



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

POROVNÁNÍ VÝPOČTU ÚČINNOSTI PARNÍHO KOTLE

COMPARASON OF CALCULATION OF STEAM BOILER EFFICIENCY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

bachelor's thesis

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN PŘÍVOZNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MAREK BALÁŠ, PH.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student(ka): Martin Přívozník

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem c.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Porovnání výpočtu účinnosti parního kotle

v anglickém jazyce:

Comparison of calculation of steam boiler efficiency

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je srovnání dvou postupů výpočtu účinnosti kotle podle normy CSN 07 0302 a normy ČSN EN 12 952-15.

Cíle bakalářské práce:

- 1/ Popište postupy podle norem ČSN 07 0302 a ČSN EN 12 952-15.
- 2/ Proved'te porovnávací výpočet na konkrétním zařízení.

Seznam odborné literatury:

Norma ČSN 07 0302 Přejímací zkoušky parních kotlu

Norma ČSN EN 12 952-15 Vodotrubné kotle a pomocná zařízení – část 15:
Přejímací zkoušky parních kotlu

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Baláš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem
akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 20.11.2012

L.S.

doc. Ing. Zdenek Skála, CSc.

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.

Ředitel ústavu

Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářské práce obsahuje porovnávací výpočet nepřímé účinnosti parního kotle. Výpočet je proveden podle dvou norem platných v České republice. V úvodu práce je shrnut popis elektrárny a parního kotle. Následně navazuje teoretický úvod k problematice účinnosti. Cílem této práce je vypočítat nepřímou účinnost parního kotle pro obě normy, popsat odlišnosti obou norem a vzájemně porovnat výsledky výpočtů.

Abstract

This bachelor's thesis contains a comparative calculation of the indirect efficiency of the steam boiler. The calculation will be performed by two existing standards in the Czech Republic. At the beginning is the description of power plant and steam boiler. Following part includes a theoretical introduction to the issue of efficiency. The idea of this work is to identify any differences between the two standards and comparison results of calculation.

Klíčová slova

účinnost, parní kotel, tepelné ztráty, norma, ČSN 07 0302, ČSN EN 12 952-15

Keywords

efficiency, steam boiler, heat losses, standard, ČSN 07 0302, ČSN EN 12 952-15

Bibliografická citace

PŘÍVOZNÍK, M. *Porovnání výpočtu účinnosti parního kotle*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 63 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Baláš, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Porovnání výpočtu účinnosti parního kotle vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing. Marka Baláše, Ph.D. Vycházel jsem ze svých znalostí a odborných konzultací v elektrárně Opatovice a.s. a z použitých pramenů a literatury uvedených v Seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 24. Května 2013

.....
podpis autor

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za připomínky a věcné rady v průběhu vypracovávání. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům společnosti Elektrárny Opatovice a.s. Miroslavu Končickému a Ing. Bruno Fišerovi za poskytnutí důležitých údajů a pochopení významu těchto hodnot. V neposlední řadě chci poděkovat celému ústavu Energetického inženýrství za velkou ochotu a vysokou kvalitu výuky. Poděkování patří i mé rodině a přátelům za neustálou podporu během studia.

V Brně dne 24. května 2013

.....

podpis autora

Obsah

1	Elektrárna Opatovice	13
2	Kotel PG 230	14
2.1	Technické parametry kotle.....	14
2.2	Řez parním kotlem PG 230	15
3	Teoretický úvod k výpočtu nepřímé účinnosti	16
4	Energetická bilance parního kotle	17
4.1	Sestavení energetické bilance	17
5	Vstupní údaje pro výpočet podle normy ČSN 07 0302.....	19
5.1	Rozbor paliva	19
6	Výpočet dle normy ČSN 07 0302 - podpůrné výpočty	20
6.1	Jmenovitý výkon kotle	20
6.2	Minimální objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení	20
6.3	Minimální objem suchých spalin při dokonalém spálení	20
6.4	Minimální objem vody vzniklý ve spalinách při dokonalém spálení.....	21
6.5	Složky stechiometrických objemů pro dokonalé spálení	21
6.5.1	Objem CO ₂	21
6.5.2	Objem N ₂	21
6.5.3	Objem vzniklých částic	21
6.6	Složky stechiometrických objemů ve spalinách pro dokonalé spálení	22
6.6.1	Objem CO ₂	22
6.6.2	Objem SO ₂	22
6.6.3	Objem N ₂	22
6.7	Složky stechiometrických objemů pro nedokonalé spálení.....	22
6.7.1	Objem CO.....	22
6.7.2	Objem O ₂	22
6.8	Parametry spalin při nedokonalém spalování	23
6.9	Výpočet přebytku vzduchu.....	25

6.9.1	Hodnota součinitele přebytku vzduchu za kotlem.....	25
6.10	Skutečný objem spalin v místě odchodu z PK.....	25
6.10.1	Skutečný objem vlhkých spalin	26
6.10.2	Příčemž obsah vodní páry ve spalinách	26
6.10.3	Poměrný obsah vodní páry.....	26
6.11	Výpočet konstanty A_0	26
6.11.1	Výpočet konstanty B_0	27
6.11.2	Výpočet konstanty C_0	27
6.11.3	Výpočet konstanty A_α	27
6.11.4	Výpočet konstanty B_α	28
6.11.5	Výpočet konstanty C_α	28
6.12	Střední měrná tepelná kapacita spalin.....	29
6.12.1	Střední měrná tepelná kapacita spalin pro teplotu 175°C	29
6.12.2	Střední měrná kapacita spalin pro teplotu 20°C	29
6.12.3	Střední integrální měrná tepelná kapacita spalin	29
7	Výpočet hrubé nepřímé účinnosti a tepelných ztrát podle ČSN 07 0302	30
7.1	Účinnost parního kotle η stanovená nepřímou metodou.....	30
7.1.1	Ztráta hořlavinou ve spalinách (chemický nedopal)	30
7.1.2	Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal).....	30
7.1.3	Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová).....	31
7.1.4	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	31
7.1.5	Střední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků	31
7.1.6	Střední měrná tepelná kapacita pro popílek.....	31
7.1.7	Střední měrná tepelná kapacita pro strusku	32
7.1.8	Ztráta sdílením tepla do okolí v závislosti na výkonu kotle	32
7.1.9	Celková účinnost parního kotle stanovená nepřímou	32
8	Vstupní hodnoty pro výpočet podle normy ČSN EN 12 952-15	33
8.1	Rozbor paliva.....	33
9	Výpočet podle normy ČSN EN 12 952-15	34
9.1	Výpočet hmotnostního toku paliva do kotle	34

9.1.1	Celková energie v palivu za hodinu	34
9.1.2	Hmotnostní tok paliva	34
9.1.3	Přepočet hmotnostního toku paliva na $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	34
9.2	Podpůrné výpočty dle ČSN EN 12 952-15	35
9.3	Teoretické minimální množství spalovacího vzduchu	35
9.4	Teoretické množství spalin.....	35
9.4.1	Hmotnostní podíl spalin	35
9.4.2	Objem spalin (STP podmínky)	35
9.5	Teoretické množství CO_2 ve spalinách.....	35
9.6	Obsah vody ve spalinách	36
9.6.1	Podíl vodní páry	36
9.6.2	Podíl vlhkosti ve spalinách.....	36
9.6.3	Celkový obsah vody ve spalinách	36
9.7	Množství suchého vzduchu	36
9.7.1	Množství spalovacího vzduchu	36
9.8	Objem suchých spalin	37
9.9	Celkové množství spalin	37
9.10	Hmotnostní podíl CO_2	37
9.11	Hmotnostní podíl vody.....	37
9.12	Měrné teplo spalin a spalovacího vzduchu.....	37
9.12.1	Podíl vody ve vlhkém vzduchu	37
9.13	Měrné teplo spalin a vzduchu.....	38
9.14	Výpočet měrného tepla pro spaliny a vzduch.....	39
9.14.1	Celkové měrné teplo spalin pro teplotu 175°	39
9.14.2	Celkové měrné teplo spalin	39
9.15	Střední měrné teplo pro vzduch.....	40
9.15.1	Střední měrné teplo suchého vzduchu pro teplotu 25°C	40
9.15.2	Celkové měrné teplo vlhkého vzduchu	40
9.16	Poměr vyhoření paliva.....	40
9.16.1	Množství strusky	41

9.17	Entalpie paliva.....	41
9.18	Entalpie vzduchu.....	41
9.19	Celková výhřevnost paliva.....	41
9.20	Využitelný tepelný výkon.....	41
10	Tepelné ztráty a celková nepřímá účinnost dle ČSN EN 12 952-15	42
10.1	Ztráty citelným teplem spalin (komínová ztráta)	42
10.1.1	Ztráta chemickým nedopalem CO	42
10.1.2	Ztráta v důsledku entalpie a nespálených složek v popelu a popílku	42
10.1.3	Ztráta sáláním a konvekcí (sdílení tepla do okolí).....	43
10.2	Výpočet nepřímé hrubé účinnosti.....	44
11	Výsledky výpočtů a porovnání tepelných ztrát.....	45
11.1	Ztráta hořlavinou ve spalinách (chemický nedopal)	45
11.2	Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích.....	46
11.3	Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta)	47
11.4	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků.....	48
11.5	Ztráta sdílením tepla do okolí.....	49
11.6	Celková účinnost.....	50
12	Závěr	52
13	Seznam použitých zdrojů.....	53
14	Seznam obrázků.....	54
15	Seznam tabulek	54
16	Seznam použitých zkratk	55
17	Seznam příloh	63

Úvod:

Energetika je poměrně konzervativní obor, nové technologie se aplikují pomalu a dává se přednost již osvědčeným a fungujícím technologiím. Nedostatek energie je vážný problém, naštěstí se Česká republika s tímto problémem zatím nepotýká. V České republice je instalovaný výkon přibližně 20 000 MW a špičková spotřeba energie se pohybuje okolo 12 000 MW. Takto vysoký instalovaný výkon nám dovoluje být vývozcem elektrické energie, avšak mnoho elektráren je dnes zastaralých a potřebují rekonstrukci a použití nových a hospodárnějších technologií.

Bez elektrické energie by dnes člověk nedokázal existovat. Téměř veškeré dnešní technologie potřebují ke svému provozu elektrickou energii, která se nejdříve musí „vyrobit“. Zákon zachování energie říká, že energie nemůže vznikat ani zanikat a lze pouze přeměnit jeden druh energie na jiný. Ze zákona zachování energie tedy vyplývá, že je potřeba přeměnit druh energie, který je k dispozici, na energii elektrickou. Jedním z nejstarších způsobů přeměny energie je spalování. Spalováním se uvolňuje energie obsažená v palivu na energii tepelnou a světelnou.

Tato práce je zaměřena na výpočet účinnosti tohoto procesu přeměny energie. Účinnost parního kotle udává, kolik energie dokážeme využít k vytvoření vodní páry a kolik energie při tomto procesu ztratíme. Účinnost také určuje kvalitu daného stroje, čím vyšší účinnost, tím více energie dokážeme využít.

V následujících kapitolách bude popsán výpočet účinnosti parního kotle na hnědé uhlí podle dvou norem platných v České republice. Jedná se o normy ČSN 07 0302 a ČSN EN 12 952-15. Závěrem práce bude porovnání výsledků.

1 Elektrárna Opatovice

Elektrárna se nachází jižně od obce Opatovice nad Labem a zároveň v polovině cesty mezi Pardubicemi a Hradcem Králové. Svorkový výkon elektrárny odpovídá 363 MW_e a tepelný výkon odpovídá přibližně 698 MW_t. K výrobě elektrické energie je použito celkem šest parních turbín - tři kondenzační, dvě odběrové a jedna protitlaková turbína. Elektrárna byla postavena v letech 1959-1960. Spaluje se v ní mostecké hnědé uhlí a roční spotřeba se pohybuje okolo 1,9 milionu tun uhlí. Odsíření spalin je v provozu od roku 1998. K elektrárně je připojena síť horkovodních potrubí o celkové délce 305 km. Do této sítě jsou připojeny obce Pardubice, Hradec Králové, Chrudim, Lázně Bohdaneč, Opatovice nad Labem, Čeperka a Rybitví. Výroba elektrické energie v roce 2010 činila 2 116 GWh. Tyto informace byly poskytnuty společností Elektrárny Opatovice a.s. z jejich interní dokumentace.



Obrázek 1- foto Elektrárny Opatovice [4]

2 Kotel PG 230

V elektrárně Elektrárny Opatovice a.s. je provozováno šest parních kotlů napojených na společnou vysokotlakou parní sběrnou 9,6 MPa. To elektrárně dovoluje použití libovolného kotle a libovolné parní turbíny. Jedná se o kotle PG 230. P – parní, G - generátor a číslo 230 značí množství páry hodinově v tunách. Dodavatelem těchto kotlů byla Vítkovická kotlárna.

