

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Analýza procesu hoření dřevních briket

Analysis of the Lump Wood Burning Process

Student:

Bc. Martin Garba

Vedoucí diplomové práce:

Ing. František Hopan, Ph.D.

Ostrava 2018

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Garba**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Analýza procesu hoření dřevěných briket**  
**Analysis of the Lump Wood Burning Process**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Proveďte analýzu procesu hoření dřeva ve formě briket v teplovodní krbové vložce o výkonu 8 kW.

Diplomová práce bude obsahovat tyto části:

- 1) rešerše problematiky spalování dřevní hmoty
- 2) termogravimetrická analýza dřevní hmoty při pyrolyze a při spalování
- 3) získání kinetických parametrů spalování kusové dřevní hmoty na teplovodní krbové vložce o výkonu 8 kW (hmotová bilance uhlíku a vody během spalovací periody)
- 4) získání podkladů pro optimalizaci vedení spalovacího procesu na teplovodní krbové vložce o výkonu 8 kW (regulace množství spalovacího vzduchu a rozdělení primárního a sekundárního vzduchu)
- 5) výkres experimentální teplovodní krbové vložky o výkonu 8 kW

### Seznam doporučené odborné literatury:

NOSKIEVIČ, P.: Spalování uhlí, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2002, 68 s. ISBN 80-248-0204-X.

BRANC, M., Studium procesu hoření dřeva. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava, 2010

STIOVOVÁ, K., Výzkum spalování dřeva v ohništích malých výkonů. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava, 2009

PILCH, R., Spalování dřeva v ohništích malých rozměrů. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava, 2004

Vědecké články o kinetice spalování kusového dřeva

AUTOR TEAM.: Handbook of biomass combustion and co-firing. Edited by Sjaak van Loo and Jaap Koppejan - London : Earthscan, 2008 - xix, 442 s. : il. ISBN 978-1-84407-249-1 (váz.)1-84407-249-5

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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. František Hopan, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.  
vedoucí katedry

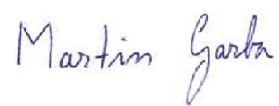


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

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

V Ostravě: 18. 5. 2018



podpis studenta

## Prohlašuji, že

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

V Ostravě : 18. 5. 2018

  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Martin Garba

Adresa trvalého pobytu autora práce: Moravská 477/39, Havířov - Šumbark

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

GARBA, M. *Analýza procesu hoření dřevěných briket: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2018, 82 s. Vedoucí práce: Hopan, F.

Diplomová práce se zabývá analýzou procesu hoření dřevěných briket v teplovodní krbové vložce. V práci je teoreticky popsána struktura dřeva, změny dřevní struktury při zahřívání a proces spalování dřeva. Ke zkoumání dřevní struktury se použil termogravimetrický analyzátor. Termogravimetrické analýzy byly provedeny v inertní a oxidační atmosféře. Měřily se emise a teploty v briketě během spalování brikety v krbové vložce. Z emisí se vypočetl hmotnostní úbytek uhlíku z brikety v průběhu spalovacího procesu. Z naměřených teplot a poznatků z termogravimetrické analýzy byl vytvořen teplotní model dřevěné brikety. Z teplotního modelu se stanovil hmotnostní úbytek vodíku, kyslíku a vody z brikety v průběhu spalovacího procesu.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

GARBA, M. *Analysis of the Lump Wood Burning Process: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2018, 82 p. Thesis head: Hopan, F.

Master thesis is dealing with analysis of the lump wood burning process at the fireplace insert. The structure of wood, changes in wood structure during heating and wood burning process is theoretically described in the thesis. Changes of wood structure was investigated using a termogravimetric analyzer. Thermogravimetric analysis were realized in an inert and oxidative atmosphere. Emissions and temperatures in the lump wood were measured during combustion in the fireplace insert. From the emissions were calculated the weight loss of carbon from the lump wood during the combustion process. From the measured temperatures and knowledge from thermogravimetric analysis was created the temperature model of lump wood. From the temperature model was determined the weight loss of hydrogen, oxygen and water from the lump wood during the combustion process.

Děkuji Ing. Františku Hopanovi, Ph.D. za odborné vedení práce a mnoho cenných rad a podnětů.

## Obsah

ÚVOD.....	10
1. STRUKTURA DŘEVA.....	11
1.1 CELULÓZA.....	12
1.2 HEMICELULÓZA .....	13
1.3 LIGNIN.....	13
1.4 TERMICKÁ DEGRADACE DŘEVNÍ STRUKTURY.....	14
2. SPALOVÁNÍ DŘEVNÍ HMOTY.....	17
2.1 VLIV PALIVA NA SPALOVÁNÍ.....	17
2.1.1 <i>Hořlavina</i> .....	17
2.1.2 <i>Pasivní složky paliva</i> .....	19
2.2 DALŠÍ VLIVY NA SPALOVÁNÍ.....	21
2.3 PROCES SPALOVÁNÍ .....	23
3. TERMOGRAVIMETRICKÁ ANALÝZA.....	24
3.1 TESTOVANÝ VZOREK – POUŽITÉ PALIVO .....	25
3.2 POSTUP A VÝSLEDKY TERMOGRAVIMETRICKÉ ANALÝZY.....	25
4. SPALOVACÍ ZKOUŠKY .....	30
4.1 POPIS MĚŘICÍ TRATĚ.....	30
4.2 STANOVENÍ OPTIMÁLNÍCH PODMÍNEK SPALOVÁNÍ.....	32
4.3 MĚŘENÍ ÚBYTKU HMOTNOSTI BRIKETY BĚHEM SPALOVÁNÍ .....	34
4.4 ÚBYTEK HMOTNOSTI UHLÍKU URČENÝ Z EMISÍ .....	35
5. TEPLOTNÍ MODEL DŘEVNÍ BRIKETY.....	43
5.1 ROZLOŽENÍ TEPLOT V BRIKETĚ.....	43
5.2 STANOVENÍ HMOTNOSTNÍHO ÚBYTKU ELEMENTÁRNÍCH PRVKŮ.....	50
5.2.1 <i>Hmotnostní úbytek vody</i> .....	52
5.2.2 <i>Hmotnostní úbytek vodíku a kyslíku</i> .....	56
5.3 VÝSLEDNÝ DIAGRAM HMOTNOSTNÍHO ÚBYTKU.....	66
ZÁVĚR.....	70
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	72
SEZNAM GRAFŮ .....	74
SEZNAM TABULEK .....	74
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	75
SEZNAM PŘÍLOH.....	75

## Seznam použitých značek a symbolů

$a$	Teplotní vodivost	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$A_r$	Popelovina obsažená v briketě	1
$C_{3H_8K}$	Koncentrace $C_3H_8$ v komíně	$\text{g} \cdot \text{m}_n^{-3}$
$C_{\text{mol}}$	Molární hmotnost uhlíku	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
$CO_{2K}$	Koncentrace $CO_2$ v komíně	$\text{g} \cdot \text{m}_n^{-3}$
$CO_{2\check{R}T}$	Koncentrace $CO_2$ v ředícím tunelu	$\text{g} \cdot \text{m}_n^{-3}$
$CO_K$	Koncentrace $CO$ v komíně	$\text{mg} \cdot \text{m}_n^{-3}$
$CO_{\check{R}T}$	Koncentrace $CO$ v ředícím tunelu	$\text{mg} \cdot \text{m}_n^{-3}$
$c_p$	Měrná tepelná kapacita	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$C_r$	Uhlík obsažený v briketě	1
$H_{\text{mol}}$	Molární hmotnost vodíku	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
$H_r$	Vodík obsažený v briketě	1
$CH_{4K}$	Koncentrace $CH_4$ v komíně	$\text{g} \cdot \text{m}_n^{-3}$
$L$	Délka brikety	$\text{m}$
$m_C$	Hmotnostní tok uhlíku ve spalinách	$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$
$m_{C_3H_8}$	Hmotnostní tok $C_3H_8$	$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$
$m_{\text{cel,H}}$	Hmotnostní zastoupení vodíku v molekule celulózy	$\%_{\text{hm}}$
$m_{\text{cel,O}}$	Hmotnostní zastoupení kyslíku v molekule celulózy	$\%_{\text{hm}}$
$m_{CO}$	Hmotnostní tok $CO$	$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$
$m_{CO_2}$	Hmotnostní tok $CO_2$	$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$
$m_{\text{hem,H}}$	Hmotnostní zastoupení vodíku v molekule hemicelulózy	$\%_{\text{hm}}$
$m_{\text{hem,O}}$	Hmotnostní zastoupení kyslíku v molekule hemicelulózy	$\%_{\text{hm}}$
$m_{CH_4}$	Hmotnostní tok $CH_4$	$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$
$m_{\text{lig,H}}$	Hmotnostní zastoupení vodíku v molekule ligninu	$\%_{\text{hm}}$
$m_{\text{lig,O}}$	Hmotnostní zastoupení kyslíku v molekule ligninu	$\%_{\text{hm}}$
$m_{\text{mol,cel}}$	Molární hmotnost molekuly celulózy	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
$m_{\text{mol,hem}}$	Molární hmotnost molekuly hemicelulózy	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
$m_{\text{mol,lig}}$	Molární hmotnost molekuly ligninu	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
$N_r$	Dusík obsažený v briketě	1
$O_{\text{mol}}$	Molární hmotnost kyslíku	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$
$O_r$	Kyslík obsažený v briketě	1
$p_{SP,\check{R}T}$	Skutečný tlak spalin v ředícím tunelu	$\text{Pa}$
$p_{SP,\check{R}T,N}$	Tlak spalin v ředícím tunelu za normálních podmínek	$\text{Pa}$
$r_1$	Poloměr předchozí vrstvy	$\text{m}$
$r_2$	Poloměr následující vrstvy	$\text{m}$
$r_i$	Vnitřní poloměr vrstvy brikety	$\text{m}$
$r_o$	Vnější poloměr vrstvy brikety	$\text{m}$
$r_s$	Poloměr výpočtové vrstvy	$\text{m}$
$\check{R}P$	Ředící poměr	1
$S_r$	Síra obsažená v briketě	1
$T_{SP,\check{R}T}$	Skutečná teplota spalin v ředícím tunelu	$\text{K}$
$T_{SP,\check{R}T,N}$	Teplota spalin v ředícím tunelu za normálních podmínek	$\text{K}$
$t_1$	Teplota předchozí vrstvy	$^{\circ}\text{C}$
$t_2$	Teplota následující vrstvy	$^{\circ}\text{C}$



$t_s$	Teplota výpočtové vrstvy	$^{\circ}\text{C}$
$t_s'$	Nová teplota výpočtové vrstvy	$^{\circ}\text{C}$
$V_{SP,N}$	Objemový tok spalin za krbovou vložkou za normálních podmínek	$\text{m}_n^3 \cdot \text{hod}^{-1}$
$V_{SP,\dot{R}T}$	Objemový tok spalin v ředícím tunelu	$\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$
$V_{SP,\dot{R}T,N}$	Objemový tok spalin v ředícím tunelu za normálních podmínek	$\text{m}_n^3 \cdot \text{hod}^{-1}$
$W_r$	Vlhkost obsažená v briketě	1
$\Delta m_i$	Hmotnost libovolné vrstvy brikety	kg
$\Delta m_{icel}$	Hm. zastoupení celulózy v libovolné vrstvě brikety	kg
$\Delta m_{icelH}$	Hm. zastoupení vodíku z celulózy v libovolné vrstvě brikety	kg
$\Delta m_{icelO}$	Hm. zastoupení kyslíku z celulózy v libovolné vrstvě brikety	kg
$\Delta m_{iH_2O}$	Hm. vody v libovolné vrstvě brikety	kg
$\Delta m_{ihem}$	Hm. zastoupení hemicelulózy v libovolné vrstvě brikety	kg
$\Delta m_{ihemH}$	Hm. zastoupení vodíku z hemicelulózy v libovolné vrstvě brikety	kg
$\Delta m_{ihemO}$	Hm. zastoupení kyslíku z hemicelulózy v libovolné vrstvě brikety	kg
$\Delta m_{ilig}$	Hm. zastoupení ligninu v libovolné vrstvě brikety	kg
$\Delta m_{iligH}$	Hm. zastoupení vodíku z ligninu v libovolné vrstvě brikety	kg
$\Delta m_{iligO}$	Hm. zastoupení kyslíku z ligninu v libovolné vrstvě brikety	kg
$\Delta S_i$	Plocha libovolné vrstvy brikety	$\text{m}^2$
$\Delta V_i$	Objem libovolné vrstvy brikety	$\text{m}^3$
$\Delta x$	Vzdálenost mezi výpočtovými vrstvami	m
$\Delta \tau$	Časový krok	s
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\pi$	Ludolfovo číslo	1
$\rho$	Hustota	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\Omega_{cel}$	Množství celulózy v briketě	1
$\Omega_{hem}$	Množství hemicelulózy v briketě	1
$\Omega_{lig}$	Množství ligninu v briketě	1

## Úvod

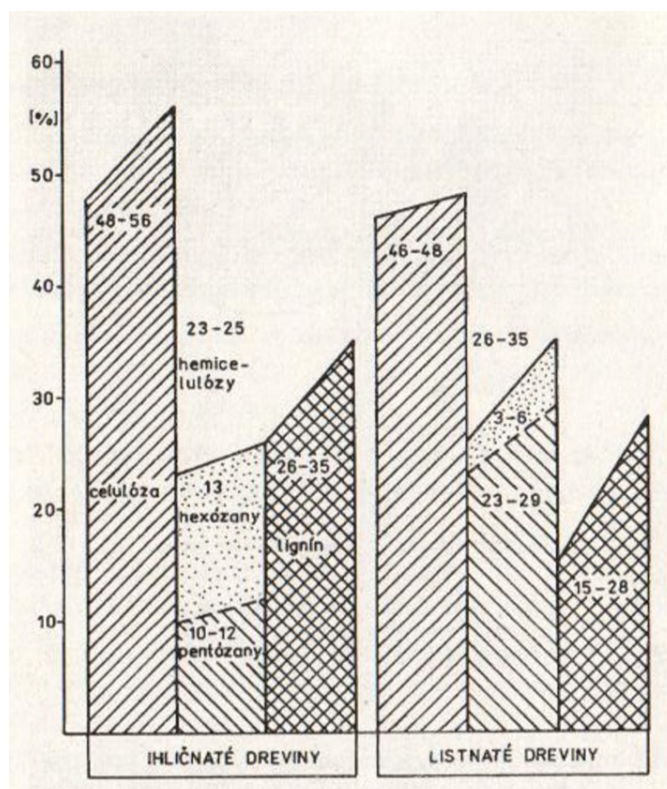
Tato práce je součástí projektu řešeného ve Výzkumném energetickém centru v Ostravě. Projekt se zabývá vlivem změny objemu spalovací komory krbové vložky na průběh spalování dřevní brikety. Problém byl řešen matematickým modelem v softwaru ANSYS Fluent. Model byl vytvořen pro několik typických míst spalovací periody. Pro tato místa bylo potřeba stanovit okrajové podmínky, zastoupení jednotlivých prvků, ze kterých se skládá prchavá hořlavina a množství elementárních prvků zbývajících v briketě. Práce je rovněž zaměřena na stanovení hmotnostního zastoupení elementárních prvků v dřevní briketě v každé minutě spalovacího procesu.

Stanovení hmotnostního zastoupení elementárních prvků v dřevní briketě během spalovacího procesu se řešilo přes hmotnostní úbytek těchto prvků. Byly provedeny spalovací zkoušky na teplovodní krbové vložce, při kterých se měřila váha dřevní brikety, složení spalin a průběh teplot v dřevní briketě během spalovacího procesu. Ze složení spalin se vypočetl úbytek uhlíku z dřevní brikety a z průběhů teplot v dřevní briketě se vytvořil teplotní model, který sloužil pro stanovení hmotnostního úbytku vlhkosti, vodíku a kyslíku. Naměřené výsledky byly použity pro kontrolu absolutního součtu vypočteného hmotnostního úbytku elementárních prvků a vlhkosti.

Součástí této práce je také termogravimetrická analýza dřevní brikety, jejíž výsledky pomohly pochopit termický rozpad dřeva. Výsledky byly použity pro tvorbu teplotního modelu dřevní brikety. V práci je také popsána struktura dřeva, její chování při tepelném namáhání a vlivy ovlivňující spalování dřevní hmoty v krbových kamnech.

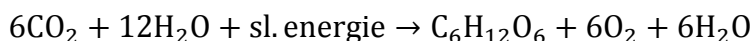
## 1. Struktura dřeva

Palivové dřevo, které se spaluje v lokálních topeništích, má původ ve zdřevnatělých stoncích rostlin. Jeho struktura je složena z heterogenních biopolymerů, které tvoří tři hlavní stavební složky dřeva. Největší část zaujímá sacharidový podíl, tedy celulóza a hemicelulóza - Obr. č. 1.1. Menší část struktury je složena z aromatického podílu, který je tvořen ligninem. Tyto biopolymery vznikají fotosyntézou z oxidu uhličitého a vody za současného působení sluneční energie. Výsledným produktem fotosyntézy je glukóza, což je monosacharid, který slouží rostlině jako zásoba energie a jako hlavní stavební kámen její struktury. Celulóza, hemicelulóza a lignin jsou složeny z atomů uhlíku, kyslíku a vodíku, které jsou spojeny chemickými vazbami do struktur. Uhlík ve dřevě průměrně zaujímá 49,5 %<sub>hm</sub>, kyslík 44,2 %<sub>hm</sub> a vodík 6,3 %<sub>hm</sub>. Ve dřevě jsou zastoupeny i jiné prvky, například dusík, který je v rostlinách obsažen v rozsahu 0,2 – 1,5 %<sub>hm</sub> v závislosti na druhu. Dalšími prvky v rostlinách mohou být různé anorganické látky, především minerály, které rostlina v průběhu růstu vstřebává ze země. Tyto minerály jsou obsaženy v popelovině. Z pohledu spalování je ve dřevě obsažena nežádoucí síra, i když pouze v malém množství, přibližně 0,03 %<sub>hm</sub>. [1, 2, 3, 7]



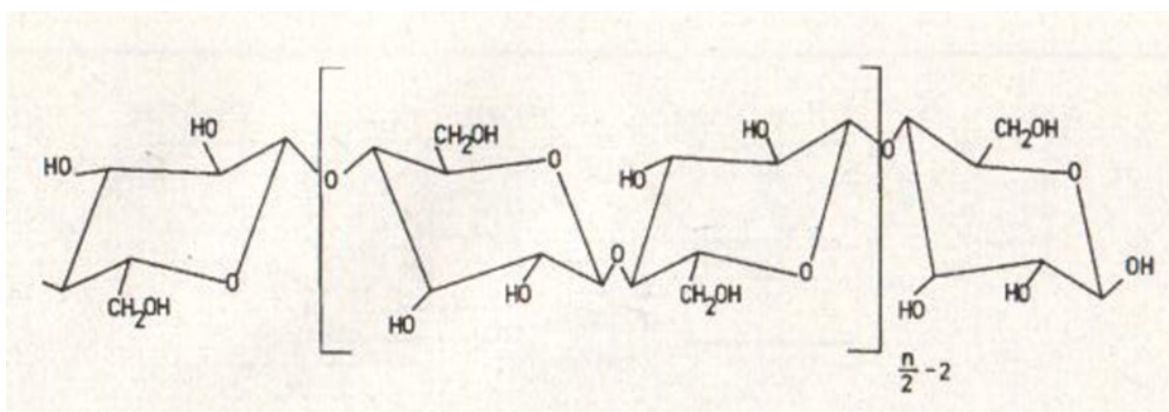
Obr. č. 1.1: Podíl hlavních organických látek ve dřevě [1]

Chemická rovnice fotosyntézy [10]



## 1.1 Celulóza

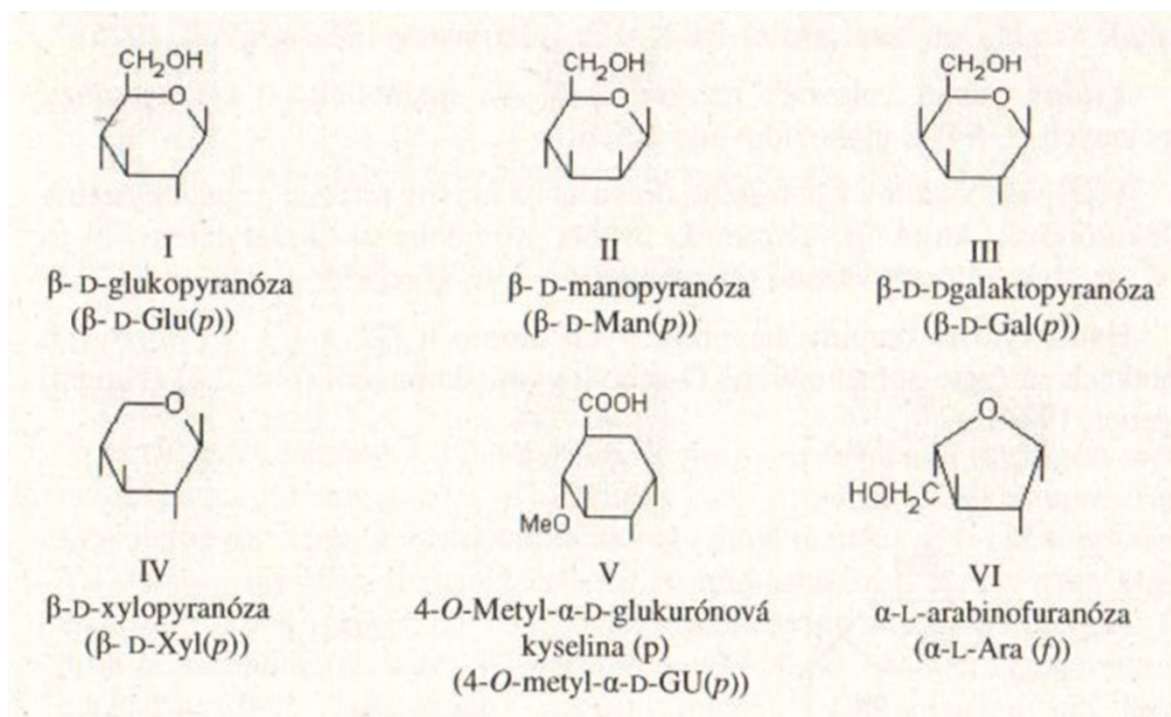
Celulóza je biopolymerní látka, která je základní stavební jednotkou dřevní struktury. Ve dřevě zabírá největší část hmoty a to přibližně 50 %<sub>hm</sub>. Tento polysacharid je tvořen lineárním spojením glukopyranózových jednotek, které tvoří řetězce - Obr. č. 1.2. Řetězce se stáčíjí do sebe za vzniku makromolekul, které se ukládají jako kostra buněčných stěn. Biopolymerní řetězce nemají stejnou délku, protože jsou tvořeny různým počtem glukózových jednotek. Průměrný polymerační stupeň, tedy počet glukózových jednotek celulózy, je nejčastěji mezi 500 – 1 500, ale může být i 14 000. I přes velký počet těchto jednotek jsou rozměry vláken celulózy v řádech tisícín milimetrů. Díky těmto vláknům má struktura dřeva v jejich směru vyšší pevnost. Každá glukopyranózová jednotka obsahuje několik hydroxylových skupin, mezi kterými vznikají intermolekulové vodíkové vazby, a jednu poloacetálovou hydroxylovou skupinu. Tyto vazby jsou dvojího druhu. Buď vznikají mezi sousedícími molekulami glukózových jednotek, což způsobuje menší ohybnost dřeva nebo mezi sousedícími makromolekulami. Makromolekuly jsou pak ve struktuře dřeva uspořádány volně, jako amorfní podíl nebo tvoří krystalickou strukturu, což je krystalický podíl. Díky těmto vazbám mezi makromolekulami je krystalický podíl stabilnější vůči fyzikálně chemickému působení. Při termickém zatížení se začne amorfní podíl rozkládat dříve než podíl krystalický. [1, 2]



Obr. č. 1.2: Řetězec celulózy [1]

## 1.2 Hemicelulóza

Hemicelulóza je kromě celulózy další součástí sacharidového podílu. Ve dřevě je zastoupena 20 – 30 %<sub>hm</sub> a ve struktuře dřeva obaluje celulózu. Jsou to různé heteropolysacharidy s menší relativní molekulovou hmotností, respektive tvoří kratší řetězce, což zapříčiňuje menší odolnost a pevnost. Hemicelulóza je také tvořena řetězcem ze základních jednotek, na kterém jsou navázány boční řetězce různých sacharidů - Obr. č. 1.3. Hodnota průměrného polymeračního stupně je nejčastěji 100 – 200 jednotek. Čím jsou řetězce rozvětvenější, tím je hemicelulóza méně odolná vůči fyzikálně chemickým vlivům. Boční řetězce jsou tvořeny různými monosacharidy. Nejvíce zastoupené jsou pak monosacharidy pentózy a hexózy. Nejdůležitějším polysacharidem hemicelulózy jehličnanů je glukomanán a u listnatých stromů xylan. [1, 2]

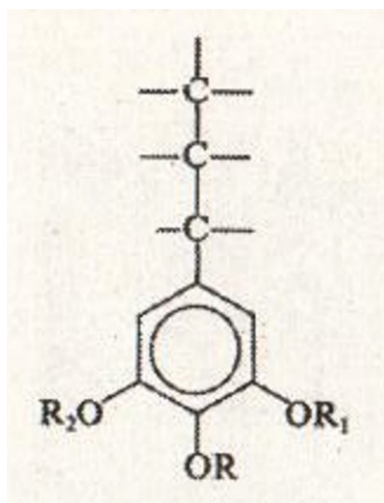


Obr. č. 1.3: Hlavní stavební jednotky hemicelulózy [1]

## 1.3 Lignin

Lignin je zesíťovaný polymer, který je ve dřevě obsažen 15 – 36 %<sub>hm</sub>. Vyplňuje prostor mezi celulózą a hemicelulózą a spojuje jejich vláknitou strukturu. Dřeviny, které obsahují větší množství ligninu, jsou těžší. Mezi ně patří listnaté stromy. Lignin

také po zahřátí měkne a dřevo se stává tvárnější. Je tvořen benzenovým jádrem, na kterém jsou navázané boční propanové řetězce, fenolové hydroxylové skupiny a metoxylové skupiny. Na Obr. č. 1.4 R znamená vodík, alkyl, aryl, acyl,  $R_1$   $CH_3$  a  $R_2$   $CH_3$ , H nebo C. Stejně jako celulóza a hemicelulóza tvoří lignin makromolekuly, které jsou složeny z jednotlivých strukturních jednotek. Tyto jednotky jsou navzájem spojované vazbami C–C nebo éterovými C–O–C vazbami. Vazby C–C spojují boční řetězce nebo boční řetězec s jádrem. Vazby typu C–C jsou stabilnější než éterové vazby. [1, 2]

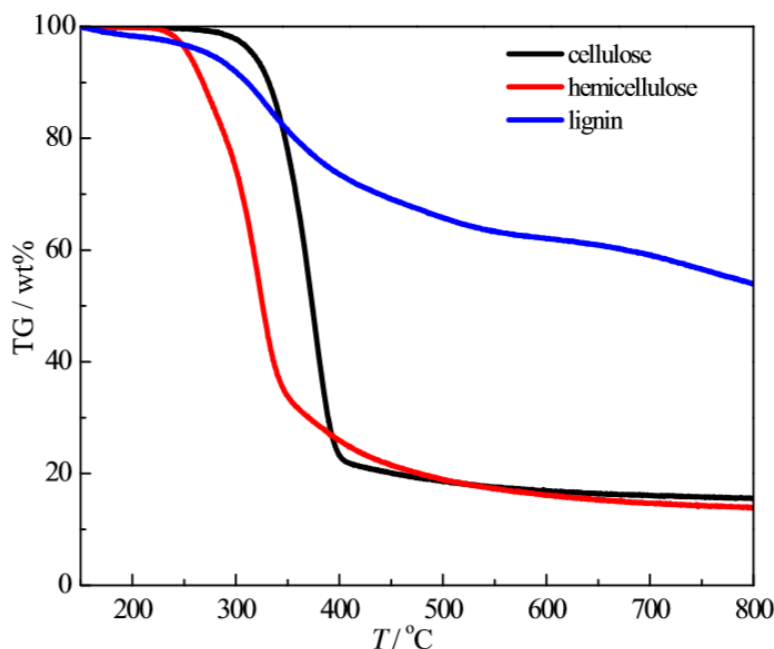


Obr. č. 1.4: Fragment struktury ligninu [1]

#### 1.4 Termická degradace dřevní struktury

Dřevní struktura je složena ze třech základních biopolymerů a každý z nich reaguje na vysoké teploty jinak. Je to dáno především rozdílnou strukturou jejich řetězců. Pokud by jednotlivé složky dřeva byly vystaveny zvyšujícím se teplotám, nejdříve by se rozpadly řetězce hemicelulózy. K rozpadu hemicelulózy dochází již při nízkých teplotách mezi 210 – 370 °C. Je to dáno především její rozvětvenou strukturou, složenou z různých sacharidů. Většina hemicelulózy by se díky své malé odolnosti při zahřívání změnila v plyn a tuhý uhlíkatý zbytek by činil přibližně 14 %<sub>hm</sub>. Také celulóza se při termickém rozpadu mění v plynnou část a uhlíkatý zbytek činí 15,6 %<sub>hm</sub>. K rozpadu celulózy dochází v teplotním intervalu 260 – 410 °C. Vyšší stabilita celulózy oproti hemicelulóze je dána jejím menším rozvětvením. Poslední složkou dřeva je lignin, což je aromatický polymer, který se rozkládá mezi teplotami

