

**VŠB-Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra energetiky**

**Možnosti stanovení účinnosti fluidního kotle K5 v Teplárně Tábor**

**Possibility of Determination of Efficiency for Fluidized bed Boiler K5 in  
Heatin Plant Tábor**

**Student:**

**Kamil Karczmarczyk**

**Vedoucí:**

**Ing. Tomáš Výtisk, Ph.D**

**Ostrava 2015**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Kamil Karczmarczyk**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení  
Téma: **Možnosti stanovení účinnosti fluidního kotle K5 v Teplárně Tábor**  
**Possibility of Determination of Efficiency for Fluidized bed Boiler K5 in Heating Plant Tábor**

Zásady pro vypracování:

Práce bude obsahovat:

- 1) Teoretický rozbor problematiky stanovení tepelné účinnosti kotlů.
- 2) Technický popis fluidního kotle K5 v Teplárně Tábor.
- 3) Metodika stanovení tepelně technických parametrů pro výpočet účinnosti.
- 4) Zpracování naměřených hodnot a kontrolní výpočet účinnosti.
- 5) Porovnání účinnosti při různých hodnotách měřených parametrů.

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 07 0302: Přejímací zkoušky parních kotlů. Praha: Český normalizační institut, 1996. 52 s.  
RAJNIÁK, I.: Tepelno-energetické a emisné merania. I. vydání, Bratislava: Ister Science, spol. s r.o., 1997. 481 s. ISBN 80-88683-20-3.  
RYBÍN, M.: Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů. II. vydání, Praha: SNTL, 1985. 420 s.  
Technické zprávy z garančních zkoušek kotlů. Katedra energetiky, VŠB TU Ostrava.


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


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Výtisk, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015



  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry

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

### **Místopřísežné prohlášení**

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

V Ostravě 18.5.2015

.....*Karolína Vozek*.....

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji 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 nevydělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské 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 – 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 obhajoby.

V Ostravě 18.5.2015

.....*Karczmarczyk*.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Kamil Karczmarczyk

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Vrchlického 110/7 Český Těšín 73701

### **Anotace bakalářské práce**

KARCZMARCZYK, K. *Možnosti stanovení účinnosti fluidního kotle K5 v Teplárně Tábor: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra Energetiky, 2015, 39 s. Vedoucí práce Ing. Tomáš Výtisk, Ph.D.

Tato práce se zabývá teoretickým rozbořem problematiky tepelné účinnosti kotlů a metodami jejího stanovení, včetně využívání potřebné měřicí techniky. Na základě naměřených hodnot tepelně technických parametrů při provozu fluidního kotle předkládá práce způsob výpočtu a stanovení účinnosti konkrétního zařízení. V závěru je sestaven program pro výpočet účinnosti, který umožňuje porovnávat její velikosti při změně vstupních parametrů.

### **Annotation of bachelor thesis**

KARCZMARCZYK, K. *Possibility of Determination of Efficiency for Fluidized bed Boiler K5 in Heatin Plant Tábor: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power engineering, 2015, 39s. Thesis head Ing. Tomáš Výtisk, Ph.D.

This thesis deals with theoretical analysis of the problems of thermal efficiency of boilers and the methods of its determination, including the use of required measuring equipment. Based on the measured values of thermal technical parameters during the operation of fluidized-bed boiler, the thesis presents the method of calculation and assesment of effectiveness of a particular device. In conclusion I present a program for calculation of efficiency that allows to compare its size when changing the input parameters.

## Obsah

|  |    |
|--|----|
| Seznam zkratk a symbolů .....  | 7  |
| Úvod.....  | 7  |
| 1. Teplárna Tábor.....   | 10 |
| 2. Fluidní kotel K5 .....  | 10 |
| 2.1 Technické parametry kotle K5 .....   | 11 |
| 3. Zkoušky účinnosti kotlů.....  | 11 |
| 4. Způsoby určení účinnosti kotlů.....   | 12 |
| 4.1 Přímá metoda stanovení účinnosti .....                                     | 12 |
| 4.1.1 Postup při měření přímou metodou .....                                   | 13 |
| 4.2 Nepřímá metoda stanovení účinnosti .....                                   | 14 |
| 4.2.1 Postup měření při nepřímé metodě stanovení účinnosti.....                | 14 |
| 5. Energetická bilance kotle.....  | 15 |
| 6. Popis měření a použité měřicí přístroje .....                               | 17 |
| 6.1 Měřicí systém.....   | 17 |
| 6.2 Měření teploty .....   | 18 |
| 6.3 Měření koncentrace CO, SO <sub>2</sub> a O <sub>2</sub> ve spalinách ..... | 20 |
| 6.4 Určení složení paliva a tuhých zbytků .....                                | 21 |
| 7. Hodnoty pro stanovení účinnosti kotle .....                                 | 22 |
| 8. Výpočet účinnosti podle normy ČSN 07 0302 .....                             | 23 |
| 8.1 Výpočet nutných proměnných pro výpočet ztrát .....                         | 23 |
| 8.2 Výpočet ztrát k výpočtu účinnosti a také vlastní výpočet účinnosti .....   | 32 |
| 9. Výpočet účinnosti kotle pro různé obsahy kyslíku .....                      | 34 |
| Závěr .....  | 37 |
| Literatura.....  | 39 |
| Přílohy.....   | 39 |

## Seznam zkratek a symbolů

### Značka

|  |  |  |
|--|--|--|
| A  | Obsah popela   | kg.kg <sup>-1</sup>                        |
| A; A <sub>0</sub> ;  |  |  |
| A <sub>α</sub>   | Konstanty rovnice pro výpočet $\bar{c}_s$  |  |
| a <sub>1</sub>   | Podíl uhlíku paliva, spáleného na CO   | kg.kg <sup>-1</sup>                        |
| B; B <sub>0</sub> ; B <sub>α</sub>                         | Konstanty rovnice pro výpočet $\bar{c}_s$  |  |
| b  | Podíl nespáleného uhlíku paliva  | kg.kg <sup>-1</sup>                        |
| C  | obsah uhlíku   | kg.kg <sup>-1</sup>                        |
| C; C <sub>0</sub> ; C <sub>α</sub>                         | Konstanty rovnice pro výpočet $\bar{c}_s$  |  |
| $\bar{c}_s$  | Střední měrná tepelná kapacita spalin (při stálém tlaku)   | kJ.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup>        |
| $\bar{c}_{si}$   | Střední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků   | kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>       |
| H  | Obsah vodíku   | kg.kg <sup>-1</sup>                        |
| ΔH   | Rozdíl hladin  | m  |
| M  | Množství   | kg.s <sup>-1</sup>                         |
| $\dot{m}$  | Hmotnostní průtok  | kg.s <sup>-1</sup> nebo kg.h <sup>-1</sup> |
| N  | Obsah dusíku   | kg.kg <sup>-1</sup>                        |
| O  | Obsah kyslíku  | kg.kg <sup>-1</sup>                        |
| p  | tlak   | Pa; Mpa                                    |
| Q  | Tepelný tok  | kJ.s <sup>-1</sup> , kW, MW                |
| Q <sub>1</sub>   | Tepelný tok Q (kJ.s <sup>-1</sup> ) vztažený na hmotnostní průtok paliva m (kg.s <sup>-1</sup> ) | kJ.kg <sup>-1</sup>                        |
| Q <sub>i</sub> <sup>r</sup> (Q <sub>s</sub> <sup>r</sup> ) | Výhřevnost (spalné teplo)  | kJ.kg <sup>-1</sup> , kJ.m <sup>-3</sup>   |
| R1-R10   | Pomocné konstanty stechiometrických objemů   |  |
| S  | Obsah síry   | kg.kg <sup>-1</sup>                        |
| t  | Teplota  | °C   |
|  |  | m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> nebo      |
| V  | Objem vzduchu nebo spalin vztažený na 1kg nebo 1m <sup>3</sup> paliva                            | m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup>            |
| W  | Obsah vody   | kg.kg <sup>-1</sup>                        |
| X  | Hmotnostní podíl složek tuhých zbytků  | kg.kg <sup>-1</sup>                        |
| α  | Součinitel přebytku vzduchu  |  |
| ζ  | Relativní tepelná ztráta   |  |
| η  | Účinnost   |  |
| v  | Objem vlhkého plynu (vzduchu) obsahující 1m <sup>3</sup> plynu (vzduchu)                         |  |

|           |                                      |                                  |
|-----------|--------------------------------------|----------------------------------|
|           | suchého)                             |                                  |
| $\varphi$ | Relativní vlhkost                    |                                  |
| $\omega$  | Objemový podíl složky ve směsi plynů | $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ |

### Index

|                  |   |
|------------------|---|
| Ar               | argon                                   |
| b                | barometrický                            |
| C                | uhlík; hořlavina v tuhých zbytcích      |
| CO               | oxid uhelnatý; hořlavina ve spalinách   |
| CO <sub>2</sub>  | oxid uhličitý                           |
| em               | před vstupem do komína                  |
| H <sub>2</sub>   | vodík                                   |
| H <sub>2</sub> O | voda; vodní pára                        |
| i                | složka směsi; člen souboru              |
| k                | koncový; komín                          |
| min              | minimální (teoretický)                  |
| n                | napájecí voda                           |
| N <sub>2</sub>   | dusík                                   |
| p                | pára                                    |
| pop              | popílek                                 |
| ref              | referenční                              |
| RO <sub>2</sub>  | oxid uhličitý a siřičitý                |
| s                | spaliny                                 |
| sk               | škvára; struska                         |
| SO <sub>2</sub>  | oxid siřičitý                           |
| ss               | spaliny suché                           |
| sv               | sdílení tepla do okolní                 |
| v                | vzduch                                  |
| vs               | vzduch suchý                            |
| 0                | počáteční; základní, vztažný; výpočtový |
| 1                | vstupní                                 |

### exponent

|   |   |
|---|---|
| r | surové, spalované palivo                        |
| " | stav vodní páry na mezi sytosti při teplotě $t$ |



## Úvod

Od doby, kdy člověk zjistil jak rozdělat oheň, začal jej využívat pro výrobu tepla. S příchodem průmyslové revoluce člověk začal využívat oheň nejen k výrobě tepla pro přípravu jídla a ohřátí sebe samého, ale také pro ohřev vody a výrobu páry pro své stroje, které mu usnadňovaly život. Z pokračující dobou se člověk snažil zlepšovat tyto stroje, aby dokázal co nejlépe využít potenciál ukrytý v palivu. Jak je známo ze zákona zachování energie, energie se nemůže ztrácet. Z toho vyplývá, že kolik energie dodáme do kotle, tolik energie z kotle získáme. Veškerá energie, která vychází z kotle, není využita pro výrobu tepla, ale její část se ztrácí. Z tohoto důvodu se člověk snaží nějakým způsobem zjistit, jak je dané zařízení schopno zužítkovat vloženou energii.

