

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

REGULACE HOŘENÍ PRO KRBY S VYUŽITÍM LAMBDA SONDY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

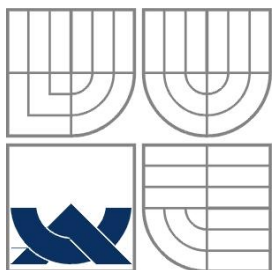
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

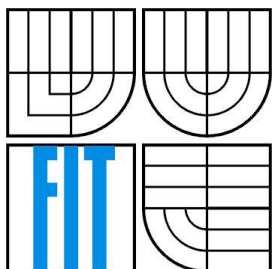
AUTHOR

LUKÁŠ BARTOŠ

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

REGULACE HOŘENÍ PRO KRBY S VYUŽITÍM LAMBDA SONDY

FIRE COMBUSTION CONTROL SYSTEM BASED ON LAMBDA PROBE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ BARTOŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. VÁCLAV ŠIMEK

BRNO 2011

Abstrakt

Práce se zabývá vývojem návrhu automatické regulace spalování biomasy v krbech pomocí lambda sondy. Tato sonda měří zbytkový kyslík při spalování, přičemž měřená hodnota má přímý vliv na účinnost spalovacího procesu a škodlivé emise unikající do ovzduší. První část práce je zaměřena na teoretický rozbor průběhu spalovacího procesu a vzájemné vlivy, které ovlivňují účinnost a emise. Druhá část se týká popisu a použití potřebných komponent pro automatickou regulaci hoření. Třetí část práce se zabývá praktickou zkouškou, která potvrdí, popř. vyvrátí možnost regulace pomocí měření zbytkového kyslíku. Čtvrtá část se zabývá návrhem algoritmu regulace a následnou implementací. Pátá část vyhodnocuje dosavadní zkoušky s návrhem na další postup pro aplikaci výroby.

Abstract

The bachelors thesis deals with a design of automatic regulation of biomass combustion in fireplaces by lambda probe. The probe measures residual amount of oxygen during the combustion and the measured value influences the efficiency of combustion process and harmful emissions which are emitted into the air. The first part of the thesis is focused onto a theoretical analysis of the proces of combustion and the effects which influence efficiency and emissions. The second part concerns the description and the use of necessary components for automatical combustion regulation. The third part deals with a pratical test which confirms or declines the possibility of regulation by measurement of residual amount of oxygen. The fourth part follows up with a design of a regulation algorithm and its implementation. The fifth part evaluates past tests and suggests a procedure for production.

Klíčová slova

Lambda sonda, automatická regulace, spalování, kyslík, emise, algoritmus, vývoj.

Keywords

Lambda probe, automatic regulation, combustion, oxygen, emissions, algorithm, development.

Citace

Bartoš Lukáš: Regulace hoření pro krby s využitím lambda sondy, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2011

Regulace hoření pro krby s využitím lambda sondy

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Václavem Šimkem. Další informace mi poskytli: Ing. Ivo Bartoš, Ing. Jan Beneš, Ing. Viktor Plaček. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Lukáš Bartoš
18.5.2011

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Václavu Šimkovi, externímu zadavateli Ing. Ivo Bartošovi a za odbornou pomoc Ing. Janu Benešovi, Ing. Viktoru Plačkovi.

© Lukáš Bartoš, 2011

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů..

Obsah

Obsah	1
1 Úvod	2
2 Palivo	4
2.1 Voda ve dřevní hmotě	6
3 Lambda sonda	8
3.1 Použitá lambda sonda	8
4 Automatická regulace	11
4.1 Blokové schéma	12
4.2 Zapojení	13
4.2.1 Ukázka zapojení regulace v praxi	15
5 Princip spalování	16
5.1 Oxid uhličitý a uhelnatý	17
5.2 Dokonalé a nedokonalé spalování	18
6 Experimentální zkoušky	20
6.1 Palivo	20
6.2 Použité spalovací zařízení	21
6.2.1 Přívody primárního a sekundárního vzduchu	22
6.3 Ověření funkčnosti lambda sondy	23
6.4 Zkoušky	26
6.4.1 Závěry zkoušek	31
7 Návrh a implementace algoritmu	33
8 Testování	36
9 Závěr	39
Literatura	40
Seznam příloh	42

1 Úvod

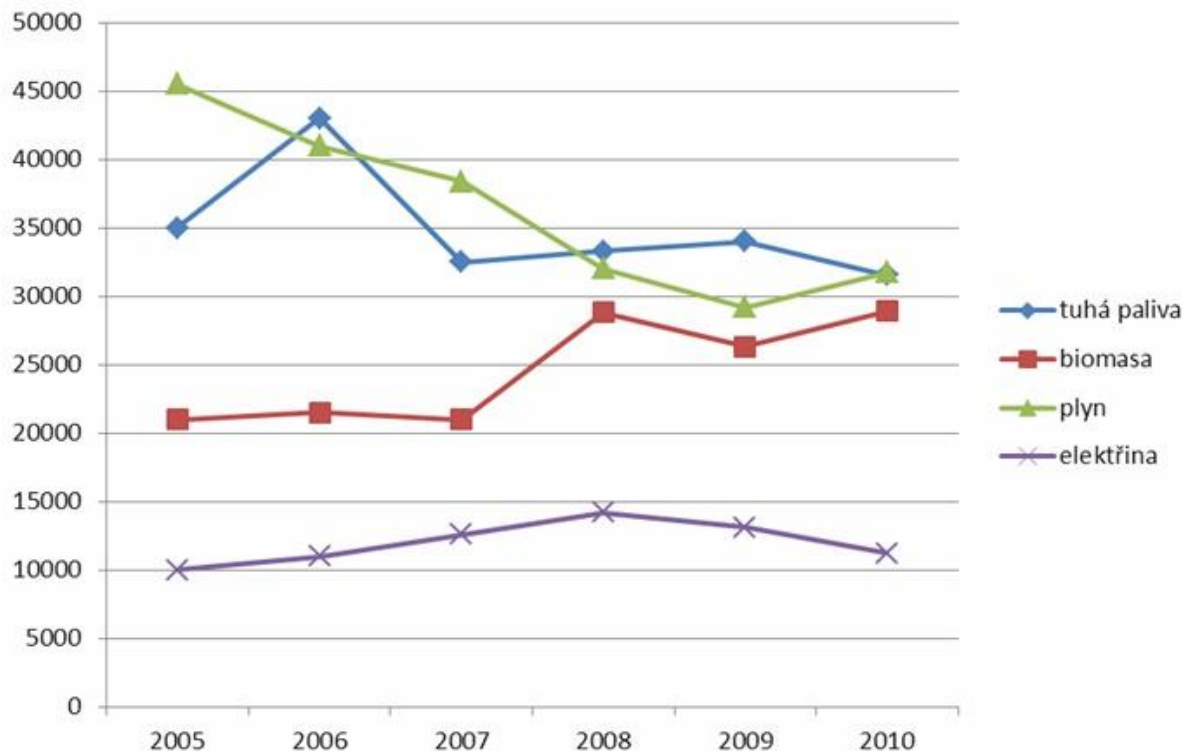
Současná doba je charakteristická tzv. „Zelenou linií“, která propaguje a preferuje snížení potřeb energie ve vytápění včetně snížení produkovaných škodlivých emisí. Je to reakce na zmenšující se zdroje energie a negativní ekologický dopad. Již od roku 2015 připravuje EU snížení škodlivých emisí a zvýšení účinnosti zdrojů tepla, přičemž již od roku 2012 jednotlivé členské státy stanovují v tzv. přechodné době přísnější ekologické podmínky nízkoenergetických zdrojů při vytápění rodinných domů. Z tohoto důvodu se postupně přechází od vytápění z fosilních paliv (uhlí) na obnovitelné paliva, především na produkty ze dřeva.

Návrh a výroba zařízení, které bude aktivně regulovat hoření s cílem vysoké účinnosti a omezení škodlivých spalin je úkolem pro nejbližší období s maximálním pozitivním dopadem na ekologii a využití energie. Podle informací v oborové oblasti nebyl do konce roku 2010 zpracován žádný projekt s cílem vývoje a výroby regulačního systému s požadovanými vlastnostmi.

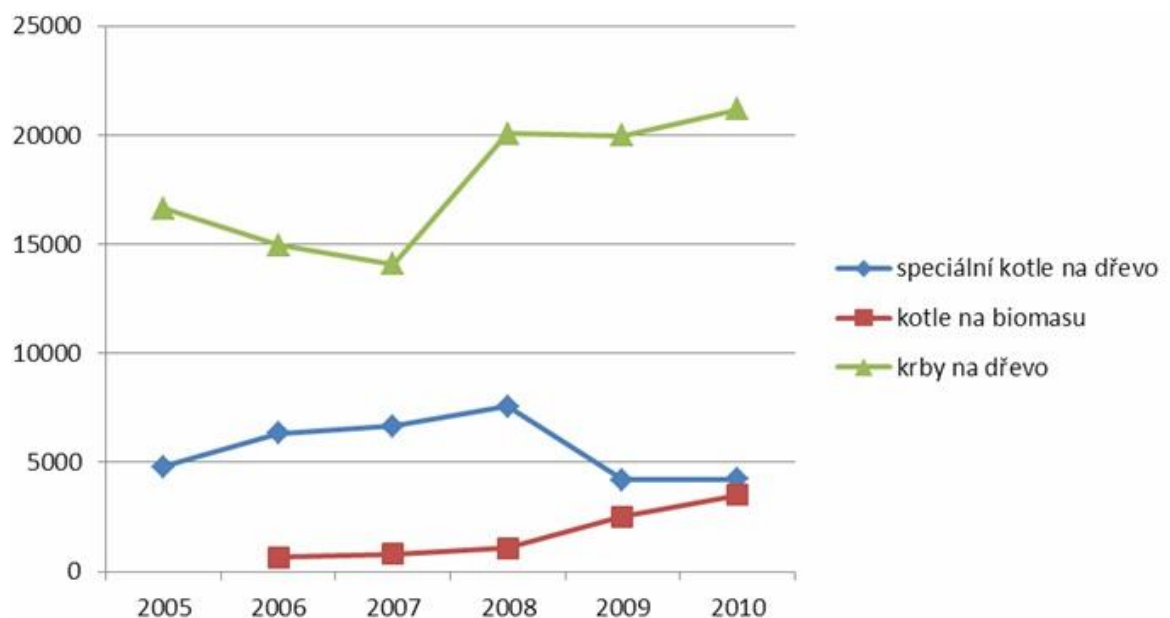
Výrobce automatických regulací hoření, firma Timpex spol. s r.o., mi navrhla téma pro bakalářskou práci a to zahájení vývoje, návrhu algoritmu, následné implementaci a odzkoušení automatické regulace hoření pomocí lambda sondy s tím, že zajistí technickou a odbornou podporu.

Požadavek na vývoj a výrobu projeví u uvedené firmy současní odběratelé, významní výrobci nízkoenergetických ohnišť (krby a kamna) v Evropě, zejména v německy mluvících zemích (Německo, Rakousko a Švýcarsko). Výroba požadovaného zařízení bude mít významný vliv nejen na ekologii v rámci celé EU, ale také na prodej českého výrobku do zahraničí.

Podle statistiky z [1] se v ČR prodalo za rok 2010 zhruba 29 000 spalovacích zařízení na biopaliva a jako jediný typ, podle paliva, má vzestupnou tendenci prodeje (viz. graf 1.1 a graf 1.2). Zvýšený zájem o pořízení ohniště na biopaliva podporuje i nejnižší provozní náklady na vytápění rodinných domů.



Graf 1.1: Vývoj prodeje tepelných zdrojů v ČR 2005 – 2011 [1]



Graf 1.2: Prodej spalovacích zařízení na biomasu v ČR 2005 – 2011 [1]

2 Palivo

Informace pro tuto kapitolu byly čerpány z [2] a [4]. Krby jsou specializované pro vytápění tuhým palivem. Jedná se především o přírodní dřevo a dřevěné brikety.

Složení tuhých paliv standardně vychází ze tří základních složek:

- hořlavina (h)
- popelovina (A)
- voda (w)

Tyto tři složky představují společně v plné míře tuhé palivo, a proto platí:

$$h + A + w = I \quad (2.1)$$

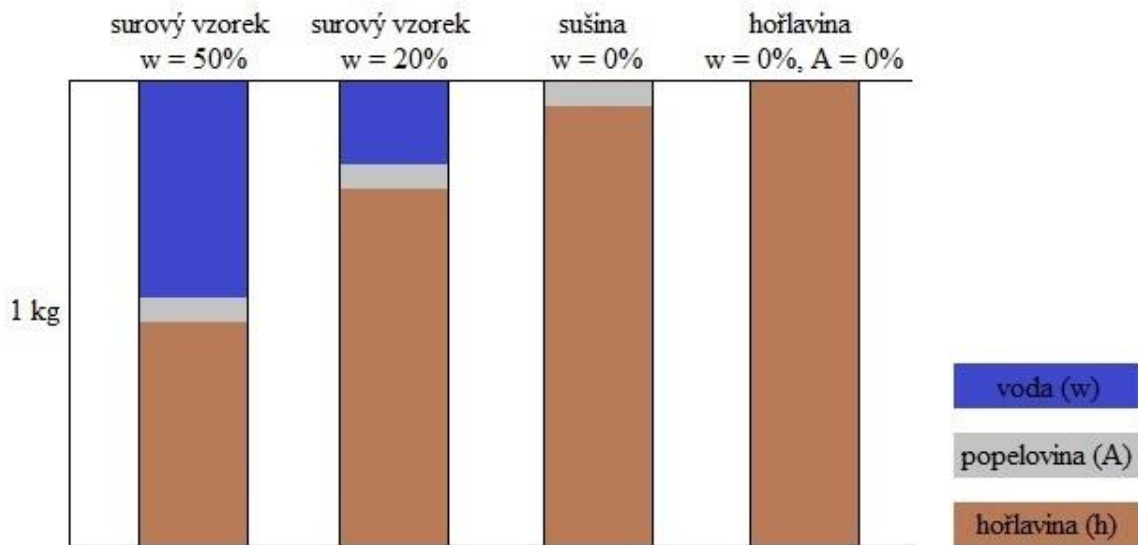
Hořlavina je organická hmota s vysokým obsahem kyslíku a zahrnuje všechny spalitelné složky jako zdroj energie. Anorganické látky, které se při růstu organické hmoty dřeva transformovaly z půdy do jeho struktury tvoří popelovinu a voda je přirozenou součástí každé organické hmoty. Sluneční záření, vzduch s obsahem oxidu uhličitého a voda jsou nezbytné pro fotosyntézu, zabezpečující růst organické hmoty. Je to proces transformace sluneční energie na energii biomasy, ve které je tato energie akumulována. Schopnost akumulovat energii slunečního záření, ať už v zásobách dřeva, či obecně biomasy ji skladovat je velkou předností tohoto přirozeně se obnovujícího zdroje energie.