200 – 600 °C. Především se štěpí jeho boční řetězce a benzenová jádra přetrvávají. Je velmi stabilní. Uhlíkatý zbytek činí 60 %<sub>hm</sub>. Následující graf znázorňuje chování třech hlavních složek dřeva v inertní atmosféře za zvyšující se teploty - Graf. č. 1.1. [1, 9]

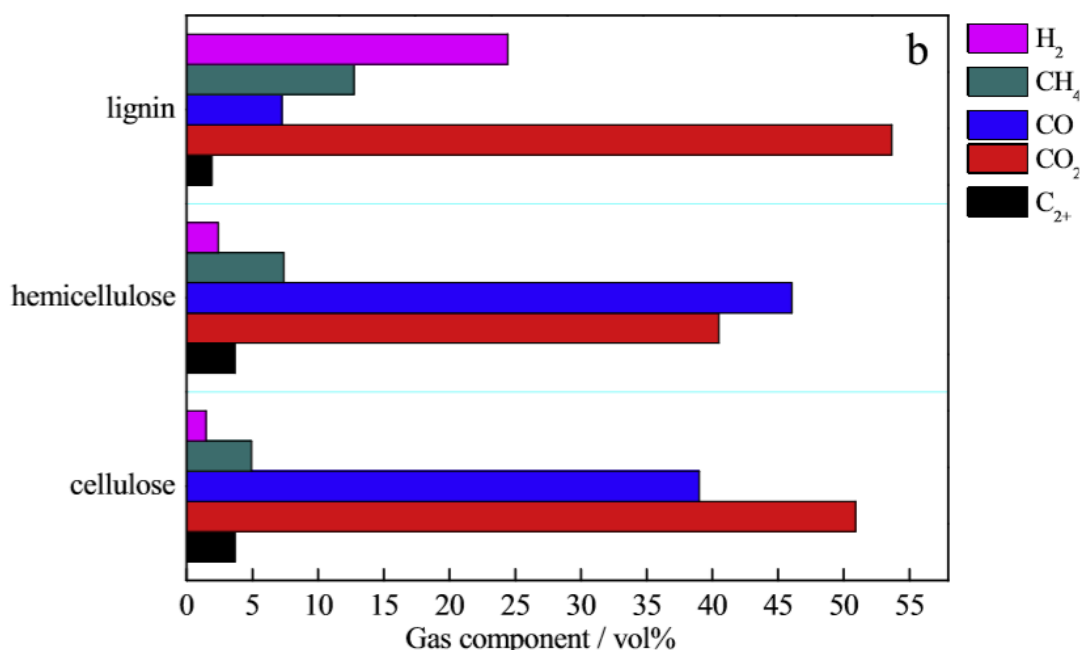


Graf. č. 1.1: Křivky hmotnostního úbytku třech hlavních složek dřeva [9]

Z diagramu tedy vyplývá, že se celulóza a hemicelulóza při zahřívání chovají téměř stejně. Po zahřátí se z hemicelulózy zachová přibližně 10 – 15 %<sub>hm</sub> pevného podílu, zbytek se přemění v plyn. Tento plyn by tvořil při spalování prchavou hořlavinu. Pevného podílu po termickém rozkladu celulózy je také kolem 15 %<sub>hm</sub>, zbytek pak tvoří plyny, které by také byly při spalování součástí prchavé hořlaviny. Lignin, jehož řetězce jsou složeny z benzenových jader, na které se připojují různé chemické skupiny, tvoří především tuhý podíl. Je to dáno právě benzenovými jádry, které jsou odolnější vůči vyšším teplotám než řetězce celulózy a hemicelulózy. Od benzenových jader se štěpí pouze boční řetězce, které pak tvoří asi 35 – 40 %<sub>hm</sub> prchavé hořlaviny. Uhlíkatého zbytku je přibližně 60 – 65 %<sub>hm</sub>. [1, 9]

Mezi plyny, které tvoří prchavou hořlavinu, patří především oxid uhličitý a oxid uhelnatý. Tyto dva plyny vznikají reakcí palivového uhlíku a kyslíku. Ve dřevě je také obsažen vodík, který se v prchavé hořlavině vyskytuje ve formě H<sub>2</sub> nebo jako součást molekul uhlovodíků. Následující diagram znázorňuje, jaké plyny vznikají z celulózy,

hemicelulózy a ligninu při zahřívání v inertní atmosféře. Množství plynů v grafu je jen přibližné, jelikož na vznik těchto plynů má také vliv rychlost ohřevu vzorku - Graf. č. 1.2. [1, 9, 13]



Graf. č. 1.2: Vznik plynů ze třech hlavních složek dřeva [9]

Pokud nebude dřevo vystaveno při zahřívání oxidační atmosféře, nebude docházet k oxidaci tuhého zbytku, tedy hoření. I přesto, že se tuhý zbytek označuje jako fixní uhlík, se pouze z uhlíku neskládá. Jak již bylo napsáno výše, tuhý zbytek je především tvořen z benzenových jader ligninu. Benzenová jádra jsou cyklicky spojené uhlíky, na které jsou navázány atomy vodíku. V tuhém zbytku tedy není jen uhlík, ale také malá část vodíku. V následující tabulce je vyjádřeno množství uhlíku a vodíku v surovém vzorku a množství těchto atomů ve vzorku po pyrolýze. [1, 9]

Raw material					
	C	H	N	Others	H/C
cellulose	43.12	6.53	0.32	50.04	1.82
hemicellulose	41.28	6.53	0.03	52.16	1.90
lignin	51.00	5.00	0.12	43.88	1.18
Pyrolysis char					
	C	H	N	Others	H/C
	85.87	3.25	0.15	10.73	0.45
	82.13	3.21	0.08	14.58	0.47
	63.2	2.38	0.29	34.13	0.45

Tab. č. 1.1: Zastoupení uhlíku a vodíku v surovém vzorku a vzorku po pyrolýze [9]



## 2. Spalování dřevní hmoty

Spalovací proces je složitý děj, při kterém dochází k uvolnění energie z paliva. Průběh tohoto procesu závisí na těchto parametrech: použité palivo, množství a rozložení spalovacího vzduchu, velikost spalovací komory a teplota, při které spalování probíhá. [3, 6]

Z pohledu ekologie se dá považovat dřevo za čisté palivo, protože se jedná pouze o oxid uhličitý, vodu a energii přeměněnou v celulózu, hemicelulózu a lignin. Při spalování dochází k rozpadu těchto chemických struktur dřeva a jejich zpětné přeměně na oxid uhličitý a vodní páru. Také dochází k uvolnění energie, která se do dřeva uložila. Proto se dá říci, že to co si rostlina pro svůj růst z ovzduší vzala, se při spalování do ovzduší uvolňuje. Zbyde pouze malá část popela, jako zůstatek minerálů, které si rostlina vzala ze země. Nesmí se zapomenout na to, že se dřevo dá považovat za čisté palivo jen tehdy, pokud se spaluje správně. [3]

### 2.1 Vliv paliva na spalování

Palivo obsahuje hořlavinu  $h$ , vodu  $W$  a popelovinu  $A$ . Popelovina je ve dřevní hmotě obsažena pouze 0,2 – 1 %<sub>hm</sub>, ale voda v čerstvém dřevě může zaujímat až 50 % hmotnosti. Zbytek náleží hořlavině, ve které je chemicky vázaná energie. Všechny složky jsou v určité míře v každém palivu, ale vždy musí platit následující rovnice: [3, 4, 13]

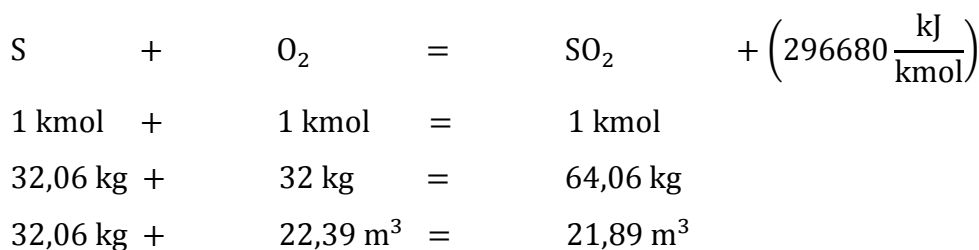
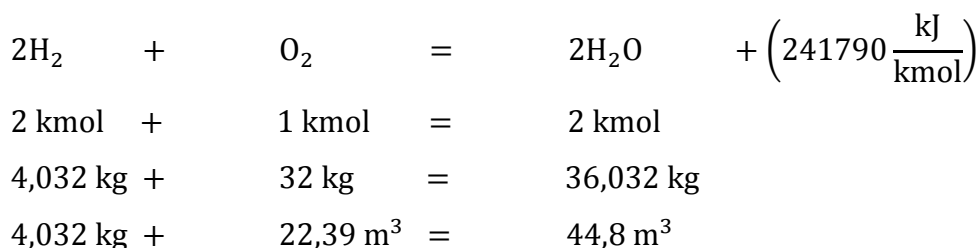
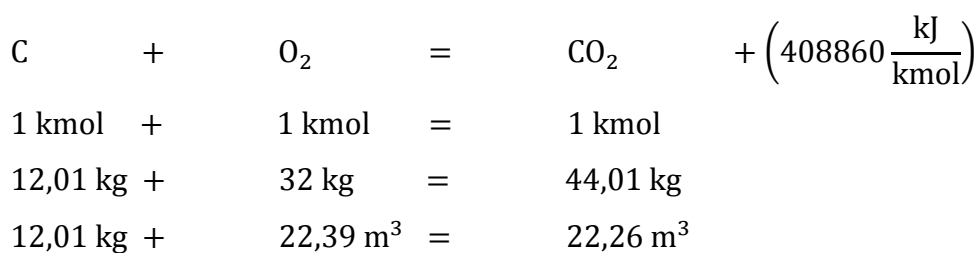
$$W + h + A = 1$$

#### 2.1.1 Hořlavina

Spalování je proces, při kterém dochází k oxidaci aktivních prvků hořlaviny, což jsou uhlík, vodík a síra. Oxidace těchto prvků je exotermický proces, a proto se tyto prvky označují jako aktivní. Dalšími prvky hořlaviny jsou dusík a kyslík, které patří mezi pasivní prvky hořlaviny, protože při procesu spalování z nich není žádný energetický zisk. Pak platí: [3, 4, 13]

$$C + H + S + N + O = h$$

Spalování je oxidační proces, při kterém se uvolňuje energie. Pokud je k palivu přivedeno dostatečné množství okysličovadla, tedy spalovacího vzduchu, pak dochází ke sloučení uhlíku, vodíku a síry s kyslíkem za vzniku oxidu uhličitého, vodní páry a oxidu siřičitého. Avšak oxid siřičitý je považován za škodlivý plyn, protože při reakci s vodou dochází ke vzniku kyseliny sírové, která ničí životní prostředí. Proto je síra v palivu nežádoucí, i když se při její oxidaci uvolňuje teplo a její negativní vliv převládá nad pozitivem uvolnění energie. Pokud by se tedy k palivu přivedlo stechiometrické množství vzduchu, pak by se veškeré atomy S, C a H přeměnily v CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O a SO<sub>2</sub>. Oxidační proces mohou popsat následující rovnice: [3, 4, 5]



Rovnice představují hmotnostní bilance, které vycházejí z molárních hmotností reagujících prvků vztažené na jeden kilomol látky. Vyjadřují, kolik vznikne plynných produktů oxidací elementárních prvků paliva. Pokud se vztáhnou rovnice na 1 kg spalovaného prvku, tak se zjistí množství kyslíku potřebného k dokonalému spálení 1 kg dané látky a kolik plynných produktů z tohoto kilogramu vznikne. Tedy k dokonalému spálení 1 kg uhlíku je třeba přivést 32/12 kg (22,39/12,01 m<sup>3</sup>) kyslíku a vznikne

44,01/12,01 kg (22,26/12,01 m<sup>3</sup>) oxidu uhličitého. Tento postup se dá aplikovat i na zbylé prvky. Také lze z rovnic vyčíst, kolik energie se oxidací uvolní. Největší množství energie se nachází v rovnici oxidace uhlíku, ale pokud se vztáhne uvolněná energie na 1 kg spalovaného prvku, tak se nejvíce energie uvolní spálením vodíku, přibližně 120 MJ·kg<sup>-1</sup>. [3, 4, 5]

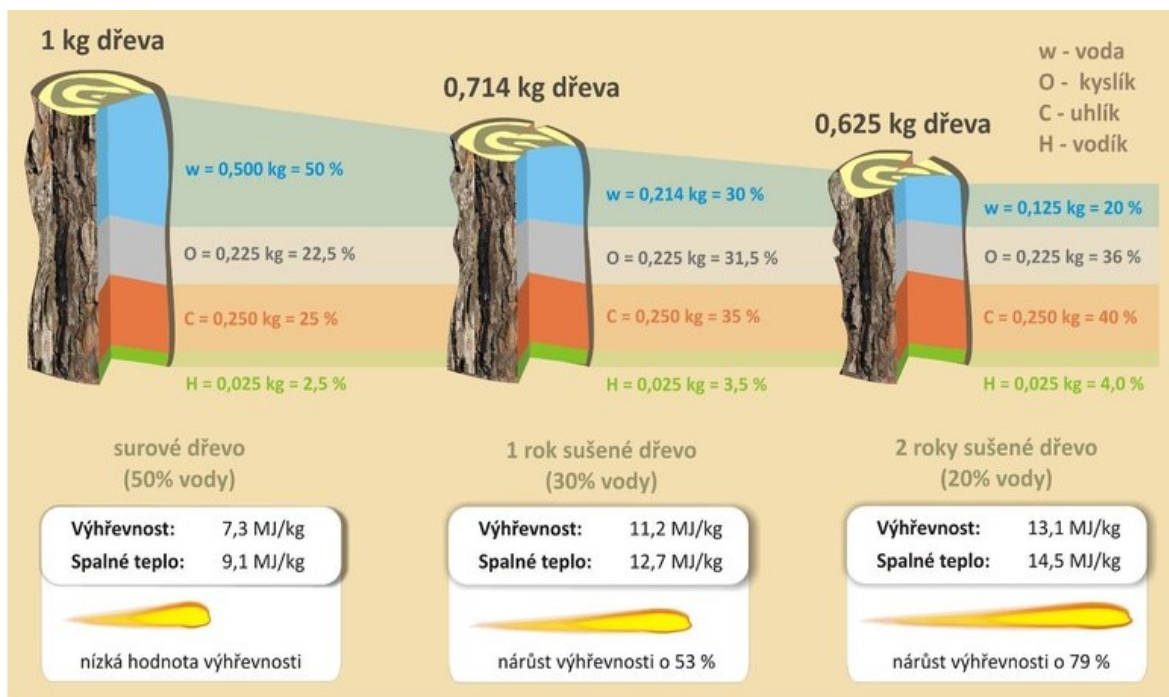
### 2.1.2 Pasivní složky paliva

Pasivními složkami paliva jsou voda a popelovina, ze kterých se během spalování neuvolňuje energie jako z hořlaviny, ale výrazně ovlivňují průběh spalování a výhřevnost paliva. [3]

Jako popelovina jsou u dřeva označovány anorganické látky, které rostlina během svého růstu vstřebává z půdy. Popelovina je složena převážně z minerálních látek, jako jsou oxidy kovů, alkalických kovů a jiných prvků. Početné zastoupení mají také karbonáty, sulfidy a sulfáty. Při spalování paliva podléhá popelovina změnám a vznikají zcela nové látky, které jsou označovány jako popel. Pokud se popelovina vystaví vysokým teplotám, může dojít k jejímu měknutí, případně až k jejímu tavení. Natavená popelovina se může začít nalepovat na stěny spalovací komory, spékat do velkých kusů, čímž se brání správnému vyhoření hořlaviny. Nejnižší kritickou teplotou je teplota měknutí, jejíž hodnota je pro smrkové dřevo 1448 °C, avšak takto vysoká teplota je v lokálních topeništích, jako jsou krbová kamna, nedosažitelná. U biomasy je také třeba brát v úvahu teplotu sintrace, při které dochází ke změnám v krystalické mřížce popeloviny. Tato teplota je mnohem nižší než teplota měknutí, u smrkového dřeva odpovídá 695 °C. Důsledkem změn krystalické struktury je spékání částic a může dojít k zhutnění práškové hmoty, což je také především problém vysoko výkonových zdrojů. Popelovina, díky svému malému obsahu ve dřevě 0,2 – 1 %<sub>hm</sub>, nízkým spalovacími teplotám a spalování kusového paliva neovlivňuje takovým způsobem spalovací proces jako voda. [3, 4, 5]

Voda v palivu ovlivňuje spalovací proces velmi výrazně. Již při přiložení do ohniště dochází k jejímu odparu. S vyšším obsahem vody se prodlužuje její odpar a zpožďuje zapálení hořlaviny. Samotné odpařování je děj endotermický, tzn. voda vstřebává teplo ze spalování, aby mohla zvýšit svou teplotu a odpařit se. To má

za následek snížení teploty ve spalovací komoře, zvýšení komínové ztráty a snížení výhřevnosti paliva - Obr. č. 2.1. Jelikož má voda velkou měrnou tepelnou kapacitu, přibližně  $4,2 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  a ještě větší výparné teplo  $2453 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , již při malém množství odpařené vody výrazně navyšuje komínovou ztrátu. Protože voda v čerstvě vytěženém dřevě může zaujímat až 50 % hmotnosti, je vždy snaha toto procento snížit. V zásadě to není těžké, jelikož volně ložené dřevo na vzduchu na zastřešeném místě, sníží již za dva roky vlhkost přibližně na 20 %<sub>hm</sub>, což už je příznivější hodnota pro dřevo určené k vytápění. Další snížení vody by již bylo energeticky náročnější, protože palivo také obsahuje vodu, která je kapilárně vázaná a k jejímu vysušení je třeba vystavit palivo teplotám nad  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pokud se spaluje velmi vlhké palivo, má to také vliv na rosný bod, který se s vyšším obsahem vody ve spalinách snižuje, tedy již při nižších teplotách může dojít ke kondenzaci vodních par v komíně a následné korozi. S rostoucím obsahem vody se navyšuje obsah nespálených hořlavých látek ve spalinách, jako je oxid uhelnatý a dehtové páry. Voda v palivu tedy způsobuje snížení výhřevnosti paliva, zvýšenou tvorbu škodlivin obsažených ve spalinách a může mít negativní vliv na spalovací zařízení. [3, 4, 5, 6, 7, 12]



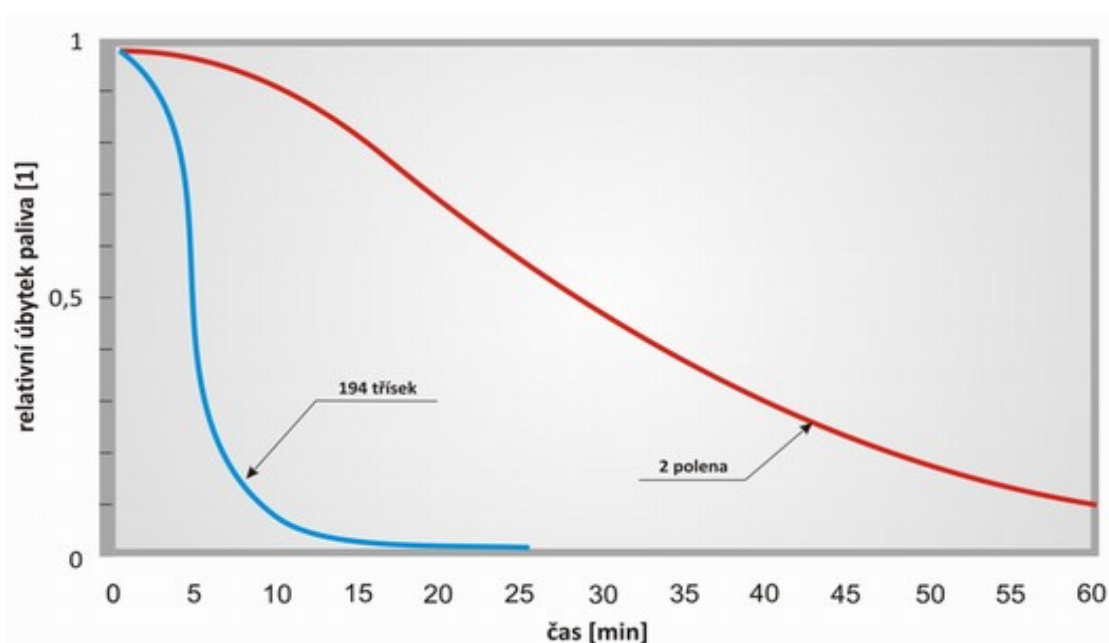
Obr. č. 2.1: Vliv vody ve dřevě na jeho výhřevnost [12]

## 2.2 Další vlivy na spalování

Spalovací proces je výrazně ovlivněn složením paliva. Pokud by se přivedlo k palivu stechiometrické množství vzduchu, veškerá hořlavina by se přeměnila v  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . V takovém případě by se ve spalinách nenacházel žádný kyslík a uvolnila se veškerá chemicky vázaná energie v palivu. Ale to je pouze teorie. Každá molekula kyslíku by se musela sloučit se svým uhlíkem nebo vodíkem. Muselo by dojít k dokonalému promíchání obou reagentů, což není možné. Ve skutečnosti i vysoko výkonové kotle spalují palivo s přebytkem vzduchu, respektive nedochází k dokonalému promísení obou reagentů. Avšak v těchto zařízeních se nejvíce přibližuje spalování ideálnímu a přebytek vzduchu se může pohybovat kolem  $n = 1,1$ . Malého přebytku vzduchu se dosahuje spalováním jemného prášku, který se mísí se vzduchem již před spalovací komorou a dochází díky konstrukci hořáků k promíchání obou reagentů. V zařízeních malých výkonů, například v krbových kamnech jsou podmínky spalování horší. Kusové palivo se spaluje na roštu, a protože se jedná o velké kusy paliva, jednotlivé atomy obou reagentů se nedokáží dobře promíchat. K procesu hoření dochází pouze na povrchu paliva, kde se molekula kyslíku nemusí vždy dostat. V takovém případě by se uhlík nemusel přeměnit na oxid uhličitý, ale oxidoval by pouze na molekulu oxidu uhelnatého, která by v plynném skupenství odcházela ve spalinách pryč komínem. Jelikož by nedošlo k exotermní reakci kyslíku s oxidem uhelnatým, nedošlo by k uvolnění veškeré možné chemické energie a rostla by ztráta chemickým nedopalem. Oxid uhelnatý není jediným produktem nedostatečného přísunu vzduchu. Ve spalinách také zůstává nevyhořelý vodík a uhlovodíky. Proto je důležité přivádět větší množství vzduchu, než je stechiometrické. S větším množstvím vzduchu roste také množství kyslíku, který je v něm obsažený. Díky přebytku vzduchu se více kyslíku dostane k palivu a dochází k jeho lepšímu vyhoření. I přesto se nezabrání úniku veškerých hořlavých plynů z oblasti hoření. Hořlavina ve spalinách je ve formě plynu, který se lépe mísí se vzduchem, a proto jsou krbová kamna, ale i ostatní spalovací zařízení zkonstruována tak, že se přivádějící vzduch rozděluje na primární a sekundární. U novějších kamen se přivádí i vzduch terciální. Každý přívod vzduchu má pak jiný účel. Primární vzduch se přivádí pod rošt přímo k palivu, kde dodává kyslík uhlíku v palivu. Sekundární vzduch je veden nad palivo, kde podporuje spalování prchavé hořlaviny. Terciální vzduch proudí kolem zadní stěny spalovací komory, kde se ohřívá

a je vyveden do horní části spalovací komory, kde díky své teplotě snižuje chemickou ztrátu dospalováním nevyhořelých plynů. [3, 4, 5, 6, 7, 20]

Je třeba si uvědomit, že každá srážka dvou molekul reagentů nemusí končit reakcí. Dvě molekuly obou reagentů se musí přiblížit dostatečně blízko k sobě a musí jim být dodána dostatečná aktivační energie, aby došlo ke vzájemnému působení elektronů molekul za vzniku molekuly nové. Aktivační energie je dána teplotou ve spalovací komoře. Dostatečná teplota se dosahuje zvýšením rychlosti hoření a snížením přebytku vzduchu, jelikož příliš velké množství vzduchu spalovací komoru ochlazuje. Toto tvrzení je v rozporu s tvrzením o přívodu většího množství vzduchu, aby byl zajištěn dostatečný přísun molekul kyslíku k palivu. Proto by se měl pro každý typ kamen přbytek vzduchu změřit, aby se vědělo, kdy se dosahuje nejlepších výsledků spalování. Například při přebytku vzduchu  $n = 2,5$  se u krbových kamen dosahuje účinnosti přes 70 % s obsahem CO do 0,5 %<sub>obj</sub>. Rychlost hoření je pak dána dostatečnou koncentrací reagentů, v případě lokálních topenišť především zvýšením koncentrace molekul paliva. Toho se dá jednoduše dosáhnout zvětšením měrného povrchu paliva, tedy zvětšením povrchu na hmotnost paliva - Obr. č. 2.2. V praxi se dá jednoduše špalek dřeva naštípat na menší kusy, briketa se může nalámat nebo se rovnou může koupit menší palivo, např. pelety. Pokud se zvětší měrný povrch paliva, dochází k vytvoření nových reakčních ploch pro hoření. [3, 4, 5, 6, 7, 15]



Obr. č. 2.2: Vliv měrného povrchu na průběh spalování [15]

### 2.3 Proces spalování

Začátkem spalovacího procesu se může považovat okamžik přiložení dřeva do spalovací komory krbových kamen. Palivo je umístěno na rošt, kde stále dohořívá uhlík z předchozího přiložení. Jak je napsáno v předchozí kapitole, k hoření paliva je třeba aktivační energie a dostatečný přívod vzduchu. Jelikož se palivo přiložilo do stále žhnoucí vrstvy uhlíku a do vyhřáté spalovací komory, která díky šamotovým cihlám akumuluje teplo, tak je aktivační energie dostatečná. Další podmínka pro hoření je dostatečný přívod vzduchu, proto je třeba po přiložení zvýšit množství primárního vzduchu, který podporuje hoření uhlíkaté vrstvy, čímž se zvýší iniciační teplota. Palivo se zahřívá a dochází k vypařování vlhkosti. Započíná první fáze spalovacího procesu. Dochází k sušení paliva. Po vypaření vody následuje další fáze - uvolnění a hoření prchavé hořlaviny. Tato fáze začíná při ohřátí paliva přibližně na 200 °C. Při této teplotě se začínají rozpadat řetězce biopolymerů ve dřevě, tedy celulózy, hemicelulózy a ligninu. Rozpad těchto řetězců se děje uvnitř paliva, kde nemá přístup spalovací vzduch. K tvorbě prchavé hořlaviny dochází pyrolýzou. Z těchto důvodů je vzniklá prchavá hořlavina tvořena plyny  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , různými uhlovodíky a vodní párou. I přesto, že se tvorba prchavé hořlaviny děje bez přístupu vzduchu, vznikají různé oxidy. Kyslík navázaný na molekuly v prchavé hořlavině pochází z biopolymerů paliva. Vzniklé plyny se dostávají prasklinkami v palivu k jeho povrchu a až po promíchání s dostatečným množstvím vzduchu shoří na  $CO_2$  a  $H_2O$ . V druhé fázi spalování je také třeba zvýšit přívod sekundárního vzduchu, aby veškerá prchavá hořlavina dobře vyhořela. Prchavá hořlavina po promíchání se vzduchem hoří plamenem a vzniklé teplo ještě více ohřívá palivo. Následuje třetí fáze, kdy je teplota paliva natolik velká, že začíná oxidovat fixní uhlík, který odhořívá z povrchu paliva. Poslední fází je pak pouze dohoření fixního uhlíku, na které se přiloží další kus paliva. Důležité je, že popsané fáze spalovacího procesu se překrývají. Pokud by se ve spalovací komoře nacházela dřevní briketa a již by hořela plamenem, například ve dvacáté minutě po přiložení, tak by v tuto minutu probíhaly první tři fáze spalování současně. Na povrchu brikety by již byly teploty přes 400 °C a docházelo by k hoření fixního uhlíku. Ale v polovině poloměru brikety by byla teplota například pouze 200 °C a teprve by se začínala tvořit prchavá hořlavina. V ose brikety by se pak teplota mohla blížit 100 °C, přičemž by se odpařovaly poslední zbytky vlhkosti. [3, 4, 5, 6, 7]

### 3. Termogravimetrická analýza

Při termogravimetrické analýze jsou sledovány změny malé navážky vzorku vážícího do 5 gramů, během jeho zahřívání v inertní nebo v oxidační atmosféře. Výsledkem je křivka průběhu úbytku hmotnosti v závislosti na čase nebo na teplotě. Inertní atmosféra se vytváří dusíkem, při které dochází k pyrolýze vzorku a oxidační atmosféra, která vzniká za přítomnosti kyslíku, představuje proces hoření.

