



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

KRBOVÁ VLOŽKA PRO VYTÁPĚNÍ FIREPLACE FOR HEATING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ KALOUSEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MARTIN LISÝ, PH.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Bc. Lukáš Kalousek

Který studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

Obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

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

Krbová vložka pro vytápění

v anglickém jazyce:

Fireplace for heating

Abstrakt:

Hlavním cílem diplomové práce je provedení měření na krbové vložce Bety. Diplomová práce se skládá ze tří částí. První část se zabývá spalováním dřeva a stručným přehledem konstrukce krbových vložek. Ve druhé části je popsána konstrukce krbové vložky Bety a úpravy, které byly provedeny během vývoje. Třetí a hlavní část popisuje provedené měření a především se zaměřuje na výpočty a zhodnocení jednotlivých měřených nastavení.

Klíčová slova:

Krbová vložka, spalování, teplovodní výměník, sekundární vzduch

Abstract:

The main topic of thesis is a measurement realized on the fireplace-insert. Thesis is consists of three parts. First part is focused on wood combustion and overview of fireplace-inserts construction. Second part contains the description of fireplace-insert Bety and accomplished construction changes. Third and main part is consists from measurements, calculations and finally assessments of measurement's configurations.

Key words:

Fireplace-insert, combustion, hot-water exchanger, secondary air

Bibliografická citace:

KALOUSEK L. *Krbová vložka pro vytápění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 74s. Vedoucí práce Ing. Martin Lisý Ph.D.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a bez cizí pomoci. Vycházel jsem ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval Ing. Martinovi Lisému Ph.D., Ing. Otakarovi Štelcovi a firmě Profitall s.r.o za vstřícnost, odborné rady a odborné vedení mé diplomové práce.

OBSAH

1. ÚVOD.....	10
2. TUHÁ PALIVA.....	11
3. SPALOVÁNÍ DŘEVA.....	12
3.1. DOKONALÉ A NEDOKONALÉ SPALOVÁNÍ	13
3.1.1. Dokonalé spalování	13
3.1.2. Nedokonalé spalování	14
4. KRBOVÉ VLOŽKY	14
4.1. DĚLENÍ KRBOVÝCH VLOŽEK	14
4.2. KONSTRUKCE KRBOVÝCH VLOŽEK.....	16
5. VARIANTY ZAPOJENÍ KRBOVÝCH VLOŽEK.....	17
5.1. ZÁKLADNÍ ZAPOJENÍ.....	18
5.2. SAMOTIŽNÉ ZAPOJENÍ (BEZ ČERPADLA)	18
5.3. ZAPOJENÍ S ČERPADLEM	19
5.4. ZAPOJENÍ S ČERPADLEM A PLYNOVÝM KOTLEM.....	20
5.5. ZAPOJENÍ S ČERPADLEM, AKUMULAČNÍ NÁDRŽÍ A KOLEKTORY.....	20
6. KRBOVÁ VLOŽKA BETY	22
6.1. KONCEPCE KRBOVÉ VLOŽKY BETY.....	23
6.2. SPALOVACÍ KOMORA.....	24
6.3. TEPLOVODNÍ VÝMĚNÍK	25
6.3.1. Výpočet výkonu teplovodního výměníku	26
6.4. Sekundární vzduch	29
6.4.1. Regulace přívodu sekundárního vzduchu.....	31
7. CÍLE MĚŘENÍ A POUŽITÉ PALIVO	31
8. VÝPOČET MINIMÁLNÍHO MNOŽSTVÍ VZDUCHU A SPALIN.....	32
8.1. Minimální množství kyslíku pro spálení 1kg paliva.....	32
8.2. Minimální množství suchého vzduchu	32
8.3. Součinitel vlhkosti.....	32
8.4. Minimální množství vzduchu pro spálení 1kg paliva	32
8.5. Objem oxidu uhličitého CO ₂ ve spalinách.....	32
8.6. Objem dusíku N ₂ ve spalinách	32
8.7. Objem argonu Ar ve spalinách	32
8.8. Minimální objem suchých spalin	32
8.9. Minimální objem vodní páry vzniklé spálením 1kg paliva	33
8.10. Minimální množství páry vzniklé z vlhkého vzduchu.....	33
8.11. Minimální množství vlhkých spalin.....	33
9. MAXIMÁLNÍ MNOŽSTVÍ CO ₂ VE SPALINÁCH	33
10. VÝPOČET SOUČINITELE A	33
11. VZTAHY PRO VÝPOČET TEPELNÝCH KAPACIT	33
11.1. STŘEDNÍ MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA SUCHÝCH SPALIN.....	33
11.2. STŘEDNÍ MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA VODNÍ PÁRY.....	33
12. VZTAHY PRO VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT.....	34
12.1. REDUKOVANÝ HMOTNOSTNÍ PODÍL UHLÍKU V PALIVU.....	34
12.2. POMĚRNÁ ZTRÁTA CITELNÝM TEPEM SPALIN.....	34
12.3. POMĚRNÁ ZTRÁTA PLYNNÝM NEDOPALEM.....	34

12.4. POMĚRNÁ ZTRÁTA MECHANICKÝM NEDOPALEM	34
13. VZTAHY PRO VÝPOČET ÚČINNOSTI	35
14. VZTAHY PRO VÝPOČET TEPELNÉHO PŘÍKONU A VÝKONU KRBOVÉ VLOŽKY	35
14.1. TEPELNÝ PŘÍKON	35
14.2. TEPELNÝ VÝKON	35
15. POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	36
15.1. ANALYZÁTOR SPALIN INFRALYT 5000	36
15.2. KALORIMETR	37
15.3. DIGITÁLNÍ TEPLMĚR M 305	37
15.4. TAHOMĚR	38
15.5. MĚŘIČ VLHKOSTI WHT 740	38
16. ZAPOJENÍ MĚŘÍCÍCH OKRUHŮ	39
17. JEDNOTLIVÁ NASTAVENÍ PRO MĚŘENÍ	40
17.1. NASTAVENÍ Č.1	41
17.1.1. Parametry měření:	41
17.1.2. Střední naměřené hodnoty a grafy:	41
17.1.3. Výpočet:	43
17.1.4. Tabulka vypočtených hodnot	44
17.1.5. Zhodnocení měření:	44
17.2. NASTAVENÍ Č. 2.....	45
17.2.1. Parametry měření:	45
17.2.2. Střední naměřené hodnoty a grafy:	45
17.2.3. Výpočet:	47
17.2.4. Tabulka vypočtených hodnot	48
17.2.5. Zhodnocení měření:	48
17.3. NASTAVENÍ Č. 3.....	50
17.3.1. Parametry měření:	50
17.3.2. Střední naměřené hodnoty a grafy:	50
17.3.3. Výpočet:	52
17.3.4. Tabulka vypočtených hodnot	53
17.3.5. ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ:	53
17.4. NASTAVENÍ Č. 4.....	54
17.4.1. Parametry měření:	54
17.4.2. Střední naměřené hodnoty a grafy:	54
17.4.3. Výpočet:	56
17.4.4. Tabulka vypočtených hodnot	57
17.4.5. Zhodnocení měření:	57
18. VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ VŠECH MĚŘENÍ.....	58
19. NAVRHOVANÉ ZMĚNY	62
19.1. ZMĚNA Č.1	62
19.2. ZMĚNA Č.2	62
19.3. ZMĚNA Č.3	62
20. ZÁVĚR.....	64
21. POUŽITÁ LITERATURA	65
22. PŘÍLOHY.....	66

1. Úvod

V posledních letech je značný nárůst poptávky domácích topenišť a tím jsou kladeny vyšší nároky na jejich výrobu. Pokud chtějí výrobci uspět na dnešním trhu, tak jejich výrobky musejí být minimálně na stejné úrovni jako výrobky konkurenčních firem. To zapříčiňuje to, že výroba a projekce domácích topenišť zaznamenává značný pokrok. Výrobci jsou nuceni inovovat své výrobky a díky tomu dnešní trh nabízí široký sortiment domácích topenišť.

V první části se tato práce zabývá obecným pohledem na domácí topeniště v podobě krbových vložek. Dále je v této části zmíněno, jak vypadá běžná konstrukce krbových vložek. Ta je v praxi samozřejmě upravena podle návrhu konkrétního výrobce. Obecná část práce se také okrajově zabývá palivem a to především dřevem, které je nejvíce využíváno při vytápění krbovou vložkou.

Ve druhé části se již práce zaměřuje na konkrétní typ krbové vložky. Jedná se o krbovou vložku pocházející z výroby firmy Profitall spol. s r.o. . Tato krbová vložka nese výrobní název Bety. Tato část práce se zaměřuje na detailní popis Bety. V průběhu vývoje došlo k několika inovačním krokům. Tyto změny jsou v práci popsány.

Poslední a hlavní část práce se zaměřuje na experimentální měření Bety. Toto měření proběhlo ve výrobních prostorách firmy Profitall. Provedena byla především podrobná analýza spalin na výstupu z krbové vložky a dále měření teplovodního výkonu. Měření proběhlo v souladu s normou *ČSN EN 13229 Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva- požadavky a zkušební metody*. Tato norma nahrazuje ČSN 06 1201 z roku 1985. Závěrečná část je zaměřena na zhodnocení naměřených výsledků a přínosu jednotlivých inovačních kroků.

2. Tuhá paliva

Paliva jsou látky, které jsou schopny za vhodných podmínek začít a udržet chemickou reakci spalování. Dále se budeme zabývat palivem v podobě dřeva, které se vyskytuje v pevném skupenství. Jedná se tedy o palivo tuhé. Mezi tuhá paliva se dále řadí uhlí, koks nebo brikety.

Dřevo je palivo, které je vzhledem k produkci CO₂ neutrální. Bilance CO₂ je tedy nulová. Je to dáno tím, že množství oxidu uhličitého, které je vyprodukováno při spálení určitého množství paliva je spotřebováno při růstu stejného množství dřevní hmoty. Díky nulové bilanci CO₂ dřevo nepřispívá ke skleníkovému efektu.

Složení dřeva:

- Hořlavina (H)
- Popelovina (A)
- Voda (V)

Vliv jednotlivých složek:

Obsah **hořlaviny** v palivu ovlivňuje míru zápalnosti paliva. Hořlavina se v palivu vyskytuje ve dvou formách a to ve formě vázané hořlaviny (neprchavá) a prchavé hořlaviny. Prchavá hořlavina se v palivu vyskytuje v největším poměru a to až 95%. Prchavá hořlavina se uvolňuje při zahřátí paliva a má největší vliv na jeho zápalnost. Dřevo obsahuje velké množství prchavé hořlaviny a jeho zápalná teplota se tedy pohybuje v rozmezí teplot 180°C-260°C. Množství prchavé hořlaviny ovlivňuje návrh spalovací komory a přívodu vzduchu. Pro skladování paliva, je podíl prchavé hořlaviny velmi důležitý, protože ovlivňuje reaktivitu paliva. U paliva obsahujícího vysoký podíl prchavé hořlaviny vzniká riziko samovznícení. Toto riziko platí zejména pro uhlí.

Popelovina a voda

Popelovina a voda tvoří nehořlavou část paliva. Nepříznivě ovlivňují spalovací procesy a konstrukci spalovacích zařízení.

Popelovina se ve dřevě vyskytuje v malém množství - zhruba 1%. Skládá se např. ze síranu, uhličitanů, křemičitanů.



Charakteristické teploty popela

- Teplota měknutí t_a
- Teplota tání t_b
- Teplota tečení t_c

Charakteristické teploty popela ovlivňují teploty teplosměných ploch. Ty totiž nesmějí překročit tyto teploty, aby nedošlo k napékání popela na teplosměné plochy.

Obsah vody snižuje kvalitu paliva a zvyšuje nároky na jeho úpravu- především sušení. Voda se ve dřevě vyskytuje v širokém rozmezí 20%-50% v závislosti na jeho skladování. Pro spalování dřeva v krbových vložkách se snažíme dosáhnout co nejnižšího obsahu vody.

Voda se vyskytuje v palivu ve dvou formách:

- Volná
- Kapilárně vázaná

Dalším prvkem, který výrazně ovlivňuje vlastnosti paliva je **síra**. Obsah síry v palivu je nežádoucí. Síra je obsažena v popelovině i hořlavině.

Vliv výskytu síry v palivu:

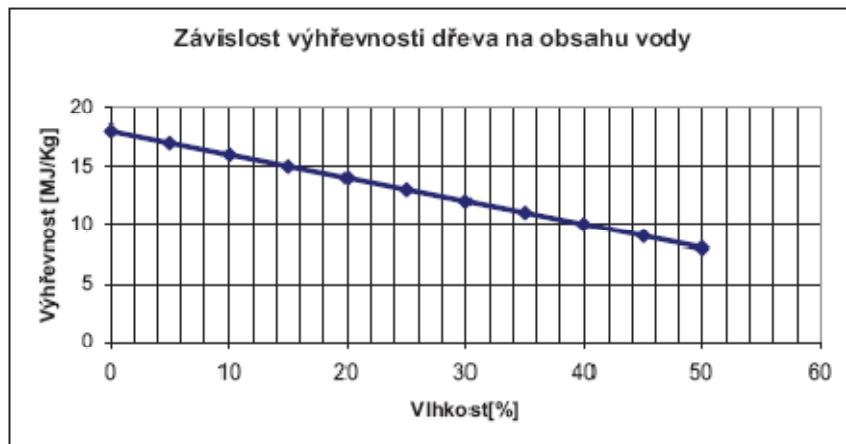
- Snižuje výhřevnost paliva
- Zvyšuje podíl SO₂ ve spalinách
- Nízkoteplotní koroze → nižší životnost zařízení
- Zvyšuje teplotu rosného bodu spalin
- Snižuje charakteristické teploty popele- teplota měknutí, tání a tečení

V palivu se také vyskytuje **chlor**, který má nepříznivý vliv na korozi materiálů. Také je nežádoucí z hlediska tvorby polychlorovaných bifenyly, které jsou v poslední době bedlivě sledovány.

3. Spalování dřeva

Na spalování dřeva má největší vliv jeho vlhkost. Dřevo (jako každá jiná rostlina) obsahuje velký podíl vody. To je zapříčiněno tím, že hlavní složkou dřeva je celulóza, která na sebe dobře váže vodu. Pokud dřevo vysušíme a uložíme jej ve vlhkém prostředí, tak dojde k opětovnému zvýšení vlhkosti.

Při zahřívání dřeva nejprve dochází k uvolňování vlhkosti. Voda se z dřeva odpařuje i v případě, že dřevo již na povrchu hoří plamenem. Je to způsobeno nízkou tepelnou vodivostí dřeva. Tento případ nastane především při spalování větších kusů dřeva. Odpařování vody pro nás znamená energetickou ztrátu. Voda má vysoké výparné teplo, takže tato ztráta je znatelná a mělo by být snahou ji zamezit. Postupným odpařováním vody dochází k ochlazení dřeva a tím je zamezeno nárůstu teploty. Teplota se zvýší až po odpaření vody z paliva. Teprve po tepelném nárůstu dochází k uvolňování prchavé hořlaviny. Prchavá hořlavina nese zhruba polovinu tepelné energie, která je ve dřevě obsažena. Pod rošt je přiváděn primární vzduch, který zajišťuje hoření, při kterém dochází k uvolňování prchavé hořlaviny. Tato směs hoří dlouhým plamenem. Jelikož by plamen neměl být ochlazen, tak je návrh topeniště značně zkomplikován a to především pro topeniště malých rozměrů. Při tomto spalování ale nedojde k úplnému vyhoření prchavé složky, protože je buď nízká teplota spalování, nebo nedostatek kyslíku. Pokud je přivedeno velké množství vzduchu, tak dochází k ochlazení plamene a vznikají saze. V druhém případě, kdy je přivedeno malé množství kyslíku, tak dochází k nedokonalému spalování a vzniku oxidu uhličitého. Z toho vyplývá, že je potřeba dosáhnout dostatečné teploty pro spalování a zároveň optimálního množství vzduchu. Spalovací komora tedy musí být izolována, aby neuvolňovala zbytečně velké množství tepla. Do horní části spalovací komory se zavádí sekundární vzduch. Tím je dosaženo dohoření zbylé prchavé hořlaviny. Dohořením prchavé složky se uvolní zbylá energie obsažená v palivu.



Graf 1. Závislost výhřevnosti dřeva na obsahu vody

Délka plamene ovlivňuje návrh rozměrů spalovací komory. Je nutné zamezit styku plamene s teplosměnnými plochami, aby nedocházelo k jeho ochlazení a vzniku sazí. Při spalování také dochází ke vzniku polévatého popílku, který zanáší teplosměnné plochy a popela, který zůstává na roštu.

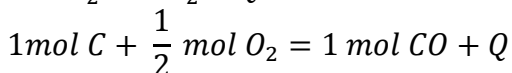
3.1. Dokonalé a nedokonalé spalování

3.1.1. Dokonalé spalování

Dokonalé spalování probíhá s přebytkem vzduchu $\alpha=1$. Hlavními produkty dokonalého spalování jsou CO_2 a H_2O .

Rovnice popisující dokonalé spalování:

Spalování C na CO_2

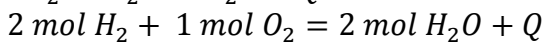


$$12,01 \text{ kg C} + 32 \text{ kg O}_2 = 44,01 \text{ kg CO}_2 + 407260 \text{ kJ}$$

$$12,01 \text{ kg C} + 22,39 \text{ m}_n^3$$

$$1 \text{ kg C} + 1,865 \text{ m}_n^3 = 1,854 \text{ m}_n^3 + 33910 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Spalování H na H_2O

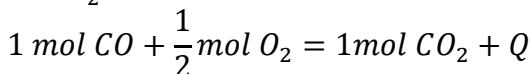


$$4,032 \text{ kg H}_2 + 32 \text{ kg O}_2 = 36,032 \text{ kg H}_2\text{O} + 486179 \text{ kJ}$$

$$4,032 \text{ kg H}_2 + 22,39 \text{ m}_n^3 + 44,80 \text{ m}_n^3$$

$$1 \text{ kg H}_2 + 5,553 \text{ m}_n^3 = 11,11 \text{ m}_n^3 + 120580 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Spalování CO na CO_2



$$28 \text{ kg CO} + 16 \text{ kg O}_2 = 44 \text{ kg CO}_2 + 255349 \text{ kJ}$$

3.1.2. Nedokonalé spalování

Nedokonalé spalování probíhá za podstechiometrického stavu. Produktem nedokonalého spalování je jedovatý plyn CO.

Rovnice popisující nedokonalé spalování



$$1 \text{ mol } C + \frac{1}{2} \text{ mol } O_2 = 1 \text{ mol } CO + Q$$

$$12,01 \text{ kg } C + 16 \text{ kg } O_2 = 28,01 \text{ kg } CO + 151866 \text{ kJ}$$

$$12,01 \text{ kg } C + 11,95 \text{ m}_n^3 = 22,50 \text{ m}_n^3$$

$$1 \text{ kg } C + 0,932 \text{ m}_n^3 = 1,873 \text{ m}_n^3 + 12645 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

4. Krbové vložky

Krbové vložky jsou tepelná zařízení, která jsou používána pro vytápění především obytných prostorů. Předchůdcem krbových vložek je krb s otevřeným ohništěm.

4.1. Dělení krbových vložek

Jak již bylo výše uvedeno, tak široká nabídka dnešního trhu, nutí výrobce inovovat své výrobky. Na základě toho existuje mnoho druhů krbových vložek. Jednotlivé druhy se liší např. materiálem ze kterého jsou vyrobeny, konstrukce nebo použitého paliva.

Dělení podle materiálu:

- celolitinové
- ocelové
- kombinované

Dělení podle konstrukce:

- jednoplášťové
- dvouplášťové
- s teplovodním výměníkem
- s rozvodem horkého vzduchu
- kombinované
- s šamotovým topeništěm
- s ohništěm vyloženým vermikulitem
- prosklené
- výsuvné

Dělení podle použitého paliva:

- zemní plyn, propan-butan
- dřevo, dřevěné brikety
- uhlí, koks

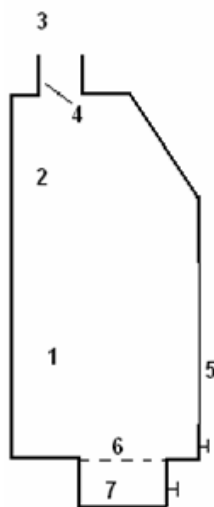
Z výše uvedeného dělení vyplývá, že existuje nepřehledné množství konstrukcí krbových vložek. Nelze ale přesně určit, která varianta je nejvhodnější. Vždy záleží na požadavcích, které jsou kladeny na výrobek a jakým způsobem bude používán. Litina má oproti oceli například lepší akumulaci tepelné vlastnosti. Ale oproti tomu je ocel lépe tvarovatelná. Dnešní oceli také dosahují velmi dobrých tepelných vlastností. Záleží tedy na tom, jestli krbová vložka má sloužit jako primární zdroj tepla, nebo pouze jako estetický prvek. V dnešní době, se na trhu vyskytuje velké množství krbových vložek, jejichž výkon a životnost jsou na nízké úrovni. Z energetického hlediska nejsou tyto typy krbových vložek vhodné pro vytápění, ale pokud má být krbová vložka využita především jako estetický prvek, tak je zcela vyhovující. Pořizovací cena je nízká, ale návratnost minimální.