Nejdůležitějším údajem o palivu je jeho energická hodnota (množství energie, které se uvolní spálením 1kg). Zdrojem energie je hořlavina, která je aktivní složkou paliva, zatímco popelovina a voda tvoří pasivní složku paliva (energicky snižující). S rostoucím podílem hořlaviny roste energická hodnota dřeva a významně snížit původně vysoký obsah vody v surovém dřevu čerstvě poraženého stromu sušením je celkem snadné. Obsah popeloviny, který je u dřeva velmi malý, samozřejmě změnit nelze. Téměř zanedbatelným obsahem popeloviny lze zjednodušit rovnici (2.1) zavedením nového pojmu **sušina** (označuje se „ d “). Sušina zahrnuje hořlavinu a zanedbatelný obsah popeloviny, navíc, jak název napovídá, se jedná o dokonale vysušenou dřevní hmotu. Zjednodušená rovnice pak bude mít tvar:

$$d + w = I \quad (2.2)$$

Jelikož jsou pro všechny druhy dřeva hodnoty obsahu popeloviny menší než 1 %, neovlivní takové zjednodušení podstatně přesnost výpočtů.

Jediným způsobem, jak lze stanovit energetický obsah paliva je spálení jeho vzorku v kalorimetru. Zvážený vzorek paliva se spálí v kovové uzavřené nádobce v kyslíkovém prostředí (zajišťuje spálení všech hořlavých složek). Spálením uvolněné teplo se stěnami nádoby předá vodě, v níž je nádoba ponořena. Zvýšením teploty vody umožní vypočítat množství z paliva uvolněného tepla. Takto určený energetický obsah paliva vyjadřuje množství veškeré chemicky vázané energie v palivu a nazývá se spalné teplo Q_n [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$].



Obrázek 2.1: Složení dřevní hmoty [2]

Obrázek 2.1 je grafickým vyjádřením rovnice (2.1) a znázorňuje složení dřevní hmoty, na kterém je uvedeno složení vzorků s rozdílným obsahem hořlaviny, sušiny a vody. Výška každého sloupce je stejná a odpovídá 1kg dřevní hmoty.

2.1 Voda ve dřevní hmotě

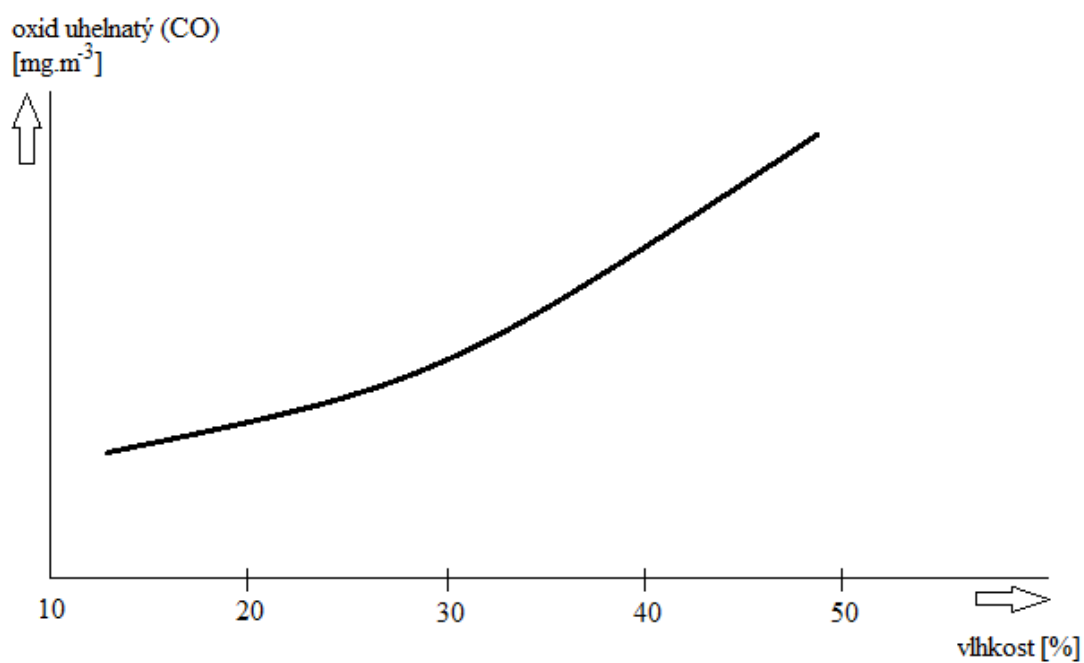
Významnou složkou dřevní hmoty je voda [2]. Pokud ze zjednodušeného vzorce (2.2) řekneme, že dřevní hmota se skládá ze sušiny a vody, pak sušina představuje aktivní složku paliva (zdroj energie) a voda pasivní složku paliva. Voda dřevo energeticky znehodnocuje tím, že snižuje jeho celkový energetický obsah. Voda je však přirozenou součástí dřeva a s její přítomností v palivu musíme počítat.

Dřevo čerstvě poraženého stromu obsahuje zhruba 50% vody a je výhodné snadno zvýšit jeho energetický obsah sušením. Orientačně lze uvést, že za vhodných podmínek lze během 2 let přirozeným schnutím snížit obsah vody na 20% a tím zvýšit jeho energetickou hodnotu. Další vysoušení je již časově náročné a pro palivové dřevo v zásadě postrádá smysl.

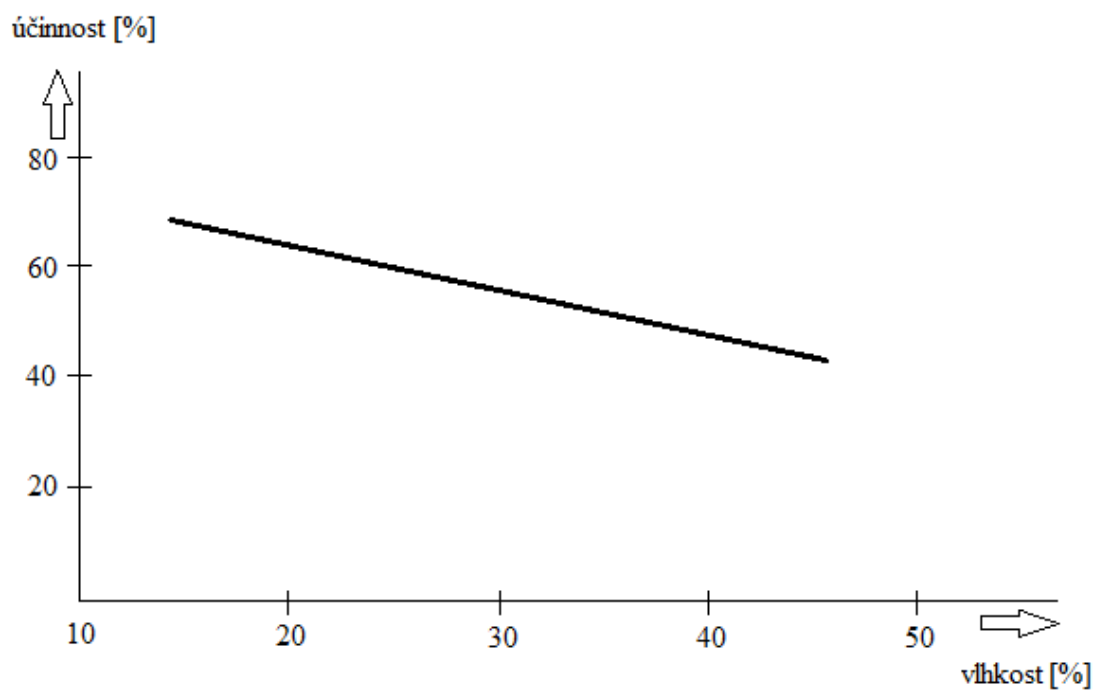
Vlhkost dřeva (obsah vody) se vyjadřuje hmotnostním podílem vody v celkovém množství dřeva. Když 1kg vzorku dřeva obsahuje 0,5kg vody, tak představuje voda polovinu (50%) celkové hmotnosti a vlhkost $w = 50\%$. Je to standardní postup užívaný v energetice. Jinak však vlhkost dřeva hodnotí dřevaři, kteří porovnávají obsah vody s obsahem sušiny ve vzorku. V našem případě připadne 0,5kg vody na 0,5kg sušiny a vlhkost dřeva bude tedy 100%.

Stanovení obsahu vody se provádí tak, že vzorek dřeva se zváží a poté suší při teplotě zhruba 100°C tak dlouho, dokud se všechna voda nevypaří, což se pozná podle toho, že při dalším sušení již hmotnost dřeva neklesá. Získaná sušina se zváží a z úbytku hmotnosti vzorku stanoví jeho původní vlhkost.

Platí, že obsah vody je rozhodujícím parametrem při stanovení energetického obsahu dřeva a že ovlivňuje nejen průběh a kvalitu spalovacího procesu, ale i produkci škodlivin. Orientační graf na obrázku 2.2 uvádí, jak s rostoucím obsahem vody v dřevní hmotě roste obsah nespálených hořlavých plynných složek (oxid uhelnatý) ve spalinách a obrázek 2.3 uvádí, jak s rostoucí vlhkostí dřeva klesá účinnost krbových kamen.



Obrázek 2.2: Vliv vlhkosti dřeva na produkci oxidu uhelnatého [2]



Obrázek 2.3: Vliv vlhkosti dřeva na účinnost kamen [2]

3 Lambda sonda

Lambda sonda, čerpáno z [5] a [6], je senzor, který měří obsah kyslíku ve spalínách. Princip lambda sondy je založen na chování keramického materiálu, který se stává po dosažení určité teploty elektricky vodivým. Lambda senzor pracuje na principu baterie, kdy přítomností různého obsahu kyslíku na platinových elektrodách, mezi kterými se nachází pevný elektrolyt, vzniká elektrické napětí úměrné rozdílu obsahu kyslíku. Pro úspěšné měření je lambda sonda vytápěna konstantním napětím na teplotu okolo 550°C. Na výstup vydává lambda sonda napětí (mV), které lze přepočítat na obsah kyslíku.

Lambda sonda je zašroubována závitem (18 x 1,5mm) přímo do plynové cesty a je omývána proudem měřeného plynu. Celková délka lambda sondy je cca 94mm a délka čidla zabudovaného v kouřovodu je cca 28mm. Napájení lambda sondy je 12V.

Výhodou měření lambda sondy je vysoká životnost měřícího čidla, značná odolnost proti nečistotám ve spalínách a snadná instalace.

Při spalování paliva v kombinaci se vzduchem vznikají spaliny, které obsahují různé látky, plyny, které škodí životnímu prostředí (emise). Jejich složení a množství je výrazně závislé právě na poměru paliva a vzduchu. Existuje však určitá úroveň, v které je množství emisí redukováno v poměru účinnosti spalování. Tedy na základě obsahu kyslíku ve spalínách můžeme stanovit koncentraci emisí, především škodlivý oxid uhelnatý, který je čím dál více zpříšňovaný.

V automobilech se lambda sonda používá současně s katalyzátorem. Sonda se umístí před katalyzátor a měří zbytkový kyslík. Řídící jednotka, která na základě hodnot z lambda sondy, řídí proces spalování v ideálním poměru paliva a kyslíku. Spalováním však vznikají škodlivé látky, které pak redukuje katalyzátor na nižší množství. U krbů však není použití katalyzátoru jednoduchý, neboť vyžaduje složitější konstrukční řešení, zvyšuje cenu krbů a nezbytná by byla jeho pravidelná výměna. Z těchto důvodů se používání katalyzátoru v krbech dosud neuplatnilo.

Podmínkou řízení spalování pomocí lambda sondy je ovšem spolehlivý odběr spalin. Ty musí být měřeny bezprostředně za spalovacím zařízením v místě, před kterým je zabráněno přísávání falešného vzduchu případnými netěsnostmi v kouřovodu směřujícím do komína. Nechtěný přísun vzduchu do spalin by výsledky znehodnocoval.

