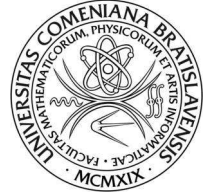




Univerzita Komenského v Bratislave  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky



**Veronika Dreninová**

**Autoreferát dizertačnej práce**

Environmetálny dom, viaczdrojový spôsob zabezpečenia energie, tepla a nakladanie s odpadmi pre stabilizáciu nárastu skleníkového efektu

**na získanie akademického titulu philosophiae doctor**

**v odbore doktorandského štúdia:**  
Meteorológia a klimatológia

**Miesto a dátum:**  
Bratislava, máj 2013

**Dizertačná práca bola vypracovaná**  
v dennej forme doktorandského

**na** oddelení fyziky životného prostredia

**Predkladateľ:** RNDr. Veronika Dreninová  
KAFZM FMFI UK  
Mlynská dolina  
842 48 Bratislava

**Školiteľ:** Doc. RNDr. Marcela Morvová PhD.

**Oponenti:** .....  
.....  
.....  
.....  
.....

(meno a priezvisko oponenta s uvedením jeho titulov a hodností  
a názov ustanovizne, s ktorou je oponent v pracovnom pomere)

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná ..... o ..... h**  
**pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou**  
**predsedom odborovej komisie .....**  
(uviest' dátum vymenovania)

#### **4.1.10 Meteorológia a klimatológia**

(študijný odbor) (názov študijného programu doktorandského štúdia)

**na** .....  
(presná adresa miesta konania obhajoby dizertačnej práce)

**Predseda odborovej komisie:**

.....  
(meno a priezvisko s uvedením titulov a hodností  
a presná adresa jeho zamestnávateľa)

## **ABSTRAKT**

V predloženej dizertačnej práci sú popísané metódy: produkcie tepla s využitím pyrolýzy biomasy a triedeného komunálneho odpadu, uskladňovania tepla využívajúc skupenské teplo topenia parafínu a citelné teplo, čistenia exhalátov z pyrolýzy, mitigácie CO<sub>2</sub> s cieľom znížiť vplyv skleníkovtvočných plynov na zhoršovanie globálneho otepľovania, nakladania s odpadmi a využitie konečného produktu v podobe uhlíkového zvyšku na zlepšenie vlastností pôdy. Súčasťou práce je prehľad súčasného stavu danej problematiky spojený s primeraným počtom referencií.

**Kľúčové slová:** alternatívny zdroj energie, pyrolýza, globálne otepľovanie, odpad, uskladnenie tepla

## **ABSTRACT**

In attached dissertation are described the following methods: heat production with usage of biomass pyrolysis and separated municipal solid waste, storage of heat energy using latent heat of melting paraffin wax and sensible heat, cleaning the emissions of pyrolysis, CO<sub>2</sub> mitigation in order to lower the impact of greenhouse gases on worsening of global warming, waste policy and usage of final product in the form of carbon residue for improvement of soil attributes. The part of this dissertation is also an overview of current status of these issues connected with adequate number of references.

**Keywords:** alternative energy source, pyrolysis, global warming, waste, heat storage

# Úvod

Vývoj architektúry a stavebníctva vo vyspelých štátoch EÚ smeruje k výstavbe energeticky plusových domov, t.j. k energeticky sebestačným budovám. Stavby, ktoré sa navrhujú na optimálne zachytenie a využívanie slnečnej energie, sú vo svete tak rozšírené, že sa podpísali pod vznik architektonického štýlu - slnečnej architektúry. Podľa direktív EÚ nasmerovaných na využívanie obnoviteľných zdrojov energie bude dnešný model výstavby do roku 2020 vo vyspelej Európe nahradený koncepciou, kde najnižšie bude postavený „štandardný dom“, ako ho poznáme dnes a štandardom budú pasívne domy. Tieto pasívne a energeticky nenáročné domy by mohli zmierniť zosilňujúci skleníkový efekt atmosféry, ktorý bude veľmi pravdepodobne viesť ku globálnemu otepleniu a k zmene ďalších charakteristík klímy na Zemi, teda k „zmene klímy“. Za najzávažnejší dôsledok tohto vývoja sa považuje zmena všeobecnej cirkulácie atmosféry a oceánov s posunom frontálnych zón a klimatických pásiem na jednej strane a veľká rýchlosť klimatickej zmeny prevyšujúca všetky doterajšie zmeny klímy najmenej 10-násobne na strane druhej. Keďže sú stále ešte závažné neistoty v uvedených zmenách, nie je možné pripraviť prognózu budúceho vývoja klímy ale iba viacmenej pravdepodobný vývoj v tvare alternatívnych scenárov. Alternatívne (krajné hodnoty najpravdepodobnejších prípadov) scenáre sa pripravujú aj preto, lebo nevieme s dostatočnou presnosťou predpovedať ani počet obyvateľov na Zemi a ani budúcu spotrebu fosílnych palív a emisiu skleníkových plynov do atmosféry. Konvenčne pripravované klimatické scenáre nepredpokladajú náhlu zmenu globálnej a ani regionálnej klímy na Zemi do roku 2100. Medzi obnoviteľné zdroje energie patrí slnečná energia, veterná, geotermálna, tepelné čerpadlo, biomasa. Biomasa je súhrn látok tvoriacich telá živých organizmov a to ako rastlín tak aj živočíchov. Energia obsiahnutá v biomase má svoj pôvod v energii slnečného žiarenia, ktorá sa procesom fotosyntézy zmenila na súčasť rastlín a po ich konzumácii živočíchmi súčasťou tiel živočíchov. Z tohto dôvodu chápeme biomasu ako obnoviteľný zdroj energie a keďže v procese fotosyntézy dochádza k spotrebovaniu CO<sub>2</sub> aj za CO<sub>2</sub> neutrálnu v prípade, že ju použijeme na energetické účely. Na rozdiel od dreva, ktoré sa od nepamäti využíva na varenie i kúrenie, v posledných niekoľkých storočiach ľudstvo využíva hlavne fosílnu formu biomasy - uhlie. Toto palivo vzniklo ako výsledok veľmi pomalých chemických procesov, ktoré menili polyméry cukrov na chemickú zložku, ktorá nahradila lignín. Tým sa dodatočné chemické väzby v uhlí stali koncentrovaným zdrojom energie. Všetky fosílna palivá, ktoré dnes spotrebovávame (uhlie, ropa, zemný plyn) sú v podstate pradávnu biomasou.

Najrozšírenejším palivom z kategórie biomasy je drevo. Drevo ako palivo môže mať rôznu podobu - môže byť využívané ako kusové, ako drevný odpad (napr. vo forme štiepok, brikiet alebo peliet), alebo môže byť špeciálne pestované ako energetická rastlina napr. vŕba, topoľ, Paulownia, Miscanthus, bambus a pod. Existujú však aj iné zdroje, ktoré hrajú významnú úlohu v energetickej bilancii mnohých krajín. Sem patria napr. organické zvyšky z poľnohospodárskej výroby ako je napr. slama. Biomasou je aj bioplyn získavaný zo skládok komunálneho odpadu, čističiek odpadových vôd alebo hnojovice zo živočíšnej výroby.

Z hľadiska svojej perspektívy je biomasa považovaná za kľúčový obnoviteľný zdroj energie a to tak na úrovni malých ako i veľkých technologických celkov. Už dnes sa podieľa asi 14% na celosvetovej spotrebe primárnych energetických zdrojov. Avšak pre tri štvrtiny obyvateľstva Zeme, žijúcich prevažne v rozvojových krajinách, je najdôležitejším palivovým zdrojom. V priemere jej podiel na spotrebe energie v týchto krajinách predstavuje asi 38% (v niektorých krajinách až 90%). Je možné predpokladať, že pri raste populácie a znižovaní rezerv fosílnych palív bude jej význam vo svete ďalej narastať.

## Ciele práce

1. Posúdiť možnosť využitia fotovoltaických slnečných kolektorov zohľadnením ich energetického efektu v rámci zimného polroku.
2. Štúdium pyrolýzy biomasy a triedeného komunálneho odpadu z pohľadu produkcie tepelnej energie pre rôzne typy vstupných materiálov, určiť získané množstvo tepla pre rôzne materiály.
3. Špecifikovať variantné typy produktov pyrolýzy okrem tepla.
4. Štúdium procesu uskladňovania tepla v uskladňovači, ktorý využíva skupenské a citeľné teplo, určiť parametre nabíjania.
5. Optimalizovať procesy analýzy on-line i ex-post so zberom dát a ich následným vyhodnotením.
6. Štúdium procesov čistenia exhalátov pomocou elektrického výboja a vláknových filtrov.
7. Špecifikovať možnosti mitigácie CO<sub>2</sub> s využitím skúmaných procesov.
8. Pri výbere materiálu pre pyrolýzu zohľadniť požiadavky odpadového hospodárstva.
9. Posúdiť možnosti využitia uhlíka na zlepšenie reologických vlastností pôdy.