Jako další velmi důležité dělení lze uvést dělení podle způsobu využití tepla. Krbová vložka může sloužit k vytápění místnosti ve které je situována, nebo k vytápění i okolních místností. Vytápění okolních místností může být provedeno buď rozvodem teplé vody z teplovodního výměníku, rozvodem horkého vzduchu, nebo kombinací obou systémů. Tato volba velmi ovlivní výběr krbové vložky, protože na těchto požadavcích je závislý potřebný tepelný výkon a cena krbové vložky.

Poslední uvedené dělení je podle použitého paliva. Nejčastějším palivem krbových vložek je dříví. U těchto typů krbových vložek, je největší nevýhodou problém se skladováním paliva. Dříví musí nejprve vyschnout a při skladování zabírá velký prostor. Další nevýhodou je omezená regulace hoření a relativně velké množství popela. I přes tyto nevýhody je dřevo nejčastěji využívaným palivem krbových vložek. Uhlí má oproti dříví výhodu zejména při topení v průběhu noci. Dříví vyhoří příliš rychle a po dlouhý časový úsek se vůbec netopí. Krbové vložky na uhlí se ale téměř nevyrábějí. Při spalování uhlí, dochází ke vzniku vysokých teplot a to komplikuje návrh spalovacího prostoru a odvodu tepla. Dále jsou také zvyšovány nároky kladené na materiály a tím i cena. Posledním typem jsou krbové vložky na plyn. Největší výhodou tohoto typu krbové vložky je okamžitá a přesná regulace hoření. Jako další výhoda je přívod paliva. U tohoto typu krbové vložky odpadá problém se skladováním paliva.

Dělení krbových vložek lze shrnout tak, že nelze přesně určit nejvhodnější materiál, konstrukci, nebo palivo. Tato volba vždy závisí na požadavcích budoucího uživatele, co od výrobku očekává a k čemu má primárně sloužit. Další faktor, který může tento výběr ovlivňovat jsou ceny paliva, které jsou ovšem proměnné .

4.2. Konstrukce krbových vložek



Obr. 1 Koncepce krbové vložky

1. Spalovací komora

Návrh spalovací komory je nejdůležitější část konstrukce krbové vložky. Její tvar a rozměry ovlivňují samotný průběh hoření. Spalovací komory se liší podle druhu použitého paliva. Například dřevo, které hoří dlouhým plamenem, vyžaduje spalovací komoru větších rozměrů. Rozměry spalovací komory také limitují velikost přikládaného paliva. To opět platí především pro kusové dříví. Spalovací komora je vyložena žáruvzdorným materiálem, který chrání stěny krbové vložky před vysokými teplotami a tím se zvyšuje její životnost. Dále žáruvzdorný materiál slouží jako tepelná izolace, pro dosažení požadovaných teplot pro spalování. Spalovací komora je rozdělena na dvě hlavní části. Ve spodní části, kam je přiváděno palivo a primární vzduch, dochází k zapalování a hoření paliva. V tomto prostoru se palivo zahřívá a postupně uvolňuje prchavou hořlavinu. Regulace se provádí množstvím přiváděného primárního vzduchu. V horní části spalovací komory dochází ke spalování prchavé hořlaviny. Do této sekce se zavádí sekundární vzduch, který podporuje hoření prchavé hořlaviny. Tím se zvyšuje účinnost spalování.

2. Kouřová komora

Kouřová komora je prostor nad spalovací komorou, do kterého je odváděn kouř. V počáteční fázi hoření, kdy krbová vložka a komín nejsou dostatečně vyhřáté, zde dochází také k mísení kouře a studeného vzduchu, který se vrací zpět komínem.

3. Výstupní hrdla

Hlavním výstupním hrdlem z krbové vložky je kouřovod. Ten slouží k napojení krbové vložky na komín a společně s ním zajišťuje potřebný tah. Tah komína je dán průměrem kouřovodu. Vedle kouřovodu mohou být umístěna další hrdla, která slouží k rozvodu horkého vzduchu do okolních místností. Tato cirkulace může být podpořena ventilátorem.

4. Kouřová klapka

Kouřová klapka slouží k regulaci tahu komína, nebo k jeho uzavření v době, kdy krbová vložka není používána. Při jejím úplném uzavření (tj. horizontální osa klapky svírá pravý úhel s osou kouřovodu) by nemělo dojít k úplnému uzavření komína. Proto klapka mívá zpravidla

tvár viz. Obr. 2. Klapka může být umístěna buď přímo v kouřovodu, nebo v prostoru mezi spalovací komorou a kouřovou komorou. Klapka je řízena manuálně, nebo automaticky.



Obr. 2 Kouřová klapka

5. Čelní sklo

Krbové vložky se většinou vyrábějí z jedné strany prosklené. Zpravidla bývají prosklená přední dvířka, která slouží k přikládání. Krbová vložka může být konstruována i tak, že jsou proskleny i boční stěny, nebo stěna zadní. Sklo musí být dostatečně odolné, aby nedošlo k jeho poškození. Konstrukce může být provedena i tak, že čelní sklo je za provozu oplachováno, nebo chlazeno přiváděným vzduchem.

6. Rošt

Rošt se nachází na dně spalovací komory. Na rošt se přikládá palivo a zároveň slouží k odvodu popela do popelníku, který je umístěn pod ním. Pro jednodušší manipulaci může být rošt konstruován v otočném provedení. Primární vzduch se přivádí pod rošt a skrz něj je přiváděn k palivu.

7. Popelník

Popelník se nachází pod spalovací komorou a slouží k shromažďování odvedeného popela.

5. Varianty zapojení krbových vložek

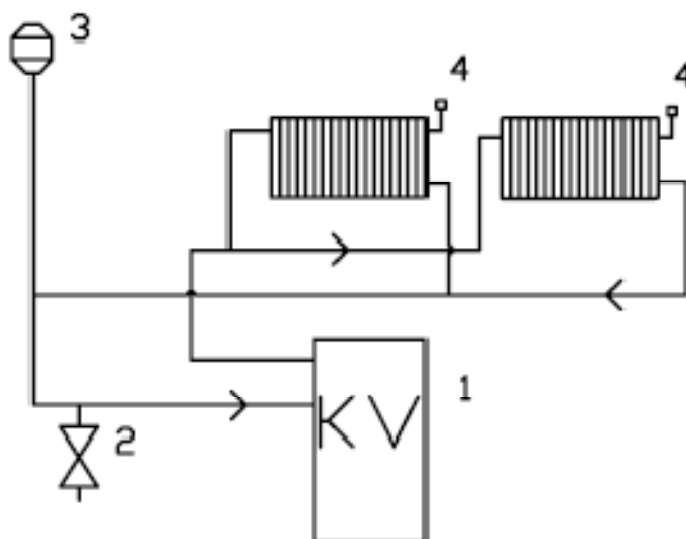
Zapojení krbové vložky s teplovodním výměníkem do topného okruhu je možné provést několika různými způsoby. Při výběru vhodného zapojení především záleží na tom, jestli krbová vložka bude sloužit jako primární zdroj tepla, nebo jestli bude plnit funkci zdroje sekundární. Krbová vložka může být zapojena v kombinaci s plynovým kotlem, solárními panely, nebo akumulací nádrží. Existuje spousta variant zapojení. Také záleží na tom, jestli je krbová vložka s teplovodním výměníkem, tudíž bude teplo rozváděno do radiátorů, nebo bude rozváděn pouze horký vzduch. Níže jsou uvedeny různé varianty zapojení. Všechny z těchto variant se zabývají zapojením teplovodního výměníku do topného systému. Zapojení musí být provedeno podle příslušných norem.

5.1. Základní zapojení

Nejjednodušší variantou zapojení krbové vložky je prosté umístění krbové vložky do vytápěné místnosti. Krbová vložka není v tomto případě vybavena teplovodním výměníkem a není ani proveden rozvod horkého vzduchu. Dochází tedy k vytápění pouze místnosti, ve které je vložka instalována. Toto zapojení je vhodné např. do chat, kde je potřeba vytápat jen malý prostor. Krbové vložky, které jsou využity pro toto zapojení, bývají většinou menších výkonů.

5.2. Samotížné zapojení (bez čerpadla)

Princip samotížného systému je založen na základním fyzikálním jevu- teplá voda stoupá vzhůru a studená voda klesá dolů. Tento systém pracuje bez oběhového čerpadla a cirkulace je tedy přirozená. Výhodou tohoto systému je, že při výpadku proudu nedochází k zastavení cirkulace vody v topném okruhu a tím tedy nevzniká riziko, že voda začne ve výměníku vřít. Další výhodou je, že odpadá ze zapojení čerpadlo, tedy jeden z prvků, který při poruše odstavuje systém z provozu. Při tomto zapojení musí být dodrženo, že krbová vložka se nachází v nejnižším bodě topného systému, aby se studená voda bez odporu vracela zpět do teplovodního výměníku. Na rovných úsecích musejí být dodrženy dané spády, které vycházejí z parametrů potrubí. Odvzdušnění je v nejvyšším bodě topného okruhu.

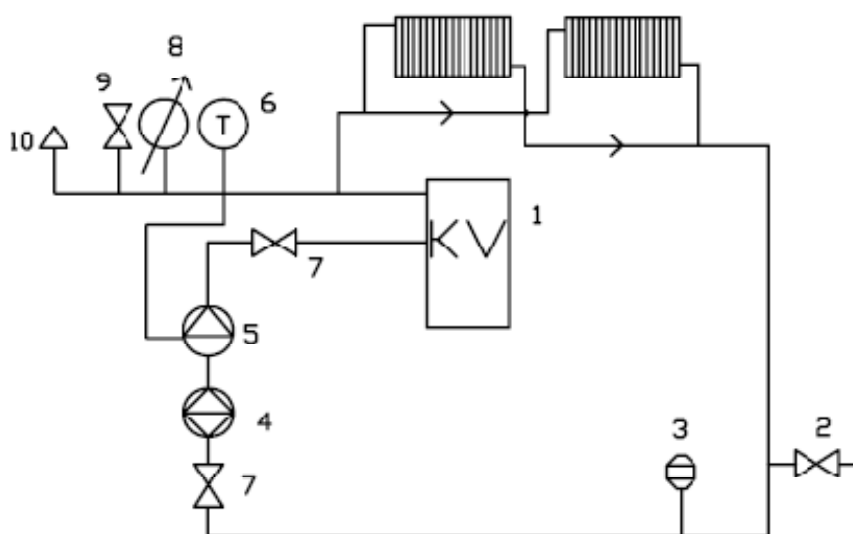


Obrázek 3 Schéma samotížného zapojení

1. krbová vložka
2. armatura k napouštění a vypouštění okruhu
3. expanzní nádrž
4. odvzdušnění

5.3. Zapojení s čerpadlem

Hlavním rozdílem mezi zapojením s nuceným a přirozeným oběhem je zapojení oběhového čerpadla (OČ) do topného okruhu. To přináší několik dalších změn v zapojení. Krbová vložka nemusí být v tomto případě umístěna v nejnižším bodě topného okruhu. Při tomto zapojení nastává problém, pokud dojde k výpadku elektřiny. Tím nedochází k napájení OČ a mohlo by nastat vaření vody v teplovodním výměníku. V takové situaci je nutné přerušit dodávku paliva do krbové vložky a utlumit hoření, pokud není okruh nijak chráněn proti této situaci. Jako jeden z možných prvků ochrany je připojení náhradního zdroje pro OČ. Pokud dojde k výpadku dodávky el. proudu, tak čerpadlo je napájeno z tohoto zdroje. Zdroj ovšem musí mít dostatečnou kapacitu. Pokud je zdroj (akumulátor) vybit, je nutné opět přerušit hoření. V bodě 6 je připojen příložný termostat, který je zapojen na topné větvi a dává signály OČ pro jeho sepnutí, nebo vypnutí na základě teploty topné vody.

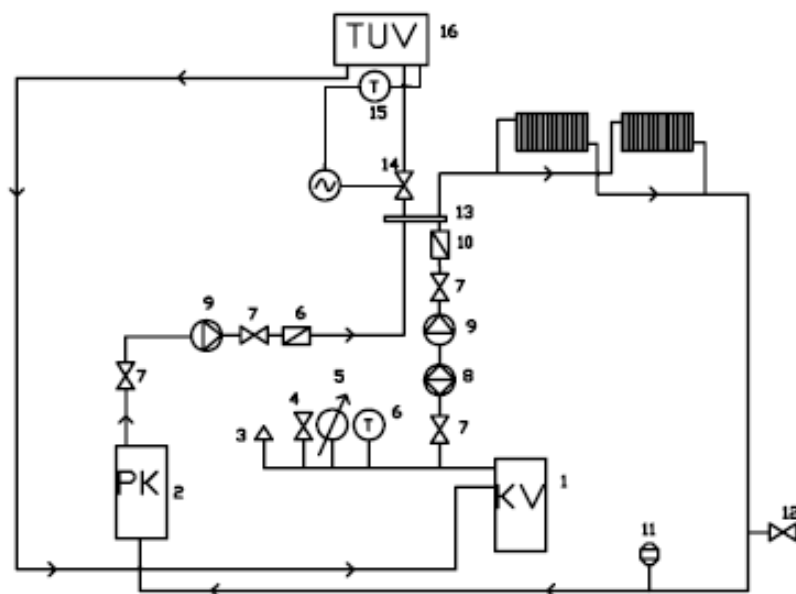


Obrázek 4 Schéma zapojení s čerpadlem

- | | |
|--|-------------------------|
| 1. krbová vložka | 7. uzavírací armatura |
| 2. armatura k napouštění a vypouštění okruhu | 8. manometr |
| 3. expanzní nádrž | 9. odvzdušňovací ventil |
| 4. filtr | 10. pojistný ventil |
| 5. oběhové čerpadlo | |
| 6. příložný termostat | |

5.4. Zapojení s čerpadlem a plynovým kotlem

V tomto zapojení slouží krbová vložka pouze jako vedlejší zdroj tepla. Hlavním zdrojem je plynový kotel. Krbová vložka slouží pouze k přitápění. Výhodou tohoto systému je, že dochází k vytápění i v případě odstavení krbové vložky z provozu. To znamená, že pokud obsluha není doma a není zabezpečen přísun paliva do krbové vložky, tak obytné prostory jsou nepřetržitě vytápěny. Což nenastává v případě, kdy krbová vložka je primárním zdrojem tepla. Topná voda z krbové vložky je směřována ve směšovači (bod 13) s topnou vodou z plynového kotle. Kde následně odchází jak do ústředního topení, tak do zásobníku TUV. Oběhové čerpadlo je opět spínáno na základě teploty vody.



Obrázek 5 Schéma zapojení s čerpadlem a plynovým kotlem

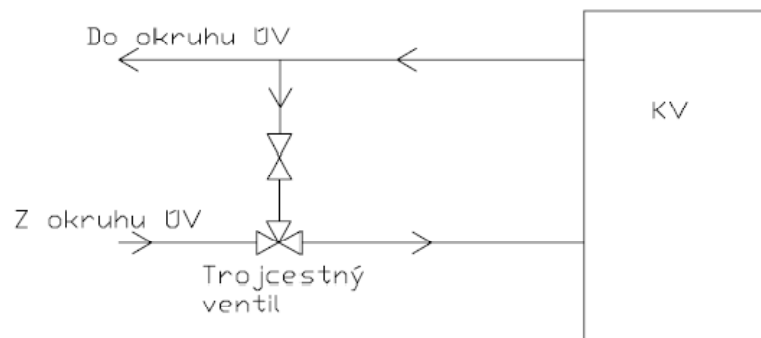
- 2. plynový kotel
- 10. zpětná klapka
- 13. rozdělovač
- 15. impulsní teplotní čidlo
- 16. zásobník TUV

5.5. Zapojení s čerpadlem, akumulací nádrží a kolektory

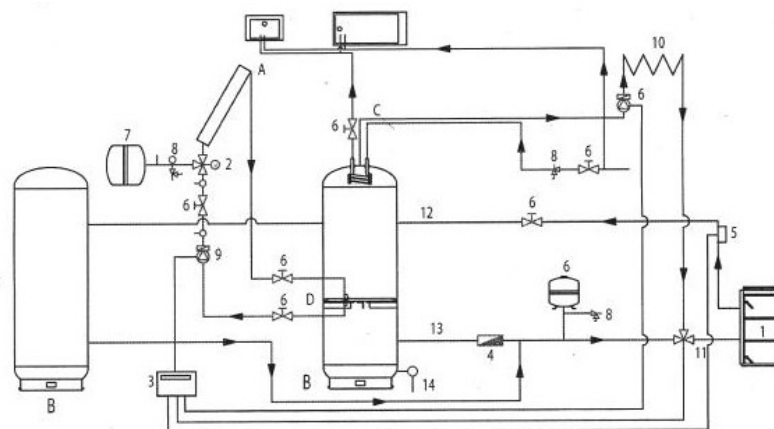
Krbová vložka může být použita jako primární zdroj tepla, pokud je zapojena v kombinaci s akumulací nádrží. Tím odpadá nevýhoda, že je přerušena dodávka tepla v případě přerušení dodávky paliva do krbové vložky. V takovém případě je totiž teplo dodáváno z akumulací nádrže. Dodávka tepla je tedy zaručena i v nepřítomnosti obsluhy, ale akumulací nádrž musí být dopředu "nabita". To si klade za požadavek zvýšení výkonu. Krbová vložka musí tedy být provozována v tuto dobu na vyšší výkon, než který by byl potřebný k vytápění daných prostorů. Tento systém může být dále podpořen zapojením solárních kolektorů do okruhu. Solární kolektory dodávají teplo do okruhu nepřetržitě. Pro solární kolektory ovšem platí omezení. Toto omezení vzniká s plochou kam kolektory umístit. Solární kolektor nemá

vysoký výkon a je tedy nutné mít dostatečně velkou plochu, pro jejich umístění. Záleží na tom, jak velký výkon je od kolektoru požadován.

V tomto okruhu je také zapojen trojcestný termostatický směšovací ventil. Tento ventil je uveden pouze v tomto zapojení, ale to je pouze z důvodu poukázání na rozdílnost systémů. Trojcestný ventil by měl být zapojen v každém systému s teplovodním výměníkem. Je to z toho důvodu, že při spalování pevných paliv se ve spalinách vyskytuje voda ve formě vodní páry. Pokud nedojde k ochlazení spalin, tak vodní pára odchází společně se spalinami komínem do ovzduší. Pokud ale dojde k ochlazení spalin, tak vodní pára zkondenzuje a způsobuje korozi a zanášení teplosměných ploch. K tomuto ochlazení může dojít na stěnách teplovodního výměníku. Zejména při roztápění, kdy je voda ve výměníku studená dochází k ochlazení spalin o stěny teplovodního výměníku. Pokud se do topného okruhu zapojí trojcestný ventil, tak je v počáteční fázi ohříváno menší množství vody. Voda ve výměníku tedy dosáhne vyšší teploty za kratší dobu. Po té je voda směšována s vodou studenou tak, aby byla vstupní voda do teplovodního výměníku udržována na požadované teplotě. Tento systém výrazně prodlužuje životnost teplovodního výměníku a je tedy nutnou součástí.



Obrázek 6 Zapojení trojcestného ventilu



Obrázek 7 Schéma zapojení s čerpadlem, akumulací nádrží a kolektory

- | | |
|----------------------|--------------------------|
| 2. trojcestný ventil | 14. odkalení, vypouštění |
| 3. řídicí systém | A. kolektory |
| 5. termostat | B. akumulací nádrž |
| 6. kulový ventil | |

6. Krbová vložka Bety

Krbová vložka Bety pochází z výroby firmy profitall s r.o. Firma vyrábí celou řadu krbových vložek a krbových kamen o různých výkonech.