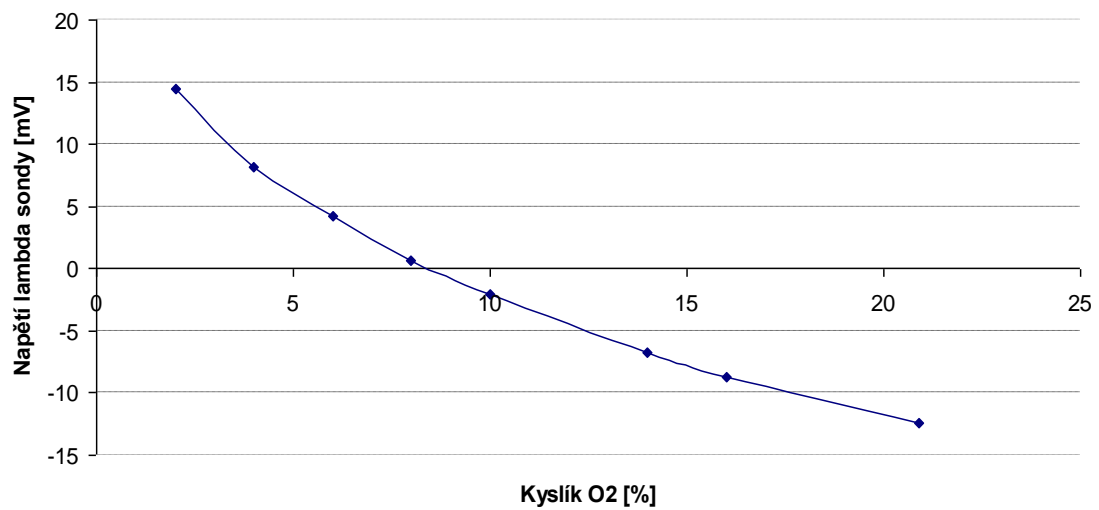
3.1 Použitá lambda sonda

Ke zkouškám byla objednána lambda sonda (viz. obrázek 3.1) se 4 vodiči. Šedý a černý vodič (signálové vodiče), které se napojí na regulaci a dva bílé vodiče pro napájecí zdroj, které slouží k vyhřívání sondy.



Obrázek 3.1: Lambda sonda

Závislost výstupního napětí lambda sondy na kyslíku O_2 (kalibrační křivka), je znázorněn na obrázku 3.2. Křivka byla dodána společně s lambda sondou.



Obrázek 3.2: Závislost výstupního napětí na kyslíku

K lambda sondě byl dále dodán napájecí zdroj Newte Z70-12SW (viz. obrázek 3.3) s ochranou proti zkratu na výstupu, tepelnému a výkonovému přetížení. Jeho vstupní napětí je 230V AC, výstupní napětí 12V DC určené pro žhavicí napětí sondy.

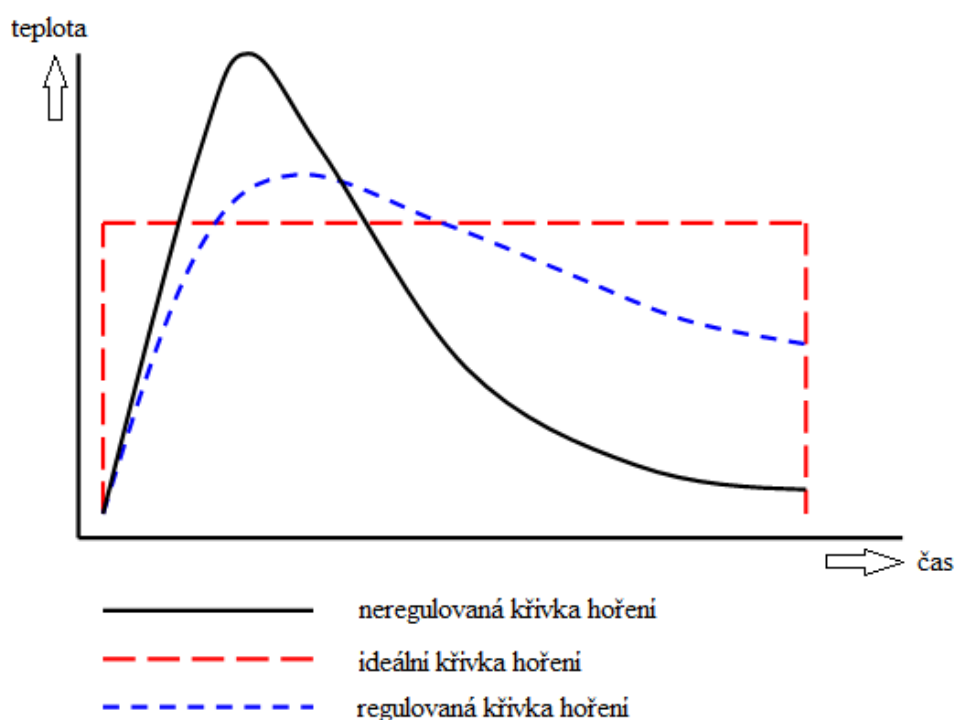


Obrázek 3.3: Napájecí zdroj lambda sondy

4 Automatická regulace

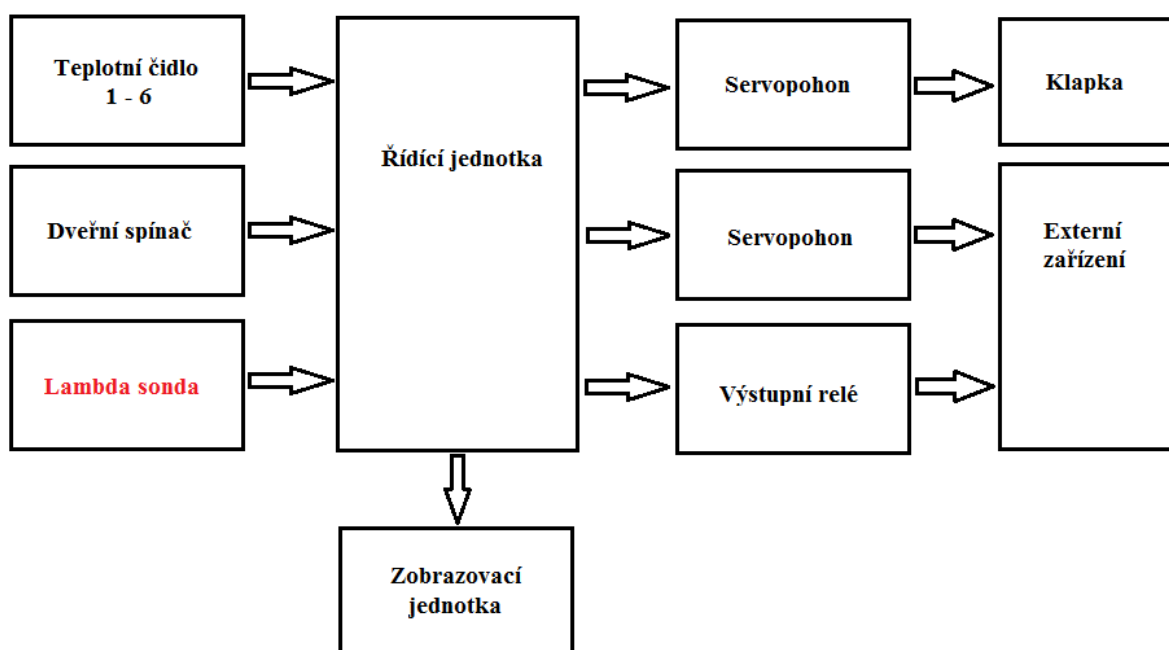
Automatická regulace je řízena elektronickou řídicí jednotkou, která reguluje množství přívodu vzduchu do ohniště v závislosti na teplotě spalin. Podmínkou pro instalaci a použití regulace je nutný centrální přístup vzduchu do ohniště. Princip regulace hoření spočívá v regulaci množství vzduchu do ohniště, takže je nutné zajistit utěsnění „falešného vzduchu“, zejména příkladací dvířka.

Pro tuto práci byla použita již funkční automatická regulace s označením **Reg310** od firmy Timpex s.r.o., která řídí spalovací proces na základě teploty pomocí teplotního čidla umístěného v kouřovodu. Cílem regulace je snížit maximální dosaženou teplotu na úroveň využitelnosti vyprodukované energie (viz. obrázek 4.1) a při dosažení tzv. žárového procesu uzavřít přívod vzduchu do ohniště, čímž se zabrání úniku spalin, resp. energie do ovzduší. Regulace však neřeší tvorbu škodlivých látek, které odcházejí se spalinami do ovzduší a úroveň účinnosti spalovacího procesu.



Obrázek 4.1: Křivky průběhu hoření

4.1 Blokové schéma



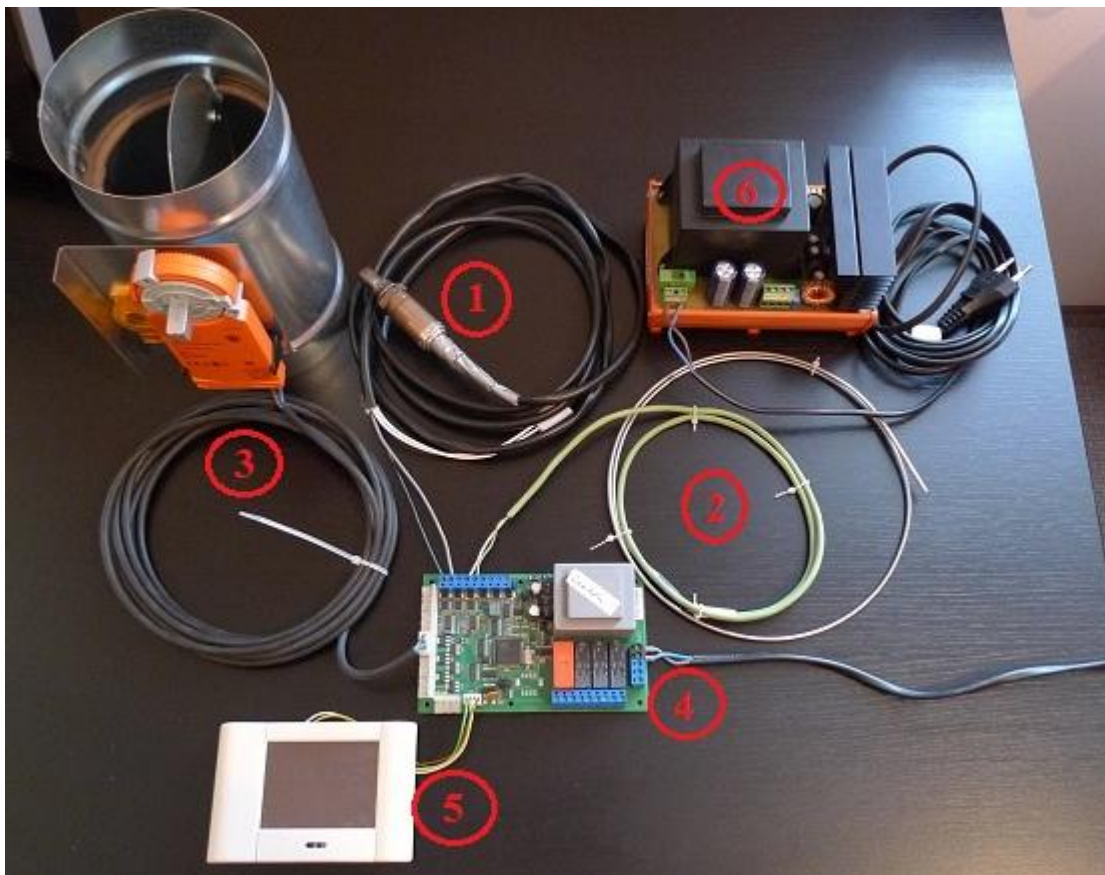
Obrázek 4.2: Blokové schéma regulace Reg310

- **Teplotní čidlo 1-3:** slouží k měření teploty spalin
- **Teplotní čidlo 4-6:** slouží k měření nízkoteplotních procesů (vzduch, voda)
- **Dveřní spínač:** používá se zejména pro ovládání startu regulace
- **Lambda sonda:** řešení této práce. Jelikož výstup teplotního čidla je podobný jako u lambda sondy (napětí v řádu mV), lambda sonda byla zapojena do vstupu teplotního čidla a následně upravena kalibrační křivka.
- **Řídící jednotka:** elektronická jednotka, která obsahuje mikroprocesor Atmel AT89C51ED2,
- **Servopohon a klapka:** klapka ovládána servopohonem, která reguluje množství vzduchu přiváděného do ohniště
- **Servopohon 2:** slouží pro ovládání externích zařízení (spalinová klapka, přepínací ventily, apod.) Servopohony jsou používány v rozsahu napětí do 24V.
- **Výstupní relé:** relé Takamisawa ovládají spínání a rozpínání elektrického obvodu externího zařízení (ventilátory, uzavírací ventily, podlahové vytápění, apod.) dle nastavení funkce činnosti. Relé jsou dimenzována na 230V/2A.

- **Zobrazovací jednotka:** k řídicí jednotce je zapojena zobrazovací dotyková jednotka v rozlišení 320 x 240 bodů, která zobrazuje vstupní a výstupní informace. Pomocí zobrazovací jednotky se nastavují potřebné hodnoty a stavy parametrů.

Napájení řídicí jednotky (230V) je vedeno z transformátoru do spínaného zdroje. Příkon samotné jednotky se pohybuje do 3VA. Je závislý od momentálního stavu činnosti servopohonů.