V následujících kapitolách této práce je předložen přehled o metodách stanovení účinnosti, o měření potřebných parametrů pro určení účinnosti a o potřebných měřicích přístrojích, které k tomu využívány. Pomocí jedné z metod je proveden výpočet z naměřených dat a následné porovnání výsledků při různých vstupních hodnotách, z čehož je možné vyvodit, jak je dané zařízení schopné transformovat dodanou energii. Díky vypočtené účinnosti kotle můžeme zjistit hospodárnost zařízení a tím ekonomickou výhodnost provozu tohoto zařízení.

Celý výpočet bude proveden v souladu s normou ČSN 07 0302 (Přejímací zkoušky parních kotlů).

## 1. Teplárna Tábor

Teplárna se nachází ve městě Tábor, kde je jedním z hlavních dodavatelů tepelné energie pro domácnosti i soukromé firmy. Tepelná energie je dodávána pomocí rozvodných sítí jako horká voda nebo pára. Celkový instalovaný tepelný výkon teplárny je 208,88 MW. Teplárna dodává také elektrickou energii. Instalovaný výkon generátoru je 19,55MW.[6]



Obrázek 1: Teplárna Tábor [6]

## 2. Fluidní kotel K5

V teplárně Tábor jsou tři parní kotle na těžký topný olej a také fluidní kotel na tuhá paliva. Kotel K5 je s cirkulační fluidní vrstvou a je schopen generovat osmdesát tun páry za hodinu. U kotle je možno dávkování aditiv přímo do kotle a díky tomu není potřeba využívat odsířování a díky nízké teplotě spalování dochází k nižší emisi oxidů dusíku. K recirkulaci tuhých částic se využívá dvou cyklonů. Palivem pro kotel K5 je hnědé uhlí.[5]

## 2.1 Technické parametry kotle K5

|                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| Typ ohniště           | fluidní            |
| Jmenovitý parní výkon | 80 t/hod           |
| Maximální přetlak     | 6,4 MPa            |
| Teplota výstupní páry | 465 °C             |
| Teplota napájecí vody | 120 °C             |
| rok výroby            | 2008               |
| Výrobce               | ČKD Praha DIZ, a.s |
| Palivo                | Hnědé uhlí         |
| Výhřevnost            | 14-17 MJ/kg        |

## 3. Zkoušky účinnosti kotlů

Zkoušky účinnosti kotle provádíme ze tří důvodů. Prvním je záruční zkouška (garanční měření), druhým důvodem je spalovací zkouška (záměna paliva) a třetím speciální zkouška (optimalizace spalování). Jedním z výsledků každého typu těchto zkoušek je většinou hodnota účinnosti kotle, avšak v rámci jejího stanovení jsou jednotlivé typy zkoušek zaměřeny vždy na jinou problematiku. [1]

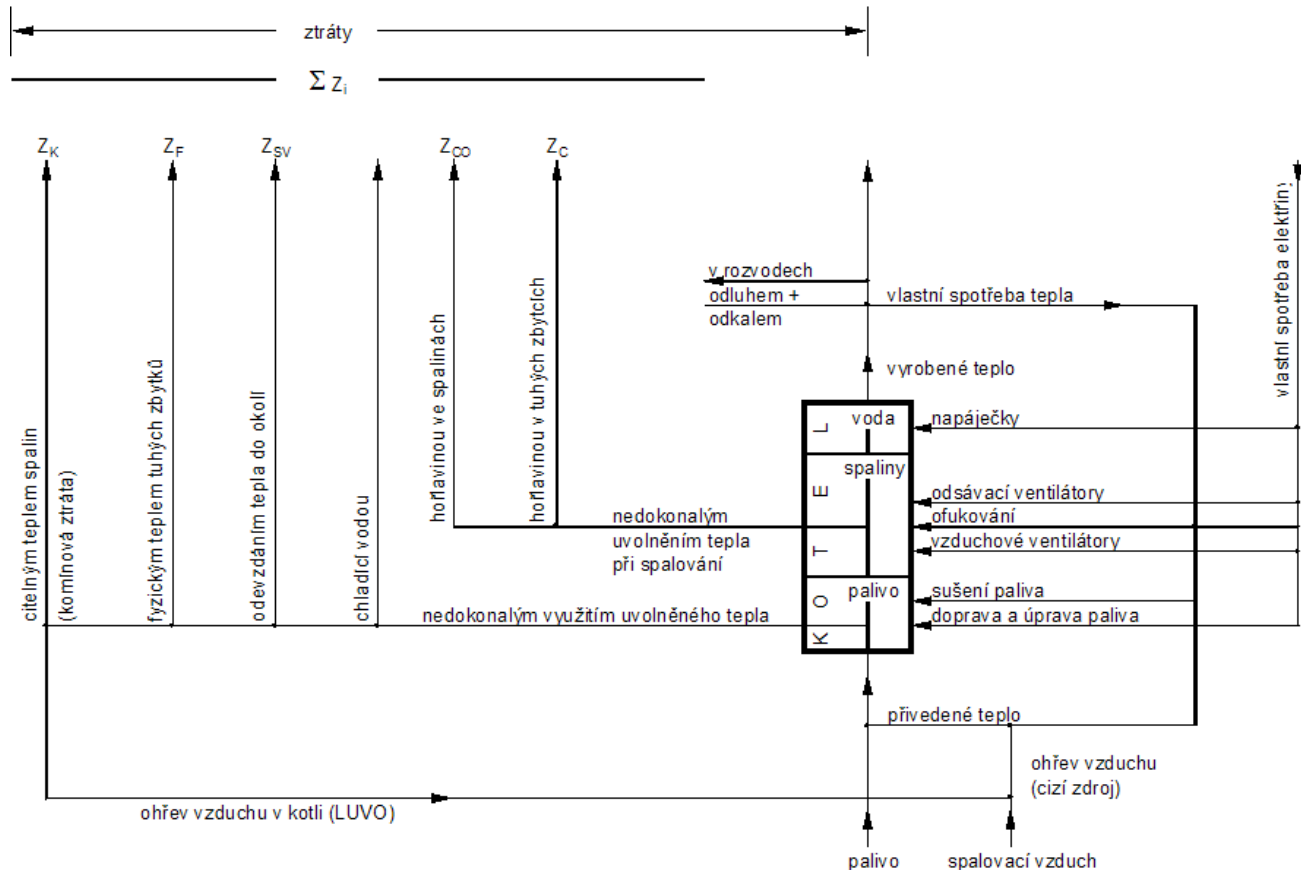
Pro stanovení účinnosti zařízení, je třeba provést energetickou bilanci daného zařízení a to se všemi ztrátami (včetně vlastní spotřeby tepla a elektrické energie). Podíváme-li se na kotel jako na energetickou soustavu, je pro nás nejdůležitějším parametrem hospodárnost zařízení (poměr vyrobeného tepla v páře nebo ve vodě k množství tepla přivedeného v palivu). [1]

Účinnost kotle je charakterizována hranicemi soustavy a je ovlivňována následujícími parametry:

- Ztráty při nedokonalém využití tepla uvolněného z paliva. Tyto ztráty vznikají při nedokonalém spalování paliva v kotli a můžeme je zjistit měřením CO, CH<sub>x</sub>, H<sub>2</sub> ve spalinách.
- Ztráty při nedokonalém uvolnění tepla z paliva při spalování. Tyto ztráty vznikají nedokonalým spálením paliva, v němž zůstává hořlavina, která následně odchází v tuhých zbytcích.

- Ztráty páry, vody a kondenzátu, které vznikají netěsnostmi potrubí a kondenzátoru.
- Ztráty paliva při přepravě a dopravě.
- Spotřeba tepla – teplo, které se využívá k předehřevu vody vstupující do kotle.
- Spotřeba elektrické energie - tato energie je spotřebována k pohonu čerpadel dopravujících vodu do kotle a také ventilátorů a dmýchadel.[1]

Všechny uvedené ztráty jsou graficky znázorněny na obrázku číslo 1



Obrázek 1: Schéma Energetické bilance kotle [3]

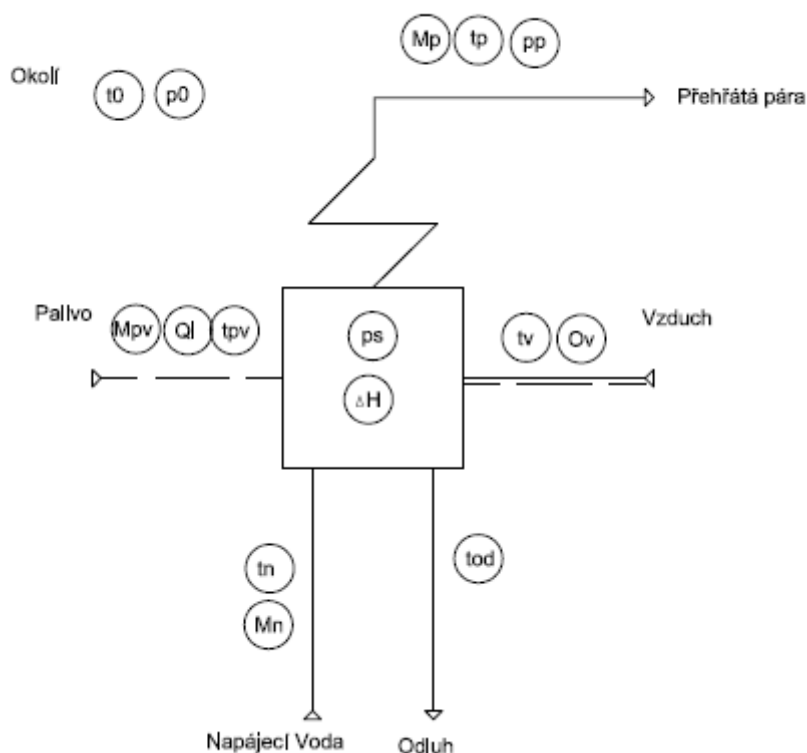
## 4. Způsoby určení účinnosti kotlů

### 4.1 Přímá metoda stanovení účinnosti

Přímým způsobem se účinnost stanoví jako poměr energie předané vodě a páře, popřípadě jiným látkám ohřivaným v parním kotli, k příkonu, tj. k veškeré energii přivedené zevně do parního kotle [2].