Pro účely vytvoření matematického modelu hoření brikety bylo potřeba zjistit, jak se chová vzorek při zahřívání. Proto proběhlo několik termogravimetrických analýz. Ty měly zjistit teploty, mezi kterými dochází k hmotnostnímu úbytku vzorku a změnám rychlosti úbytku hmotnosti vzorku. Z výsledků analýz by se dalo odečíst množství vody, prchavé hořlaviny, fixního uhlíku a popela v palivu. Dále provedené analýzy měly objasnit, jak je ovlivněno spalování dřevní brikety různou velikostí jejich pilin, stlačením pilin, rychlostí ohřevu vzorku, různou atmosférou a kombinací těchto vlivů. Veškeré termogravimetrické analýzy byly provedeny na analyzátoru STA 499 F1 Jupiter firmy NETZSCH. Tento analyzátor také umožňuje měřit uvolněné a přijaté teplo vzorkem. [16]



Obr. č. 3.1: Analyzátor STA 499 F1 Jupiter [16]



### 3.1 Testovaný vzorek – použité palivo

Palivem vybraným pro tuto analýzu byla dřevní briketa ENERGO TOP vyrobena ze smrkových hoblin. Briketa je osově symetrická a nemá složitý tvar, na rozdíl od špalku dřeva. Díky jednoduchému tvaru bylo modelování a veškeré výpočty jednodušší. Hobliny, ze kterých je briketa vyrobena, jsou dobře promíseny, a proto se dá briketa považovat za homogenní, má v celém objemu stejné složení a vlastnosti. Smrkové dřevo pak obsahuje 42 %<sub>hm</sub> celulózy, 27,3 %<sub>hm</sub> hemicelulózy a 27,4 %<sub>hm</sub> ligninu. Výrobce uvádí hustotu 1250 kg·m<sup>-3</sup>, výhřevnost 18,9 MJ·kg<sup>-1</sup>, obsah popele 0,28 %<sub>hm</sub>, obsah vody 8,2 %<sub>hm</sub>, hmotnost 2,5 kg a průměr 90 mm. Také byl proveden prvkový rozbor testované brikety - Tab. č. 3.1.

Výhřevnost paliva	MJ·kg <sup>-1</sup>	17,26
Uhlík v palivu C <sub>r</sub>	%	46,89
Vodík v palivu H <sub>r</sub>	%	5,91
Dusík v palivu N <sub>r</sub>	%	0,13
Kyslík v palivu O <sub>r</sub>	%	39,95
Síra v palivu S <sub>r</sub>	%	0,03
Voda v palivu W <sub>r</sub>	%	6,50
Popel v palivu A <sub>r</sub>	%	0,59

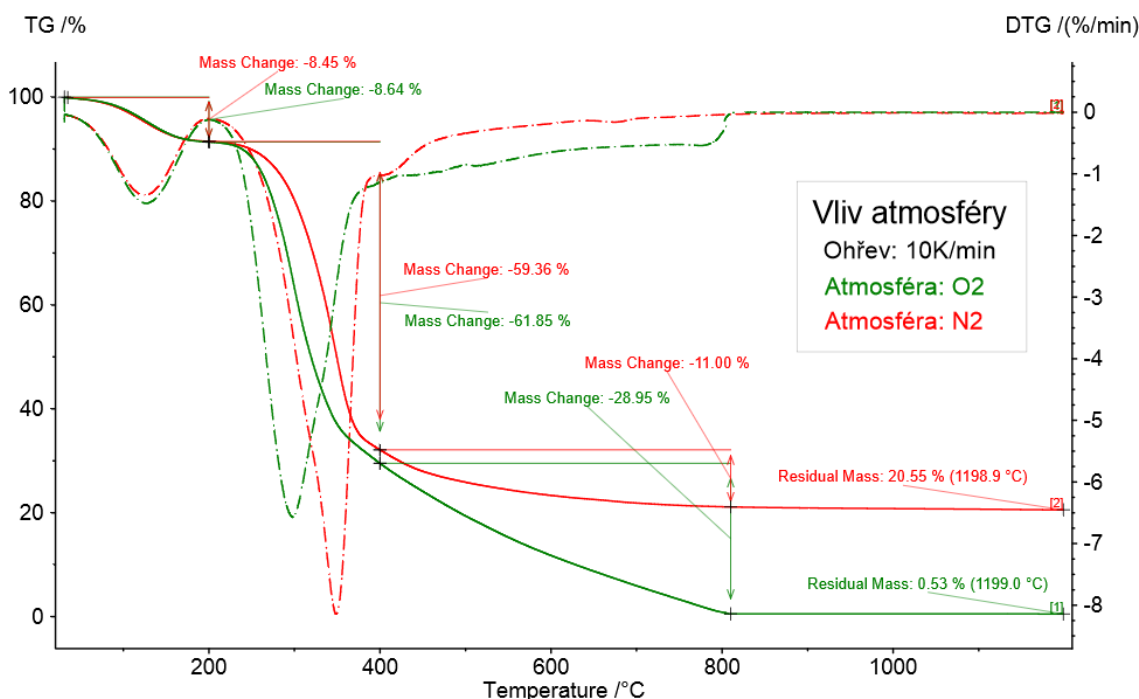
Tab. č. 3.1: Prvkové složení dřevní brikety

### 3.2 Postup a výsledky termogravimetrické analýzy

Při analýze se malé množství vzorku, přibližně půl gramu, vloží do kelímku, který je umístěn na tyčinku s termočlánkem. Tyčinka je zasunuta do stojanu a položena na váhu. Následně je stojan zakryt reakční komorou. Do reakční komory proudí přes otvory plyny, které tvoří reakční atmosféru. Při každé analýze byly použity vždy dvě atmosféry. První byla tvořena 70 ml·min<sup>-1</sup> dusíku, při které docházelo k pyrolýze a druhá byla tvořena 20 ml·min<sup>-1</sup> kyslíku s 50 ml·min<sup>-1</sup> dusíku, který zajišťoval oxidační atmosféru podobnou vzduchu vhodnou pro spalování. Absolutní hmotnostní úbytek znázorňují plné křivky a křivky čerchované představují rychlost úbytku vzorku. Vrcholy

čerchovaných křivek pak ukazují, při jaké teplotě docházelo k nejrychlejší ztrátě hmotnosti.

První měření bylo provedeno s analytickým vzorkem, tzn., že byl vybrán homogenní vzorek nadrcené brikety, který byl následně namletý na částice menší než 315  $\mu\text{m}$ . Tímto měřením se mělo zjistit, jak se vzorek chová při zvýšené teplotě, v jakých teplotních intervalech dochází k hmotnostním úbytkům a kolik vzorku v těchto intervalech ubylo.



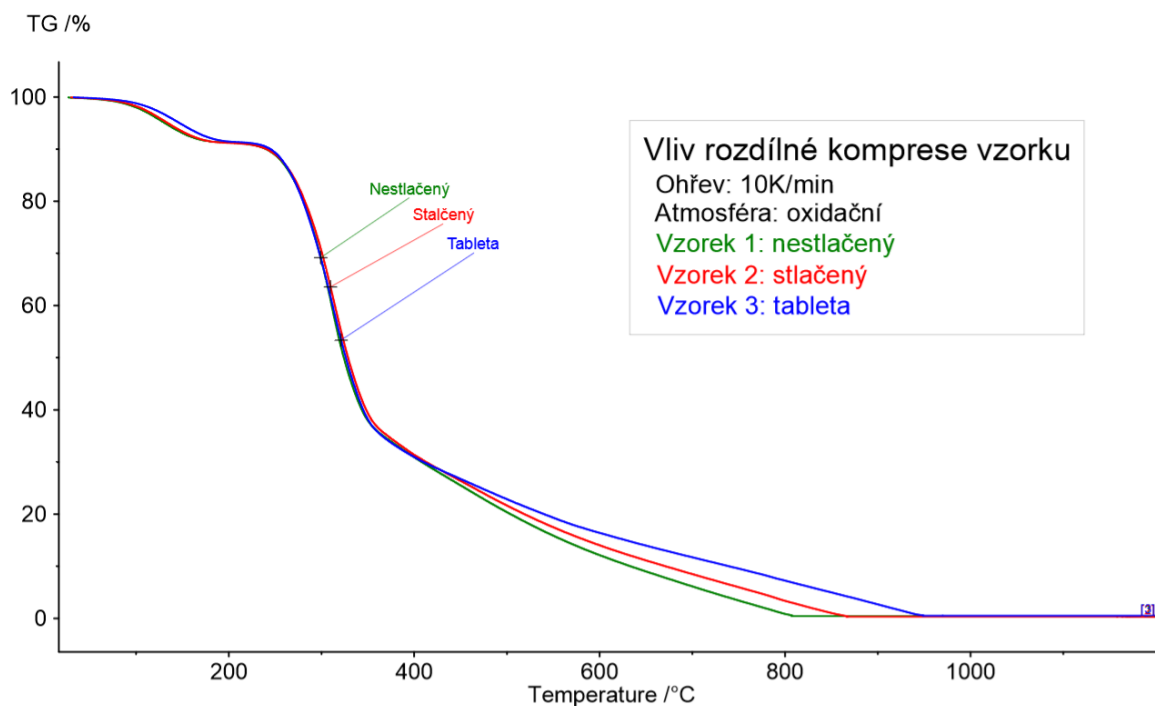
Graf. č. 3.1: Termogravimetrická analýza dřevní brikety

Z grafu vyplývá, že na odpařování vody nemá různá atmosféra vliv. Odpařování vody se děje do 200 °C a nastalo snížení hmotnosti přibližně o 8,5 %<sub>hm</sub>, což odpovídá hodnotám vlhkosti, které udává výrobce brikety. K úbytku 60 % hmotnosti dochází mezi teplotami 200 – 400 °C, kde nastává největší pokles hmotnosti. Jedná se především o rozklad celulózy a hemicelulózy. V tomto intervalu teplot dochází ke tvorbě a uvolnění prchavé hořlaviny. K odchýlení obou křivek dochází již při teplotě 200 °C, což může být zapříčiněno zvýšenou oxidací uhlíku v kyslíkové atmosféře. V teplotním rozmezí 400 – 810 °C dochází k poslednímu rozpadu ligninu a v oxidační atmosféře

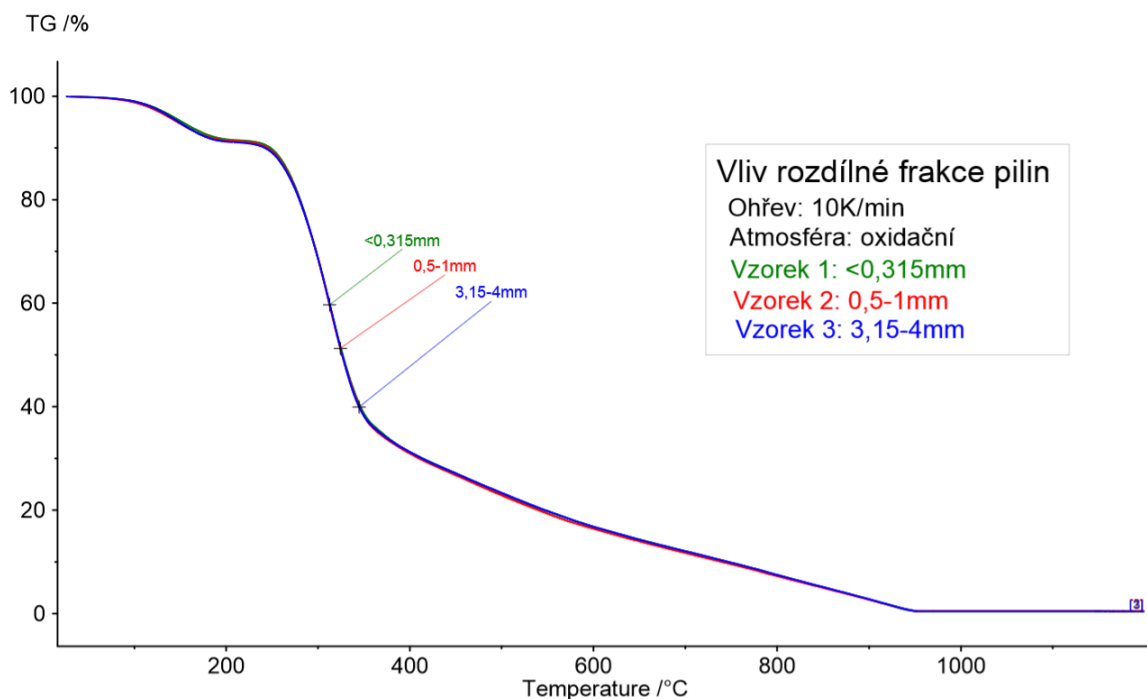
k dohoření uhlíku. Zbylá hmotnost v oxidační atmosféře, přibližně 0,5 %<sub>hm</sub>, odpovídá popelu, která se shoduje s laboratorní hodnotou. V inertní atmosféře se ve zbylém vzorku nachází pouze uhlík a popel.

Lze konstatovat, že při spalování do teploty 200 °C bylo veškerých 8,5 %<sub>hm</sub> vody odpařeno. Mezi teplotami 200 – 400 °C došlo k uvolnění přibližně 59,3 % hmotnosti, což zahrnuje 26,9 %<sub>hm</sub> uhlíku, který se v inertní atmosféře pravděpodobně sloučil s vodíkem nebo s kyslíkem z paliva za vzniku uhlovodíků, oxidu uhelnatého nebo oxidu uhličitého. Zbylých 32,4 % hmotnostního úbytku tvoří vodík a kyslík. Vodík, který se uvolnil také jako prchavá hořlavina, odchází ve formě molekulového vodíku H<sub>2</sub> a jako sloučenina ve formě uhlovodíků. V posledním intervalu teplot 400 – 800 °C se snížila hmotnost vzorku o 31 %, což odpovídá 20 %<sub>hm</sub> uhlíku a 11 %<sub>hm</sub> vodíku a kyslíku. Při teplotě 400 °C se TG křivky výrazně rozcházejí a mohlo by se zdát, že 20 %<sub>hm</sub> uhlíku vyhoří během 400 – 800 °C. Jelikož se uhlík slučuje v inertní atmosféře s vodíkem a kyslíkem, tak se nedá přesně určit, jestli odchylka obou TG křivek skutečně odpovídá 20 %<sub>hm</sub> uhlíku. Proto jsou uvedené hmotnostní úbytky uhlíku pouze přibližné. Důležité je, že se obě křivky v rozmezí teplot 200 – 400 °C, kdy dochází k největšímu tvoření prchavé hořlaviny, příliš nerozcházejí. Prchavá hořlavina se tedy tvoří pyrolýzou dřeva přímo ve vzorku, kde ještě nemá vzduch přístup. Vznikají plyny obsahující H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O a uhlovodíky.

Dřevní briketa, u které byly provedeny výpočty, byla vyrobena z mnoha různě velikých pilin stlačených k sobě. Avšak předchozí analýza byla provedena s volně nasypáním analytickým vzorkem. Proto se uskutečnily další analýzy, aby se zjistilo, jestli se mohou výsledky analýzy přenést na skutečnou briketu. První ověřovací analýza měla ukázat, jak se chová vzorek při různé kompresi. První vzorek byl volně nasypán do TG kelímku, druhý byl do kelímku zatlačen prstem a z třetího vzorku se vyrobila tableta, která byla stlačena silou 3 – 5 tun na plošku o průměru 10 mm. Analýzy byly provedeny se vzorkem s velikostí pilin 0,5 – 1 mm v oxidační atmosféře a ohřevem 10 °C·min<sup>-1</sup>. Druhá ověřovací zkouška testovala vliv různě velkých pilin. První vzorek měl piliny <0,315 mm, druhý 0,5-1 mm a poslední 3,15-4 mm. Všechny tři vzorky při druhé zkoušce byly volně nasypány do kelímku. Zkoušky byly provedeny v oxidační atmosféře s ohřevem 10 °C·min<sup>-1</sup>.



Graf. č. 3.2: Vliv komprese vzorku na průběh TGA



Graf. č. 3.3: Vliv rozdílné frakce pilin na průběh TGA

Z průběhů TG křivek v grafu - Graf. č. 3.2 lze vidět, že na odpaření vlhkosti a na odplynění vzorku nemá komprese vliv. K rozdílnému průběhu křivek dochází až

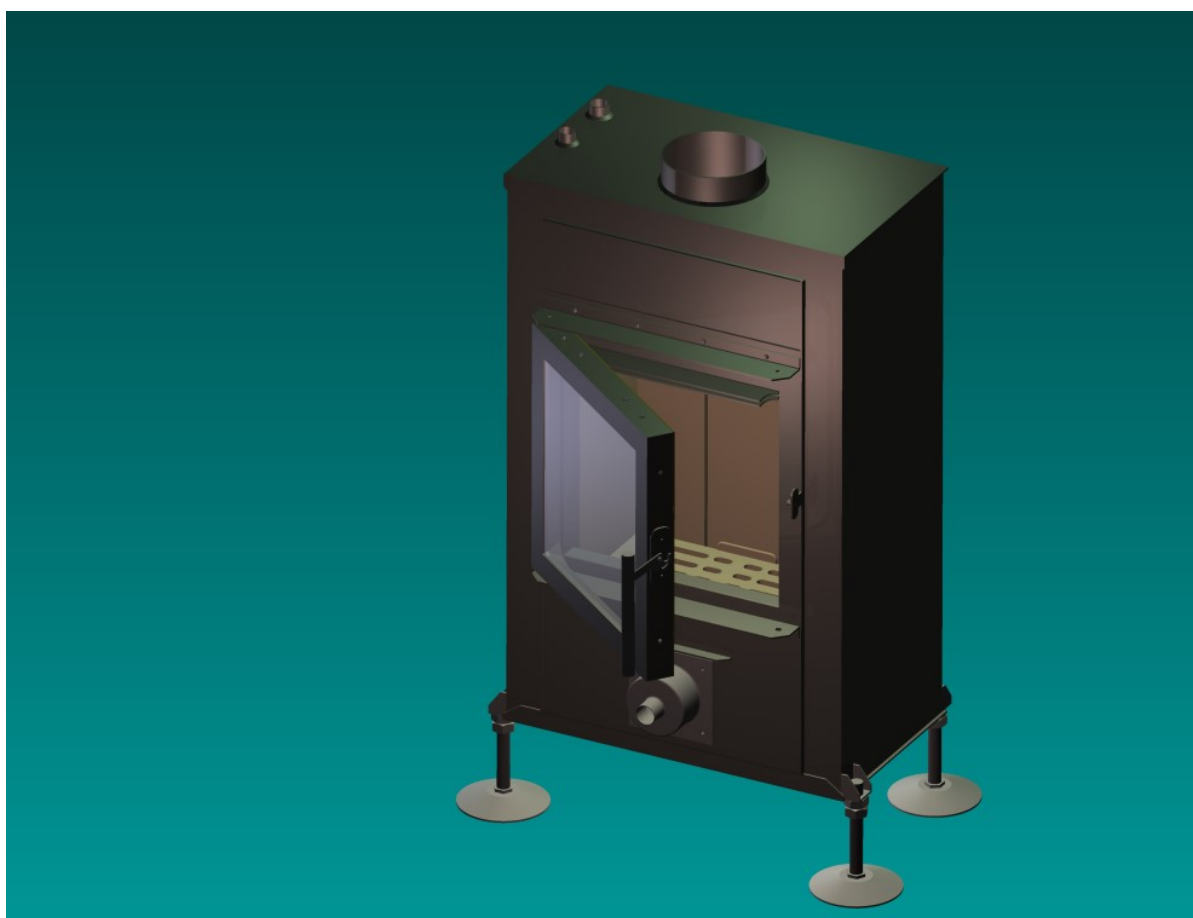
nad teplotou 400 °C, kdy pouze vyhořívá uhlík. Nejvíce stlačený vzorek dohořívá nejpomaleji. Ale pouze rozdílná doba vyhoření nemá na výpočty v této práci vliv. Z druhého grafu - Graf. č. 3.3 vyplývá, že rozdílná velikost pilin nemá žádný vliv na celý průběh TG křivek. Z obou zkoušek lze vyvodit, že se mohou výsledky z termogravimetrické analýzy aplikovat na skutečnou briketu.

#### 4. Spalovací zkoušky

Cílem spalovacích zkoušek bylo stanovit optimální nastavení podmínek spalovacího procesu. Mezi ně patří množství spalovacího vzduchu, poměr primárního a sekundárního vzduchu, přebytek vzduchu, množství paliva a měrný povrch paliva. Dalším cílem bylo stanovit hmotnostní úbytek elementárních prvků paliva ze složení spalin a měření úbytku hmotnosti brikety v průběhu spalovacího procesu.

##### 4.1 Popis měřicí tratě

Spalovací zkoušky proběhly na teplovodní krbové vložce, která byla upravena pro potřeby měření - Obr. č. 4.1. Byla odstraněna původní regulace primárního a sekundárního vzduchu a byla nahrazena napevno přivařenými trubkami. Trubky zajišťovaly úplné oddělení primárního a sekundárního vzduchu. Do levého boku byly vyřezány dva otvory, do kterých byly zasunuty dva termočlánky, kterými byly v průběhu zkoušek měřeny teploty ve spalovací komoře.



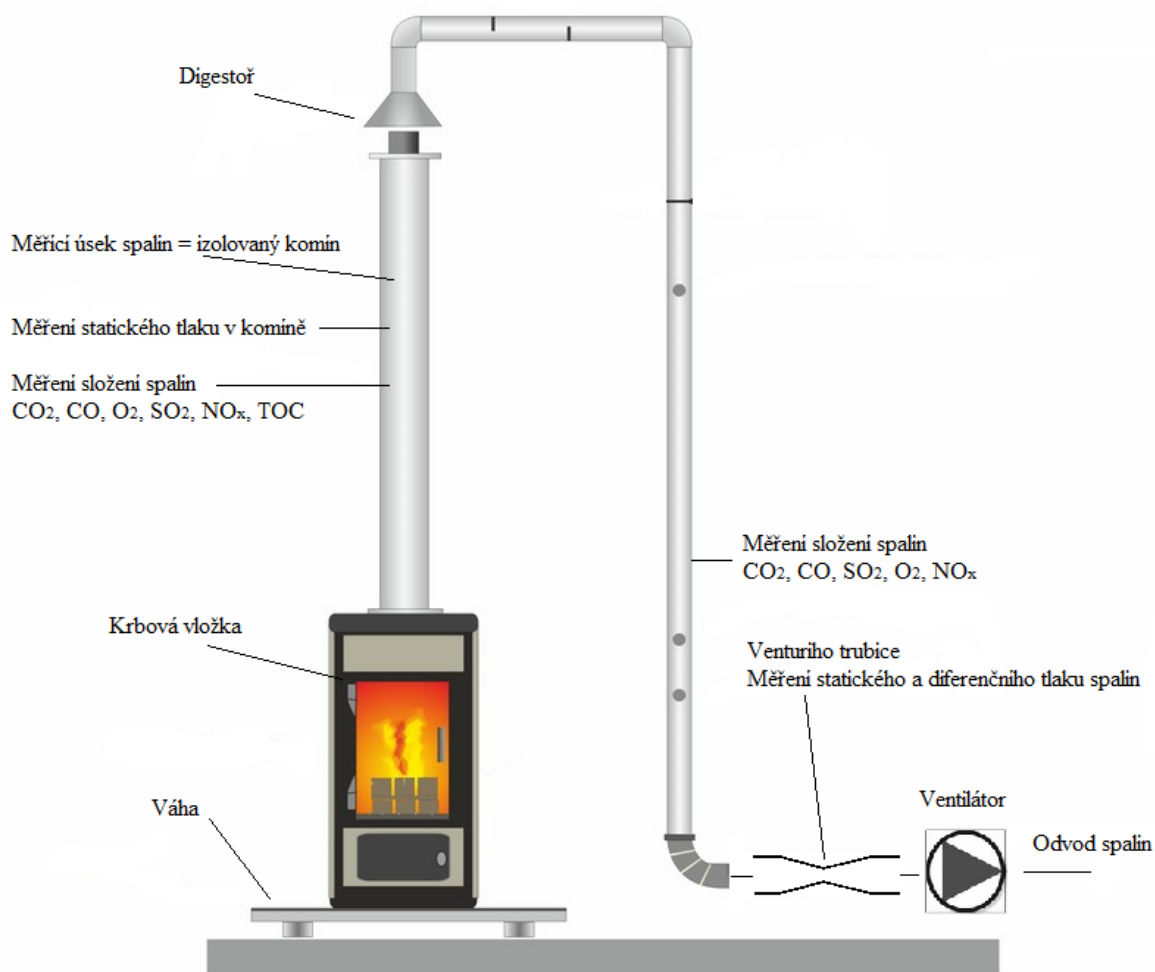
Obr. č. 4.1: Model krbové vložky

Krbová vložka byla napojena na vychlazovací okruh, který odváděl vzniklé teplo během spalovacího procesu - Obr. č. 4.2. Vzduch byl přiváděn z kompresoru dvěma hadicemi, zvlášť do primárního přívodu vzduchu a zvlášť do sekundárního. Vzduch byl také veden přes regulační ventily a dva plynoměry. Proto se mohlo přesně dávkovat požadované množství primárního a sekundárního vzduchu.



*Obr. č. 4.2: Měřicí trať*

Krbová vložka byla postavena na mostové váze, která snímala váhu celé sestavy v průběhu zkoušek. Odvod spalin byl řešen vývodem do izolovaného komínu, na kterém se měřily emise  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{TOC}$  a uhlovodíků. V tomto místě se měřil statický tlak a teplota spalin. Vývod spalin z izolovaného komínu byl napojen přes digestoř na ředící tunel, ve kterém bylo také měřeno složení spalin a teploty. Za ředícím tunelem byla připojena Venturiho trubice pro měření objemového toku spalin, ve které se měřil statický a diferenční tlak. Podtlak v komínu a rovnoměrný odtah spalin byl zajištěn ventilátorem. Schéma měřící tratě na obrázku - Obr. č. 4.3.



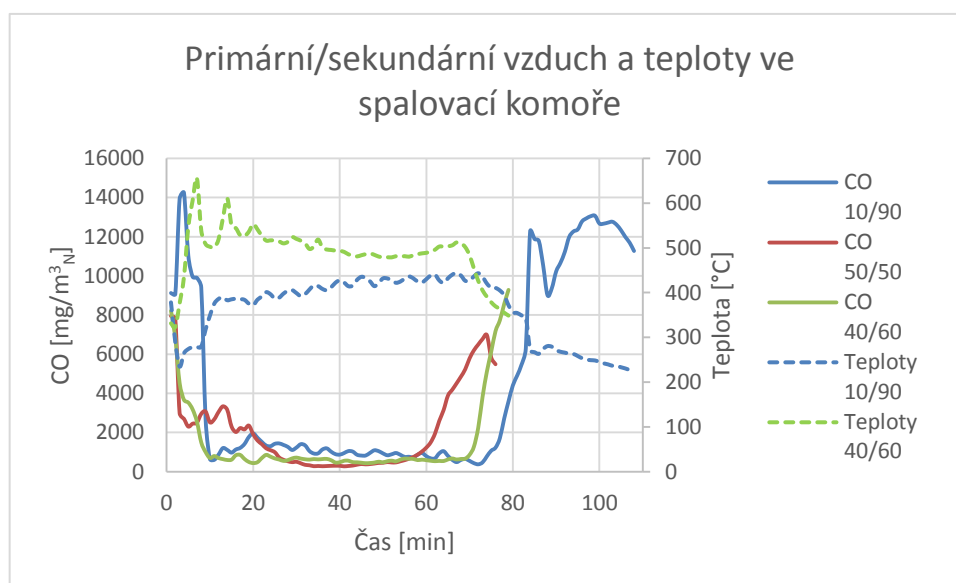
Obr. č. 4.3: Schéma měřící tratě

#### 4.2 Stanovení optimálních podmínek spalování

Jednou ze základních podmínek spalování je optimální množství spalovacího vzduchu a jeho správné rozdělení mezi primární a sekundární přívod. Množství vzduchu



při spalovacích zkouškách bylo nastaveno tak, aby se koncentrace kyslíku ve spalínách pohybovala kolem 11 - 13 %<sub>obj</sub>, tedy přebytek vzduchu  $n = 2,1 - 2,6$ . Pro správný poměr primárního a sekundárního vzduchu byly provedeny spalovací zkoušky. Testovalo se rozdělení v poměru primární/sekundární vzduch 10/90, 50/50 a 40/60 %<sub>obj</sub>. Rozhodovacím kritériem pro optimální poměr bylo množství CO ve spalínách, doba vyhoření brikety a teplota ve spalovací komoře. Tyto parametry ukazují, zda je dostatečný přísun kyslíku do správného místa spalovací komory a jestli je intenzita hoření ideální.



Graf. č. 4.1: Optimální nastavení poměru primárního a sekundárního vzduchu

Z grafu - Graf. č. 4.1 vyplývá, že pouze 10 %<sub>obj</sub> primárního vzduchu způsobuje o 30 minut delší hoření. Při tak malém množství primárního vzduchu nedochází k dokonalé oxidaci uhlíku, což vede ke špatnému uvolnění energie a teploty ve spalovací komoře jsou oproti dalším testovaným poměrům nižší, a to především při rozhořívání. Z hlediska emisí CO poměr primárního a sekundárního vzduchu 50/50 a 40/60 vycházel v průběhu hoření mezi 20 – 60 minutou spalovací periody přibližně stejně. Ale do 20 minuty vychází poměr 40/60 mnohem lépe, protože pro správné vyhoření prchavé hořlaviny je potřeba více sekundárního vzduchu, který je přiváděn nad briketu do uvolněné prchavé hořlaviny. Také při dohořívání vycházejí emise CO lépe pro poměr 40/60. Průměr emisí CO byl také nejnižší u poměru 40/60. Proto byl pro další zkoušky

zvolen poměr vzduchu 40/60. Ze zkoušek s tímto poměrem byly výsledky použity pro další výpočty.