## Popis aparátúry

Komplexný ekologicko-energetický systém pozostáva z:

- pyrolýzny kotol,
- vzduchotechnický systém s on-line analýzou vzduchotechnických parametrov systému,
- výbojové zariadenie na čistenie exhalátov.

Systém prešiel postupnými vývojovými zmenami a dodnes k nemu pribudli ešte:

- systém na izokinetický odber plynných vzoriek umožňujúci ex-post analýzu,
- 4-okruhový rekuperátor tepla spojený s destilačným systémom na kondenzáciu a separáciu dechtov spojený s odberom kvapalných vzoriek, ktorý spôsobí pokles teplôt zo 600°C na 110°C s následnou akumuláciou tepla do skupenského tepla topenia parafínu (objem pripojeného akumulátora 1,6 m<sup>3</sup>)
- rekuperačný systém na destiláciu parafínov a voskov spojený s odberom kvapalných zložiek, ktorý spôsobí pokles teplôt zo 90°C na 45°C s akumuláciou tepla do skupenského tepla topenia parafínu (objem pripojeného akumulátora 670 dm<sup>3</sup>)
- systém na zachytávanie polietavého uhlíka a polietavých produktov z výboja (vláknové filtre),
- on-line absorbér vodíka,
- biochemická čistička obsahujúca aj skrúbrový systém na dočisťovanie odoru,
- on-line analýza chemického zloženia (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) absolútnymi meraniami (vodík tepelná vodivosť, kyslík paramagnetická rezonancia, ostatné IČ absorpčná spektrometria NDIR) na 9 miestach aparátúry analytickým systémom Maihak S715 so zberom dát do počítača cez Hyperterminal
- rozšírená on-line analýza tepelných a vzduchotechnických dát systémom Testo so vzorkovaním 1 sekunda (termočlánky, združené NTC senzory na teplotu, lineárnu prietočnú rýchlosť a jej profily a objemový prietok, snímače statického a dynamického tlaku, snímače vlhkosti), všetky snímače sú umiestnené spolu na 10 miestach aparátúry a zberom dát do počítača cez datalogger TESTO 454.

Súčasný technický stav zariadenia je možné rozdeliť do blokov podľa tématického zamerania štúdia nasledovne:

- pyrolýza rôznych zložiek biomasy a triedeného komunálneho odpadu,
- čistenie exhalátov s využitím elektrického výbojového zariadenia,
- separácia a analýza produktov vo všetkých troch skupenstvách a to ako on-line tak aj ex-post,
- analýza časového a termodynamického priebehu pyrolýzy pomocou on-line meraní,
- analýza a štúdium možnosti využitia produktov.

Pyrolýzny kotol plní nasledujúce úlohy:

- umožní naštartovať pyrolýzny proces
- stabilizuje pyrolýzny proces počas jeho chodu
- zabezpečuje bezkyslíkaté prostredie v oblasti pyrolýzneho lôžka
- je zdrojom exhalátov na štúdium vlastností výbojového zariadenia

Pyrolýzny kotol je upravený komerčne vyrábaný krb zo šedej liatiny. Krbová vložka má dvierka zo špeciálneho vysokoteplotného skla, ktoré odoláva teplotám do 3100°C a do teploty 1900°C je spektroskopicky priehľadné. Krbová vložka je z liatiny a vnútro obsahuje šamot na báze oxidu horečnatého s rekryštalizačnou teplotou 650°C (skupenský prechod rekryštalizácie) a tepelnou odolnosťou nad 3000°C. Samotný proces pyrolýzy pozostáva z opakujúcich sa cyklov v pravidelných intervaloch. Dĺžka jedného pyrolýzneho cyklu závisí od pyrolýzovaného materiálu, ale v priemere trvá asi 30 minút (20 - 45 minút). V rámci jedného cyklu je možné spracovať od 0,5 do 2 kg podľa typu materiálu. Pyrolýzny proces má dynamický charakter, t.j. uvoľňovanie tepla a tvorba všetkých produktov je nespojitá. Preto na dosiahnutie primeraného obrazu o procese a na získanie dostatočného množstva dát a vzoriek je potrebné jednotlivé cykly opakovať dostatočne dlho. Experimenty ukazujú, že celková doba pyrolýzy asi 10 hodín (20 pyrolýznych cyklov) spĺňa túto požiadavku. Presný okamih nakladania suroviny určujeme pomocou on-line dát o priebehu teploty merané pomocou Testo systému a zbierané do počítača. Doba samotného procesu nakladania je kratšia ako 15 sekúnd a na priebehoch sledovaných parametrov sa neprajaví.

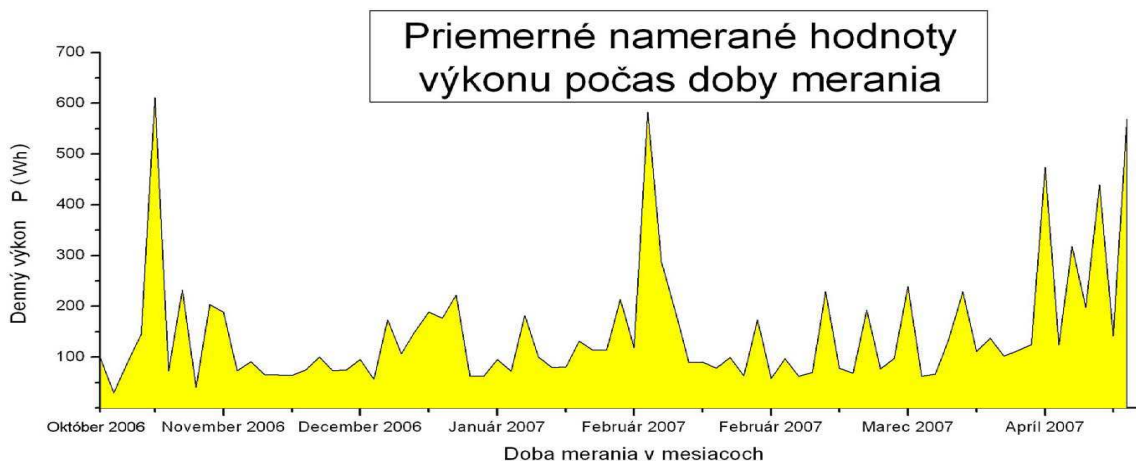
Pri zvažovaní využitia rôznych technických systémov v environmentálnom dome s viacdrojovým systémom získavania energie takmer vždy uvažujeme s využitím slnečnej energie na báze fotovoltaiických slnečných kolektorov.

Preto na tomto mieste uvádzam časť výsledkov, ktoré som získala v rámci mojej diplomovej práce<sup>1</sup>.

Obr. 1 predstavuje potenciálny zisk zo slnečného kolektora v zimných mesiacoch. Zvyčajne sa zimné mesiace nespracovávajú a považujú sa pre slnečné kolektory za hluché obdobie. To bol hlavný dôvod, prečo sme realizovali aj zimné obdobie.

---

<sup>1</sup> DRENINOVÁ V., Využitie alternatívnych zdrojov energie pre vybudovanie tzv. ekologického domu. [Diplomová práca] - Univerzita Komenského v Bratislave. Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, Bratislava, 2007, 88p.



Obr. 1 Potenciálny zisk slnečného kolektora v priebehu zimných mesiacov

Z nameraných veličín možno vidieť priebeh celého skúmaného obdobia. Zo záznamu za celé zimné obdobie vidíme len pár dní, kedy slnečný svit bol dostatočne vysoký, teda dosahoval 600 Wh, v priemerných dňoch boli získané výkony medzi 100-200 Wh, letné mesiace sa pohybovali na úrovni 800-1000 Wh.