#### 4.1.1 Postup při měření přímou metodou

Minimální trvání zkoušky je šest hodin, během ní by měl být ustálen stav kotle na jmenovitém výkonu. Díky tomu by se zařízení na konci zkoušky mělo dostat na počáteční stav hladiny vody, paliva v kotli a tepelné kapacity ohniště. Před zkouškou musí být kotel zbaven nečistot a netěsností. Měřicí přístroje musí být kalibrovány. Palivo musí mít během celé zkoušky stejnou kvalitu. Na obrázku 2 je znázorněno umístění měřících míst pro přímou metodu [1].



Obrázek 2: Přehled měřících míst pro přímou metodu [1]

Množství vyrobené páry  $M_p$  a napájecí vody  $M_n$  se měří pomocí škrtícího prvku a diferenčního manometru (průtokoměrem). Vhodnější je použít přesnější manometr, než je manometr provozní.

Entalpie vyrobené přehřáté páry se určí z měření teploty  $t_p$  a tlaku  $p_p$  přehřáté páry. Největší obtíž při měření je působí určení přesného množství spáleného paliva  $M_{pv}$ . Spolehlivě se dá určit jen u plyných a kapalných paliv. Výhřevnost paliva  $Q_i$  se měří v laboratoři ze vzorku paliva. Množství spalovacího vzduch  $Q_v$  se neměří, ale vypočítá se

ze spalovacích rovnic. Rozdíl hladiny v bubnu  $\Delta H$  a tlak v bubnu  $p_b$  se kontroluje z důvodu požadavku ustáleného provozu, aby byl počáteční a koncový stav stejný.

Přímá metoda určení účinnosti kotle bez ohledu na svou teoretickou jednoduchost neposkytuje přesné výsledky. Problematický u této metody je požadavek na přesnost měření vstupu [1].

## **4.2 Nepřímá metoda stanovení účinnosti**

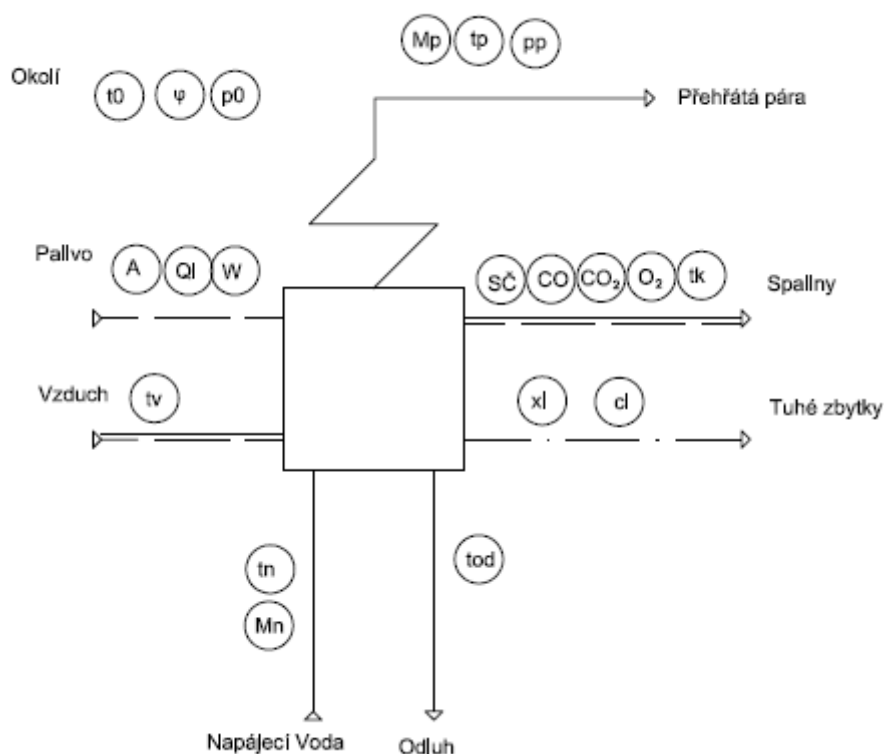
Nepřímým způsobem se účinnost stanoví jako poměr rozdílu veškeré energie přivedené zevně do parního kotle a úhrnu ztrát energie v parním kotli, k příkonu tj. veškeré energii přivedené zevně do parního kotle; nebo jako rozdíl 1 a poměru ztrát k příkonu. [2]

### **4.2.1 Postup měření při nepřímé metodě stanovení účinnosti**

Zásady při měření jsou stejné, jako u přímé metody. Rozdíl je v délce trvání zkoušky. Dalším rozdílem oproti přímé metodě je vyšší počet měřících míst. Hodnoty potřebné k určení účinnosti kotle, upřednostňujeme získat měřením. V případě, že hodnoty není možné získat měřením, je možné použít jednu z výpočetních metod. Důležitými body pro měření jsou [1]:

- analýza spalin popř. hodnota sazového čísla
- objektivní a správný odběr vzorků a jejich zpracování
- laboratorní rozbor vzorku paliva a tuhých zbytků po spálení
- správné určení teploty a množství spalin

V praxi se častěji setkáváme s nepřímou metodou měření pro tuhá paliva z důvodu přesnějších výsledků zkoušky oproti metodě přímé. Na obrázku číslo 3 jsou zobrazeny měřící místa při využití nepřímé metody stanovení účinnosti kotle.



Obrázek 3: Přehled měřících míst pro nepřímou metodu [1]

## 5. Energetická bilance kotle

Soustavu tvoří:

- parní kotel, který se skládá s různých výměníků tepla,
- pomocná zařízení pro dopravu, chemickou úpravu a čištění.

Parametry potřebné pro určení účinnosti, které vstupují do energetické bilance kotle:

### 1. Příkon [2]

- teplo chemicky vázané v palivu,
- fyzické teplo dodané palivu z cizího zdroje,
- fyzické teplo dodané spalovacímu vzduchu z cizího zdroje,
- fyzické teplo a jiné energie přivedené mimo spalovací proces a nezbytné k zajištění chodu parního kotle,
- fyzické teplo a jiné energie přivedené mimo spalovací proces a nezbytné k zajištění chodu pomocných zařízení.

## 2. Ztráty [2]

- hořlavinou ve spalínách,
- fyzickým teplem spalin (komínová),
- hořlavinou v tuhých zbytcích,
- fyzickým teplem tuhých zbytků,
- sdílením tepla do okolí,
- chlazením.

## 3. Vstup pracovní látky do parního kotle [2]

- teplo v napájecí vodě,
- teplo ve vodě vstříkované do přehřáté páry (není-li obsaženo v napájecí vodě),
- teplo ve vratné páře vstupující do mezipřehříváku,
- teplo ve vodě vstříkované do mezipřehřívákové páry.

## 4. Výstup pracovní látky z parního kotle [2]

- teplo v syté nebo přehřáté páře (popřípadě horké vodě),
- teplo v mezipřehřáté páře,
- teplo odebrané v páře a vodě pro zajištění chodu vlastního parního kotle a podobné účely,
- teplo v odkalu a odluhu.

Některé z uvedených parametrů normy jsem při řešení velikosti účinnosti kotle K5 vyřadil z důvodu technického provedení a typu spalovacího zařízení kotle. Do konečné bilance kotle K5 vstupují tyto parametry:

- teplo chemicky vázané v palivu,
- ztráta hořlavin ve spalínách,



- ztráta teplo vázané na spalínách,
- ztráta hořlaviny v tuhých zbytcích,
- ztráta teplo vázané na tuhých zbytcích,
- ztráta sdílením tepla do okolí,
- teplo v napájecí vodě,
- teplo v syté nebo přehřáté páře,
- teplo v odkalu a odluhu.

## **6. Popis měření a použité měřicí přístroje**

Pro zpracování metodiky výpočtu účinnosti kotle a vyhodnocení její velikosti jsem využil výsledků diagnostického měření, které na kotli K5 prováděli pracovníci katedry energetiky VŠB-TU Ostrava v květnu 2014. Popis měření a měřicí techniky tak odpovídá reálnému stavu a také výsledné hodnoty naměřených veličin, využití v dalších kapitolách, jsou převzaty z výsledků tohoto diagnostického měření. [4]

### **6.1 Měřicí systém**

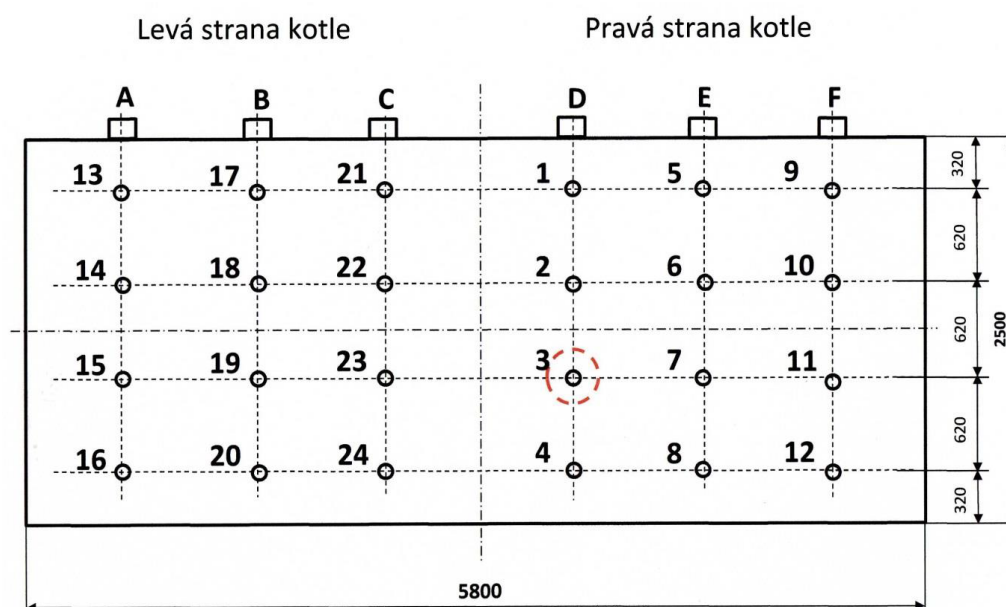
Data byla snímána pomocí systému Solatron Schlumberger. Tento počítačově řízený systém je přímo určen pro měření tepelně technických parametrů v parních elektrárnách. Systém se skládá z počítačové I/O karty 3595 4A a externích sběrných karet IMP 35951. Tento systém je vhodný pro měření podle normy ČSN07 0302. Karty mezi sebou byly propojeny S-Net kabelem. Externí sběrnice jsou analogově-digitální 16-ti bit převodníky, díky nimž můžeme měřit velice přesné hodnoty napětí, proudu a teploty pomocí termočlánků. Studený konec termočlánků můžeme nahradit termistorem anebo přesným zadáním okolní teploty. Měření probíhalo kontinuálně a ukládání hodnot bylo opakováno v pravidelných intervalech, zvolených podle doby trvání zkoušky. Následně byla data zpracována pomocí obslužného programu a zpracována v Excelu do tabulek.[4]