Dalším parametrem, který ovlivňoval spalovací proces a byl zahrnut do spalovacích zkoušek, byl měrný povrch paliva. Zvětšení měrného povrchu brikety se provedlo jejím rozlomením na dvě půlky, které byly umístěny vedle sebe na rošt. Z grafu - Graf. č. 4.2 vyplývá, že změna měrného povrchu výrazně neovlivnila množství emisí CO ve spalínách. Také doba vyhoření brikety a teplota ve spalovací komoře se zásadně neměnila. I přesto, že zvětšení měrného povrchu paliva vede k intenzivnějšímu hoření, tak rozlomením brikety pouze na dvě půlky se měrný povrch výrazně nezvětší. Aby došlo ke změně emisí CO, případně změny teploty ve spalovací komoře, bylo by nutné briketu rozdělit na více menších částí. Jelikož emise CO, teplota ve spalovací komoře a doba vyhoření byly dostačující i s celou briketou, tak se další zkoušky prováděly s nedělenou briketou. Dalším důvodem pro použití celé brikety byla jednodušší tvorba matematického modelu.

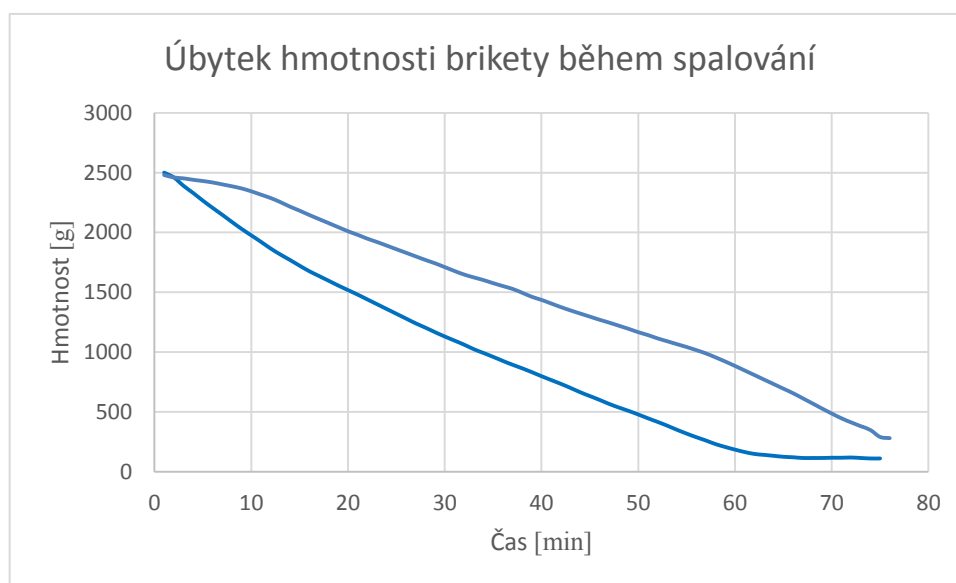


Graf. č. 4.2: Zvětšení měrného povrchu brikety

#### 4.3 Měření úbytku hmotnosti brikety během spalování

V průběhu spalovacího procesu byl úbytek hmotnosti brikety měřen mostovou vahou. Měření probíhalo tak, že se krbová vložka umístila na váhu, která snímala hmotnost během průběhu celé zkoušky v gramech s přesností na dvě desetinná místa.

Počátek jedné periody spalování brikety byl ve chvíli přiložení. Dřevní briketa se umístila již na rozžhavené uhlíky, které zbyly z předchozího zatápní. Ještě před přiložením brikety se v krbové vložce spalovalo kusové dřevo, aby došlo k prohřátí krbové vložky a ohřátí vody ve výměníku. Konec zkoušky byl ve chvíli, kdy se hmotnost vrátila na hodnotu před přiložením, případně tehdy, kdy se již delší dobu hmotnost neměnila. Provedlo se několik měření a výsledné křivky úbytku hmotnosti měly všechny podobný, přibližně lineární charakter. Výsledné křivky ze všech zkoušek se nacházely v oblasti mezi dvěma křivkami v grafu - Graf. č. 4.3.

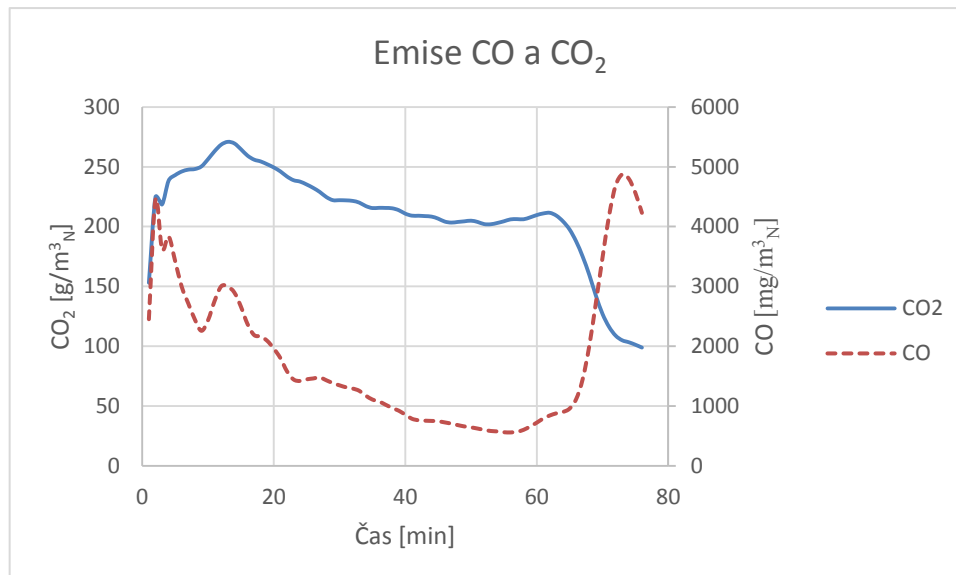


Graf. č. 4.3: Úbytek hmotnosti brikety během spalování

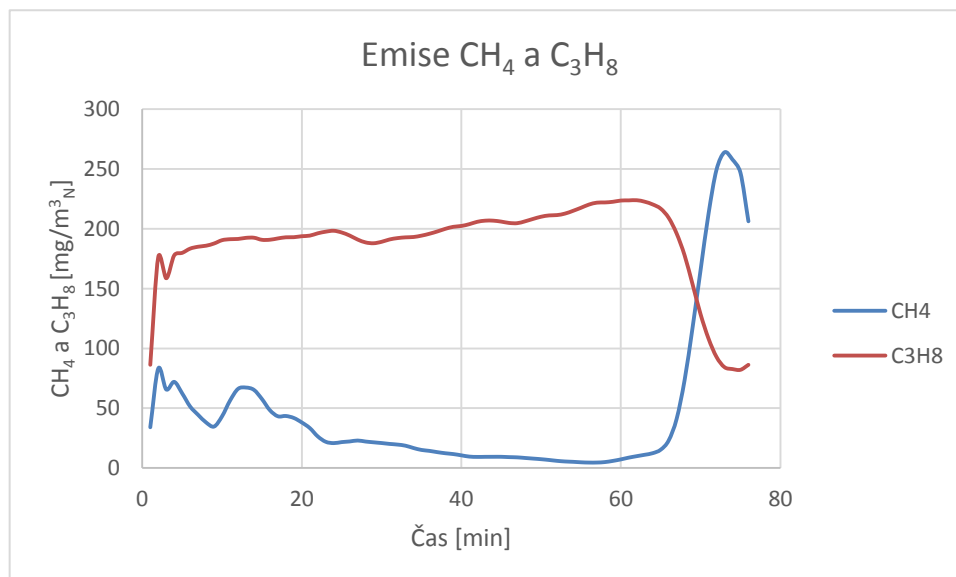
#### 4.4 Úbytek hmotnosti uhlíku určený z emisí

Spaliny vzniklé spálením brikety obsahují řadu různých plynů, ať už v malém nebo větším množství. Avšak pro stanovení hmotnostního úbytku uhlíku z brikety je třeba znát pouze plyny, které obsahují uhlík. Těmito plyny jsou oxid uhelnatý, oxid uhličitý a uhlovodíky - Graf. č. 4.4 a Graf. č. 4.5. Jelikož spalovací vzduch neobsahuje CO, ani uhlovodíky a pouze zanedbatelné množství CO<sub>2</sub>, tak veškeré plyny ve spalinách obsahující ve svých molekulách uhlík, musely vzniknout reakcí vodíku nebo kyslíku s uhlíkem z paliva. Samotný přepočítání emisí na hmotnostní úbytek uhlíku z paliva spočívá ve zjištění hmotnosti atomů uhlíku ve všech molekulách zmíněných plynů obsažených ve spalinách. Pak součet hmotnosti těchto atomů uhlíku se rovná úbytku hmotnosti brikety. Veškeré výpočty v této kapitole jsou provedeny pro každou minutu

spalovacího procesu, s výsledky uvedenými v diagramech. Do rovnic jsou dosazeny hodnoty pro 20 minutu spalovacího procesu, protože se v této minutě dělal matematický model v programu ANSYS Fluent. Tato minuta byla zvolena z toho důvodu, že se již dřevní briketa dostatečně rozhořela a spalovací proces se ustálil.



Graf. č. 4.4: Emise CO a CO<sub>2</sub>

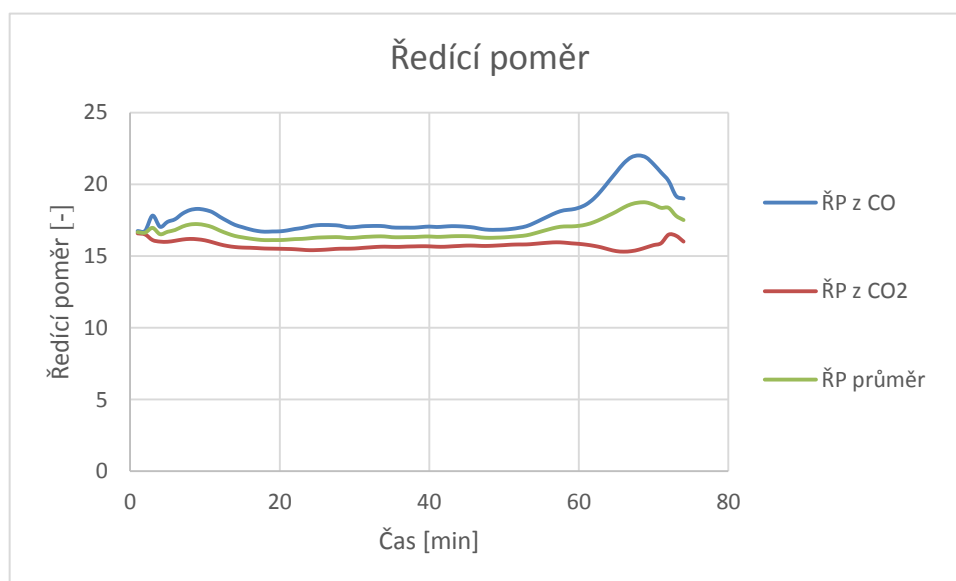


Graf. č. 4.5: Emise uhlovodíků

Protože po celou dobu spalovací periody bylo nastaveno konstantní množství spalovacího vzduchu, lze z emisí CO poznat, jak lépe regulovat přiváděný vzduch

v průběhu celé periody. V prvních dvaceti minutách dochází k uvolnění většího množství prchavé hořlaviny, která obsahuje CO. Pokud by bylo přivedeno větší množství spalovacího vzduchu k prchavé hořlavině, došlo by k lepšímu vyhoření oxidu uhelnatého a snížení jeho množství ve spalinách.

Koncentrace plynů ve spalinách byly měřeny za krbovou vložkou v gramech nebo miligramech na metr krychlový normální spalin. Aby mohl být zjištěn hmotnostní úbytek uhlíku, musely se koncentrace plynů přepočítat na jejich objemový tok. Tento výpočet vycházel z objemového toku spalin, který se měřil Venturiho trubicí za ředícím tunelem. Jelikož se spaliny v ředícím tunelu mísily se vzduchem, musel se provést přepočet objemového toku spalin v ředícím tunelu na objemový tok spalin v měřicím úseku za krbovou vložkou. Přepočet byl proveden ředícím poměrem, který byl zjištěn z poměru emisí CO a CO<sub>2</sub> měřených za krbovou vložkou a v ředícím tunelu. Jelikož spalovací vzduch byl přiváděn z kompresoru a byl po celou dobu konstantní, byl přibližně konstantní také ředící poměr - Graf. č. 4.6. Ředící poměr z CO a z CO<sub>2</sub> se mírně lišil, a proto se dále počítalo s jeho průměrnou hodnotou.



Graf. č. 4.6: Ředící poměr

Ředící poměr z CO a CO<sub>2</sub>

$$\check{R}P = \frac{CO_K}{CO_{\check{R}T}} \cong \frac{CO_{2K}}{CO_{2\check{R}T}} \quad [1] \quad (1)$$

$$\check{R}P = \frac{2171,5}{123,4} = 17,6 \cong \frac{254,2}{15,7} = 16,2$$

kde	$CO_K$	koncentrace CO za kotlem	$[mg \cdot m_n^{-3}]$
	$CO_{\dot{R}T}$	koncentrace CO v ředícím tunelu	$[mg \cdot m_n^{-3}]$
	$CO_{2K}$	koncentrace $CO_2$ za kotlem	$[g \cdot m_n^{-3}]$
	$CO_{2\dot{R}T}$	koncentrace $CO_2$ v ředícím tunelu	$[g \cdot m_n^{-3}]$

Aby mohl být objemový tok spalin v ředícím tunelu přepočten na objemový tok spalin za krbovou vložkou, tzn. aby mohl být podělen ředícím poměrem, musel se tento objemový tok přepočítat na normální podmínky, protože byl ředící poměr vypočten z emisí, které byly vztaženy na normální podmínky. Jelikož spaliny měly vyšší teplotu než je teplota okolí, při přepočtu na normální podmínky, tedy na tlak 101325 Pa a teplotu 0 °C, došlo k zmenšení jejich objemu.

Objemový tok spalin v ředícím tunelu za normálních podmínek

$$\dot{V}_{SP,\dot{R}T,N} = \dot{V}_{SP,\dot{R}T} \cdot \frac{p_{SP,\dot{R}T}}{p_{SP,\dot{R}T,N}} \cdot \frac{T_{SP,\dot{R}T,N}}{T_{SP,\dot{R}T}} \quad [m_n^3 \cdot \text{hod}^{-1}] \quad (2)$$

$$\dot{V}_{SP,\dot{R}T,N} = 225,8 \cdot \frac{98984,1}{101325} \cdot \frac{273,15}{(273,15+32,8)} = 196,9 \text{ m}_n^3 \cdot \text{hod}^{-1}$$

kde	$V_{SP,\dot{R}T}$	objemový tok spalin v ředícím tunelu	$[m^3 \cdot \text{hod}^{-1}]$
	$p_{SP,\dot{R}T}$	skutečný tlak spalin v ředícím tunelu	[Pa]
	$p_{SP,\dot{R}T,N}$	tlak spalin za normálních podmínek	[Pa]
	$T_{SP,\dot{R}T}$	skutečná teplota spalin v ředícím tunelu	[K]
	$T_{SP,\dot{R}T,N}$	teplota spalin za normálních podmínek	[K]

Nyní se může objemový tok spalin v ředícím tunelu podělit ředícím poměrem a vypočítat průběh objemového toku za krbovou vložkou, který bude vztažen na normální podmínky.

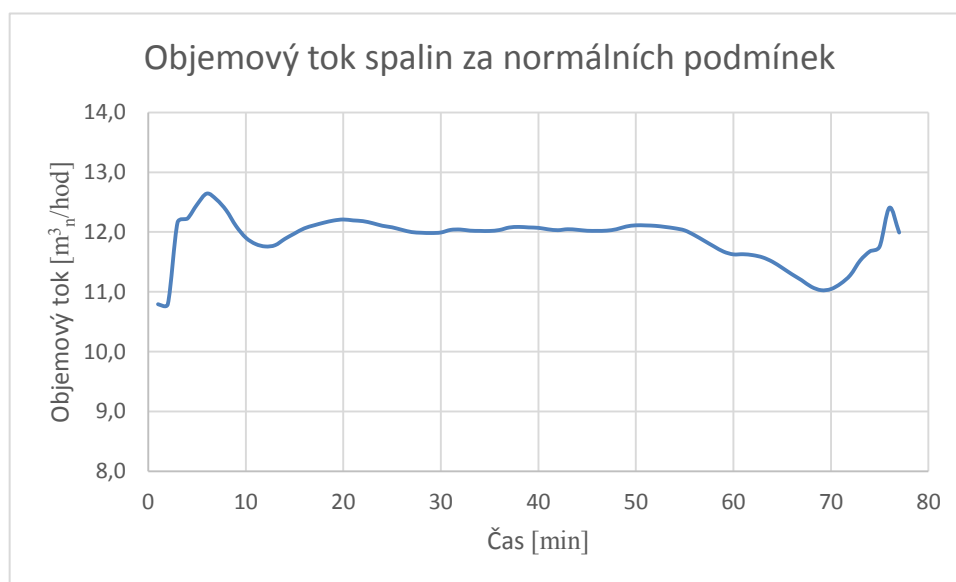
Objemový tok spalin za krbovou vložkou

$$\dot{V}_{SP,N} = \frac{\dot{V}_{SP,\dot{R}T,N}}{\dot{R}P} \quad [m_n^3 \cdot \text{hod}^{-1}] \quad (3)$$

$$\dot{V}_{SP,N} = \frac{196,9}{16,9} = 11,651 \text{ m}_n^3 \cdot \text{hod}^{-1}$$

kde  $\dot{V}_{SP,\check{R}T,N}$  obj. tok spalin v řed. tunelu za norm. p. ze vzorce 2  $[\text{m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}]$   
 $\check{R}P$  ředící poměr ze vzorce 1  $[1]$

Vypočtený tok spalin za kotlem se pohyboval v průběhu celé spalovací periody kolem hodnoty  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , tedy kolem  $12 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  - Graf. č. 4.7. Konstantní tok spalin byl dosažen konstantním příívodem spalovacího vzduchu.



Graf. č. 4.7: Objemový tok spalin

Objemový tok spalin byl vztažen na normální podmínky a koncentrace jednotlivých plynů na normální metr krychlový spalin, proto se mohly vypočítat hmotnostní toky jednotlivých plynů ve spalinách. Jelikož emise i objemový tok spalin byly zaznamenávány každou minutu, byly i jednotlivé hmotnostní toky vztaženy na jednu minutu.

Hmotnostní tok CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> a C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

$$\dot{m}_{\text{CO}} = \frac{\dot{V}_{SP,N}}{60} \cdot \text{CO}_K \quad [\text{g} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4)$$

$$\dot{m}_{\text{CO}} = \frac{11,651}{60} \cdot 2,172 = 0,422 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = \frac{\dot{V}_{SP,N}}{60} \cdot \text{CO}_{2K} \quad [\text{g} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (5)$$

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = \frac{11,651}{60} \cdot 254,2 = 49,390 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_4} = \frac{\dot{V}_{\text{SP,N}}}{60} \cdot \text{CH}_{4\text{K}} \quad [\text{g} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (6)$$

$$\dot{m}_{\text{CH}_4} = \frac{11,651}{60} \cdot 4,51 \cdot 10^{-2} = 0,009 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{\dot{V}_{\text{SP,N}}}{60} \cdot \text{C}_3\text{H}_{8\text{K}} \quad [\text{g} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (7)$$

$$\dot{m}_{\text{C}_3\text{H}_8} = \frac{11,651}{60} \cdot 0,279 = 0,054 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$$

kde  $V_{\text{SP,N}}$  objemový tok spalin za norm. p. ze vzorce 8  $[\text{m}_n^3 \cdot \text{hod}^{-1}]$

$\text{CO}_\text{K}$  koncentrace CO ve spalinách  $[\text{g} \cdot \text{m}_n^{-3}]$

$\text{CO}_{2\text{K}}$  koncentrace  $\text{CO}_2$  ve spalinách  $[\text{g} \cdot \text{m}_n^{-3}]$

$\text{CH}_{4\text{K}}$  koncentrace  $\text{CH}_4$  ve spalinách  $[\text{g} \cdot \text{m}_n^{-3}]$

$\text{C}_3\text{H}_{8\text{K}}$  koncentrace  $\text{C}_3\text{H}_8$  ve spalinách  $[\text{g} \cdot \text{m}_n^{-3}]$

Samotný přepočít hmotnostního toku CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  a  $\text{C}_3\text{H}_8$  na hmotnost uhlíku spočíval ve hmotnosti molekul. Molekula CO má molekulovou hmotnost  $28 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$  a uhlík s molekulovou hmotností  $12 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$  zaujímá v této molekule  $12/28$  hmotnosti. Stejným způsobem se postupovalo s přepočtem u ostatních plynů. Uhlík v molekule  $\text{CO}_2$  zaujímá  $12/44$  hmotnosti, v molekule  $\text{CH}_4$   $12/16$  hmotnosti a v propanu  $\text{C}_3\text{H}_8$   $16/44$  hmotnosti. Výsledný součet hmotnosti atomů uhlíku ze všech plynů se rovná minutovému toku uhlíku ve spalinách, což odpovídá hmotnostnímu úbytku uhlíku z brikety.

Výsledné množství uvolněného uhlíku v každé minutě

$$\dot{m}_\text{C} = \dot{m}_{\text{CO}} \cdot \frac{12}{28} + \dot{m}_{\text{CO}_2} \cdot \frac{12}{44} + \dot{m}_{\text{CH}_4} \cdot \frac{12}{16} + \dot{m}_{\text{C}_3\text{H}_8} \cdot \frac{36}{44} \quad [\text{g} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (8)$$

$$\dot{m}_\text{C} = 0,422 \cdot \frac{12}{28} + 49,39 \cdot \frac{12}{44} + 0,009 \cdot \frac{12}{16} + 0,054 \cdot \frac{36}{44} = 13,702 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$$

kde  $m_{\text{CO}}$  hmotnostní tok CO ze vzorce 4  $[\text{g} \cdot \text{min}^{-1}]$

$m_{\text{CO}_2}$  hmotnostní tok  $\text{CO}_2$  ze vzorce 5  $[\text{g} \cdot \text{min}^{-1}]$

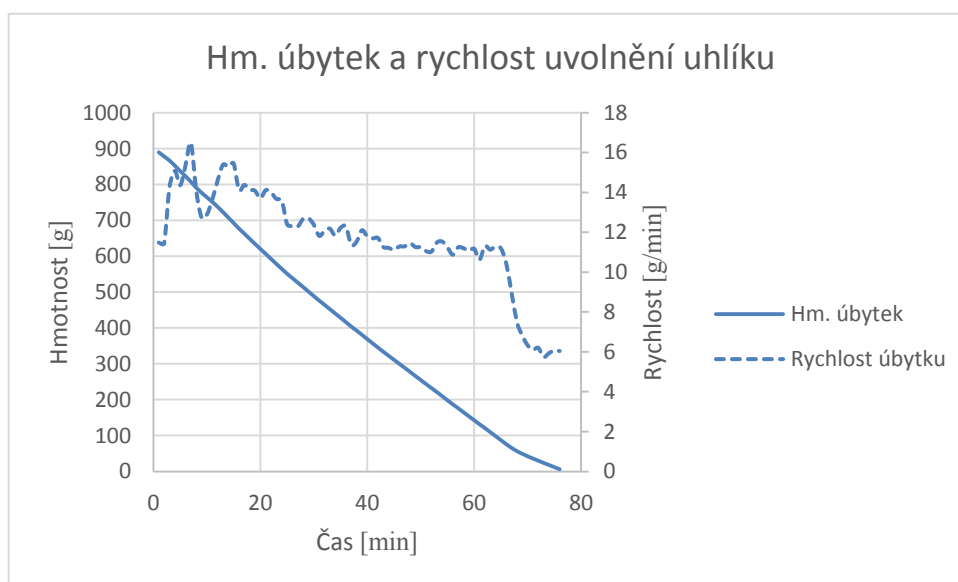
$m_{\text{CH}_4}$  hmotnostní tok  $\text{CH}_4$  ze vzorce 6  $[\text{g} \cdot \text{min}^{-1}]$

$m_{\text{C}_3\text{H}_8}$  hmotnostní tok  $\text{C}_3\text{H}_8$  ze vzorce 7  $[\text{g} \cdot \text{min}^{-1}]$



Z rovnice 8 vyplývá, že ve 20 minutě spalovacího procesu se uvolnilo 13,7 gramů uhlíku. Součtem minutových úbytků z celé spalovací periody se získalo veškeré množství vyhořelého uhlíku z brikety - Graf. č. 4.8.

Křivka hmotnostního úbytku uhlíku vypadá, že má téměř lineární charakter, ale křivka rychlosti jednoznačně ukazuje, že na začátku spalovací periody byla rychlost úbytku uhlíku z brikety nejvyšší a postupně klesala. To může být způsobeno válcovitým tvarem brikety. Jelikož dochází k odhořívání uhlíku od povrchu brikety k její ose, postupně se zmenšuje povrch brikety k jejímu středu, což vede ke zmenšení plochy, kde probíhá vlastní proces hoření. Velký pokles rychlosti v posledních dvaceti minutách je způsoben tím, že došlo k zhasnutí plamene, tedy k dohoření prchavé hořlaviny. Poté dohořival pouze zbylý fixní uhlík.



Graf. č. 4.8: Hmotnostní úbytek a rychlost uvolnění uhlíku z brikety

Stejným způsobem se mělo postupovat při výpočtu hmotnostního úbytku kyslíku a vodíku. Tedy převést koncentrace určitých plynů obsahující kyslík a vodík na hmotnostní tok těchto plynů a přes molární hmotnost molekul z nich vyjádřit hmotnost atomů kyslíku a vodíku. Tento postup byl možný, protože bylo známo přesné množství spalovacího vzduchu, tzn. objem kyslíku. Proto by se mohlo stanovit, kolik navázaného kyslíku v molekulách plynů ve spalinách pochází z paliva a kolik ze vzduchu. Spalovací vzduch byl zbaven vlhkosti, jelikož proudil z kompresoru

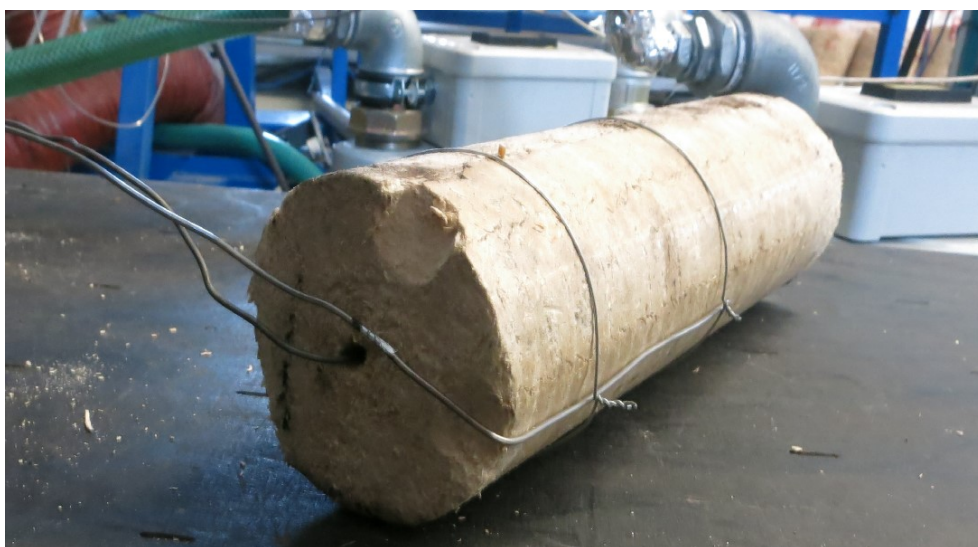
s odlučovačem vlhkosti. Mohlo se tedy říci, že vzniklá pára ve spalinách pochází z brikety. Problém nastal, kdy se muselo určit, zda molekula  $H_2O$  ve spalinách vznikla odpařením vlhkosti nebo oxidací vodíku z paliva. Tato chyba se nemohla zanedbat, jelikož vodík je přibližně devětkrát lehčí než molekula vody. Při zanedbání vzniklého problému mohlo dojít k velké chybě v celkovém úbytku hmotnosti brikety. Proto se přešlo k novému řešení, k vytvoření teplotního modelu dřevní brikety.

## 5. Teplotní model dřevní brikety

Z termogravimetrické analýzy jsou známy intervaly teplot, ve kterých dochází k vypaření vlhkosti z brikety a také intervaly teplot, ve kterých se tvoří prchavá hořlavina, uvolňuje se kyslík a vodík. Pokud by byl znám okamžitý stav teplot v celém objemu brikety v každé minutě spalovacího procesu, mohlo by se stanovit, v jakém čase a v jaké hloubce brikety dosáhne teplota zmíněných teplotních intervalů a dojde k uvolnění vlhkosti a prchavé hořlaviny. Proto se vytvořil teplotní model brikety, který ukazuje, v jaké vzdálenosti od osy, v jaké minutě spalovacího procesu a v jakém množství dochází k uvolnění vlhkosti, vodíku a kyslíku.