## Pyrolýza biomasy

Pyrolýza spočíva v zohrievaní biomasy (ktorá je často rozdrvená a dodávaná do reaktora) v neprítomnosti vzduchu na teplotu 300 – 850°C, až do doby pokiaľ najskôr voda a následne všetky prchavé látky z nej neuniknú, čo trvá pomerne dlho. Dominantná časť týchto procesov je endotermická a je ukončená pri teplote asi 180°C. Ďalším krokom je krakovanie, ktoré spôsobí, že reťazce celulózy a ďalšie vysokomolekulárne látky sa trhajú na kratšie reťazce obsahujúce

- C 1-5, teda plynné látky
- C 6-35, teda kvapalný decht
- konečný uhlíkový zvyšok
- polietavý uhlík, ktorý je sekundárnym produktom a vzniká kumuláciou radikálov

Proces krakovania je silne endotermický, ale energia ktorá vysoko prevyšuje súčet energie potrebnej na krakovanie, uvoľňovanie vody a prchavej horľaviny pochádza z procesu autooxidácie biomasy. Biomasa totiž obsahuje až 18,5% vnútorne viazaného kyslíka (jej základnou stavebnou jednotkou sú monosacharidy so sumárnym vzorcom  $C_6H_{12}O_6$ ). Tento kyslík je už v singletnom stave a nachádza sa vo vzdialenosti chemickej väzby od svojich oxidačných targetov uhlíka a vodíka. Preto reakcia autooxidácie prebieha takmer okamžite



najmä v porovnaní so spaľovaním riadeným difúziou. K autooxidácii spravidla dochádza v miestach kde sa krakovaním roztrhne reťazec biomasy. Pritom sa autooxiduje väčší počet atómov uhlíka. Aby sme nemali celkový proces pyrolýzy zaťažený vibráciami plynu spojenými s uvoľňovaním energie (autooxidácia) a spotrebovaním energie (všetky endotermické procesy) použili sme pyrolýzne lôžko vyplnené na hrúbku asi 3 cm kremičitým pieskom. Kremičitý piesok je výborným absorbentom tepelnej energie pochádzajúcej z autooxidácie, pričom získanú energiu poskytuje na sušenie novonaloženej biomasy a na uvoľňovanie prchavých horľavých plynov. Naštartovanie procesu a tepelnú stabilizáciu sme realizovali pomocou horákov s využitím zemného plynu. Spotreba tepla zo zemného plynu predstavovala počas štartovania procesu asi 20% výslednej energie a počas stabilizácie 3-5% energie. Tieto hodnoty je možné zistiť analýzou pyrolýznych kriviek teploty v procese štartu a tepelnej stabilizácie a z pozadia kriviek v priebehu pyrolýzy.

Z analýzy celkového naloženého množstva suroviny na vstupe vážením a celkového množstva pyrolýzneho zvyšku na konci procesu tiež vážením sme zistili, že v priemere 30% naloženej suroviny ostáva v podobe pyrolýzneho uhlíkového zvyšku. Inak povedané minimálne (ak neberieme do úvahy ostatné vytvorené produkty ku ktorým sa vyjadrim neskôr) 30% viazaného chemicky viazaného uhlíka v biomase neodchádza do ovzdušia v podobe CO<sub>2</sub> za predpokladu, že sa podarí ukázať, že proces pyrolýzy poskytuje rovnaké množstvo tepla ako proces spaľovania rovnakého množstva biomasy. Z tejto úvahy vyplýva, že proces pyrolýzy je nielen CO<sub>2</sub> inertný, ale dokonca CO<sub>2</sub> negatívny a to minimálne mínus 30%.

Štandardný neriadený proces pyrolýzy vytvára produkty vo všetkých troch skupenstvách. Občania, ktorí chcú využívať proces pyrolýzy ako zdroj tepla nemajú na rozdiel od chemického priemyslu záujem vytvárať a následne oddeľovať decht kondenzáciou. Koniec koncov vznikol by im zbytočný problém. Túto dilemu riešia výrobcovia koltov v dvoch krokoch. Tzv. pyrolýzne kotle Najskôr produkujú zmes pyrolýzneho plynu a pyrolýznej pary. Tuto zmes následne ako energoplyn spaľujú. Takého kotle sú potom dvojstupňové a už dnes je ich na trhu viacero. Alternatívou je pyrolýza, kde priamo do pyrolýznej komory sa zavádza malé množstvo vzduchu (splyňovanie), vody (parné splyňovanie) alebo vodík a (hydrogenácia). Keďže druhý stupeň tohto procesu teda spaľovanie je spojený s prívodom vzduchu je zaťažený problémom difúzie kyslíka a zmeny stavu kyslíka z tripelného na singletný čo môžeme zjednodušene nazvať stratami energie.

Preto sme hľadali spôsob ako bez umelého prívodu kyslíka zo vzduchu dosiahnuť stav kedy nebudú vznikať kvapalné produkty, alebo ich množstvo bude minimálne a hlavnými

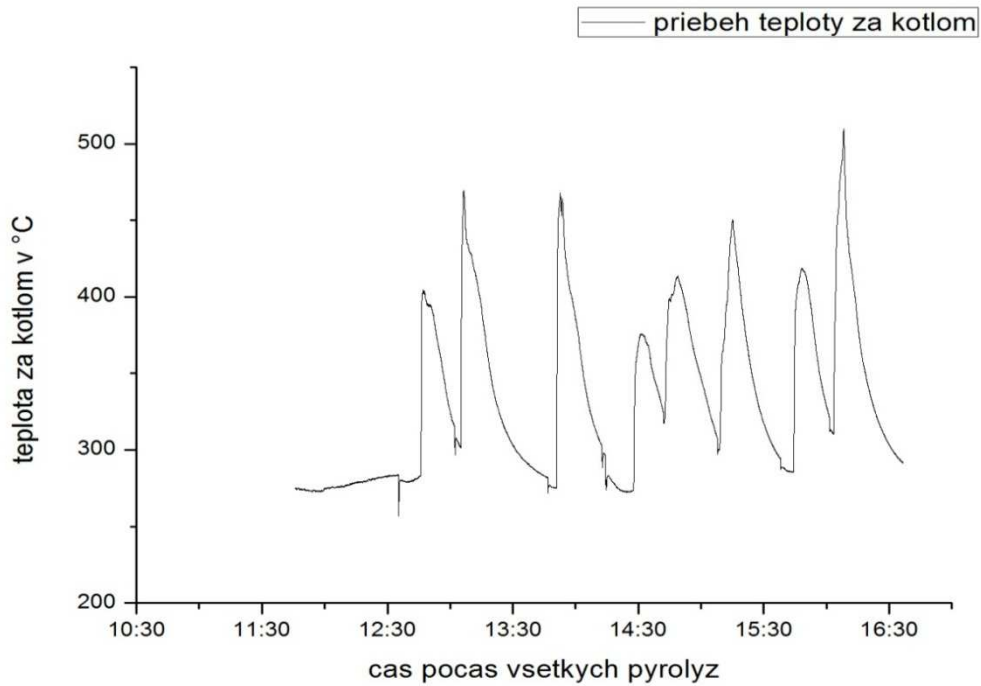
rodkami bude pyrolýzny zvyšok a energoplyn. V budúcnosti pri zodpovedajúcom financovaní bude možné energoplyn využiť v mikroturbíne Capstone C30 na výrobu elektrickej energie. Je výhodné energoplyn očistiť od nežiadúcich zložiek ako sú oxidy dusíka a CO<sub>2</sub>, prípadne ďalšie zložky (okrem iného z dôvodu, že v súčasnosti tento energoplyn odchádza do ovzdušia) s využitím výbojového zariadenia a ďalších zaradených systémov na čistenie exhalátov.

Predložená práca chce prispieť k riešeniu problému získať bez dodatočného prívodu kyslíka zmes energoplynu a uhlíka. Ukazuje sa, že tento problém je možné vyriešiť pomocou katalytického vplyvu pyrolýzneho lôžka. Moja školiteľka už dlhšiu dobu vytvára zmesi kremičitého piesku s prímiesami na báze suboxidu medi a horčíka, ktoré sú schopné tento efekt dosiahnuť. Uvedené zmesi však nie sú predmetom mojej práce.