## 6.2 Měření teploty

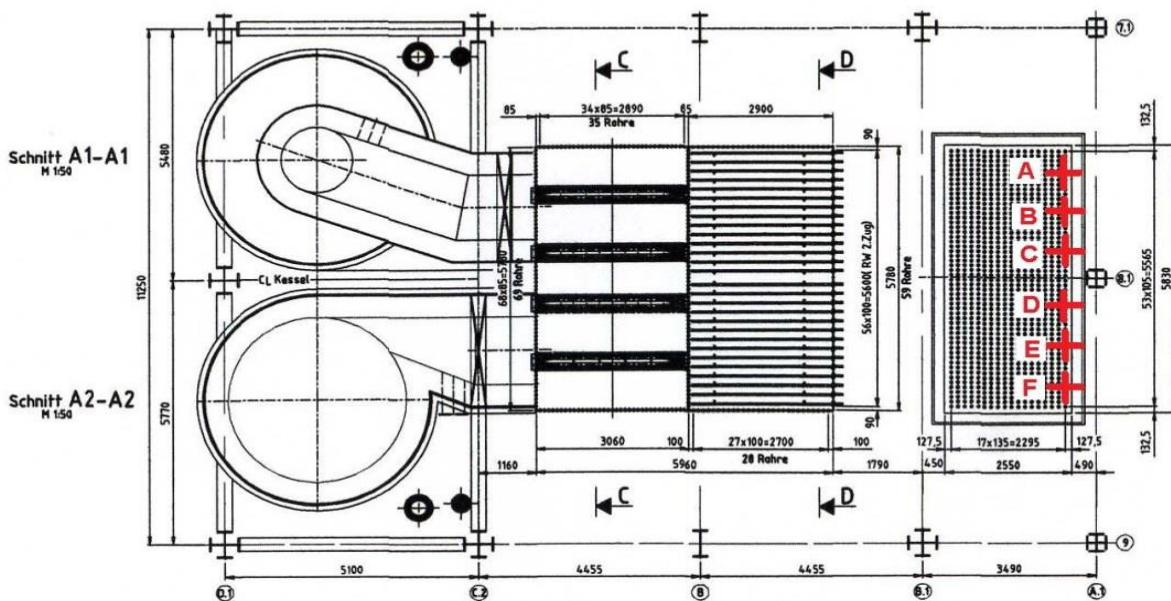
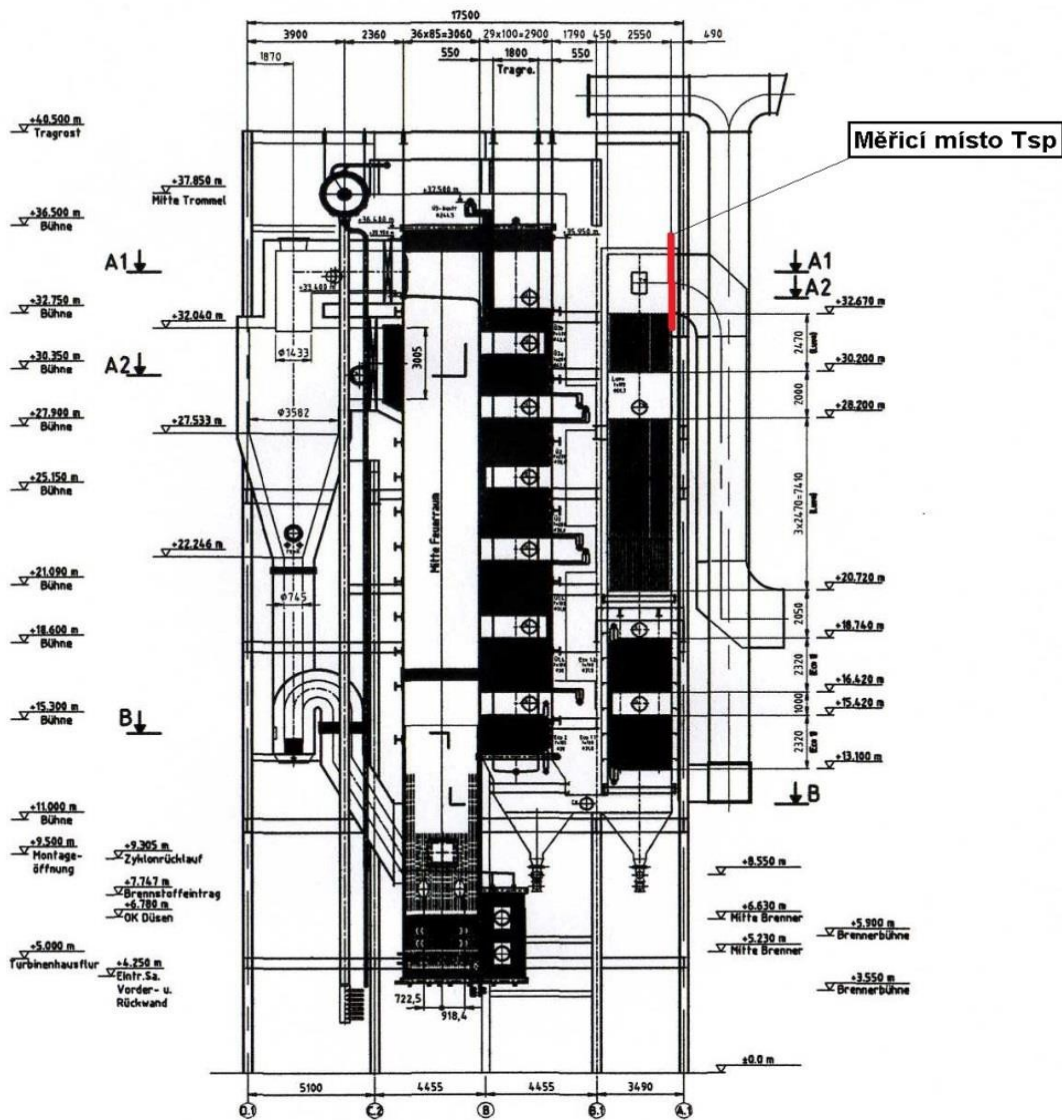
Měřicím systémem byla měřena a zapsána teplota spalin na výstupu z kotle a teplota nasávaného vzduchu.

Teplota byla snímána pomocí plášťových termočlánků typu K (NiCr-Ni) o průměru tří milimetrů, a to v měřicích místech v souladu s normou pro síťové měření. Externí karta byla s termočláanky spojena kompenzačním vedením. Naměřená data byla zaznamenávána v pravidelném intervalu.

Měřicí místo bylo zvoleno ve vodorovné části kouřovodu za poslední teplosměnou plochou před vstupem do elektroodlučovače a spalinového ventilátoru. Kouřovod byl obdélníkového průřezu o rozměrech 5,8 x 2,5 m. Umístění termočlánků bylo rovnoměrné v šesti řadách po čtyřech termočláncích, čímž celkový součet byl dvacet čtyři termočlánků. Zobrazení místa měření na kotli je zobrazeno na obrázku 7 a řezu kouřovodem je znázorněno na obrázku 6 , kde je také zobrazeno síťové rozložení termočlánků.[4]



Obrázek 6: Umístění termočlánků v potrubí [4].



Obrázek 7: Schéma kotle K5 a umístění měřícího průřezu pro stanovení teploty spalin [4]

### 6.3 Měření koncentrace CO, SO<sub>2</sub> a O<sub>2</sub> ve spalinách

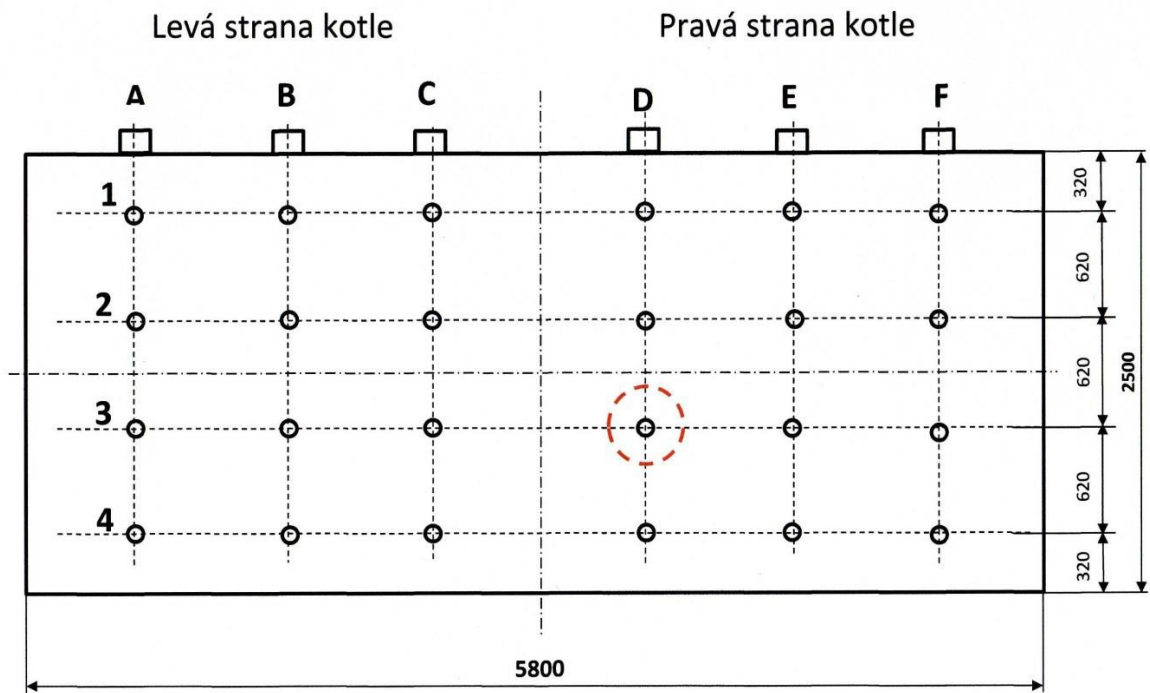
Měření koncentrace spalin bylo provedeno v souladu s normou pro síťová měření. Místo měření bylo také, stejně jako u měření teploty, za poslední teplosměnnou plochou, před vstupem do elektrodučovače ve vodorovné části spalinového traktu o rozměrech 5,8 x 2,5 m. Měřicí body byly rozmístěny v šesti přímkách po čtyřech, což dává dvacet čtyři měřicích bodů, jak můžeme vidět na obrázku 8. Měřicí rovina je vzdálena od měřicí roviny pro teplotu o dvacet centimetrů ve směru proudění spalin.