4.2 Zapojení



Obrázek 4.3: Potřebné komponenty

Na obrázku 4.3 jsou znázorněny potřebné komponenty pro správnou činnost regulace a na obrázku 4.4 jejich zapojení.

1. Připojení lambda sondy
2. Připojení teplotního čidla
3. Připojení servopohonu, který ovládá klapku
4. Připojení napájení 230V

5. Připojení zobrazovací jednotky
6. Napájecí zdroj pro lambda sondu (obrázek 4.3)



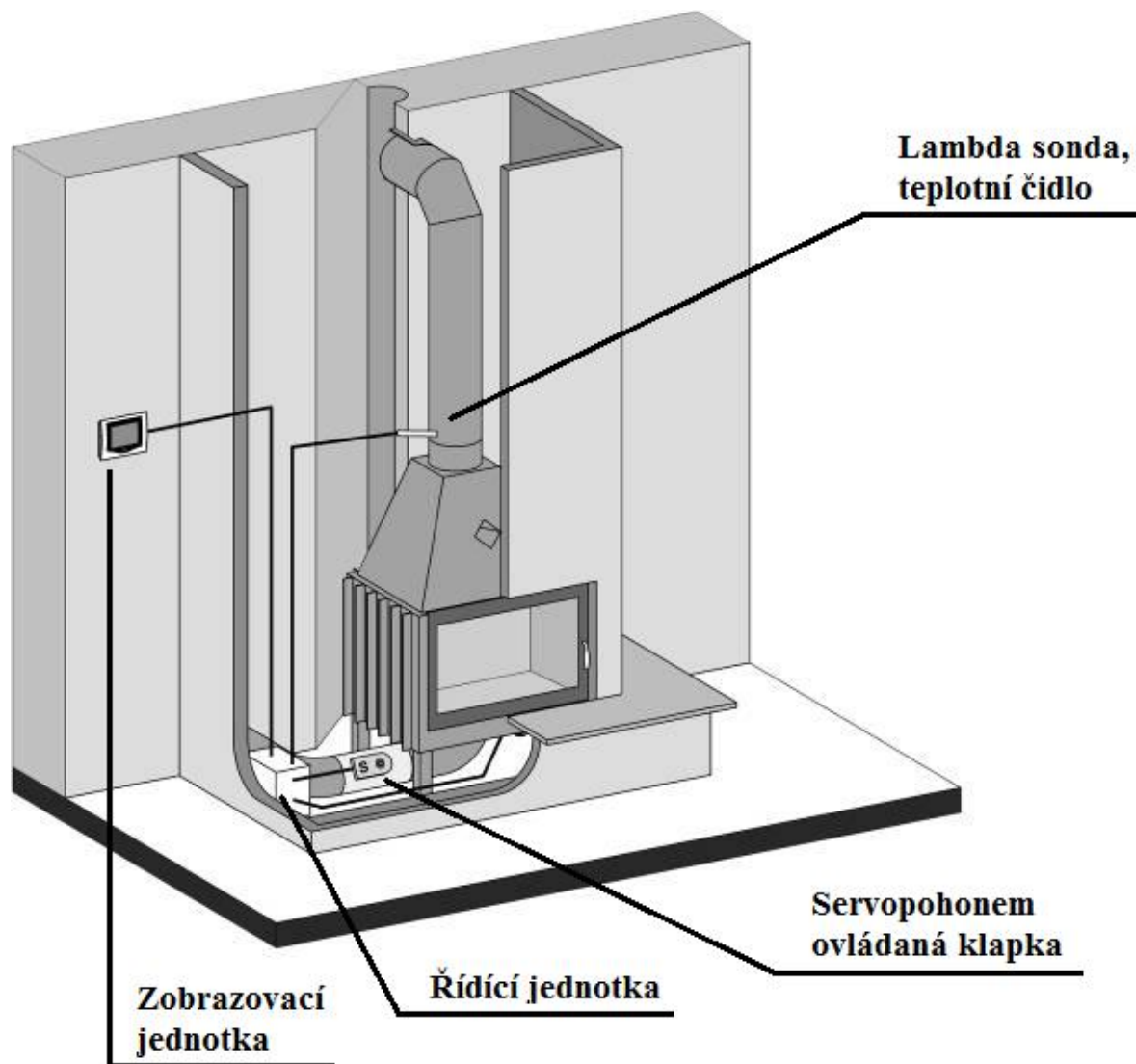
Obrázek 4.4: Zapojení regulace Reg310

Regulace Reg310 byla vybrána pro svou univerzálnost při nastavení parametrů a stavů a možných změn funkcí vstupů a výstupů. Základní nastavení se provádí pomocí rozhraní RS485 s PC, na kterém je instalován aplikační software. Doplňkové, popř. jednodušší nastavení se provádí pomocí zobrazovací jednotky. Uvedená regulace se používá nejen pro regulaci hoření, ale i pro regulaci teplovodního vytápění v rodinných domech. Velkou výhodou, zejména z praktického pohledu, je hardwarové řešení do dvou jednotek – centrální a zobrazovací, které usnadní praktické zkoušky. Veškeré kabelové propojení je řešeno v centrální jednotce, přičemž zobrazovací část je „mobilní“ a snadno ovládaná. Při zkouškách funkčnosti regulačního systému s lambda sondou byly použity následující komponenty:

- servopohon Belimo, typ CM24-F10-T CZ, 24 V AC/DC s magnetickou spojkou
- klapka o průměru 120mm
- teplotní čidlo, termočlánek „K“, 1 100°C / 4m se skelnou izolací, popř. se silikonovou izolací

Bohužel v době realizace této práce nebyla k dispozici funkční záznamová část aplikačního softwaru, takže nebylo možno výsledky přímo ukládat v textové, popř. grafické podobě.

4.2.1 Ukázka zapojení regulace v praxi



Obrázek 4.4: Ukázka zapojení regulace v praxi [7]

Obrázek 4.4 byl převzat z [7] a následně upraven o popis komponent.

5 Princip spalování

Informace pro tuto kapitolu jsou čerpány z [2], [3], [4]. Podstatou spalovacího procesu je oxidace hořlaviny paliva vzdušným kyslíkem. Charakter spalovací reakce je v určité fázi vždy omezen buď ochlazením v důsledku odvodu tepla, nedostatkem některé z reagujících látek, nebo taktéž nedostatkem spalovacího vzduchu do spalovací oblasti. U malých spalovacích zařízení typu krb a kamna se nepoužívá nucený přívod spalovacího vzduchu (ventilátoru), ale přívod vzduchu do ohniště je zajišťován pouhým tahem komína.

Hořlavina, jak už bylo řečeno (viz. kapitola 2), je nejvýznamnější složkou paliva, neboť je nositelem energie. Skládá se z:

- 50,3% uhlíku (C)
- 6,0% vodíku (H)
- 0,6% dusíku (N)
- 42,3% kyslíku (O)
- a 0,8% popeloviny (pokud se jedná o sušinu)

Z toho aktivními prvky jsou pouze uhlík a vodík (nositelé energie paliva). Prvkové složení hořlaviny se všech běžných druhů dřeva podstatně neliší.

Chování hořlaviny v průběhu spalovacího procesu je takový, že část se při zahřátí paliva uvolní ve formě hořlavých plynů a zbytek dohořívá v podobě tuhého uhlíku. Hořlavina se dá tedy rozdělit na prchavou hořlavinu a fixní uhlík. Obsah prchavé hořlaviny je důležitým parametrem tuhých paliv, protože zásadně ovlivňuje fázi zapálení paliva, resp. čím více prchavé hořlaviny palivo obsahuje, tím lépe se zapaluje. Prchavá hořlavina se ze dřeva začíná uvolňovat při teplotách nad 160°C.

Po uvolnění prchavé hořlaviny ze dřeva zůstává fixní uhlík v tuhé fázi ležet na roštu, kde dohořívá. Kvalita spalovacího procesu se v první řadě hodnotí podle toho, jakou část hořlaviny paliva se podařilo spálit. Mluví se o účinnosti spalování, která ale nikdy nedosáhne 100%, protože část spalitelných látek v hořlavině neshoří a především opouští ohniště ve formě hořlavých plynů (oxid uhelnatý), nebo zůstává na roštu ve formě tuhého uhlíku v popelu, který je ale porovnáním s oxidem uhelnatým nepatrný. Závažnější je tedy příliš vysoký obsah nespálených hořlavých plynů ve spalinách, které snižují účinnost, ale zvyšují produkci nežádoucích škodlivin s negativními vlivy. Technický vývoj se tedy zaměřuje zejména na zvýšení účinnosti spalování, které se dá dosáhnout mj. snížením oxidu uhelnatého ve spalinách.

Přebytečný vzduch přiváděný do spalovací oblasti snižuje teplotu v ohništi, tím se prodlužuje doba potřebná ke spalovací reakci a navíc zvyšuje průtok vzduchu ohništěm, kterým se snižuje doba

setrvání potřebného vzduchu ke spalování. Přebytečný vzduch navíc zvyšuje množství spalin (oxid uhelnatý) a tepla, které spaliny odvádějí komínem do ovzduší (snižuje se účinnost spalovacího zařízení). Naopak při nedostatečném množství přívodu vzduchu do ohniště spalitelné složky dostatečně nezreagují na oxid uhličitý, ale jen na škodlivý oxid uhelnatý, který odchází komínem do ovzduší.

Množství vzduchu do ohniště by tedy nemělo být příliš nízké, ale ani příliš vysoké. Aby spalovací proces proběhl v ohništi co nejdokonaleji, je nutné udělat určitý kompromis mezi nízkým a vysokým obsahem vzduchu v ohništi.

Při měření zbytkového obsahu kyslíku ve spalinách pomocí lambda sondy se bere v úvahu, že část přiváděného vzduchu do ohniště se spotřebuje k oxidaci hořlavých složek (uhlík a vodík) a zbytek odchází, jako přebytečný kyslík, se spalinami komínem do ovzduší. Při nekonečně velkém přebytku vzduchu bude ve spalinách 21% kyslíku, stejně jako je ve vzduchu. Obsah kyslíku ve spalinách se tedy může pohybovat v rozmezí 0 až 21%.

5.1 Oxid uhličitý a uhelnatý

Oxid uhličitý [8] (značí se CO_2) je bezbarvý plyn bez zápachu a chuti. Při vyšších koncentracích může mít v ústech nakyslou chuť. Vzniká při dokonalém spalování reakcí uhlíku s kyslíkem.

Oxid uhelnatý [9], [10] (značí se CO) je bezbarvý plyn bez zápachu a chuti. Je jednou z nejběžnějších a široce rozšířených látek znečišťujících ovzduší. Vzniká nedokonalým spalováním uhlíkatých materiálů, ale také v některých průmyslových a biologických procesech.

Celkové emise oxidu uhelnatého do ovzduší se rovnají souhrnu emisí všech ostatních látek znečišťujících ovzduší, nebo ho dokonce převyšují. Z toho důvodu představuje oxid uhelnatý potenciální ohrožení životního prostředí.

Největším zdrojem oxidu uhelnatého je nedokonalé spalování (v průmyslu, v automobilech, v teplárnách a ve spalovnách). Vzniká často v domácnostech ve spalovacích zařízeních s omezeným přístupem vzduchu (popř. bez odtahu vzduchu), zejména pokud se tato zařízení používají v málo větraných místnostech. Jedná se především o vytápění domů pomocí krbů a kamen.

Oxid uhelnatý se uvádí v jednotkách mg/m^3 , nebo jako ppm, přičemž 1 ppm představuje $1,145\text{mg/m}^3$.

5.2 Dokonalé a nedokonalé spalování

Dokonalé spalování [2], [3], [8], [9] představuje spálení všech hořlavých složek. Tedy při dokonalém spálení vznikne reakcí kyslíku s uhlíkem oxid uhličitý podle rovnice:



nebo reakcí oxidu uhelnatého s kyslíkem podle rovnice:



a z vodíku voda (vodní pára). Při obvyklých podmínkách můžeme spalování vodíku považovat za dokonalé. Avšak jinak je tomu při spalování uhlíku. Část uhlíku neshoří vůbec a najdeme ji v popelu (zanedbatelný množství), další část zreaguje s kyslíkem, ale pouze na oxid uhelnatý podle rovnice:



a zbytek uhlíku zreaguje na oxid uhličitý, jako produkt dokonalého spalování. Pokud tedy neproběhne reakce až na oxid uhličitý, ale pouze na oxid uhelnatý, jedná se o nedokonalé spalování.

Ukázka výpočtu množství spalovacího vzduchu:

Jak už bylo řečeno, hořlavina obsahuje 2 spalitelné složky a to uhlík (C) a vodík (H). Dále je v hořlavině obsažen kyslík (O₂), jehož množství je nutno odečíst (není zapotřebí jej dodávat). S přihlédnutím k obsahu kyslíku ve vzduchu (21% objemově) lze vypočítat spotřebu vzduchu pro spálení 1kg dřeva podle vzorce:

$$V_{vz,t} = 1/0,21 (1,86 \cdot C + 5,55 \cdot H - 0,7 \cdot O_2) \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.4)$$

Přičemž první člen v rovnici (5.4) vypočítává spotřebu kyslíku na spotřebu spalovacího vzduchu. Druhý člen vyjadřuje spotřebu kyslíku pro spálení uhlíku, třetí člen taktéž vyjadřuje spotřebu kyslíku, ale na vodík a čtvrtý snižuje celkovou spotřebu kyslíku o kyslík, který je obsažen již v palivu.