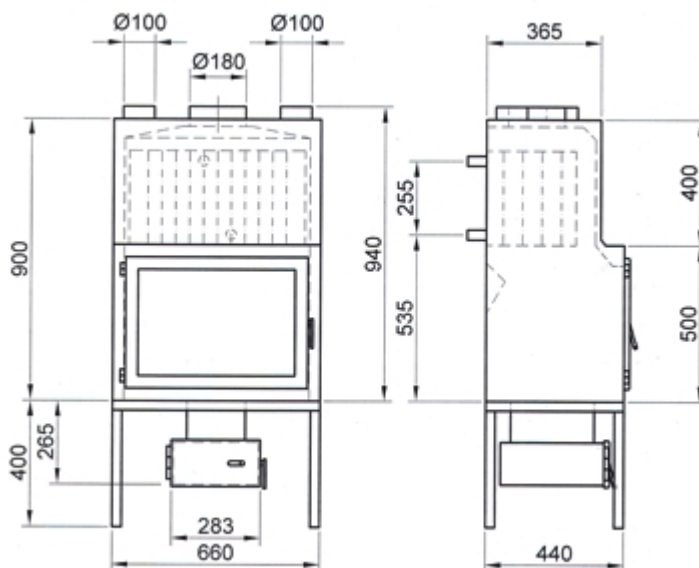
Celkový jmenovitý tepelný výkon	20 kW
Jmenovitý tepelný výkon teplovodního výměníku	16 kW
Výkonový rozsah teplovodního výměníku	4-19 kW
Jmenovitý teplovzdušný výkon	4 kW
Průměr kouřovodu	180 mm
Provozní tah	20 Pa
Výška krbové vložky	1165 mm
Výška krbové vložky s podstavcem	1300 mm
Šířka	660 mm
Hloubka	440 mm
Hmotnost	195 kg

Tab. 1 Technické parametry krbové vložky Bety



obr. 8 Krbová vložka Bety

6.1. Koncepce krbové vložky Bety



Obr. 9 Koncepce krbové vložky Bety

Krbová vložka BETY je určena pro vytápění objektů dřevem a dřevěnými briketami. V souladu s trendem využívání krbových vložek k ústřednímu vytápění je u krbové vložky BETY maximálně možný podíl tepelného výkonu převáděn do teplovodního výměníku (16 kW, tj. 80% celkového výkonu). Teplovzdušný výkon je tím omezen na možné minimum (4 kW, tj. 20% celkového výkonu). Celkový tepelný výkon krbové vložky BETY je 20 kW. Tato koncepce umožňuje trvalý provoz krbové vložky na plný výkon bez přetápění místnosti ve které je umístěna. Krbová vložka BETY je ideálním řešením pro vytápění celých objektů, zejména v kombinaci s akumulací nádrží. Nádrž akumuluje nadbytečný teplovodní výkon a po ukončení provozu krbové vložky zpětně otáčí celý objekt. Vysoké účinnosti je dosaženo originální konstrukcí krbové vložky s řízenou cestou spalin přes výměník a spalinový ohoz a optimálním dochlazováním spalin ve výměníku se speciálními rozvířovacími plechy. Rozvířovací plechy se zároveň využívají pro čištění teplosměnných ploch výměníku. Těleso vložky je dvouplášťové a je svařeno z ocelových plechů. Zadní a boční stěny spalovací komory jsou vyloženy žáruvzdornými deskami, dno je ze žarobetonu. Krbová vložka BETY je vybavena výklopným roštem. Hrdlo pro odtah spalin je umístěno v horní části krbové vložky, stejně jako 2 hrdla pro možné připojení teplovzdušného rozvodu. Regulace výkonu krbové vložky množstvím primárního vzduchu je umístěna na dvířkách popelníku. Konstrukční provedení krbové vložky umožňuje vybírání popelníku z čelní strany, nebo na přání zákazníka i z prostoru za krbovou vložkou. [2]

6.2. Spalovací komora

Hlavní část spalovací komory má rozměry 440x500x660. Jak je zřejmé z obr. 9, tak spalovací komora přechází do části, kde je umístěn teplovodní výměník. Spalovací komora je vyložena žáruvzdorným materiálem. Dno spalovací komory je vyzděno žáruvzdorným betonem a opatřeno otočným roštem pro odvod popela. Primární vzduch je do spalovací komory přiváděn přes popelník, který je umístěn vně krbové vložky, jak je patrné na obr. 9. Do spalovací komory je dále přiváděn vzduch sekundární. Ten je přiváděn do horní části spalovací komory obr. 10 Dvířka na čelní stěně jsou prosklená.



Obr. 10 Spalovací komora



Obr. 11 Přívod a regulace primárního vzduchu

6.3. Teplovodní výměník

Od svého prvního návrhu prošla krbová vložka Bety vývojem a určitými inovačními kroky. Jedna z hlavních změn byla provedena v oblasti teplovodního výměníku. Původní teplovodní výměník byl vodotrubného typu. Tento typ teplovodního výměníku měl řadu nevýhod. Aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti a provozního komfortu, museli být provedeny změny. Původní teplovodní výměník vodotrubného typu byl nahrazen typem novým.

Nevýhody vodotrubného teplovodního výměníku:

- Náročná výroba
- Vysoká výrobní cena
- Časté zanášení teplosměnných ploch
- Komplikovaná čistitelnost teplosměnných ploch

Konstrukční znaky nového teplovodního výměníku

- Použitý materiál- ocel 11 523.1 a 11 353.1
- Rozměry žárových trubek- 60,3 x 3,2 – 376
- Počet žárových trubek 22 ks

Jako nový typ teplovodního výměníku byl zvolen výměník žárotrubný. Nevýhody předešlého typu byly odstraněny. Výrobní postup je jednodušší a tím jsou sníženy i výrobní náklady. Konstrukce výměníku je zřejmá z obr. 12. Pro zvýšení teplovodního výkonu výměníku a pro snížení teploty spalin na výstupu z krbové vložky, byla použita tělesa, která jsou vložena uvnitř žárových trubek. obr. 13. Ty slouží ke zpomalení průchodu spalin spalinovými trubkami výměníku. Tepelná ztráta, která je způsobena citelným teplem spalin je tedy snížena. Tyto plechy mohou být dále použity při čištění výměníku. Tato varianta se nejeví jako zcela ideální. Tělíska jsou do žárových trubek vkládána shora. To je provedeno před tím, než je teplovodní výměník zabudován do krbové vložky. Po zabudování teplovodního výměníku je možný přístup jen k několika tělískům a to skrz kouřovod. Ostatní tělíska jsou zakryta pláštěm v horní části krbové vložky. To omezuje manipulaci s tělísky a zabraňuje jejich vyjmutí. Tím pádem lze větší část trubek čistit jen velmi omezeně. Po určité době provozu dojde k zanesení žárových trubek, které nebude možné odstranit a tepelný výkon výměníku může být výrazně snížen. Jedno z možných řešení je, že by plechy byly vkládány do výměníku ze spodní části. Při tomto řešení by byli vyjímatelné ze spalovací komory. Po jejich vyjmutí je možné žárové trubky snadno vyčistit. Původní výrobní variantou těchto tělísek byl plech, který byl stočen do spirály. Tato výrobní varianta byla značně komplikovaná a nebylo dosaženo požadovaných výsledků. Proto se tedy přešlo a zůstalo na variantě stávající.



Obr. 12 Teplovodní výměník



Obr. 13 Výměníkové tělísko

6.3.1. Výpočet výkonu teplovodního výměníku

Prandtlovo číslo

$$P_R = \frac{c_p * \nu}{\lambda_s} = \frac{1370 * 56,5 * 10^{-6}}{54,3 * 10^{-3}} = 1,42 \quad [-]$$

λ_s - dle tabulky pro střední teplotu proudu spalin

Rychlost proudění spalin

$$u = \frac{\dot{m}_{SP}}{n_{TR} * S} = \frac{0,0169}{0,0621} = 0,272 \quad [m/s]$$

$n_{TR} = 22$

$\dot{m}_{SP} =$ dodané firmou Profitall na základě měření

Reynoldsovo kritérium

$$R_e = \frac{u * d}{\nu} = \frac{0,272 * 0,06}{56,5 * 10^{-6}} = 288 \quad [-]$$

Součinitel prostupu tepla u spalín

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_s}{d} * 0,023 * R_e^{0,8} * P_R^{0,4} = \frac{54,3 * 10^{-3}}{0,06} * 0,023 * 288^{0,8} * 1,42^{0,4} = 2,22$$

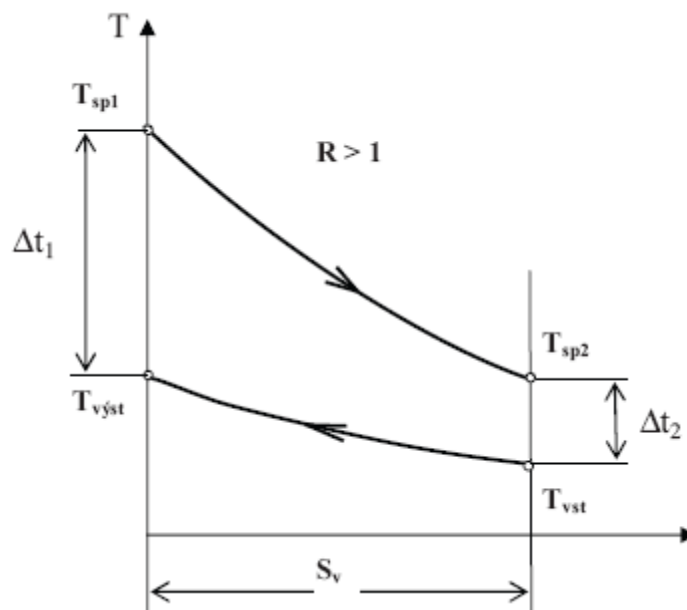
Součinitel přestupu tepla u vody bude ve výpočtu zanedbán. Je to z toho důvodu, že vycházíme z následujícího vztahu:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Kde α_1 – součinitel přestupu tepla u vody
 α_2 – součinitel přestupu tepla u spalín

$$\alpha_1 \gg \alpha_2 \rightarrow k \approx \alpha_2$$

k – součinitel přestupu tepla

Střední logaritmický spád pro protiproudé proudění

Graf 1 Střední log. spád pro protiproudé proudění

$$\Delta T_{LN} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

$$\Delta T_1 = T_{sp1} - T_{vyst} = 550 - 56 = 494 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta T_2 = T_{sp2} - T_{vst} = 192 - 10 = 182 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta T_{LN} = \frac{494 - 182}{\ln \frac{494}{182}} = 312 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Teplosměnná plocha

$$S = 2 * r * l * n_{TR} = 2 * 3,14 * 0,03 * 0,376 * 22 = 1,55 \text{ [m}^2\text{]}$$

Výkon předaný spaliny

$$Q_{SP} = k * S * \Delta T_{LN} = 2,22 * 1,55 * 312 = 1,07 \text{ [kW]}$$

Průměrná teplota vody

$$T_Z = \frac{T_{vst} + T_{výst}}{2} = \frac{10 + 56}{2} = 33 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

 ΔT na výstupu z ohniště

Dle [1] str.125

$$\Delta T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

Výkon předaný sáláním stěn

$$Q_{ST} = \varepsilon * \sigma * S * (T_1^4 - T_2^4) = 0,952 * 5,67 * 10^{-8} * 1,55 * (713,15^4 - 386,15^4) = 19,7 \text{ [kW]}$$

$T_1 = 440^\circ\text{C}$ – zadáno

$$T_1 = 440 + 273,15 = 713,15 \text{ [K]}$$

$$T_2 = T_Z + \Delta t + 273,15 = 386,15 \text{ [K]}$$

$$\sigma = 5,67 * 10^{-8}$$

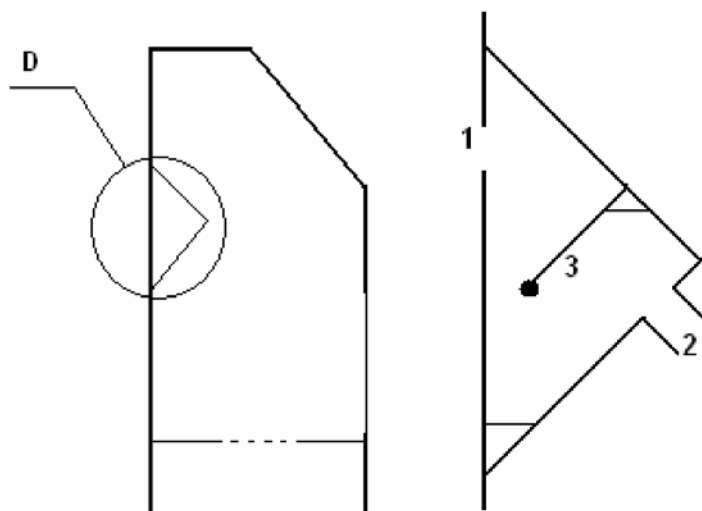
$$\varepsilon = 0,952$$

Celkový výkon

$$Q_C = Q_{SP} + Q_{ST} = 1,07 + 19,7 = 20,77 \text{ [kW]}$$

6.4. Sekundární vzduch

Sekundární vzduch je přiváděn do horní části spalovací komory obr. 10. Cílem použití sekundárního vzduchu je dosáhnout lepšího vyhoření prchavé hořlaviny a tím snížit ztrátu chemickým nedopalem. Přívod sekundárního vzduchu prošel několika inovačními kroky. První inovační návrh přívodu sekundárního vzduchu, který jsem provedl, byl podle obr. 14.

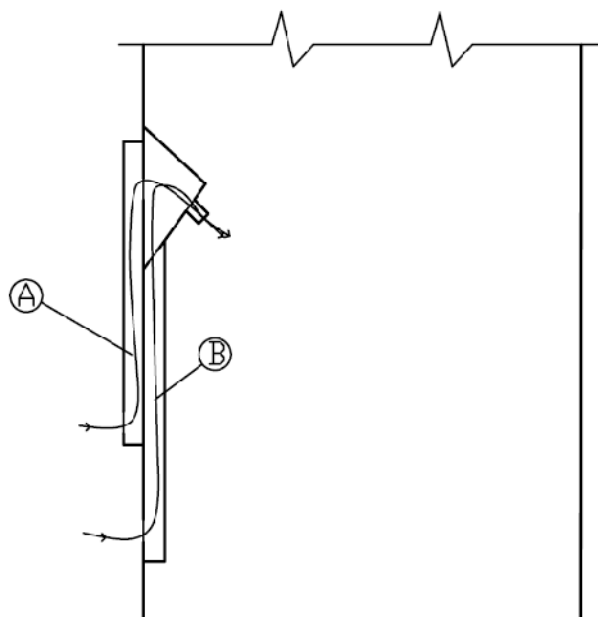


Obr. 14 První návrh přívodu sekundárního vzduchu

V bodě 1 je vzduch nasáván a vstupuje do kapsy, kde je mírně předeříván. Aby byl vzduch promíchán a neprošel kapsou příliš rychle a tím pádem mu bylo předáno co nejvíce tepla, tak je v kapse instalováno hradítko 3. V bodě 2 částečně předeřátý vzduch vstupuje do spalovací komory.

Tuto variantu jsem praktickým měřením neověřil, ale po dalších úvahách jsem usoudil, že by bylo možné provést návrh lepším způsobem. V dalším návrhu jsem ale vycházel z toho, že vstupní kapsa pro přívod sekundárního vzduchu je umístěna uvnitř spalovací komory.

Na obr. 15 (nejedná se o detailní výkres; pouze o principiální schéma) jsou znázorněny dvě varianty přívodu sekundárního vzduchu. Varianta A byla navržena firmou Profitall. Pro lepší ohřev vzduchu jsem navrhl variantu B. Tyto dvě varianty byly zhotoveny pro experimentální měření, na základě kterého jsou dále porovnávány. U těchto variant je předpoklad lepšího ohřátí sekundárního vzduchu (především pro variantu B). Doposud byla v krbové vložce Bety používána varianta A. Výsledek této změny je zhodnocen později.



Obr. 15 Dvě varianty přívodu sekundárního vzduchu

Sekundární vzduch je do spalovací komory přiváděn 6 tryskami (vstupy). Při prvních zkouškách, byly všechny vstupy navrženy o stejném průměru. Bylo zjištěno, že nejvíce vzduchu je přiváděno vstupy umístěnými na středu. Na základě zjištění byly prostřední vstupy zmenšeny a u krajních byly rozměry zachovány. Výsledek této změny je zhodnocen později.



Obr. 16 Vliv sekundárního vzduchu na průběh hoření

Na obr. 16 je zřetelné, ve kterých místech je sekundární vzduch přiváděn (zakroužkovaná místa) a že dochází k ovlivnění průběhu hoření.

6.4.1. Regulace přívodu sekundárního vzduchu

Při zvažování provedených změn, byla zmiňována i instalace regulace přívodu sekundárního vzduchu.

Sekundární vzduch může být nevýhodou v počáteční a konečné fázi hoření. Pokud není krbová vložka dostatečně ohřátá a není dosaženo požadovaných teplot ve spalovací komoře, může docházet k ochlazení plamene přiváděním sekundárním vzduchem. Přívod sekundárního vzduchu není v této fázi hoření nutný.

Existuje několik možností, jak tuto regulaci provést. Regulace může být prováděna elektronicky. Tato varianta je ekonomicky poměrně nákladná a tím by byla zvýšena výrobní cena krbové vložky. Dosažený výsledek by nebyl adekvátní této ceně. Druhou a méně nákladnou variantou jak provést regulaci, je regulaci mechanickou. Byla zvažována možnost použití bimetalu. Tato možnost by byla méně nákladná. Při jejím řešení ovšem nastal problém s dostupností tohoto materiálu, takže regulace zavedena nebyla.

Domnívám se, že regulace by neměla výrazný vliv na průběh hoření a účinnost krbové vložky. Regulace je prováděna přirozeně a to v závislosti na tahu komína. Pokud není v krbové vložce dosaženo požadovaných teplot, tak i teplota v komíně je nízká a tím pádem není dostatečný tah. Sekundární vzduch je v tomto případě přiváděn minimálně.

7. Cíle měření a použité palivo

Jak již bylo výše uvedeno, tak na krbové vložce Bety proběhlo několik konstrukčních změn. Aby mohlo být ověřeno, zda tyto změny mají vliv na průběh spalování, účinnost a tepelný výkon krbové vložky, tak muselo být provedeno experimentální měření. Toto měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN 13229. Měření bylo prováděno ve výrobních prostorách firmy Profitall s.r.o.

Cílem měření bylo získání následujících hodnot:

- Analýza složení spalin (CO, CO₂, O₂)
- Měření teploty spalin na výstupu z krbové vložky
- Měření tahu komína
- Měření výkonu teplovodního výměníku na základě vstupních a výstupních teplot vody a průtoku
- Vlhkost paliva

Jako palivo bylo použito smrkové dřevo a pro jedno nastavení měření dřevěné brikety. Nebyl proveden chemický rozbor složení paliva. Byla změřena pouze vlhkost paliva. Pro výpočet bylo použito prvkové složení smrkového dřeva z literárního zdroje [3]. Jako druhé palivo byly použity dřevěné brikety. U těchto briket nebylo zjištěno prvkové složení. Výrobce uvádí pouze výhřevnost 18,1 MJ/kg. Prvkové složení tedy bylo použito stejné jako pro smrkové dřevo.