V daných místech byly nainstalovány odběrové sondy, ke kterým bylo připojeno vzduchotěsné vedení. Pomocí sond a vzduchotěsného vedení byly vzorky spalin odebírány a transportovány do odběrových vaků. Rychlost proudění spalin ve vedení byla přibližně deset litrů za minutu. Z analyzovaného vzorku byly odfiltrované nečistoty a zkondenzovaná vodní pára, které byly obsažné ve spalinách, a následně byla určena koncentrace kyslíku pomocí analyzátoru. Analyzátor, který byl použit, využíval paramagnetických vlastností kyslíku.

Koncentrace dalších složek, na výstupu z kotle za poslední teplosměnnou plochou (jako oxid uhelnatý a oxid siřičitý), v suchých spalinách byla vypočtena na základě znalosti měřených referenčních koncentrací těchto složek před komínem ( $CO_{em}$ ,  $SO_{2em}$ ) z údajů emisního monitoringu a průměrné hodnoty obsahu O<sub>2</sub> získané z měření ve 24 bodech po průřezu kouřovodu na výstupu z kotle podle rovnic (1),(2) ve kterých  $O_{2ref}$  je hodnota referenčního obsahu kyslíku ve spalinách při spalování uhlí.[4]

$$CO = \frac{CO_{em}}{1,25} \cdot \frac{21 - O_2}{21 - O_{2ref}} \quad (1)$$

$$SO_2 = \frac{SO_{2em}}{2,93} \cdot \frac{21 - O_2}{21 - O_{2ref}} \quad (2)$$



Obrázek 8: Umístění odběrových míst v potrubí [4].

#### 6.4 Určení složení paliva a tuhých zbytků

Pro stanovení referenčního vzorku paliva a tuhých zbytků po spalování byly v průběhu zkoušky odebrány v pravidelných intervalech dílčí vzorky těchto surovin. Kvartováním byly po ukončení zkoušky získány referenční vzorky, jejichž rozbor byl proveden v laboratoři firmy AmpluServis a.s. a výsledky jsou sestaveny do následující tabulky 1.[4]

## 7. Hodnoty pro stanovení účinnosti kotle

| <b>Palivo</b>            |        |         |
|--------------------------|--------|---------|
| Výhřevnost               | 16,69  | [MJ/kg] |
| Voda W <sub>r</sub>      | 28,35  | [%]     |
| Popel A <sub>r</sub>     | 11,62  | [%]     |
| S <sub>r</sub>           | 0,8    | [%]     |
| C <sub>r</sub>           | 44,104 | [%]     |
| H <sub>r</sub>           | 3,498  | [%]     |
| N <sub>r</sub>           | 0,584  | [%]     |
| O <sub>rd</sub>          | 11,05  | [%]     |
| <b>Pára</b>              |        |         |
| Průtok                   | 80,9   | [t/h]   |
| Tlak                     | 6,3    | [MPa-r] |
| Teplota                  | 478,7  | [°C]    |
| <b>napájecí voda</b>     |        |         |
| Průtok                   | 81,6   | [t/h]   |
| Tlak                     | 8,6    | [MPa-r] |
| Teplota                  | 149,2  | [°C]    |
| <b>spaliny za kotlem</b> |        |         |
| Teplota (průměr)         | 131,9  | [°C]    |
| Obsah O <sub>2</sub> [%] | 4,55   | [%]     |
| Obsah SO <sub>2</sub>    | 170    | [ppm]   |
| Obsah CO                 | 5      | [ppm]   |
| <b>nasávaný vzduch</b>   |        |         |
| Teplota                  | 32,6   | [°C]    |
| vzduch Relativní vlhkost | 47,8   | [%]     |
| Atmosférický tlak        | 99300  | [Pa]    |
| <b>nespálené látky</b>   |        |         |
| Popílek                  | 1,63   | [%]     |
| Škvára                   | 1,53   | [%]     |

Tabulka 1: Hodnoty pro stanovení účinnosti [4].

## 8. Výpočet účinnosti podle normy ČSN 07 0302

Výsledné hodnoty laboratorního rozboru a naměřených a vypočtených veličin při diagnostickém měření vstupují do výpočtu účinnosti kotle, jehož příklad je uveden v následující kapitole.

### 8.1 Výpočet nutných proměnných pro výpočet ztrát

- Minimální objem suchého vzduchu pro spálení

Uvažujeme, že spalování je dokonale vypočtou se stechiometrické objemy spalovacího vzduchu

$$V_{vs\ min} = \frac{22,39}{0,2095} \cdot \left( \frac{C^r}{12,011} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,066} - \frac{O^r}{32,00} \right) \quad (3)$$

$$V_{vs\ min} = \frac{22,39}{0,2095} \cdot \left( \frac{0,441}{12,011} + \frac{0,035}{4,032} + \frac{0,0008}{32,066} - \frac{0,111}{32,00} \right)$$

$$V_{vs\ min} = 4,509 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

- Minimální objem suchých spalin

$$V_{ss\ min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r + \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r + \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r + 0,7905 \cdot V_{vs\ min} \quad (4)$$

$$V_{ss\ min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,441 + \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,0008 + \frac{22,40}{28,016} \cdot 0,000584 + 0,7905 \cdot 4,509$$

$$V_{ss\ min} = 4,392 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

- Minimální obsah vody ve spalinách

$$V_{sH_2O\ min} = 11,1111 \cdot H^r + 1,2433 \cdot W_f + (\nu - 1) \cdot V_{vs\ min} \quad (5)$$

$$V_{sH_2O\ min} = 11,1111 \cdot 0,035 + 1,2433 \cdot 0,284 + (1,0114 - 1) \cdot 4,509$$

$$V_{sH_2O\ min} = 0,792 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

přítom

$$\nu = 1 + \frac{\varphi_v \cdot p''}{p_b - \varphi_v \cdot p''} \quad (6)$$

$$\nu = 1 + \frac{0,478 \cdot 2,337 \cdot 10^3}{99300 - 0,478 \cdot 2,337 \cdot 10^3}$$

$$\nu = 1,0114 \left[ m^3 \cdot kg^{-1} \right]$$

Hodnotu  $p''$  jsem použil z tabulek ze skript Termomechaniky. (viz Příloha A)

- Složky stechiometrických objemů pro dokonale spalování ve vzduchu

- Objemové množství  $CO_2$

$$V_{vCO_2} = 0,0003 \cdot V_{vs \min} \quad (7)$$

$$V_{vCO_2} = 0,0003 \cdot 4,509$$

$$V_{vCO_2} = 0,001 \left[ m^3 \cdot kg^{-1} \right]$$

- Objemové množství  $N_2$

$$V_{vN_2} = 0,7809 \cdot V_{vs \min} \quad (8)$$

$$V_{vN_2} = 0,7809 \cdot 4,509$$

$$V_{vN_2} = 3,521 \left[ m^3 \cdot kg^{-1} \right]$$

- Objemové množství částic

$$V_{vAr} = 0,0093 \cdot V_{vs \min} \quad (9)$$

$$V_{vAr} = 0,0093 \cdot 4,509$$

$$V_{vAr} = 0,042 \left[ m^3 \cdot kg^{-1} \right]$$

- Složky stechiometrických objemů pro dokonalé spalování ve spalinách



- Objemové množství CO<sub>2</sub>

$$V_{sCO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r \quad (10)$$

$$V_{sCO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,441$$

$$V_{sCO_2} = 0,817 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

- Objemové množství SO<sub>2</sub>

$$V_{sSO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r \quad (11)$$

$$V_{sSO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,008$$

$$V_{sSO_2} = 0,00546 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

- Objemové množství N<sub>2</sub>

$$V_{sN_2} = \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r \quad (12)$$

$$V_{sN_2} = \frac{22,40}{28,016} \cdot 0,00584$$

$$V_{sN_2} = 0,00467 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Pro nedokonalé spalování