Řekli jsme si, že složení hořlaviny se běžných typů dřeva prakticky nemění. Tyto hodnoty tedy můžeme použít pro výpočet množství spalovacího vzduchu. Pro připomenutí:

- 50,3% uhlíku (C)
- 6,0% vodíku (H)
- 0,6% dusíku (N)
- 42,3% kyslíku (O)
- a 0,8% popeloviny (pokud se jedná o sušinu)

1kg sušiny bude obsahovat: 0,503kg uhlíku a 0,06kg vodíku. Tyto složky jsou aktivní (zdroj energie). Ostatní složky nepředstavují energetický přínos. Ovšem pro výpočet potřebujeme ještě kyslík, který představuje 0,423kg v 1kg sušině. Kyslík obsažený v palivu je jedna z příčin snadného zapalování dřeva.

Po dosazení hodnot do rovnice (5.4) dokážeme vypočítat teoretické množství vzduchu pro dokonalé spálení 1kg sušiny:

$$V_{vz,t} = 1/0,21 (1,86 \cdot 0,503 + 5,55 \cdot 0,06 - 0,7 \cdot 0,423) = 4,63 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Příklad byl uveden pro představu, jaké teoretické množství (objemově) je potřeba ke spálení 1kg paliva. V reálu hraje roli na výsledku ale také fakt, jaká je např. vlhkost vzduchu, množství a způsob přiloženého paliva, rozdílná vlhkost dřeva. Takže nelze přesně říct, resp. vypočítat množství vzduchu potřebného pro dokonalé vyhoření paliva. Jedná se pouze o teoretický výpočet.

6 Experimentální zkoušky

Pro vývoj algoritmu řízení regulace pomocí lambda sondy a její použitelnost v praxi, bylo nezbytně nutné provést experimentální zkoušky. Zkoušky byly prováděny ve Výzkumném energetickém centru v Ostravě výhradně pro tuto práci.

Cíle prováděných zkoušek:

Experimentální ověření vlivu regulace přívodu vzduchu na výsledné parametry spalovacího procesu (oxid uhelnatý, účinnost, délka periody). Bude se jednat o zařízení spalující kusové dřevo s centrálním přívodem spalovacího vzduchu pro krbové vložky.

Body řešení:

- na vybraném spalovacím zařízení bude na přívodním potrubí spalovacího vzduchu nainstalována servopohonem řízená klapka, která bude regulovat množství spalovacího vzduchu do ohniště
- z měřicího úseku za krbovou vložkou budou měřeny spaliny a obsah zbytkového kyslíku bude stanoven na kontinuálním analyzátoru. Tato informace bude sloužit jako vstupní signál regulátoru, který bude pomocí regulační klapky udržovat stabilní úroveň obsahu kyslíku ve spalínách na úrovni 10%
- spalovací režim bez regulace při různých nastaveních ovládacích prvků testovaného spalovacího zařízení
- ověření funkčnosti lambda sondy
- ověření použitelnosti lambda sondy pro cílový typ spalovacího zařízení
- experimentální ověření funkčnosti lambda sondy. Signál z lambda sondy bude snímán a porovnán s hodnotami koncentrace kyslíku stanoveným kontinuálním analyzátozem

6.1 Palivo

Pro zkoušky byla použita buková polena, která jsou pro topení v krbech a kamnech s dubovým dřevem jedny z nejvhodnějších, neboť dřevo rychle vysychá a lehce se zapaluje. Navíc je jeho výhřevnost na vysoké úrovni ($4,2 \text{ kWh.kg}^{-1}$) oproti např. neméně používaného dřeva z jasanu, který má výhřevnost $2,1 \text{ kWh.kg}^{-1}$ [11].

6.2 Použité spalovací zařízení

Pro experimentální zkoušky byla vybrána krbová vložka od české firmy Romotop s označením **KV025L**. Tato krbová vložka byla vybrána z důvodu její univerzálnosti a rozšířenosti. Na obrázku 6.1, je uveden čelní pohled a boční průřez krbové vložky KV025L [12].



Obrázek 6.1: Krbová vložka Romotop KV025L [12]

Parametry od výrobce krbové vložky:

Výkon:	9,5 kW
Účinnost:	80,17 %
CO při 13% O ₂ :	1400 mg.m ⁻³
Prach při 13% O ₂ :	34 mg.m ⁻³
Palivo:	dřevo, dřevěné brikety
Teplota spalin:	166 °C

6.2.1 Přívody primárního a sekundárního vzduchu

Krbová vložka je vybavena centrálním přívodem spalovacího vzduchu, který se nachází uprostřed v zadní části krbové vložky. Centrální vzduch se pak dále dělí ve vložce na primární a sekundární vzduch. Primární vzduch směřuje do spalovací komory (resp. ohniště) zespodu skrz rošt a sekundární vzduch je veden kanálky vzhůru po zadní straně vložky a do ohniště vstupuje zhruba ve 2/3 výšky.

V přední části krbové vložky, uprostřed pod dvířky, se nachází ovládací páka, kterou je možno ovládat celkový přívod spalovacího vzduchu (centrální) a přívod primárního vzduchu.

Při nastavení přední regulační páky úplně vlevo je přívod vzduchu úplně uzavřen. V prostřední oblasti se nachází část omezená dvěma drobnými zarážkami. Při nastavení páky mezi tyto zarážky je sekundární přívod spalovacího vzduchu otevřen, ale klapka otevírající přívod primárního vzduchu je stále uzavřená. Při nastavení páky úplně vpravo je otevřen jak přívod sekundárního vzduchu, tak i klapka přívodu primárního vzduchu.

Na centrální přívod spalovacího vzduchu krbové vložky byla instalována krátká rovná část potrubí s regulační klapkou, která je ovládána servopohonem (viz. obrázek 6.2 a obrázek 6.3). Nastavení regulační klapky je popisováno ve stupních otevření (0° znamená, že klapka je uzavřená, 90° klapka je otevřená). Implementačně však 100% jako otevřená klapka, 0% zavřená klapka.



Obrázek 6.2: Instalovaná regulační klapka se servopohonem



Obrázek 6.3: Detail regulační klapky se servopohonem

6.3 Ověření funkčnosti lambda sondy

Zkouška 1:

První zkouškou však bylo nejdříve otestováno chování regulace při reálném provozu.

- počáteční stav – regulační klapka se servopohonem je uzavřená
- regulace pracuje v režimu ovládání serva 1 x za 5 sekund
- požadovaná hodnota kyslíku ve spalínách 10 % (měřeno kontinuálním analyzátozem)
- po přiložení klesá kyslík a servopohon pomalu otevírá klapku (cca 2 až 3 minuty)
- klapka se otevře na maximum (90°)
- cca 10 minut setrvává otevřená, potom opět uzavírá, chvíli reguluje cca 5 min
- následně se uzavře a zůstává uzavřená. Po uzavření klapky se kyslík ve spalínách drží na hodnotě kolem 12 %

Z toho bylo odvozeno, že krbová vložka je netěsná a je potřeba ji přetěsnit.

Zkouška 2:

Bylo provedeno přetěsnění krbové vložky. Přetěsnění spočívá k výměně těsnící šňůry mezi krbovou vložkou a dvířky. Zkouška se tedy opakovala. Tentokrát již při uzavření vstupního vzduchu do ohniště oheň ve spalovací komoře znatelně pohasíná.

Po roztopení byla následně instalována lambda sonda. Lambda sonda byla zapojena na napěťový vstup (DATALAB) a na další napěťový vstup na měřící smyčce zkušebny. Při změně kyslíku ve spalínách nebyla pozorována žádná změna výstupního signálu. Proto bylo přistoupeno

k ověření funkčnosti lambda sondy kalibračním plynem s nulovým obsahem kyslíku. Při nízkém průtoku plynu lambda sondou nebyla pozorována žádná odezva (jednotky mV). Teprve po zvýšení průtoku kalibračního plynu se odezva začala projevovat (dosaženo hodnoty 70mV až 80mV). Při opětovném snížení průtoku kalibračního plynu se snižovala i odezva lambda sondy. Dodaná lambda sonda je tedy výrazně závislá na průtoku měřeného plynu a v reálných podmínkách (při instalaci v kouřovodu za spalovacím zařízením) se spaliny k čidlu téměř nedostanou a lambda sonda neměří správně. Bude tedy nutné, k měření obsahu kyslíku ve spalínách, použít jinou lambda sondu s odlišnou konstrukcí přívodních kanálků tak, aby i při nízké rychlosti spalin v kouřovodu byla zajištěna doprava vzorku k senzoru lambda sondy.

Aby testy mohly dále pokračovat, byla použita lambda sonda, která se využívá v automatických kotlích firmy Benekov s.r.o. Na obrázku 6.4 je dole umístěna původní lambda sonda, nahoře nově testovaná lambda sonda z automatických kotlích firmy Benekov s.r.o.



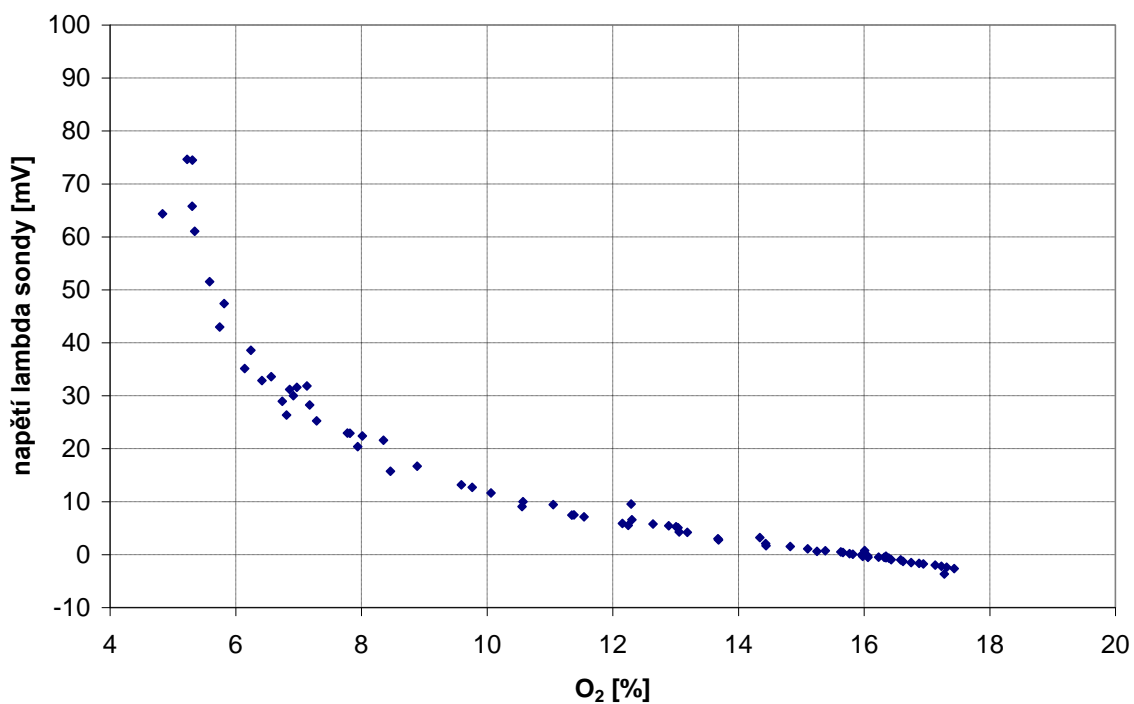
Obrázek 6.4: Lambda sondy

S druhou lambda sondou byly provedeny stejné testy, jako s původní lambda sondou. Výsledky odezvy výstupního signálu byly pozitivní a proto byla lambda sonda instalována do spalínového kanálu krbové vložky (viz. obrázek 6.5).



Obrázek 6.5: Instalace lambda sondy do kouřovodu

Po instalaci lambda sondy byla stanovena závislost výstupního signálu lambda sondy na obsah kyslíku ve spalínách (měřeno kontinuálním analyzátořem). Každý bod je naměřeným minutovým průměrem napětí lambda sondy a koncentrace kyslíku ve spalínách. Při cca 5% kyslíku výstupní signál na lambda sondě prudce stoupá cca k hodnotě 80mV (viz. graf 6.1)



Graf 6.1: Závislost výstupního napětí lambda sondy na koncentraci kyslíku ve spalínách

6.4 Zkoušky

Bylo provedeno celkem 8 spalovacích zkoušek na utěsněné krbové vložce KV025L.

Zkouška 1: Při této zkoušce bylo přiloženo 2,77kg paliva. Palivo vyhořelo cca za 45 minut. Přední ovládací pákou byly ovládací klapky otevřeny na maximum (páka nastavena úplně vpravo), zadní regulační klapka byla nastavována ručně. Nastavení zadní regulační klapky se výrazně projevovalo na průběžích sledovaných veličin.

Zkouška 2: Při této zkoušce bylo přiloženo 2,85kg paliva. Palivo vyhořelo za cca 45 minut. Přední ovládací pákou byly ovládací klapky otevřeny na maximum (páka nastavena zcela vpravo), zadní regulační klapka byla také otevřena na maximum po celou dobu zkoušky.