Q	Qi	N	C	H
[J]	[J]	[%]	[%]	[%]
16900	15300	0,12	43,1	5,16
W	S	O	A	Ci
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
16,1	0,01	36,27	0,47	17,73

Tab. 2 Složení smrkového dřeva

8. Výpočet minimálního množství vzduchu a spalin

Výpočty jsou prováděny pro stechiometrické spalování. Při stechiometrickém spalování je přebytek vzduchu $\alpha = 1$

8.1. Minimální množství kyslíku pro spálení 1kg paliva

$$V_{O_2min} = \frac{22,39}{100} * \left(\frac{C}{12,01} + \frac{H}{4,032} + \frac{S}{32,03} - \frac{O}{32} \right) [m_n^3/kg] \quad (7)$$

$$V_{O_2min} = \frac{22,39}{100} * \left(\frac{43,1}{12,01} + \frac{5,16}{4,032} + \frac{0,01}{32,03} - \frac{36,27}{32} \right) = 0,836 [m_n^3/kg]$$

8.2. Minimální množství suchého vzduchu

$$V_{Vzmin}^S = \frac{100}{21} * V_{O_2min} [m_n^3/kg] \quad (8)$$

$$V_{Vzmin}^S = \frac{100}{21} * 0,836 = 3,982 [m_n^3/kg]$$

8.3. Součinitel vlhkosti

$$f = 1 + \varphi * \frac{p''}{p_c - \varphi * p''} [-] \quad (9)$$

Dosazené hodnoty:

- Relativní vlhkost $\varphi = 0,7$
- Absolutní tlak pro teplotu 20°C $p'' = 2,34 \text{ kPa}$
- Celkový absolutní tlak vlhkého vzduchu $p_c = 101,2 \text{ kPa}$

$$f = 1 + 0,7 * \frac{2,34}{101,2 - 0,7 * 2,34} = 1,016 [-]$$

8.4. Minimální množství vzduchu pro spálení 1kg paliva

$$V_{Vzmin} = f * V_{Vzmin}^S [m_n^3/kg] \quad (10)$$

$$V_{Vzmin} = 1,016 * 3,982 = 4,046 [m_n^3/kg]$$

8.5. Objem oxidu uhličitého CO₂ ve spalinách

$$V_{CO_2} = \frac{22,6}{100} * \frac{C}{12,01} + 0,0003 * V_{Vzmin}^S [m_n^3/kg] \quad (11)$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,6}{100} * \frac{43,1}{12,01} + 0,0003 * 4,046 = 0,80 [m_n^3/kg]$$

8.6. Objem dusíku N₂ ve spalinách

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{100} * \frac{N}{28,016} + 0,7805 * V_{Vzmin}^S [m_n^3/kg] \quad (12)$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{100} * \frac{0,12}{28,016} + 0,7805 * 4,046 = 3,109 [m_n^3/kg]$$

8.7. Objem argonu Ar ve spalinách

$$V_{Ar} = 0,0092 * V_{Vzmin}^S [m_n^3/kg] \quad (13)$$

$$V_{Ar} = 0,0092 * 4,046 = 0,036 [m_n^3/kg]$$

8.8. Minimální objem suchých spalin

$$V_{SPmin}^S = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} [m_n^3/kg] \quad (14)$$

$$V_{SPmin}^S = 0,80 + 3,109 + 0,036 = 3,946 [m_n^3/kg]$$

8.9. Minimální objem vodní páry vzniklé spálením 1kg paliva

$$V_{H_2Omin}^P = \frac{44,8}{100} * \frac{H}{4,032} * \frac{22,4}{100} * \frac{W}{18,016} \quad [m_n^3/kg] \quad (15)$$

$$V_{H_2Omin}^P = \frac{44,8}{100} * \frac{5,16}{4,032} * \frac{22,4}{100} * \frac{16,1}{18,016} = 1,69 \quad [m_n^3/kg]$$

8.10. Minimální množství páry vzniklé z vlhkého vzduchu

$$V_{H_2Omin}^{VZ} = (f - 1) * V_{VZmin}^S \quad [m_n^3/kg] \quad (16)$$

$$V_{H_2Omin}^{VZ} = (1,016 - 1) * 3,982 = 0,063 \quad [m_n^3/kg]$$

8.11. Minimální množství vlhkých spalin

$$V_{Spmin} = V_{Spmin}^S + V_{H_2O}^P + V_{H_2O}^{VZ} \quad [m_n^3/kg] \quad (17)$$

$$V_{Spmin} = 3,946 + 1,69 + 0,063 = 5,70 \quad [m_n^3/kg]$$

9. Maximální množství CO₂ ve spalinách

$$(CO_2)_{max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{SPmin}^S} * 100 \quad [%] \quad (18)$$

$$(CO_2)_{max} = \frac{0,80}{3,946} * 100 = 20,27 \quad [%]$$

10. Výpočet součinitele α

$$\alpha = 1 + \left(\frac{(CO_2)_{max}}{CO_2} - 1 \right) * \frac{V_{SPmin}^S}{V_{VZmin}^S}$$

11. Vztahy pro výpočet tepelných kapacit

11.1. Střední měrná tepelná kapacita suchých spalin

$$c_{pmd} = 3,6 * \left[0,361 + 0,008 * \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) + 0,034 * \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 + \left(0,085 + 0,19 * \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) - 0,14 * \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right) * \left(\frac{CO_2}{100} \right) + \left(0,03 * \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) - 0,2 * \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right) * \left(\frac{CO_2}{100} \right) \right] \quad [kJ/m^3] \quad (19)$$

11.2. Střední měrná tepelná kapacita vodní páry

$$c_{pmH_2O} = 3,6 * \left(0,414 + 0,038 * \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right) + 0,034 * \left(\frac{t_{sp}}{1000} \right)^2 \right) \quad [kJ/m^3] \quad (20)$$

12. Vztahy pro výpočet tepelných ztrát

12.1. Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku v palivu

$$C_R = R * \frac{C_i}{100} \quad [\%] \quad (21)$$

$$R = \frac{m_{popela}}{m_{paliva}} * 100 \quad [\%]$$

12.2. Poměrná ztráta citelným teplem spalin

Ztráta citelným teplem spalin

$$Q_a = (t_{sp} - t_{ok}) * \left[\frac{(c_{pmd} * (C - C_R))}{0,536 * (CO_2 + CO)} + \left[\frac{c_{pmh_2o} * 1,92 * (9 * H * W)}{100} \right] \right] \quad [kJ/kg] \quad (21)$$

Poměrná ztráta citelným teplem spalin

$$q_a = 100 * \frac{Q_a}{H_u} \quad [\%] \quad (22)$$

12.3. Poměrná ztráta plynným nedopalem

Ztráta plynným nedopalem

$$Q_b = 12644 * CO * \frac{(C - C_r)}{[0,536 * (CO_2 + CO) * 100]} \quad [kJ/kg] \quad (23)$$

Poměrná ztráta plynným nedopalem

$$q_b = 100 * \frac{Q_b}{H_u} \quad [\%] \quad (24)$$

12.4. Poměrná ztráta mechanickým nedopalem

Ztráta mechanickým nedopalem

$$Q_r = 335 * R * \frac{C_i}{100} \quad [kJ/kg] \quad (25)$$

Poměrná ztráta mechanickým nedopalem

$$q_r = 100 * \frac{Q_r}{H_u} \quad [\%] \quad (26)$$

13. Vztahy pro výpočet účinnosti

Výpočet účinnosti je v souladu s normou ČSN EN 13229.

Účinnost je stanovena na základě teplených ztrát

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r) \quad [\%] \quad (27)$$

Podle účinnosti jsou krbové vložky děleny do jednotlivých tříd.

Třída účinnosti KV	Mezní hodnoty třídy účinnosti [%]
Třída 1	≥ 70
Třída 2	$\geq 60 < 70$
Třída 3	$\geq 50 < 60$
Třída 4	$\geq 30 < 50$

Tab. 3 Třídy rozdělení krbových vložek

14. Vztahy pro výpočet tepelného příkonu a výkonu krbové vložky

14.1. Tepelný příkon

$$P_p = \dot{m} * \frac{H_u}{3600} \quad [kW] \quad (28)$$

14.2. Tepelný výkon

$$P_{KV} = P_p * \frac{100 - (q_a + q_b + q_r)}{100} \quad [kW] \quad (29)$$

15. Použité měřicí přístroje

15.1. Analyzátor spalin INFRALYT 5000

Infralyt 5000 slouží k měření objemové koncentrace plynů ve spalinách.

Jsou měřeny koncentrace těchto plynů:

- Oxidu uhelnatého CO v rozmezí 0 – 15 %
- Oxidu uhličitého CO₂ v rozmezí 0 – 20%
- Sumu uhlovodíků HC v rozmezí 0 – 20%
- Kyslíku O₂ v rozmezí 0 – 15%

Analyzátor je nutno před samotným měřením zapnout ke kalibraci, která proběhne automaticky. Po kalibraci přístroje je možné začít měření. Měřené spaliny jsou nasávány analyzátozem a procházejí přes čisticí trať. Ta je složena z filtrů, trojcestného ventilu a ventilu pro regulaci. Spaliny musejí být během průchodu čisticí trati ochlazeny na teplotu nejméně 50°C. Analyzátor vyhodnocuje a zaznamenává koncentrace v čase.



Obr. 17 Infralyt 500

15.2. Kalorimetr

Měření výkonu teplovodního výměníku bylo prováděno na základě snímání teplot topné a vratné vody pomocí termočlánku a na měřeném průtoku. Kalorimetr tyto hodnoty vyhodnotí a zobrazuje daný výkon.



Obr. 18 Průtokoměr

15.3. Digitální teploměr M 305

Pomocí teploměru byla měřena teplota okolí a teplota výstupních spalin z krbové vložky. Teploměr má možnost připojení termočlánku, pomocí kterého se snímá teplota v daném místě. V našem případě byl jeden termočlánek umístěn do spalinovodu a druhý snímal teplotu okolí.

Měřicí parametry:

- Měřicí rozsah -50 °C až $+1300\text{ °C}$
- Teplota okolí při měření by měla být v rozsahu 0 °C až 50 °C
- Přesnost měření je $0,5\%$



Obr. 19 Digitální teploměr M 305

15.4. Tahoměr

Tahoměr slouží k měření rozdílu tlaků. Rozdíl je určován z tlaku okolí a tlaku v měřeném úseku.



Obr. 20 Tahoměr

15.5. Měřič vlhkosti WHT 740

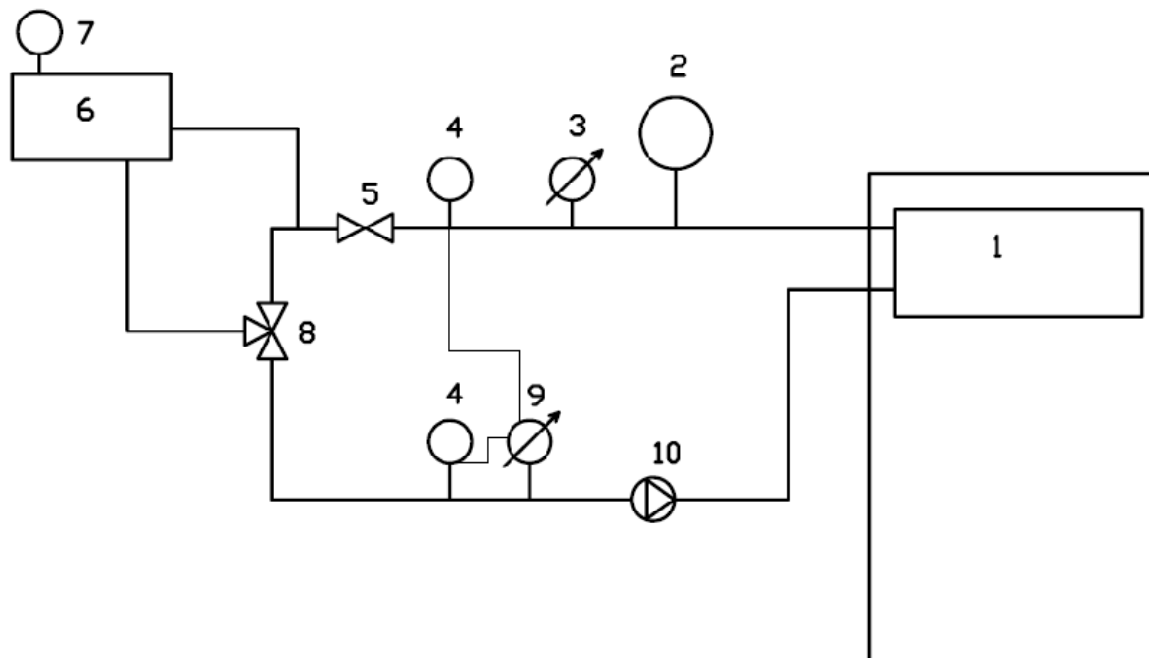
WHT 740 je hrotové měřidlo, které slouží k měření vlhkosti obsažené v měřeném materiálu. Rozsah měření vlhkosti je 5 – 40 %.



Obr. 21 Měřič vlhkosti WHT 740

16. Zapojení měřících okruhů

Zapojení měřícího okruhu teplovodního výměníku je zřejmé z obr. 22.



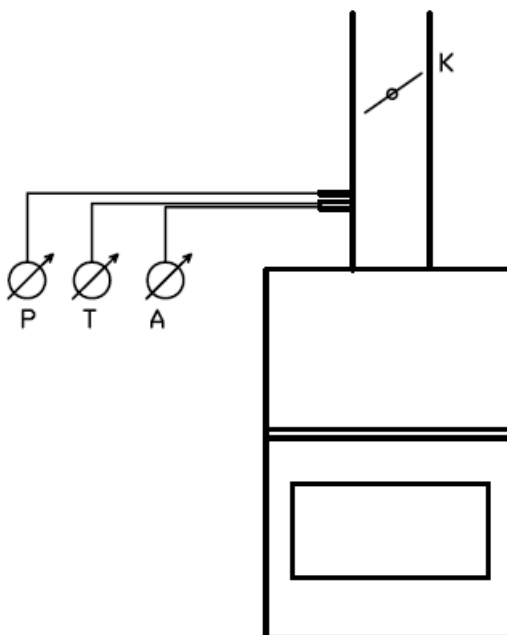
Obr. 22 Zapojení měřícího okruhu teplovodního výměníku

Popis zapojení:

1. Teplovodní výměník
2. Expanzní nádrž
3. Manometr
4. Termočlánek
5. Uzavírací armatura
6. Chladič z osobního automobilu
7. Pojistný ventil a napouštění okruhu
8. Trojcestný ventil
9. Kalorimetr
10. Oběhové čerpadlo

Měřící okruh je napouštěn vodou přes chladič v bodě 7. Pokud je napouštěcí hrdlo chladiče uzavřeno víčkem, tak víčko slouží společně s bočním nátrubkem hrdla jako pojistný ventil. Měřící okruh byl nejprve napuštěn vodou a během zkušebního zátoku byl systém odvzdušněn. Jako chladicí zařízení topné vody byl použit chladič z osobního automobilu Lada. Tento chladič je chlazen ventilátorem, který je napájen trakčním akumulátorem Varta 180 Ah.

Zapojení pro měření spalín je na obr. 23



Obr.23 Schematické zapojení pro analýzu spalín a tahu komína

Popis zapojení:

A – Analyzátor spalín

T – Termočlánek

P – Tahoměr

K – Klapka pro regulaci tahu komína

17. Jednotlivá nastavení pro měření

Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN 13229. Před zahájením samotného měření byl proveden zkušební zátop, aby došlo k prohřátí krbové vložky a komína. Zkušební zátop probíhal po dobu jedné hodiny.

Měření bylo provedeno pro 4 různá nastavení:

- Uzavřený primární vzduch; studený sekundární vzduch; palivo smrkové dřevo
- Primární vzduch otevřen z 1/2; ohříváný sekundární vzduch; palivo smrkové dřevo
- Primární vzduch otevřen z 1/2; ohříváný sekundární vzduch; palivo dřevěné brikety
- Primární vzduch otevřen z 3/4; sekundární vzduch uzavřen; palivo smrkové dřevo

Jednotlivá měření se lišila v množství přiváděného vzduchu pod rošt a v přívodu sekundárního vzduchu. Vysvětlení pro studený a ohříváný sekundární vzduch je na obr. 15. Kde studený sekundární vzduch je varianta A, a ohříváný sekundární vzduch je varianta B.

Podle normy ČSN EN 13229, měření probíhá po dobu jedné hodiny. Norma dovoluje zkrátit dobu měření na 45min, při snížení dávky paliva v daném poměru. Měření krbové vložky Bety probíhalo po dobu jedné hodiny.

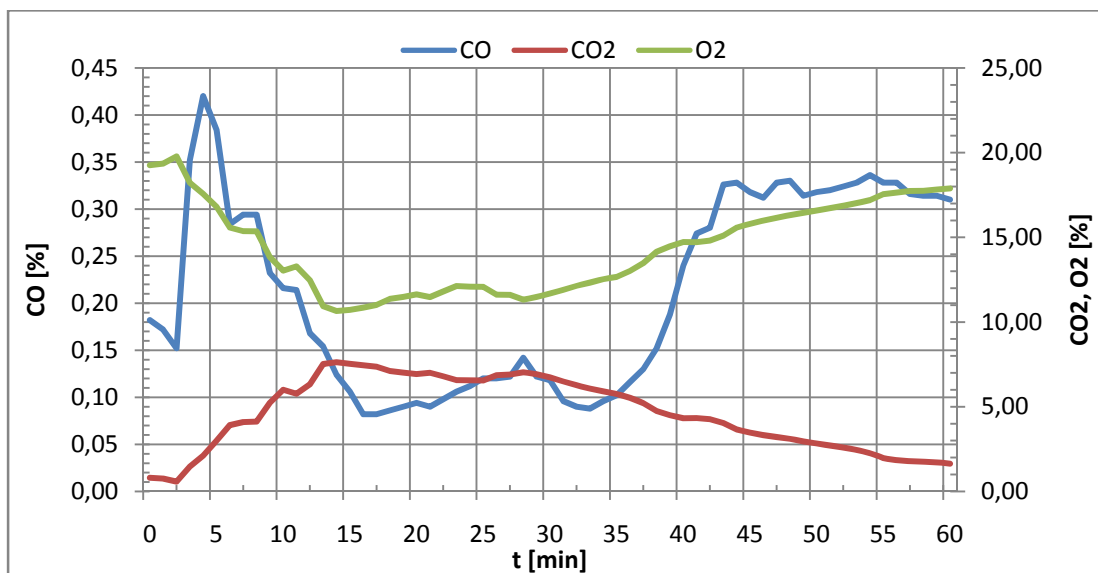
17.1. Nastavení č.1

17.1.1. Parametry měření:

- Primární vzduch UZAVŘEN
- Sekundární vzduch STUDENÝ
- Palivo SMRKOVÉ DŘEVO
- Výhřevnost paliva 15,3 MJ/kg
- Hmotnostní tok paliva 5 kg
- Venkovní teplota 13°C
- Tah komína 5 Pa
- Výhřevnost paliva 15,3 MJ/kg
- Doba měření 60 min
- Zaznamenávací interval 1 0 s
-

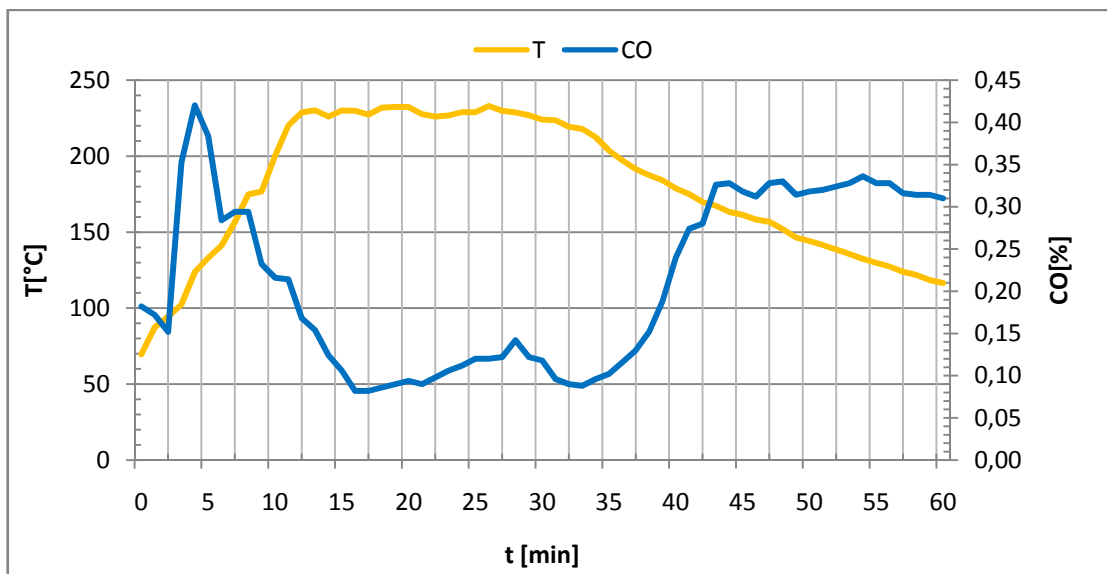
17.1.2. Střední naměřené hodnoty a grafy:

Koncentrace CO, CO₂, O₂ v závislosti na čase



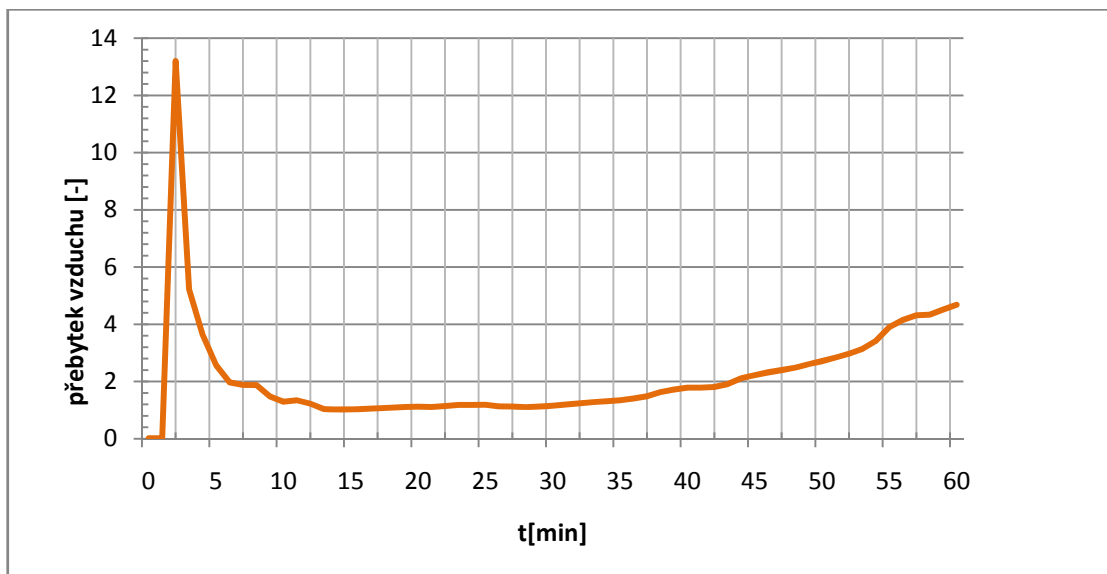
Graf 3 Koncentrace CO, CO₂, O₂ v závislosti na čase

