie charakteristické pro dílčí probíhané reakce, dostaneme:

Gazifikace:

$$\eta_{EPG} = \frac{E_{ZG}}{E_{DG}} = \frac{Q_G}{\Delta E_G} = \frac{154,93 \cdot 10^6}{300,31 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 51,59 \% \quad (5.17)$$

Částečná pyrolýza:

$$\eta_{EPPP} = \frac{E_{ZPP}}{E_{DPP}} = \frac{Q_{PP}}{\Delta E_{PP}} = \frac{226,82 \cdot 10^6}{843,65 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 26,89 \% \quad (5.18)$$

Pyrolýza:

$$\eta_{EPP} = \frac{E_{ZP}}{E_{DP}} = \frac{Q_P}{\Delta E_P} = \frac{55,70 \cdot 10^6}{269,79 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 20,65 \% \quad (5.19)$$

K dodané energii E_D bychom správně měli přičíst i výhřevnost původní složky, kterou v tomto případě neznáme, proto jsme se omezili na zjednodušený výpočet, který neuvažuje energetickou hodnotu zpracovaného materiálu. Můžeme se však pokusit ji alespoň odhadnout.

Nejprve odhadneme průměrnou výhřevnost SNO pomocí znalosti poměrného zastoupení materiálů v připraveném vzorku shrnutého v tabulce 4.4:

$$H_{SNO} = H_B \cdot 0,629 + H_P \cdot 0,178 + H_T \cdot 0,119 + H_G \cdot 0,075 \quad (5.20)$$

kde H_B [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] je výhřevnost biomasy, H_P [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] je výhřevnost plastů, H_T [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] je výhřevnost textilu a H_G [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] je výhřevnost gumy.

Výhřevnost suché biomasy se pohybuje od 15 do 19 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (uvážíme střední hodnotu), u běžných plastů jako polypropylenů se jedná o necelých 33 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, námi použité injekční stříkačky jsou ale vyrobeny z neznámé kombinace polypropylenů a polyetylenů, který má výhřevnost kolem 43 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, pro zastoupený plast tedy uvážíme aritmetický průměr těchto hodnot, a sice 38 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Vhodné výhřevné vlastnosti vykazují následující materiály, neboť jsou přirovnatelné ke konvenčním palivům. Jmenovitě textil má údajnou výhřevnost jako hnědé uhlí a guma téměř jako černé uhlí. Jedná se sice o gumu technickou, ale vzhledem k minimálnímu zastoupení gumy ve vzorku se spokojíme s tímto údajem. Různé zdroje uvádí též odlišné hodnoty výhřevnosti textilu, konkrétně v intervalu od 8 do 25 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, hnědé uhlí má výhřevnost průměrně zhruba 13 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, černé potom průměrně 23 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, jinak se může pohybovat v intervalu 20 až 30 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Souhrn uvažovaných výhřevností materiálů je v tabulce 5.7. [55, 56, 57, 58, 59, 60, 61]

| Typ materiálu | Výhřevnost [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] |
|---------------|---|
| Biomasa | 17 |
| Plasty | 38 |
| Textil | 13 |
| Guma | 23 |

Tabulka 5.7: Uvažované výhřevnosti zastoupených materiálů v SNO

Nyní dosadíme hodnoty výhřevností z tabulky 5.7 do rovnice 5.20:

$$H_{SNO} = 17 \cdot 0,629 + 38 \cdot 0,178 + 13 \cdot 0,119 + 23 \cdot 0,075 = 20,73 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1} \quad (5.21)$$

Tímto jsme stanovili přibližnou výhřevnost připraveného vzorku SNO na zhruba 20,7 $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Hmotnost zpracovaného paliva SNO tvořila 11,37 kg (gazifikace – 3,77 kg; částečná pyrolýza – 6,04 kg; pyrolýza – 1,56 kg). Dle rovnice 5.22 lze dojít k přibližné energetické účinnosti procesu. [36]

$$\eta = \frac{E_Z}{E_D + E_{SNO}} \quad (5.22)$$

Nyní spočteme dílčí energetické účinnosti procesu vztažené k jednotlivým typům reakcí se započtením odhadnuté výhřevnosti původního vzorku.

Gazifikace:

$$\eta_G = \frac{E_{ZG}}{E_{DG} + E_{SNOG}} = \frac{Q_G}{\Delta E_G + E_{SNOG}} \quad (5.23)$$

$$\eta_G = \frac{154,93 \cdot 10^6}{300,31 \cdot 10^6 + 20,73 \cdot 3,77 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 40,94 \% \quad (5.24)$$

Částečná pyrolýza:

$$\eta_{PP} = \frac{E_{ZPP}}{E_{DPP} + E_{SNOPP}} = \frac{Q_{PP}}{\Delta E_{PP} + E_{SNOPP}} \quad (5.25)$$

$$\eta_{PP} = \frac{226,82 \cdot 10^6}{843,65 \cdot 10^6 + 20,73 \cdot 6,04 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 23,41 \% \quad (5.26)$$