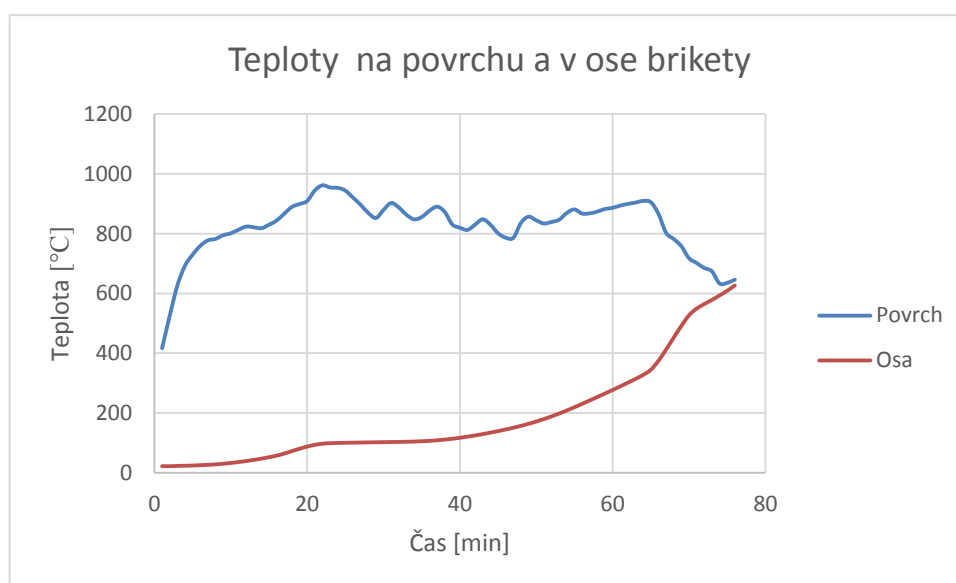
### 5.1 Rozložení teplot v briketě

První úvaha byla zaměřena na změření teploty v ose a na povrchu brikety. Teplotní průběhy mezi povrchem a osou brikety se měly následně doplnit geometrickou řadou v programu Excel. Proto byla první zkouška s měřením teplot zaměřena na stanovení průběhů povrchových teplot a teplot v ose brikety. Teploty byly měřeny termočláňky, které byly připevněny drátky na povrchu brikety a v ose brikety. V ose byl termočlánek umístěn v předvrtaném otvoru - Obr. č. 5.1. Termočláňky zasahovaly až do středu brikety, aby nedošlo k ovlivnění teplot z jejich stran. K ovlivnění teploty z boku brikety nedocházelo, protože je briketa téměř stejně dlouhá jako délka spalovací komory, která měla chlazené stěny. Proto byl prostup tepla k termočláňku v ose brikety rychlejší z jejího povrchu.



Obr. č. 5.1: Umístění termočláňků v ose a na povrchu brikety

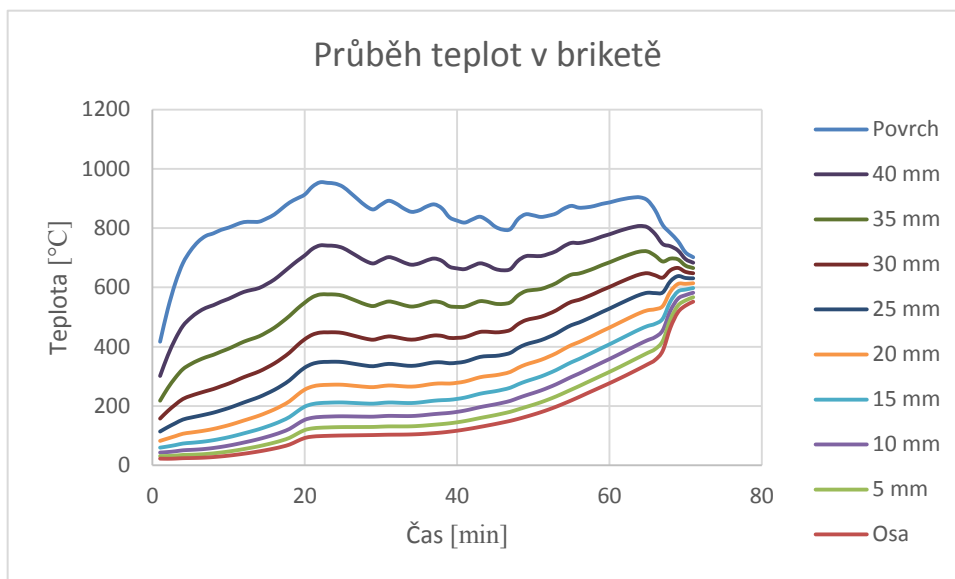
Výsledné naměřené teploty jsou znázorněny v následujícím grafu - Graf. č. 5.1. Z grafu je patrné, že teplota v ose brikety dosáhla 100 °C až po 20 minutě po přiložení. Teplota v ose se začala opět zvyšovat po více než 10 minutách. Tato oblast konstantní teploty je pravděpodobně způsobena vypařováním vlhkosti. Teplota v ose začala opět růst, až byla veškerá voda z tohoto místa odpařena. Proto se může říci, že vlhkost z brikety se vypařuje v průběhu prvních 40 minut spalovacího procesu. Pokles povrchové teploty kolem 70 minuty spalovací periody je způsoben dohořením uhlíku ve vnějších vrstvách brikety, kde byl umístěn termočlánek. Proto termočlánek neležel přímo na žhavé vrstvě hořícího uhlíku, kde dosahovaly teploty nejvyšších hodnot.



Graf. č. 5.1: Naměřené teploty na povrchu a v ose dřevní brikety

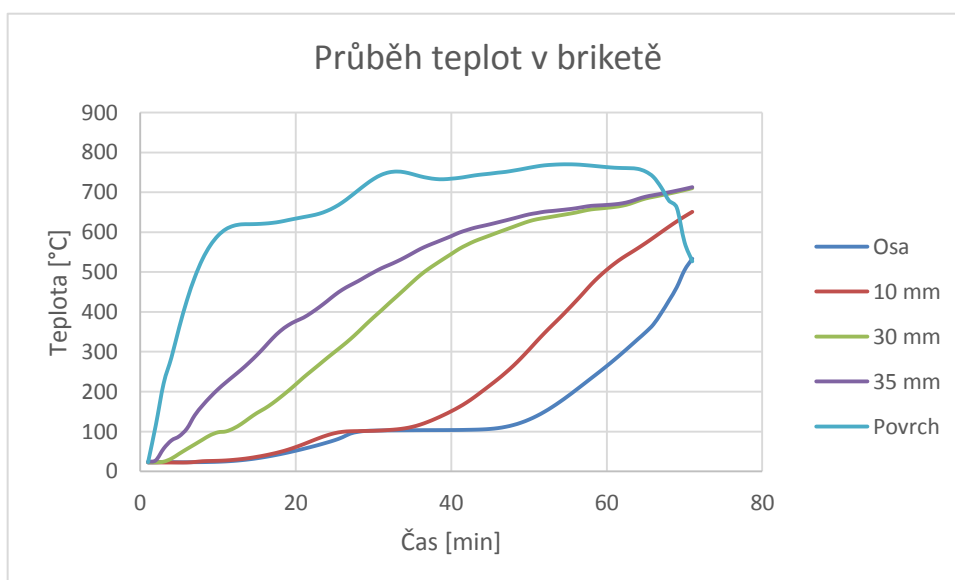
Po změření teplot se v úsecích každých 5 mm po průměru brikety doplnily teploty geometrickou řadou v programu Excel - Graf. č. 5.2. Z diagramu lze vidět, že se charakter naměřených teplot v ose brikety a na jejím povrchu výrazně přenášel do zbývajících teplotních průběhů a z toho důvodu vykazovaly teploty v briketě velkou nepřesnost. Charakter konstantní teploty při 100 °C v ose brikety mezi 20 – 30 minutou, který znamenal vypařování vlhkosti, se přenesl i do dalších teplotních průběhů. K zastavení růstu teploty docházelo dle diagramu po celém poloměru brikety mezi 20 – 30 minutou, což není reálné. Interval konstantní teploty by se ve skutečnosti měl v oblasti blíže povrchu přesouvat k počátku spalovací periody. U povrchu brikety bylo také větší tepelné působení a teplotní interval vypařování by se měl zkracovat.

Mělo by docházet k rychlejšímu ohřevu povrchových oblastí, tedy k větší strmosti křivek. Přesto se pomalý nárůst teplot v ose přenesl do dalších teplotních průběhů.



Graf. č. 5.2: Průběhy teplot v briketě vytvořené geometrickou řadou

Celkově jsou tyto teploty příliš nepřesné, a proto bylo rozhodnuto, že se teploty proměří i po poloměru brikety. Bylo provedeno několik dalších spalovacích zkoušek, při kterých se naměřily teplotní průběhy nejen v ose a na povrchu brikety, ale také 10 mm, 30 mm a 35 mm od osy brikety - Graf. č. 5.3.



Graf. č. 5.3: Naměřené průběhy teplot v briketě

Naměřené teploty mají přirozenější charakter. Již dochází k posouvání oblasti vypařování se zvyšující se vzdáleností od osy. Interval konstantní teploty při 100 °C se také zkracuje. Z toho vyplývá, že se voda v povrchových oblastech brikety vypařuje rychleji než v oblastech blíže k její ose. Průběhy teplot pak mají výrazně jiný charakter, než teploty v minulém případě. Další průběhy teplot ve vrstvách mezi povrchem a osou, které nebyly naměřeny, se nyní neprokládaly geometrickou řadou, ale vypočetly se numerickou metodou z rovnice pro nestacionární vedení tepla.

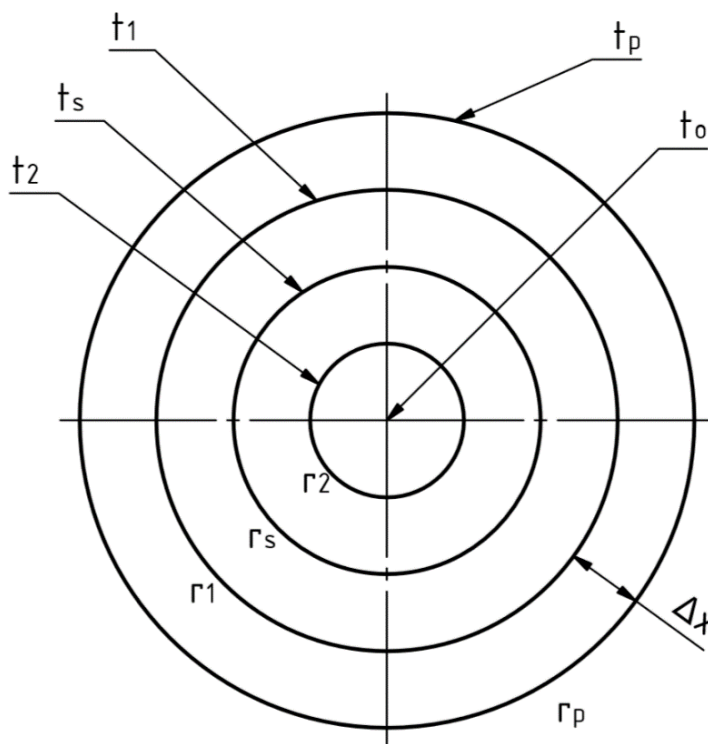
Rovnice vedení tepla pro libovolnou vnitřní vrstvu [8]

$$\frac{c_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot \left[ \left( r_s + \frac{\Delta x}{2} \right)^2 - \left( r_s - \frac{\Delta x}{2} \right)^2 \right]}{\Delta \tau} \cdot (t'_s - t_s) = \frac{\lambda}{\Delta x} \cdot (t_1 - t_s) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_1 + \frac{\lambda}{\Delta x} \cdot (t_2 - t_s) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_2 \quad (9)$$

kde	$c_p$	měrná tepelná kapacita brikety	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
	$\rho$	hustota brikety	[kg·m <sup>-3</sup> ]
	$\Delta x$	vzdálenost mezi výpočtovými vrstvami	[m]
	$\Delta \tau$	časový krok	[s]
	$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
	$r_1$	poloměr předchozí vrstvy	[m]
	$r_2$	poloměr následující vrstvy	[m]
	$r_s$	poloměr výpočtové vrstvy	[m]
	$t_1$	teplota předchozí vrstvy	[°C]
	$t_2$	teplota následující vrstvy	[°C]
	$t_s$	teplota výpočtové vrstvy	[°C]
	$t'_s$	nová teplota výpočtové vrstvy	[°C]

Briketa se rozdělila do 10 pomyslných vrstev po 5 mm, mezi kterými již byly vrstvy s naměřeným teplotním průběhem. Prostor mezi jednotlivými vrstvami vytvářel 5 mm široká mezikruží. Pro výpočet teplotních průběhů se musela z rovnice vedení tepla vyjádřit nová teplota  $t'_s$  výpočtové vrstvy, respektive teplota výpočtové vrstvy v dalším časovém intervalu. Časový interval byl tomto případě byl 60 vteřin, protože se úbytek hmotnosti brikety stanovoval v každé minutě. Nová teplota se počítala ze stávající teploty  $t_s$  výpočtové vrstvy, u které se počítala teplota nová a také vycházela

ze stávajících teplot  $t_1$  a  $t_2$  vrstev před a za vrstvou výpočtovou. Vzdálenost mezi vrstvami  $\Delta x$  byla v tomto případě 5 mm, v jednom případě 10 mm, protože 5 mm od vrstvy již byla teplota naměřená a vzdálenost  $\Delta x$  musela být před i za vrstvou stejná. Následující obrázek znázorňuje rozdělení brikety do vrstev - Obr. č. 5.2. Pro jednoduchost je v obrázku pouze 5 výpočtových vrstev včetně povrchu a osy. [8]



Obr. č. 5.2: Znárodnění rozdělení brikety do výpočtových vrstev

Aby mohla být použita rovnice pro nestacionární vedení tepla, musela být splněna podmínka konvergence řešení. Podmínka, která vychází z předpokladu, že časový krok, který je 60 s, musí být menší než podíl čtverce vzdálenosti a dvojnásobku teplotní vodivosti mezi výpočtovými vrstvami, podmínka byla dle následující rovnice splněna. Hodnoty rovnice byly dosazeny pro stav před začátkem spalovací zkoušky. [8]

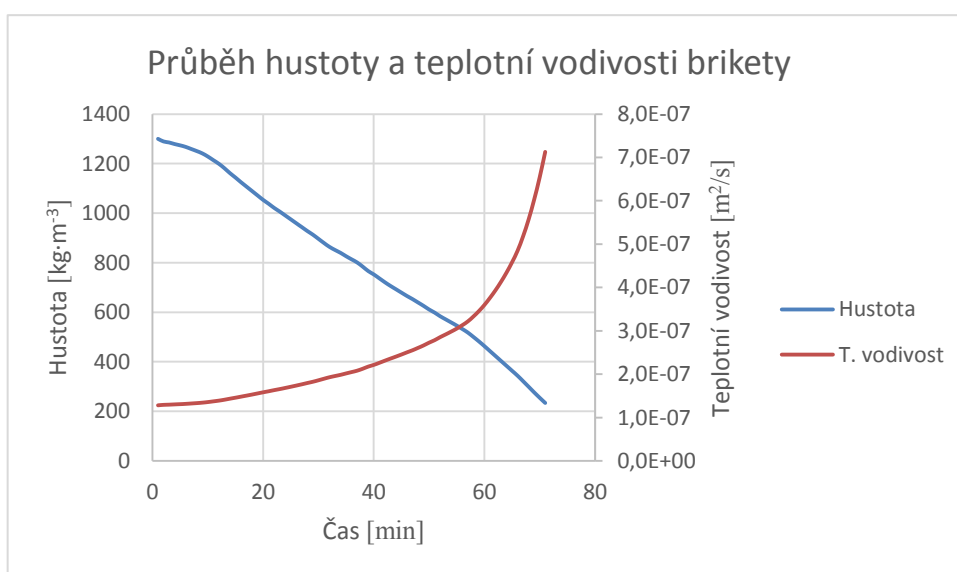
Podmínka konvergence řešení [8]

$$\Delta\tau_{\max} \leq \frac{\Delta x^2}{2 \cdot a} \quad [\text{s}] \quad (10)$$

$$60 \leq \frac{0,005^2}{2 \cdot (1,28 \cdot 10^{-7})} = 97,7$$

kde	$a$	teplotní vodivost ze vzorce 8	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
	$\Delta x$	vzdálenost mezi výpočtovými vrstvami	$[\text{m}]$
	$\Delta \tau$	časový krok	$[\text{s}]$

Teplotní vodivost  $a$ , kterou v sobě zahrnuje rovnice pro výpočet teplot ve vrstvě brikety, tak i rovnice podmínky konvergence vychází z tepelné vodivosti  $\lambda$ , jejíž hodnota je pro dřevo  $0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , z měrné tepelné kapacity  $c_p$ , která je pro stlačené dřevní piliny rovna  $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a z hustoty. Tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita byla převzata z tabulek - Příloha 6 a Příloha 7. Briketa, která byla použita pro spalovací zkoušky, jejíž hustota  $\rho$  byla vypočtena z její hmotnosti a rozměrů, měla hodnotu  $1300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Jelikož se teplotní vodivost mění s hustotou - Graf. č. 5.4 a hustota brikety v průběhu spalování neustále klesá, protože z brikety uniká prchavá hořlavina, byla počítána pro každou minutu spalovacího procesu nová teplotní vodivost s aktuální hustotou brikety.



Graf. č. 5.4: Průběh hustoty a teplotní vodivosti brikety v průběhu spalování

Teplotní vodivost [8]

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

$$a = \frac{0,25}{1300 \cdot 1500} = 1,28 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$



kde	$c_p$	měrná tepelná kapacita brikety	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
	$\rho$	hustota brikety	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
	$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

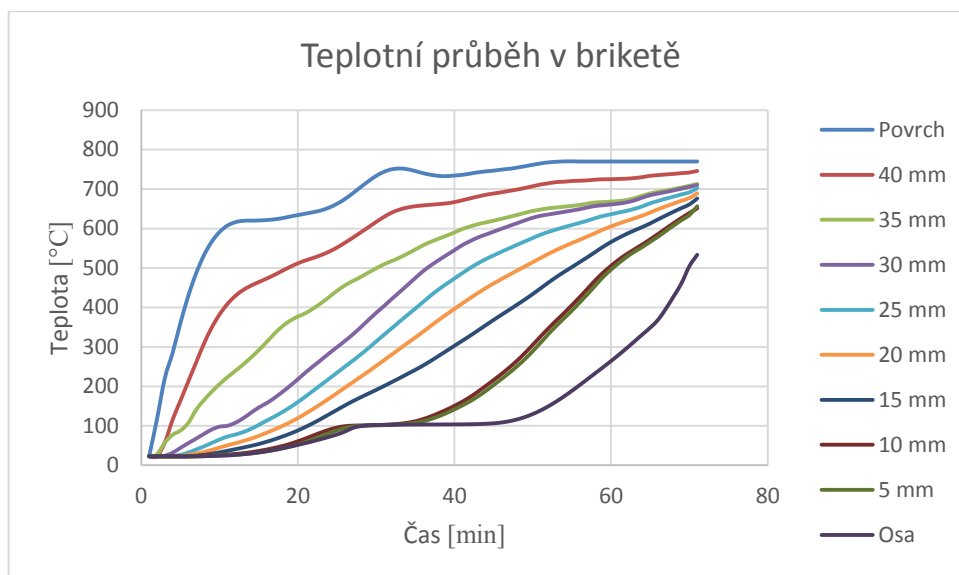
Rovnice pro výpočet nové teploty vrstvy vyjádřené z rovnice pro nestacionární vedení tepla se v nezměněné formě použije pro každou vrstvu, ve které je zapotřebí vypočítat teplotní průběh. Pro názornost jsou do rovnice dosazeny hodnoty ze čtvrté minuty spalovacího procesu, kdy se počítá nová teplota vrstvy, které bude dosaženo v páté minutě spalování. Výpočtová vrstva je vzdálená 40 mm od osy dřevní brikety a teplota v této vrstvě je ve čtvrté minutě 164 °C. Teplota na povrchu brikety, což je 5 mm od výpočtové vrstvy, je 361 °C. Teplota ve vrstvě o 5 mm blíže k ose od výpočtové vrstvy je 88 °C. Dle rovnice 12 je tedy teplota v páté minutě ve vrstvě 40 mm od osy brikety 213 °C.

Nová teplota výpočtové vrstvy

$$t'_s = \left\{ [(t_1 - t_s) \cdot r_1 + (t_2 - t_s) \cdot r_2] \cdot \frac{a \cdot \Delta\tau}{r_s \cdot \Delta x^2} \right\} + t_s \quad [^\circ\text{C}] \quad (12)$$

$$t'_s = \left\{ [(361 - 164) \cdot 0,045 + (88 - 164) \cdot 0,035] \cdot \frac{(1,31 \cdot 10^{-7}) \cdot 60}{0,04 \cdot 0,005^2} \right\} + 164 = 213 \text{ } ^\circ\text{C}$$

kde	$a$	teplotní vodivost ze vzorce 8	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
	$\Delta x$	vzdálenost mezi výpočtovými vrstvami	$[\text{m}]$
	$\Delta\tau$	časový krok	$[\text{s}]$
	$r_1$	poloměr předchozí vrstvy	$[\text{m}]$
	$r_2$	poloměr následující vrstvy	$[\text{m}]$
	$r_s$	poloměr výpočtové vrstvy	$[\text{m}]$
	$t_1$	teplota předchozí vrstvy	$[\text{ } ^\circ\text{C}]$
	$t_2$	teplota následující vrstvy	$[\text{ } ^\circ\text{C}]$
	$t_s$	teplota výpočtové vrstvy	$[\text{ } ^\circ\text{C}]$



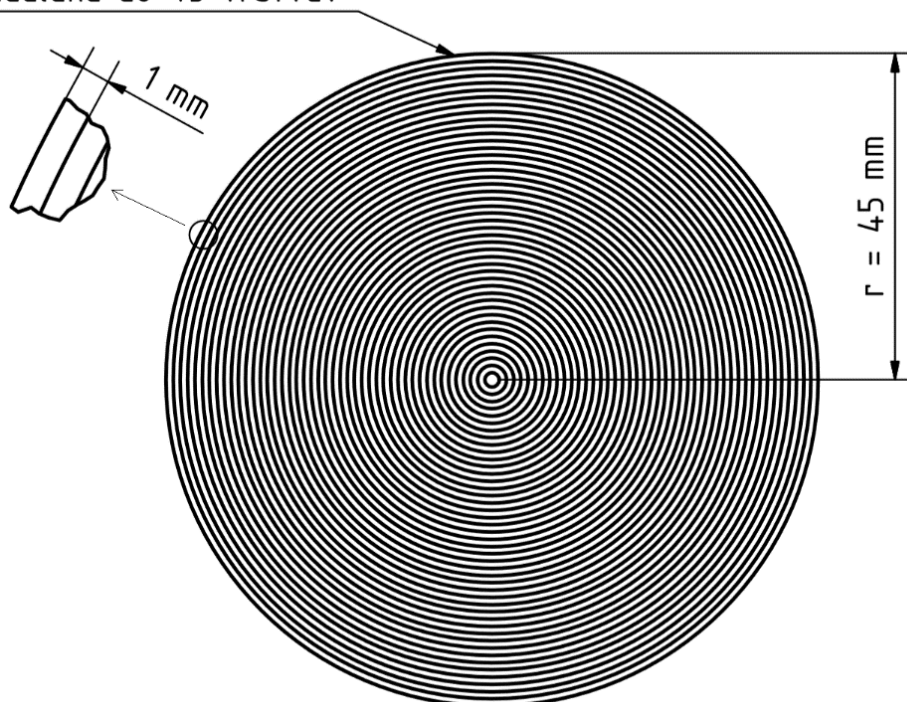
Graf. č. 5.5: Teplotní průběhy v dřevní briketě

Vypočtené teplotní průběhy jsou mnohem přesnější než v předchozím případě - Graf. č. 5.2, jelikož rovnice nevychází pouze z teploty povrchové a teploty v ose, ale rovněž z teplot, které byly naměřeny po poloměru brikety. Takto jsou vždy počítány teploty mezi již naměřenými teplotami. Rovnice 12 také zohledňuje hustotu brikety, její tepelnou vodivost a měrnou tepelnou kapacitu. Nyní jsou známy teplotní průběhy v 5 mm vrstvách po celém poloměru brikety - Graf. č. 5.5

## 5.2 Stanovení hmotnostního úbytku elementárních prvků

Tato kapitola v sobě zahrnuje teplotní model, do kterého se aplikovaly poznatky z termogravimetrické analýzy a následné stanovení hmotnostních úbytků elementárních prvků a vlhkosti. Pro vytvoření přesného teplotního modelu byl poloměr brikety rozdělen do 46 vrstev po 1 mm včetně vrstev, ve kterých již byl vypočten nebo naměřen teplotní průběh. V nových vrstvách byly hodnoty teplot doplněny geometrickou řadou v Excelu. Jelikož poloměr brikety je 45 mm, došlo k vytvoření 45 mezikruží širokých 1 mm - Obr. č. 5.3, která ležela mezi vrstvami s již stanoveným teplotním průběhem. Vzniklá mezikruží jsou natolik úzká, že teplotní průběh v určité vrstvě může být umístěn přímo do celého mezikruží pod touto vrstvou. Pro další výpočty se budou jednotlivá mezikruží považovat za milimetr široké vrstvy, ve kterých jsou již stanoveny teplotní průběhy.

## Briketa rozdělena do 45 vrstev



Obr. č. 5.3: Rozdělení brikety do 45 vrstev

V programu Excel byla vytvořena tabulka, ve které představoval jeden sloupec jednu vrstvu brikety a každý řádek jednu minutu spalovacího procesu. Byly vytvořeny čtyři teplotní modely, respektive tabulky pro hmotnostní úbytek vody a rozpad celulózy, hemicelulózy a ligninu. Všechny čtyři tabulky měly stejný základ, jelikož vycházely ze stejných naměřených a vypočtených teplot. Z tabulky - Tab. č. 5.1 byly vytvořeny zmíněné teplotní modely. Každý sloupec znázorňuje průběh teplot určité vrstvy v čase. Sloupec zcela vlevo zastupuje vrstvu povrchovou, sloupec zcela vpravo znázorňuje vrstvu v ose brikety. Žluté sloupce jsou vrstvy s naměřenými teplotními průběhy, zelené sloupce vrstvy s dopočtenými teplotními průběhy. Zbylé sloupce mají teploty dosazené geometrickou řadou v programu Excel. Každý řádek tabulky znamená jednu minutu spalovací periody, která byla dlouhá 70 minut, proto je v tabulce 70 řádků. První řádek znamená nultou minutu, tzn. počátek spalovacího procesu, řádek poslední znamená ukončení spalovací periody. V 70 minutě docházelo k zhasnutí plamene ve spalovací komoře, tzn. k dohoření všech vzniklých plynů a k ukončení zkoušky. Pro lepší názornost je tabulka - Tab. č. 5.1 ve větším rozlišení v příloze - Příloha 1.