Koncentrace CO a teplota spalin v závislosti na čase



Graf 4 Koncentrace CO a průběh teploty spalin v závislosti na čase

Přebytek vzduchu v závislosti na čase



Graf 5 Přebytek vzduchu v závislosti na čase

Tsp	CO	CO ₂	O ₂	α
[°C]	[%]	[%]	[%]	[-]
180,28	0,21	4,66	14,35	2,41

Tab. 4 Střední naměřené hodnoty- 1. měření

17.1.3. Výpočet:**Střední měrná tepelná kapacita suchých spalín**

Dle vztahu (30)

$$c_{pmd} = 3,6 * \left[0,361 + 0,008 * \left(\frac{180,28}{1000} \right) + 0,034 * \left(\frac{180,28}{1000} \right)^2 + \left(0,085 + 0,19 * \left(\frac{180,28}{1000} \right) - 0,14 * \left(\frac{180,28}{1000} \right)^2 \right) * \left(\frac{4,66}{100} \right) + \left(0,03 * \left(\frac{180,28}{1000} \right) - 0,2 * \left(\frac{180,28}{1000} \right)^2 \right) * \left(\frac{4,66}{100} \right) \right] = 1,34 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry

Dle vztahu (31)

$$c_{pM_{H_2O}} = 3,6 * \left(0,414 + 0,038 * \left(\frac{180,28}{1000} \right) + 0,034 * \left(\frac{180,28}{1000} \right)^2 \right) = 1,51 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku

Dle vztahu (32)

$$C_r = R * \frac{C_i}{100} = 1,21 * \frac{17,73}{100} = 0,21 \text{ [%]}$$

$$R = \frac{234}{19314} * 100 = 1,21 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta citelným teplem spalín

Dle vztahu (33)

$$Q_a = (180,28 - 13) * \left[\frac{(1,34 * (43,1 - 0,21))}{[0,536 * (0,21 + 4,66)]} + \frac{[1,51 * 1,92 * (9 * 5,16 * 16,1)]}{100} \right] = 4003,52 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (34)

$$q_a = 100 * \frac{4003,52}{15300} = 26,16 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta plynným nedopalem

Dle vztahu (35)

$$Q_b = 12644 * 0,21 * \frac{(43,1 - 0,21)}{[0,536 * (4,66 + 0,21) * 100]} = 441 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (36)

$$q_b = 100 * \frac{441}{15300} = 2,88 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta mechanickým nedopalem

Dle vztahu (37)

$$Q_r = 335 * 1,21 * \frac{17,73}{100} = 71,96 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (38)

$$q_r = 100 * \frac{71,96}{15300} = 0,47 \text{ [%]}$$

Účinnost krbové vložky

Dle vztahu (39)

Výpočet účinnosti je v souladu s normou ČSN EN 13229.

Účinnost je stanovena na základě tepelných ztrát

$$\eta = 100 - (26,16 + 2,88 + 0,47) = 70,48 \text{ [%]}$$

Tepelný příkon

Dle vztahu (40)

$$P_p = 5 * \frac{15300}{3600} = 21,25 \text{ [kW]}$$

Tepelný výkon

Dle vztahu (41)

$$P_{KV} = 21,25 * \frac{100 - (26,16 + 2,88 + 0,47)}{100} = 15,9 \text{ [kW]}$$

17.1.4. Tabulka vypočtených hodnot

C _{pmhd}	C _{pmh2o}	R	Cr	Q _a	q _a	Q _b
[kJ/m ³]	[kJ/m ³]	[%]	[%]	[kJ/kg]	[%]	[kJ/kg]
1,34	1,51	1,21	0,21	4003,52	26,16	441,05
q _b	Q _r	q _r	η	P _p	P _v	
[%]	[kJ/kg]	[%]	[%]	[kW]	[kW]	
2,88	71,96	0,47	70,48	21,25	15,9	

Tab. .5 Vypočtené hodnoty pro 1.měření

17.1.5. Zhodnocení měření:

Jak je zřejmé z grafického znázornění č. 2 tak k zahoření paliva došlo zhruba 4 až 5 minut po započetí měření. V tuto dobu byl zaznamenán pokles kyslíku a snížení přebytku vzduchu. Koncentrace CO byla nejvyšší zhruba v 5. minutě a dále klesala s narůstající teplotou. Maximální hodnota teploty spalin byla dosažena zhruba po 12 minutách a na této hodnotě setrvala necelých 25 minut, kde byl již zaznamenán pokles teploty spalin. Tento pokles byl způsoben vyhořením převážné části paliva a prchavé hořlaviny v palivu. Vyhoření prchavé složky v palivu opět potvrzuje graf č. 2, kde je zřejmí nárůst koncentrace CO v tomto časovém úseku. Strmý nárůst a pokles součinitele přebytku vzduchu proběhl v prvních 5 minutách a dále jeho změny jsou pozvolné. V grafu č. 2 je také patrné velké množství přiváděného vzduchu. Tím bylo zapříčiněno rychlé vyhoření paliva a dosažení vyšších teplot spalin.

Velké množství přiváděného vzduchu bylo způsobeno špatným utěsněním dveří. Přívod primárního vzduchu byl uzavřen, a přesto docházelo k hoření, vlivem přísávaného vzduchu a dosažení tak vysokých teplot, jaké byly naměřeny. Tento stav je naprosto nežádoucí. Při uzavření přívodu primárního vzduchu musí dojít k postupnému uhasínání plamene. Tento jev byl hlavní příčinou nejnižší vypočtené účinnosti krbové vložky, která dosahuje hodnoty 70,5%.

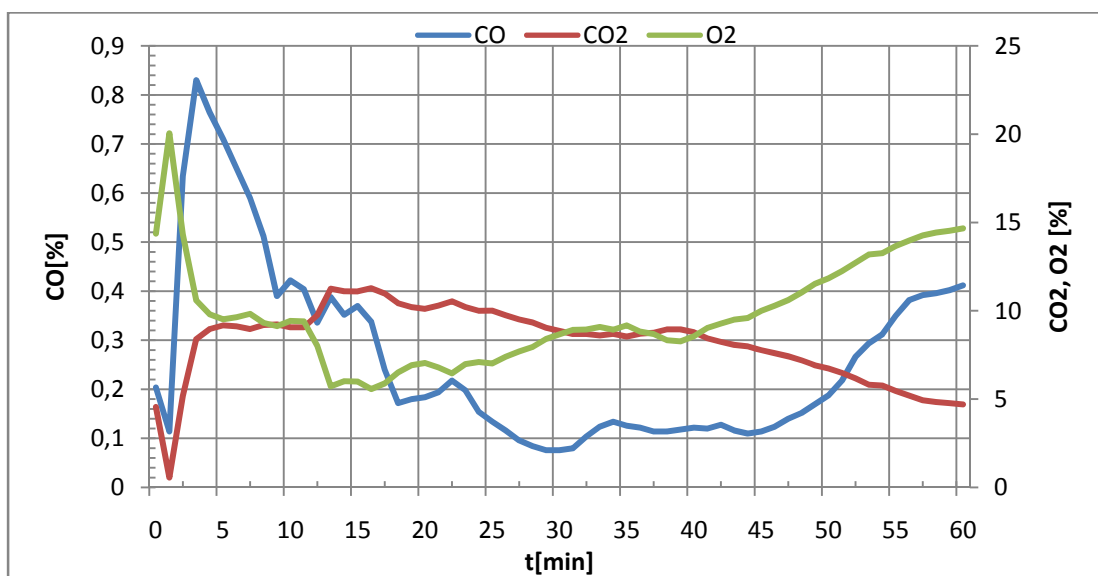
17.2. Nastavení č. 2

17.2.1. Parametry měření:

- Primární vzduch OTEVŘEN Z 1/2
- Sekundární vzduch OHŘÍVANÝ
- Palivo SMRKOVÉ DŘEVO
- Výhřevnost paliva 15,3 MJ/kg
- Hmotnostní tok paliva 3,95 kg
- Venkovní teplota 15°C
- Tah komína 9 Pa
- Doba měření 60 min
- Zaznamenávací interval 10 s

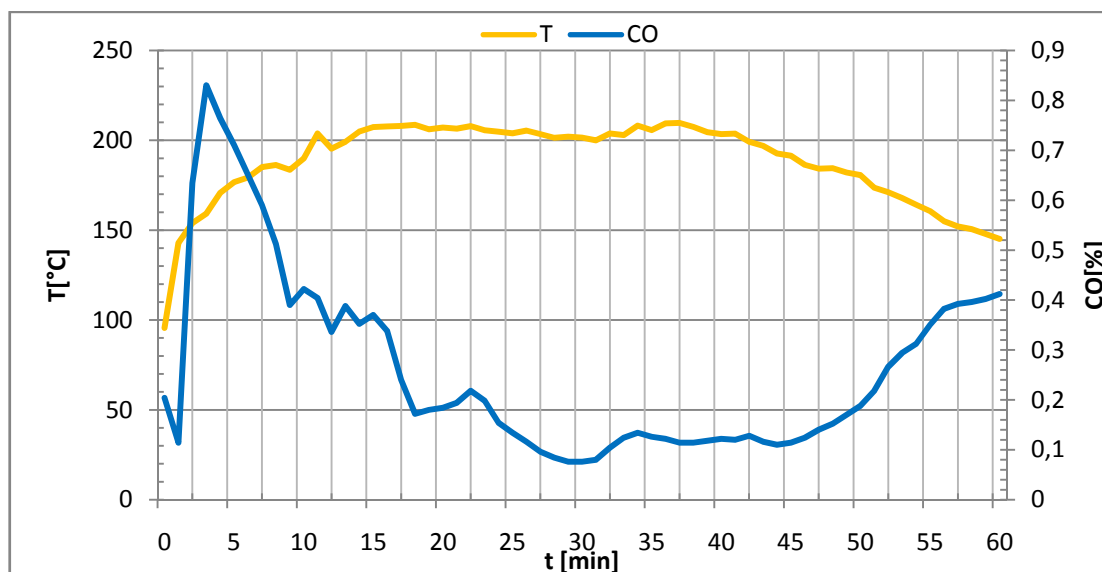
17.2.2. Střední naměřené hodnoty a grafy:

Koncentrace CO, CO₂, O₂ v závislosti na čase



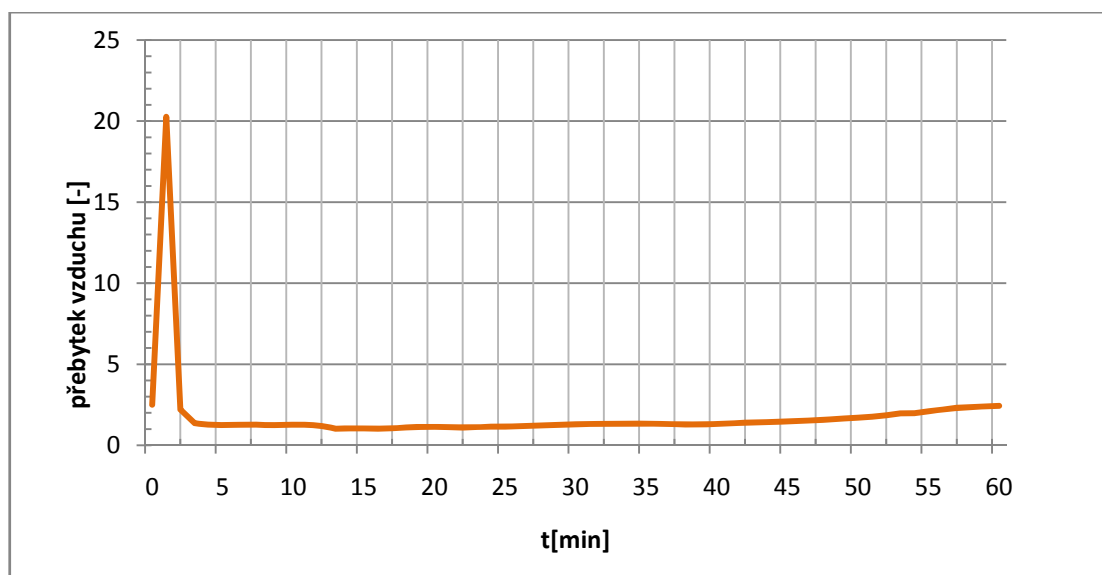
Graf 6 Koncentrace CO, CO₂, O₂ v závislosti na čase

Koncentrace CO a teplota spalin v závislosti na čase



Graf 7 Koncentrace CO a průběh teploty spalin v závislosti na čase

Přebytek vzduchu v závislosti na čase



Graf 8 Přebytek vzduchu v závislosti na čase

Tsp	CO	CO2	O2	α
[°C]	[%]	[%]	[%]	[-]
188,93	0,26	8,26	9,75	1,82

Tab. 6 Střední naměřené hodnoty – 2. měření

17.2.3. Výpočet:**Střední měrná tepelná kapacita suchých spalín**

Dle vztahu (30)

$$c_{pmd} = 3,6 * \left[0,361 + 0,008 * \left(\frac{188,93}{1000} \right) + 0,034 * \left(\frac{188,93}{1000} \right)^2 + \left(0,085 + 0,19 * \left(\frac{188,93}{1000} \right) - 0,14 * \left(\frac{188,93}{1000} \right)^2 \right) * \left(\frac{8,26}{100} \right) + \left(0,03 * \left(\frac{188,93}{1000} \right) - 0,2 * \left(\frac{188,93}{1000} \right)^2 \right) * \left(\frac{8,26}{100} \right) \right] = 1,36 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry

Dle vztahu (31)

$$c_{pmH_2O} = 3,6 * \left(0,414 + 0,038 * \left(\frac{188,93}{1000} \right) + 0,034 * \left(\frac{188,93}{1000} \right)^2 \right) = 1,52 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku

Dle vztahu (32)

$$C_r = R * \frac{C_i}{100} = 1,21 * \frac{17,73}{100} = 0,21 \text{ [%]}$$

$$R = \frac{234}{19314} * 100 = 1,21 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta citelným teplem spalín

Dle vztahu (33)

$$Q_a = (188,93 - 15) * \left[\frac{(1,36 * (43,1 - 0,21))}{[0,536 * (0,26 + 8,26)]} + \frac{[1,52 * 1,92 * (9 * 5,16 * 16,1)]}{100} \right] = 2629,15 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (34)

$$q_a = 100 * \frac{2629,15}{15300} = 17,18 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta plynným nedopalem

Dle vztahu (35)

$$Q_b = 12644 * 0,26 * \frac{(43,1 - 0,21)}{[0,536 * (0,26 + 8,26) * 100]} = 309,52 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (36)

$$q_b = 100 * \frac{309,52}{15300} = 2,02 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta mechanickým nedopalem

Dle vztahu (37)

$$Q_r = 335 * 1,21 * \frac{17,71}{100} = 71,96 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (38)

$$q_r = 100 * \frac{71,96}{15300} = 0,47 \text{ [%]}$$

Účinnost krbové vložky

Dle vztahu (39)

Výpočet účinnosti je v souladu s normou ČSN EN 13229.

Účinnost je stanovena na základě tepelných ztrát

$$\eta = 100 - (17,18 + 2,02 + 0,47) = 80,32 \text{ [%]}$$

Tepelný příkon

Dle vztahu (40)

$$P_p = 3,95 * \frac{15300}{3600} = 16,78 \text{ [kW]}$$

Tepelný výkon

Dle vztahu (41)

$$P_{KV} = 16,78 * \frac{100 - (17,18 + 2,02 + 0,47)}{100} = 13,47 \text{ [kW]}$$

17.2.4. Tabulka vypočtených hodnot

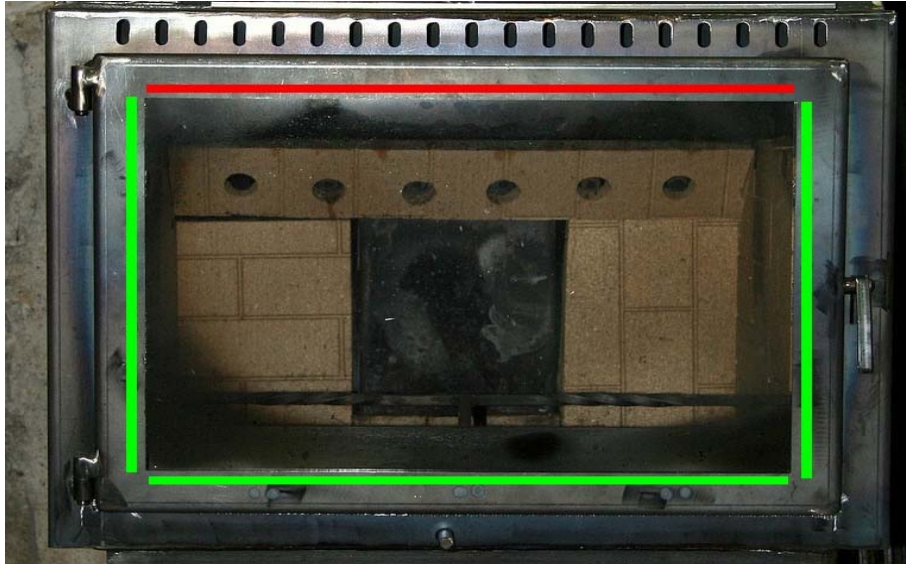
C_{pm,d}	C_{pm,h₂O}	R	Cr	Q_a	q_a	Q_b
[kJ/m ³]	[kJ/m ³]	[%]	[%]	[kJ/kg]	[%]	[kJ/kg]
1,36	1,52	1,21	0,21	2629,15	17,18	309,52
q_b	Q_r	q_r	η	P_p	P_v	
[%]	[kJ/kg]	[%]	[%]	[kW]	[kW]	
2,02	71,96	0,47	80,32	16,78	13,47	

Tab. 7. Vypočtené hodnoty pro 2. měření

17.2.5. Zhodnocení měření:

Provedené změny:

Před druhým měřením byla provedena oprava utěsnění dvířek a čelního skla. Vzhledem k tomu, že dvířka byla mírně prohnutá a tím vznikala mezera, kudy mohl být přísávan vzduch, tak utěsnění nebylo naprosto dokonalé. Je ale nutné podotknout, že přísávání vzduchu nebylo tak značné jako v prvním měření (což je zřejmé z grafických průběhů a vypočtených hodnot). Na tento stav mělo hlavní vliv utěsnění ploch, kde čelní sklo dosedá na rám dvířek. Utěsnění dvířek je zřejmé z obr. 24 kde zelená část jsou utěsněné plochy a červená část je plocha, která utěsněná není. Tato neutěsněná plocha slouží k přísávání vzduchu, který zajišťuje oplach skla. Po prvním měření bylo sklo značně znečištěné a díky oplachu skla, bylo vyčištěno již během jedné hodiny provozu.



Obr. 24 Utěsnění dvířek

Průběh hoření při druhém nastavení byl pozvolnější než v prvním případě, což je viditelné především v grafickém znázornění č. 6. Průběh teploty spalin je plynulejší. Pozvolný průběh teploty zajišťuje stabilní hoření. Také bylo dosaženo nižší maximální teploty spalin a tím byla snížena tepelná ztráta citelným teplem spalin. Maximální koncentrace CO byla naměřena ve 4. minutě a dále docházelo k jejímu poklesu. Střední hodnota výkonu teplovodního výměníku je 9 kW, při tomto nastavení. Vypočtená účinnost činí 80,3%.