Kotel PG 230 je vodotrubný bubnový parní kotel se čtyřmi okruhy s mlýny a granulačním ohništěm s přirozeným oběhem vody. V kotli se spaluje hnědé uhlí. Vlastní kotel se skládá ze spalovací komory, jejíž stěny tvoří systém várníc a v níž jsou umístěny čtyři přehříváky páry. Další částí kotle je zadní tah, tedy dodatkové plochy, které obsahují spalinové ohříváky vzduchu tzv. LUVO I., LUVO II. a ohříváky napájecí vody tzv. EKO I. a EKO II. Spalovací vzduch je dopravován pomocí dvou vzduchových ventilátorů. Spaliny jsou odtahovány pomocí dvou kouřových ventilátorů při udržování mírného podtlaku ve spalovací komoře. Ke kotli taktéž náleží dva zásobníky uhlí s celkovou kapacitou 700 tun. Pro odlučování popílku jsou za kotlem instalovány mechanické a elektrostatické odlučovače popílku.

2.1 Technické parametry kotle

Jmenovitý maximální výkon	250 t / h
Jmenovitý maximální tepelný výkon	178 MWt
Jmenovitá teplota přehřáté páry	530 °C
Jmenovitý tlak přehřáté páry	9,51 Mpa
Teplota napájecí vody s VTO	208 °C
Teplota napájecí vody bez VTO	145 °C
Jmenovitá teplota spal. vzduchu	410 °C
Konstrukční přetlak	11,77 MPa
Zkušební přetlak	15,3 Mpa
Vodní obsah při norm. provozu	60 m ³
Vodní obsah pro tlakovou zkoušku	99 m ³

3 Teoretický úvod k výpočtu nepřímé účinnosti

Nepřímým způsobem se účinnost stanoví obecně jako poměr rozdílu veškeré energie přivedené z vnějšku do parního kotle a úhrnu ztrát energie v parním kotli k příkonu, tj. veškeré energii přivedené z vnějšku do parního kotle nebo jako rozdíl jedna minus poměr ztrát k příkonu.

Stanovení účinnosti nepřímou metodou, tedy vyjádřením tepelných ztrát kotle, se využívá především u kotlů spalujících tuhá paliva na roštu, ve vzosu či ve fluidní vrstvě. [1]

Rozeznáváme pět ztrát kotle: [1]

1. Ztráta hořlavinou ve spalínách
2. Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
3. Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta)
4. Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
5. Ztráta sdílením tepla do okolí v závislosti na výkonu kotle

Ztráta hořlavinou ve spalínách - ζ_{CO} :

Jinými slovy se dá popsat jako ztráta chemickým nedopalem. Ztráta se projevuje, pokud ve spalínách naměříme CO, H₂ a CH_x. Pokud naměříme tyto prvky, znamená to, že v kotli probíhá částečně nedokonalé spalování. [3]

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích - ζ_C :

Taktéž nazývána ztráta mechanickým nedopalem. Ztráta je způsobena obsahem uhlíku v nespálených tuhých zbytcích, které odcházejí ze spalovací komory. Jako tuhé zbytky rozeznáváme strusku, popílek a škváru. [3]

Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová) - ζ_k :

Ztráta fyzickým teplem spalin, obvykle se označuje jako komínová. Tato ztráta je dána tepelnou energií odcházející v plynných spalínách. Tato ztráta bývá největší. Rozhodující faktor této ztráty je teplota spalin a součinitel přebytku vzduchu α_k , který souvisí s těsností kotle a přísáváním tzv. falešného vzduchu. [3]

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků - ζ_f :

Tato ztráta spočívá v nevyužitém teple, které odchází v tuhých zbytcích. Při výpočtu se uvažuje teplota škváry 600 °C a teplota strusky 1 500 °C. Teplota popílku se rovná teplotě spalin za kotlem. [3]

Ztráta sdílením tepla do okolí - ζ_{sv} :

Zohledňuje množství tepla, které uniká pláštěm do okolí. Závisí na kvalitě stěn izolace, způsobu oplechování, velikost povrchu a výkonu kotle. [3]

4 Energetická bilance parního kotle

4.1 Sestavení energetické bilance

Nejdůležitější podmínkou při výpočtu účinnosti je správné vymezení kotelní soustavy. Hranice soustavy musí splňovat určité předpoklady, aby bylo možné správně a jednoznačně měřit všechny hmotnostní a energetické toky, které vstupují a vystupují ze soustavy. [1]

Úplnou soustavu tvoří [1]:

- a) vlastní parní kotel, tj. soubor výměníků tepla, v nichž se:
 - napájecí voda dohřívá a odpařuje, vyrobená pára přehřívá, popřípadě také částečně expandovaná a ochlazená pára znovu přehřívá,
 - ohřívá (případně suší) spalované palivo,
 - ohřívá spalovací vzduch,včetně zařízení potřebná pro zajištění pracovních látek v těchto výměnících (oběhová čerpadla u PK).
- b) pomocné zařízení, tj. soubor všech zařízení důležitých pro provoz PK, ale které nejsou součástí vlastního PK. Tyto zařízení zajišťují:
 - dopravu a úpravu použitých paliv (dopravníky a podavače uhlí, mlýny na uhlí s příslušnými třídíči, odlučovači a ventilátory, čerpadla kapalných paliv a podobně),
 - dopravu spalovacího vzduchu (vzduchové ventilátory),
 - dopravu spalin (spalinové a recirkulační ventilátory),
 - dopravu a úpravu tuhých zbytků (drtiče, podavače a dopravníky škváry, strusky a popílku, výměníky tepla pro chlazení tuhých zbytků a podobně),
 - čištění spalin (odlučovače popílku, odsiřovací zařízení, denox a podobně).

Do energetické bilance zahrnujeme všechny tyto následující parametry:

1. Příkon [1]

- 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 stálého chodu parního kotle.

2. Ztráty [1]

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

3. Vstup pracovní látky do parního kotle [1]

- teplo 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 mezipřehříváku páry.

4. Výstup pracovní látky z parního kotle [1]

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

5 Vstupní údaje pro výpočet podle normy ČSN 07 0302

Následující vstupní údaje a rozbor paliva byly poskytnuty společností Elektrárny Opatovice a.s.

Pára

Teplota	530	°C
Tlak	9,5	MPa
Množství	230	t.h ⁻¹
Entalpie	3 456	kJ.kg ⁻¹

Napájecí voda

Teplota vody	195	°C
Tlak vody	14,0	MPa
Entalpie	835,6	kJ.kg ⁻¹

Spaliny

Teplota	175	°C
O ₂	6,5	%
SO ₂	1 200	ppm
CO	80	ppm

Tuhé zbytky

Nedopal - popel	1,55	%
Nedopal - popílek	0,90	%
Zachycení popela	15,0	%
Zachycení popílku	85,0	%
Teplota popela	600	°C

Další údaje

Jmenovitý výkon kotle	167,4	MW
Srovnávací teplota vzduchu	20	°C
Naměřená teplota vzduchu	15	°C

5.1 Rozbor paliva

C ^r	=	37,57	% hm	N ^r	=	0,57	% hm
H ^r	=	3,07	% hm	W ^r	=	27	% hm
S ^r	=	1,16	% hm	A ^r	=	21	% hm
O ^r	=	9,65	% hm	Q _i	=	14 500	kJ.kg ⁻¹

6 Výpočet dle normy ČSN 07 0302 - podpůrné výpočty

Sled výpočtů je dle normy ČSN 07 0302. Tyto výpočty jsou důležité k určení hrubé nepřímé účinnosti a tepelných ztrát kotle.

6.1 Jmenovitý výkon kotle

Je to výkon kotle, který se vypočte z množství vyrobené páry, z entalpie napájecí vody a entalpie vyrobené páry.

$$\dot{Q}_N = \dot{m}_{SST} \cdot (h_{SST} - h_{FW}) \quad (1.1)$$

$$\dot{Q}_N = \frac{230 \cdot (3456 - 835,6)}{3600 [s]} \quad (1.2)$$

$$\dot{Q}_N = 167,4 [MW]$$

6.2 Minimální objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení

$$V_{vs\min} = \frac{22,39}{0,2095} \cdot \left[\frac{C^r}{12,011} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,066} - \frac{O^r}{32,00} \right] \quad (2.1)$$

$$V_{vs\min} = \frac{22,39}{0,2095} \cdot \left[\frac{0,3757}{12,011} + \frac{0,0307}{4,032} + \frac{0,0116}{32,066} - \frac{0,0965}{32,00} \right] = 3,873 [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (2.2)$$

6.3 Minimální objem suchých spalin při dokonalém spálení

$$V_{ss\min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r + \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r + \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r + 0,7905 \cdot V_{vs\min} \quad (3.1)$$

$$V_{ss\min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,3757 + \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,0307 + \frac{22,40}{28,016} \cdot 0,0116 + 0,7905 \cdot 3,873 = 1,013 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (3.2)$$

6.4 Minimální objem vody vzniklý ve spalinách při dokonalém spálení

$$V_{sH_2O\min} = 11,1111 \cdot H^r + 1,2433 \cdot W_t + (v-1) \cdot V_{vs\min} \quad (4.1)$$

$$V_{sH_2O\min} = 11,1111 \cdot 0,0307 + 1,2433 \cdot 0,27 + (1,013-1) \cdot V_{vs\min} = 0,727 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (4.2)$$

Přítom

$$v = 1 + \frac{\varphi_v \cdot P''}{p_b - \varphi_v \cdot P''} \quad (4.3)$$

$$v = 1 + \frac{0,55 \cdot 0,0023}{0,098 - 0,55 \cdot 0,0023} = 1,013 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (4.4)$$

6.5 Složky stechiometrických objemů pro dokonalé spálení

6.5.1 Objem CO₂

$$V_{vCO_2} = 0,0003 \cdot V_{vs\min} \quad (5.1)$$

$$V_{vCO_2} = 0,0003 \cdot 3,873 = 0,00116 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (5.2)$$

6.5.2 Objem N₂

$$V_{vN_2} = 0,7809 \cdot V_{vs\min} \quad (5.3)$$

$$V_{vN_2} = 0,7809 \cdot 3,873 = 3,0245 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (5.4)$$

6.5.3 Objem vzniklých částic

$$V_{vAr} = 0,0093 \cdot V_{vs\min} \quad (5.5)$$

$$V_{vAr} = 0,0093 \cdot 3,8730 = 0,0360 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (5.6)$$

6.6 Složky stechiometrických objemů ve spalínách pro dokonalé spálení

6.6.1 Objem CO₂

$$V_{sCO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r \quad (6.1)$$

$$V_{sCO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,3757 = 0,6963 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (6.2)$$

6.6.2 Objem SO₂

$$V_{sSO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r \quad (6.3)$$

$$V_{sSO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,0116 = 0,0079 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (6.4)$$

6.6.3 Objem N₂

$$V_{sN_2} = \frac{22,40}{28,016} \cdot N^r \quad (6.5)$$

$$V_{sN_2} = \frac{22,40}{28,016} \cdot 0,0307 = 0,0046 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (6.6)$$

6.7 Složky stechiometrických objemů pro nedokonalé spálení

6.7.1 Objem CO

$$V_{sCO} = \frac{22,41}{12,011} \cdot C^r \quad (7.1)$$

$$V_{sCO} = \frac{22,41}{12,011} \cdot 0,3757 = 0,7010 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (7.2)$$

6.7.2 Objem O₂

$$V_{O_2}(C) = \frac{22,39}{12,011} \cdot C^r \quad (7.3)$$

$$V_{O_2}(C) = \frac{22,39}{12,011} \cdot 0,3757 = 0,7004 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (7.4)$$

6.8 Parametry spalin při nedokonalém spalování

$$b = \frac{A^r}{C^r} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot X_i}{1 - C_i} \quad (8.1)$$

$$b = \frac{0,21}{0,3757} \cdot \left(\left(\frac{C_1 \cdot X_1}{1 - C_1} \right) + \left(\frac{C_2 \cdot X_2}{1 - C_2} \right) \right) \quad (8.2)$$

$$b = \frac{0,21}{0,3757} \cdot \left(\left(\frac{0,009 \cdot 0,85}{1 - 0,009} \right) + \left(\frac{0,0155 \cdot 0,15}{1 - 0,0155} \right) \right) = 0,0056 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (8.3)$$

$$a_1 = \frac{R7 \cdot \omega_{co}}{R1 \cdot \omega_{o_2} + R2 \cdot \omega_{co} + R3} \quad (8.4)$$

$$a_1 = \frac{3,0041 \cdot 8 \cdot 10^{-5}}{-2,7149 \cdot 0,065 + 1,0683 \cdot 8 \cdot 10^{-5} + 0,5688} = 0,0006 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (8.5)$$

Konstanty R1 až R7 lze vyjádřit pomocí vztahů

$$R1 = -V_{vs\min} \cdot V_{sCO}$$

$$R1 = -3,873 \cdot 0,7010 = -2,7419 [-]$$

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

$$R2 = 3,873 \cdot (0,5 \cdot 0,7004 - 0,2095 \cdot 0,3549) = 1,0683 [-]$$

$$R3 = 0,2095 \cdot V_{vs\min} \cdot V_{sCO}$$

$$R3 = 0,2095 \cdot 3,873 \cdot 0,7010 = 0,5688 [-]$$

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

$$R4 = 0,7010 \cdot (-0,1026 + 0,0056 \cdot 0,0041) = -0,0719 [-]$$

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

$$R5 = 0,3549 \cdot (0,0056 \cdot 0,7004 - 0,2095 \cdot 3,873) -$$

$$-0,5 \cdot 0,7004 \cdot (-0,1026 + 0,0056 \cdot 0,0041) = -0,2506 [-]$$

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

$$R6 = 0,7010 \cdot (0,2095 \cdot 3,873 - 0,0056 \cdot 0,7004) = 0,5660 [-]$$

(8.6)