Povrch (r = 45 mm) Poloměr brikety r = 45 mm Osa r = 0 mm

τ = 0 min

τ = 70 min

τ = 100 min

τ = 130 min

τ = 160 min

τ = 190 min

τ = 220 min

τ = 250 min

τ = 280 min

τ = 310 min

τ = 340 min

τ = 370 min

τ = 400 min

τ = 430 min

τ = 460 min

τ = 490 min

τ = 520 min

τ = 550 min

τ = 580 min

τ = 610 min

τ = 640 min

τ = 670 min

τ = 700 min

τ = 730 min

τ = 760 min

τ = 790 min

τ = 820 min

τ = 850 min

τ = 880 min

τ = 910 min

τ = 940 min

τ = 970 min

τ = 1000 min

τ = 1030 min

τ = 1060 min

τ = 1090 min

τ = 1120 min

τ = 1150 min

τ = 1180 min

τ = 1210 min

τ = 1240 min

τ = 1270 min

τ = 1300 min

τ = 1330 min

τ = 1360 min

τ = 1390 min

τ = 1420 min

τ = 1450 min

τ = 1480 min

τ = 1510 min

τ = 1540 min

τ = 1570 min

τ = 1600 min

τ = 1630 min

τ = 1660 min

τ = 1690 min

τ = 1720 min

τ = 1750 min

τ = 1780 min

τ = 1810 min

τ = 1840 min

τ = 1870 min

τ = 1900 min

τ = 1930 min

τ = 1960 min

τ = 1990 min

τ = 2020 min

τ = 2050 min

τ = 2080 min

τ = 2110 min

τ = 2140 min

τ = 2170 min

τ = 2200 min

τ = 2230 min

τ = 2260 min

τ = 2290 min

τ = 2320 min

τ = 2350 min

τ = 2380 min

τ = 2410 min

τ = 2440 min

τ = 2470 min

τ = 2500 min

τ = 2530 min

τ = 2560 min

τ = 2590 min

τ = 2620 min

τ = 2650 min

τ = 2680 min

τ = 2710 min

τ = 2740 min

τ = 2770 min

τ = 2800 min

τ = 2830 min

τ = 2860 min

τ = 2890 min

τ = 2920 min

τ = 2950 min

τ = 2980 min

τ = 3010 min

τ = 3040 min

τ = 3070 min

τ = 3100 min

τ = 3130 min

τ = 3160 min

τ = 3190 min

τ = 3220 min

τ = 3250 min

τ = 3280 min

τ = 3310 min

τ = 3340 min

τ = 3370 min

τ = 3400 min

τ = 3430 min

τ = 3460 min

τ = 3490 min

τ = 3520 min

τ = 3550 min

τ = 3580 min

τ = 3610 min

τ = 3640 min

τ = 3670 min

τ = 3700 min

τ = 3730 min

τ = 3760 min

τ = 3790 min

τ = 3820 min

τ = 3850 min

τ = 3880 min

τ = 3910 min

τ = 3940 min

τ = 3970 min

τ = 4000 min

τ = 4030 min

τ = 4060 min

τ = 4090 min

τ = 4120 min

τ = 4150 min

τ = 4180 min

τ = 4210 min

τ = 4240 min

τ = 4270 min

τ = 4300 min

τ = 4330 min

τ = 4360 min

τ = 4390 min

τ = 4420 min

τ = 4450 min

τ = 4480 min

τ = 4510 min

τ = 4540 min

τ = 4570 min

τ = 4600 min

τ = 4630 min

τ = 4660 min

τ = 4690 min

τ = 4720 min

τ = 4750 min

τ = 4780 min

τ = 4810 min

τ = 4840 min

τ = 4870 min

τ = 4900 min

τ = 4930 min

τ = 4960 min

τ = 4990 min

τ = 5020 min

τ = 5050 min

τ = 5080 min

τ = 5110 min

τ = 5140 min

τ = 5170 min

τ = 5200 min

τ = 5230 min

τ = 5260 min

τ = 5290 min

τ = 5320 min

τ = 5350 min

τ = 5380 min

τ = 5410 min

τ = 5440 min

τ = 5470 min

τ = 5500 min

τ = 5530 min

τ = 5560 min

τ = 5590 min

τ = 5620 min

τ = 5650 min

τ = 5680 min

τ = 5710 min

τ = 5740 min

τ = 5770 min

τ = 5800 min

τ = 5830 min

τ = 5860 min

τ = 5890 min

τ = 5920 min

τ = 5950 min

τ = 5980 min

τ = 6010 min

τ = 6040 min

τ = 6070 min

τ = 6100 min

τ = 6130 min

τ = 6160 min

τ = 6190 min

τ = 6220 min

τ = 6250 min

τ = 6280 min

τ = 6310 min

τ = 6340 min

τ = 6370 min

τ = 6400 min

τ = 6430 min

τ = 6460 min

τ = 6490 min

τ = 6520 min

τ = 6550 min

τ = 6580 min

τ = 6610 min

τ = 6640 min

τ = 6670 min

τ = 6700 min

τ = 6730 min

τ = 6760 min

τ = 6790 min

τ = 6820 min

τ = 6850 min

τ = 6880 min

τ = 6910 min

τ = 6940 min

τ = 6970 min

τ = 7000 min

τ = 7030 min

τ = 7060 min

τ = 7090 min

τ = 7120 min

τ = 7150 min

τ = 7180 min

τ = 7210 min

τ = 7240 min

τ = 7270 min

τ = 7300 min

τ = 7330 min

τ = 7360 min

τ = 7390 min

τ = 7420 min

τ = 7450 min

τ = 7480 min

τ = 7510 min

τ = 7540 min

τ = 7570 min

τ = 7600 min

τ = 7630 min

τ = 7660 min

τ = 7690 min

τ = 7720 min

τ = 7750 min

τ = 7780 min

τ = 7810 min

τ = 7840 min

τ = 7870 min

τ = 7900 min

τ = 7930 min

τ = 7960 min

τ = 7990 min

τ = 8020 min

τ = 8050 min

τ = 8080 min

τ = 8110 min

τ = 8140 min

τ = 8170 min

τ = 8200 min

τ = 8230 min

τ = 8260 min

τ = 8290 min

τ = 8320 min

τ = 8350 min

τ = 8380 min

τ = 8410 min

τ = 8440 min

τ = 8470 min

τ = 8500 min

τ = 8530 min

τ = 8560 min

τ = 8590 min

τ = 8620 min

τ = 8650 min

τ = 8680 min

τ = 8710 min

τ = 8740 min

τ = 8770 min

τ = 8800 min

τ = 8830 min

τ = 8860 min

τ = 8890 min

τ = 8920 min

τ = 8950 min

τ = 8980 min

τ = 9010 min

τ = 9040 min

τ = 9070 min

τ = 9100 min

τ = 9130 min

τ = 9160 min

τ = 9190 min

τ = 9220 min

τ = 9250 min

τ = 9280 min

τ = 9310 min

τ = 9340 min

τ = 9370 min

τ = 9400 min

τ = 9430 min

τ = 9460 min

τ = 9490 min

τ = 9520 min

τ = 9550 min

τ = 9580 min

τ = 9610 min

τ = 9640 min

τ = 9670 min

τ = 9700 min

τ = 9730 min

τ = 9760 min

τ = 9790 min

τ = 9820 min

τ = 9850 min

τ = 9880 min

τ = 9910 min

τ = 9940 min

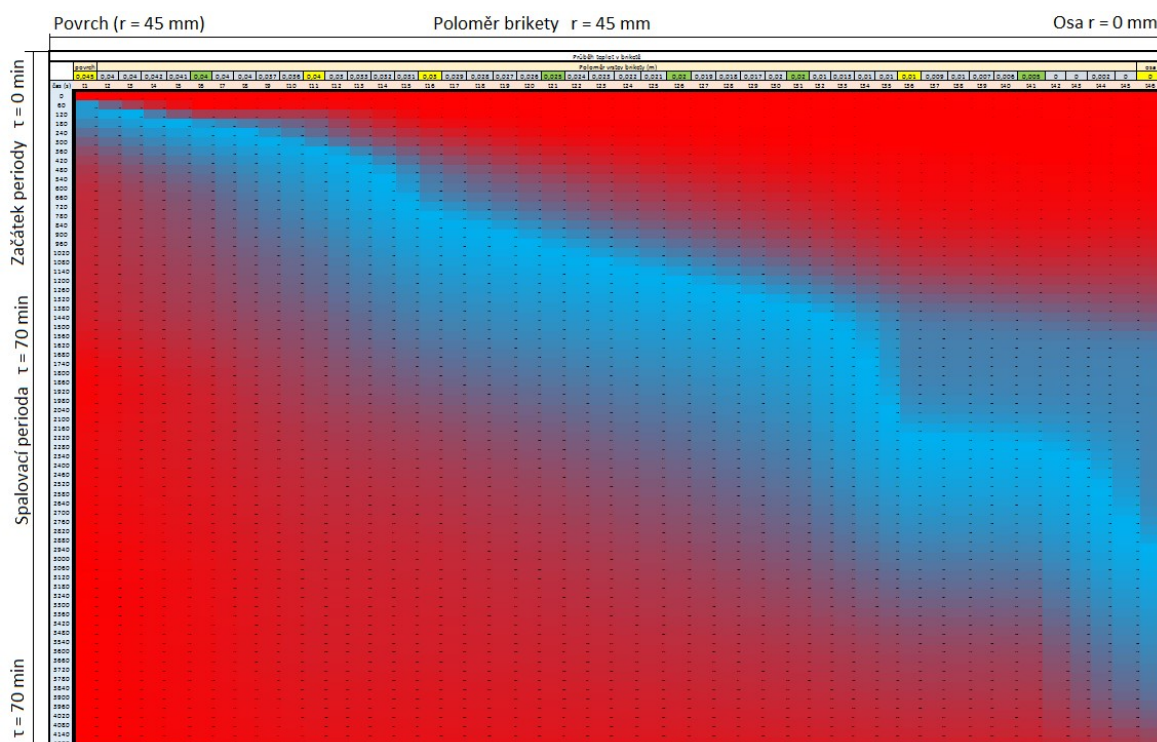
τ = 9970 min

τ = 10000 min

Tab. č. 5.1: Tabulka znázorňující průběhy teplot po poloměru brikety

5.2.1 Hmotnostní úbytek vody

Z naměřených teplot v briketě vyplývá, že voda se vypařuje v každé její vrstvě jinou dobu a v jiném množství. V povrchových vrstvách je tepelné působení největší, což zapříčiňuje rychlejší vypaření vody než ve vrstvách blíže k ose. Jelikož je dřevní briketa homogenní a voda v ní obsažená je v celém jejím objemu zastoupena stejnou procentuální částí, proto povrchové vrstvy, které jsou objemnější, mají v sobě více vody. Pokud se vezme do úvahy větší tepelné působení na povrchové vrstvy a jejich větší obsah vody, znamená to, že se nejvíce vody z brikety vypaří během prvních minut spalovací periody a poté bude rychlost vypařování klesat. V ose brikety bude tepelné působení natolik malé, že vypařování nejmenšího obsahu vody bude trvat více než 10 minut. Pro zjištění přesného místa v briketě a přesné doby, kdy dojde k vypaření vody, byly aplikovány poznatky o vypařování vody z termogravimetrické analýzy do teplotního modelu. Modrá barva v následujícím teplotním modelu - Tab. č. 5.2 znázorňuje oblast vypařování vody. Pro lepší názornost je tabulka - Tab. č. 5.2 Tab. č. 5.1 ve větším rozlišení v příloze - Příloha 2.



Tab. č. 5.2: Teplotní model vypařování vody z brikety

Tepelné působení ve vrstvách u povrchu brikety bylo natolik velké, že se následující vrstvy ohřívaly ještě před vypařením vlhkosti z vrstvy předešlé. Tepelné působení se snižovalo směrem k ose brikety, tím pádem se prodlužovala doba vypařování a prodlužoval se interval teplot v teplotním modelu, který vypařování znázorňuje. V ose brikety se voda vypařovala za konstantní teploty a až po vypaření veškeré vlhkosti se teplota v této oblasti začala zvyšovat. Z těchto důvodů je v prvních minutách spalovací periody a v povrchových vrstvách brikety nejužší teplotní interval vypařování. Ke konci spalovacího procesu a v nejhlubších vrstvách brikety je tento interval zase nejširší. Z důvodu snižování tepelného působení směrem k ose brikety dochází v těchto vrstvách k prodlužování doby vypařování. Až ve 27 minutě se teplota v ose brikety dostane na 100 °C, kde setrvá dalších 10 minut, dokud se veškerá voda nevypaří. Z toho vyplývá, že se nedá přesně určit interval teplot pro vypaření vody. V povrchových vrstvách je díky velkému tepelnému působení tento interval velmi malý, v teplotním modelu pouze 1 – 2 minuty. V ose brikety je to až 10 minut.

Při výpočtu hmotnostního úbytku vody z brikety se rozložila hmotnost vody určité vrstvy rovnoměrně do teplotního intervalu, ve kterém k vypaření dojde. Pokud v první

vrstvě, tedy v prvním sloupci teplotního modelu, dochází k vypařování přibližně ve dvou minutách, respektive ve dvou řádcích, tak se uvažovalo, že se voda v této vrstvě rovnoměrně vypaří v průběhu dvou minut. Jedna polovina hmotnosti vody ve vrstvě se vypaří během jedné minuty a druhá polovina během minuty druhé. Stejným způsobem se postupovalo i v dalších vrstvách brikety. Teplotní intervaly vypařování se měrem k ose posouvaly níže v teplotním modelu, což znamená, že k vypařování dochází během pozdějších minut spalovací periody.

Briketa je rozdělena od osy k povrchu do 45 vrstev po 1 mm. Součin plochy libovolné vrstvy  $\Delta S$  a délky brikety  $L$  dává objem  $\Delta V$  vrstvy. Pokud se tento objem  $\Delta V$  vynásobí hustotou brikety, získá se hmotnost  $\Delta m$  libovolné vrstvy. Součet hmotností všech vrstev dává hmotnost celé brikety. Dle laboratorního rozboru briketa obsahuje, 6,7 %<sub>hm</sub> vlhkosti. Součin procentuálního zastoupení vlhkosti a hmotnosti vrstvy dává hmotnost vody v ní obsažené. Vypočtené hodnoty platí pro povrchovou vrstvu dřevní brikety. Výsledky pro celou spalovací periodu jsou v grafu - Graf. č. 5.6

Plocha libovolné vrstvy brikety

$$\Delta S_i = \pi \cdot (r_o^2 - r_i^2) \quad [\text{m}^2] \quad (13)$$

$$\Delta S_1 = \pi \cdot (0,045^2 - 0,044^2) = 2,796 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

kde  $r_o$  vnější poloměr vrstvy [m]

$r_i$  vnitřní poloměr vrstvy [m]

Objem libovolné vrstvy brikety

$$\Delta V_i = \Delta S_i \cdot L \quad [\text{m}^3] \quad (14)$$

$$\Delta V_1 = (2,796 \cdot 10^{-4}) \cdot 0,3 = 8,388 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

kde  $\Delta S_i$  plocha libovolné vrstvy brikety ze vzorce 13 [m<sup>2</sup>]

$L$  délka brikety [m]

Hmotnost libovolné vrstvy brikety

$$\Delta m_i = \Delta V_i \cdot \rho \quad [\text{kg}] \quad (15)$$

$$\Delta m_1 = (8,388 \cdot 10^{-5}) \cdot 1300 = 0,109 \text{ kg}$$

---

kde	$\Delta V_i$	objem libovolné vrstvy brikety ze vzorce 14	$[\text{m}^3]$
	$\rho$	hustota brikety	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$

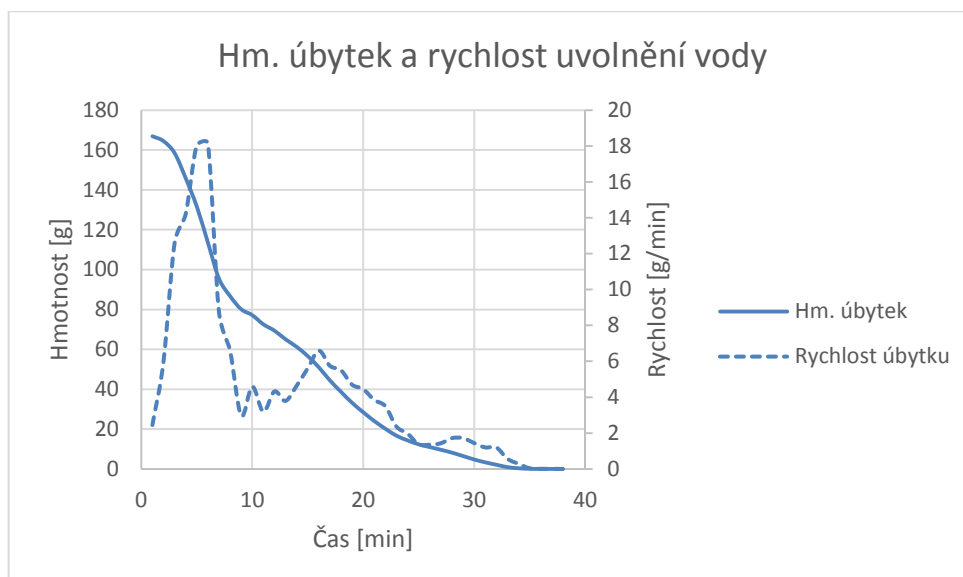
Hmotnost vody v libovolné vrstvě brikety

$$\Delta m_{i_{\text{H}_2\text{O}}} = \Delta m_i \cdot W_r \quad [\text{kg}] \quad (16)$$

$$\Delta m_{1_{\text{H}_2\text{O}}} = 0,109 \cdot 0,065 = 7,085 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

kde	$\Delta m_i$	hmotnost libovolné vrstvy brikety ze vzorce 15	$[\text{kg}]$
	$W_r$	vlhkost brikety	$[1]$

Z rovnice 16 vyplývá, že v povrchové vrstvě je přibližně 7,1 gramů vody. Toto množství vody se dosadilo do prvního sloupce teplotního modelu. Teno sloupec odpovídá nejvzdálenější vrstvě brikety od osy, ve které bylo dosaženo teploty vypařování 100 °C hned v druhé minutě spalovacího procesu. Druhá minuta je v teplotním modelu znázorněna druhým řádkem. Teplotní interval vypařování dle termogravimetrie při tak velkém tepelném působení je 100 až 200 °C. Teploty 200 °C bylo v povrchové vrstvě dosaženo již ve třetí minutě. V teplotním modelu je 100 °C ve druhém řádku a 200 °C ve třetím řádku. Proto v povrchové vrstvě docházelo k vypařování po dobu dvou minut. Ve druhé minutě spalovacího procesu se vypařilo z povrchové vrstvy 3,55 gramů vlhkosti a ve třetí minutě se vypařila druhá polovina vlhkosti. Vlhkost ve vrstvě se tedy rovnoměrně rozdělila do všech minut teplotního intervalu vypařování. Tímto způsobem se postupovalo i v dalších vrstvách. Byl zjištěn hmotnostní úbytek vody v každé vrstvě a v každé minutě spalovací periody. Součet všech úbytků v určité minutě, tedy v daném řádku teplotního modelu, se rovná rychlosti hmotnostního úbytku vody v dané minutě. Tento součet se vypočetl pro každý řádek teplotního modelu a výsledkem byla rychlost úbytku v každé minutě spalovacího procesu. Bylo zjištěno, kolik gramů vody se v každé minutě spalovacího procesu uvolnilo. Součtem těchto minutových úbytků byl hmotnostní úbytek vody z brikety - Graf. č. 5.6.



Graf. č. 5.6: Hmotnostní úbytek a rychlost vypaření vody z brikety

Z diagramu lze vyčíst, že se veškerá voda vypaří do 40 minuty spalovacího procesu. Největší minutový úbytek vlhkosti nastává v prvních minutách spalování, protože tepelné působení na briketu je dosti velké a z vrstev blíže povrchu dochází k vypaření vlhkosti během 1 – 2 minut. Tyto vrstvy mají také větší objem než vrstvy blíže ose, proto je v nich zastoupen větší podíl vody. Ve vrstvách blíže k ose je tepelné působení menší, vypařování probíhá až několik minut, a proto se voda uvolňuje v delším časovém úseku.

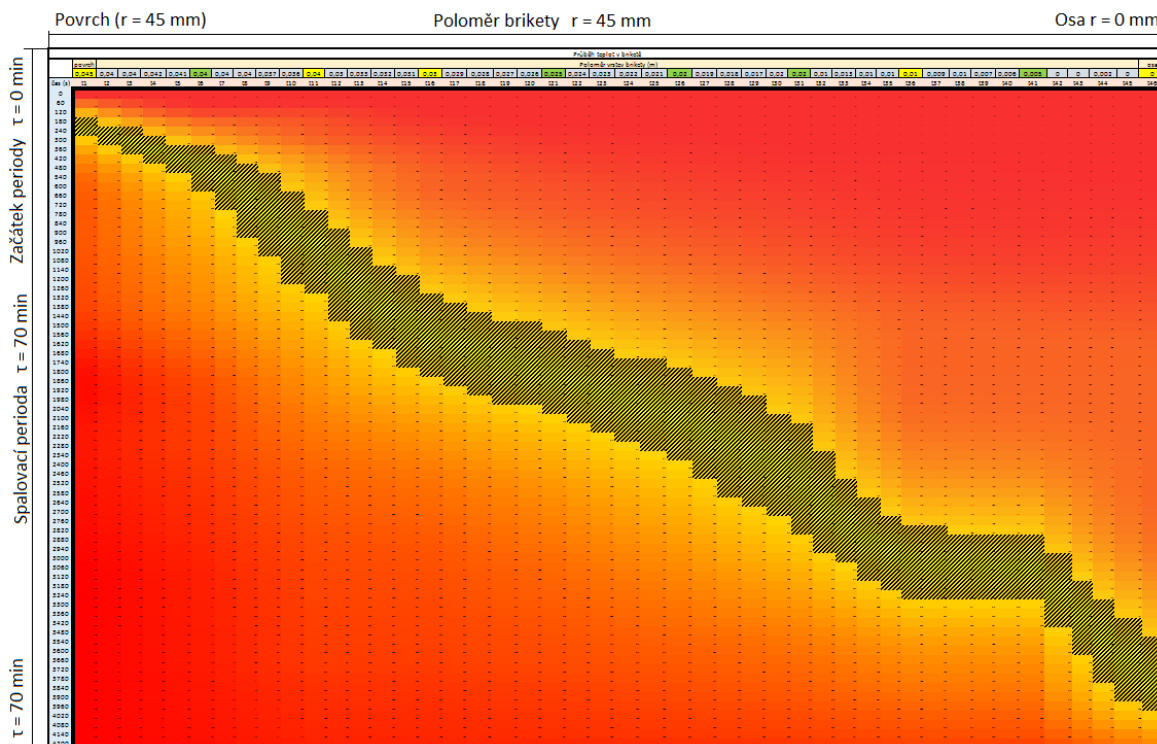
### 5.2.2 Hmotnostní úbytek vodíku a kyslíku

Dřevní briketa použita pro účely této práce, je vyrobena ze smrkového dřeva. Smrkové dřevo obsahuje přibližně 42 %<sub>hm</sub> celulózy, 27,3 %<sub>hm</sub> hemicelulózy a 27,4 %<sub>hm</sub> ligninu. Protože se každá složka dřeva rozpadá při jiných teplotách, byl pro každou z nich vytvořený vlastní teplotní model.

Celulóza je v jehličnanech zastoupena největším dílem. Při zvýšených teplotách se začínají řetězce celulózy rozpadat při 260 °C. Celý proces degradace tohoto biopolymeru končí kolem 410 °C. Jelikož je znám, na rozdíl od vody, přesný interval teplot, v kterém dochází k rozpadu celulózy, je ho možné přesně zanést do teplotního modelu. V tabulce - Tab. č. 5.3 je tento interval znázorněn vyšrafovanou oblastí.



Pro lepší názornost je tabulka - Tab. č. 5.3 ve větším rozlišení v příloze - Příloha 3Příloha 1.



Řetězce celulózy se skládají z uhlíku, kyslíku a vodíku. Při rozpadu řetězce dochází k uvolnění těchto prvků. Postup výpočtu stanovení úbytku vodíku a kyslíku byl podobný, jako výpočet úbytku vlhkosti v předchozí kapitole. Ale v tomto případě se stanovilo hmotnostní zastoupení celulózy v každé vrstvě brikety a ne přímo jeho úbytek. Po stanovení množství celulózy ve všech vrstvách bylo vyjádřeno množství kyslíku a vodíku, který se uvolní při rozpadu jejich řetězců. Předtím se však hmotnost celulózy ve vrstvách rovnoměrně rozdělila do teplotního intervalu rozpadu celulózy, stejně jako se v předchozí kapitole dosazovala hmotnost vlhkosti ve vrstvě do intervalu teplot vypařování. To znamená, že pokud ohřev z teploty 260 °C na 410 °C ve vrstvě brikety trval 3 minuty, tak se v každé minutě ohřevu, respektive daného teplotního intervalu, uvolnila jedna třetina vodíku a kyslíku z dané vrstvy. Pokud ohřev trval 5 minut, v každé minutě teplotního intervalu se uvolnila jedna pětina vodíku a kyslíku z dané vrstvy.

Nejdříve se stanovila hmotnost celulózy ve vrstvách brikety. Jelikož procentuální zastoupení složek dřeva platí pouze pro sušinu, to znamená pro bezvodný vzorek, muselo se počítat s hmotností brikety bez vlhkosti. Proto se odečetla hmotnost vlhkosti z brikety. Všechny výpočty v této kapitole jsou opět provedeny pro první povrchovou vrstvu brikety. Výsledky pro celou spalovací periodu jsou uvedeny v grafu - Graf. č. 5.7.

Hmotnostní zastoupení celulózy v libovolné vrstvě brikety

$$\Delta m_{i_{\text{cel}}} = (\Delta m_i - \Delta m_{i_{\text{H}_2\text{O}}}) \cdot \Omega_{\text{cel}} \quad [\text{kg}] \quad (17)$$

$$\Delta m_{1_{\text{cel}}} = (0,109 - (7,085 \cdot 10^{-3})) \cdot 0,42 = 0,043 \text{ kg}$$

kde  $\Delta m_i$  hmotnost libovolné vrstvy brikety ze vzorce 15 [kg]

$\Delta m_{i_{\text{H}_2\text{O}}}$  hmotnost vlhkosti v lib. vrstvě brikety ze vzorce 16 [kg]

$\Omega_{\text{cel}}$  množství celulózy v briketě [1]

Nyní se hmotnost celulózy ve vrstvě rozdělila v teplotním modelu do teplotního intervalu, ve kterém dochází k jejímu rozpadu. Z rovnice 17 vyplývá, že v povrchové vrstvě je 43 gramů celulózy. Celulóza se rozpadá mezi 260 - 410 °C. Intervalu teplot bylo dosaženo ve čtvrté až šesté minutě. Celulóza se tedy v povrchové vrstvě rozkládala tři minuty, v teplotním modelu znázorněno 4 – 6 řádkem. Těchto 43 gramů bylo rovnoměrně rozděleno do třech minut, tedy v každé minutě se rozpadne jedna třetina z oněch 43 gramů celulózy. Poté se udělal minutový, respektive řádkový součet a tím se zjistilo minutové množství celulózy, které se rozpadlo. Nyní bylo třeba zjistit, kolik vodíku a kyslíku je zastoupeno v řetězci celulózy, aby bylo možné hmotnostně vyjádřit množství těchto prvků uvolněných při rozpadu řetězců. Jelikož sumární vzorec celulózy je  $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ , kde  $n$  je pouze počet těchto jednotek v celém polymeru, lze vypočítat, kolik procent hmotnosti zabírají vodík a kyslík v molekule. Výpočet zahrnoval molární hmotnosti jednotlivých atomů. Molární hmotnost uhlíku je  $12,01 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ , vodíku  $1,0079 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$  a kyslíku  $16 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ . [17]

Molární hmotnost molekuly celulózy

$$m_{\text{mol,cel}} = 6 \cdot C_{\text{mol}} + 10 \cdot H_{\text{mol}} + 5 \cdot O_{\text{mol}} \quad [\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}] \quad (18)$$

$$m_{\text{mol,cel}} = 6 \cdot 12,01 + 10 \cdot 1,0079 + 5 \cdot 16 = 162,139 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

kde	$C_{\text{mol}}$	molární hmotnost uhlíku	$[\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}]$
	$H_{\text{mol}}$	molární hmotnost vodíku	$[\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}]$
	$O_{\text{mol}}$	molární hmotnost kyslíku	$[\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}]$

Hmotnostní zastoupení vodíku v molekule celulózy

$$m_{\text{cel,H}} = \frac{10 \cdot H_{\text{mol}}}{m_{\text{mol,cel}}} \cdot 100 \quad [\%_{\text{hm}}] \quad (19)$$

$$m_{\text{cel,H}} = \frac{10 \cdot 1,0079}{162,139} \cdot 100 = 6,216 \%_{\text{hm}}$$

kde	$H_{\text{mol}}$	molární hmotnost vodíku	$[\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}]$
	$\Delta m_{\text{mol,cel}}$	molární hmotnost molekuly celulózy ze vzorce 18	$[\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}]$

Hmotnostní zastoupení kyslíku v molekule celulózy

$$m_{\text{cel,O}} = \frac{10 \cdot O_{\text{mol}}}{m_{\text{mol,cel}}} \cdot 100 \quad [\%_{\text{hm}}] \quad (20)$$

$$m_{\text{cel,O}} = \frac{5 \cdot 16}{162,139} \cdot 100 = 49,34 \%_{\text{hm}}$$

kde	$O_{\text{mol}}$	molární hmotnost kyslíku	$[\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}]$
	$\Delta m_{\text{mol,cel}}$	molární hmotnost molekuly celulózy ze vzorce 15	$[\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}]$

V řetězci molekuly je obsaženo 6,2 %<sub>hm</sub> vodíku a 49,3 %<sub>hm</sub> kyslíku. Pokud se tato procenta vynásobí hmotností celulózy v dané vrstvě, zjistí se hmotnost atomů vodíku a kyslíku v dané vrstvě obsažena v celulóze.