Pyrolýza:

$$\eta_P = \frac{E_{ZP}}{E_{DP} + E_{SNOP}} = \frac{Q_P}{\Delta E_P + E_{SNOP}} \quad (5.27)$$

$$\eta_P = \frac{55,70 \cdot 10^6}{269,79 \cdot 10^6 + 20,73 \cdot 1,56 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 18,44 \% \quad (5.28)$$

5.7 Diskuze

5.7.1 Výsledky

Z těchto výsledků je možné usoudit, že energeticky nejziskovější je reakce plazmového zplyňování, která pro simulovaný nemocniční odpad dosahuje v rozmezí 41-52 %. Zřejmě je tento výsledek nejvíce ovlivněn množstvím podávaného paliva, které ani v jednom z případech nebylo optimální, to se navíc s postupem času při experimentu ještě zhoršovalo. Při gazifikaci se materiálu podávalo více, tudíž vzniklo více syntézního plynu a reakce vychází jako nejziskovější. Všeobecně ale nemůžeme říci, která z reakcí je nejúčinnější, protože rozdíly v efektivitě byly způsobené nastavením experimentu. Pro úplnost lze zmínit, že v menší míře mohla účinnost ovlivnit také teplota v reaktoru, protože se neustále měnila. Energii též ovlivňuje množství podávaného oxidu uhličitého, protože se spotřebovává na jeho rozklad, zejména pak při gazifikaci, proto je pyrolýza energeticky méně náročná. Tento faktor byl však zahrnut snižováním příkonu plazmatronu v průběhu experimentu. Co se týče oxidu uhličitého, ten mohl účinnost také ovlivnit tím, kolik ho zbylo na výstupu z reaktoru, protože se nestihl (především v počátečních fázích experimentu) rozložit.

Ohledně získaných výsledků nemusíme být pesimističtí mimo jiné proto, že jsme uvažovali suchý vzorek a jak je známo z [51], s rostoucí vlhkostí materiálu v nemocničním odpadu klesá jeho výhřevnost, jak také dokazujeme v tabulce 1.1 v kapitole *Nemocniční odpad*. Při plazmovém zplyňování či pyrolýze by se naopak výskyt vody či jiných tekutin mohl projevit vyšším objemem výtěžku syntézního plynu. Dalším faktorem, který způsobuje energetické ztráty, je chlazení. V případě, že bychom zahřátou chladicí vodu dokázali využít pro tepelné účely, znamenalo by to energetickou úsporu, tedy zvýšení účinnosti takového zařízení.

Jak bylo zmíněno v kapitole *Očekávaný průběh*, byl předpokládáný hmotnostní průtok SNO 8 kg za hodinu. Pro toto množství byly vyhodnoceny optimální podmínky a stechiometrické množství podávaného oxidu uhličitého bylo spočítáno na 164 slm ($\text{litr} \cdot \text{min}^{-1}$) pro případ gazifikace. Dalším způsobem, jak účinnost EP zvýšit, by tedy mohla být optimalizace podávacího systému a zajištění vyššího přísunu zpracovávaného materiálu do reaktoru po dobu experimentu. Jak jsme popsali v kapitole *Počáteční podmínky experimentu*, nízký

hmotnostní průtok materiálu byl v tomto případě zapříčiněn jeho strukturou a nízkou hmotností. To mělo vliv nejenom na nízký hmotnostní průtok, ale na temování vzorku v podávacím potrubí nad reaktorem, tedy na nerovnoměrnost styku SNO s plazmatem a přerušování kontinuity reakcí. Je též důležité zmínit, že není vhodné ani podávat do reaktoru více paliva, než je předem určeno. V takovém případě by se totiž nestíhal materiál spolehlivě rozložit, což je ještě více nežádoucí, než případ, který nastal při našem experimentu.

Podstatné je též připomenout, že hořák pracoval při různých časech s odlišnou účinností (jak je naznačeno v tabuce 4.6), takže skutečná energie, která měla za následek zplyňování a pyrolýzu, se v závislosti na čase lišila. Pro porovnání energetické bilance jednotlivých reakcí mezi sebou můžeme modifikovat námi výše používané vzorce a na místo dodané elektrické energie ve formě příkonu počítat s pouhou hodnotou výkonu, která je závislá na již zmíněné účinnosti. Průměrné hodnoty účinností hořáku po čas jednotlivých reakcí jsou uvedeny v tabulce 5.8, v rovnicích je označíme indexem PT⁴. Výslednou účinnost označíme malým s^5 .

| Typ reakce | Gazifikace | Částečná pyrolýza | Pyrolýza |
|--------------------------|------------|-------------------|----------|
| Průměrná účinnost PT [%] | 61,96 | 52,32 | 47,90 |

Tabulka 5.8: Průměrná účinnost plazmatronu při dílčích reakcích

Gazifikace:

$$\eta_{sG} = \frac{E_{ZG}}{E_{DG} \cdot \eta_{PTG} + E_{SNOG}} = \frac{Q_G}{\Delta E_G \cdot \eta_{PTG} + E_{SNOG}} \quad (5.29)$$

$$\eta_{sG} = \frac{154,93 \cdot 10^6}{300,31 \cdot 10^6 \cdot 0,6196 + 20,73 \cdot 3,77 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 58,65 \% \quad (5.30)$$