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

$$R7 = 3,873 \cdot \left(0,2095 \cdot \left(\frac{-0,1026 + 0,0056 \cdot 0,0041 \cdot 3,873}{0,0056 \cdot 0,7004} \right) \right) =$$

$$= 3,0441 [-]$$

Příčemž platí

$$V_1 = V_{ss\min} - V_{vs\min} \tag{8.7}$$

$$V_1 = 3,7704 - 3,873 = -0,1027 [m^3 \cdot kg^{-1}] \tag{8.8}$$

$$V_2 = V_{sCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{sCO_2} \tag{8.9}$$

$$V_2 = 0,7010 + 0,5 \cdot 0,7004 - 0,6963 = 0,3549 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (8.10)$$

$$V_3 = V_{O_2}(C) - V_{sCO_2} \quad (8.11)$$

$$V_3 = 0,70004 - 0,6963 = 0,0041 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (8.12)$$

6.9 Výpočet přebytku vzduchu

Aby nedošlo k nedokonalému spalování je potřeba spalovat s určitým přebytkem vzduchu.

$$\alpha = \frac{R4 \cdot \omega_{O_2} + R5 \cdot \omega_{CO} + R6}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3} \quad (9.1)$$

$$\alpha = \frac{-0,7019 \cdot 0,04 - 0,2506 \cdot 8 \cdot 10^{-5} + 0,5660}{-2,7149 \cdot 0,04 + 1,0683 \cdot 8 \cdot 10^{-5} + 0,5688} = 1,2235 [-] \quad (9.2)$$

6.9.1 Hodnota součinitele přebytku vzduchu za kotlem

$$\alpha_k = \frac{(R7 - a_1 \cdot R2) \cdot (R4 \cdot (\omega_{O_2})_k + R6) + a_1 \cdot R5 \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R3)}{(R7 - a_1 \cdot R2) \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R5) + a_1 \cdot R2 \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R3)} \quad (9.3)$$

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \frac{(3,0441 - 0,0006 \cdot 1,0383) \cdot (-0,0719 \cdot 0,0650 + 0,5660) + \\ &+ 0,006 \cdot (-0,2506) \cdot (-2,7149 \cdot 0,0650 + 0,5688)}{(3,0441 - 0,0006 \cdot 1,0683) \cdot (-2,7149 \cdot 0,0650 - 0,2506) + \\ &+ 0,006 \cdot 1,0683 \cdot (-2,7149 \cdot 0,0650 + 0,5688)} = \\ &= 1,3146 [-] \end{aligned} \quad (9.4)$$

6.10 Skutečný objem spalin v místě odchodu z PK

$$V_{ss} = V_{ss\min} + a_1 \cdot (V_{sCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{sCO_2}) + \\ + b \cdot (V_{O_2}(C) - V_{sCO_2}) + (\alpha_k - 1) \cdot V_{vs\min} \quad (10.1)$$

$$V_{ss} = 3,7704 + 0,0006 \cdot (0,7010 + 0,5 \cdot 0,7004 - 0,6963) + \\ + 0,0056 \cdot (0,7004 - 0,6963) + (1,3146 - 1) \cdot 3,873 = 4,9891 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (10.2)$$

6.10.1 Skutečný objem vlhkých spalín

$$V_s = V_{ss} + V_{sH_2O} \quad (10.3)$$

$$V_s = 4,989 + 0,7434 = 5,7325 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (10.4)$$

6.10.2 Přičemž obsah vodní páry ve spalínách

$$V_{sH_2O} = V_{sH_2Omin} + (\alpha_k - 1) \cdot (v - 1) \cdot V_{vsmin} \quad (10.5)$$

$$V_{sH_2O} = 0,7274 + (1,3146 - 1) \cdot (1,0131 - 1) \cdot 3,873 = 0,7434 \left[m^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (10.6)$$

6.10.3 Poměrný obsah vodní páry

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{sH_2O}}{V_s} \quad (10.7)$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{0,7434}{5,7325} = 0,1297 [-] \quad (10.8)$$

Pro známé složená spalín je možné dále jednotlivé konstanty rozepsat:

6.11 Výpočet konstanty A_0

$$\begin{aligned} A_0 = & \left[(1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right] \cdot A1 + V_{sSO_2} \cdot A2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot A3 + \\ & + V_{vAr} \cdot A4 + V_{sH_2O} \cdot A5 + A' \cdot (1 - X_{sk}) \cdot A7 - V_{vsmin} \cdot (A6 + (v - 1) \cdot A5) + \\ & + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2} \cdot C8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot A9 \end{aligned} \quad (11.1)$$

$$\begin{aligned} A_0 = & \left[(1 - 0,0006 - 0,0056) \cdot 0,6963 + 0,0012 \right] \cdot 2,5903 \cdot 10^{-4} + \\ & + 0,0079 \cdot 1,7912 \cdot 10^{-4} + (0,0046 + 3,0245) \cdot 1,1366 \cdot 10^{-4} + 0,0360 \cdot \\ & \cdot 1,0336 \cdot 10^{-4} + 0,7434 \cdot 2,5071 \cdot 10^{-4} + 0,21 \cdot (1 - 0,15) \cdot 3,1338 \cdot 10^{-4} - \\ & - 3,873 \cdot (1,2065 \cdot 10^{-4} + (1,013 - 1) \cdot 2,5071 \cdot 10^{-4}) + \\ & + (0,5 \cdot 0,0006 + 0,0056) \cdot 0,7004 \cdot 1,0688 \cdot 10^{-4} + \\ & + 0,0006 \cdot 0,7010 \cdot 1,1490 \cdot 10^{-4} = 0,0004 [-] \end{aligned} \quad (11.2)$$

6.11.1 Výpočet konstanty B_0

$$B_0 = \left[(1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right] \cdot B1 + V_{sSO_2} \cdot B2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot B3 + \\ + V_{vAr} \cdot B4 + V_{sH_2O} \cdot B5 + A' \cdot (1 - X_{sk}) \cdot B7 - V_{vsmin} \cdot (B6 + (v - 1) \cdot B5) + \\ + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2} (C) \cdot B8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot B9 \quad (11.3)$$

$$B_0 = \left[(1 - 0,0006 - 0,0056) \cdot 0,6963 + 0,0012 \right] \cdot 2,0121 + \\ + 0,0079 \cdot 2,1566 + (0,0046 + 3,0245) \cdot 1,2827 + 0,0360 \cdot \\ \cdot 0,9281 + 0,7434 \cdot 1,5643 + 0,21 \cdot (1 - 0,15) \cdot 0,6757 - \\ - 3,873 \cdot (1,2908 + (1,013 - 1) \cdot 1,4643) + \\ + (0,5 \cdot 0,0006 + 0,0056) \cdot 0,7004 \cdot 1,3831 + \\ + 0,0006 \cdot 0,7010 \cdot 1,2993 = 2,9571 [-] \quad (11.4)$$

6.11.2 Výpočet konstanty C_0

$$C_0 = \left[(1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right] \cdot C1 + V_{sSO_2} \cdot C2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot C3 + \\ + V_{vAr} \cdot C4 + V_{sH_2O} \cdot C5 + A' \cdot (1 - X_{sk}) \cdot C7 - V_{vsmin} \cdot (C6 + (v - 1) \cdot C5) + \\ + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2} (C) \cdot C8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot C9 \quad (11.5)$$

$$C_0 = \left[(1 - 0,0006 - 0,0056) \cdot 0,6963 + 0,0012 \right] \cdot (-47,7837) + \\ + 0,0079 \cdot (-43,4667) + (0,0046 + 3,0245) \cdot (-0,0391) + 0,0360 \cdot \\ \cdot (0,3719) + 0,7434 \cdot (6,6196) + 0,21 \cdot (1 - 0,15) \cdot (2,7078) - \\ - 3,873 \cdot ((-1,6503) + (1,013 - 1) \cdot (6,6196)) + \\ + (0,5 \cdot 0,0006 + 0,0056) \cdot 0,7004 \cdot (-13,6304) + \\ + 0,0006 \cdot 0,7010 \cdot (-3,3038) = -52,0856 [-] \quad (11.6)$$

6.11.3 Výpočet konstanty A_α

$$A_\alpha = V_{vsmin} \cdot (A6 + (v - 1) \cdot A5) \quad (11.7)$$

$$A_\alpha = 3,873 \cdot (1,2065 \cdot 10^{-4} + (1,0131 - 1) \cdot 2,5071 \cdot 10^{-4}) = 0,0005 [-] \quad (11.8)$$

6.11.4 Výpočet konstanty B_α

$$B_\alpha = V_{vs\min} \cdot (B6 + (v-1) \cdot B5) \quad (11.9)$$

$$B_\alpha = 3,873 \cdot (1,2908 + (1,0131-1) \cdot 1,4643) = 5,0734 [-] \quad (11.10)$$

6.11.5 Výpočet konstanty C_α

$$C_\alpha = V_{vs\min} \cdot (C6 + (v-1) \cdot C5) \quad (11.11)$$

$$C_\alpha = 3,873 \cdot ((-1,6503) + (1,0131-1) \cdot 6,6196) = -59,4955 [-] \quad (11.12)$$

Přičemž konstanty A,B,C lze v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu α vyjádřit:

$$A = A_0 + \alpha \cdot A_\alpha$$

$$A = 0,0004 + 1,2235 \cdot 0,0005 = 0,001 [-]$$

$$B = B_0 + \alpha \cdot B_\alpha$$

$$B = 2,9571 + 1,2235 \cdot 5,0735 = 9,1642 [-] \quad (11.13)$$

$$C = C_0 + \alpha \cdot C_\alpha$$

$$C = -52,0856 + 1,2235 \cdot (-6,0565) = -59,4955 [-]$$

Tabulka 1 - Koeficienty A (I), B (I), C (I) složek spalín a vzduchu [1]

I	Složka	A (I)	B (I)	C (I)
1	CO ₂	2,5903118 x 10 ⁻⁴	2,0121359	-47,7836646
2	SO ₂	1,7911607 x 10 ⁻⁴	2,1566298	-43,46660944
3	N ₂	1,1365887 x 10 ⁻⁴	1,2827182	-0,0390503
4	Ar	1,033607 x 10 ⁻⁴	0,9281643	+0,3719149
5	H ₂ O	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	O ₂	1,0687881 x 10 ⁻⁴	1,3830632	-13,6303648
9	CO	1,1490349 x 10 ⁻⁴	1,2992527	-3,3037630
10	CH ₄	2,5903118 x 10 ⁻⁴	2,0121359	-47,7836646

6.12 Střední měrná tepelná kapacita spalin

$$\bar{c}_s(t) = \frac{\left(A \cdot t + B + \frac{C}{t}\right)}{V_s} \quad (12.1)$$

6.12.1 Střední měrná tepelná kapacita spalin pro teplotu 175°C

$$\bar{c}_s(t_k) = \frac{\left(0,001 \cdot 175 + 9,1642 + \frac{-59,4955}{175}\right)}{5,7325} = 1,57 \left[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right] \quad (12.2)$$

6.12.2 Střední měrná kapacita spalin pro teplotu 20°C

$$\bar{c}_s(t_0) = \frac{\left(A \cdot t_0 + B + \frac{C}{t_0}\right)}{V_s} \quad (12.4)$$

$$\bar{c}_s(t_0) = \frac{\left(0,001 \cdot 20 + 9,1642 + \frac{-59,4955}{20}\right)}{5,7325} = 1,0832 \left[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right] \quad (12.5)$$

6.12.3 Střední integrální měrná tepelná kapacita spalin

$$\bar{c}_s = \frac{\bar{c}_s(t_k) \cdot t_k - \bar{c}_s(t_0) \cdot t_0}{t_k - t_0} \quad (12.6)$$

$$\bar{c}_s = \frac{1,5700 - 1,0832}{175 - 20} = 1,6329 \left[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right] \quad (12.7)$$

7 Výpočet hrubé nepřímé účinnosti a tepelných ztrát podle ČSN 07 0302

Tato krátká kapitola se bude zabývat konkrétním výpočtem jednotlivých ztrát a celkové hrubé nepřímé účinnosti.

7.1 Účinnost parního kotle η stanovená nepřímou metodou

$$\eta = 1 - \xi_{CO} - \xi_C - \xi_k - \xi_f - \xi_{sv} - \xi_{ch} \quad (13.1)$$

kde ξ_{CO} je ztráta hořlavinou ve spalínách,

ξ_C - ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích,

ξ_k - ztráta fyzickým teplem spalín (komínová),

ξ_f - ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků,

ξ_{sv} - ztráta sdílením tepla do okolí.