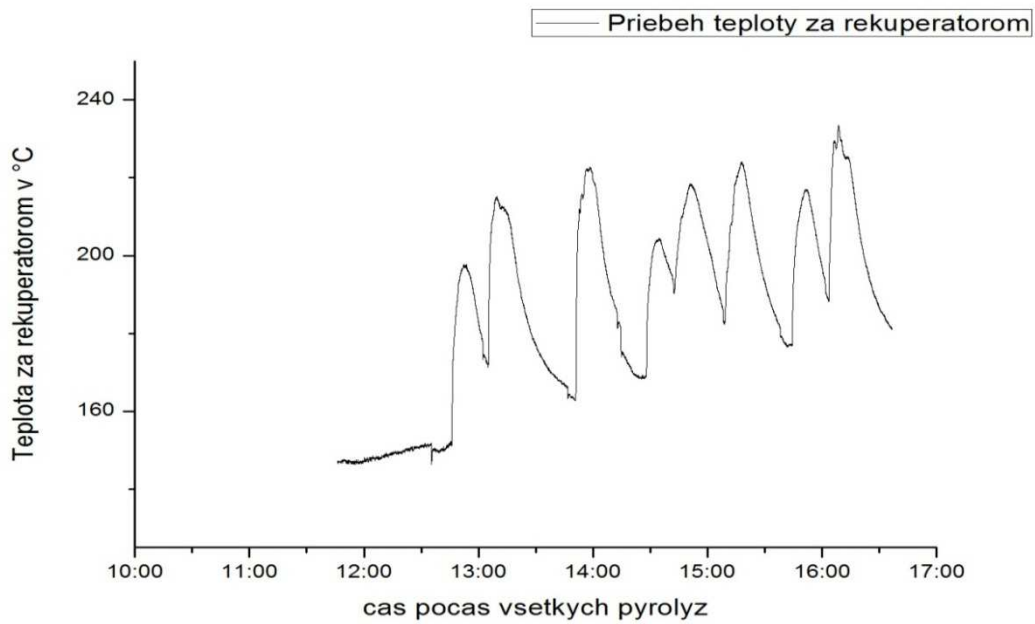
Vzhľadom na to, že každá biomasa si zachováva svoj unikátny charakter v podobe špecifik v procese pyrolýzy i v tvorbe produktov je potrebné proces pyrolýzy sledovať pre každý materiál samostatne. Skúmanie tohto procesu prostredníctvom diagnostiky, ktorú máme k dispozícii je proces spojený so zberom veľkého množstva dát, je to časovo náročné na samotné meranie a aj na spracovanie dát do grafickej podoby. V nasledujúcej časti uvedením takto získané výsledky pre viacero skúmaných zdrojových surovín.

Prvou skupinou materiálov, ktorou sme sa zaoberali bol odpad z lisovania olivového oleja. Tento odpad nie je možné skládkovať, pretože je mastný, zabíja pôdne baktérie a ak sa dostane do povrchových vôd dostáva sa na žiabre rýb, ktoré sa zadusia. Preto sa na jeho dočasné uskladnenie používajú lagúny s geotextíliou. Odpad dala priviezť moja školiteľka z Portugalska pre účely diplomanta z rovnakej krajiny. Išlo o pomerne veľké množstvo (asi 500 kg), tážže je ho možné stále použiť. Riešenie tohto problému je environmentálne významné. Na tomto mieste si treba uvedomiť, že rovnaké vlastnosti majú aj odpady z lisovania všetkých typov olejov. Oleje sú triglyceridy vyšších mastných kyselín a ich odpad má pH v intervale 3,5-5,9.

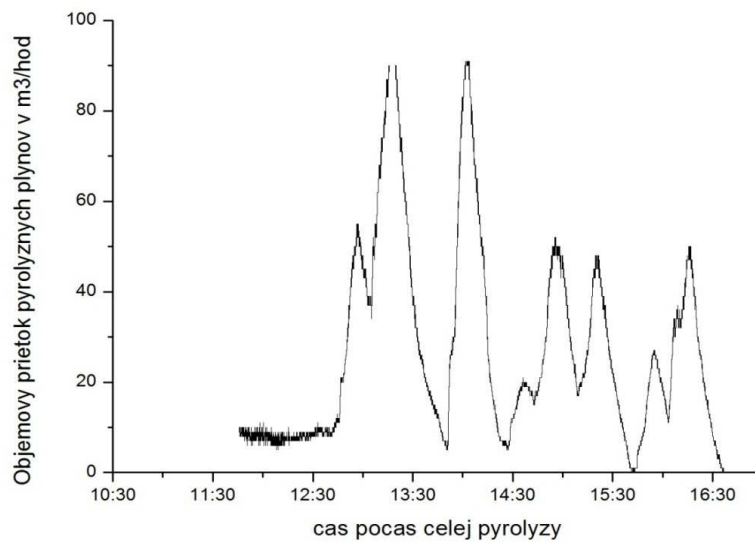
Uvedený odpad sme pyrolyzovali tak, že jedno naloženie malo približnú hmotnosť 500 gramov a doba pyrolýzy bola 30 minút. Denný pyrolýzny cyklus predstavoval spravidla 20 naložení. Na rozdiel od iných neskôr uvedených materiálov sme mali k dispozícii veľké množstvo materiálu a tak aj získané dáta sú rozsiahlejšie ako u iných surovín.



Obr. III-3-15: Priebch teplotných cyklov v nadväznosti na nakladanie suroviny meraný termočlánkom umiestneným v prúde exhalátov za pyrolyznym kotlom, vzorkovanie 1 sekunda.

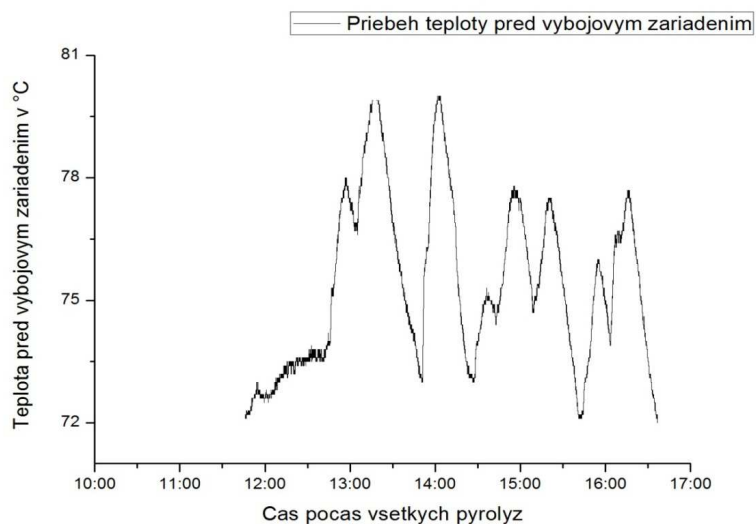


Obr. III-3-16: Priebch teplotných cyklov v nadväznosti na nakladanie suroviny meraný termočlánkom umiestneným v prúde exhalátov za rekuperátorom tepla, vzorkovanie 1 sekunda.



Obr. III-3-17: Čistý objemový prietok pyrolýznych plynov v nadväznosti na nakladanie suroviny merané NTC senzorom za rekuperátorom tepla, vzorkovanie 1 sekunda.

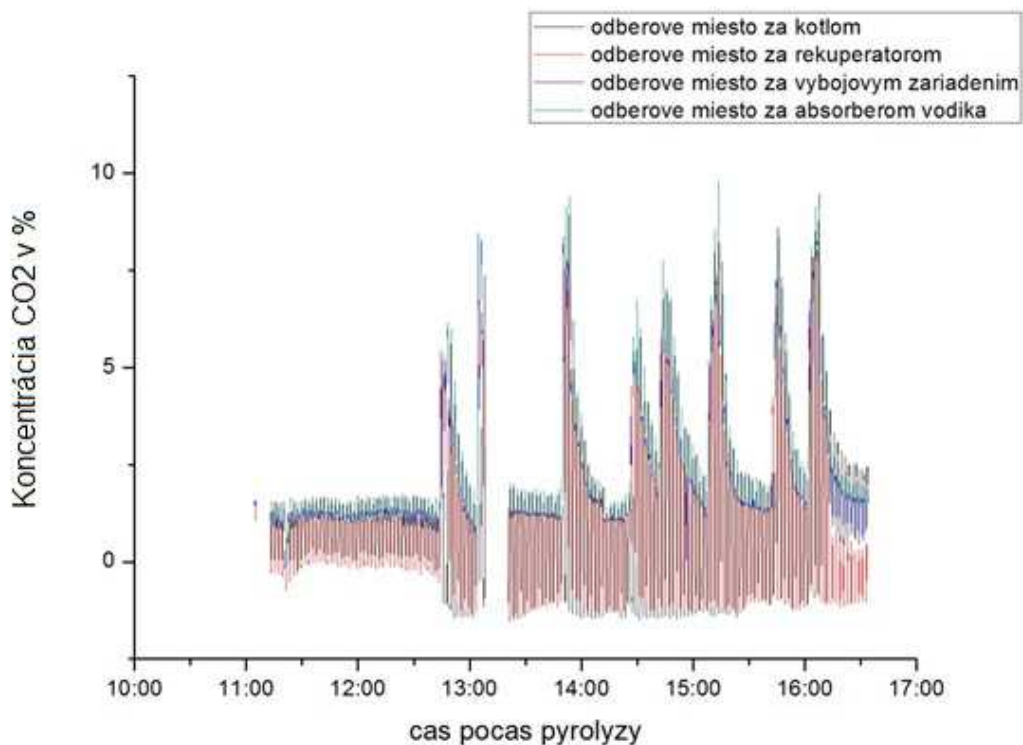
Z grafov na vyššie uvedených obrázkoch III-3-15, III-3-16 je vidieť že teplota exhalátov klesla prechodom cez 1. rekuperátor v priemere o asi 250°C z hodnoty 500 na asi 250°C. Pritom sa menil čistý prietok plynu, ale priemerný prietok pyrolýznych plynov presahoval 60m<sup>3</sup>/hodinu, obrázok III-3-17.