Částečná pyrolýza:

$$\eta_{sPP} = \frac{E_{ZPP}}{E_{DPP} \cdot \eta_{PTPP} + E_{SNOPP}} = \frac{Q_{PP}}{\Delta E_{PP} \cdot \eta_{PTPP} + E_{SNOPP}} \quad (5.31)$$

$$\eta_{sPP} = \frac{226,82 \cdot 10^6}{843,65 \cdot 10^6 \cdot 0,5232 + 20,73 \cdot 6,04 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 40,03 \% \quad (5.32)$$

Pyrolýza:

$$\eta_{sP} = \frac{E_{ZP}}{E_{DP} \cdot \eta_{PTP} + E_{SNOP}} = \frac{Q_P}{\Delta E_P \cdot \eta_{PTP} + E_{SNOP}} \quad (5.33)$$

$$\eta_{sP} = \frac{55,70 \cdot 10^6}{269,79 \cdot 10^6 \cdot 0,4790 + 20,73 \cdot 1,56 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 34,47 \% \quad (5.34)$$

Vidíme, že po tomto srovnání jsou si účinnosti jednotlivých přeměn (hlavně pyrolýzy a částečné pyrolýzy) poměrově o něco bližší. Tento výpočet provádíme spíše pro uvážení a případného odhadu horní hranice účinnosti energetické přeměny při bezztrátovém chodu plazmového hořáku.

⁴Plazmatron (*Plasma torch*)

⁵Srovnávací

Výše zmíněné informace dokládají, že v případě účelnějšího využívání tepelné energie uložené ve vodě putující z chlazení plazmatronu (a reaktoru) a při zefektivnění podávacího systému a plazmového hořáku, tedy zvýšení účinnosti plazmatronu při provozu, je možné dosáhnout i vyšší celkové účinnosti energetické přeměny, než předpokládáme naším výpočtem v kapitole *Účinnost energetické přeměny*. Výsledky některých informačních zdrojů dokládají, že při dobře zvládnutém a efektivním řešení zařízení pro plazmové zplyňování odpadu může účinnost gazifikace dosáhnout dokonce 69,1 %, konkrétně se však jednalo o zpracovávání TAP, nikoliv TKO, SNO nebo jiné druhy ON⁶. [47]

Chceme-li hovořit o bilanci vstupních a výstupních produktů, je vidět, že s ubývajícím dodávaným kyslíkem ve formě oxidu uhličitého se rapidně snižuje výtěžek syntézního plynu. Na druhou stranu se s úbytkem kyslíku zvyšuje zisk pevné výstupní složky čistého uhlíku. Výhodou tohoto uhlíku je, že dosahuje velmi vysoké čistoty a že při zkoumání vlivů p.p. na jeho mikroskopickou strukturu jej lze vyšlechtit pro budoucí aplikace dle konkrétních požadavků. Navíc některé experimenty ukazují, že tento uhlík může mít různou podobu, kupříkladu tzv. funkční saze nebo struktury nanočástic. Takový typ uhlíku může mít mnohonásobně vyšší hodnotu, než je hodnota daná jeho výhřevností. Výhodou produkce pevného uhlíku je také jednoduchý fakt, že při jeho produkci nevzniká oxid uhličitý (pokud jej místo spálení využijeme jinak). Tato skutečnost je zajímavá i z pohledu celosvětové snahy o snižování emisí oxidu uhličitého v ovzduší a atmosféře.

5.7.2 Experiment

Co se realizace experimentů týče, je velice zdoluhavá, náročná a složitá. Jedná se o velmi komplexní proces, který může trvat i několik měsíců (od návrhu experimentu až po jeho dokončení a vyhodnocení výsledků). Experiment se simulovaným nemocničním odpadem byl plánován již od roku 2019. K tomu však bylo především z mé strany z hlediska přípravy experimentu a vzorkového materiálu potřeba kontaktovat různé dodavatele zdravotnických pomůcek, objednat potřebné zboží, zařídit uskladnění, obstarat zařízení, které bude schopné materiály nejmenno zpracovat, směs poté co nejlépe homogenizovat a označit. Bylo též třeba precizně naměřit a zvážit vzorkový materiál, aby co nejvěrněji odpovídal požadovanému množství ve směsi vzorku. Před samotným experimentem došlo ke kontrole a hlídání laboratoře kvůli nočnímu vyhřívání reaktoru. Poté, co experiment úspěšně proběhl a nám se podařilo kvantifikovat výtěžek získaných látek, bylo nutné zpracovat velké množství naměřených a vypočítaných dat, z nichž ty nejdůležitější jsou součástí této práce.

Důvodem, proč jsou experimenty takto zdoluhavé a opakovaně odkládané, je komplikovanost zařízení, časté poruchy nebo problémy. Nemusí jít pouze o problémy týkající se plazmového hořáku či reaktoru. Nedávný problém byl, jak jsme již probírali, s mechanismem podávajícím materiál, neboť na tento druh odpadu nebyl podavač zvyklý, a tak se materiál nedařilo efektivně dopravit od násypky po vstup do reaktoru. V nejhorším případě materiál potrubí dokonce ucpal a bylo třeba demontovat vnitřní šroubovici, která slouží k dopravě materiálu vpřed směrem k reakční komoře. K tomuto došlo při testování dosud zdaleka nejhoršího typu vyzkoušeného odpadního vzorku, a sice TKO⁷. Technici a vědečtí pracovníci neustále bojují s podobnými problémy a snaží se přijít na způsoby, jak je co nejefektivněji řešit a zařízení renovovat, aby se těmito komplikacím předcházelo. Cesty v oblasti výzkumu jsou však nevyzpytatelné.