7.1.1 Ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal) se vypočte z rovnice

$$\xi_{CO} = \frac{12\,640 \cdot a_1 \cdot V_{sCO}}{Q_1} \quad (13.2)$$

$$\xi_{CO} = \frac{12\,640 \cdot 0,0006 \cdot 0,7010}{14\,500} = 0,0004 [-] \quad (13.3)$$

7.1.2 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)

se vypočte z rovnice

$$\xi_C = \frac{b \cdot C^r \cdot 32\,600}{Q_1} \quad (13.4)$$

$$\xi_C = \frac{0,0056 \cdot 0,3757 \cdot 32\,600}{14\,500} = 0,0048 [-] \quad (13.5)$$

7.1.3 Ztráta fyzickým teplem spalín (komínová) se vypočte z rovnice

$$\xi_k = \frac{V_s \cdot \bar{c}_s \cdot (t_k - t_0)}{Q_1} \quad (13.6)$$

$$\xi_k = \frac{5,7325 \cdot 1,6329 \cdot (175 - 20)}{14\,500} = 0,1001 [-] \quad (13.7)$$

7.1.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků se vypočítává z rovnice

$$\xi_f = \frac{A^r \left(\sum \frac{X_i \cdot \bar{c}_{si} \cdot (t_i - t_0)}{1 - C_i} \right)}{Q_1} \quad (13.8)$$

$$\xi_f = \frac{A^r \cdot \left(\frac{X_1 \cdot \bar{c}_{s1} \cdot (t_k - t_0)}{1 - C_1} + \frac{X_2 \cdot \bar{c}_{s2} \cdot (t_p - t_0)}{1 - C_2} \right)}{Q_1} \quad (13.9)$$

$$\xi_f = \frac{0,21 \cdot \left(\frac{0,85 \cdot 0,7998 \cdot (175 - 20)}{1 - 0,009} + \frac{0,15 \cdot 1,0132 \cdot (600 - 20)}{1 - 0,0155} \right)}{14\,500} = \quad (13.10)$$
$$= 0,0028 [-]$$

7.1.5 Střední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků

$$\bar{c}_{si} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_i \quad (13.11)$$

7.1.6 Střední měrná tepelná kapacita pro popílek

$$\bar{c}_{s1} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_k \quad (13.12)$$

$$\bar{c}_{s1} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 175 = 0,7999 \left[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right] \quad (13.13)$$

7.1.7 Střední měrná tepelná kapacita pro strusku

$$\bar{c}_{s2} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_p \quad (13.14)$$

$$\bar{c}_{s2} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 600 = 1,0132 \left[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right] \quad (13.15)$$

7.1.8 Ztráta sdílením tepla do okolí v závislosti na výkonu kotle

$$\xi_{sv} = \xi_{svj} \cdot \frac{\dot{Q}_{vyvj}}{\dot{Q}_{vyr}} \quad (13.16)$$

$$\xi_{sv} = 0,0057 \cdot \frac{178}{167,41} = 0,006 [-] \quad (13.17)$$

kde

$$\xi_{svj} = k_1 \cdot \dot{Q}_{vyvj}^{-0,35} \cdot 10^{-2} \quad (13.18)$$

$$\xi_{svj} = 3,5 \cdot 178^{-0,35} \cdot 10^{-2} = 0,0057 [-] \quad (13.19)$$

Hodnota konstanty k_1 pro hnědé uhlí je 3,5.

7.1.9 Celková účinnost parního kotle stanovená nepřímou

$$\eta = 1 - \xi_{CO} - \xi_C - \xi_k - \xi_f - \xi_{sv} - \xi_{ch} \quad (13.20)$$

$$\eta = 1 - 0,0004 - 0,0046 - 0,1001 - 0,0028 - 0,0057 \quad (13.21)$$

$$\eta = 0,8859 \rightarrow 88,59 \% \quad [1]$$

8 Vstupní hodnoty pro výpočet podle normy ČSN EN 12 952-15

Vstupní údaje byly poskytnuty společností Elektrárny Opatovice a.s.

Pára

Teplota	530	°C
Tlak	9,5	MPa
Množství	230	t.h ⁻¹
Entalpie	3 456	kJ.kg ⁻¹

Napájecí voda

Teplota vody	195	°C
Tlak vody	14,0	MPa
Entalpie	835,6	kJ.kg ⁻¹

Spaliny

Teplota	175	°C
O ₂	6,5	%
SO ₂	1 200	ppm
CO	80	ppm

Tuhé zbytky

Nedopal - popel	1,55	%
Nedopal - popílek	0,90	%
Zachycení popela	15,0	%
Zachycení popílku	85,0	%
Teplota popela	600	°C

Další údaje

Jmenovitý výkon kotle	167,4	MW
Ztrátový výkon kotle	1,9	MW
Srovnávací teplota vzduchu	25	°C
Naměřená teplota vzduchu	15	°C
Měrné teplo popílku	0,84	kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Měrné teplo strusky	1,26	kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹

8.1 Rozbor paliva

γ_c	=	37,57	% hm	γ_n	=	0,57	% hm
γ_H	=	3,07	% hm	γ_{H_2O}	=	27	% hm
γ_s	=	1,16	% hm	γ_{Ash}	=	21	% hm
γ_o	=	9,65	% hm	H_N	=	14 500	kJ.kg ⁻¹

9 Výpočet podle normy ČSN EN 12 952-15

9.1 Výpočet hmotnostního toku paliva do kotle

Následující výpočet hmotnostního toku paliva není součástí normy ČSN EN 12 952-15. Tento údaj je nezbytný pro výpočet celkové účinnosti. Společnost Elektrárny Opatovice a.s. poskytla hodnota přímé účinnosti, ze které se pomocí vzorců poskytnutých opět společností Elektrárny Opatovice a.s. vypočte tok paliva v $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$m_{pal} = \frac{1}{\eta} \quad (14.1)$$

$$m_{pal} = \frac{1}{0,8734} = 1,145 [-] \quad (14.2)$$

9.1.1 Celková energie v palivu za hodinu

$$M_{pal} = P \cdot m_{pal} \cdot 3,6 \quad (14.3)$$

$$M_{pal} = 178 \cdot 145 \cdot 3,6 = 733,7 [GJ \cdot h^{-1}] \quad (14.4)$$

9.1.2 Hmotnostní tok paliva

$$\dot{m}_F = \frac{M_{pal}}{H_n} \quad (14.5)$$

$$\dot{m}_F = \frac{733,7}{14,5} = 50,6 [t \cdot h^{-1}] \quad (14.6)$$

9.1.3 Přepočet hmotnostního toku paliva na $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$

$$\dot{m}_F = \frac{50,6}{3,6} = 14,06 [kg \cdot s^{-1}] \quad (14.7)$$

9.2 Podpůrné výpočty dle ČSN EN 12 952-15

Následující sled výpočtů je podle normy ČSN EN 12 952-15. Jsou to podpůrné výpočty k určení tepelných ztrát a nepřímé účinnosti.

9.3 Teoretické minimální množství spalovacího vzduchu

$$\mu_{Aod} = 11,5122 \cdot \gamma_C + 34,2974 \cdot \gamma_H + 4,3129 \cdot \gamma_S - 4,3212 \cdot \gamma_O \quad (16.1)$$

$$\begin{aligned} \mu_{Aod} &= 11,5122 \cdot 0,3757 + 34,2974 \cdot 0,0307 + \\ &+ 4,3129 \cdot 0,0116 - 4,3212 \cdot 0,0965 = 5,0111 \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \end{aligned} \quad (16.2)$$

9.4 Teoretické množství spalin

9.4.1 Hmotnostní podíl spalin

$$\mu_{God} = 12,5122 \cdot \gamma_C + 26,3604 \cdot \gamma_H + 5,3129 \cdot \gamma_S - 3,3212 \cdot \gamma_O + 1,0 \cdot \gamma_N \quad (17.1)$$

$$\begin{aligned} \mu_{God} &= 12,5122 \cdot 0,3757 + 26,3604 \cdot 0,0307 + \\ &+ 5,3129 \cdot 0,0116 - 3,3212 \cdot 0,0965 + 1,0 \cdot 0,0057 = 5,2569 \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \end{aligned} \quad (17.2)$$

9.4.2 Objem spalin (STP podmínky)

$$V_{God} = 8,8930 \cdot \gamma_C + 20,9724 \cdot \gamma_H + 3,3190 \cdot \gamma_S - 2,6424 \cdot \gamma_O + 0,7997 \cdot \gamma_N \quad (17.3)$$

$$\begin{aligned} V_{God} &= 8,8930 \cdot 0,3757 + 20,9724 \cdot 0,0307 + \\ &+ 3,3190 \cdot 0,0116 - 2,6424 \cdot 0,0965 + 0,7997 \cdot \gamma_N = 3,773 \left[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \end{aligned} \quad (17.4)$$

9.5 Teoretické množství CO₂ ve spalinách

$$\mu_{CO_2o} = 3,6699 \cdot \gamma_C + 0,0173 \cdot \gamma_H + 0,0022 \cdot \gamma_S - 0,0022 \cdot \gamma_O \quad (18.1)$$

$$\begin{aligned} \mu_{CO_2o} &= 3,6699 \cdot 0,3557 + 0,0173 \cdot 0,0307 + \\ &+ 0,0022 \cdot 0,0116 - 0,0022 \cdot 0,0965 = 1,5155 \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \end{aligned} \quad (18.2)$$

$$\mu_{CO_2} = \mu_{CO_2o} + \rho_{nAd} \cdot V_{God} \cdot \frac{\gamma_{O_2d}}{\gamma_{O_2Ad} - \gamma_{O_2d}} \quad (18.3)$$

$$\mu_{CO_2} = 1,3791 + 1,293 \cdot 3,773 \cdot \frac{0,06}{0,20938 - 0,06} = 3,3386 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (18.4)$$

9.6 Obsah vody ve spalínách

9.6.1 Podíl vodní páry

$$\mu_{H_2O F} = 8,9370 \cdot \gamma_H + 1,0 \cdot \gamma_{H_2O} \quad (19.1)$$

$$\mu_{H_2O F} = 8,9370 \cdot 0,0307 + 1,0 \cdot 0,27 = 0,5444 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (19.2)$$

9.6.2 Podíl vlhkosti ve spalínách

$$x_{H_2O Ad} = \frac{\varphi_v \cdot P_p''}{P_0 - \varphi_v \cdot P_p''} \quad (19.3)$$

$$x_{H_2O Ad} = \frac{0,55 \cdot 1706}{98000 - 0,55 \cdot 1706} = 0,0097 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (19.4)$$

9.6.3 Celkový obsah vody ve spalínách

$$\mu_{H_2O} = \mu_{H_2O F} + \mu_{Ad} \cdot x_{H_2O Ad} \quad (19.5)$$

$$\mu_{H_2O} = 0,5443 + 6,7906 \cdot 0,0097 = 0,61175 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (19.6)$$

9.7 Množství suchého vzduchu

$$\mu_{Ad} = \mu_{Aod} + \rho_{nAd} \cdot V_{God} \cdot \frac{\gamma_{O_2d}}{\gamma_{O_2Ad} - \gamma_{O_2d}} \quad (20.1)$$

$$\mu_{Ad} = 5,0111 + 1,293 \cdot 3,773 \cdot \frac{0,06}{0,20938 - 0,06} = 6,9706 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (20.2)$$

9.7.1 Množství spalovacího vzduchu

$$\mu_A = \mu_{Ad} \cdot (1 + x_{H_2O Ad}) \quad (20.3)$$

$$\mu_A = 6,9706 \cdot (1 + 0,0097) = 7,038 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (20.4)$$

9.8 Objem suchých spalin

$$V_{Gd} = V_{God} \cdot \frac{\gamma_{O2d}}{\gamma_{O2Ad} - \gamma_{O2d}} \quad (21.1)$$

$$V_{Gd} = 3,773 \cdot \frac{0,06}{0,20938 - 0,06} = 1,5155 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (21.2)$$

9.9 Celkové množství spalin

$$\mu_G = \mu_A + 1 - \gamma_{Ash} \cdot (1 - \nu) \quad (22.1)$$

$$\mu_G = 7,038 + 1 - 0,21 \cdot (1 - 0,05) = 7,8385 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (22.2)$$

9.10 Hmotnostní podíl CO₂

$$x_{CO2} = \frac{\mu_{CO2}}{\mu_G} \quad (23.1)$$

$$x_{CO2} = \frac{3,3386}{7,7815} = 0,429 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (23.2)$$

9.11 Hmotnostní podíl vody

$$x_{H2O} = \frac{\mu_{H2O}}{\mu_G} \quad (24.1)$$

$$x_{H2O} = \frac{6,1175}{7,7815} = 0,0786 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (24.2)$$

9.12 Měrné teplo spalin a spalovacího vzduchu

9.12.1 Podíl vody ve vlhkém vzduchu

$$x_{H2OA} = \frac{x_{H2OAd}}{(1 + x_{H2OAd})} \quad (25.1)$$

$$x_{H2OA} = \frac{0,0097}{(1 + 0,0097)} = 0,0097 \text{ [kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (25.2)$$