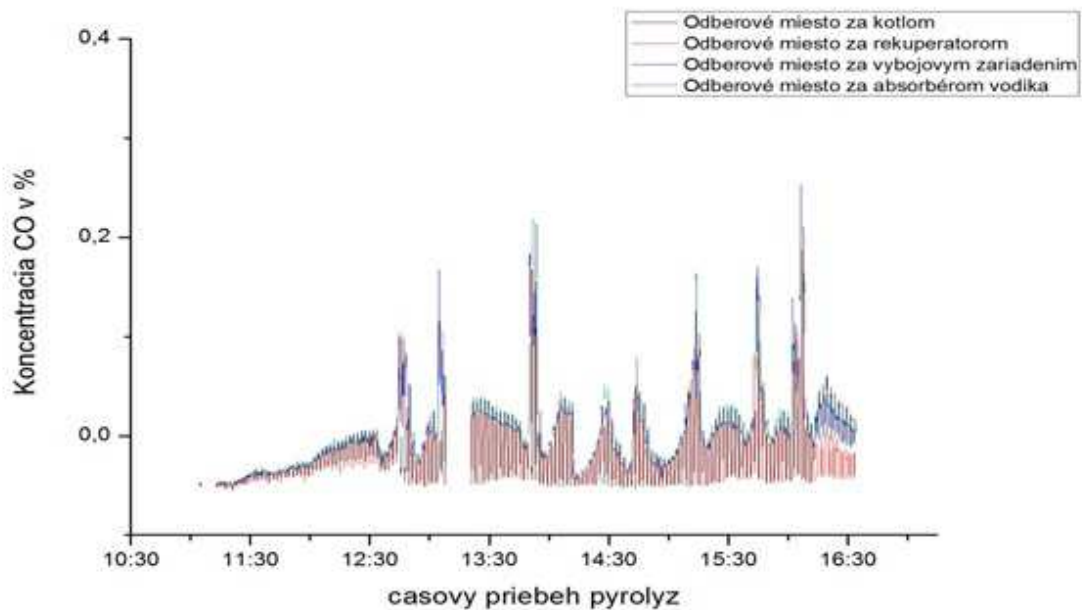
Obr. III-3-18: Priebek teplotných cyklov v nadväznosti na nakladanie suroviny meraný NTC senzorom umiestneným v prúde exhalátov za 2. rekuperátorom tepla resp. pred výbojovým zariadením, vzorkovanie 1 sekunda.

Porovnaním grafov na obrázkoch III-3-16 a III-3-18 vidíme, že v 2. rekuperátore klesla teplota pyrolýznych plynov z priemernej hodnoty 250°C na priemernú hodnotu 76°C.

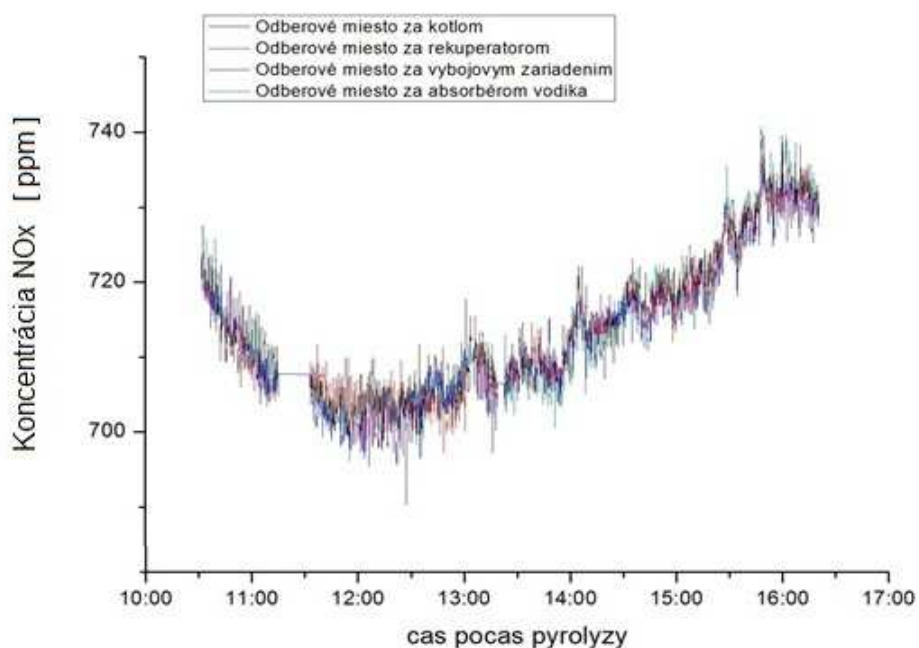
Zdanlivo sa zdá, že z týchto hodnôt vieme jednoducho určiť odovzdané teplo. Treba si ale uvedomiť (bližšie objasnenie tohto faktu uvediem na nasledujúcich obrázkoch), že pyrolýzne plyny sú veľmi dynamicky sa meniaci zmesi plynov. Každá zložka tejto zmesi teda plyn má inú tepelnú vodivosť a teda aj inú konštantu vo vzťahu na výpočet odovzdaného tepla. Priebehy koncentrácií 5 plynov ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ), ktoré sme mali možnosť merať systémom Maihak so vzorkovaním 6 sekúnd sú na nasledujúcich obrázkoch.



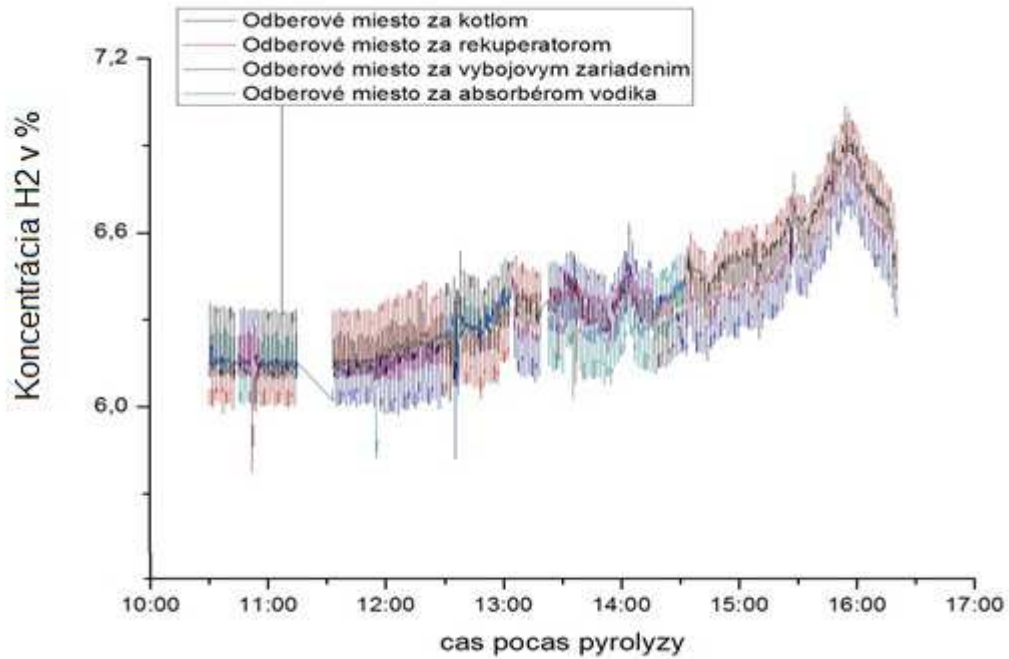
Obr. III-3-19 Priebeh koncentrácie  $\text{CO}_2$  v nadväznosti na jednotlivé pyrolýzne cykly na 4 odberových miestach, ale bez použitia výboja (z dôvodu overenia, že nedochádza v systéme k úniku plynov).