Zkouška 3: Při této zkoušce bylo přiloženo 3,07kg paliva. Palivo vyhořelo cca za jednu hodinu. Přední ovládací páka byla nastavena doprostřed (primární vzduch uzavřen, sekundární otevřen). Zadní klapka byla automaticky regulována tak, aby bylo dosaženo 10% koncentrace kyslíku ve spalinách. Po přiložení paliva do zařízení byla zadní regulační klapka otevřena na maximum. Po cca 13 minutách od přiložení se klapka začala přivírat, tento zásah se projevil na koncentraci kyslíku ve spalinách. Cca po 20 minutách došlo k prvnímu úplnému uzavření regulační klapky (uzavření přívodu vzduchu do zařízení) a tímto zásahem se zhoršily emise CO. Po zbývající část zkoušky regulace celkem spolehlivě udržovala požadovanou koncentraci kyslíku ve spalinách. Oproti zkoušce 1 a 2 došlo k prodloužení doby hoření paliva.

Zkouška 4: Při této zkoušce bylo přiloženo 2,81kg paliva. Palivo vyhořelo za jednu hodinu a čtyři minuty. Přední ovládací páka byla nastavena doprostřed (primární vzduch uzavřen, sekundární otevřen). Zadní klapka byla automaticky regulována tak, aby bylo dosaženo 10% koncentrace kyslíku ve spalinách. Po přiložení paliva byla na dobu asi jedné minuty přední klapka otevřena na maximum, aby došlo k rozhoření paliva. Zadní regulační klapka byla na počátku uzavřena, během asi osmi minut po přiložení ji automatická regulace naplno otevřela. Koncentrace kyslíku byla po dobu 40 minut od přiložení stále menší než požadovaných 10%, poté začala automatická regulace klapku uzavírat. Doba činnosti regulace byla asi 25 minut, tedy zhruba od 40. minuty do konce zkoušky. Při činnosti automatické regulace opět došlo k zvýšení množství emisí CO díky tomu, že klapka byla po nějaký čas úplně uzavřena.

Zkouška 5: Při této zkoušce bylo přiloženo 2,96kg paliva. Palivo vyhořelo přibližně za 50 minut od přiložení. Přední ovládací pákou byly ovládací klapky otevřeny na maximum (páka nastavena úplně vpravo). Zadní klapka byla automaticky regulována tak, aby bylo dosaženo 10%

koncentrace kyslíku ve spalinách. Na počátku zkoušky byla zadní regulační klapka otevřena na maximum. Po 20 minutách od přiložení se koncentrace kyslíku ve spalinách zvýšila nad požadovaných 10% a automatická regulace začala přivírat zadní regulační klapku.

Zkouška 6: Při této zkoušce bylo přiloženo 2,82kg paliva. Palivo vyhořelo přibližně za 58 minut od přiložení. Přední ovládací páka byla nastavena doprostřed (primární vzduch uzavřen, sekundární otevřen). Zadní klapka byla po celou dobu zkoušky otevřena na maximum. Při zkoušce 6 bylo dosaženo nejlepších emisí CO.

Zkouška 7: Při této zkoušce bylo přiloženo 3,00kg paliva. Palivo vyhořelo přibližně za hodinu a 10 minut od přiložení. Přední ovládací páka byla nastavena doprostřed (primární vzduch uzavřen, sekundární otevřen). Zadní klapka byla zpočátku naplno otevřena, palivo se nechtělo rozhořet a koncentrace kyslíku ve spalinách byla stále nad 10%. Při poklesu kyslíku zhruba na hodnotu kolem 11% byla spuštěna automatická regulace. Ta způsobila přivírání regulační klapky až do úplného uzavření. Tímto zásahem došlo ke zvýšení emisí CO a „přidušení“ ohniště. Dále bylo evidentní, že pro opětovné rozhoření ohniště je nutné regulaci vypnout. Po vypnutí regulace byla zadní regulační klapka otevřena na maximum. Přední regulační klapka byla v tuto dobu také nakrátko otevřena na maximum, aby se palivo dostatečně rozhořelo. Potom byla přední klapka opět posunuta doprostřed. To vše se odehrálo v prvních 20 minutách po přiložení paliva. Po 40 minutách od přiložení paliva byla přední klapka otevřena na maximum a zadní byla ručně otevřena na 30°. Tímto zásahem bylo docíleno snížení celkového přiváděného vzduchu.

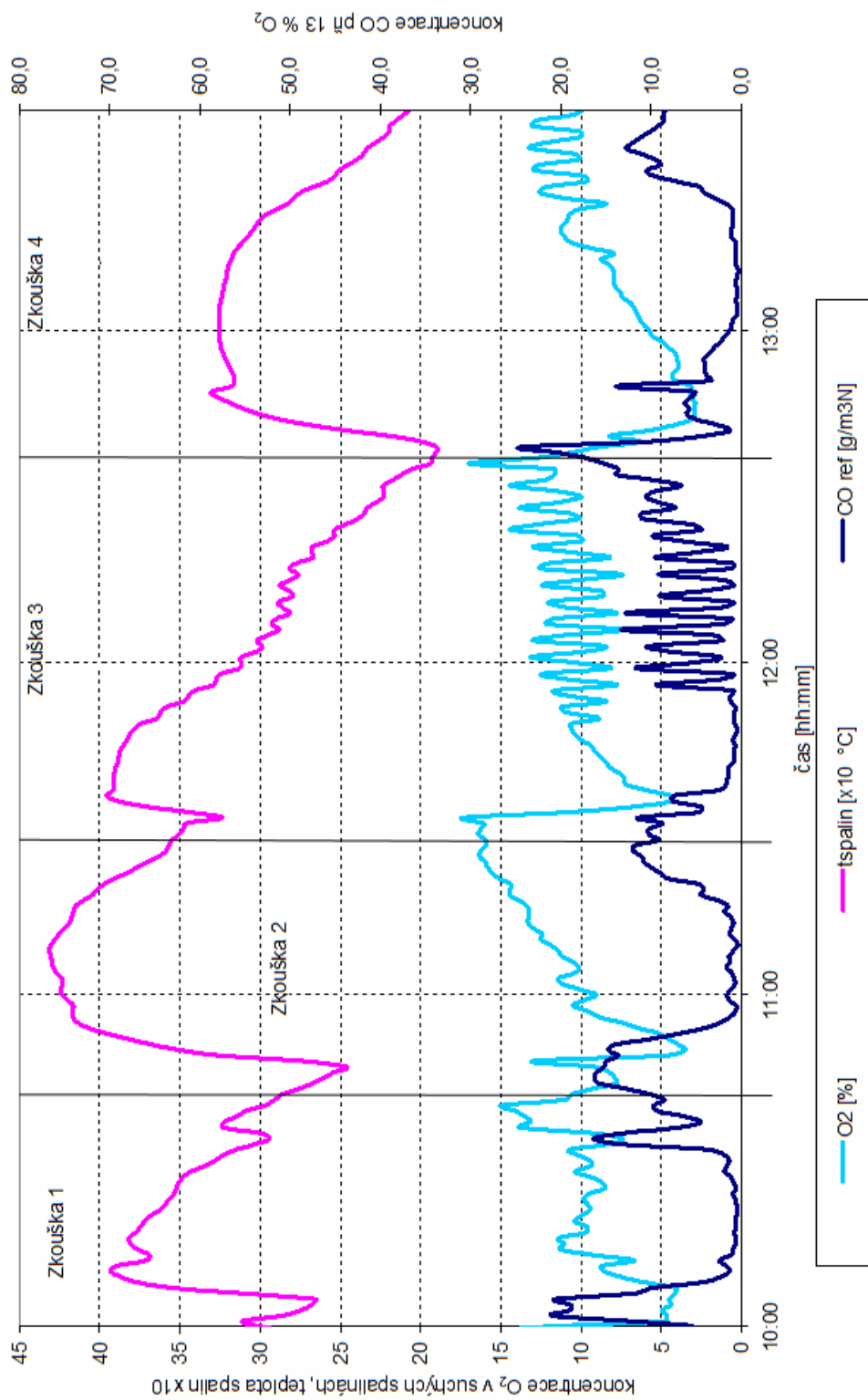
Tato zkouška je z hlediska navržení regulace pomocí lambda sondou velmi důležitá. Protože v případě nedostatečně rychlého rozhoření paliva může regulace způsobit „udušení“ ohniště. Při tvorbě algoritmu regulace je nutno pracovat s údajem lambda sondy v kombinaci s teplotou spalin.

Zkouška 8: Při této zkoušce bylo přiloženo 6,00kg paliva. Palivo vyhořelo přibližně za hodinu a 20 minut od přiložení. Přední klapka byla nastavena uprostřed (primární vzduch uzavřen, sekundární otevřen). Zadní klapka byla automaticky regulována tak, aby bylo dosaženo 10% koncentrace kyslíku ve spalinách. Po přiložení byla zadní regulační klapka plně otevřena. Palivo se velmi rychle rozhořelo. Regulace začala reagovat teprve po 50 minutách od přiložení paliva, protože koncentrace O₂ byla stále nízká vzhledem k vyšší dávce paliva. Při nástupu automatické regulace došlo ke zhoršení emisí CO. Proto byla po 60 minutách od přiložení automatická regulace vypnuta a zadní regulační klapka byla otevřena na 20°. Cílem bylo ověřit, zda je v tomto případě možno docílit nižších emisí CO. Ke snížení CO ve spalinách nedošlo. Proto byla hodinu a 10 minut po přiložení zadní regulační klapka otevřena na 30°, ke snížení koncentrace CO opět nedošlo. Zkouška byla ukončena. Zadní regulační klapka byla úplně uzavřena a přední regulační klapka byla otevřena na maximum. Tímto krokem se podařilo snížit koncentraci kyslíku ve spalinách z cca 15% na 8%.

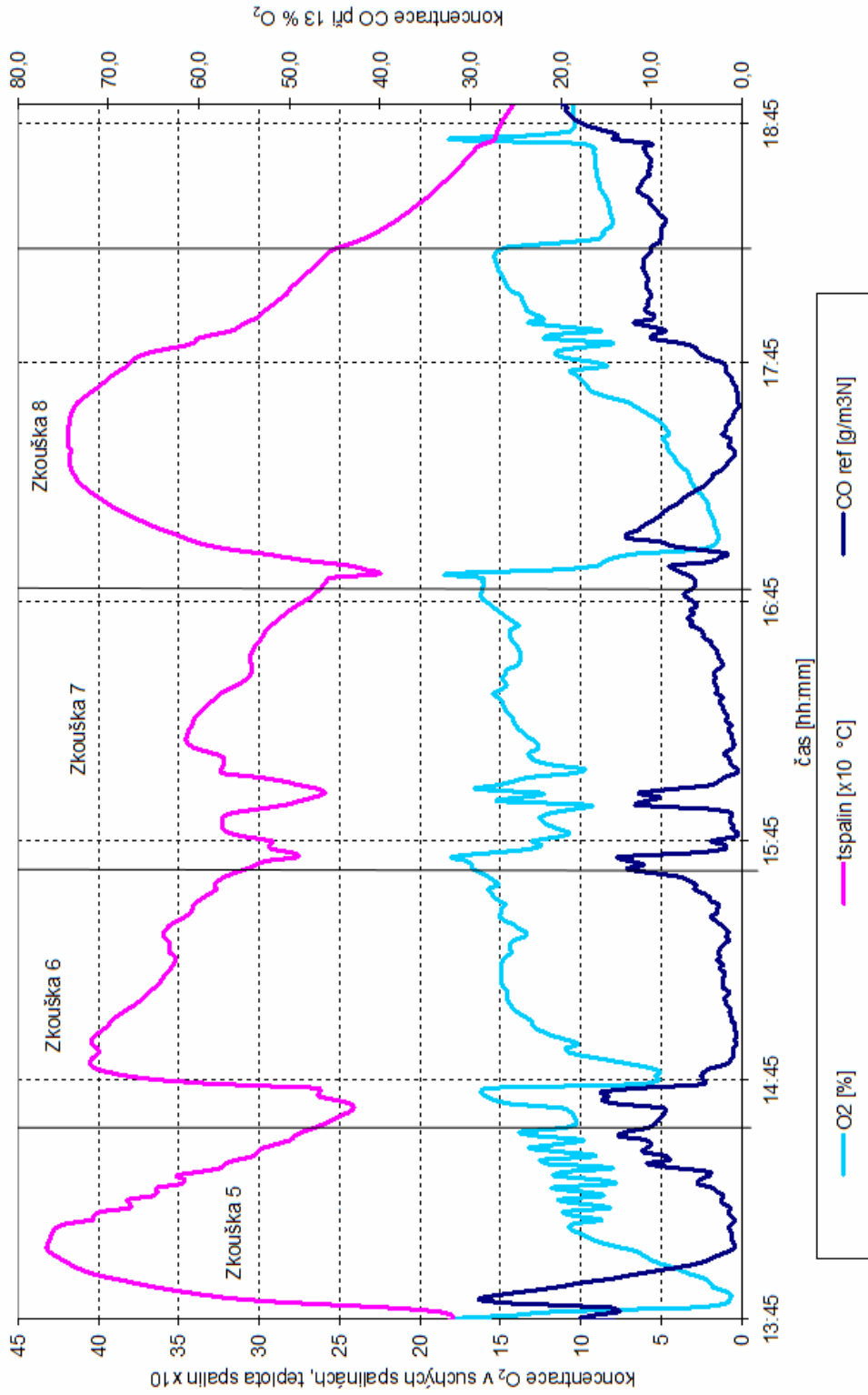
Tabulka naměřených hodnot pro zkoušky 1 až 8 je uvedena jako tabulka 6.1. Grafický průběh koncentrace kyslíku, teploty spalin a koncentrace oxidu uhelnatého pro zkoušky 1 až 4 je uveden jako graf 6.2, pro zkoušky 5 až 8 jako graf 6.3. Grafy byly převzaty z měření ve Výzkumném energetickém centru v Ostravě, které byly určeny pro tuto práci.