9.13 Měrné teplo spalin a vzduchu

$$\bar{c}_{pG0} = \bar{c}_{pAd0} + P_{1m}x_{H_2O} + P_{2m}x_{CO_2} \quad (26.1)$$

$$\bar{c}_{pA0} = \bar{c}_{pAd0} + P_1x_{H_2OA} \quad (26.2)$$

$$\bar{c}_{pGd0} = \bar{c}_{pAd0} + P_{2m}x_{CO_2} \quad (26.3)$$

kde je

- \bar{c}_{pG0} je celkové měrné teplo spalin mezi 0 °C a t °C v [kJ·kg⁻¹·K⁻¹]
- \bar{c}_{pA0} je celkové měrné teplo suchého vzduchu mezi 0 °C a t °C v [kJ·kg⁻¹·K⁻¹]
- \bar{c}_{pAd0} je celkové měrné teplo vlhkého vzduchu mezi 0 °C a t °C v [kJ·kg⁻¹·K⁻¹]

$$\bar{c}_{pAd0} = a + \frac{b}{2} \cdot t + \frac{c}{3} \cdot t^2 + \frac{d}{4} \cdot t^3 + \frac{e}{5} \cdot t^4 + \frac{f}{6} \cdot t^5 \quad (26.4)$$

$$P_{1m} = a_1 + \frac{b_1}{2} \cdot t + \frac{c_1}{3} \cdot t^2 + \frac{d_1}{4} \cdot t^3 + \frac{e_1}{5} \cdot t^4 + \frac{f_1}{6} \cdot t^5 \quad (26.5)$$

$$P_{2m} = a_2 + \frac{b_2}{2} \cdot t + \frac{c_2}{3} \cdot t^2 + \frac{d_2}{4} \cdot t^3 + \frac{e_2}{5} \cdot t^4 + \frac{f_2}{6} \cdot t^5 \quad (26.6)$$

Tabulka 2 - Vícečlenní součinitele pro stanovení celkové hodnoty měrného tepla [2]

a	1,004173	a ₁	0,8554535	a ₂	-0,1002311
b	0,1919210·10 ⁻⁴	b ₁	0,2036005·10 ⁻³	b ₂	0,7661864·10 ⁻³
c	0,5883483·10 ⁻⁶	c ₁	0,4583082·10 ⁻⁶	c ₂	-0,9259622·10 ⁻⁶
d	-0,7011184·10 ⁻⁹	d ₁	-0,2798080·10 ⁻⁹	d ₂	0,5293496·10 ⁻⁹
e	0,3309525·10 ⁻¹²	e ₁	0,5634413·10 ⁻¹³	e ₂	-0,1093573·10 ⁻¹²
f	-0,5673876·10 ⁻¹⁶				

9.14 Výpočet měrného tepla pro spaliny a vzduch

9.14.1 Celkové měrné teplo spalin pro teplotu 175°

$$\bar{c}_{pAd0} = a + \frac{b}{2} \cdot t_k + \frac{c}{3} \cdot t_k^2 + \frac{d}{4} \cdot t_k^3 + \frac{e}{5} \cdot t_k^4 + \frac{f}{6} \cdot t_k^5$$

$$\begin{aligned} \bar{c}_{pAd0} &= 1,004173 + \frac{0,1919210 \cdot 10^{-4}}{2} \cdot 175 + \frac{0,5883483 \cdot 10^{-6}}{3} \cdot 175^2 + \\ &+ \frac{-0,7011184 \cdot 10^{-9}}{4} \cdot 175^3 + \frac{0,3309525 \cdot 10^{-12}}{5} \cdot 175^4 + \\ &+ \frac{-0,5673876 \cdot 10^{-16}}{6} \cdot 175^5 = 1,011 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \end{aligned} \quad (27.1)$$

$$P_{1m} = a_1 + \frac{b_1}{2} \cdot t_k + \frac{c_1}{3} \cdot t_k^2 + \frac{d_1}{4} \cdot t_k^3 + \frac{e_1}{5} \cdot t_k^4 \quad (27.2)$$

$$\begin{aligned} P_{1m} &= 0,8554535 + \frac{0,2036005 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 175 + \frac{0,4583082 \cdot 10^{-6}}{3} \cdot 175^2 + \\ &+ \frac{-0,2798082 \cdot 10^{-9}}{4} \cdot 175^3 + \frac{0,5634413 \cdot 10^{-13}}{5} \cdot 175^4 = 0,1084 \text{ [-]} \end{aligned} \quad (27.3)$$

$$P_{2m} = a_2 + \frac{b_2}{2} \cdot t_k + \frac{c_2}{3} \cdot t_k^2 + \frac{d_2}{4} \cdot t_k^3 + \frac{e_2}{5} \cdot t_k^4 \quad (27.4)$$

$$\begin{aligned} P_{2m} &= -0,1002311 + \frac{0,7661864 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 175 + \frac{-0,9259622 \cdot 10^{-6}}{3} \cdot 175^2 + \\ &+ \frac{0,5293496 \cdot 10^{-9}}{4} \cdot 175^3 + \frac{-0,1093573 \cdot 10^{-12}}{5} \cdot 175^4 = -0,042 \text{ [-]} \end{aligned} \quad (27.5)$$

9.14.2 Celkové měrné teplo spalin

$$\bar{c}_{pG0} = \bar{c}_{pAd0} + P_{1m} \cdot x_{H_2O} + P_{2m} \cdot x_{CO_2} \quad (27.6)$$

$$\bar{c}_{pG0} = 1,011 + 0,108 \cdot 0,079 - 0,042 \cdot 0,429 = 1,002 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (27.7)$$

9.15 Střední měrné teplo pro vzduch

9.15.1 Střední měrné teplo suchého vzduchu pro teplotu 25°C

$$\bar{c}_{pAd0} = a + \frac{b}{2} \cdot t_r + \frac{c}{3} \cdot t_r^2 + \frac{d}{4} \cdot t_r^3 + \frac{e}{5} \cdot t_r^4 + \frac{f}{6} \cdot t_r^5 \quad (28.1)$$

$$\begin{aligned} \bar{c}_{pAd0} = & 1,004173 + \frac{0,1919210 \cdot 10^{-4}}{2} \cdot 25 + \frac{0,5883483 \cdot 10^{-6}}{3} \cdot 25^2 + \\ & + \frac{-0,7011184 \cdot 10^{-9}}{4} \cdot 25^3 + \frac{0,3309525 \cdot 10^{-12}}{5} \cdot 25^4 + \\ & + \frac{-0,5673876 \cdot 10^{-16}}{6} \cdot 25^5 = 1,0045 \left[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right] \end{aligned} \quad (28.2)$$

$$P_{1m} = a_1 + \frac{b_1}{2} \cdot t_r + \frac{c_1}{3} \cdot t_r^2 + \frac{d_1}{4} \cdot t_r^3 + \frac{e_1}{5} \cdot t_r^4 \quad (28.3)$$

$$\begin{aligned} P_{1m} = & 0,8554535 + \frac{0,2036005 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 25 + \frac{0,4583082 \cdot 10^{-6}}{3} \cdot 25^2 + \\ & + \frac{-0,2798082 \cdot 10^{-9}}{4} \cdot 25^3 + \frac{0,5634413 \cdot 10^{-13}}{5} \cdot 25^4 = -0,0908 [-] \end{aligned} \quad (28.4)$$

9.15.2 Celkové měrné teplo vlhkého vzduchu

$$\bar{c}_{pA0} = \bar{c}_{pAd0} + P_{1m} \cdot x_{H_2O} \quad (28.5)$$

$$\bar{c}_{pA0} = 1,0045 + 0,0882 \cdot 0,097 = 1,0054 \left[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \right] \quad (28.6)$$

9.16 Poměr vyhoření paliva

$$l_u = \frac{\gamma_{Ash} \cdot (1-v)}{1 - \gamma_{Ash} - \gamma_{H_2O}} \cdot \frac{1}{1 - u_{FA}} \cdot \left[u_{FA} + (u_{SL} - u_{FA}) \cdot \frac{\dot{m}_{SL}}{\dot{m}_{Fo} \cdot \gamma_{Ash} \cdot (1-v)} \right] \quad (29.1)$$

$$l_u = \frac{27 \cdot (1 - 0,05)}{1 - 21 - 27} \cdot \frac{1}{1 - 0,009} \cdot \left[0,009 + (0,0155 - 0,099) \cdot \frac{0,427}{14,06 \cdot 21 \cdot (1 - 0,05)} \right] = 0,0039 [-] \quad (29.2)$$

9.16.1 Množství strusky

$$\dot{m}_{SL} = \dot{m}_{Fo} \cdot \gamma_{As} \cdot \frac{X_{sl}}{1 - u_{SL}} \quad (29.3)$$

$$\dot{m}_{SL} = 14,06 \cdot 21 \cdot \frac{0,15}{1 - 0,0155} = 0,4499 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (29.4)$$

9.17 Entalpie paliva

$$h_F = \bar{c}_F \cdot (t_F - t_r) \quad (30.1)$$

$$h_F = 1,9 \cdot (15 - 25) = 19 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (30.2)$$

9.18 Entalpie vzduchu

$$J_{(N)A} = \mu_A \cdot \bar{c}_{pA} \cdot (t_A - t_r) \quad (31.1)$$

$$J_{(N)A} = 7,038 \cdot 1,0054 \cdot (38 - 25) = 91,986 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (31.2)$$

9.19 Celková výhřevnost paliva

$$H_{(N)tot} = \left[\frac{H_{(N)} + h_f}{1 - l_u} + J_{(N)A} \right] \quad (32.1)$$

$$H_{(N)tot} = \left[\frac{14\,500 + 19}{1 - 0,00389} + 91,986 \right] = 14\,667,65 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (32.2)$$

9.20 Využitelný tepelný výkon

$$\dot{Q}_N = \dot{m}_{SST} \cdot (h_{SST} - h_{FW}) \quad (33.1)$$

$$\dot{Q}_N = \frac{230 \cdot (3\,456 - 835,6)}{3\,600} = 167,41 \text{ [MW]} \quad (33.2)$$

10 Tepelné ztráty a celková nepřímá účinnost dle ČSN EN 12 952-15

Tato část se nyní bude zabývat výpočtem konkrétních tepelných ztrát a na závěr výpočtu celkové hrubé nepřímé účinnosti.

10.1 Ztráty citelným teplem spalin (komínová ztráta)

$$\dot{Q}_{(N)G} = \dot{m}_F \cdot \mu_G \cdot \bar{c}_{pG} \cdot (t_G - t_r) \quad (34.1)$$

$$\dot{Q}_{(N)G} = 14,06 \cdot 7,8385 \cdot 1,0016 \cdot (175 - 25) = 16,55738 [MW] \quad (34.2)$$

Vyjádření poměrnou ztrátou:

$$l_{(N)GF} = \frac{\mu_G}{H_{(N)tot}} \cdot \bar{c}_{pG} \cdot (t_G - t_r) \quad (34.3)$$

$$l_{(N)GF} = \frac{7,8385}{14\,667,65} \cdot 1,0016 \cdot (175 - 25) = 0,0803 [-] \quad (34.4)$$

10.1.1 Ztráta chemickým nedopalem CO

$$l_{(N)COF} = \frac{V_{Gd}}{H_{(N)tot}} \cdot y_{COd} \cdot H_{COd} \quad (34.5)$$

$$l_{(N)COF} = \frac{1,5155}{14\,667,65} \cdot 0,00008 \cdot 12\,633 = 1,044 \cdot 10^{-4} [-] \quad (34.6)$$

kde y_{COd} je naměřené množství CO ve spalinách = 0,00008 hm. %
- H_{COd} výhřevnost CO = 12 633 [kg⁻¹·K⁻¹]

10.1.2 Ztráta v důsledku entalpie a nespálených složek v popelu a popílku

$$\dot{Q}_{SL} = \dot{m}_{SL} \cdot \left[\bar{c}_{SL} \cdot (t_{SL} - t_r) + u_{SL} \cdot H_{uu} \right] \quad (34.7)$$

$$\dot{Q}_{SL} = 0,4499 \cdot \left[1,26 \cdot (600 - 25) + 0,0155 \cdot 27,2 \right] = 0,4499 [MW] \quad (34.8)$$

$$\dot{Q}_{FA} = \dot{m}_{FA} \cdot \left[c_{FA} \cdot (t_G - t_r) + u_{FA} \cdot H_{uu} \right] \quad (34.9)$$

$$\dot{Q}_{FA} = 2,5325 \cdot \left[0,84 \cdot (600 - 25) + 0,009 \cdot 27,2 \right] = 2,5325 \text{ [MW]} \quad (34.10)$$

$$\dot{m}_{FA} = \dot{m}_F \cdot \gamma_{As} \cdot \frac{X_{FA}}{1 - u_{FA}} \quad (34.11)$$

$$\dot{m}_{FA} = 14,06 \cdot 0,21 \cdot \frac{0,85}{1 - 0,009} = 2,5325 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (34.12)$$

- kde
- je c_{SL} měrné teplo strusky = 1,26 [kJ·kg⁻¹·K⁻¹]
 - t_{SL} teplota strusky = 600 °C
 - u_{SL} nedopal ve strusce = 0,0155 [-]
 - H_{uu} výhřevnost nespáleného uhlíku = 27,2 [MJ·kg⁻¹]
 - c_{FA} měrné teplo popílku = 0,84 [kJ·kg⁻¹·K⁻¹]
 - u_{FA} nedopal v popílku = 0,009 [-]
 - X_{FA} poměr zachycení popílku = 0,85 [-]