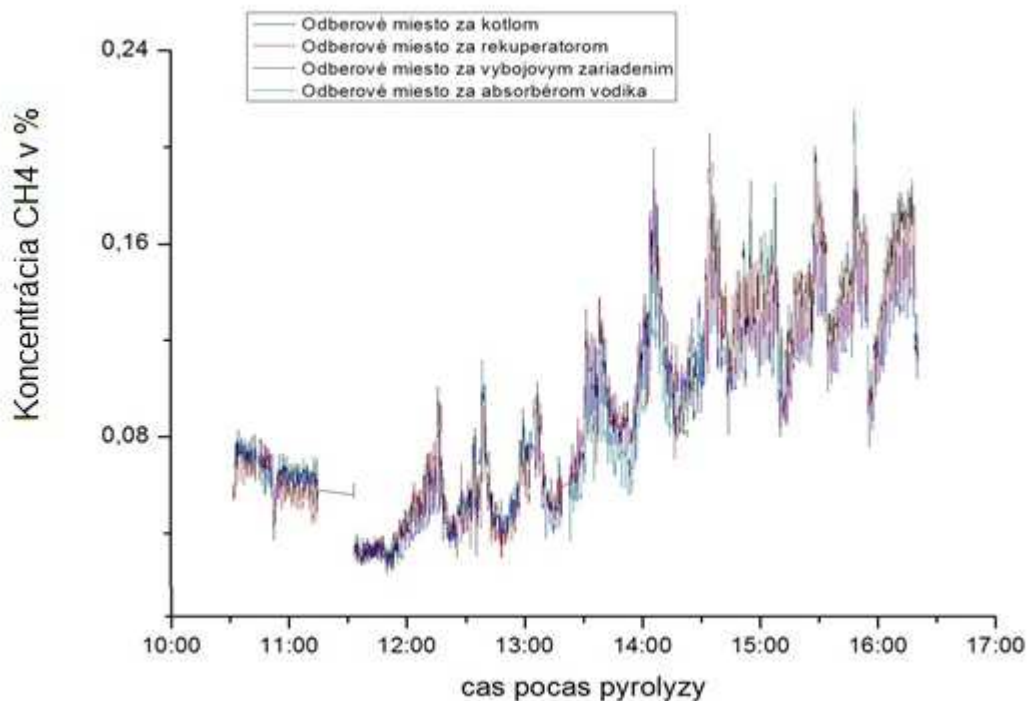
Obr. III-3-20 Priebek koncentrácie CO v nadväznosti na jednotlivé pyrolýzne cykly na 4 odberových miestach, ale bez použitia výboja (z dôvodu overenia, že nedochádza v systéme k úniku plynov).



Obr. III-3-21 Priebek koncentrácie NO<sub>x</sub> v nadväznosti na jednotlivé pyrolýzne cykly na 4 odberových miestach, ale bez použitia výboja (z dôvodu overenia, že nedochádza v systéme k úniku plynov).

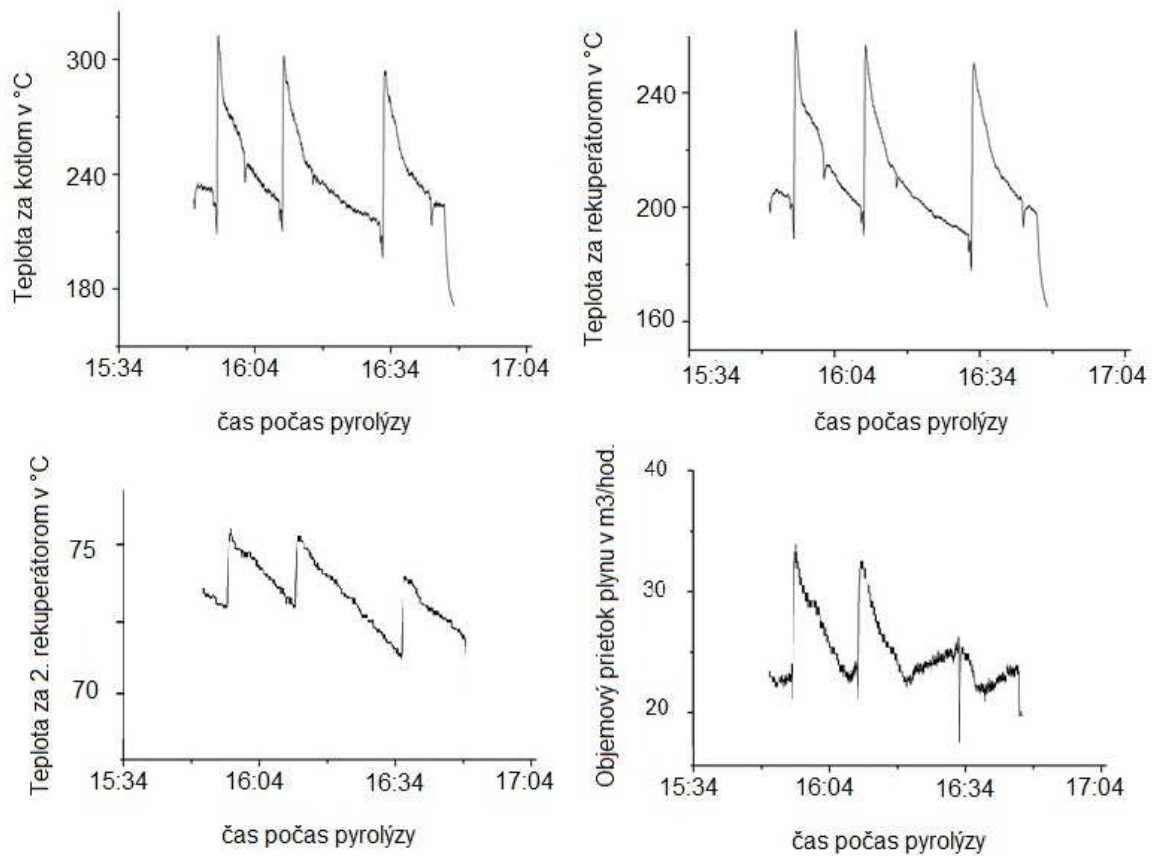


Obr. III-3-22 Priebek koncentrácie H<sub>2</sub> v nadväznosti na jednotlivé pyrolýzne cykly na 4 odberových miestach, ale bez použitia výboja (z dôvodu overenia, že nedochádza v systéme k úniku plynov).



Obr. III-3-23 Priebek koncentrácie CH<sub>4</sub> v nadväznosti na jednotlivé pyrolýzne cykly na 4 odberových miestach, ale bez použitia výboja (z dôvodu overenia, že nedochádza v systéme k úniku plynov). Ide o metán, ktorý v procese vzniká

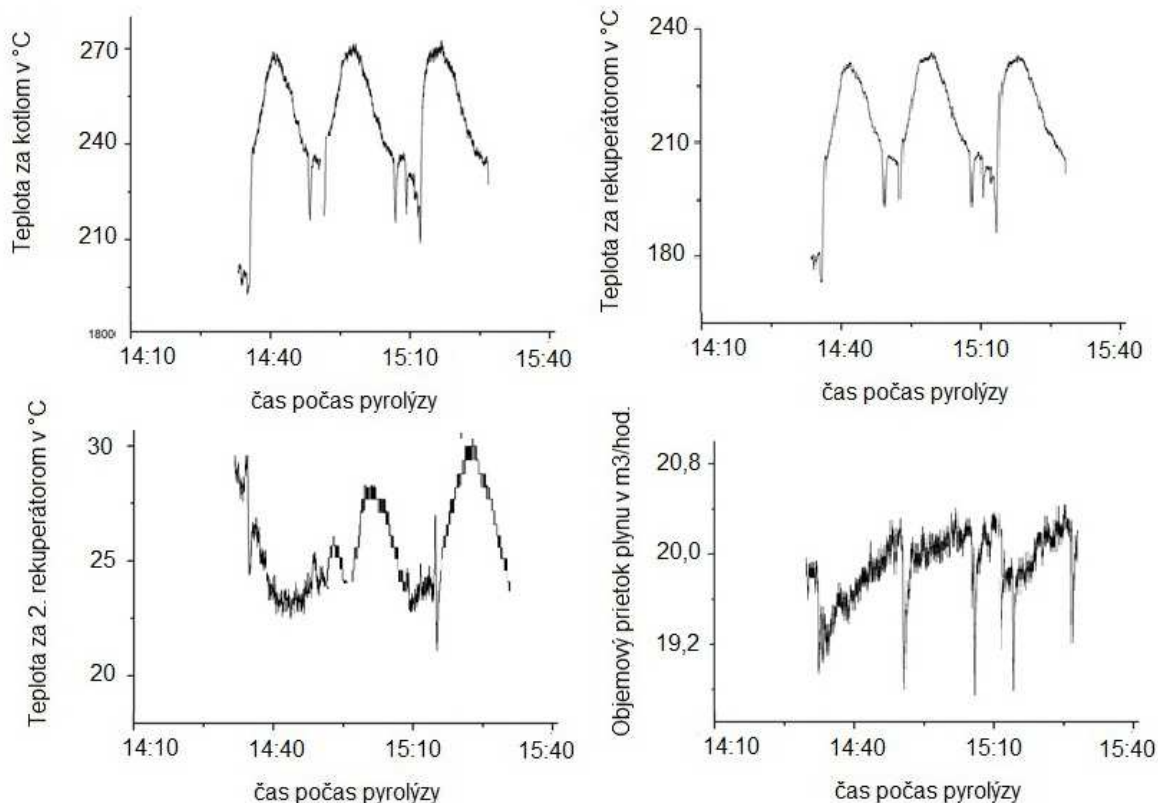
a nie o metán zo stabilizácie procesu (zachováva si pulzácie zodpovedajúce naloženiam suroviny).