⁶Odpady nebezpečné

⁷Tuhý komunální odpad

5.7.3 Komplikace a nedostatky

Jak bylo zmíněno v kapitole *Zdroje termického plazmatu*, od typu použitého plazmového hořáku se odvíjí možné problémy nebo potíže, které mohou nastat. Z finančního pohledu jsou to náklady na DC plazmatron, zvýšené o fixní cenu potřebných výkonových měničů, drahé jsou též speciální komponenty nebo častá výměna opotřebovaných částí. Zařízení je citlivé, nerobustní a chod včetně usměrňování proudu je více ztrátový než u jiných elektrických zařízení. Technologie plazmových hořáků jsou komplikované a vyžadují odborné znalosti při provozu nebo případných poruchách. Energeticky se jedná o velice náročnou aparaturu, potřebný příkon plazmového hořáku je velký. Při delším provozu je třeba zajistit průběžný odběr pevných produktů reakce, jako je uhlík a zbytkový popel (resp. struska). Obtížné je i skladování syntézního plynu v tlakových lahvích, ty musejí být odolné a hermeticky utěsněné. Samotné plnění tlakových lahví kompresí plynu je vedle procesu generování termického plazmatu také energeticky velmi náročné. Obtíže se též mohou vyskytnout při návrhu podávajícího systému pro dávkování materiálu do reakční komory, ten by měl být schopen spolehlivě podávat materiál (např. TKO) a zároveň být kvalitně utěsněn, aby nedocházelo k úniku tepla mimo reaktor.

5.7.4 Porovnání s konvenčními prostředky nakládání s odpady

Vzhledem k doposud klasickému způsobu zpracování odpadů má plazmové zplyňování/pyrolýza velké výhody, avšak i velké nevýhody.

Největší počet výhod má vůči skládkování, neboť v porovnání s ním zbavujeme životní prostředí vyprodukovaného odpadu. Tento odpad je dokonce přeměněn na užitečné látky, využitelné ve všech možných odvětvích. Přestože se při skládkování odpad pokládá na nepropustnou vrstvu, aby nekontaminoval půdu a podzemní vody, je plazmové zpracování odpadu ekologičtější, neboť se při něm potenciálně nebezpečné látky neuvolňují ani do vzduchu a nehrozí, že se nepropustná vrstva poškodí nebo nezaručí garantovanou neprodyšnost.

Recyklovat lze zpravidla materiály k tomu určené, jako jsou kovy, papír, sklo, plasty aj. Hlavními požadavky na recyklační procesy jsou komerční dostupnost, výhodnost oproti jiným metodám nakládání s odpady a vysoká kvalita recyklátu v poměru s primární surovinou. Tímto se recyklace krajně podobá zplyňování a pyrolýze, ale postupy využívající plazmatu má smysl uvažovat zejména pro odstranění odpadů komunálních, nebezpečných, infekčních či radioaktivních. S ohledem na zpracovávané materiály se tedy tyto dva způsoby nedají moc srovnávat, protože postojem k omezení odpadů v oběhu si jsou podobné, ale materiály, které se pomocí těchto způsobů budou zpracovávat, budou pravděpodobně vždy jiné. [1]

Oproti spalování jakožto způsobu energetického využití odpadu je gazifikace a pyrolýza jednoduše řečeno jen další stupeň spalování. Při spalování odpadu musí být zplodiny však několikrát důkladně filtrovány a čištěny, neboť by se do ovzduší dostávaly nebezpečné látky jak pro živé organismy, tak pro atmosféru, ve které by mohlo docházet k poškozování jejích vrstev a vytváření ozonových děr. Tyto zplodiny však zanáší spalovací systém a mohou způsobit jeho poškození. U plazmového zplyňování a pyrolýzy toto nehrozí, protože výstupní produkty vykazují vysokou míru čistoty. Zároveň se můžeme rozhodnout, zda získaný syntézní plyn zpracujeme ihned, nebo jej uložíme v tlakových lahvích pro budoucí využití a energii tímto akumulujeme. U spalování toto uvážit nelze.

Nevýhodou technologie využívající plazmatu oproti všem těmto způsobům nakládání s odpady je vysoká energetická náročnost, neboť zařízení spotřebuje spoustu elektrické energie. Další problém pramení z náročnosti této technologie, neboť všechny ostatní způsoby jsou oproti tomu už v dnešní době tak říkajíc „zvládnuté“. Podstatnou slabinou plazmového hořáku je též poměrně nízká životnost jednotlivých komponent v porovnání s ostatními zařízeními, a tedy častá údržba nebo výměna opotřebovaných součástí. Přesto má gazifikace a pyrolýza pomocí plazmatronů a plazmových reaktorů velký potenciál, který nemůžeme přehlížet.