- Objemové množství CO

$$V_{sCO} = \frac{22,41}{12,011} \cdot C^r \quad (13)$$

$$V_{sCO} = \frac{22,41}{12,011} \cdot 0,441$$

$$V_{sCO} = 0,823 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

- Objemové množství C

$$V_{O_2}(C) = \frac{22,39}{12,011} \cdot C^r \quad (14)$$

$$V_{O_2}(C) = \frac{22,39}{12,011} \cdot 0,441$$

$$V_{O_2}(C) = 0,822 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

- Výpočet základních podmínek při spalování určující kvalitu spalování na základě vyhodnocení naměřených objemových podílů

$$b = \frac{A^r}{C^r} \sum_{i=1}^a \frac{C_i \cdot X_i}{1 - C_i} \quad (15)$$

$$b = \frac{0,116}{0,441} \cdot \left( \frac{0,016 \cdot 0,1}{1 - 0,016} + \frac{0,015 \cdot 0,1}{1 - 0,015} \right)$$

$$b = 0,000846 [kg \cdot kg^{-1}]$$

$$\alpha_1 = \frac{R7 \cdot \omega_{CO}}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3} \quad (16)$$

$$\alpha_1 = \frac{4,147 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{-3,71 \cdot 0,0455 + 0,689 \cdot 5 \cdot 10^{-6} + 0,777}$$

$$\alpha_1 = 3,407 \cdot 10^{-5} [kg \cdot kg^{-1}]$$

- Konstanty R1-R7 můžeme vyjádřit

$$R1 = -V_{vs \min} \cdot V_{sCO} \quad (17)$$

$$R1 = -4,509 \cdot 0,823 = -3,711 [-]$$

$$R2 = V_{vs \min} \cdot (0,5 \cdot V_{O_2}(C) - 0,2095 \cdot V_2) \quad (18)$$

$$R2 = 4,509 \cdot (0,5 \cdot 0,822 - 0,2095 \cdot 0,417) = 1,460 [-]$$

$$R3 = 0,2095 \cdot V_{vs \min} \cdot V_{sCO} \quad (19)$$

$$R3 = 0,2095 \cdot 4,509 \cdot 0,823 = 0,777 [-]$$

$$R4 = V_{sCO} \cdot (V_1 + b \cdot V_3) \quad (20)$$

$$R4 = 0,823 \cdot (-0,117 + 0,000846 \cdot 0,821) = -0,0958 [-]$$

$$R5 = V_2 \cdot (b \cdot V_{O_2}(C) - 0,2095 \cdot V_{vs \min}) - 0,5 \cdot V_{O_2}(C) \cdot (V_1 + b \cdot V_3) \quad (21)$$

$$R5 = 0,417 \cdot (0,000846 \cdot 0,822 - 0,2095 \cdot 4,509) - 0,5 \cdot 0,822 \cdot (-0,117 + 0,000846 \cdot 0,821) = -0,345[-]$$

$$R6 = V_{sCO} \cdot (0,2095 \cdot V_{vs \min} - b \cdot V_{O_2}(C)) \quad (22)$$

$$R6 = 0,823 \cdot (0,2095 \cdot 4,509 - 0,000846 \cdot 0,822) = 0,777[-]$$

$$R7 = V_{vs \min} \cdot (0,2095 \cdot (V_1 + b \cdot V_3) + 0,2095 \cdot V_{vs \min} - b \cdot V_{O_2}(C)) \quad (23)$$

$$R7 = 4,509 \cdot (0,2095 \cdot (-0,117 + 0,000846 \cdot 0,821) + 0,2095 \cdot 4,509 - 0,000846 \cdot 0,822) = 4,147[-]$$

- Kdy platí:

$$V_1 = V_{ss \min} - V_{vs \min} \quad (24)$$

$$V_1 = 4,392 - 4,509 = -0,117[m^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_2 = V_{sCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{sCO_2} \quad (25)$$

$$V_2 = 0,823 + 0,5 \cdot 0,822 - 0,817 = 0,417[m^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_3 = V_{O_2}(C) - V_{sCO_2} \quad (26)$$

$$V_3 = 0,822 - 0,817 = 0,005[m^3 \cdot kg^{-1}]$$

- Přebytek vzduchu pro spalování

Díky přebytku vzduchu dochází k dokonalému shoření veškeré hořlaviny v kotli.

$$\alpha = \frac{R4 \cdot \omega_{O_2} + R5 \cdot \omega_{CO} + R6}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3} \quad (27)$$

$$\alpha = \frac{-0,0958 \cdot 0,0455 + (-0,345) \cdot 5 \cdot 10^{-6} + 0,777}{-3,711 \cdot 0,0455 + 1,460 \cdot 5 \cdot 10^{-6} + 0,777}$$

$$\alpha = 1,269[-]$$

Součinitel přebytku vzduchu za kotlem.

$$\alpha_k = \frac{(R7 - a_1 \cdot R2) \cdot (R4 \cdot (\omega_{O_2})_k + R6) + a_1 \cdot R5 \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R3)}{(R7 - a_1 \cdot R2) \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R5) + a_1 \cdot R2 \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R3)} \quad (28)$$

$$\alpha_k = \frac{(4,147 - 3,407 \cdot 10^{-5} \cdot 1,460) \cdot (-0,0958 \cdot 0,0455 + 0,777) + 3,407 \cdot 10^{-5} \cdot -0,345 \cdot (-3,711 \cdot 0,0455 + 0,777)}{(4,147 - 3,407 \cdot 10^{-5} \cdot 0,689) \cdot (-3,711 \cdot 0,0455 + (-0,345)) + 3,407 \cdot 10^{-5} \cdot 1,460 \cdot (-3,711 \cdot 0,0455 + 0,777)}$$

$$\alpha_k = -1,502[-]$$

- Reálný objem spalin za kotlem po spálení jednoho kilogramu paliva.

- suchých spalin

$$V_{ss} = V_{ss \min} + a_1 \cdot (V_{sCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{sCO_2}) + b \cdot (V_{O_2}(C) - V_{sCO_2}) + (\alpha_k - 1) \cdot V_{vs \min} \quad (29)$$

$$V_{ss} = 4,392 + 3,407 \cdot 10^{-5} \cdot (0,823 + 0,5 \cdot 0,822 - 0,817) + 0,000846 \cdot (0,822 - 0,817) + (1,502 - 1) \cdot 4,509$$

$$V_{ss} = 6,657 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

- vlhkých spalin

$$V_s = V_{ss} + V_{sH_2O} \quad (30)$$

$$V_s = 6,657 + 0,818$$

$$V_s = 7,475 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

přičemž obsah vodní páry

$$V_{sH_2O} = V_{sH_2O \min} + (\alpha_k - 1) \cdot (v - 1) \cdot V_{vs \min} \quad (31)$$

$$V_{sH_2O} = 0,792 + (1,502 - 1) \cdot (1,0114 - 1) \cdot 4,509$$

$$V_{sH_2O} = 0,818 [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

- poměrný obsah páry

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{sH_2O}}{V_s} \quad (32)$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{0,818}{7,475}$$

$$\omega_{H_2O} = 0,109[-]$$

- Střední měrná kapacita

- Tepelná kapacita při dané teplotě

$$\bar{c}_s(t) = \left( A \cdot t + B + \frac{C}{t} \right) / V_s \quad (33)$$

- Tepelná kapacita pro teplotu za kotlem

$$\bar{c}_s(t_k) = \left( 0,00101 \cdot 131,9 + 9,084 + \frac{35,644}{131,9} \right) / 7,475$$

$$\bar{c}_s(t_k) = 1,197 \left[ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right]$$

- Tepelná kapacita pro teplotu okolí

$$\bar{c}_s(t_0) = \left( 0,00101 \cdot 131,9 + 9,084 + \frac{35,644}{131,9} \right) / 7,475$$

$$\bar{c}_s(t_0) = 0,979 \left[ \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right]$$

- Konstanty A, B, C jde vyjádřit při pomoci přebytku vzduchu  $\alpha$ .

$$A = A_0 + \alpha \cdot A_\alpha \quad (34)$$

$$A = 0,000302 + 1,269 \cdot 0,000557$$

$$A = 0,00101 [-]$$

$$B = B_0 + \alpha \cdot B_\alpha \quad (35)$$

$$B = 1,600 + 1,269 \cdot 5,895$$

$$B = 9,084 [-]$$

$$C = C_0 + \alpha \cdot C_\alpha \quad (36)$$

$$C = -26,629 + 1,269 \cdot (-7,102)$$

$$C = -35,644 [-]$$

Pro známé složky můžeme dále napsat

$$\begin{aligned}
 A_0 = & ((1 - a_1 - a_2 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2}) \cdot A1 + V_{sSO_2} \cdot A2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot A3 \\
 & + V_{vAr} \cdot A4 + V_{sH_2O} \cdot A5 + A^r \cdot (1 - X_{sk}) \cdot A7 - V_{vs \min} \cdot (A6 + (v - 1) \cdot A5) \quad (37) \\
 & + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot A8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot A9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_0 = & ((1 - 3,407 \cdot 10^{-5} - 0 - 0,000846) \cdot 0,817 + 0,00135) \cdot 2,590 \cdot 10^{-4} \\
 & + 0,00546 \cdot 1,791 \cdot 10^{-4} + (0,00467 + 3,521) \cdot 1,137 \cdot 10^{-4} + 0,0419 \cdot 1,0336 \cdot 10^{-4} \\
 & + 0,818 \cdot 2,507 \cdot 10^{-4} + 0,116 \cdot (1 - 0,0153) \cdot 3,134 \cdot 10^{-4} \\
 & - 4,509 \cdot (1,207 \cdot 10^{-4} + (1,0114 - 1) \cdot 2,507 \cdot 10^{-4}) \\
 & + (0,5 \cdot 3,407 \cdot 10^{-5} + 0,000846) \cdot 0,822 \cdot 1,0688 \cdot 10^{-4} + 3,407 \cdot 10^{-5} \cdot 0,823 \cdot 1,149 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}$$

$$A_0 = 0,000302[-]$$

$$\begin{aligned}
 B_0 = & ((1 - a_1 - a_2 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2}) \cdot B1 + V_{sSO_2} \cdot B2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot B3 \\
 & + V_{vAr} \cdot B4 + V_{sH_2O} \cdot B5 + A^r \cdot (1 - X_{sk}) \cdot B7 - V_{vs \min} \cdot (B6 + (v - 1) \cdot B5) \quad (38) \\
 & + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot B8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot B9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_0 = & ((1 - 3,407 \cdot 10^{-5} - 0 - 0,000846) \cdot 0,817 + 0,00135) \cdot 2,0121 \\
 & + 0,00546 \cdot 2,157 + (0,00467 + 3,521) \cdot 1,283 + 0,0419 \cdot 0,928 + 0,818 \cdot 1,464 \\
 & + 0,116 \cdot (1 - 0,0153) \cdot 0,676 - 4,509 \cdot (1,291 + (1,0114 - 1) \cdot 1,464) + \\
 & (0,5 \cdot 3,407 \cdot 10^{-5} + 0,000846) \cdot 0,822 \cdot 1,383 + 3,407 \cdot 10^{-5} \cdot 0,823 \cdot 1,299
 \end{aligned}$$