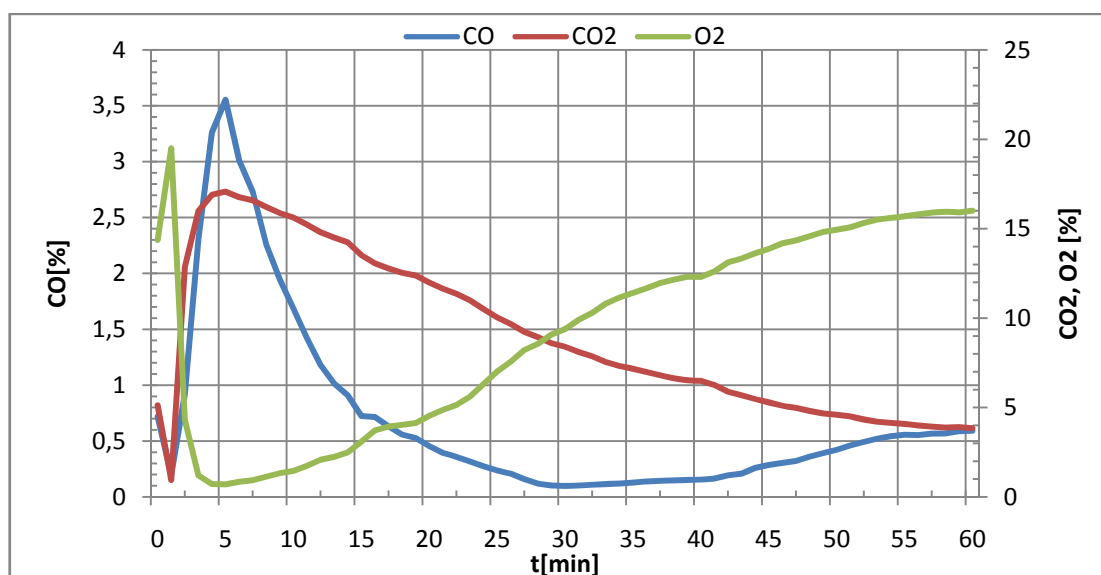
17.3. Nastavení č. 3

17.3.1. Parametry měření:

- Primární vzduch OTEVŘEN Z 1/2
- Sekundární vzduch OHŘÍVANÝ
- Palivo DŘEVĚNÉ BRIKETY
- Výhřevnost paliva 18,1 MJ/kg
- Hmotnostní tok paliva 5,2 kg
- Venkovní teplota 17°C
- Tah komína 10 Pa
- Doba měření 60 min
- Zaznamenávací interval 10 s

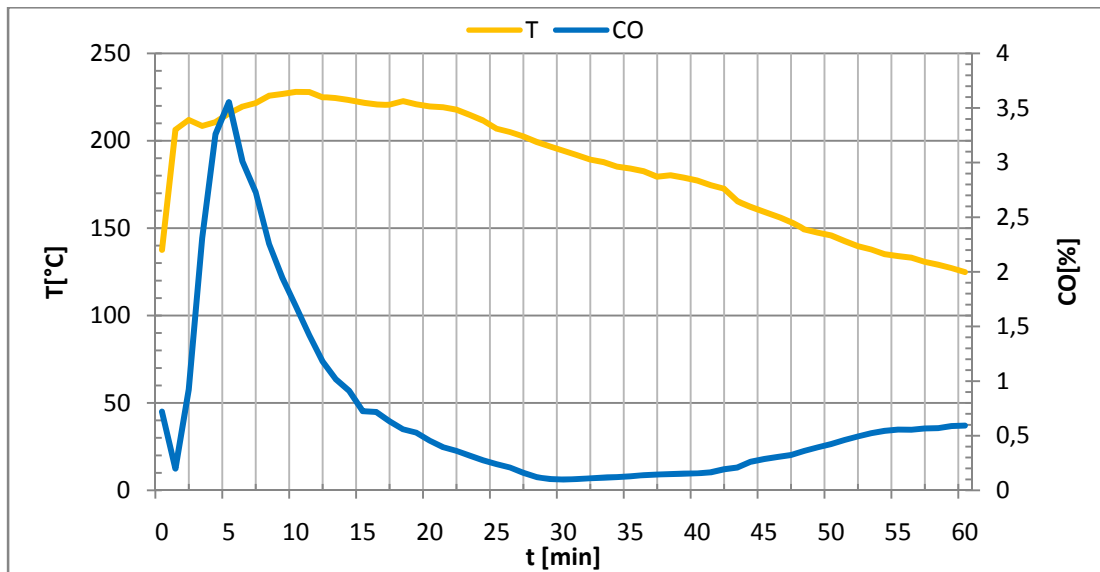
17.3.2. Střední naměřené hodnoty a grafy:

Koncentrace CO, CO₂, O₂ v závislosti na čase



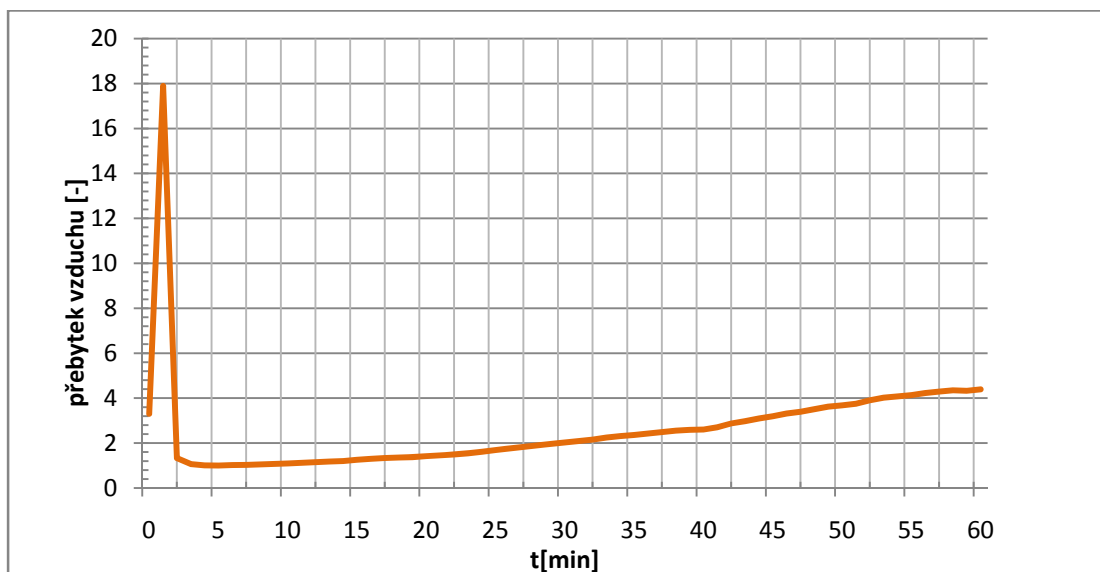
Graf 9 Koncentrace CO, CO₂, O₂ v závislosti na čase

Koncentrace CO a teplota spalin v závislosti na čase



Graf 10 Koncentrace CO a průběh teploty spalin v závislosti na čase

Přebytek vzduchu v závislosti na čase



Graf 11 Přebytek vzduchu v závislosti na čase

T _{sp}	CO	CO ₂	O ₂	α
[°C]	[%]	[%]	[%]	[-]
186,77	0,70	9,07	9,10	2,49

Tab. 8 Střední naměřené hodnoty – 3. měření

17.3.3. Výpočet:**Střední měrná tepelná kapacita suchých spalin**

Dle vztahu (30)

$$c_{pmd} = 3,6 * \left[0,361 + 0,008 * \left(\frac{186,77}{1000} \right) + 0,034 * \left(\frac{186,77}{1000} \right)^2 + \left(0,085 + 0,19 * \left(\frac{186,77}{1000} \right) - 0,14 * \left(\frac{186,77}{1000} \right)^2 \right) * \left(\frac{9,07}{100} \right) + \left(0,03 * \left(\frac{186,77}{1000} \right) - 0,2 * \left(\frac{186,77}{1000} \right)^2 \right) * \left(\frac{9,07}{100} \right) \right] = 1,36 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry

Dle vztahu (31)

$$c_{pmH_2O} = 3,6 * \left(0,414 + 0,038 * \left(\frac{186,77}{1000} \right) + 0,034 * \left(\frac{186,77}{1000} \right)^2 \right) = 1,52 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku

Dle vztahu (32)

$$C_r = R * \frac{C_i}{100} = 1,21 * \frac{17,73}{100} = 0,21 \text{ [%]}$$

$$R = \frac{234}{19314} * 100 = 1,21 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta citelným teplem spalin

Dle vztahu (33)

$$Q_a = (186,77 - 17) * \left[\frac{(1,36 * (43,1 - 0,21))}{0,536 * (0,7 + 9,07)} + \frac{1,52 * 1,92 * (9 * 5,16 * 16,1)}{100} \right] = 2207,98 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (34)

$$q_a = 100 * \frac{2207,98}{15300} = 12,19 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta plynným nedopalem

Dle vztahu (35)

$$Q_b = 12644 * 0,7 * \frac{(43,1 - 0,21)}{[0,536 * (0,7 + 9,07) * 100]} = 723,51 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (36)

$$q_b = 100 * \frac{723,51}{15300} = 3,99 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta mechanickým nedopalem

Dle vztahu (37)

$$Q_r = 335 * 1,21 * \frac{17,71}{100} = 71,96 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (38)

$$q_r = 100 * \frac{71,96}{18100} = 0,39 \text{ [%]}$$

Účinnost krbové vložky

Dle vztahu (39)

Výpočet účinnosti je v souladu s normou ČSN EN 13229.

Účinnost je stanovena na základě teplených ztrát

$$\eta = 100 - (12,19 + 3,99 + 0,47) = 83,4 \text{ [%]}$$

Tepelný příkon

Dle vztahu (40)

$$P_p = 5,2 * \frac{18100}{3600} = 26,14 \text{ [kW]}$$

Tepelný výkon

Dle vztahu (41)

$$P_{KV} = 26,14 * \frac{100 - (12,19 + 3,99 + 0,47)}{100} = 21,8 \text{ [kW]}$$

17.3.4. Tabulka vypočtených hodnot

C _{pm} d	C _{pm} h ₂ o	R	Cr	Q _a	q _a	Q _b
[kJ/m ³]	[kJ/m ³]	[%]	[%]	[kJ/kg]	[%]	[kJ/kg]
1,36	1,52	1,21	0,21	2299,02	12,7	723,51
q _b	Q _r	q _r	η	P _p	P _v	
[%]	[kJ/kg]	[%]	[%]	[kW]	[kW]	
3,99	71,96	0,47	82,9	26,14	21,67	

Tab. 10 Vypočtené hodnoty pro 3. měření

17.3.5. Zhodnocení měření:

Dřevěné brikety mají jiný charakter hoření než smrkové dřevo. V počáteční fázi dochází k prudkému hoření. Tento jev je zřejmý z grafu č.10, kde je viditelný rychlý nárůst teploty spalin. Teplota spalin dosáhne maximální hodnoty a v krátkém časovém úseku dochází k jejímu poklesu. Při spalování dřevěných briket tedy nebylo dosaženo stabilního hoření. U tohoto měření vznikali největší problémy s chlazením topné vody a okruh se značně přehříval. Teploty vody přesahovaly i teplotu 100°C. Chladič tedy neměl dostatečný výkon na uchlazení okruhu a musel být skrácen vodou pro zvýšení odvodu tepla. Z tohoto důvodu nejsou uvedena grafická znázornění pro výkon teplovodního výměníku. Průběhy výkonu jsou dodatečným dochlazováním zkráceny a v době kdy byla chladič zkrácen vodou, dosahují značných dynamických změn. Maximální koncentrace CO byla dosažena v 5. minutě hoření a její hodnota byla značně vysoká 17,07 %. Byla vypočtena účinnost 83,4%. Tato účinnost je ovšem zkrácena, protože nebylo zjištěno prvkové složení paliva. Výrobce také uvádí výhřevnost 18,1 MJ/kg. Tato hodnota je pravděpodobně nereálná a ve skutečnosti je nižší než výrobce uvádí. Při snížení výhřevnosti paliva na pravděpodobnější hodnotu např. 16 MJ/kg je účinnost krbové vložky 81%. Střední hodnota výkonu teplovodního výměníku je 10,35 kW.

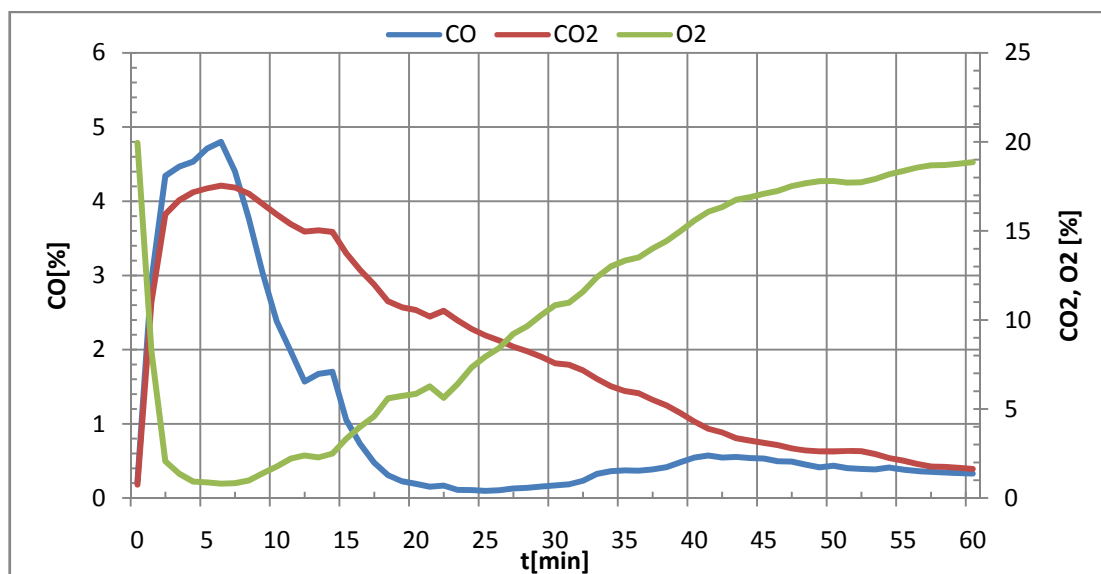
17.4. Nastavení č. 4

17.4.1. Parametry měření:

- Primární vzduch OTEVŘEN Z 3/4
- Sekundární vzduch NENÍ PŘIVÁDĚN
- Palivo SMRKOVÉ DŘEVO
- Výhřevnost paliva 15,3 MJ/kg
- Hmotnostní tok paliva 5,16 kg
- Venkovní teplota 17°C
- Tah komína 10 Pa
- Výhřevnost paliva 15,3 MJ/kg
- Doba měření 60 min
- Zaznamenávací interval 10 s

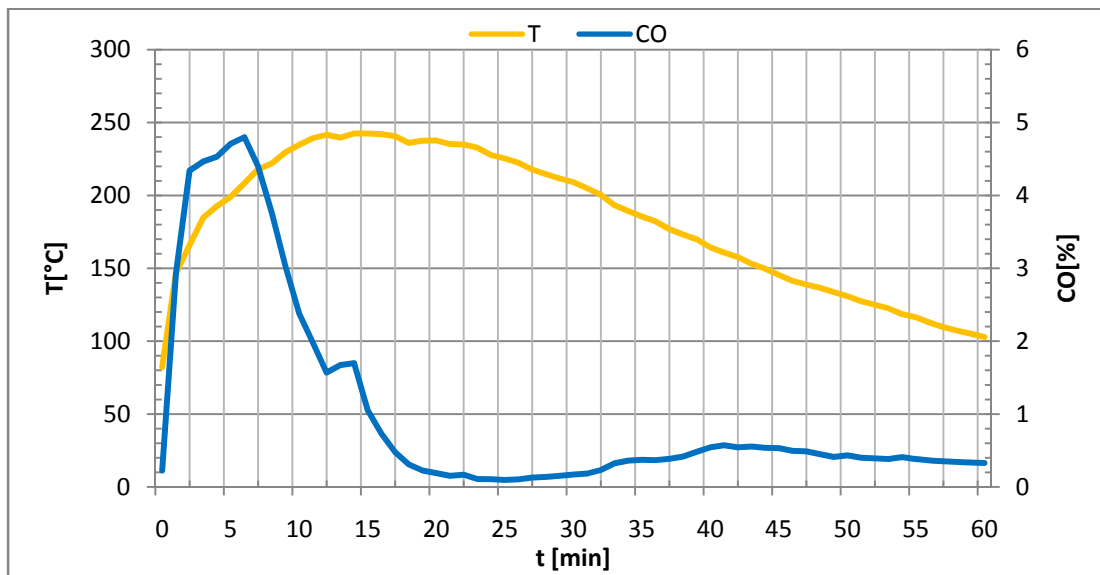
17.4.2. Střední naměřené hodnoty a grafy:

Koncentrace CO, CO₂, O₂ v závislosti na čase



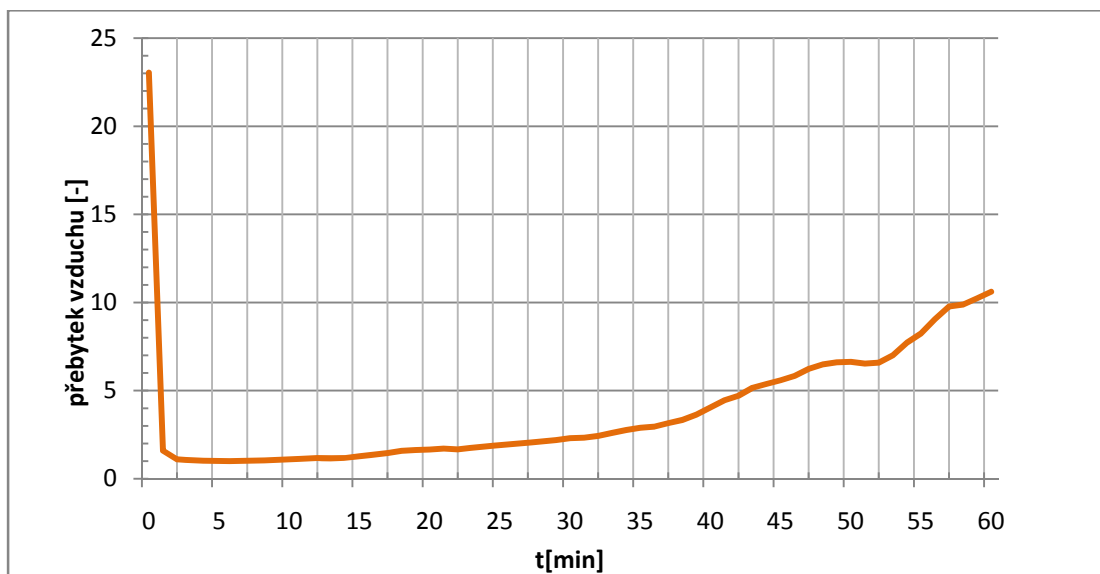
Graf 12 Koncentrace CO, CO₂, O₂ v závislosti na čase

Koncentrace CO a teplota spalin v závislosti na čase



Graf 13 Koncentrace CO a průběh teploty spalin v závislosti na čase

Přebytek vzduchu v závislosti na čase



Graf 14 Přebytek vzduchu v závislosti na čase

T _{sp}	CO	CO ₂	O ₂	α
[°C]	[%]	[%]	[%]	[-]
184,10	1,04	8,22	10,51	3,70

Tab. 11 Střední naměřené hodnoty – 4. měření

17.4.3. Výpočet:**Střední měrná tepelná kapacita suchých spalin**

Dle vztahu (30)

$$c_{pmd} = 3,6 * \left[0,361 + 0,008 * \left(\frac{184,10}{1000} \right) + 0,034 * \left(\frac{184,10}{1000} \right)^2 + \left(0,085 + 0,19 * \left(\frac{184,10}{1000} \right) - 0,14 * \left(\frac{184,10}{1000} \right)^2 \right) * \left(\frac{8,22}{100} \right) + \left(0,03 * \left(\frac{184,10}{1000} \right) - 0,2 * \left(\frac{184,10}{1000} \right)^2 \right) * \left(\frac{8,22}{100} \right) \right] = 1,36 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry

Dle vztahu (31)

$$c_{pmH_2O} = 3,6 * \left(0,414 + 0,038 * \left(\frac{184,10}{1000} \right) + 0,034 * \left(\frac{184,10}{1000} \right)^2 \right) = 1,51 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

Redukovaný hmotnostní podíl uhlíku

Dle vztahu (32)

$$C_r = R * \frac{C_i}{100} = 1,21 * \frac{17,73}{100} = 0,21 \text{ [%]}$$

$$R = \frac{234}{19314} * 100 = 1,21 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta citelným teplem spalin

Dle vztahu (33)

$$Q_a = (184,10 - 17) * \left[\frac{(1,36 * (43,1 - 0,21))}{0,536 * (1,04 + 8,22)} + \frac{1,51 * 1,92 * (9 * 5,16 * 16,1)}{100} \right] = 2269,46 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (34)

$$q_a = 100 * \frac{2427,26}{15300} = 14,83 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta plynným nedopalem

Dle vztahu (35)

$$Q_b = 12644 * 1,04 * \frac{(43,1 - 0,21)}{[0,536 * (1,04 + 8,22) * 100]} = 1138,28 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (36)

$$q_b = 100 * \frac{1138,28}{15300} = 7,43 \text{ [%]}$$

Poměrná ztráta mechanickým nedopalem

Dle vztahu (37)

$$Q_r = 335 * 1,21 * \frac{17,71}{100} = 71,96 \text{ [kJ/kg]}$$

Dle vztahu (38)

$$q_r = 100 * \frac{71,96}{15300} = 0,47 \text{ [%]}$$

Účinnost krbové vložky

Dle vztahu (39)

Výpočet účinnosti je v souladu s normou ČSN EN 13229.