Číslo zkoušky	1	2	3	4	5	6	7	8
Délka zkoušky	0:46	0:47	0:59	1:04	0:50	0:58	1:10	1:22
Teplota spalin	331	387	311	283	346	358	305	352
Koncentrace O ₂ ve spalinách	9,3	11,8	10,1	8,2	8,5	13,3	13,9	8,1
CO	6604	5811	4634	5294	8569	3446	3600	5832
NO ₂	95	121	86	72	84	127	154	88
CO ₂	146	144	147	143	142	146	149	144

Tabulka 6.1: Naměřené hodnoty zkoušek



Graf 6.2: Průběh teploty, kyslíku a oxidu uhelnatého pro zkoušky 1 až 4



Graf 6.3: Průběh teploty, kyslíku a oxidu uhelnatého pro zkoušky 5 až 8

6.4.1 Závěry zkoušek

Původní lambda sonda nepracovala správně. Její konstrukce neumožnila spalínám, aby se dostaly k senzoru. Nutno změnit konstrukci, nebo použít jinou lambda sondu.

Krbová vložka byla netěsná. V takovém případě je regulace dle obsahu O_2 ve spalínách nefunkční. Přestože byl přívod vzduchu úplně uzavřen, oheň téměř nepohasnul a obsah O_2 ve spalínách byl kolem 13%.

Těsnost spalovacího zařízení je základní podmínkou úspěšného použití automatické regulace. Jednoduchým testem lze provést kontrolu těsnosti ohniště. Při uzavření klapky přívodu vzduchu musí plamen v rozhořené spalovací komoře výrazně pohasnout.

Aby palivo dokonale shořelo, musí být splněny tyto základní předpoklady:

- přítomnost hořlaviny a dostatečný objem kyslíku
- dostatečná teplota
- dostatečný čas pro reakci

Při spalování paliva s nedostatečným množstvím přiváděného vzduchu do ohniště dochází k nedokonalému vyhoření paliva, což má za následek vysoké emise oxidu uhelnatého a současně snížení účinnosti. Naopak při spalování paliva s vysokým množstvím přívodu vzduchu do ohniště je sice dosahováno kvalitního vyhoření paliva, ale procházející vzduch odebírá velké množství tepla, které pak bez užítu opouští ohniště komínem do ovzduší. Pro daný typ paliva a ohniště je optimální příjem spalovacího vzduchu různý. Představuje to určitý kompromis.

Nastává ale problém regulace pomocí lambda sondy, neboť po přiložení paliva je nutno nastavit příjem vzduchu do ohniště na maximální úroveň pro dostatečné rozhoření paliva. V ideálním případě otevřít klapku pro centrální vzduch na 90° , primární na maximum a sekundární uzavřít. Tato fáze může být různě dlouhá v závislosti na teplotě ohniště, množství přiloženého paliva a současně jeho vlhkosti.

Po rozhoření lze vhodně pomocí lambda sondy přivádět do ohniště dostatečné množství vzduchu tak, aby bylo dosaženo optimálních podmínek spalování. Jedná se o nízké emise oxidu uhelnatého a vysokou účinnost spalování.

Po dosažení požadovaného výkonu a dobré kvality spalovacího procesu je nutné reagovat na ubývající množství prchavé hořlaviny. Pro tuto fázi by bylo vhodné uzavírat přívod vzduchu do ohniště.

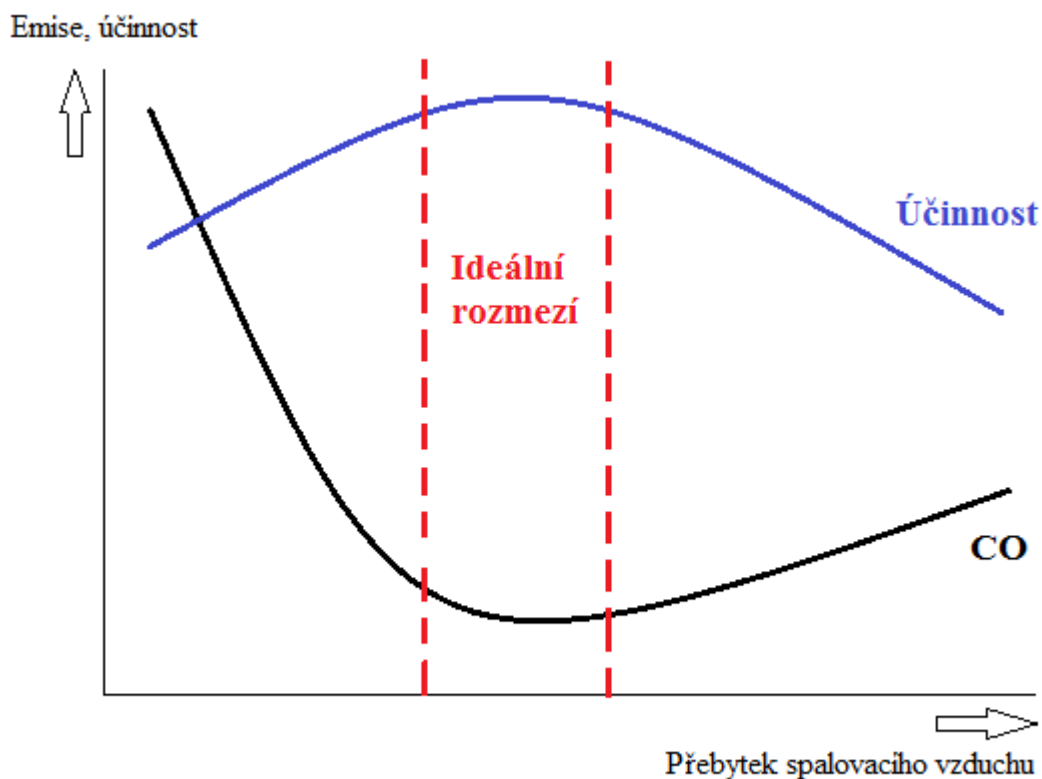
Jaké veličiny lze sledovat při spalovacím procesu:

- obsah kyslíku ve spalinách pomocí lambda sondy
- gradient obsahu kyslíku ve spalinách
- teplotu spalin
- gradient teploty spalin

Co je možno regulovat:

- množství celkového vzduchu do ohniště
- poměr mezi primárním a sekundárním vzduchem

Výsledky zkoušek byly zkontrolovány s Ing. Františkem Hopanem z Výzkumného energetického centra v Ostravě, následně pak i s Ing. Viktorem Plačkem z ČVUT v Praze a došlo se k závěru, že pro nejefektivnější způsob hoření v rámci nižších emisí a vysoké účinnosti je jen v určitém rozsahu obsahu kyslíku v ohništi. Tento stav je znázorněn na obrázku 6.6 [13].



Obrázek 6.6: Znázornění ideálního množství kyslíku [13]

7 Návrh a implementace algoritmu

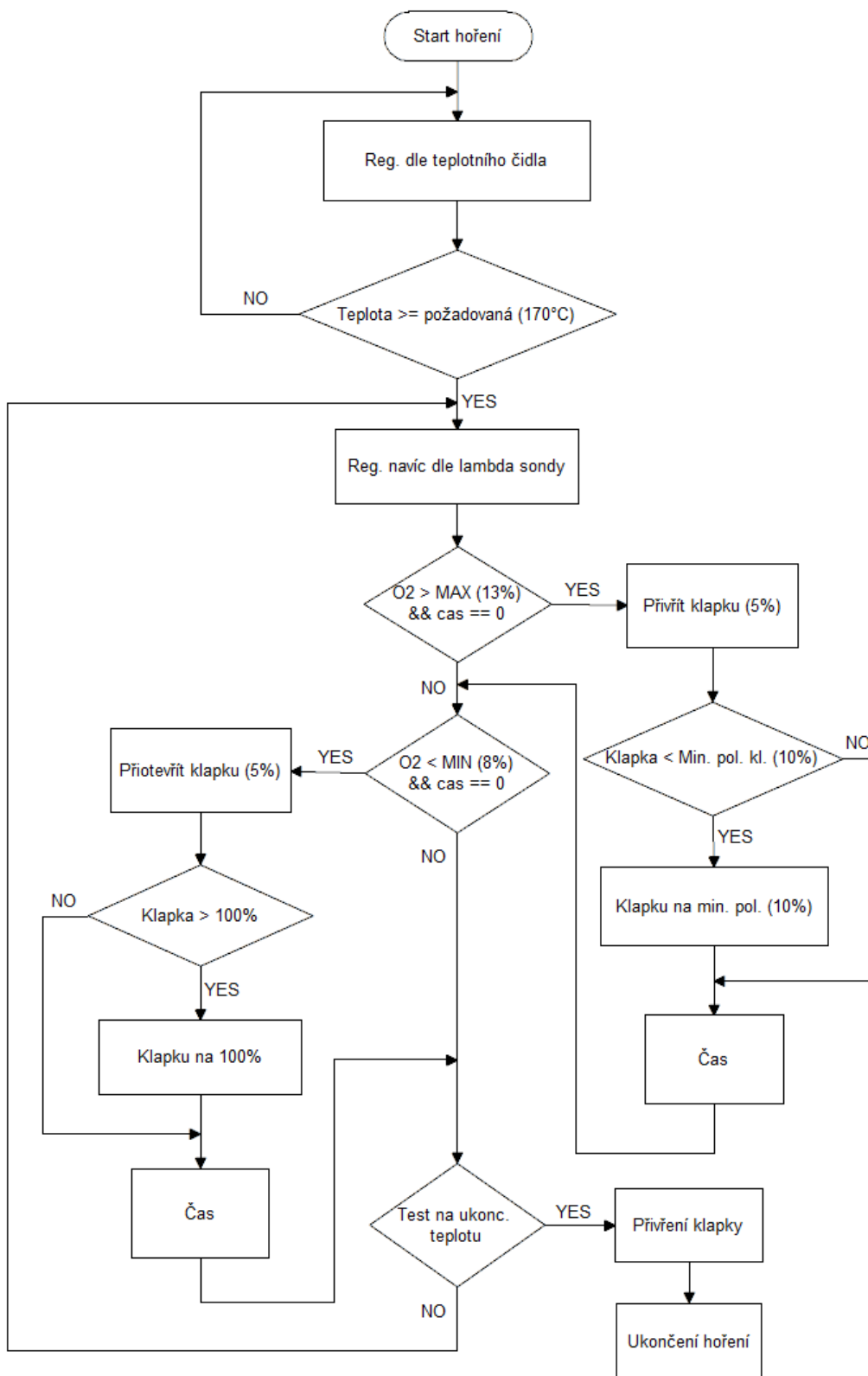
Na základě teorie, konzultací a experimentálních zkoušek jsem mohl začít vyvíjet algoritmus.

Usoudil jsem, že pro optimální regulaci, tedy velkou účinnost a nízké emise (oxid uhelnatý), je vhodné řídit obsah zbytkového kyslíku ve spalínách v rozsahu hodnot 8 - 13%.

Jak už bylo zmíněno, lambda sonda je nepoužitelná při nedostatečné rozhoření paliva, neboť palivo potřebuje v počáteční fázi hoření velký přebytek vzduchu v závislosti na množství přiloženého dřeva. Pokud by se pro proces rozhoření paliva použila regulace pomocí lambda sondy a otevřela se klapka pro velký nadbytek vzduchu (resp. maximum), nevědělo by se, kdy začít klapku přivírat pro optimální mez přebytku vzduchu. Pro počáteční fázi hoření paliva se tedy bude řídit regulace dle teplotního čidla a to do teploty 170°C (TS_ZAT). Po dosažení požadované teploty se přepne regulace do režimu měření zbytkového kyslíku na základě měření lambda sondou.

Po startu regulace (resp. zmáčknutí tlačítka „start regulace“ na zobrazovací jednotce) se reguluje přívod vzduchu na základě údajů z teplotního čidla. Pro rozhoření paliva je klapka otevřena na 100% (POL_0) a při dosažení určité teploty se klapka přivře o nastavenou hodnotu. Po dosažení teploty 170°C (TS_ZAT) se začne regulovat pomocí lambda sondy. Lambda sonda změří zbytkový O₂ ve spalínách a podle toho uzavírá (popř. otevírá) klapku přívodu vzduchu o hodnotu 5% (KS_ZAT). Pokud je O₂ ve spalínách větší než požadovaných 13% (POL_12), klapka se přivře. Naopak pokud je ve spalínách méně než 8% O₂ (POL_11), klapka se přiotevře. Při přivírání je řešena i minimální poloha klapky (10% - POL_13) jako **bezpečnostní opatření**, neboť při úplném uzavření přívodu vzduchu se mohou v ohništi hromadit nespálené uhlovodíky a v případě, pokud by se otevřela dvířka krbu, nespálené uhlovodíky by se sloučily s velkým množstvím kyslíku a mohla by vzniknout výbušná směs. Dále si také nastavuji čas (C_STR2) po každém přivírání (popř. otevírání klapky), protože po každé změně polohy klapky je nutno vyčkat, než se vzduch „ustálí“. Jelikož celý algoritmus probíhá každou sekundu, nastavený čas se dekrementuje o 1 sekundu, takže pomocí podmínky (čas==0) zamezím další změny polohy klapky při regulaci pomocí lambda sondou.