Hmotnostní zastoupení vodíku z celulózy v libovolné vrstvě brikety

$$\Delta m_{i_{\text{celH}}} = \Delta m_{i_{\text{cel}}} \cdot \frac{m_{\text{cel,H}}}{100} \quad [\text{kg}] \quad (21)$$

$$\Delta m_{1_{\text{celH}}} = 0,043 \cdot \frac{6,216}{100} = 2,673 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

kde	$\Delta m_{i_{\text{cel}}}$	hm. celulózy v libovolné vrstvě brikety ze vzorce 17 [kg]
	$\Delta m_{\text{cel,H}}$	hm. zastoupení H <sub>2</sub> v molekule celulózy ze vzorce 19 [% <sub>hm</sub> ]

Hmotnostní zastoupení kyslíku z celulózy v libovolné vrstvě brikety

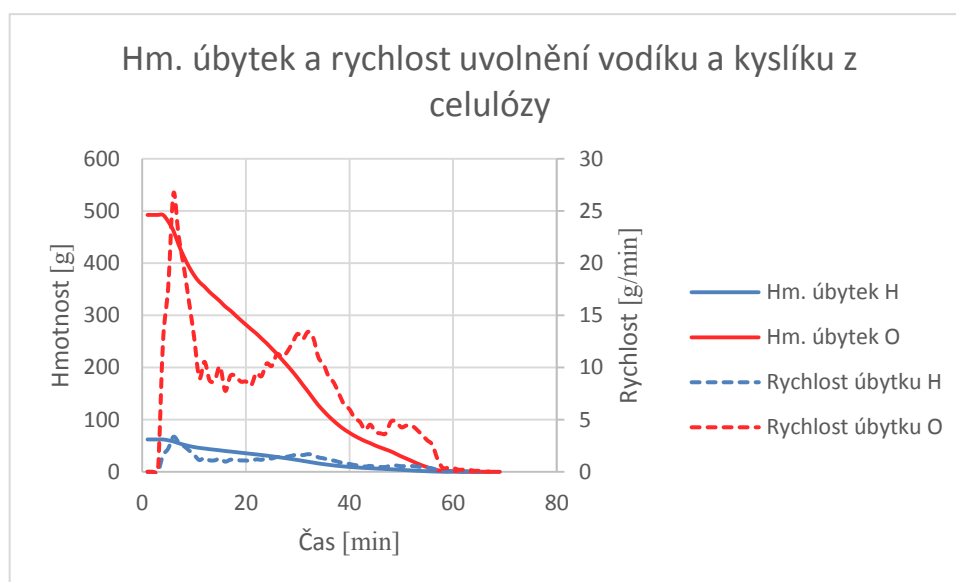
$$\Delta m_{i_{\text{celO}}} = \Delta m_{i_{\text{cel}}} \cdot \frac{m_{\text{cel,O}}}{100} \quad [\text{kg}] \quad (22)$$

$$\Delta m_{1_{\text{celO}}} = 0,043 \cdot \frac{49,34}{100} = 21,22 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

kde  $\Delta m_{i_{\text{cel}}}$  hm. celulózy v libovolné vrstvě brikety ze vzorce 17 [kg]

$\Delta m_{\text{cel,O}}$  hm. zastoupení O<sub>2</sub> v molekule celulózy ze vzorce 20 [%<sub>hm</sub>]

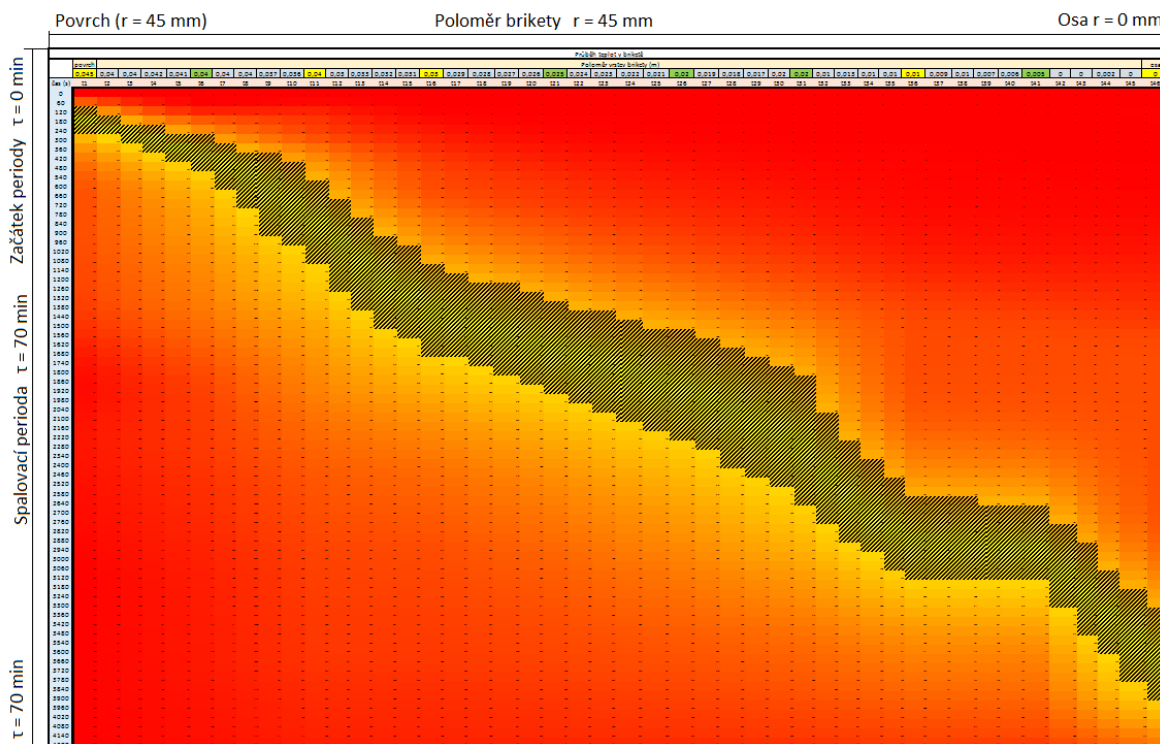
V povrchové vrstvě brikety, která má šířku 1 mm, je 2,7 gramů vodíku a 21 gramů kyslíku obsažených v celulóze. Stejným způsobem se vyjádřilo zastoupení těchto prvků ve všech vrstvách. Minutovým součtem se zjistila rychlost uvolnění vodíku a kyslíku, tzn. jejich minutový úbytek z brikety. Součet úbytků dává celkové množství vodíku a kyslíku uvolněného z řetězců celulózy.



Graf. č. 5.7: Hmotnostní úbytek a rychlost uvolnění kyslíku a vodíku z řetězců celulózy

Hemicelulózy je ve smrkovém dřevě obsaženo přibližně 27,3 %<sub>hm</sub>. Interval teplot, ve kterém dochází k rozkladu jejího řetězce, je 210 – 370 °C a je větší než u celulózy. To má za následek, že se interval teplot rozpadu hemicelulózy mírně rozšířil, a protože počáteční teplota rozpadu hemicelulózy je nižší, je interval posunut v teplotním modelu výše - Tab. č. 5.4. Veškeré výpočty jsou provedeny pro povrchovou

vrstvu. Výsledné hodnoty pro celý spalovací proces jsou v grafu - Graf. č. 5.8. Pro lepší názornost je tabulka - Tab. č. 5.4 ve větším rozlišení v příloze - Příloha 4.



Tab. č. 5.4: Teplotní model rozpadu hemicelulózy

Postup výpočtu je rovněž stejný jako u celulózy. Za pomoci molárních hmotností vodíku a kyslíku se určila rychlost úbytku hmotnosti v každé minutě spalovací periody těchto atomů. Jelikož je hemicelulóza složena z více monosacharidů, byl pro zjednodušení vytvořen průměrný sumární vzorec ze dvou hlavních skupin monosacharidů, které smrkové dřevo obsahuje. Tyto dvě skupiny jsou pentózy  $C_5H_{10}O_5$  a hexózy  $C_6H_{12}O_6$ . Průměrný sumární vzorec byl  $C_{5,5}H_{11}O_{5,5}$ . [19]

Hmotnostní zastoupení hemicelulózy v libovolné vrstvě brikety

$$\Delta m_{i_{\text{hem}}} = (\Delta m_i - \Delta m_{i_{H_2O}}) \cdot \Omega_{\text{hem}} \quad [\text{kg}] \quad (23)$$

$$\Delta m_{1_{\text{hem}}} = (0,109 - (7,085 \cdot 10^{-3})) \cdot 0,273 = 0,028 \text{ kg}$$

kde  $\Delta m_i$  hmotnost libovolné vrstvy brikety ze vzorce 15 [kg]

$\Delta m_{i_{H_2O}}$  hm. vlhkosti v lib. vrstvě brikety ze vzorce 16 [kg]

$\Omega_{\text{hem}}$  množství hemicelulózy v briketě [1]

Molární hmotnost molekuly hemicelulózy

$$m_{\text{mol,hem}} = 5,5 \cdot C_{\text{mol}} + 11 \cdot H_{\text{mol}} + 5,5 \cdot O_{\text{mol}} \quad [\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}] \quad (24)$$

$$m_{\text{mol,hem}} = 5,5 \cdot 12,01 + 11 \cdot 1,0079 + 5,5 \cdot 16 = 165,142 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

kde  $C_{\text{mol}}$  molární hmotnost uhlíku  $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

$H_{\text{mol}}$  molární hmotnost vodíku  $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

$O_{\text{mol}}$  molární hmotnost kyslíku  $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

Hmotnostní zastoupení vodíku v molekule hemicelulózy

$$m_{\text{hem,H}} = \frac{11 \cdot H_{\text{mol}}}{m_{\text{mol,hem}}} \cdot 100 \quad [\%_{\text{hm}}] \quad (25)$$

$$m_{\text{hem,H}} = \frac{11 \cdot 1,0079}{165,142} \cdot 100 = 6,838 \%_{\text{hm}}$$

kde  $H_{\text{mol}}$  molární hmotnost vodíku  $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

$\Delta m_{\text{mol,hem}}$  molární hm. molekuly hemicelulózy ze vzorce 24  $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

Hmotnostní zastoupení kyslíku v molekule hemicelulózy

$$m_{\text{hem,O}} = \frac{10 \cdot O_{\text{mol}}}{m_{\text{mol,hem}}} \cdot 100 \quad [\%_{\text{hm}}] \quad (26)$$

$$m_{\text{hem,O}} = \frac{5 \cdot 16}{165,142} \cdot 100 = 54,274 \%_{\text{hm}}$$

kde  $O_{\text{mol}}$  molární hmotnost kyslíku  $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

$\Delta m_{\text{mol,hem}}$  molární hm. molekuly hemicelulózy ze vzorce 24  $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

Hmotnostní zastoupení vodíku z hemicelulózy v libovolné vrstvě brikety

$$\Delta m_{i_{\text{hemH}}} = \Delta m_{i_{\text{hem}}} \cdot \frac{m_{\text{hem,H}}}{100} \quad [\text{kg}] \quad (27)$$

$$\Delta m_{1_{\text{hemH}}} = 0,028 \cdot \frac{6,838}{100} = 1,915 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

kde  $\Delta m_{i_{\text{hem}}}$  hm. hemicelulózy v lib. vrstvě brikety ze vzorce 23  $[\text{kg}]$

$\Delta m_{\text{hem,H}}$  hm. zast.  $H_2$  v molekule hemicelulózy ze vzorce 25  $[\%_{\text{hm}}]$

Hmotnostní zastoupení kyslíku z hemicelulózy v libovolné vrstvě brikety

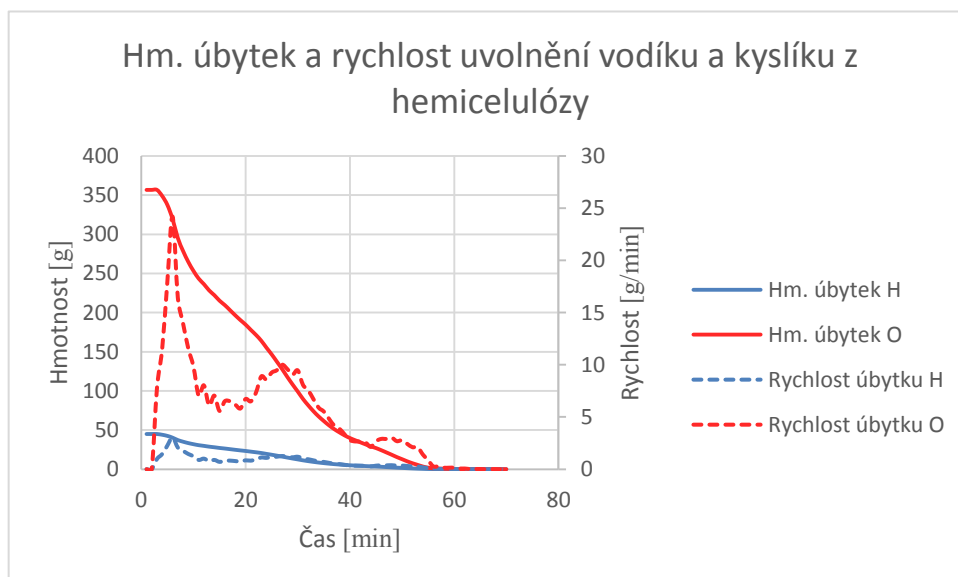
$$\Delta m_{i_{\text{hemO}}} = \Delta m_{i_{\text{hem}}} \cdot \frac{m_{\text{hemO}}}{100} \quad [\text{kg}] \quad (28)$$

$$\Delta m_{1_{\text{hemO}}} = 0,028 \cdot \frac{54,274}{100} = 15,197 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

kde  $\Delta m_{i_{\text{hem}}}$  hm. hemicelulózy v lib. vrstvě brikety ze vzorce 23 [kg]

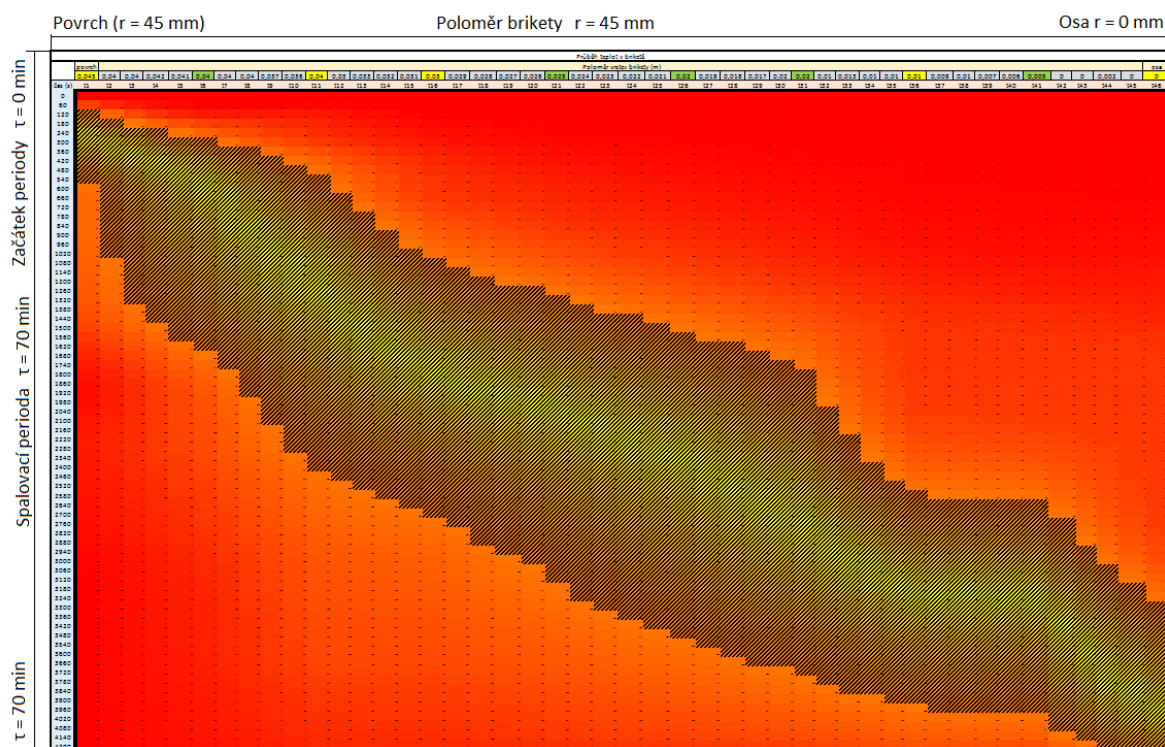
$\Delta m_{\text{hemO}}$  hm. zast. O<sub>2</sub> v molekule hemicelulózy ze vzorce 26 [%<sub>hm</sub>]

V povrchové vrstvě brikety je v hemicelulóze obsaženo 1,9 gramů vodíku a 15,2 gramů kyslíku. Výsledkem výpočtu byl, stejně jako v předchozím případě, hmotnostní úbytek těchto prvků a rychlost jejich uvolnění vyjádřený v grafu - Graf. č. 5.8.



Graf. č. 5.8: Hmotnostní úbytek a rychlost uvolnění kyslíku a vodíku z řetězců hemicelulózy

Obdobně se postupovalo také u ligninu. Ligninu se ve smrkovém dřevě nachází v množství 27,4 %<sub>hm</sub> a rozkládá se v širokém intervalu teplot 200 – 600 °C. Výpočet hmotnostního úbytku vodíku a kyslíku byl také stejný. Vycházelo se ze sumárního vzorce ligninu C<sub>10</sub>H<sub>12</sub>O<sub>3</sub>. Teplotní model je pak výrazně odlišný od předchozích dvou případů. Je to právě z důvodu nejširšího teplotního intervalu - Tab. č. 5.5. Pro lepší názornost je tabulka - Tab. č. 5.5 ve větším rozlišení v příloze- Příloha 5. [18]



Tab. č. 5.5: Teplotní model rozpadu ligninu

Hmotnostní zastoupení ligninu v libovolné vrstvě brikety

$$\Delta m_{i_{\text{lig}}} = (\Delta m_i - \Delta m_{i_{\text{H}_2\text{O}}}) \cdot \Omega_{\text{lig}} \quad [\text{kg}] \quad (29)$$

$$\Delta m_{1_{\text{lig}}} = (0,109 - (7,085 \cdot 10^{-3})) \cdot 0,274 = 0,028 \text{ kg}$$

kde  $\Delta m_i$  hmotnost libovolné vrstvy brikety ze vzorce 15 [kg]

$\Delta m_{i_{\text{H}_2\text{O}}}$  hm. vlhkosti v libovolné vrstvě brikety ze vzorce 16 [kg]

$\Omega_{\text{lig}}$  množství ligninu v briketě [1]

Molární hmotnost molekuly ligninu

$$m_{\text{mol,lig}} = 10 \cdot C_{\text{mol}} + 12 \cdot H_{\text{mol}} + 3 \cdot O_{\text{mol}} \quad [\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}] \quad (30)$$

$$m_{\text{mol,lig}} = 10 \cdot 12,01 + 12 \cdot 1,0079 + 3 \cdot 16 = 180,195 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

kde  $C_{\text{mol}}$  molární hmotnost uhlíku [kg·kmol<sup>-1</sup>]

$H_{\text{mol}}$  molární hmotnost vodíku [kg·kmol<sup>-1</sup>]

$O_{\text{mol}}$  molární hmotnost kyslíku [kg·kmol<sup>-1</sup>]



Hmotnostní zastoupení vodíku v molekule ligninu

$$m_{\text{lig,H}} = \frac{12 \cdot H_{\text{mol}}}{m_{\text{mol,lig}}} \cdot 100 \quad [\%_{\text{hm}}] \quad (31)$$

$$m_{\text{lig,H}} = \frac{12 \cdot 1,0079}{180,195} \cdot 100 = 7,460 \%_{\text{hm}}$$

kde  $H_{\text{mol}}$  molární hmotnost vodíku  $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

$\Delta m_{\text{mol,lig}}$  molární hmotnost molekuly ligninu ze vzorce 30  $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

Hmotnostní zastoupení kyslíku v molekule ligninu

$$m_{\text{lig,O}} = \frac{3 \cdot O_{\text{mol}}}{m_{\text{mol,lig}}} \cdot 100 \quad [\%_{\text{hm}}] \quad (32)$$

$$m_{\text{lig,O}} = \frac{3 \cdot 16}{180,195} \cdot 100 = 29,604 \%_{\text{hm}}$$

kde  $O_{\text{mol}}$  molární hmotnost kyslíku  $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

$\Delta m_{\text{mol,lig}}$  molární hmotnost molekuly ligninu ze vzorce 30  $[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

Hmotnostní zastoupení vodíku z ligninu v libovolné vrstvě brikety

$$\Delta m_{\text{ligH}} = \Delta m_{\text{ilig}} \cdot \frac{m_{\text{lig,H}}}{100} \quad [\text{kg}] \quad (33)$$

$$\Delta m_{\text{ligH}} = 0,028 \cdot \frac{7,46}{100} = 2,089 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

kde  $\Delta m_{\text{ilig}}$  hm. ligninu v libovolné vrstvě brikety ze vzorce 29  $[\text{kg}]$

$\Delta m_{\text{lig,H}}$  hmotnost vodíku v molekule ligninu ze vzorce 31  $[\%_{\text{hm}}]$

Hmotnostní zastoupení kyslíku z ligninu v libovolné vrstvě brikety

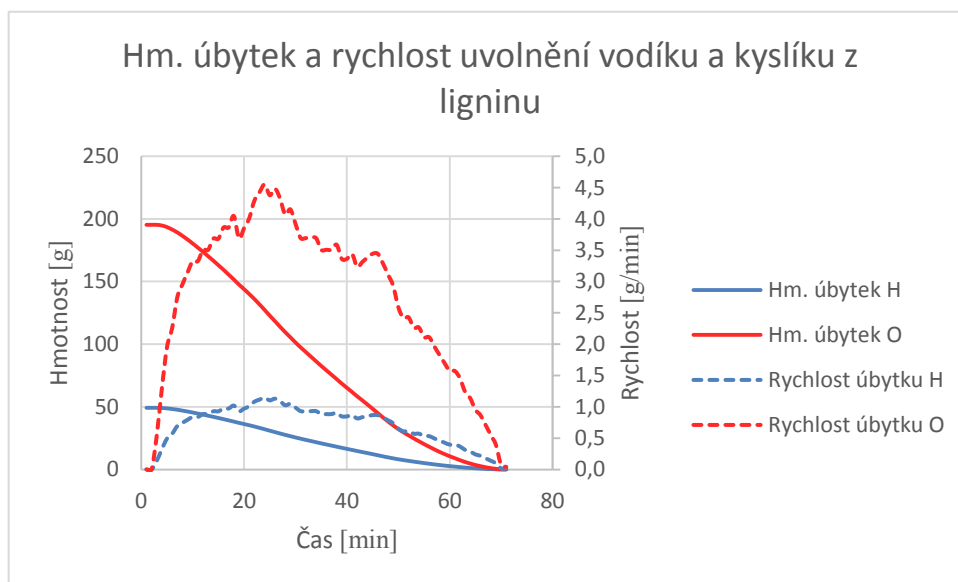
$$\Delta m_{\text{ligO}} = \Delta m_{\text{ilig}} \cdot \frac{m_{\text{lig,O}}}{100} \quad [\text{kg}] \quad (34)$$

$$\Delta m_{\text{ligO}} = 0,028 \cdot \frac{29,604}{100} = 8,289 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

kde  $\Delta m_{\text{ilig}}$  hm. ligninu v libovolné vrstvě brikety ze vzorce 29  $[\text{kg}]$

$\Delta m_{\text{lig,O}}$  hm. zast. kyslíku v molekule ligninu ze vzorce 32  $[\%_{\text{hm}}]$

V povrchové vrstvě brikety je 2,1 gramu vodíku a 8,3 gramu kyslíku. Vodík je v této vrstvě zastoupen přibližně stejně jako u hemicelulózy a celulózy, ale kyslíku je téměř dvakrát méně než u hemicelulózy. To je dáno molekulou ligninu, která má v sobě pouze tři atomy kyslíku. Také lignin obsahuje v řetězcích nejvíce uhlíku, tím pádem snižuje procentuální zastoupení kyslíku. Výsledný diagram hmotnostního úbytku vodíku a kyslíku je znázorněn v grafu - Graf. č. 5.9. Průběh rychlosti uvolnění kyslíku a vodíku v průběhu spalování je odlišný. To je dáno širokým teplotním intervalem rozpadu ligninu. V teplotním modelu - Tab. č. 5.5 je vidět, že pás teplot je mírně vypouklý ve středu modelu. To zapříčiňuje největší hmotnostní úbytek uprostřed spalovacího procesu a ne, jak tomu bylo u celulózy a hemicelulózy, na jeho začátku. Může se tedy říci, že uvolněná prchavá hořlavina, která hoří ke konci spalovací periody, je právě z ligninu.

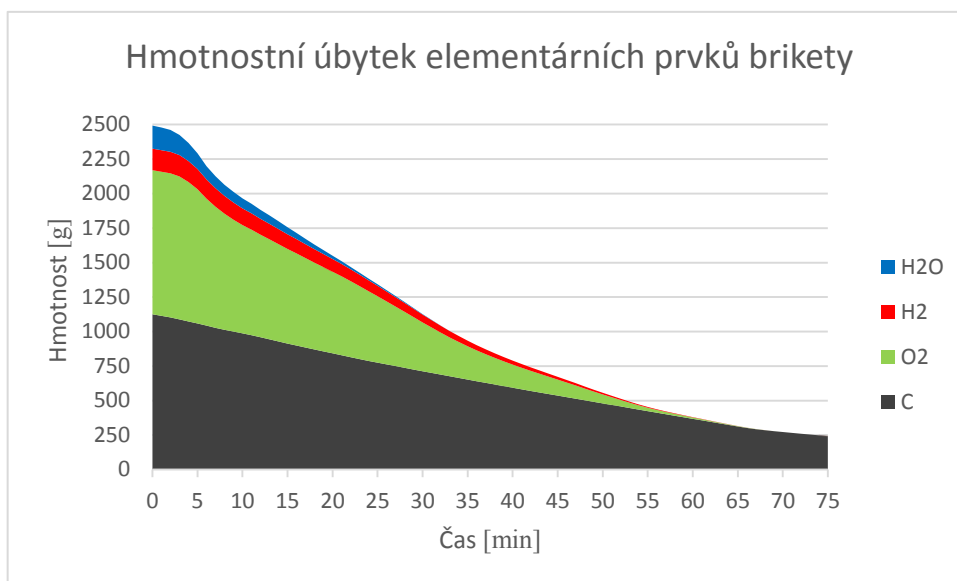


Graf. č. 5.9: Hmotnostní úbytek a rychlost uvolnění kyslíku a vodíku z řetězců ligninu

### 5.3 Výsledný diagram hmotnostního úbytku

Součet hmotnostního úbytku uhlíku, kyslíku, vodíku a vlhkosti se získá výsledný diagram hmotnostního úbytku všech elementárních prvků a vlhkosti dřevní brikety - Graf. č. 5.10. K hmotnostnímu úbytku uhlíku, který se vypočetl z emisí, se musí přičíst zbylý uhlík, který zůstal v nedopalu. Nespáleného uhlíku zůstalo v ohništi po dokončení spalovací zkoušky přibližně 280 gramů. V uhlíkatém nedopalu zbylo malé procento vodíku, dle tabulky - Tab. č. 1.1 průměrně 2,95 % ze všech složek dřeva. Neuvolněný

zbytek vodíku váží přibližně 8,5 g, což při celkové váze brikety 2500 gramů odpovídá přibližně 0,33 %. Z důvodu tak malého množství se tento zbylý vodík v absolutním součtu zanedbal.



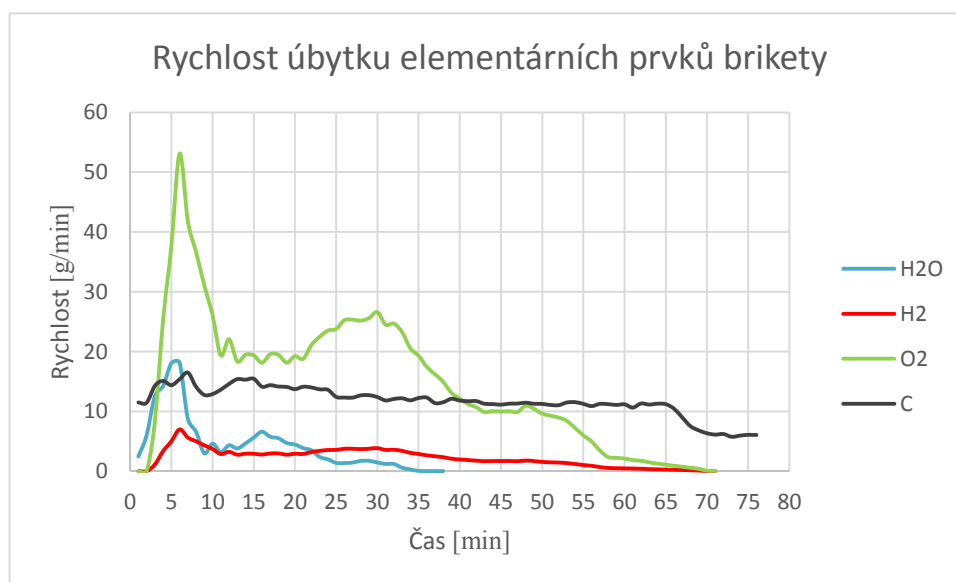
Graf. č. 5.10: Hmotnostní úbytek elementárních prvků dřevní brikety

Z výsledného diagramu lze tedy vyčíst, jak se měnilo prvkové složení dřevní brikety v průběhu spalovacího procesu. Počáteční stav prvkového složení a vlhkosti dřevní brikety při jejím umístění do spalovací komory je v následující tabulce - Tab. č. 5.6.

Uhlík v palivu $C_r$	%	46,89	g	1172,25
Vodík v palivu $H_r$	%	5,91	g	147,75
Dusík v palivu $N_r$	%	0,13	g	3,25
Kyslík v palivu $O_r$	%	39,95	g	998,75
Síra v palivu $S_r$	%	0,03	g	0,75
Voda v palivu $W_r$	%	6,50	g	162,50
Popel v palivu $A_r$	%	0,59	g	14,75

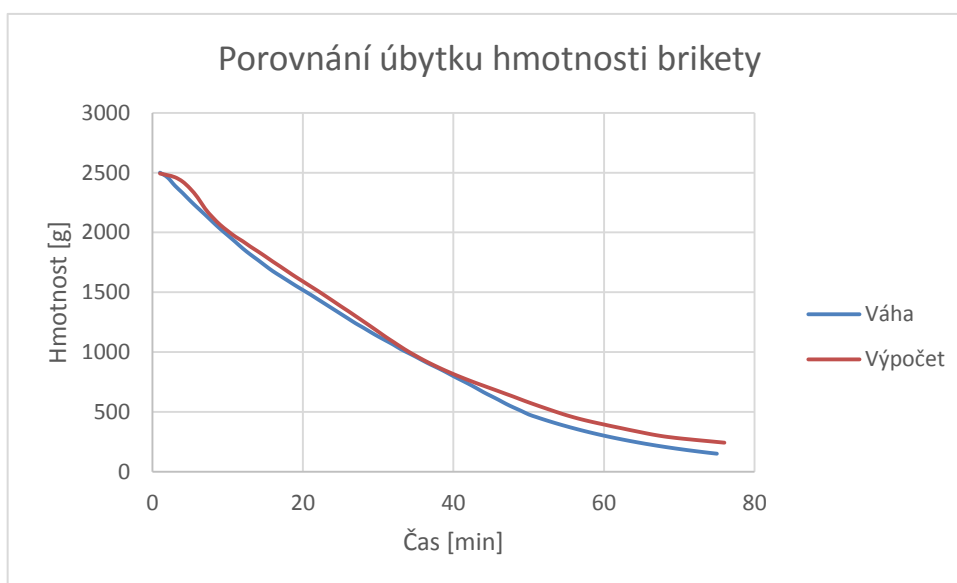
Tab. č. 5.6: Složení dřevní brikety

Jelikož dřevní briketa odhořívá postupně od povrchu k jejímu středu, dochází ke snižování vlhkosti, odplynění a hoření uhlíku průběžně. Jednotlivé fáze spalovacího procesu, tedy sušení, odplynění a hoření uhlíku, se překrývají. Z grafu Graf. č. 5.10 lze vyčíst, že odpaření vlhkosti trvá přibližně 40 minut. Odplynění trvá asi 70 minut, uvolňuje se prchavá hořlavina, která hoří jasným plamenem. Uvolnění plynu je způsobeno termickým rozpadem biopolymerů, ze kterých se uvolňuje vodík, kyslík a uhlík. Proto v 70 minutě ustává uvolňování vodíku a kyslíku. Malé množství vodíku je vázáno na fixní uhlík. Během hoření uhlíku se také bude uvolňovat a oxidovat tato malá část vodíku, což způsobí, že se vlhkost může naměřit ve spalínách po celou dobu spalování. Po zhasnutí plamene dochází pouze k oxidaci uhlíku, projevující se, jako žhnoucí vrstva v ohništi. V grafu - Graf. č. 5.11 je pak znázorněna minutová rychlost uvolnění elementárních prvků brikety a vlhkosti. Graf znázorňuje, kolik jednotlivých prvků a vlhkosti se v každé minutě spalovacího procesu uvolní. K největší rychlosti uvolnění vodíku, kyslíku a vody dochází během prvních 15 minut, což je způsobeno největším tepelným působením na nejobjemnější povrchové vrstvy brikety. Postupně se rychlost uvolnění snižuje. Rychlost uvolnění uhlíku se také postupně snižuje díky odhořívání od povrchu brikety. Množství uhlíku od povrchu k ose brikety, tak jak dochází k odhořívání, se postupně snižuje, tedy se snižuje také rychlost. Po zhasnutí plamene, po asi 70. minutě, se rychlost uvolnění uhlíku snižuje více, protože dochází k hoření pouze fixního uhlíku, ale ne k hoření plynů CO a uhlovodíků.