Účinnost je stanovena na základě teplených ztrát

$$\eta = 100 - (14,83 + 7,43 + 0,47) = 77,25 \text{ [%]}$$

Tepelný příkon

Dle vztahu (40)

$$P_p = 5,16 * \frac{15300}{3600} = 21,94 \text{ [kW]}$$

Tepelný výkon

Dle vztahu (41)

$$P_{KV} = 21,94 * \frac{100 - (14,83 + 7,43 + 0,47)}{100} = 16,95 \text{ [kW]}$$

17.4.4. Tabulka vypočtených hodnot

C _{pm,d}	C _{pm,h₂O}	R	C _r	Q _a	q _a	Q _b
[kJ/m ³]	[kJ/m ³]	[%]	[%]	[kJ/kg]	[%]	[kJ/kg]
1,36	1,51	1,21	0,21	2269,46	14,83	1138,3
q _b	Q _r	q _r	η	P _p	P _v	
[%]	[kJ/kg]	[%]	[%]	[kW]	[kW]	
7,43	71,96	0,47	77,25	21,94	16,95	

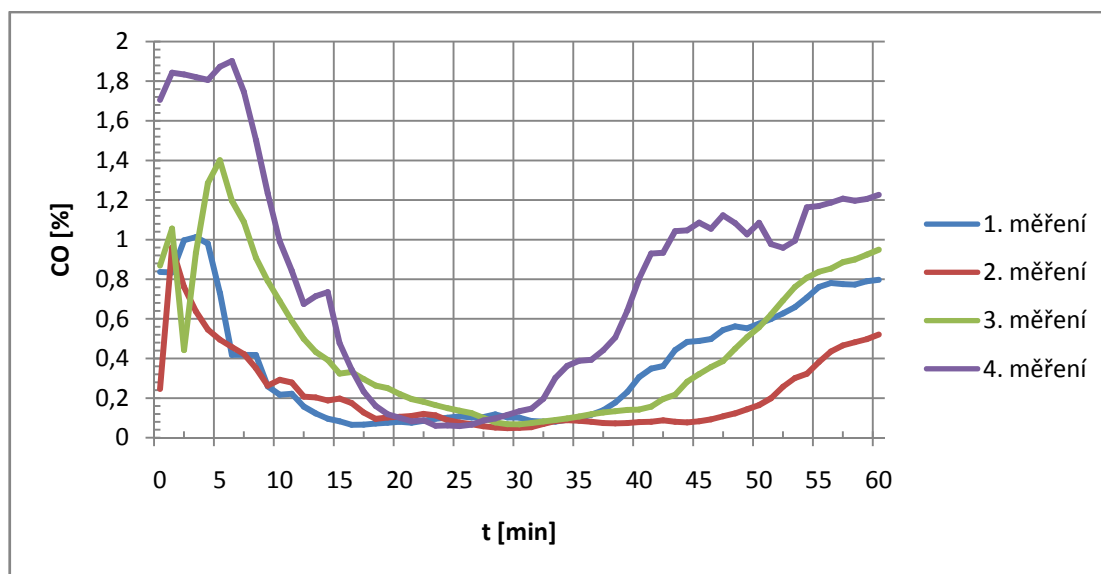
Tab. 12 Vypočtené hodnoty pro 4. Měření

17.4.5. Zhodnocení měření:

V posledním měření byl uzavřen přísun sekundárního vzduchu. Cílem tedy bylo zjistit, jak velký vliv na hoření má přívod sekundárního vzduchu.

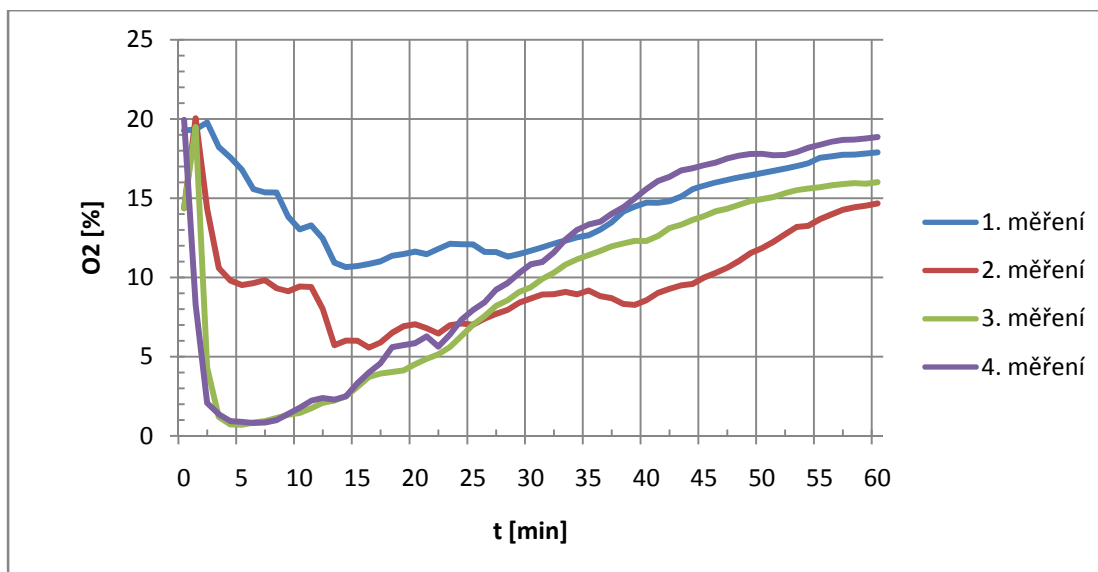
Již v počátku měření došlo k prudkému poklesu koncentrace O₂ ve spalinách. Což je způsobeno menším množstvím přiváděného vzduchu. Průběh teploty spalin již není tak pozvolný. Dochází k rychlému nárůstu teploty na maximální hodnotu. Na této maximální hodnotě teplota setrvá jen velmi krátkou chvíli a pozvolna klesá. Nejvyšší teplota spalin se pohybovala okolo 245°C, což znamená vyšší ztrátu citelným teplem spalin. Uzavření sekundárního vzduchu se nejvíce projevilo na koncentraci CO ve spalinách, ta značně převyšuje koncentrace naměřené v předchozích měřeních. Tím je potvrzena důležitost zavádění sekundárního vzduchu do spalovací komory. Uzavření sekundárního vzduchu také způsobilo snížení účinnosti krbové vložky na hodnotu 77% což je snížení o 3%.

18. Vzájemné porovnání všech měření

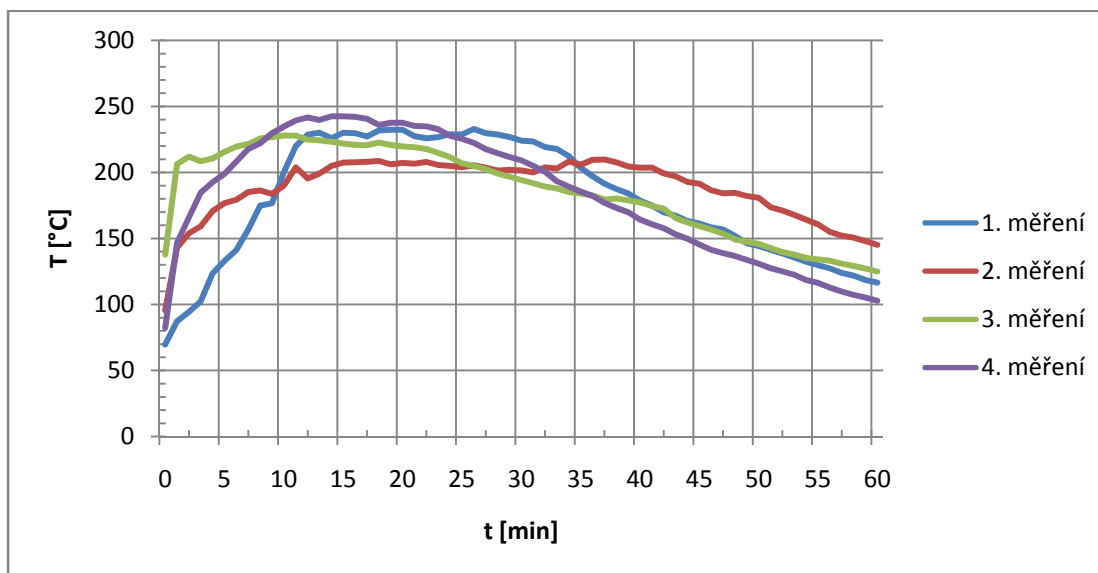


Graf 15 Koncentrace CO v závislosti na čase přepočtena na 13% O₂

V grafickém znázornění č.15 jsou zobrazeny průběhy koncentrací CO obsaženého ve spalínách v závislosti na čase. Protože CO je produkováno při nedokonalém spalování, tak je žádoucí co nejnižší hodnota. Nejnižší hodnoty bylo dosaženo při 1. nastavení. V tomto měření ovšem nebyla zcela kontrolována regulace přívody primárního vzduchu, vlivem přísávání. Tudiž nelze označit toto nastavení za nejlepší. Při druhém měření se minimální hodnoty koncentrace pohybovali velmi blízko hodnotám z měření prvního. U tohoto měření bylo těchto nejnižších koncentrací dosahováno po delší časový úsek než v měření prvním. Při dohořívání byla koncentrace CO také nejnižší. Ve třetím měření byly spalovány dřevěné brikety. Jak je zřejmé z průběhů, tak brikety mají zcela jiný charakter hoření. U spalování briket nebylo dosaženo pozvolného hoření. Koncentrace CO zhruba po 30min hoření dosáhla své minimální hodnoty, na které setrvala jen krátký časový úsek. V počáteční a konečné fázi byla koncentrace CO výrazně vyšší než u měření č. 2. V pořadí 4. měření bylo provedeno s uzavřeným přísunem sekundárního vzduchu. Od tohoto měření se očekávalo horší spalování, způsobené nedohořením prchavé hořlaviny ve spalínách. Koncentrace CO ve spalínách je výrazně vyšší než v předchozích případech. V průběhu změn koncentrace dochází k prudkému poklesu na minimální hodnotu, která je ustálena pouze na dobu 10min a po té dochází k rychlému nárůstu koncentrace. Je tu způsobeno tím, že do horní části spalovací komory není přiváděn sekundární vzduch a nedochází tedy k vyhoření prchavé hořlaviny.

Graf 16 Koncentrace O₂ v závislosti na čase

V prvním měření byla naměřena největší koncentrace O₂ ve spalínách. Ve druhém měření došlo k pozvolnému zahoření paliva a následně k plynulému hoření bez skokových změn. Díky tomu nedochází k náhlým skokovým změnám koncentrace O₂. Oproti tomu je vidět skoková změna koncentrace kyslíku ve třetím a čtvrtém měření. Ve 3. měření je tato skoková změna způsobena prudkým zahořením dřevěných briket. Ve 4. měření byl prudký pokles koncentrace způsoben především tím, že nebyl přiváděn další vzduch do spalovací komory a tím tedy docházelo ke spálení většiny kyslíku již ve spodní části spalovací komory a v horní části nedošlo k zahoření prchavé hořlaviny.



Graf 17 Průběh teploty spalín v závislosti na čase

Poslední grafické znázornění zobrazuje průběhy teplot spalín pro jednotlivá měření. Nejvyšší teplota spalín byla naměřena v posledním měření. Příčina je stejná jako u výše popsaných případů. U 1. 3. a 4. měření došlo k prudkému nárůstu teploty. Teplota těchto nastavení setrvala na maximální hodnotě kratší dobu než v měření č. 2. To znamená, že došlo k rychlejšímu vyhoření paliva. Druhé měření probíhalo za pozvolného a stabilního hoření. Maximální teplota spalín se dlouhou dobu pohybovala těsně nad hranicí 200°C. Tato teplota je optimální, protože vyšší teplota by znamenala vyšší ztrátu citelným teplem spalín a při nižší

teplotě by mohlo docházet k zanášení komína. Druhé měření tedy vyšlo opět nejlépe. Přesto lze ale říci, že ve všech případech byly výstupní teploty spalin dobré. Z toho lze vyhodnotit, že teplovodní výměník velmi dobře ochlazuje spaliny a tím je snížena ztráta citelným teplem spalin.

		1.měření	2.měření	3.měření	4.měření
C_{pmd}	[kJ/m ³]	1,34	1,36	1,36	1,36
C_{pmh2o}	[kJ/m ³]	1,51	1,52	1,52	1,51
R	[%]	1,21	1,21	1,21	1,21
Cr	[%]	0,21	0,21	0,21	0,21
Q_a	[kJ/kg]	4003,5	2629,15	2299,02	2269,46
q_a	[%]	26,16	17,18	12,7	14,83
Q_b	[kJ/kg]	441,05	309,53	723,51	1138,3
q_b	[%]	2,88	2,02	3,99	7,43
Q_r	[kJ/kg]	71,96	71,96	71,96	71,96
q_r	[%]	0,47	0,47	0,47	0,47
η	[%]	70,48	80,32	82,9	77,25
P_p	[kW]	21,25	16,78	26,14	21,94
P_v	[kW]	14,97	13,48	21,67	16,95

Tab. 13. Vypočtené hodnoty pro jednotlivá měření

	T_{sp}	CO	CO₂	O₂	α	CO na 13% O₂
	[°C]	[%]	[%]	[%]	[-]	[%]
1. měření	180,28	0,21	4,66	14,35	2,41	0,25
2. měření	188,93	0,26	8,26	9,75	1,82	0,18
3. měření	186,77	0,7	9,07	9,1	2,49	0,46
4. měření	184,10	1,04	8,22	10,51	3,7	0,79

Tab. 14 Střední hodnoty pro jednotlivá měření

V tabulce č. 13 se nacházejí vypočtené hodnoty. Z těchto vypočtených hodnot jsou pro nás nejdůležitější vzniklé ztráty a z nich následně vypočítaná účinnost. Ztráta citelným teplem spalin (Q_a) je značně nejvyšší pro měření číslo 1. U dalších měření je srovnatelná. Ztráta způsobená plynným nedopalem (Q_b) je nejvyšší v měření č. 4. To je způsobeno únikem prchavé hořlaviny, která nedohořela v horní části spalovací komory. Nutnost zavádění sekundárního vzduchu je tedy zřejmá. Pro měření číslo 3. byla vypočtena nejvyšší účinnost. Tuto hodnotu nelze pokládat za zcela platnou, protože nebylo známo složení dřevěných briket, které sloužily jako palivo pro toto měření. Výhřevnost udávána výrobcem je nevěrohodná, tudíž účinnost by ve skutečnosti byla s největší pravděpodobností nižší. Výkon teplovodního výměníku byl nejvyšší pro měření č. 3. Špičkové výkony pro toto nastavení dosahovaly hodnot 17 kW, což byly nejvyšší naměřené hodnoty. Tato hodnota se příliš neliší

od vypočtené hodnoty 20,7 kW. Pokud by bylo teplo dostatečně odváděno, tak by těchto hodnot mohlo být v praxi dosaženo. Nejvyššího naměřeného výkonu bylo dosaženo z důvodu rychlého hoření dřevěných briket, kdy výkon velice rychle narostl, ale po krátké době rychle klesl na nižší hodnotu. Tohoto maximálního výkonu by tedy bylo možné dosáhnout jen v případě častého přikládání. Tento způsob vytápění by byl značně neekonomický. Je tedy lepší stabilizovat hoření na nižší teplotě. Toho bylo nejlépe dosaženo při 2. měření. U tohoto nastavení byl naměřen střední výkon teplovodního výměníku 9 kW. Pro toto nastavení bylo také použito nejméně paliva.

Podle účinnosti krbových vložek je lze řadit do jednotlivých tříd. Podle tabulky č.15 lze všechna měřená nastavení zařadit do Třídy 1. První měření se sice pohybuje na hranici 70%, ale jak již bylo výše uvedeno, tak toto nastavení není provozní.

Třída účinnosti zařízení	Mezní hodnoty účinností [%]
Třída 1	≥ 70
Třída 2	$\geq 60 < 70$
Třída 3	$\geq 50 < 60$
Třída 4	$\geq 30 < 50$

Tab. 15. Dělení tepelných zařízení do tříd podle účinnosti

Jako druhé dělení krbových vložek je podle naměřené koncentrace CO přepočtené na 13% O₂. Podle tabulky č. 16 lze do první třídy emisí CO zařadit pouze první dvě měření. Další nastavení přesáhla hodnotu 0,3 % a jsou tedy řazena do Třídy 2.

Třída emisí CO	Koncentrace CO při 13% O ₂ ve spalinách [%]
Třída 1	$\leq 0,3$
Třída 2	$> 0,3 \leq 1,0$

Tab. 16 Dělení tepelných zařízení do tříd podle emisí CO

Po provedeném vzájemném porovnání všech měřených nastavení, bych zhodnotil druhé měření jako nejúspěšnější.

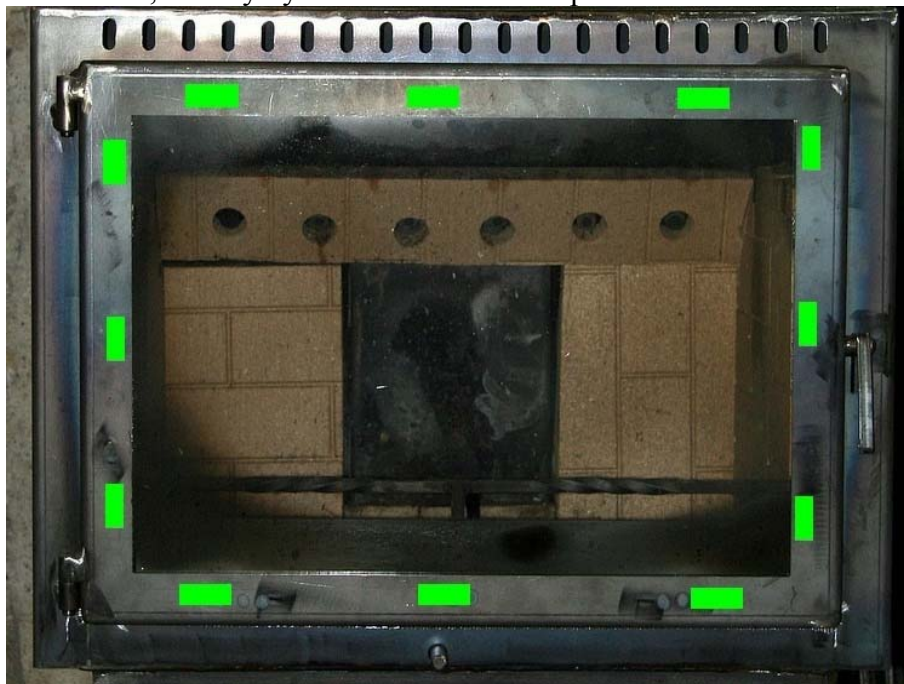
K tomuto rozhodnutí směřuje několik bodů:

1. Nejvyšší vypočtená účinnost krbové vložky (hodnotu pro 3. nastavení nelze považovat za zcela platnou)
2. Nejnižší hodnota koncentrace CO ve spalinách (první měření nebylo prováděno za běžného provozu, vlivem přisávaného vzduchu)
3. Stabilní průběh hoření, bez náhlých nárůstů a poklesů teploty
4. Nejnižší příkon krbové vložky i při vysoké účinnosti
5. Nejnižší ztráta plynným nedopalem
6. Zařazení do Třídy 1 emisí CO

19. Navrhované změny

19.1. Změna č.1

Během prvního měření bylo zjištěno značné přisávání vzduchu. Vlivem přisávaného vzduchu nebylo možné provádět regulaci hoření. Během prvního měření byla dosedací plocha mezi čelním sklem a dvířky utěsněna podle obr. 25. Zelená barva značí těsnění. Při tomto provedení vznikla mezera mezi sklem a dvířky téměř po celém obvodu. Je nutné provést změnu podle obr. 24, tak aby byl zaveden zároveň i oplach skla.