Po vyhodnocení kyslíku ve spalínách řeším podmínku na ukončovací teplotu. Při každém průchodu algoritmem se zaznamenává do proměnné t_mx nejvyšší dosažená teplota. Pokud dosažená nejvyšší teplota klesne o 50°C (TD1), vyhodnotí se, že se jedná o sestupnou křivku hoření, takže klapka se bude uzavírat na 10% (POL_18) pro čas C_END. Po uplynutí doby C_STAND se klapka zcela uzavře (0% - POL_END) a proces regulace hoření se ukončuje. Algoritmus se krouje na jednotlivé části. Krok0 představuje počátek hoření, kroky1-10 vzrůstající křivku hoření, krok11 regulace dle zbytkového O₂, krok12 spádovou křivku hoření, v kroku18 se klapka přivře pro dohoření a v kroku19 se uzavře klapka na 0%, neboť nastává žárový proces. Tímto rozvržením na kroky zamezují prováděním nežádoucích částí a zvyšuje se přehlednost kódu.



Obrázek 7.1: Algoritmus regulace

Implementace algoritmu byla prováděna v jazyku C s potřebným překladačem pro procesory řady 51 Keil a dalšími soubory pro správný chod regulace a překlad. Jazyk C [14] byl navržen k systémovému, nízkoúrovňovému programování. Díky tomu se prosadí tam, kde je potřeba přímo ovládat libovolný hardware.

Výhody jazyka C:

- jednoduchá přenositelnost
- přehlednost
- rychlejší vývoj aplikací
- nástroje pro optimalizaci
- podporovaný výrobcí hardwaru a softwaru

Pro implementaci algoritmu jsem vycházel z původní regulace a použil již vytvořených parametrů a proměnných. Hodnoty se tedy mohou dále nastavovat při provozu na zobrazovací jednotce pomocí dotykového panelu. Zamezují se tím pevně dané hodnoty, které by za určitých podmínek nemusely být správné a následné úpravy by znamenaly přepisování kódu. Kód je komentován v českém jazyce. Kód implementace algoritmu je přiložen na CD v souboru „HRS.C“.

Popis použitých parametrů:

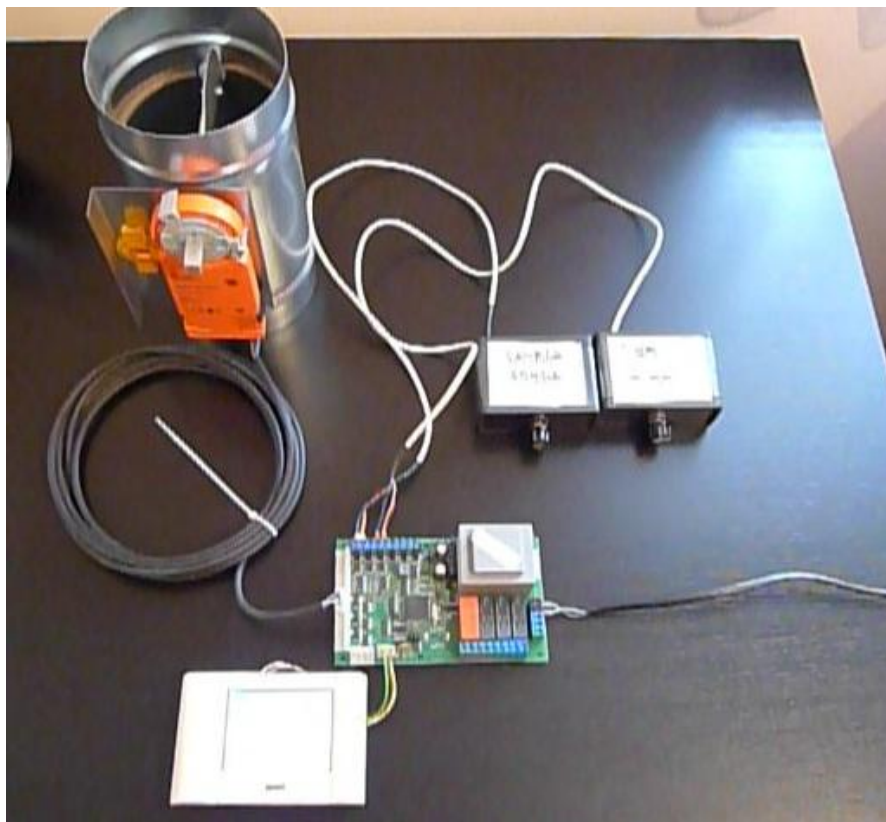
<u>Název</u>	<u>Popis</u>	<u>Nastavená hodnota</u>
TS1	startovací teplota vzrůstající křivky hoření	(40°C)
TS10	maximální teplota	(300°C)
POL0 – 10	poloha servopohonu v určitých krocích	(0 – 100%)
TS_ZAT	teplota začátku regulace dle kyslíku	(170°C)
KS_ZAT	krok regulace klapky	(5%)
TD1	teplotní rozdíl (diference) od maximální teploty	(50°C)
POL11	minimum kyslíku	(8%)
POL12	maximum kyslíku	(13%)
POL13	minimální poloha klapky	(10%)
C_STR2	čas do další regulace	(45sek)
C_END	časová prodleva polohy klapky v kroku 18	(180sek)
POL18	poloha klapky v kroku 18	(10%)
POL_END	poloha klapky při ukončení hoření	(0%)

8 Testování

Pro testování naimplementovaného algoritmu regulace hoření dle měření zbytkového kyslíku pomocí lambda sondy byly prováděny následující zkoušky:

Simulátory teplotního čidla a lambda sondy:

Jako simulátor byl použit jednoduchý napěťový dělič z tužkové baterie 1,5V a odporovým potenciometrem. Vstup byl regulován požadovaným napětím (mV), které odpovídalo kalibračním křivkám teplotního čidla a lambda sondy. Tyto zkoušky (viz. obrázek 8.1) byly prováděny průběžně během implementace algoritmu. Zkoušky byly prováděny jen za účelem odzkoušení správné funkce regulace. Jedná se zejména na nastavení časových prodlev mezi jednotlivými změnami poloh klapky centrálního přívodu vzduchu, velikosti regulační změny v regulačním kroku klapky a regulačního pásma měření zbytkového kyslíku. Uvedené zkoušky byly neocenitelné z hlediska průběžného testování a odhalovaly chyby jak v návrhu algoritmu, tak i chybné implementaci. Současně, zejména v počátku vývoje, jsem díky základním simulacím odhaloval slepé cesty směru úvah a hledání postupů.



Obrázek 8.1: Testování regulace se simulátory

V rámci tohoto testování byly vytvořeny dvě předváděcí komentovaná videa znázorňující funkčnost regulace. Na prvním videu (**1test_privirani_klapky.mov**) se testuje uzavírání klapky přívodu vzduchu při dosažení obsahu kyslíku nad hodnotu 13%. Naopak na druhém videu (**2test_priotevirani_klapky.mov**) se testuje otevírání klapky přívodu vzduchu při poklesu obsahu kyslíku pod hodnotu 8%. Videa jsou umístěna na přiloženém CD.

Reálnou zkouškou hoření v krbové vložce:

Zkouška proběhla ve zkušebně (viz. obrázek 8.2) bez měření hodnot účinnosti hoření a oxidu uhelnatého pomocí analyzátoru. Během zkoušky se sledovaly závislosti nastavení jednotlivých parametrů, které jsou důležité pro přirozený průběh hoření zejména nastavení časových prodlev mezi jednotlivými kroky regulace. Cílem těchto zkoušek bylo zajistit přirozený průběh hoření. Bohužel v průběhu těchto zkoušek nebylo k dispozici potřebné měřicí vybavení, takže nebylo možno vyhodnotit hoření dle účinnosti a úrovní emisí spalín.



Obrázek 8.2: Reálná zkouška

Zkoušky s analyzátozem spalin (oxidu uhelnatého) a měřením účinnosti:

Tyto zkoušky jsou zajištěny ve zkušebně u soukromé firmy za přítomnosti odborníků v oblasti spalování. Bohužel tyto zkoušky proběhnou po datu předání této práce (18.5.2011).

Cílem těchto zkoušek bude praktické vyzkoušení funkčnosti navrženého regulačního systému a nastavení požadovaných parametrů pro reálný průběh hoření včetně záznamu výstupních hodnot z hlediska požadovaného snížení emisí spalin (zejména oxidu uhelnatého) a zvýšení účinnosti hoření.

9 Závěr

Práci jsem pojal jako ucelené řešení od vývoje, návrhu až po odzkoušení systému. Zadání použití lambda sondy pro regulaci spalování v krbech a následný vývoj algoritmu regulace hoření má reálný základ pro aplikaci v běžném využívání při vytápění v domácnostech s okamžitým ekologickým dopadem – snížení emisí škodlivých plynů, zejména oxidu uhelnatého a zvýšení účinnosti hoření.

Pro implementaci algoritmu bylo nezbytně nutné nastudovat princip spalování dřeva, závislosti nedostatku a naopak přebytku vzduchu na tvorbě škodlivých plynů a provést experimentální zkoušky, ve kterých jsem si teorii mohl ověřit.

Již v prvotní fázi praktických zkoušek byly shledány základní podmínky pro správný chod regulace. Jedná se o utěsnění ohniště a zabránění přístupu „falešného“ vzduchu. Ve fázi zkoušek hoření bylo zjištěno, že regulace hoření podle lambda sondy, resp. regulace dle měření zbytkového kyslíku je reálné až po dosažení určitého stupně teploty hoření, tedy v době kdy se stabilizuje spalování.

Algoritmus regulace hoření není obsáhlý, ale je spojen s vývojem v reálných podmínkách a zjišťování reálných dopadů v běžných podmínkách. V této fázi byla nutná velice častá konzultace s odborníky na spalování a regulačních systémů.

Pro další vývoj navrhuji pokračovat v dalších zkouškách a zjistit následující závislosti:

- vliv velikosti a tvaru ohnišť na jednotlivé nastavení parametrů
- vliv poměrů sekundárního a primárního vzduchu na účinnost a emise plynů
- zjistit možnost použití regulace s proporcionální funkcí

Výsledky z těchto zkoušek se mohou dále aplikovat na úpravě navrženého algoritmu.

Regulace hoření podle lambda sondy, v nízkoenergetickém ohništi (krbů), nebyla doposud nikde publikována ani vyvíjena. Vývoj a aplikace jsou vyvolány požadavkem současné doby a předpokládá se, v rámci zpřísnování emisních limitů v EU, postupná aplikace tohoto regulačního systému do běžného využívání v krbových vložkách a kamnech.

Literatura

- [1] *TZB-info* [online]. 25.4.2011 [cit. 2011-05-01]. Prodej kotlů o výkonu do 50 kW v ČR v roce 2010. Dostupné z WWW: <<http://vytapani.tzb-info.cz/zdroje-tepla/7382-prodej-kotlu-o-vykonu-do-50-kw-v-cr-v-roce-2010>>.
- [2] NOSKIEVIČ, Pavel; PILCH, Radek. *Spalování dřeva v malém ohništi*. Suchdol nad Odrou: Romotop, 2008. 80 s. ISBN 978-80-248-1889-4.
- [3] NOSKIEVIČ, Pavel. *Spalování uhlí*. Ostrava : VŠB-TU, 1993. 127 s. ISBN 80-7078-197-1.
- [4] NOSKIEVIČ, Pavel. *Krbová a kachlová kamna : Topení dřevem v krbových a kachlových kamnech*. Suchdol nad Odrou : Romotop a Výzkumné energetické centrum VŠB-TU, 2001. 48 s.
- [5] *Automatizace.HW.cz* [online]. 13.06.2006 [cit. 2011-04-20]. Princip a použití Lambda sondy. Dostupné z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART252-princip-a-pouziti-lambda-sondy.html>>.
- [6] SKOPAL, Libor. *Lambda regulace spalovacího motoru* [online]. Ostrava, 2010. 50 s. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava. Dostupné z WWW: <http://dspace.vsb.cz/dspace/bitstream/10084/79017/1/SKO267_USP_B3943_3906R007_2010.pdf>.
- [7] Automatická regulace hoření Reg 300/310. In *Servisní manuál* [online]. Hanušovice : Timplex, 2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <http://www.timplex.cz/asplus/soubory/55_soubor_ke_stazeni.pdf>.
- [8] Oxid uhličitý. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-17]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhli%C4%8Dit%C3%BD>.
- [9] Oxid uhelnatý. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-17]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhelnat%C3%BD>.
- [10] *Směrnice pro kvalitu ovzduší v Evropě* [online]. 1996 [cit. 2011-04-10]. Oxid uhelnatý. Dostupné z WWW: <http://www.ecmost.cz/ver_cz/ovzdusi/smernice/smernice4.htm>.
- [11] *Topte dřevem* [online]. 2009 [cit. 2011-04-22]. Topte dřevem. Dostupné z WWW: <<http://www.toptedrevem.cz/features.php>>.
- [12] *Krbové vložky Dynamic* [online]. 2010 [cit. 2011-04-23]. KV 025 M - široká rádiusová. Dostupné z WWW: <<http://www.romotop.cz/krbove-vlozky-dynamic/kv-025-m-siroka-radiusova>>.

- [13] PLAČEK, Viktor. *Experimentální prověřování nových možností řízení u malých kotlů na biomasu*. Stará Lesná, 2011. 9 s. Workshop odborníků z univerzit, vysokých škol a praxe. ČVUT v Praze.
- [14] *HW group* [online]. 2009 [cit. 2011-05-01]. Web51-C - první kroky. Dostupné z WWW: <http://www.hw-group.com/products/web51c/index_cz.html>.

Seznam příloh

Příloha 1. CD obsahující:

- zdrojový kód
- dvě ukázková videa znázorňující funkčnost regulace