Graf. č. 5.11: Rychlost úbytku elementárních prvků brikety

Správnost výpočtů a teplotních modelů se dá ověřit porovnáním součtů všech uvolněných prvků a vlhkosti s křivkou úbytku hmotnosti z měření vahou. Charakter obou křivek v grafu - Graf. č. 5.12 je téměř stejný. K malé odchylce mohlo dojít z více příčin. Především jsou veškeré výpočty provedeny pro jedno měření. Úbytek hmotnosti vahou, měření emisí a měření teplot v briketě bylo provedeno zvlášť, při jiné spalovací zkoušce. I přes to, že při každé zkoušce byly nastaveny stejné podmínky, mohlo dojít k mírným nepřesnostem např. jiné množství spalovacího vzduchu, nestejně umístění dřevní brikety v ohništi a rozdílné rozezhřátí krbové vložky.



Graf. č. 5.12: Porovnání úbytku hmotnosti brikety měřeného vahou a vypočteného

## Závěr

Výsledné křivky z termogravimetrické analýzy ukázaly, jak se chová dřevní hmota při zahřívání v inertní a oxidační atmosféře. Analýzy v obou atmosférách měly stejný počáteční průběh. Nejdříve docházelo k odparu vlhkosti mezi 100 až 200 °C, což odpovídalo hmotnostnímu úbytku 8,5 %<sub>hm</sub>. Následující úbytek hmotnosti 59,3 %<sub>hm</sub> byl také stejný pro analýzy v obou atmosférách. Jednalo se o počátek rozpadu biopolymerů a uvolnění prchavé hořlaviny mezi 200 až 400 °C. V této fázi začal v oxidační atmosféře hořet fixní uhlík. Mezi 400 až 800 °C v inertní atmosféře se snižuje hmotnost o 11 %<sub>hm</sub>, což odpovídá odplynění zbylého vodíku a kyslíku. V tomto teplotním intervalu dochází v oxidační atmosféře zároveň k vyhoření 20 %<sub>hm</sub> uhlíku.

Kinetické parametry spalování dřevní brikety, tedy hmotnostní úbytky elementárních prvků paliva a vlhkosti, byly vypočteny ze složení spalin a z teplotního modelu. Byl stanoven výsledný diagram, ve kterém je znázorněno složení dřevní brikety v každé minutě spalovací periody. Z diagramu vyplývá, že se veškerá vlhkost z brikety odpaří až ve čtyřicáté minutě spalovací periody. Odplynění brikety, respektive uvolnění vodíku a kyslíku, trvá do 70 minuty spalovací periody. V prvních 15 minutách nejrychleji ubývá vlhkost, vodík a kyslík z brikety, protože je tepelnému působení vystavena největší plocha brikety. Rychlost uvolnění se postupně zpomaluje, protože dochází k odhořívání brikety a tím k zmenšení jejího objemu. Hmotnostní úbytek uhlíku je téměř lineární a rychlost jeho uvolnění z brikety postupně klesá. V 70. minutě dojde k většímu poklesu rychlosti uvolnění uhlíku z brikety, protože se v této minutě spálila veškerá prchavá hořlavina a došlo k zhasnutí plamene a tím k menšímu tepelnému působení na briketu.

Optimální poměr primárního a sekundárního vzduchu se stanovil jako 40/60 %<sub>obj</sub> s přebytkem vzduchu  $n = 2,1$  až  $2,6$ . Ale tyto hodnoty platí pouze pro případ krbové vložky použité pro účely této práce. Ve skutečnosti by se měl poměr primárního a sekundárního vzduchu přiváděného do spalovací komory měnit. Při rozhořívání dřevní hmoty ve spalovací komoře je potřeba většího množství primárního vzduchu. Po rozhoření by se mělo přivést dostatečné množství vzduchu sekundárního. Také by se mělo množství vzduchu v průběhu spalovací periody snižovat, protože se dle výsledných křivek hmotnostního úbytku elementárních prvků brikety

snižuje i množství uvolněných plynů. Pro přesné stanovení množství přiváděného spalovacího vzduchu by se mohl použít diagram rychlosti úbytku elementárních prvků paliva, který ukazuje, kolik těchto prvků se v každé minutě spalovací periody z brikety uvolní. Z tohoto minutového složení uvolněných plynů by se mohlo stanovit množství přiváděného spalovacího vzduchu tak, aby došlo k jejich dokonalému spálení.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] KAČÍKOVÁ, Danica, Anton OSVALD a Miroslava NETOPILOVÁ. *Dřevo a jeho termická degradácia*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2006. SPBI Spektrum. ISBN 80-86634-78-7.
- [2] KRÁTKÝ, Lukáš a Tomáš JIROUT. *Moderní trendy předúprav biomasy: pro intenzifikaci výroby biopaliv druhé generace*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. ISBN 978-80-01-05720-9.
- [3] NOSKIEVIČ, Pavel a Radek PILCH. *Spalování dřeva v malém ohništi*. Suchdol nad Odrou: Romotop ; Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1889-4.
- [4] JIROUŠ, František. *Efektivní spalování paliv*. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, c2013. ISBN 978-80-260-5393-4.
- [5] NOSKIEVIČ, Pavel. *Spalování uhlí*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2002. ISBN 80-248-0204-X.
- [6] BRANC, Michal. *Studium procesu hoření dřeva: autoreferát doktorské disertační práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2199-3.
- [7] STIOVOVÁ, Kristýna. *Výzkum spalování dřeva v ohništích malých výkonů: autoreferát doktorské disertační práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1892-4.
- [8] KADLEC, Zdeněk. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-061-6.
- [9] C. Quan, et al., Pyrolysis of biomass components in a TGA and a fixed-bed reactor: Thermochemical behaviours, kinetics, and products characterization, *J. Anal. Appl. Pyrol.* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2016.07.005>
- [10] SLADKÝ, Václav. Fytopaliva - obnovující se zdroj energie (I). *TZB-info* [online]. 12. září 2001 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/658-fytopaliva-obnovujici-se-zdroj-energie-i>
- [11] LABOUTKA, Karel a Tomáš SUCHÁNEK. Tabulky a výpočty: Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů. *Tzb-info* [online]. 2001 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>



- [12] HORÁK, Jiří, Kamil KRPEC, Petr KUBESA, František HOPAN, Lenka MICHNOVÁ a Lubomír MARTINÍK. Jak si doma stanovit vlhkost a výhřevnost dřeva?. *Tzb-info* [online]. 19. 11. 2012 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/9300-jak-si-doma-stanovit-vlhkost-a-vyhrevnost-dreva>
- [13] HORÁK, Jiří a Petr KUBESA. O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (1). *Tzb-info* [online]. 21. 5. 2012 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [14] HORÁK, Jiří, Petr KUBESA, František HOPAN a Kamil KRPEC. Metodický přístup k testování krbových kamen v ČR a v zahraničí – 1. část. *Tzb-info* [online]. 23. 12. 2013 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/10723-metodicky-pristup-k-testovani-krbovych-kamen-v-cr-a-v-zahranici-1-cast>
- [15] HORÁK, Jiří a Petr KUBESA. Proces hoření kusového dřeva. *Tzb-info* [online]. 18. 6. 2012 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/8716-proces-horeni-kusoveho-dreva>
- [16] STA 449 F1 Jupiter®. *NETZSCH* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/simultaneous-thermogravimetry-differential-scanning-calorimetry/sta-449-f1-jupiter/>
- [17] Cellulose. *PubChem* [online]. 12. 7. 2007 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/16211032#section=Top>
- [18] ROSENDAHL, Lasse. *Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications*. Duxford: Woodhead publishing, 2017. ISBN 978-0-08-101029-7.
- [19] Carbohydrates. *RSC: Chemistry for Biologist* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/cfb/Carbohydrates.htm>
- [20] Kamnářský slovníček a FAQ. *KRBOVÁKAMNA.COM* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.krbova-kamna.com/15-r.html>

## Seznam grafů

Graf. č. 1.1: Křivky hmotnostního úbytku třech hlavních složek dřeva .....	15
Graf. č. 1.2: Vznik plynů ze třech hlavních složek dřeva .....	16
Graf. č. 3.1: Termogravimetrická analýza dřevní brikety .....	26
Graf. č. 3.2: Vliv komprese vzorku na průběh TGA .....	28
Graf. č. 3.3: Vliv rozdílné frakce pilin na průběh TGA .....	28
Graf. č. 4.1: Optimální nastavení poměru primárního a sekundárního vzduchu .....	33
Graf. č. 4.2: Zvětšení měrného povrchu brikety .....	34
Graf. č. 4.3: Úbytek hmotnosti brikety během spalování .....	35
Graf. č. 4.4: Emise CO a CO <sub>2</sub> .....	36
Graf. č. 4.5: Emise uhlovodíků .....	36
Graf. č. 4.6: Ředící poměr .....	37
Graf. č. 4.7: Objemový tok spalin .....	39
Graf. č. 4.8: Hmotnostní úbytek a rychlost uvolnění uhlíku z brikety .....	41
Graf. č. 5.1: Naměřené teploty na povrchu a v ose dřevní brikety .....	44
Graf. č. 5.2: Průběhy teplot v briketě vytvořené geometrickou řadou .....	45
Graf. č. 5.3: Naměřené průběhy teplot v briketě .....	45
Graf. č. 5.4: Průběh hustoty a teplotní vodivosti brikety v průběhu spalování .....	48
Graf. č. 5.5: Teplotní průběhy v dřevní briketě .....	50
Graf. č. 5.6: Hmotnostní úbytek a rychlost vypaření vody z brikety .....	56
Graf. č. 5.7: Hmotnostní úbytek a rychlost uvolnění kyslíku a vodíku z řetězců celulózy .....	60
Graf. č. 5.8: Hmotnostní úbytek a rychlost uvolnění kyslíku a vodíku z řetězců hemicelulózy .....	63
Graf. č. 5.9: Hmotnostní úbytek a rychlost uvolnění kyslíku a vodíku z řetězců ligninu .....	66
Graf. č. 5.10: Hmotnostní úbytek elementárních prvků dřevní brikety .....	67
Graf. č. 5.11: Rychlost úbytku elementárních prvků brikety .....	68
Graf. č. 5.12: Porovnání úbytku hmotnosti brikety měřeného vahou a vypočteného .....	69

## Seznam tabulek

Tab. č. 1.1: Zastoupení uhlíku a vodíku v surovém vzorku a vzorku po pyrolýze .....	16
Tab. č. 3.1: Prvkové složení dřevní brikety .....	25
Tab. č. 5.1: Tabulka znázorňující průběhy teplot po poloměru brikety .....	52
Tab. č. 5.2: Teplotní model vypařování vody z brikety .....	53
Tab. č. 5.3: Teplotní model rozpadu celulózy .....	57
Tab. č. 5.4: Teplotní model rozpadu hemicelulózy .....	61
Tab. č. 5.5: Teplotní model rozpadu ligninu .....	64
Tab. č. 5.6: Složení dřevní brikety .....	67

## Seznam obrázků

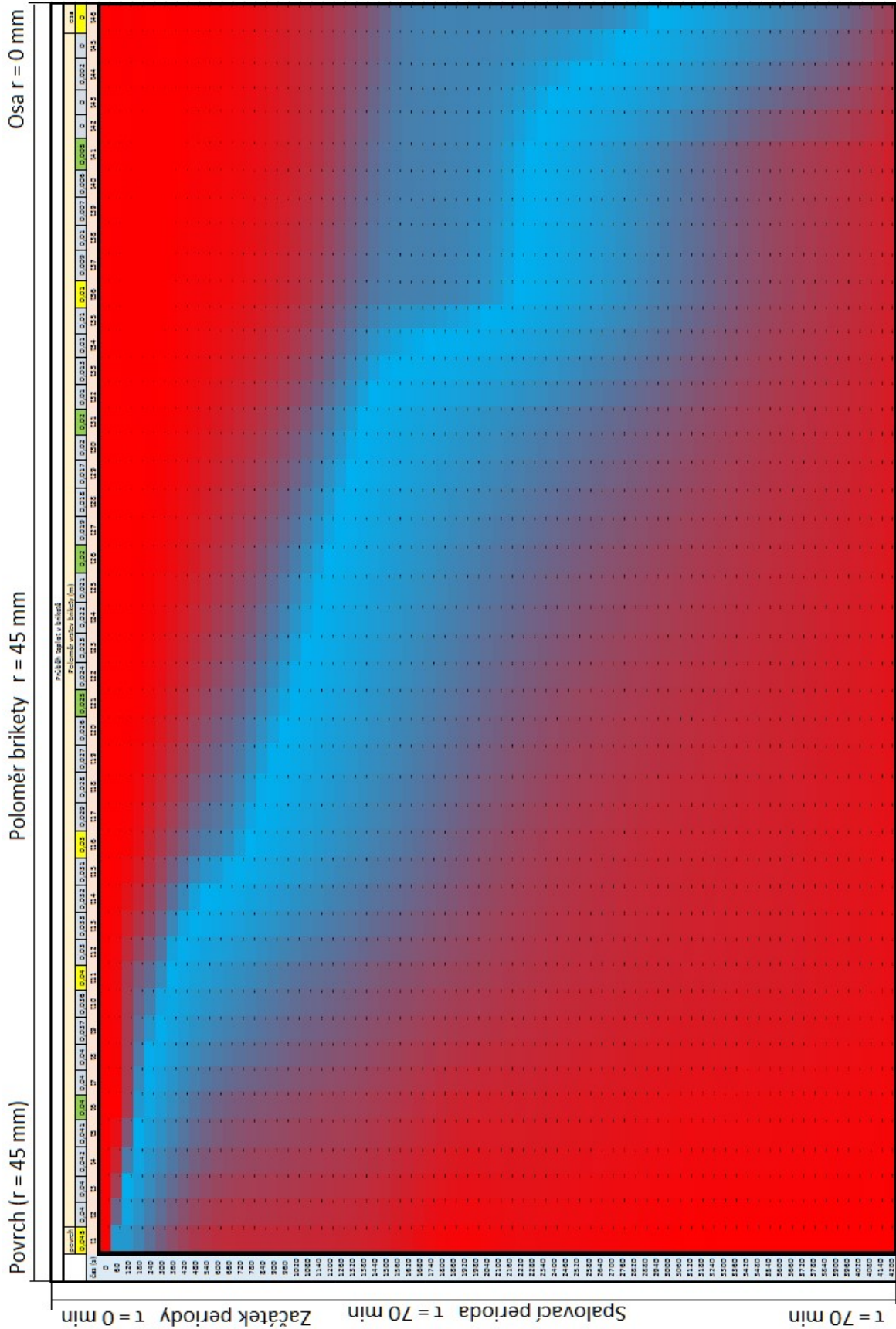
Obr. č. 1.1: Podíl hlavních organických látek ve dřevě .....	11
Obr. č. 1.2: Řetězec celulózy .....	12
Obr. č. 1.3: Hlavní stavební jednotky hemicelulózy .....	13
Obr. č. 1.4: Fragment struktury ligninu.....	14
Obr. č. 2.1: Vliv vody ve dřevě na jeho výhřevnost .....	20
Obr. č. 2.2: Vliv měrného povrchu na průběh spalování .....	22
Obr. č. 3.1: Analyzátor STA 499 F1 Jupiter .....	24
Obr. č. 4.1: Model krbové vložky .....	30
Obr. č. 4.2: Měřicí trať .....	31
Obr. č. 4.3: Schéma měřicí tratě.....	32
Obr. č. 5.1: Umístění termočlánků v ose a na povrchu brikety.....	43
Obr. č. 5.2: Znárodnění rozdělení brikety do výpočtových vrstev .....	47
Obr. č. 5.3: Rozdělení brikety do 45 vrstev .....	51

## Seznam příloh

Příloha 1: Tabulka znázorňující průběhy teplot po poloměru brikety .....	76
Příloha 2: Teplotní model vypařování vody z brikety .....	77
Příloha 3: Teplotní model rozpadu celulózy .....	78
Příloha 4: Teplotní model rozpadu hemicelulózy .....	79
Příloha 5: Teplotní model rozpadu ligninu .....	80
Příloha 6: Tepelná vodivost pevných látek při 20 °C .....	81
Příloha 7: Měrná tepelná kapacita materiálů ze dřeva .....	82

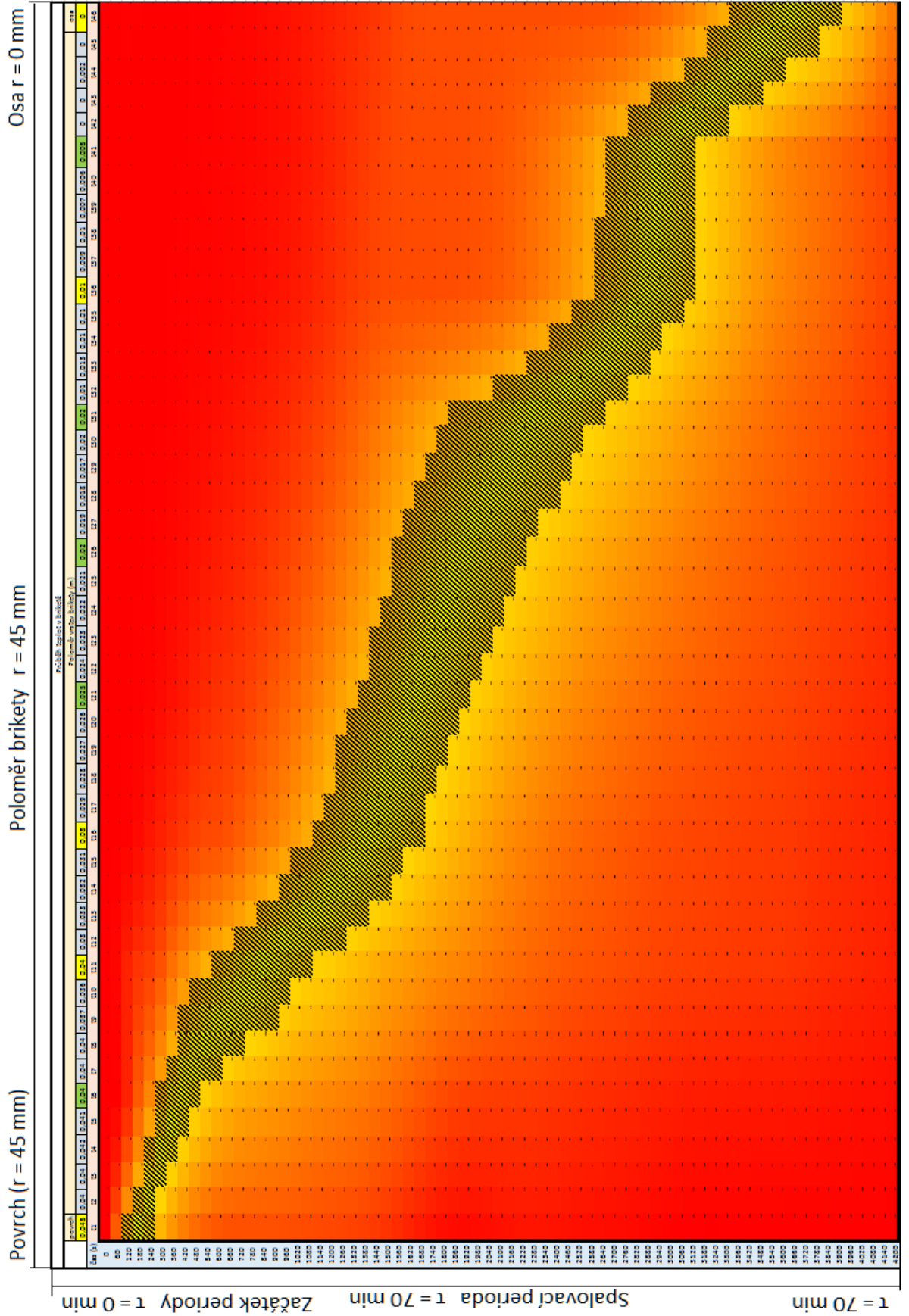


Příloha 2: Teplotní model vypařování vody z brikety

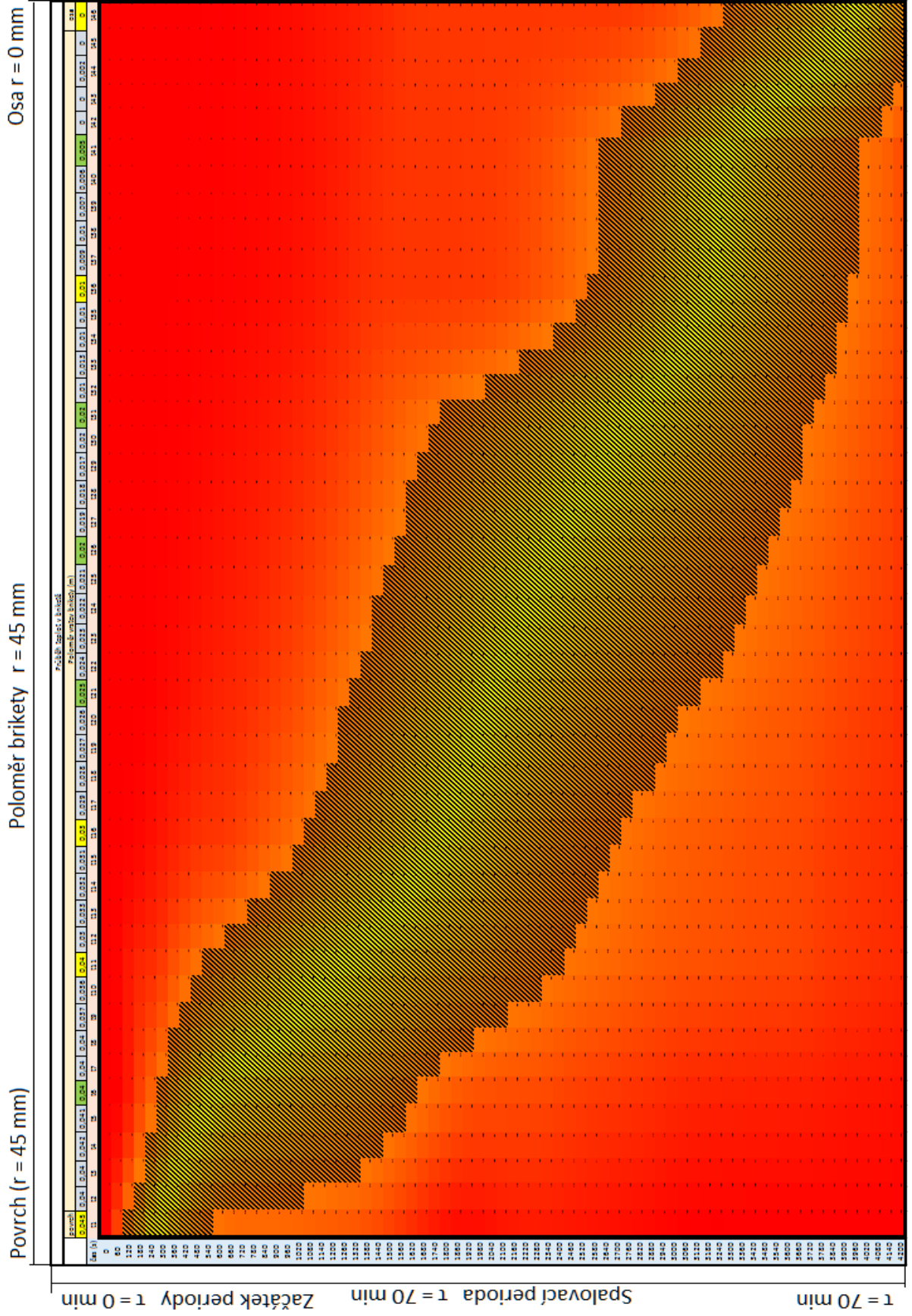




Příloha 4: Teplotní model rozpadu hemicelulózy



Příloha 5: Teplotní model rozpadu ligninu





Příloha 6: Tepelná vodivost pevných látek při 20 °C

látka	$\rho$ kg.m <sup>-3</sup>	$\lambda$ W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	látka	$\rho$ kg.m <sup>-3</sup>	$\lambda$ W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
asfalt	1120	0,7	lněná tkanina	-	0,09
beton:- přírodní	1800	0,8	mramor	2500-2800	2,1+3,5
	2000	1,0	papír	700-1000	0,14+0,15
	2200	1,3	peří	-	0,03+0,08
-plynový	600	0,57+0,35	písek - suchý	-	0,33
	1000	0,35+0,70	- vlhký 10-	-	1+1,3
-škvárobeton	1400	0,6+1,2	omítka - vnitřní		0,7+0,9
	-	0,5+0,6	- vnější		0,9+1,2
cihly červené	1400	0,44	pěnoplast	70-220	0,06
	1800	0,73	plexisklo	1180	0,195
dřevěné piliny	215	0,07	polyetylén	950	0,29
hoblíny	140	0,06	polystyrén	1050	0,16
dřevo-borovice, jedle, ⊥ na vlákna	400+600	0,13+0,19	porcelán berlínský	2290	1,05+1,3
s vlákny		0,28	rašelinové desky	200-400	0,05+0,09
-buk, dub ⊥ na	700+900	0,21+0,27	sádra	800-1200	0,4+0,66
s vlákny		0,35+0,37	sklo - Jena 16 III	2950	0,97
guma tvrdá 0-100 °C	1200	0,16	- křemenné 0 °C	2600+4700	1,16
pěnová	100	0,04	-křemenné 600 °C		1,71
	400	0,07	- obyčejné	2400+3200	0,6+1,05
Heraklit, dřevocement	-	0,17	sláma	140	0,05
hedvábí 0-90 °C	100	0,04+0,06	sníh - čerstvý	200	0,105
kámen hutný	-	2,9	- slehlý	400	0,465
pórovitý	-	1,7	škvára, struska	700+750	0,33
kamenina	2100+2400	1,05+1,63	uhlí - dřevěné	185+215	0,041+0,065
korkové desky	250	0,07	- hnědé 48%	960	0,33
kotelní kámen- 300 °C			- hnědé 12%	920	0,165
- bohatý na	300+1200	0,08-0,23	- kamenné	1200+1350	0,24+0,27
- bohatý na	1000+2500	0,15-2,3	uhelný prach,	200	0,03
- bohatý na sádro	2000+2700	0,7-2,3		600	0,06
kůže	850+1000	0,14+0,17		1000	0,1
led 0 °C	917	2,21	vlna	50+200	0,03+0,04
led -50 °C	924	2,78	zem - písčítá 8 %	1500+2000	1,1+1,8
lepenka	-	0,14+0,35	- jílovitá 28 %	1500+2000	1,5+2,6
			žula	2600+2900	2,9+4,1

[8]

## Příloha 7: Měrná tepelná kapacita materiálů ze dřeva

9. Dřevo, materiály z aglomerovaného dřeva a korku							
	$\rho_{an}$	$C_{an}$	$\mu_n$	$\delta_n \cdot 10^9$	$\lambda_p$		
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kg.K]	[-]	[s]	[W/m.K]		
112	Dřevo tvrdé, tepelný tok - kolmo k vláknům	600	2510	157	0,0012	0,22	112
113	- rovnoběžně s vlákny	600	2510	4,50	0,042	0,49	113
114	Dřevo měkké, tepelný tok - kolmo	400	2510	157	0,0012	0,18	114
115	- rovnoběžně s vlákny	400	2510	4,50	0,042	0,41	115
116	Dřevotřískové desky	800	1500	12,50	0,015	0,11	116
117	Dřevovláknité desky - měkké	230	1380	5,0	0,038	0,046	117
118	Desky z korku lisované	150	1880	5,0-10,0	0,038-0,019	0,064	118
119	Desky z dřevitého odpadu - s cementem	300	1580	6,50	0,31	0,11	119
120		400				0,15	120
121		500				0,17	121
122		600				0,19	122
123		800				0,24	123
124		1000				0,29	124
125		1200				0,35	125
126	Desky dřevovláknité, lisované	200	1630	12,50	0,015	0,075	126
127		400				0,098	127
128		600				0,130	128
129		800				0,150	129
130		1000				0,170	130

[11]