5.7.5 Potenciál plazmového zpracování odpadu

Všechny látky a materiály v sobě mají určitou energii. Z některých forem je ale tato energie lépe využitelná než z jiných. Proces zpracování a rozkladu plazmatem nám z těchto nevyužitelných látek nabízí látky perspektivní a užitečné. Můžeme dokonce najít aplikaci, ve které je vysoká energetická náročnost zařízení pro daný účel přínosná a efektivní. Jedná se o stabilizaci rozvodné sítě při potřebě záporné regulace formou podpůrných služeb a služeb výkonové rovnováhy, které regulují parametry přenosové či distribuční soustavy.

Veškerou vyrobenou energii je třeba rozvést, využít, upotřebit nebo akumulovat. Je-li energie v síti nedostatek, musí se buď dovést nebo zapnout záložní zdroje, je-li jí přebytek, je nutné ji odvést nebo nějak využít. Existuje více způsobů, jak přebytečnou energii uložit na později. Široce známé jsou PVE⁸, které za účelem akumulace přečerpávají vodu. Poměrně moderním způsobem akumulace je rozkládání vody elektrolýzou a získávání cenného vodíku, který je možné uložit ve formě zemního plynu a zpětně přeměnit na elektrickou energii nebo využít jako palivo. Tato technologie je též známa jako P2G⁹.

Z tohoto hlediska je plazmové zplyňování (a pyrolýza) velmi podobné technologii P2G, avšak s tím rozdílem, že má možnost lidstvo zbavovat odpadů, zejména těch nebezpečných, radioaktivních a infekčních.

Budeme-li pro následující úvahu předpokládat nulovou (nebo zápornou) hodnotu elektrické energie, kterou by bylo nutné zužít a odvést ze sítě pro účely regulace, podstatně se tím změní účinnost energetické přeměny, jak se můžeme přesvědčit výpočtem. Potenciální účinnost označíme indexem *reg*¹⁰. Výchozí upravená rovnice tedy přejde do tvaru:

$$\eta_{reg} = \frac{E_Z}{E_{SNO}} \quad (5.35)$$

Po dosazení odpovídajících energií uložených v palivu před a po dílčí reakci obdržíme:

Gazifikace:

$$\eta_{regG} = \frac{E_{ZG}}{E_{SNOG}} = \frac{Q_G}{E_{SNOG}} = \frac{154,93 \cdot 10^6}{20,73 \cdot 3,77 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 198,24 \% \quad (5.36)$$

Částečná pyrolýza:

$$\eta_{regPP} = \frac{E_{ZPP}}{E_{SNOPP}} = \frac{Q_{PP}}{E_{SNOPP}} = \frac{226,82 \cdot 10^6}{20,73 \cdot 6,04 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 181,15 \% \quad (5.37)$$

⁸Přečerpávací vodní elektrárny

⁹Power to gas

¹⁰Regulační

Pyrolýza:

$$\eta_{regP} = \frac{E_{ZP}}{E_{SNOP}} = \frac{Q_P}{E_{SNOP}} = \frac{55,70 \cdot 10^6}{20,73 \cdot 1,56 \cdot 10^6} \cdot 100 \% = 172,24 \% \quad (5.38)$$

Je tedy vidět, že podaří-li se navrhnout systém, který by byl schopen poskytovat zápornou regulační energii formou plazmového zplyňování (nebo pyrolýzy) odpadů, mohla by se energetická hodnota původních odpadních materiálů bezmála zdvojnásobit (a možná i více). Tento výsledek je při uvážení náležitých okolností (jako je simultánní likvidace odpadu při provozu, ochrana životního prostředí nebo vyšší výhřevnost a hodnota produktů na výstupu) velmi zajímavý, a to nejen pro samotnou oblast energetiky.

Závěr

Práce se věnovala problematice zpracování odpadů plazmovým zplyňováním a pyrolýzou. Teoreticky byla zaměřena na popis a stručnou statistiku odpadních látek, jejich členění a způsoby zpracování, využívané též v ČR. Definovali jsme pojem plazma a popsali jeho základní vlastnosti a chování v elektromagnetickém poli. Dále jsme se seznámili s potřebným laboratorním vybavením, především DC zdroji termického plazmatu a plazmovým reaktorem, ve kterém dochází k termochemickým reakcím popsáných v kapitolách *Gazifikace* a *Pyrolýza*.

Zdrojem termického plazmatu byl pro naše účely hybridní plazmový hořák, vyvinutý na Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. Ten má oproti plynem nebo vodou stabilizovaným hořákům, jak bylo popsáno v kapitole *Hybridní hořák*, značné výhody a umožňuje nám tak využít širšího spektra provozních podmínek. Tento hořák byl po čas experimentu zaveden do plazmového reaktoru, kam byl přiváděn zpracovávaný testovaný vzorek SNO a vstupní plyny. Díky energii generovaného plazmatu docházelo k extrémním termochemickým reakcím a materiál byl rozložen na jednotlivé atomy, které dále rekombinovaly na jednodušší sloučeniny v porovnání s původním materiálem. Výstupní složky disponují vysokou energetickou hodnotou nebo využitelností pro chemické účely.