$$B_0 = 1,600[-]$$

$$\begin{aligned}
 C_0 = & ((1 - a_1 - a_2 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2}) \cdot C1 + V_{sSO_2} \cdot C2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot C3 \\
 & + V_{vAr} \cdot C4 + V_{sH_2O} \cdot C5 + A^r \cdot (1 - X_{sk}) \cdot C7 - V_{vs \min} \cdot (C6 + (v - 1) \cdot C5) \quad (39) \\
 & + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot C8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot C9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_0 = & ((1 - 3,407 \cdot 10^{-5} - 0 - 0,000846) \cdot 0,817 + 0,00135) \cdot (-47,784) \\
 & + 0,00546 \cdot (-43,466) + (0,00467 + 3,521) \cdot (-0,0391) + 0,0419 \cdot 0,372 \\
 & + 0,818 \cdot 6,620 + 0,116 \cdot (1 - 0,0153) \cdot 2,708 - 4,509 \cdot (-1,650 + (1,0114 - 1) \cdot 6,620) \\
 & + (0,5 \cdot 3,407 \cdot 10^{-5} + 0,000846) \cdot 0,822 \cdot (-13,630) + 3,407 \cdot 10^{-5} \cdot 0,823 \cdot (-3,304)
 \end{aligned}$$

$$C_0 = -35,644[-]$$

$$A_\alpha = V_{vs \min} \cdot (A6 + (v - 1) \cdot A5) \quad (40)$$

$$A_\alpha = 4,509 \cdot (1,207 \cdot 10^{-4} + (1,0114 - 1) \cdot 2,507 \cdot 10^{-4})$$

$$A_\alpha = 0,000557[-]$$

$$B_{\alpha} = V_{vs \min} \cdot (B6 + (v - 1) \cdot B5) \quad (41)$$

$$B_{\alpha} = 4,509 \cdot (1,291 + (1,0114 - 1) \cdot 1,464)$$

$$B_{\alpha} = 5,895[-]$$

$$C_{\alpha} = V_{vs \min} \cdot (C6 + (v - 1) \cdot C5) \quad (42)$$

$$C_{\alpha} = 4,509 \cdot (-1,650 + (1,0114 - 1) \cdot 6,620)$$

$$C_{\alpha} = -7,102[-]$$

Hodnoty koeficientů A(I), B(I), C(I) pro vybrané plyny, suchý vzduch a popílek jsou uvedeny v tabulce (2), kterou jsem převzal z normy.

| I  | Složka       | A (I)            | B (I)     | C (I)       |
|----|--------------|------------------|-----------|-------------|
| 1  | CO2          | 2,5903118 x 10-4 | 2,0121359 | -47,7836646 |
| 2  | SO2          | 1,7911607 x 10-4 | 2,1566298 | -43,4666094 |
| 3  | N2           | 1,1365887 x 10-4 | 1,2827182 | -0,0390503  |
| 4  | Ar           | 1,033607 x 10-4  | 0,9281643 | 0,3719149   |
| 5  | H2O          | 2,5070785 x 10-4 | 1,4643053 | 6,6195562   |
| 6  | Vzduch suchý | 1,2065266 x 10-4 | 1,2907768 | -1,6503075  |
| 7  | Popel        | 3,1337938 x 10-4 | 0,6756903 | 2,7077545   |
| 8  | O2           | 1,0687881 x 10-4 | 1,3830632 | -13,6303648 |
| 9  | CO           | 1,1490349 x 10-4 | 1,2992527 | -3,303763   |
| 10 | CH4          | 2,5903118 x 10-4 | 2,0121359 | -47,7836646 |

Tabulka 2: Hodnoty pro stanovení tepelné kapacity spalín [2].

- Střední integrální měrná tepelná kapacita spalín

$$\bar{c}_s = \frac{\bar{c}_s(t_k) \cdot t_k - \bar{c}_s(t_0) \cdot t_0}{t_k - t_0} \quad (43)$$

$$\bar{c}_s = \frac{1,197 \cdot 131,9 - 0,979 \cdot 20}{131,9 - 20}$$

$$\bar{c}_s = 1,236 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

## 8.2 Výpočet ztrát k výpočtu účinnosti a také vlastní výpočet účinnosti

Účinnost parního kotle stanovím nepřímou metodou, která je popsána tímto vztahem

$$\eta = 1 - \zeta_{CO} - \zeta_C - \zeta_k - \zeta_f - \zeta_{sd} - \zeta_{ch} \quad (44)$$

$$\eta = 1 - 2,123 \cdot 10^{-5} - 0,000729 - 0,0619 - 0,000123 - 0,692$$

$$\eta = 0,930 \Rightarrow 93\%$$

$\zeta_i$  což jsou tepelné poměry ztrát, kde i je:

|    |  |
|----|--|
| CO | ztráta způsobená únikem hořlaviny v spalínách  |
| C  | ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích  |
| k  | ztráty způsobené únikem tepla se spalínami (komínová)  |
| f  | ztráty způsobené únikem tepla v tuhých zbytcích  |
| sv | ztráty způsobené odevzdáním tepla do okolí tj. ztráta tepla způsobena přestupem tepla radiací a konvekcí |
| ch | ztráty způsobené odvedením tepla chladící vodou[1]   |

- Ztráta hořlaviny ve spalínách

je výsledkem úniku hořlaviny ve spalínách a je to ztráta během uvolňování tepla při nedokonalém spalování hořlaviny v palivu. Projevuje se výskytem složek, například oxid uhelnatý, vodík a různé uhlovodíky, ve spalínách. Nejčastěji je to však výskyt oxidu uhelnatého, který tvoří hlavní část ztrát. Určení hodnoty ztrát se počítá z tepelného obsahu hořlavých složek ve spalínách.[1]

$$\zeta_{CO} = (12640 \cdot a_1 \cdot V_{sCO}) / Q_1 \quad (45)$$

$$\zeta_{CO} = (12640 \cdot 3,407 \cdot 10^{-5} \cdot 0,823) / (16,69 \cdot 10^3)$$

$$\zeta_{CO} = 2,123 \cdot 10^{-5} [-]$$



- Ztráta hořlaviny tuhých zbytcích

Vztah vyjadřuje poměr tepla vázaného v hořlavině v tuhém zbytku, vyrobeného z paliva k množství tepla vázaného v palivu které je přivedené do kotle co je vyjádřené výhřevností.[1]

$$\zeta_c = b \cdot C^r \cdot 32600 / Q_t \quad (46)$$

$$\zeta_c = 0,000846 \cdot 0,441 \cdot 32600 / 16,69 \cdot 10^3$$

$$\zeta_c = 0,000729[-]$$

- Ztráta tepla ve spalinách

je způsobena únikem tepla ve spalinách (jinak komínová ztráta), je poměr tepla uniklého komínem ve spalinách k množství tepla přivedeného do kotle v jednom kilogramu paliva.[1]

$$\zeta_k = V_s \cdot \bar{c}_s \cdot (t_k - t_0) / Q_1 \quad (47)$$

$$\zeta_k = 7,475 \cdot 1,236 \cdot (131,9 - 20) / 16,69 \cdot 10^3$$

$$\zeta_k = 0,0619[-]$$

- Ztráta tepla v tuhých zbytcích

vznikla únikem tepla v tuhých zbytcích po spálení paliva. Tato ztráta se vyskytuje jen u tuhých paliv.[1]

$$\zeta_f = A^r \cdot \left( \sum \frac{X_i \cdot \bar{c}_{si} \cdot (t_i - t_0)}{1 - C_i} \right) / Q_1 \quad (48)$$

$$\zeta_f = A^r \cdot \left( \frac{X_{pop} \cdot \bar{c}_{spop} \cdot (t_{pop} - t_0)}{1 - C_{pop}} + \frac{X_{sk} \cdot \bar{c}_{ssk} \cdot (t_{sk} - t_0)}{1 - C_{sk}} \right) / Q_1$$

$$\zeta_f = A^r \cdot \left( \frac{0,1 \cdot 0,778 \cdot (132 - 20)}{1 - 0,0163} + \frac{0,1 \cdot 0,778 \cdot (132 - 20)}{1 - 0,0153} \right) / (16,69 \cdot 10^3)$$

$$\zeta_f = 0,0619[-]$$

přičemž střední měrná tepelná kapacita

$$\bar{c}_{si} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_i \quad (49)$$

- pro škváru

$$\bar{c}_{spop} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 132$$

$$\bar{c}_{spop} = 0,778 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

- pro popílek

$$\bar{c}_{ssk} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 132$$

$$\bar{c}_{ssk} = 0,778 [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

- ztráta sdílením do okolí

$$\zeta_{sd} = 0,00692 [-]$$

Měření ztráty tepla sdílením do okolí bylo provedeno důkladně a to z důvodu, že tyto ztráty v Teplárně Tábor způsobovaly problémy.

K získání přesných údajů o této ztrátě bylo provedeno celkové měření celého zařízení. K tomu byly využity povrchové teploměry a v nedostupných místech byla využita i termokamera. Určena ztráta díky měření a následnému spočítání byla nižší a to o 0,2%, než hodnota, která vycházela při výpočtu podle vztahu z normy.

- ztráta chlazením

Tato ztráta se většinou nevyužívá. Tato ztráta vzniká chlazením části kotle. Vzniklé teplo se nevyužívá a obvádí se pryč.

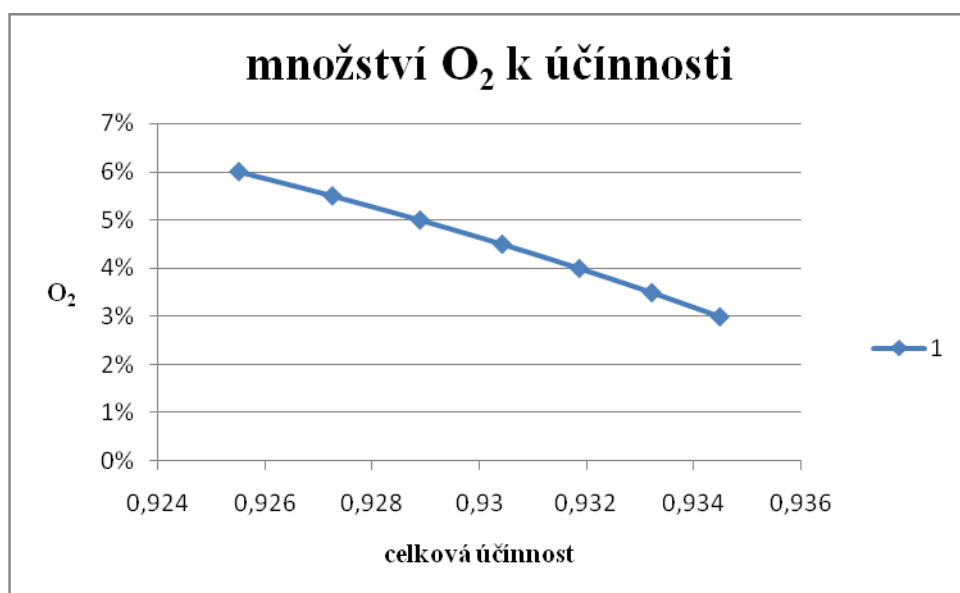
## 9. Výpočet účinnosti kotle pro různé obsahy kyslíku