Obr. III-3-24 Horný rad zľava priebeh teploty za kotlom a vpravo za rekuperátorom v závislosti od času priebehu pyrolýzy, dolný rad vľavo priebeh teploty za 2. rekuperátorom a vpravo priebeh objemového prietoku pyrolýznych plynov v závislosti od času priebehu pyrolýzy, všetko pre tri naloženia borovicového ihličia.

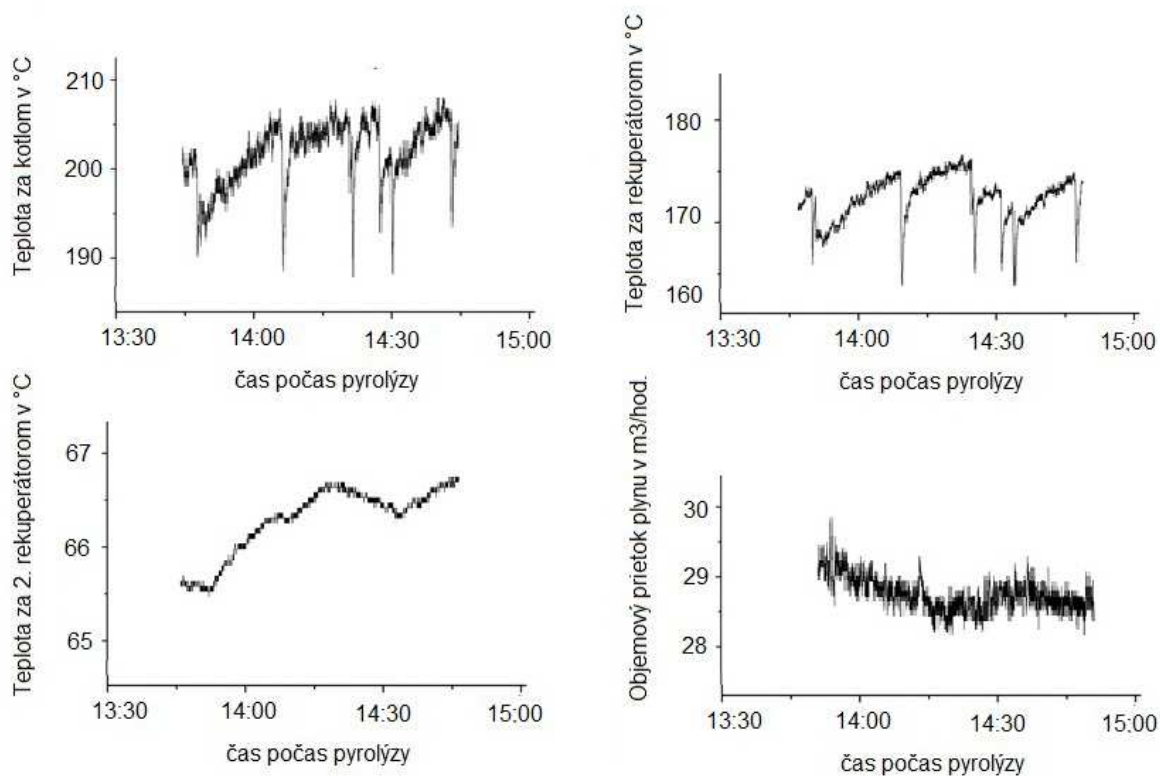
Hmotnosť  $1\text{ m}^3$  pyrolýznych plynov je  $2,691\text{ kg}$ , výmenníkom pretečie  $25\text{ m}^3/\text{hod}$ , pyrolýza trvala  $1,5$  hodiny, pričom sme spyrolyzovali  $1,5\text{ kg}$  borovicového ihličia. Špecifická tepelná kapacita pyrolýznych plynov  $c_p$  je  $1053\text{ [JK}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{]}$ . Teplotný rozdiel je  $\Delta T_1=100\text{ K}$ . Využitím vzťahu  $Q= m\cdot c_p\cdot \Delta T$  určíme množstvo tepla  $Q_1$ , ktoré skúmaným pyrolýznym procesom získame cez prvý výmenník/rekuperátor tepla.  $Q_1=7,08\text{ MJ}$ . Pre druhý výmenník použijeme rovnaké dáta, iba teplotný rozdiel  $\Delta T_2=170\text{ K}$ . Z toho vyplynie hodnota tepla získaného na druhom výmenníku  $Q_2=12,04\text{ MJ}$ . Celkové množstvo tepla  $Q=Q_1+Q_2=19,12\text{ MJ}$ . Toto teplo získame pyrolýzou  $1,5\text{ kg}$  borovicového ihličia, z čoho vyplýva získané množstvo tepla na  $1\text{ kg}$  naloženej suroviny  $12,74\text{ MJ/kg}$ . Vzhľadom na to, že za hodinu spracujeme pyrolýzou asi  $1\text{ kg}$  materiálu, je súčasne množstvo tepla ktoré za hodinu získame  $12,74\text{ MJ/hod}$ .





Obr. III-3-25 Horný rad zľava priebeh teploty za kotlom a vpravo za rekuperátorom v závislosti od času priebehu pyrolýzy, dolný rad vľavo priebeh teploty za 2. rekuperátorom a vpravo priebeh objemového prietoku pyrolýznych plynov v závislosti od času priebehu pyrolýzy, všetko pre tri naloženia borovicových šišíek.

Hmotnosť  $1\text{ m}^3$  pyrolýznych plynov je  $2,691\text{ kg}$ , výmenníkom pretečie  $20\text{ m}^3/\text{hod}$ , pyrolýza trvala  $1,5$  hodiny, pričom sme spyrolyzovali  $1,5\text{ kg}$  borovicových šišíek. Špecifická tepelná kapacita pyrolýznych plynov  $c_p$  je  $1053\text{ [JK}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{]}$ . Teplotný rozdiel je  $\Delta T_1=85\text{ K}$ . Využitím vzťahu  $Q= m\cdot c_p\cdot \Delta T$  určíme množstvo tepla  $Q_1$ , ktoré skúmaným pyrolýznym procesom získame cez prvý výmenník/rekuperátor tepla.  $Q_1=4,67\text{ MJ}$ . Pre druhý výmenník použijeme rovnaké dáta, iba teplotný rozdiel  $\Delta T_2=165\text{ K}$ . Z toho vyplynie hodnota tepla získaného na druhom výmenníku  $Q_2=9,35\text{ MJ}$ . Celkové množstvo tepla  $Q=Q_1+Q_2=14,02\text{ MJ}$ . Toto teplo získame pyrolýzou  $1,5\text{ kg}$  borovicových šišíek, z čoho vyplýva získané množstvo tepla na  $1\text{ kg}$  naloženej suroviny  $9,35\text{ MJ/kg}$ . Vzhľadom na to, že za hodinu spracujeme pyrolýzou asi  $1\text{ kg}$  materiálu, je súčasne množstvo tepla ktoré za hodinu získame  $9,35\text{ MJ/hod}$ .



Obr. III-3-26 Horný rad zľava priebeh teploty za kotlom a vpravo za rekuperátorom v závislosti od času priebehu pyrolýzy, dolný rad vľavo priebeh teploty za 2. rekuperátorom a vpravo priebeh objemového prietoku pyrolýznych plynov v závislosti od času priebehu pyrolýzy, všetko pre tri naloženia kávového odpadu z presso kávovaru.