Díky tomu, že experiment úspěšně proběhl, jsme získali spoustu dat vypovídajících o jeho vlastnostech. K těm patřily zejména časově závislé údaje veličin z průběhu experimentu, konkrétně vstupní a výstupní složky, teploty reaktoru, elektrický proud, napětí a příkon plazmového hořáku. Též jsme obdrželi detailní informace ohledně složení výstupních produktů jako jsou syntézní plyn a pevný uhlík. Jak se ukázalo, poměr mezi výstupní plynou a pevnou složkou závisí na charakteru probíhaných reakcí.

Naměřená data nám umožnila odhadnout přibližnou účinnost energetické přeměny jednotlivých typů reakcí, kterou jsme stanovili na cca 41-52 % pro gazifikaci, 23-27 % pro částečnou pyrolýzu a 18-21 % pro pyrolýzu, ta je však efektivnější při požadavku na vyšší podíl pevné složky a sice čistého široce využitelného a vysoce cenného uhlíku, který může vykazovat vlastnosti účelných nanostruktur.

Též jsme došli k závěru, že by zařízení (pro případné komerční nebo průmyslové účely) bylo mnohem hospodárnější, pokud by z dlouhodobého hlediska pracovalo pouze v jednom z popsáných režimů (např. gazifikaci) při jmenovitém výkonu hořáku. Jedním z důvodů, proč nám v porovnání s gazifikací vyšly účinnosti energetických přeměn ostatních reakcí tak nízké, je také průměrná elektrická účinnost samotného plazmatronu při provozu. Ta činila zhruba 62 % při gazifikaci a pouhých 48 % při pyrolýze. Další způsob zefektivnění využití dodané energie je chod s kogeneračními jednotkami, protože odvedená energie formou tepla přes chladící vodu plazmového hořáku a reaktoru je také jedním ze zásadních faktorů ovlivňujících účinnost zplyňovací reakce. V neposlední řadě má na energetickou přeměnu a její účinnost také vliv množství materiálu, který se podaří za jednotku času zpracovat, a to v důsledku vyšší hodnoty výstupní složky oproti vstupní.

Závěrem jsme nastínili pohled na možnou budoucnost plazmových technologií, především v sektoru odpadového hospodářství v kombinaci s elektroenergetikou a regulací přenosových či distribučních soustav. Došli jsme k úvaze, že zpracování odpadů plazmatem v komerčním měřítku je možné principem srovnat k technologii P2G, ovšem s tou výhodou, že disponuje možností společnost zbavovat nevyužitelných odpadních materiálů s nízkou hodnotou.

Existuje však široký prostor pro zlepšení a inovace, neboť přes svoje nezpochybnitelné výhody trpí zařízení pro plazmové zpracování odpadu některými zásadními nedostatky. Prvním problémem je omezená životnost plazmatronu, způsobená vysokým elektrickým a mechanickým namáháním, a to hlavně aktivních částí, jako jsou elektrody hořáku. Budeme-li chtít využívat DC plazmatrony, budou vyšší investiční náklady kvůli potřebě výkonových polovodičových měničů. Dalším problémem při ohledu na celý reaktor je nutnost průběžného odbavení pevných produktů reakce, jako je uhlík a zbytkový popel (či struska). Problematické je též uskladňování syntézního plynu, neboť se skládá především z vodíku a oxidu uhelnatého, takže je zapotřebí obstarat odolné a velmi těsné tlakové lahve, do kterých je potřeba plyn vtlačit. Tento proces je vedle plazmového zpracování odpadu také energeticky velmi náročný.

Nezbývá tedy než doufat, že společným spojením sil dokážeme čelit výzvě, kterou pro nás plazmové zpracování odpadu představuje. Podaří-li se nám vyvinout zařízení, které bude schopné se s dosavadními komplikacemi vypořádat, zajistí to pro naši budoucí společnost garantovaný a efektivní způsob, jak se definitivně vypořádat s odpady.

Reference

1. KURAŠ, Mečislav. *Odpady a jejich zpracování*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2014. ISBN 9788086832807. OCLC: 886603906.
2. *Efektivní zpracování odpadu pomocí plazmatu* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=99DbfhpMt1w>.
3. *Žhavé plazma by mohlo sloužit jako „uklízeč“ nebezpečného odpadu - Akademie věd České republiky* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/aplikovana-fyzika/Zhave-plazma-by-mohlo-slouzit-jako-uklizec-nebezpecneho-odpadu/>.
4. SANLISOY, A; CARPINLIOGLU, MO. A review on plasma gasification for solid waste disposal. *International journal of hydrogen energy*. 2017, roč. 42, č. 2, s. 1361–1365.
5. HŘEBÍČEK, Jiří; FRIEDMANN, Bedřich. *Integrovaný systém nakládání s odpady na regionální úrovni*. Brno: Littera, 2009. ISBN 9788085763546. OCLC: 551409441.
6. ČR, MŽP. *Odpady* [online]. 2008 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/odpady_podrubrika.
7. PICHTEL, John. *Waste management practices: municipal, hazardous, and industrial*. Second edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 9781466585188.
8. ČR, MŽP. *Nebezpečné odpady* [online]. 2008 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/nebezpecne_odpady.
9. *Odpad* [online]. 2021 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Odpad&oldid=19626682>. Page Version ID: 19626682.
10. INFO@AION.CZ, AION CS-. *541/2020 Sb. Zákon o odpadech* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541>.
11. ČR, MŽP. *Plán odpadového hospodářství ČR* [online]. 2008 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/plan_odpadoveho_hospodarstvi_cr.
12. *Oběhové hospodářství: definice, význam a přínos | Zpravodajství | Evropský parlament* [online]. 2018 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/economy/20151201ST005603/obehove-hospodarstvi-definice-vyznam-a-prinos>.
13. MOUSTAKAS, K; FATTA, Do; MALAMIS, S; HARALAMBOUS, K; LOIZIDOU, M. Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment. *Journal of hazardous Materials*. 2005, roč. 123, č. 1-3, s. 120–126.
14. HEBERLEIN, Joachim; MURPHY, Anthony B. Thermal plasma waste treatment. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008, roč. 41, č. 5, s. 053001.
15. HRABOVSKY, Milan; WALT, Izak Jacobus van der. Plasma Waste Destruction. In: *Handbook of Thermal Science and Engineering*. Ed. KULACKI, Francis A. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 1–57. ISBN 978-3-319-32003-8. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-319-32003-8_32-1.