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{SL} + \dot{Q}_{FA} \quad (34.13)$$

$$\dot{Q}_L = 0,4271 + 2,5325 = 2,98 \text{ [MW]} \quad (34.14)$$

$$l_{(N)SFF} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_N} \quad (34.15)$$

$$l_{(N)SFF} = \frac{2,98}{167,41} = 0,0178 \text{ [-]} \quad (34.16)$$

10.1.3 Ztráta sáláním a konvekcí (sdílení tepla do okolí)

$$\dot{Q}_{RC} = C \cdot \dot{Q}_N^{0,7} \quad (34.17)$$

$$\dot{Q}_{RC} = 0,315 \cdot 167,41^{0,7} = 1,135 \text{ [MW]} \quad (34.18)$$

Přepočet na poměrnou ztrátu:

$$l_{(N)RC} = \frac{\dot{Q}_{(N)RC}}{\dot{Q}_N} \quad (34.19)$$

$$l_{(N)RC} = \frac{1,135}{167,41} = 0,0059 [-] \quad (34.20)$$

10.2 Výpočet nepřímé hrubé účinnosti

Pomocí výsledků z předchozího postupu je nyní možné dopočítat výslednou nepřímou hrubou účinnost dle ČSN EN 12 952-15.

$$\sum l_{(N)F} = l_{(N)GF} + l_{(N)COF} + l_{(N)SFF} \quad (34.21)$$

$$\sum l_{(N)F} = 0,0803 + 1,044 \cdot 10^{-4} + 0,0178 = 0,0982 [-] \quad (34.22)$$

$$\eta_{(N)B} = \frac{1 - \sum l_{(N)F}}{1 + \frac{\dot{Q}_{RC} + \dot{Q}_L - \dot{Q}_{(N)Z} \cdot \sum l_{(N)F}}{\dot{Q}_N}} \quad (34.23)$$

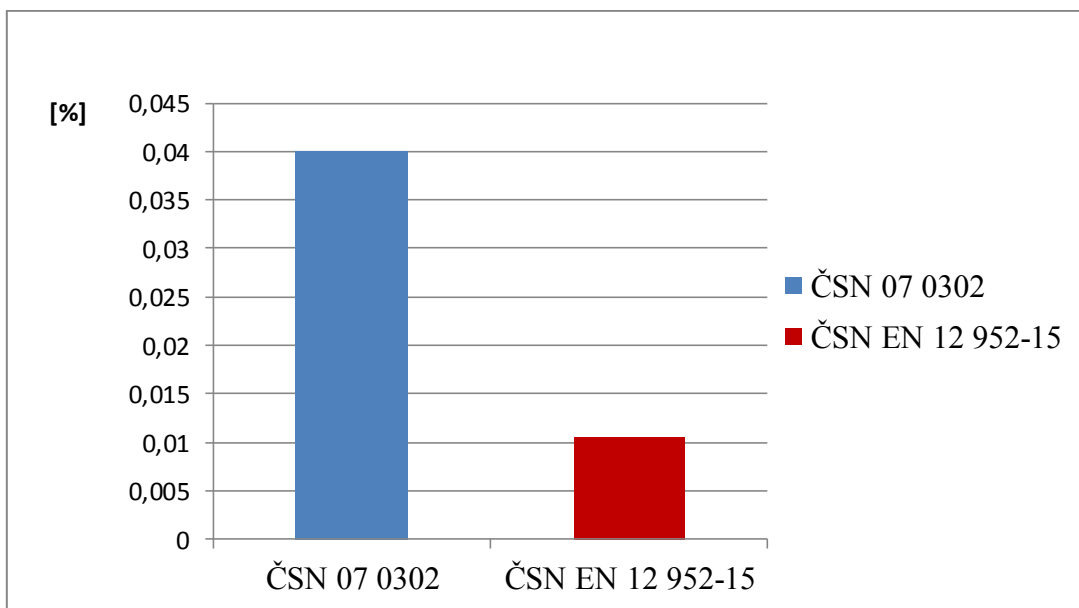
$$\eta_{(N)B} = \frac{1 - 0,0981}{1 + \frac{1,135 + 2,8318 - 1,9 \cdot 0,0982}{167,41}} \quad (34.24)$$

$$\eta_{(N)B} = 0,8811 \rightarrow 88,11 \% \quad [2]$$

11 Výsledky výpočtů a porovnání tepelných ztrát

11.1 Ztráta hořlavinou ve spalinách (chemický nedopal)

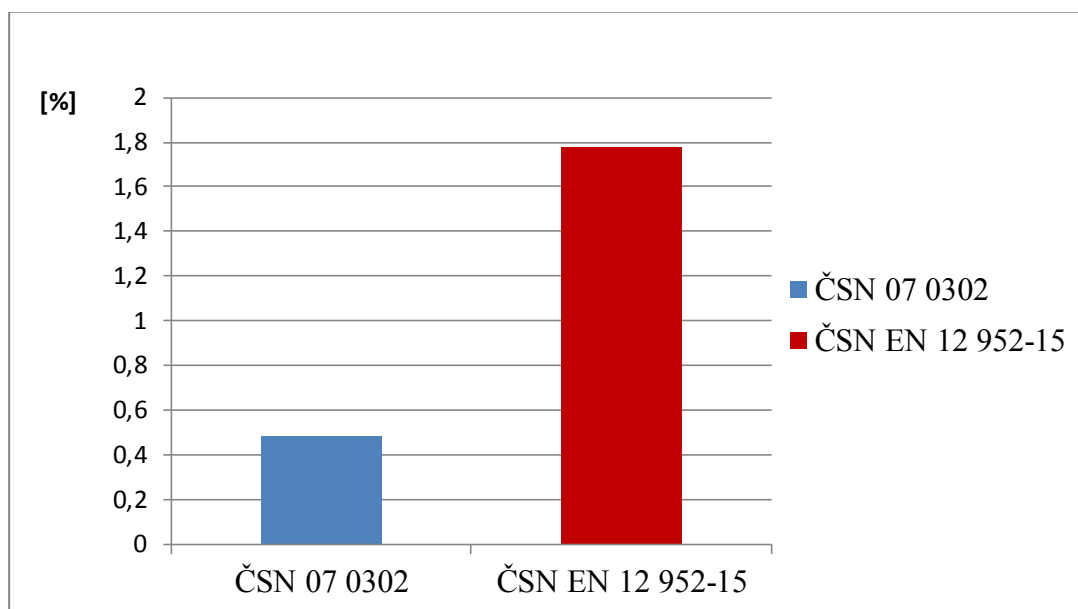
Porovnání ztráty hořlavinou ve spalinách (norma ČSN 07 0302), taktéž označovaná jako ztráta chemickým nedopalem, se ztrátou chemickým nedopalem podle normy ČSN EN 12 952-15. Na Obrázku 3 je jasně vidět, že ztráta podle ČSN 07 0302 (modrý sloupec) je téměř 4 krát větší než podle normy ČSN EN 12 952-15 (červený sloupec). Ztráta podle ČSN 07 0302 činí **0,04 %** a ztráta podle ČSN EN 12 952-15 činí **0,01044 %**.



Obrázek 3 - Ztráta hořlavinou ve spalinách a ztráta chemickým nedopalem

11.2 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

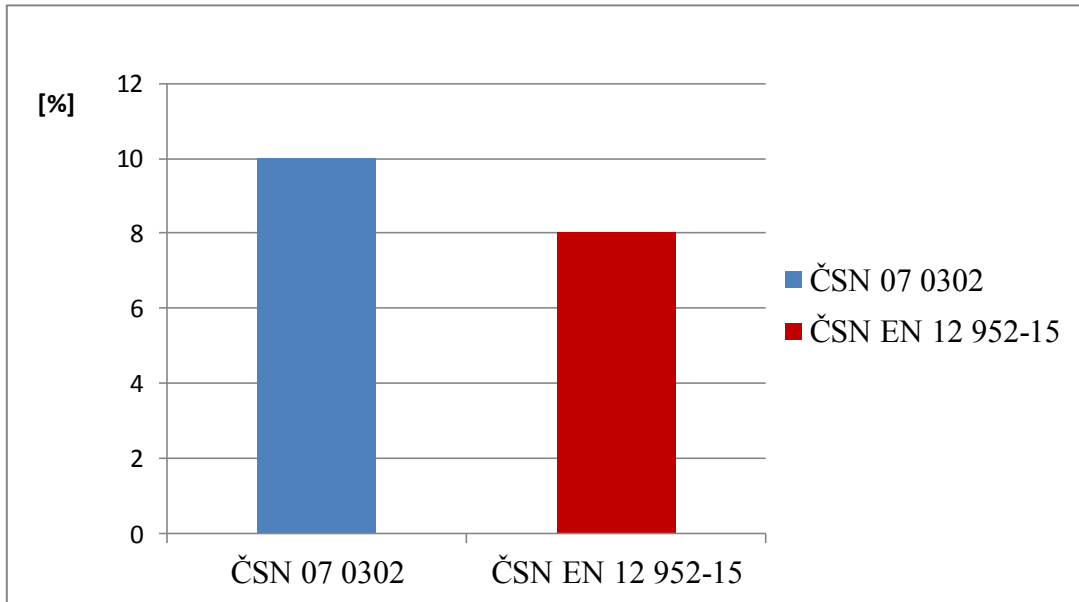
Porovnání ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích podle normy ČSN 07 0302, se ztrátou v důsledku entalpie a nespálených složek v popelu a popílku podle normy ČSN EN 12 952-15 objektivně není možné. Ztráta v důsledku entalpie a nespálených složek v popelu a popílku se skládá ze ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích a ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků podle normy ČSN 07 0302. Počítají se z jiných hodnot a výsledky se tudíž nedají porovnat. ČSN 07 0302 (modrý sloupec) v tom případě činí **0,48 %** a podle ČSN EN 12 952-15 (červený sloupec) činí **1,78 %**. Ztráty jsou jiné, proto srovnání není objektivní.



Obrázek 4 - Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích a ztráta v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek v popelu a popílku

11.3 Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta)

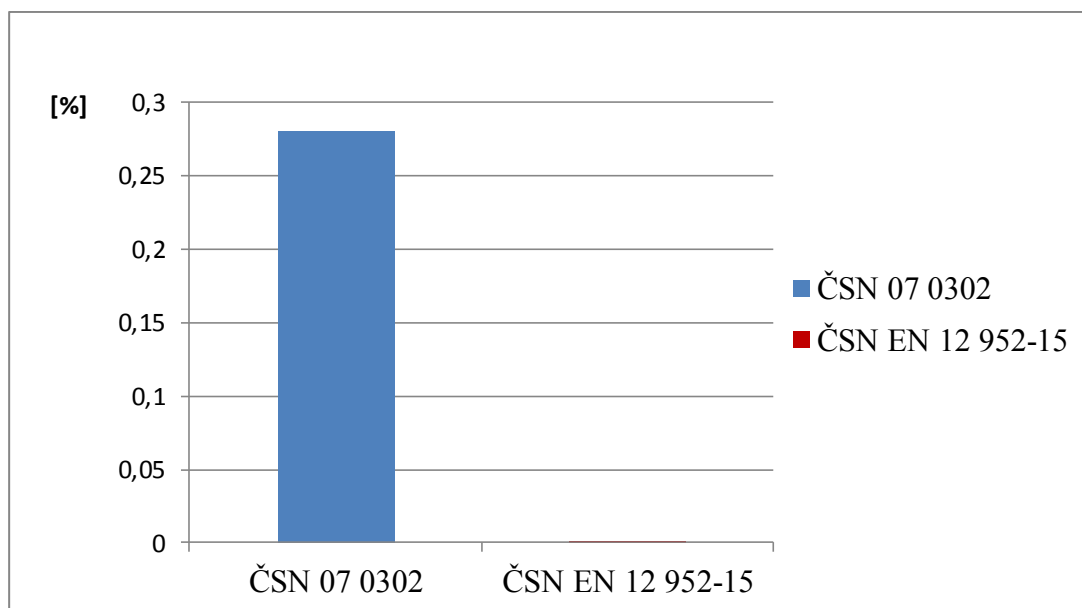
Tyto ztráty jsou jednoznačné pro obě normy. Princip výpočtu je ovšem jiný proto se výsledky liší. ČSN 07 0302 (modrý sloupec) činí **10,01 %** a ČSN EN 12 952-15 (červený sloupec) činí **8,03 %**. Rozdíl 2 % je velmi významný, bez bližšího zkoumání není možné určit, která z uvedených hodnot je blíže skutečné hodnotě.