Hmotnosť  $1\text{ m}^3$  pyrolýznych plynov je  $2,691\text{ kg}$ , výmenníkom pretečie  $29\text{ m}^3/\text{hod}$ , pyrolýza trvala  $1,5$  hodiny, pričom sme spyrolyzovali  $1,5\text{ kg}$  kávového odpadu z presso kávovaru. Špecifická tepelná kapacita pyrolýznych plynov  $c_p$  je  $1053\text{ [JK}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{]}$ . Teplotný rozdiel je  $\Delta T_1=40\text{ K}$ . Využitím vzťahu  $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$  určíme množstvo tepla  $Q_1$ , ktoré skúmaným pyrolýznym procesom získame cez prvý výmenník/rekuperátor tepla.  $Q_1=3,29\text{ MJ}$ . Pre druhý výmenník použijeme rovnaké dáta, iba teplotný rozdiel  $\Delta T_2=104\text{ K}$ . Z toho vyplynie hodnota tepla získaného na druhom výmenníku  $Q_2=8,55\text{ MJ}$ . Celkové množstvo tepla  $Q=Q_1+Q_2=11,84\text{ MJ}$ . Toto teplo získame pyrolýzou  $1,5\text{ kg}$  kávového odpadu z presso kávovaru, z čoho vyplýva získané množstvo tepla na  $1\text{ kg}$  naloženej suroviny  $7,89\text{ MJ/kg}$ . Vzhľadom na to, že za hodinu spracujeme pyrolýzou asi  $1\text{ kg}$  materiálu, je súčasne množstvo tepla ktoré za hodinu získame  $7,89\text{ MJ/hod}$ .

Okrem uvedených materiálov sme spracovali aj ďalšie, avšak v nich boli na niektorých miestach výpadky dát takže ich nebolo možné použiť.

## Záver

Predložená práca je súčasťou dlhodobého a komplexného výskumu. Jej význam treba chápať v nasledujúcom kontexte. Asi 32% obyvateľov Európy žije v rodinných domoch. V podmienkach Slovenska dominantnou položkou sú náklady na teplo a teplú úžitkovú vodu. Preto efektívna výroba a najmä uskladnenie energie predstavuje problém, ktorý je potrebné riešiť v najbližšej budúcnosti. Predložená dizertačná práca sa snaží prispieť k riešeniu týchto problémov.

A vychádzame zo získaných výsledkov prispeli sme k riešeniu nasledujúcich problémov:

### 1. Produkcia tepla s využitím pyrolýzy biomasy a odpadu

Teplo sme získavali pyrolýzou surovín uvedených v tabuľke., pričom spracovaním termických a vzduchotechnických parametrov sme určili teplo, ktoré je možné týmto procesom získať. Nie je to jediný profit z pyrolýzy, pretože okrem tepla je produktom predovšetkým pyrolýzny uhlík.

Pyrolyzovaný materiál v množstve 1kg/hod	Teplo získané za hodinu v MJ/hod.
odpad z lisovania olivového oleja	10,30 MJ/hod.
borovicové ihličie	12,74 MJ/hod.
borovicové šišky	9,35 MJ/hod.
kávový odpad z presso kávovaru	7,89 MJ/hod.

### 2. Uskladňovanie tepla v uskladňovači využívajúcom skupenské teplo topenia parafínu a citelné teplo

Otestovali sme možnosť uskladňovať teplo v uskladňovači naplnenom parafínom s teplotou topenia v intervale 52-56°C, skupenským teplom topenia 210 kJ/kg. Existujúci systém je schopný uskladniť celkovo 1,22 GJ tepla, z toho a 0,92 GJ vo forme latentného tepla a 0,30 GJ vo forme citelného tepla pri teplote materiálu v roztavenom a ohriatom stave na 80°C.

Pyrolyzovaný materiál	Teplo získané za hodinu v MJ/hod.	Čas potrebný na nabitie uskladňovača v hodinách
<b>odpad z lisovania olivového oleja</b>	10,30 MJ/hod.	118 hodín
<b>borovicové ihličie</b>	12,74 MJ/hod.	96 hodín
<b>borovicové šišky</b>	9,35 MJ/hod.	130 hodín
<b>kávový odpad z pressa kávovaru</b>	7,89 MJ/hod.	155 hodín

### 3. Čistenie exhalátov z pyrolýzy

Pyrolýzne plyny sme sa snažili vyčistiť od nežiadúcich zložiek v plynnom skupenstve a od polietavého uhlíka. Zo získaných výsledkov vyplynula vysoká účinnosť na NO<sub>x</sub>, CO a polietavý uhlík.

### 4. CO<sub>2</sub> mitigácia s cieľom znížiť vplyv exhalátov na zhoršovanie globálneho otepľovania

Synergiou použitých metód (pyrolýza a pôsobenie elektrického výboja) je možné dosiahnuť CO<sub>2</sub> negatívny proces v rozsahu -75% až -80% v porovnaní so spaľovaním biomasy.

### 5. Nakladanie s odpadmi

Medzi materiály, ktoré sme využili v procese pyrolýzy sme zaradili aj poľnohospodársko-potravinársky odpad z lisovania olivového oleja. Zaradenie odpadov do procesu produkcie tepla použitím pyrolýzy treba považovať za významný krok a to minimálne z dvoch dôvodov: po prvé olivový a iný mastný odpad je nežiadúci z pohľadu skládkovania pretože má kyslé pH a po druhé zaradenie odpadov je vhodné, lebo znižuje použitie dreva a ostatných komodít užitočných pre iné uplatnenie ako ak pre zachovanie zelene.

### 6. Použitie uhlíka

Uhlík získaný pyrolýzou je možné okrem iného využiť na zlepšenie rheologických vlastností a úrodnosti pôdy. Súčasne predstavuje jednu z možností sequestrácie uhlíka a znižovania skleníkového efektu.

## Literatúra

[1] HORBAJ P., Ekologické aspekty spaľovania palív, Martin, 2000, ISBN 80-7099-405-3.

[2] USŤAK S., Netradiční rostliny, perpektivni pro bionergetické účely v přírodných podmienkach, 2000, Chomutov, ISBN 80-239-1956-3

[3] MORVOVÁ M., Princíp metód a využitie obnoviteľných zdrojov energie, 2008, Bratislava, ISBN: 978-80-89186-28-0

[4] DRENINOVÁ V., Využitie alternatívnych zdrojov energie pre vybudovanie tzv. ekologického domu. [Diplomová práca] - Univerzita Komenského v Bratislave. Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, Bratislava, 2007, 88p.

## Zoznam publikačnej činnosti

AEC01 Morvová, Marcela, st. 12 % - Martišovitš, Viktor 11 % - Morva, Imrich 11 % - Košinár, Ivan 11 % - Janda, Mário 11 % - Kunecová, Daniela 11 % - Kolesárová, Nina - Dreninová, Veronika - Morvová, Marcela, ml. : Nonthermal plasma-based system forexhaust treatment under reduced atmosphere of pyrolysis gases  
Lit. 10 záz. n.

In: Industrial plasma technology : Applications from environmental to energy technologies. - Weinheim :Wiley-VCH, 2010. - S. 105-111. - ISBN 978-3-527-32544-3

AFA01 Morvová, Marcela, st. 40% - Martišovitš, Viktor 10% - Morva, Imrich 10% - Košinár, Ivan 10% - Janda, Mário 10% - Kunecová, Daniela 10% - Kolesárová, N. - Dreninová, V. - Morvová, Marcela, ml. : Nonthermal plasma based system for exhausttreatment in reduced atmosphere of pyrolysis gases  
Lit. 2 záz. n., 5 obr.

In: 3rd International School of Advances Plasma Technology: Proceedings. - Fukuoka : Kyushu University, 2008. - S. 77-78

[Advances Plasma Technology : International School. 3rd, Varenna, 28.-31.7.2008]

AFC01 Morvová, Marcela, st. 40% - Morva, Imrich 10% - Košinár, Ivan 10% - Kunecová, Daniela 10% - Kolesárová, N. - Dreninová, V. - Martins Joao, M. S. - Morvová, Marcela, ml. : Pyrolysis of olive mill solid waste with non-thermal plasma based exhaustcleaning  
Lit. 2 záz. n., 5 obr.

In: HAKONE XI: Contributed Papers, Vol. 2. - Toulouse : Université Paul Sabatier, 2008. - S. 565-569

[HAKONE 2008 : International Symposium on High Pressure, Low Temperature Plasma Chemistry. 11th, Oléron Island, 7.-12.9.2008]