16. ZHANG, Qinglin; DOR, Liran; FENIGSHTEIN, Dikla; YANG, Weihong; BLASIAK, Wlodzmerz. Gasification of municipal solid waste in the Plasma Gasification Melting process. *Applied Energy*. 2012, roč. 90, č. 1, s. 106–112.
17. ČR, MŽP. *Odpadová data 2019: Každý Čech vyprodukoval 551 kilogramů “komunálu”* [online]. 2020 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/news_20201124-odpadova-data-2019-Kazdy-Cech-vyprodukoval-551-tun-komunalu.
18. *Produkce odpadů v ČR roste, problémem je skládkování* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/produkce-odpadu-v-cr-roste-problemem-je-skladkovani>.
19. *Produkce, využití a odstranění odpadů - 2019* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2019>.
20. *Nebezpečný odpad* [online]. 2020 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Nebezpe%C4%8Dn%C3%BD_odpad&oldid=19259975. Page Version ID: 19259975.
21. *Charakteristika Moravskoslezského kraje | ČSÚ v Ostravě* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/xt/charakteristika_moravskoslezskeho_kraje.
22. FILIP, Jiří. *Odpadové hospodářství*. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2002. ISBN 9788071576082 9788071576822. OCLC: 51191912.
23. *Radioactive Waste Disposal* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.dmt-group.com/radioactive-waste-disposal.html>.
24. FILIP, Jiří; ORAL, Jaroslav; MENDELOVA ZEMĚDĚLSKÁ A LESNICKÁ UNIVERZITA. *Odpadové hospodářství. II II*. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2003. ISBN 9788071576822. OCLC: 320586153.
25. GOMEZ, E; RANI, D Amutha; CHEESEMAN, CR; DEEGAN, D; WISE, M; BOC-CACCINI, AR. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review. *Journal of hazardous materials*. 2009, roč. 161, č. 2-3, s. 614–626.
26. BITTENCOURT, José A. *Fundamentals of plasma physics*. Springer Science & Business Media, 2013.
27. NEHRA, Vijay; KUMAR, Ashok; DWIVEDI, HK. Atmospheric non-thermal plasma sources. *International Journal of Engineering*. 2008, roč. 2, č. 1, s. 53–68.
28. MISRA, NN; TIWARI, BK; RAGHAVARAO, KSMS; CULLEN, PJ. Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens. *Food Engineering Reviews*. 2011, roč. 3, č. 3-4, s. 159–170.
29. KIM, Hyun-Ha. Nonthermal plasma processing for air-pollution control: a historical review, current issues, and future prospects. *Plasma Processes and Polymers*. 2004, roč. 1, č. 2, s. 91–110.
30. KALGHATGI, Sameer; KELLY, Crystal M; CERCHAR, Ekaterina; TORABI, Behzad; ALEKSEEV, Oleg; FRIDMAN, Alexander; FRIEDMAN, Gary; AZIZKHAN-CLIFFORD, Jane. Effects of non-thermal plasma on mammalian cells. *PloS one*. 2011, roč. 6, č. 1, e16270.
31. KORTSHAGEN, Uwe. Nonthermal plasma synthesis of semiconductor nanocrystals. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009, roč. 42, č. 11, s. 113001.
32. *Non-Thermal Plasma Inactivation of Airborne Pathogens Relevant to Agriculture – Clack Lab* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://clacklab.engin.umich.edu/research/non-thermal-plasma-virus-inactivation/>.