Obrázek 5 - Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta)

11.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

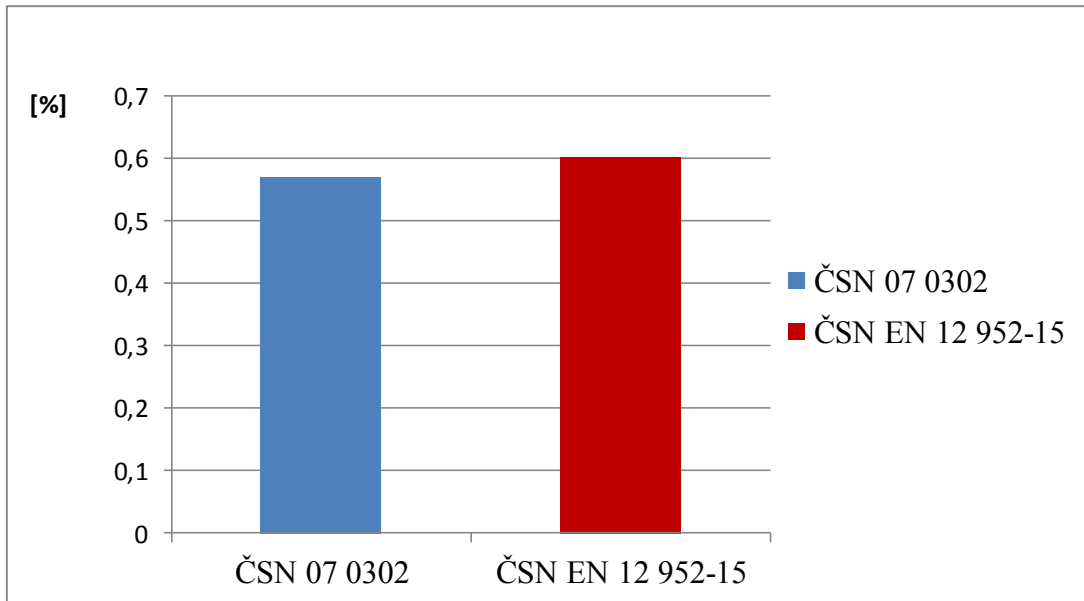
Tento graf není chybný, ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků vypočtená u normy ČSN EN 12 952-15 jako poměrná část ze ztráty v důsledku entalpie a nespálených složek v popelu a popílku je tak malá, že ji není možné graficky porovnat s normou ČSN 07 0302. Výsledky jsou pro normu ČSN 07 0302 (modrý sloupec) **0,28 %** a poměrná část z normy ČSN EN 12 952-15 (červený sloupec) je **$1,044 \cdot 10^{-4}$ %**. Už z těchto čísel je naprosto zřejmé, že toto srovnání je bezpředmětné, protože část ztráty v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek v popelu a popílku dle ČSN EN 12 952-15 oproti ztrátě fyzickým teplem spalin podle ČSN 07 0302 zanedbatelná.



Obrázek 6 - Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků a poměrná část ztráty v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek v popelu a popílku

11.5 Ztráta sdílením tepla do okolí

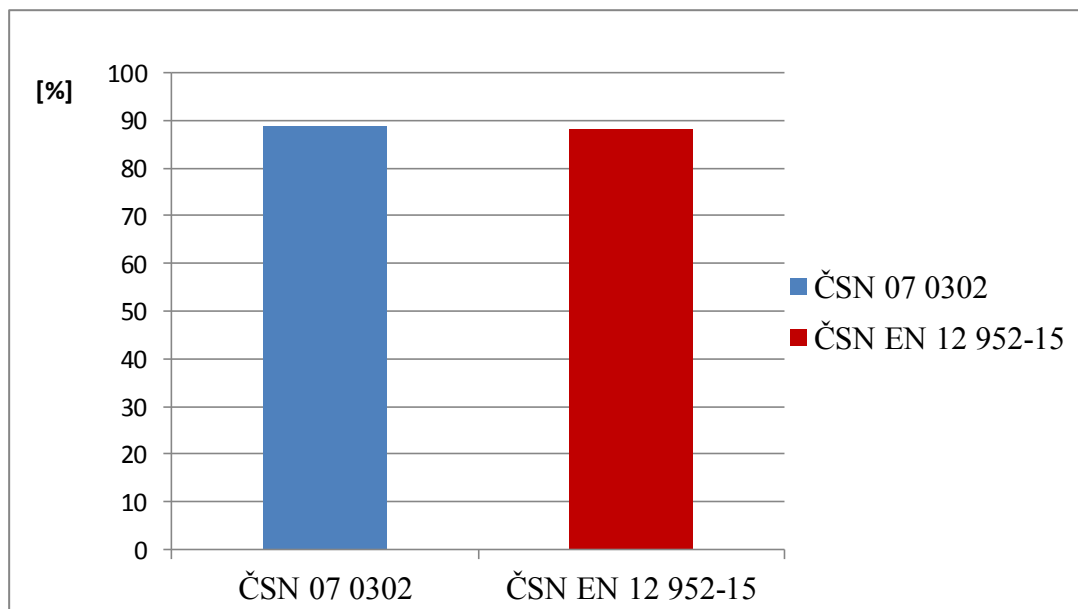
Podle ČSN 07 0302 se jedná o ztrátu sdílení tepla do okolí a podle ČSN EN 12 952-15 jde o ztrátu sáláním a konvekcí. Obě normy používají jiné vztahy založené na empirických konstantách. Výsledky mají k sobě velmi blízko. Ztráta podle **ČSN 07 0302** (modrý sloupec) činí **0,57 %** a podle **ČSN EN 12 952-15** (červený sloupec) činí **0,6 %**. Výsledky při použití zaokrouhlení se dají považovat za totožné.



Obrázek 7 – Ztráty sdílením tepla do okolí a sáláním a konvekcí

11.6 Celková účinnost

Celková účinnost podle normy ČSN 07 0302 (modrý sloupec) činí **88,59 %** a podle normy ČSN EN 12 952-15 (červený sloupec) je celková účinnost **88,11 %**. Obě normy používají jiné postupy a jiné vzorce pro konečné určení účinnosti. Za důležité je nutno považovat fakt, že jsou výsledné účinnosti rozdílné o 0,48% i přes to, že normy používají jiný způsob výpočtu.



Obrázek 8 - Graf porovnání celkových účinností

Tabulka 3 Tabulka výsledků

Ztráty	ČSN 07 0302 [-]	ČSN EN 12 952-15 [-]	ln_{SFF} [-]
Ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal)	0,0004	$1,044 \cdot 10^{-4}$	-
Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)	0,0048	0,0178	$\Sigma 0,017801044$
Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	0,0028	$1,044 \cdot 10^{-6}$	
Ztráta fyzickým teplem spalin (komínová ztráta)	0,1001	0,0803	-
Ztráta sdílením tepla do okolí (ztráta sáláním a konvekcí)	0,0057	0,006	-
Celková účinnost	88,59 [%]	88,11 [%]	-

ln_{SFF} je ztráta v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek v popelu a popílku (ČSN EN 12 952-15). Dá se považovat za součet ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích a fyzickým teplem tuhých zbytků, které jsou uvedeny v ČSN 07 0302. Přímé srovnání není možné, protože se počítá z jiných hodnot.

12 Závěr

Zadáním této bakalářské práce bylo provést porovnávací výpočet účinnosti parního kotle PG 230 nepřímou metodou podle norem ČSN 07 0302 a ČSN EN 12 952-15.

První výpočet je dle ČSN 07 0302. Norma je velice dobře zpracovaná a i začátečník v oblasti státních technických norem nemá problém pochopit a zjistit, vše co potřebuje.

Norma ČSN EN 12 952-15 je nová norma platná v celé Evropě. Norma obsahuje vše potřebné z hlediska výpočtu, ovšem postrádá přehlednost, jednoduchost a posloupnost výpočtu jako u normy ČSN 07 0302. Pro nováčka je tato norma opravdu náročná a výpočet podle této normy trval mnohem déle než podle normy ČSN 07 0302.

Při studování norem bylo zjištěno, že se normy v mnoha věcech liší. Nejdůležitějším a nejvýraznějším znakem je, že norma ČSN EN 12 952-15 pracuje s hmotnostními toky a norma ČSN 07 0302 pracuje s objemovými toky. K výpočtu dle ČSN 07 0302 stačí pouze znát konstrukční a provozní parametry kotle a k tomu rozbor a výhřevnost paliva. U normy ČSN EN 12 952-15 se vyskytl problém. Bylo nutno dodatečně zjistit hmotnostní průtok paliva, protože by tento údaj byl značně nepřesný (váhy pro měření toku paliva mají odchylku $\pm 5\%$). Společnost Elektrárny Opatovice a.s. poskytla naměřenou hodnotu účinnosti, ze které bylo možné odvodit hmotnostní tok paliva. Norma ČSN EN 12952-15 obsahuje několik postupů výpočtu, pro měření různých hodnot, jako např. hmotnostní tok spalin nebo hmotnostní tok popela. V tomto případě jediná možná varianta výpočtu podle zadaných hodnot byla přes hmotnostní tok paliva. Zde vzniká důležitá otázka, na kterou v rozsahu této bakalářské práce není možné odpovědět, jak přesné je měření účinnosti z jiné hodnoty účinnosti.

Ztráty podle obou norem se počítají jiným způsobem a z jiných hodnot. Bezpečně se dá srovnat ztráta fyzickým teplem spalin, ztráta hořlavinou ve spalinách a ztráta sdílením tepla do okolí. Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích a ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků se počítají odlišně. U normy ČSN EN 12 952-15 se s těmito termíny neseznamujeme. Setkáme se s pojmem ztráta v důsledku entalpie a nespálených složek v popelu a popílku. Tato ztráta se dá uvažovat jako součet ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích a ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků. Výpočet je ovšem jiný a počítá se z odlišných hodnot, proto tyto ztráty nelze vzájemně porovnat.

Výpočet celkové hrubé nepřímé účinnosti se opět velmi liší. U normy ČSN 07 0302 se od celku odečítají jednotlivé ztráty. U normy ČSN EN 12 952-15 spočívá ve výpočtu několik ztrát a do toho stejného výpočtu se zahrnují i ztrátová tepla. Je to z důvodu, že nelze vyjádřit tyto ztrátová tepla poměrnou ztrátou bez znalosti výsledné účinnosti. Přepočtení bylo provedeno a je uvedeno u jednotlivých norem jako přepočtení na poměrnou ztrátu, aby bylo možné ztráty vzájemně porovnat. I přes rozdíly ve způsobu výpočtu vyšla účinnost podle ČSN 07 0302 **88,59 %** a podle ČSN EN 12 952-15 **88,11 %**. Která hodnota je blíže skutečné účinnosti, je diskutabilní. Jak norma ČSN 07 0302, tak norma ČSN EN 12 952-15 obsahují vlastní statistický výpočet pro zjištění intervalu, v jakém se hodnota účinnosti nachází a zároveň se v normě dá uvažovat i vliv odsíření. Potom by ovšem rozsah takové práce značně překročil úroveň bakalářské práce.

13 Seznam použitých zdrojů

- [1] ČSN 07 0302. *PŘEJÍMACÍ ZKOUŠKY PARNÍCH KOTLŮ*. Praha: Český normalizační institut, Říjen 1996.
- [2] ČSN EN 12952-15. *Vodotrubné kotle a pomocné zařízení: Část 15: Přejímací zkoušky*. Český normalizační institut, Květen 2004.
- [3] BALÁŠ, Marek. *KOTLE A VÝMĚNÍKY TEPLA*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. Brno, Říjen 2009. ISBN 987-80-314-3955-9.
- [4] KLÍMA, Michal. Elektrárna Opatovice. In: *Ekonomika.idnes.cz* [online]. 7. června 2012 [cit. 2013-04-08]. Obrázek ve formátu JPG. Dostupné z: http://ekonomika.idnes.cz/foto.aspx?r=ekonomika&foto1=KOT2c22cb_opatov_3.JPG

14 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Fotografie elektrárny Opatovice	13
Obrázek 2 - Řez parním kotlem PG 230	15
Obrázek 9 - Ztráta hořlavinou ve spalínách a ztráta chemickým nedopalem.....	45
Obrázek 10 - Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích a ztráta v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek v popelu a popílku	46
Obrázek 11 - Ztráta fyzickým teplem spalín (komínová ztráta).....	47
Obrázek 12 - Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků a poměrná část ztráty v důsledku entalpie a nespálených prchavých složek v popelu a popílku	48
Obrázek 13 - Ztráty sdílením tepla do okolí a sáláním a konvekcí	49
Obrázek 14 - Graf porovnání celkových účinností.....	50

15 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Koeficienty A (I), B (I), C (I) složek spalín a vzduchu	28
Tabulka 2 - Součinitele pro stanovení celkové hodnoty měrného tepla.....	38
Tabulka 3 - Přehled číselných výsledků.....	51

16 Seznam použitých zkratek

Seznam použitých zkratek by byl v případě této bakalářské práce nesmírně dlouhý a prodloužilo by to práci i o více než 30 stránek. Po dohodě s vedoucím bakalářské práce se všechny důležité zkratky oskenovaly z použitých norem.