Výpočet při různém obsahu kyslíku ukazuje, jak se bude měnit účinnost kotle. Problém může vzniknout při špatném určení referenčního místa pro měření obsahu kyslíku ve spalínách a tím dojít k vnášení chyby při určování účinnosti daného zařízení. To způsobí nedokonalé využití energie dodané v palivu

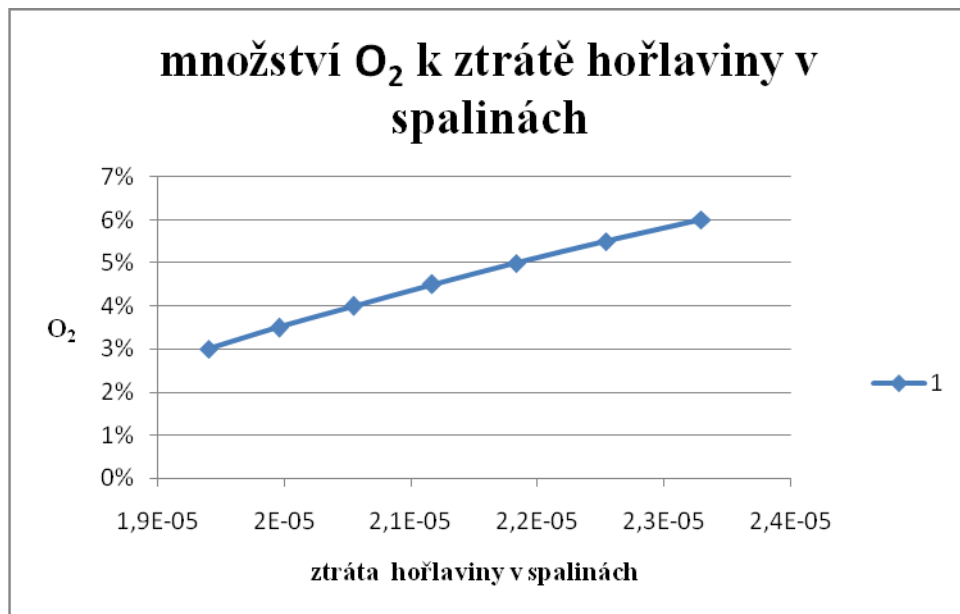
|   | O <sub>2</sub> | $\eta$ | $\zeta_{CO}$ | $\zeta_k$ |
|---|----------------|--------|--------------|-----------|
| 1 | 3%             | 0,934  | 1,940E-05    | 0,0577    |
| 2 | 3,50%          | 0,933  | 1,995E-05    | 0,0590    |
| 3 | 4,00%          | 0,932  | 2,054E-05    | 0,0603    |
| 4 | 4,50%          | 0,930  | 2,117E-05    | 0,0618    |
| 5 | 5,00%          | 0,929  | 2,183E-05    | 0,0633    |
| 6 | 5,50%          | 0,927  | 2,254E-05    | 0,0649    |
| 7 | 6,00%          | 0,926  | 2,329E-05    | 0,0667    |

Tabulka 3: závislost účinnosti na obsahu kyslíku.

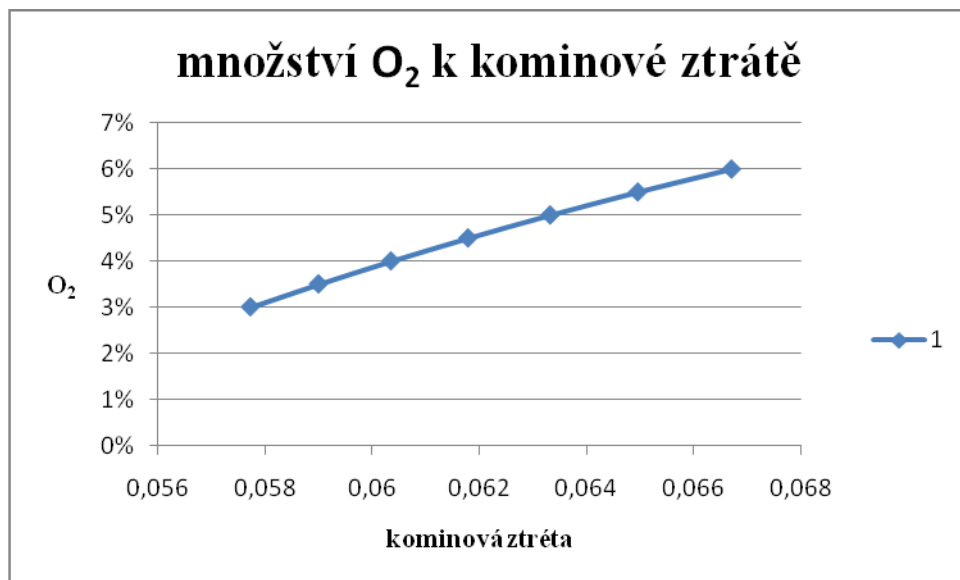
Na grafech 1, 2 a 3 můžeme vidět grafické znázornění vývoje účinnosti a ztrát při změně obsahu kyslíku ve spalínách. S rostoucím obsahem kyslíku účinnost kotle lineárně klesá. Klesání je zapříčiněno zvyšováním množství spalín a tím rostoucí komínovou ztrátou.



Graf 1: množství O<sub>2</sub> k účinnosti



Graf 2: množství O<sub>2</sub> k ztrátě hořlaviny v spalinách



Graf 3: množství O<sub>2</sub> k kominové ztrátě

## Závěr

Úkolem mé bakalářské práce bylo zjištění účinnosti parního kotle K5 v teplárně Tábor. Výpočet jsem prováděl dle normy ČSN 07 0302. Pro výpočet jsem zvolil nepřímou metodu stanovení účinnosti kotle. Tuto metodu jsem vybral, protože u přímé metody je nutné přesné měření množství dodávaného paliva, což je u tuhých paliv obtížné. Díky tomu je tato metoda pro tento typ kotle vhodnější a přesnější. Pro samotný výpočet bylo potřeba znát vstupní a výstupní parametry paliva, nasávaného vzduchu, páry a spalin vycházejících z kotle. Síťovým měřením byla měřena teplota a koncentrace některých složek spalin například: kyslíku, oxidu uhelnatého a oxidu siřičitého. Výpočet účinnosti pro naměřené parametry jsem provedl v tabulkovém editoru Excel. Postup, dle kterého jsem postupoval, je uveden výše. Program pro výpočet, který jsem vytvořil, je uveden v příloze.

Při výpočtu jsem vypočítal ztráty, které ukazovaly nedokonalost zařízení. Těmito ztrátami byly: ztráta způsobená únikem hořlaviny v spalinách, ztráta způsobená únikem hořlaviny v tuhých zbytcích, ztráta způsobená únikem tepla se spalinami - jinak komínová, ztráty způsobené únikem tepla v tuhých zbytcích, ztráty způsobené odevzdáním tepla do okolí tj. ztráta tepla způsobena přestupem tepla radiací a konvekcí. Odvodem tepla v chladící vodě jsem se nezabýval, protože zařízení, které jsem počítal, nemělo žádné přídatné chlazení. Hodnoty ztráty hořlaviny v tuhých zbytcích a ve spalinách dosahovaly nízkých hodnot z důvodu dobrého technického provedení kotle a správného množství přivedeného vzduchu. Ztráta odvodem tepla do okolí byla stanovena mimo obsah bakalářské práce a byla převzata z výpočtové dokumentace Katedry energetiky. Ztráta odvodem tepla v tuhých zbytcích vycházela nízká, a proto také neovlivňovala celkovou účinnost. Komínová ztráta vyšla největší ze všech ztrát a byla ovlivněna přebytkem spalovacího vzduchu a teplotou spalin vycházejících z kotle.

Komínovou ztrátou jsem se zabýval důkladněji a porovnával jsem, jak se bude měnit účinnost kotle s rostoucím obsahem kyslíku respektive vzduchu ve spalinách. Provedl jsem výpočet pro různé podíly kyslíku při konstantních zbylých proměnných.

Účinnost kotle při zadaných parametrech dosahovala hodnoty 93%. V dalších výpočtech, při rostoucí koncentraci kyslíku ve spalinách, účinnost klesala lineárně a komínová ztráta rostla. Díky tomu můžeme, navrhnout optimální množství kyslíku pro spalování z největší účinností a v důsledku toho hospodárnější provoz kotle. Tímto výpočtem bych chtěl také ukázat na důležitost správného měření objemu kyslíku ve spalinách, které se provádí

v referenčním bodě v spalinovodu. Nesprávným určením tohoto bodu můžeme vnášet chybu do výpočtu a tím snižovat účinnost provozovaného zařízení. Samozřejmě tím dochází ke zvyšování nákladů na jeho provoz.

## Literatura

1. RAJNIAK, Ivan. *Tepelnoenergetické a emisné merania*. 1. vyd. Bratislava: Ister Science, 1997, 481 s. ISBN 80-886-8320-3.
2. ČSN 070302. *Přejímací zkoušky parních kotlů*. Praha: Český normalizační institut, 1996.
3. HORÁK, Jiří, František HOPÁK a Kamil KRPEC. TZB-Info. *Stanovení účinnosti kotlů* [online]. 2014 [cit. 2015-01-30]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11107-stanoveni-ucinnosti-kotlu>
4. VÝTISK, Tomáš, Radim JANALÍK a Zdeněk KADLEC. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA V OSTRAVĚ. *Stanovení účinnosti kotle K1.7 Teplárna Tábor, a.s.* Ostrava, 2014
5. VLK. *JEDNOSTUPŇOVÝ PROJEKT PS 704.1 - TS 01*. České Budějovice, 2007.
6. Teplárna Tábor, a.s. *Poslání společnosti* [online]. 2008 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.tta.cz/cz/o-spolecnosti/poslani-spolecnosti>
7. KADLEC, Zdeněk. 2008. *Termomechanika: návody do cvičení*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 97 s. ISBN 978-80-248-1736-1.

## Seznam příloh

**Příloha A:** Tabulka vlastností syté vody a syté páry

**Příloha B:** Ukázka programu pro výpočet účinnosti