33. JANAJREH, Isam; RAZA, Syed Shabbar; VALMUNDSSON, Arnar Snaer. Plasma gasification process: Modeling, simulation and comparison with conventional air gasification. *Energy conversion and management*. 2013, roč. 65, s. 801–809.
34. BOULOS, Maher I; FAUCHAIS, Pierre; PFENDER, Emil. *Thermal plasmas: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
35. *ProjectSoft* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.projectsoft.cz/plazma-system-nastriku.php>.
36. FABRY, Frédéric; REHMET, Christophe; ROHANI, Vandad; FULCHERI, Laurent. Waste gasification by thermal plasma: a review. *Waste and Biomass Valorization*. 2013, roč. 4, č. 3, s. 421–439.
37. MOUNTOURIS, Antonious; VOUSAS, Epaminondas; TASSIOS, D. Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization. *Energy conversion and management*. 2008, roč. 49, č. 8, s. 2264–2271.
38. *Ke stažení* [online]. [N.d.] [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://millenium-technologies.cz/ke-stazeni/>.
39. *VTP Dubá* [online]. [N.d.] [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://millenium-technologies.cz/vtp-duba/>.
40. CONRADS, H; SCHMIDT, M. Plasma generation and plasma sources. *Plasma Sources Science and Technology*. 2000, roč. 9, č. 4, s. 441.
41. *Plasma torch* [online]. 2021 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Plasma_torch&oldid=1000778417. Page Version ID: 1000778417.
42. *Water-Stabilized Plasma (WSP)* [online]. 2013 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://degradation2.wordpress.com/alternatives/direct-current-dc-plasma/water-stabilized-plasma-wsp/>.
43. *Wolframové elektrody pro TIG svařování*. [Online]. [N.d.] [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <http://svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006111201>.
44. *Facilities* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: http://www.ipp.cas.cz/vedecka_struktura_ufp/plazmochemicke_technologie/pristrojove_vybaveni/.
45. *Hybrid Plasma* [online]. 2013 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://degradation2.wordpress.com/alternatives/direct-current-dc-plasma/hybrid-plasma/>.
46. RUTBERG, Ph G; BRATSEV, AN; KUZNETSOV, VA; POPOV, VE; UFIMTSEV, AA et al. On efficiency of plasma gasification of wood residues. *Biomass and bioenergy*. 2011, roč. 35, č. 1, s. 495–504.
47. MINUTILLO, M; PERNA, A; DI BONA, D. Modelling and performance analysis of an integrated plasma gasification combined cycle (IPGCC) power plant. *Energy Conversion and Management*. 2009, roč. 50, č. 11, s. 2837–2842.
48. LASHKOV, VA; SATTAROVA, ZG; TAYMAROV, MA; GERASIMOV, MK; HALITOV, RA. Modeling of a reduction zone of the gasifier installation. In: *IOP conference series: materials science and engineering*. 2016, sv. 124, s. 012111. Č. 1.
49. JILKOVÁ, Lenka; CIAHOTN, Karel; ČERN, Radek. Technologie pro pyrolzu paliv a odpad. *Paliva*. 2012, roč. 4, č. 3, s. 74–80.
50. JUCHELKOVÁ, Dagmar; FIBINGER, Vratislav; MÍKA, Jiří. *Metody nakládání s odpady*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1996. ISBN 9788070783092. OCLC: 37251851.

51. ZHANG, Li; WU, Lihua; TIAN, Feng; WANG, Zheng. Retrospection-simulation-revision: approach to the analysis of the composition and characteristics of medical waste at a disaster relief site. *PLoS one*. 2016, roč. 11, č. 7, e0159261.
52. *Law Insider* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.lawinsider.com/dictionary/normal-cubic-meter>.
53. *Gross and Net Heat Values common Gases* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/gross-net-heating-values-d_420.html.
54. *Fuels - Higher and Lower Calorific Values* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html.
55. *Spalovny odpadu - odpad jako palivo* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/nakladani-s-odpady/11897-spalovny-odpadu-odpad-jako-palivo>.
56. *Výhřevnosti paliv* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>.
57. *ŘEŠENÍM JSOU MODERNÍ TECHNOLOGIE* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.odpady-online.cz/resenim-jsou-moderni-technologie/>.
58. *JAK SE RECYKLUJE TEXTIL | TRŽDĚNÍODPADU.CZ* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluje-textil>.
59. *JAK SE RECYKLUJÍ PNEUMATIKY | TRŽDĚNÍODPADU.CZ* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluji-pneumatiky>.
60. MURTINGER, Karel. Možnosti využití biomasy. *Biom.cz*. 2007, roč. 9, č. 5. ISSN 1801-2655. Dostupné také z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-vyuziti-biomasy>.
61. *Zpracování odpadů textilních materiálů* [online]. [N.d.] [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <http://odpadovy-hospodar.cz/komunalni-odpady/zpracovani-odpadu-textilnich-materialu>.

Přílohy

A Materiál pro SNO

Použitý materiál pro přípravu experimentu jsme objednávali od dodavatelů shrnutých v tabulce 9.

| Dodavatel | e-shop |
|---------------------------------|---|
| ANPRO s.r.o. | https://www.anpro.cz/ |
| GigaLékárna.cz | https://www.gigalekarna.cz/ |
| Lékárna U Zlatého Slunce | https://www.lekarnauslunce.cz/ |
| Medplus s.r.o. | https://www.medplus.cz/ |
| Medimas.cz | https://medimas.cz/ |
| Lékárna Bella.cz - RTRIO s.r.o. | https://www.lekarna-bella.cz/ |
| ZÁSOBOVÁNÍ KANCELÁŘÍ s.r.o. | https://eshop.prokancelar.cz/ |
| Technická guma s.r.o. | http://guma.cz/ |

Tabulka 9: Dodavatelé objednaného materiálu pro přípravu SNO