ČSN 07 0302

Poskytnuto za poplatek - Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství - Martina Drabantová
Rozmnožování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu UNMZ je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podleha pokute

ČSN 07 0302

2.2 Značky veličin

Tabulka 1 – Použité veličiny a jednotky

Značka	Veličina	Rozměr
A	Obsah popela	kg . kg ⁻¹
A1–A10		
A ₁ ; A ₀ ; A _s	Konstanty rovnice pro výpočet $\bar{\zeta}$	
a ₁	Podíl uhlíku paliva, spáleného na CO	kg . kg ⁻¹
a ₂	Podíl nespáleného CH ₄	kg . kg ⁻¹
B1–B10		
B; B ₀ ; B _a	Konstanty rovnice pro výpočet $\bar{\zeta}$	
Ba	Bacharachovo číslo hustoty kouře	
b	Podíl nespáleného uhlíku paliva	kg . kg ⁻¹
C	Obsah uhlíku	kg . kg ⁻¹
C1–C10		
C; C ₀ ; C _a	Konstanty rovnice pro výpočet $\bar{\zeta}$	
$\bar{\zeta}$	Střední měrná tepelná kapacita spalín (při stálém tlaku)	kJ . m ⁻³ . K ⁻¹
$\bar{\zeta}_a$	Střední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků	kJ . kg ⁻¹ . K ⁻¹
DAF	Obsah hořlaviny (organické hmoty)	kg . kg ⁻¹
H	Obsah vodíku	kg . kg ⁻¹
h	Entalpie	kJ . kg ⁻¹
M	Molární hmotnost plynu	kg . kmol ⁻¹
m	Hmotnost	kg
\dot{m}	Hmotnostní průtok	kg . s ⁻¹ nebo kg . h ⁻¹
N	Obsah dusíku	kg . kg ⁻¹
O	Obsah kyslíku	kg . kg ⁻¹
Ö	Objemový průtok	m ³ . s ⁻¹ nebo m ³ . h ⁻¹
P	Pravděpodobnost	1 (nebo %)
p	tlak	Pa; MPa
q	Množství tepla	kJ
Q	Tepelný tok	kJ . s ⁻¹ , kW, MW
Q ₁	Tepelný tok \dot{Q} (kJ . s ⁻¹) vztahovaný na hmotnostní průtok paliva \dot{m} (kg . s ⁻¹)	kJ . kg ⁻¹
Q' (Q')	Výhřevnost (spalné teplo)	kJ . kg ⁻¹ , kJ/m ³
R1–R10	Pomocné konstanty stechiometrických objemů	
S	Obsah síry	kg . kg ⁻¹
S1–S10	Pomocné konstanty stechiometrických objemů	
t	Teplota	°C
u	Nejistota	rozměr dané veličiny
V	Obsah prchavé hořlaviny	kg . kg ⁻¹
V	Objem vzduchu nebo spalín vztahovaný na 1 kg nebo 1 m ³ paliva	m ³ . kg ⁻¹ nebo m ³ . m ⁻³
V1–V4	Pomocné hodnoty objemů spalín	m ³ . kg ⁻¹ nebo m ³ . m ⁻³
W	Obsah vody	kg . kg ⁻¹
X	Hmotnostní podíl složky tuhých zbytků	kg . kg ⁻¹
Y	Hmotnostní podíl složky ve směsi plynů	kg . kg ⁻¹
α	Součinitel přebytku vzduchu	
α	Součinitel přenosu tepla	W . m ⁻² . K ⁻¹
β	Podíl přísátého vzduchu	
ε	Relativní nejistota	
ζ	Relativní tepelná ztráta	
η	Účinnost	
μ	Koncentrace nespáleného uhlíku ve spalínách	g . m ⁻³
v	Objem vlhkého plynu (vzduchu) obsahující 1 m ³ plynu (vzduchu) suchého	
ρ	Hustota	kg . m ⁻³
σ	Směrodatná odchylka	rozměr dané veličiny
τ	Doba trvání zkoušky	h
φ	Relativní vlhkost	
φ	Součinitel vlivu	
ω	Objemový podíl složky ve směsi plynů	m ³ . m ⁻³
Ω	Průtok recirkulovaných spalín	m ³ . kg ⁻¹

Poskytnuto za poplatek - Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství - Martina Drabantova
 Rozmnožování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu UNMZ je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podleha pokutě

CSN 07 0302

2.3 Indexy

Tabulka 2 – Význam použitých indexů

Index	Význam
Ar	argon
b	barometrický
C	uhlík; hořlavina v tuhých zbytcích
CO	oxid uhelnatý; hořlavina ve spalinách
CO ₂	oxid uhličitý
ex	výstupní; vnější
f	fyzický
H ₂	vodík
H ₂ O	voda; vodní pára
ch	chladič voda
i	složka směsi; člen souboru
in	vstupní, vnitřní
j	jmenovitá hodnota
k	koncový; komín
min	minimální (teoretický)
mp	mezipřehřátá pára
N ₂	dušík
nv	napájecí voda
O ₂	kyslík
od	odkalování; odluhování
ok	okolí
ost	ostatní (přívody energie kromě paliva)
pal	palivo; přivedeno palivem
pl	plyn (topný)
pop	popílek
pp	přehřátá pára
pr	přivedený; příkon
RO ₂	oxid uhličitý a siřičitý
s	spaliny
sk	škvára; struska
sm	směs
SO ₂	oxid siřičitý
spal	spalitelný
sr	spaliny recirkulované
ss	spaliny suché
ssr	spaliny suché recirkulované
sv	sdílení tepla do okolí
t	celkový (totální)
uz	užitečný; využitelný
v	vzduch
vs	vzduch suchý
vmp	vstřík do mezipřehřáté páry
vpp	vstřík do přehřáté páry
vp	vratná pára
vyr	vyrobený (výkon)
z	ztráty (mědia)
0	počáteční; základní, vztažný; výpočtový
1	vstupní
2	výstupní
(X) _r	veličina X při recirkulaci spalin

2.4 Exponenty

Tabulka 3 – Význam použitých exponentů

Exponent	Význam
a	analytický vzorek
b	hrubý (brutto)
d	bezvodý vzorek; suché palivo
daf	vzorek bez vody a popela; hořlavina paliva
kor	přepočtený (korigovaný)
n	čistý (netto)
r	surové, spalované palivo
"	stav vodní páry na mezi sytosti při teplotě <i>t</i>

Poskytnuto za poplatek - Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství - Martina Drabantová
Rozmnožování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu UNMZ je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podleha pokutě

ČSN 07 0302

2.5 Zkratky

Tabulka 4 – Význam použitých zkratek

Zkratka	Význam
DE	Zařízení pro odstraňování oxidů síry a nebo dusíku ze spalin (desulfurace a nebo denitrogenace spalin)
EKO	Ohřívák vody (ekonomizer)
EO	Elektrostatický odlučovač popílku
LJ	Ohřívák vzduchu Ljungström
M	Motor (elektromotor)
MO	Mlečcí okruh
MP	Mezipřehřívák (přihřívák) páry
OC	Oběhové čerpadlo
PK	Parní kotel
POV	Parní ohřívák vzduchu
PP	Přehřívák páry
RV	Recirkulační ventilátor
SOV	Spalinový ohřívák vzduchu
SV	Spalinový (sací) ventilátor
VV	Vzduchový ventilátor
VÝP	Výparník

ČSN EN 12 952-15

Poskytnuto za poplatek - Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství - Martina Drabantova
 Rozmnožování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu UNMZ je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podleha pokute

ČSN EN 12952-15

Tabulka 4.1-1 – Latinská písmena

Značka	Popis	Jednotka
<i>A</i>	obsah popela v palivu ve vztahu k suchému palivu bez popela	–
<i>A_u</i>	ovlivňující veličina	–
<i>c</i>	střední měrná tepelná kapacita (při stálém tlaku v daném teplotním intervalu) ^{a)}	kJ/(kg.K)
\bar{c}	celková střední měrná tepelná kapacita (v daném teplotním intervalu) ^{a)}	kJ/(kg.K)
<i>f</i>	faktor (dočasný zlomek tepelného výkonu)	–
<i>f</i>	meze (dovolené) chyby	–
<i>H</i>	tepelná hodnota (CV)	kJ/kg
<i>h</i>	měrná entalpie	kJ/kg
<i>i</i>	počet vzorků	–
<i>J</i>	měrná entalpie spalín nebo spalovacího vzduchu vztahovaná k hmotnostnímu průtoku paliva	kJ/kg
<i>L</i>	výparné teplo	kJ/kg
<i>l</i>	dílčí ztráta	–
<i>l</i>	délka přívodu	m
<i>l_u</i>	podíl nespálených prchavých složek a přiváděného hmotnostního průtoku paliva	–
<i>M</i>	molární hmotnost	–
\dot{m}	hmotnostní průtok paliva	kg/s
<i>n</i>	součinitel přebytku vzduchu na výstupu z kotle	–
<i>n</i>	poměr vápence (CA/S)	–
<i>P</i>	elektrický proud	kW
<i>p</i>	tlak	N/mm ²
\dot{Q}	tepelný tok	kW
<i>T</i>	absolutní teplota	K
<i>t</i>	teplota	°C
<i>U</i>	hmotnostní podíl nespálených prchavých složek	kg/kg
<i>U_M</i>	nejistota měření	–
<i>V</i>	objemový podíl spalovacího vzduchu a spalín (na hmotnostní jednotku paliva)	m ³ /kg
\dot{V}	objemový průtok	m ³ /h
<i>v</i>	hmotnostní objem	m ³ /kg
<i>w</i>	průtoková rychlost	m/s
<i>W</i>	vlhkost paliva ve vztahu k suchému palivu bez popela	–
<i>x</i>	hmotnostní podíl složek paliva/spalovacího vzduchu	kg/kg
<i>x_{Ad}</i>	hmotnostní podíl spalovacího vzduchu	kg/kg
<i>y</i>	objemový podíl	m ³ /m ³
<i>y_{Ad}</i>	objemový podíl spalovacího vzduchu	m ³ /m ³

POZNÁMKA 1 1 N/mm² = 1 MN/m² = 1 MPa
 POZNÁMKA 2 Uvedené jednotky jsou běžně používané jednotky. V případě použití v bezrozměrných rovnicích je nezbytný jejich převod.
^{a)} dále jen „měrné teplo“

Poskytnuto za poplatek - Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství - Martina Drabantová
Rozmnožování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu UNMZ je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podléhá pokutě

ČSN EN 12952-15

Tabulka 4.1-2 – Řecká písmena

Značka	Veličina	Jednotka
α	součinitel přestupu tepla	W/(m ² K)
∂	parciální diferenciál	–
Δ	rozdíl	–
ε	relativní nejistota měření	–
ε	sálavost	–
η	tepelná účinnost	–
η_{SL}	účinnost sběru popela	–
η_S	účinnost odsíření	–
γ	hmotnostní podíl paliva	kg/kg
ν	obsah prchavých složek v popelu	kg/kg
ρ	hustota	kg/m ³
σ	směrodatná odchylka	–
μ	podíl hmotnosti spalovacího vzduchu a hmotnosti paliva	kg/kg
τ	doba trvání zkouška	h nebo s

Poskytnuto za poplatek - Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství - Martina Drabantova
 Rozmnožování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu UNMZ je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podléhá pokutě

ČSN EN 12952-15

Tabulka 4.1-2 – Indexy

Značka	Popis
A	vzduch
Ash	popel
AS	vstřikování páry nebo vzduchu
B	kotel
BD	voda z odkalení kotle
c	přepočtený (upravený)
Cn	konvekce
C	uhlík
Ca	vápenec
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
d	suchý (základ)
daf	suchý, bez popela
DC	odlučovač popílku
e	konečná hodnota
EC	vnější chlazení
FA	popílek
F	palivo, spálené palivo
Fo	přiváděné palivo
Fw	napájecí voda
G	spaliny (zplodiny hoření)
(G)	označení spalného tepla
g	garantovaný
H	vodík
H ₂ O	voda
K	mletý vápenec (používá-li se jako přídavná látka)
L	ztráta
LA	vzduch přísátý netěsnostmi
M	mlýn na jemné mletí
m	průměrná hodnota
meas	naměřeno
min	minimální
n	využitelný, efektivní
N	dusík
(N)	označení výhřevnosti
n	srovnávací podmínky
o	stechiometrický
O; O ₂	kyslík
p	konstantní tlak
r	srovnávací; referenční
R	sálání
RC	sálání a konvekce
RH	přehřátá pára
S	síra

(pokračování)

Poskytnuto za poplatek - Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství - Martina Drabantova
Rozmnozování a rozšiřování českých technických norem nebo jejich částí bez souhlasu UNMZ je porušením zákona č. 22/1997 Sb. a podléhá pokutě

ČSN EN 12952-15

Tabulka 4.1-2 (dokončení)

Značka	Popis
SS	vstříkovací voda
SA	parní ohřívák vzduchu
SL	(hrubý) popel
Sam	vzorkování
Sen	čidlo; snímač
ST	sytá pára
tot	celkem
tr	pravá (hodnota)
u	nespálené složky paliva
U	oběhové čerpadlo nebo ventilátor pro recirkulaci
VM	prchavá složka
W	stěna
Z	tepelný příkon
0	při 0 °C
1	proti směru proudění; vstupní
2	ve směru proudění, výstupní
I, II	stupně přehříváku/přehříváků
^	maximální

17 Seznam příloh

Příloha 1 - Výpočet v programu Maple dle normy ČSN 07 0302

Příloha 2 - Výpočet v programu Maple dle normy ČSN EN 12 952-15