Obrázek 25 Utěsnění dvířek před prvním měřením

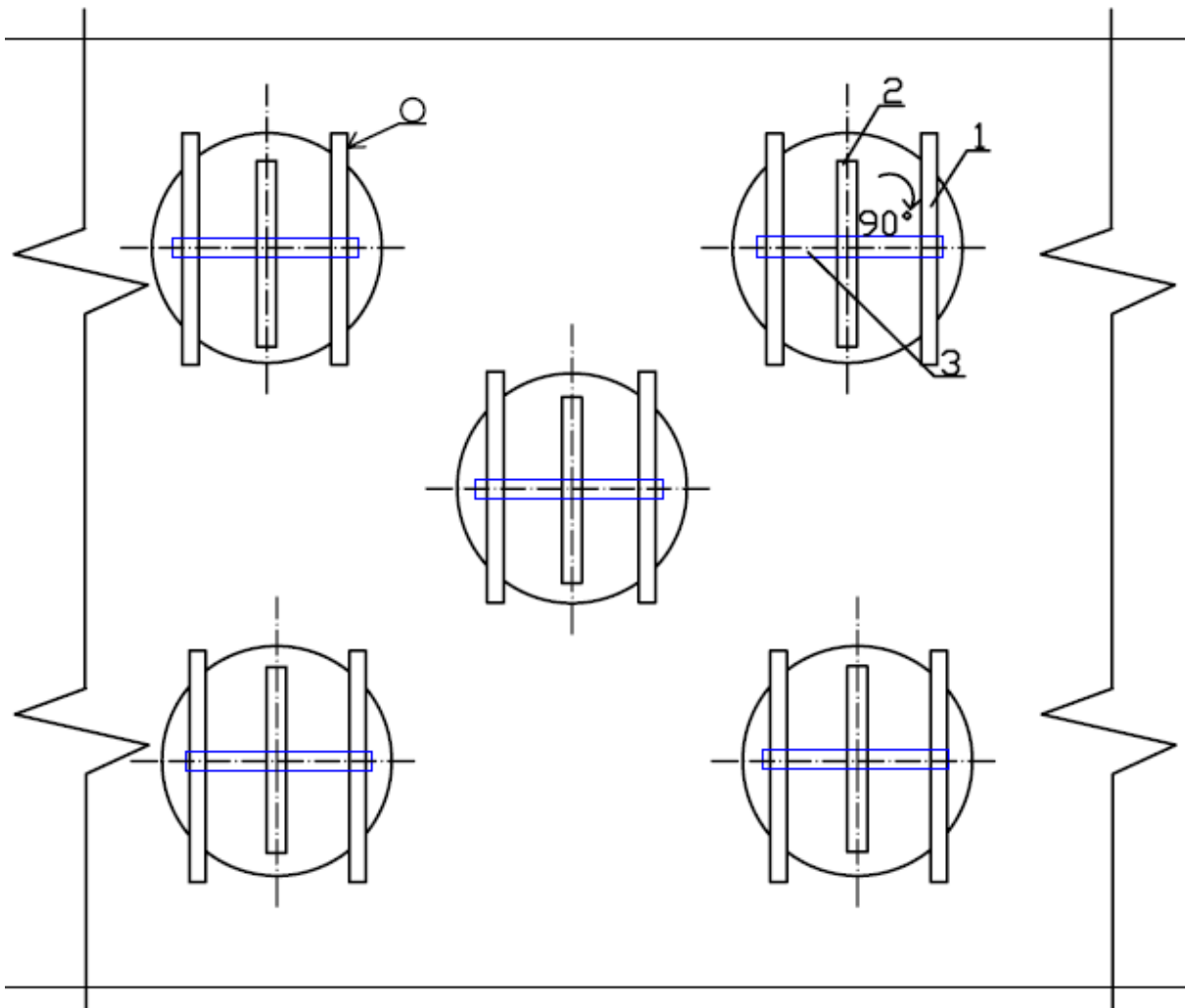
19.2. Změna č.2

Druhá změna se týká rozměrů trysek sloužících k přivádění sekundárního vzduchu do horní části spalovací komory. Při prvním návrhu měly všechny trysky stejný rozměr. Při tomto provedení, byl přívod sekundárního vzduchu nerovnoměrný. Krajiní trysky vzduch téměř nepřiváděly. Vzduch byl tedy přiváděn především do středu spalovací komory. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno ke změně rozměrů trysek tak, že krajní mají větší průměr než trysky na středu. Tím ovšem bylo dosaženo opět nerovnoměrného přívodu sekundárního vzduchu, ale opačného charakteru. Během měření bylo zjištěno, že krajní trysky přivádějí velké množství vzduchu a na střed je vzduch přiváděn jen v minimálním množství. Bylo by tedy vhodné provést opětovnou úpravu rozměrů těchto trysek a to tak, že buď budou zmenšeny průměry trysek krajních, nebo zvětšeny průměry trysek umístěných na středu. Tuto problematiku lze ovšem řešit pouze metodou "pokus-omyl", kdy se výsledek prakticky ověří a případně dojde k další úpravě rozměrů.

19.3. Změna č.3

Poslední navrhovaná změna se týká uložení rozvířovacích plechů v žárových trubkách teplovodního výměníku. Tyto plechy jsou umístěny v žárových trubkách tak, že jsou přístupné k vyjmutí pouze skrz kouřovod, to znamená z horní části křbové vložky. Což není z praktického hlediska obsluhy ideální řešení. V tomto provedení je přístup možný jen k několika plechům skrz kouřovod a zbylá část je nepřístupná, protože je ukryta pod vrchním

pláštěm křbové vložky. Po dlouhodobějším provozování křbové vložky, dochází k zanášení teplosměnných ploch teplovodního výměníku. Tím se snižuje jeho výkon a účinnost celé křbové vložky. Teplosměnné plochy je tedy nutné čistit. Původní návrh rozvířovacích plechů byl směřován tak, že plechy mají sloužit nejen ke zpomalení průchodu spalin žárovými trubkami, ale také k jejich čištění. Jak již bylo výše uvedeno, tak čištění je možné provádět jen několika plechy, protože ostatním ve vertikálním pohybu brání horní plášť křbové vložky. Konstrukci je tedy potřeba provést tak, aby plechy byly vyjímatelné a to ze spodní části teplovodního výměníku. Provedení může být například podle obr.26 kde pozice 1 značí kulatinu, která je navařena bodovým svářem k hornímu plášti teplovodního výměníku. Plech je vsazen do žárové trubky ze spodní strany teplovodního výměníku a je přístupný přes spalovací komoru. Otočením plechu o 90° dojde k jeho zajištění a dosednutí na kulatinu. Stejným způsobem se plech může vyjmout a žárové trubky mohou být vyčištěny. Pozice č. 2 značí plech před zajištěním. Pozice č. 3 značí plech pootočený o 90° a uložený v provozní poloze. Nevýhodou tohoto provedení je to, že při transportu by plechy mohli vypadat do spalovací komory. Je tedy nutné je umístit až při instalaci křbové vložky.



Obrázek 26 Návrh konstrukce uložení žárotrubných plechů

20. Závěr

Hlavním cílem práce, bylo provést zkušební měření krbové vložky Bety v souladu s normou ČSN EN 13 229. Toto měření bylo provedeno a na základě naměřených hodnot byly provedeny potřebné výpočty. Měření bylo provázeno několika technickými problémy. Jednalo se problémy při dochlazování topné vody, na základě kterých nemohli být uvedeny v práci grafické průběhy závislosti výkonu teplovodního výměníku na čase. Byly ovšem vyhodnoceny střední hodnoty výkonu, které jsou z hlediska dlouhodobého provozu zcela dostačující. Druhý problém se týkal utěsnění čelního skla. Tento problém byl odstraněn před druhým měřením a v závěrečné kapitole je uveden jako jedno z navrhovaných řešení. Za pozornost stojí vypočtené účinnosti, které se v nejlepších případech pohybují těsně nad hranicí 80% a jsou tedy s velkou rezervou zařazeny do 1. účinnostní třídy. Co se týče emisí CO tak při použití sekundárního vzduchu a smrkového dřeva je krbová vložka také řazena do 1. třídy. Měření a následné vyhodnocení (zejména emisí) prokázalo, že dřevěné brikety nejsou vhodným palivem pro tento typ krbové vložky. Z naměřených hodnot lze také usoudit, že přívod sekundárního vzduchu který jsem navrhl má kladný vliv na průběh spalování. Z naměřených výstupních teplot spalin, lze usoudit velmi dobré konstrukční navržení teplovodního výměníku. Střední hodnoty výstupních teplot spalin se pohybují okolo 185°C což znamená malou ztrátu citelným teplem spalin. Teplovodní výměník tedy velmi dobře ochlazuje spaliny a tím dosahuje velkého teplovodního výkonu.

Vypočtené výsledky nelze považovat za zcela přesné, jelikož nebylo známo přesné prvkové složení paliva a každé nastavení bylo proměřeno pouze jednou. Vypočtené hodnoty se tedy mohou mírně lišit od hodnot skutečných.

21. Použitá literatura

1. Budaj, F.: Parní kotle – podklady pro tepelný výpočet, nakladatelství VUT Brno, 1992
2. <http://www.profitall.cz/index.php?disp=vlozky&lang=0&shw=100012>
3. <http://www.centrumkrbu.cz/teplvodni-vlozky/akumulacni-nadrz>
4. Energetické parametry biomasy, Doc. Ing. Zdeněk Skála Csc. , Dr. Ing. Tadeáš Ochodek
5. Norma ČSN EN 13229

22. Přílohy

t	P	T	CO	CO ₂	O ₂	α
[min]	[kW]	[°C]	[%]	[%]	[%]	
0	4,5	69,6	0,18	0,81	19,26	0,02
1	4	87,3	0,17	0,76	19,35	0,02
2	3,9	94,3	0,15	0,58	19,78	13,20
3	3,6	102,3	0,35	1,47	18,22	5,22
4	4,2	123,7	0,42	2,11	17,57	3,64
5	4,3	133	0,38	3,00	16,80	2,56
6	4,7	141,2	0,28	3,92	15,57	1,97
7	4,8	156,6	0,29	4,10	15,37	1,88
8	5,6	174,8	0,29	4,12	15,36	1,87
9	5,6	176,7	0,23	5,24	13,83	1,48
10	6,4	200	0,22	6,00	13,03	1,29
11	6,8	220,1	0,21	5,77	13,29	1,34
12	8,1	228,7	0,17	6,33	12,46	1,22
13	7,7	230,1	0,15	7,53	10,93	1,03
14	8,6	226	0,12	7,63	10,65	1,02
15	8,1	230	0,11	7,54	10,72	1,03
16	8,3	229,7	0,08	7,45	10,85	1,04
17	8,8	227,2	0,08	7,37	11,01	1,05
18	9,3	231,8	0,09	7,11	11,37	1,09
19	10,7	232,3	0,09	7,02	11,48	1,11
20	11	232,3	0,09	6,93	11,63	1,12
21	11,1	227,5	0,09	7,01	11,47	1,11
22	10,6	225,9	0,10	6,80	11,80	1,14
23	11,6	226,7	0,11	6,57	12,12	1,18
24	10,3	228,9	0,11	6,56	12,09	1,18
25	11,5	228,8	0,12	6,55	12,08	1,18
26	11,9	232,9	0,12	6,86	11,61	1,13
27	10,7	229,7	0,12	6,90	11,60	1,12
28	11,5	228,7	0,14	7,03	11,32	1,10
29	11,7	226,8	0,12	6,92	11,48	1,12
30	11,6	224	0,12	6,73	11,68	1,15
31	12,3	223,5	0,10	6,49	11,90	1,19
32	11	219,2	0,09	6,28	12,14	1,23
33	11,3	217,8	0,09	6,07	12,32	1,28
34	11,6	212,4	0,10	5,91	12,53	1,31
35	12	203,6	0,10	5,76	12,66	1,34
36	10	197,1	0,12	5,52	13,01	1,40
37	9	191,4	0,13	5,21	13,48	1,48
38	10,2	187,4	0,15	4,75	14,15	1,63
39	9,1	184	0,19	4,50	14,47	1,72
40	10	178,7	0,24	4,32	14,72	1,79
41	8,6	174,9	0,27	4,33	14,71	1,78
42	9,5	169,7	0,28	4,27	14,81	1,81
43	8,2	167,3	0,33	4,04	15,10	1,91
44	8,7	163,2	0,33	3,66	15,57	2,11
45	8,5	161,3	0,32	3,48	15,79	2,21
46	8,2	158,3	0,31	3,32	15,99	2,32
47	8,1	156,8	0,33	3,21	16,17	2,40
48	7,3	151,9	0,33	3,11	16,30	2,47
49	7,1	146,4	0,31	2,95	16,45	2,61
50	7,3	144,1	0,32	2,84	16,58	2,71
51	7,1	141,4	0,32	2,71	16,73	2,84
52	7,4	138,6	0,32	2,59	16,87	2,97
53	6,4	135,5	0,33	2,45	17,02	3,14
54	6,3	132,3	0,34	2,25	17,20	3,41
55	6,4	129,7	0,33	1,97	17,55	3,90
56	5,9	127,3	0,33	1,85	17,64	4,15
57	6,6	123,8	0,32	1,78	17,74	4,31
58	5,7	121,7	0,31	1,77	17,75	4,34
59	6	118,4	0,31	1,70	17,82	4,51
60	5,9	116,5	0,31	1,64	17,89	4,68

Tab. 17. Naměřené hodnoty pro 1. měření

t	P	T	CO	CO ₂	O ₂	α
[min]	[kW]	[°C]	[%]	[%]	[%]	
0	7,1	95,6	0,204	4,56	14,37	2,50
1	7,1	142,9	0,114	0,56	20,05	20,26
2	7,1	153,9	0,634	5,17	14,33	2,21
3	7,9	159,2	0,83	8,4	10,59	1,37
4	7,4	170,8	0,764	8,97	9,8	1,28
5	7,3	176,7	0,71	9,18	9,52	1,25
6	7,5	179,3	0,65	9,12	9,64	1,26
7	7,5	185,1	0,59	8,97	9,83	1,28
8	7,3	186,3	0,512	9,2	9,32	1,25
9	8,4	183,6	0,39	9,23	9,13	1,24
10	7,9	189,9	0,422	9,07	9,43	1,27
11	8,1	203,8	0,404	9,07	9,4	1,27
12	8,9	195,4	0,336	9,76	8,02	1,18
13	8,5	199,2	0,388	11,25	5,72	1,02
14	8,3	204,9	0,352	11,11	6,01	1,04
15	9,1	207,4	0,37	11,1	6	1,04
16	9,3	207,7	0,338	11,28	5,57	1,02
17	9,4	208	0,24	10,98	5,89	1,05
18	9	208,6	0,172	10,43	6,51	1,10
19	9,7	206,1	0,18	10,21	6,92	1,13
20	9,8	207,1	0,184	10,11	7,05	1,14
21	9,7	206,5	0,194	10,29	6,79	1,12
22	9,7	207,9	0,218	10,54	6,46	1,09
23	9,9	205,6	0,198	10,21	6,98	1,13
24	10,6	204,8	0,154	10	7,1	1,15
25	10	203,9	0,134	10,01	7,02	1,15
26	10	205,4	0,116	9,75	7,4	1,18
27	9,9	203,5	0,096	9,51	7,7	1,21
28	9,9	201,4	0,084	9,34	7,95	1,23
29	9,2	202	0,076	9,04	8,41	1,27
30	9,8	201,5	0,076	8,86	8,67	1,30
31	9,9	200	0,08	8,69	8,92	1,32
32	9,9	203,8	0,104	8,69	8,94	1,32
33	9,9	202,9	0,124	8,61	9,09	1,33
34	9,9	208,2	0,134	8,7	8,93	1,32
35	9,8	205,7	0,126	8,54	9,18	1,34
36	9,7	209,4	0,122	8,71	8,82	1,32
37	9,1	209,7	0,114	8,76	8,69	1,31
38	9,7	207,5	0,114	8,95	8,33	1,28
39	9,9	204,5	0,118	8,95	8,27	1,28
40	9,9	203,5	0,122	8,79	8,56	1,31
41	9,9	203,7	0,12	8,44	9,03	1,36
42	9,8	199,2	0,128	8,24	9,28	1,39
43	9,7	197	0,116	8,07	9,5	1,42
44	9,7	192,7	0,11	7,99	9,59	1,43
45	9,6	191,4	0,114	7,77	10	1,48
46	9,6	186,4	0,124	7,6	10,29	1,51
47	9,4	184,2	0,14	7,43	10,61	1,54
48	9,3	184,5	0,152	7,19	11,04	1,59
49	9,2	182,1	0,17	6,91	11,53	1,66
50	9,1	180,7	0,188	6,73	11,84	1,70
51	9,9	173,6	0,218	6,49	12,25	1,76
52	9,7	171,1	0,266	6,18	12,72	1,85
53	9,6	167,8	0,294	5,82	13,19	1,96
54	9,8	164,2	0,312	5,77	13,26	1,98
55	8,1	160,6	0,35	5,46	13,67	2,09
56	7,9	155	0,382	5,2	13,98	2,20
57	7,7	152,1	0,392	4,94	14,27	2,31
58	7,9	150,6	0,396	4,84	14,43	2,36
59	7,8	147,9	0,402	4,77	14,53	2,39
60	7,7	145,1	0,412	4,7	14,67	2,43

Tab. 18. Naměřené hodnoty pro 2. měření

t	P	T	CO	CO ₂	O ₂	α
[min]	[kW]	[°C]	[%]	[%]	[%]	
0	9,2	137,6	0,72	5,12	14,37	3,30
1	9,1	206,4	0,198	0,94	19,5	17,89
2	9	212	0,922	12,84	4,33	1,32
3	10,4	208,5	2,308	15,99	1,2	1,07
4	10,1	210,7	3,26	16,89	0,72	1,01
5	10,5	215,6	3,554	17,07	0,7	1,00
6	10,1	219,6	3,014	16,76	0,84	1,02
7	10,2	221,6	2,732	16,58	0,93	1,03
8	10,8	225,8	2,256	16,21	1,13	1,05
9	12	226,8	1,944	15,87	1,33	1,07
10	18,2	228	1,686	15,62	1,45	1,09
11	14,8	227,9	1,42	15,23	1,74	1,12
12	16,3	224,9	1,18	14,8	2,08	1,15
13	15,6	224,3	1,014	14,5	2,24	1,17
14	12,7	223,3	0,908	14,23	2,49	1,20
15	17,4	222	0,724	13,52	3,09	1,26
16	17,6	220,8	0,716	13,06	3,72	1,30
17	15,5	220,7	0,632	12,77	3,93	1,33
18	15,5	222,7	0,558	12,53	4,03	1,36
19	14,5	220,9	0,528	12,38	4,13	1,37
20	13,5	219,7	0,454	11,99	4,53	1,42
21	10,7	219,2	0,394	11,65	4,86	1,46
22	15,5	217,8	0,36	11,36	5,14	1,49
23	11,9	214,8	0,316	10,99	5,61	1,54
24	9,4	211,6	0,274	10,5	6,31	1,62
25	10,1	206,9	0,238	10,03	7,01	1,69
26	10,5	205	0,208	9,67	7,56	1,75
27	10,4	202,5	0,16	9,23	8,21	1,84
28	10,2	199,3	0,12	8,93	8,56	1,90
29	10,2	196,8	0,102	8,59	9,08	1,97
30	10,2	194,3	0,098	8,4	9,38	2,02
31	10,6	191,8	0,102	8,1	9,9	2,09
32	10	189,3	0,11	7,86	10,3	2,15
33	9,9	187,8	0,114	7,54	10,81	2,24
34	9,7	185,2	0,12	7,32	11,15	2,31
35	9,1	184,1	0,128	7,16	11,41	2,36
36	9,6	182,6	0,138	6,98	11,67	2,42
37	10	179,5	0,144	6,79	11,96	2,49
38	9,5	180,3	0,148	6,63	12,15	2,55
39	9,4	178,9	0,152	6,53	12,31	2,59
40	8,8	177,3	0,154	6,49	12,3	2,60
41	9,1	174,6	0,164	6,26	12,61	2,70
42	8,9	172,6	0,192	5,88	13,12	2,87
43	8,7	165,5	0,208	5,68	13,33	2,97
44	8	162,3	0,26	5,46	13,63	3,09
45	8,3	159,3	0,286	5,29	13,87	3,19
46	8,1	156,6	0,304	5,09	14,18	3,32
47	7,6	153,6	0,322	4,98	14,34	3,39
48	8,3	149,3	0,36	4,81	14,58	3,51
49	7,5	147,4	0,392	4,66	14,82	3,62
50	7	145,9	0,422	4,59	14,94	3,68
51	7,7	142,7	0,46	4,5	15,08	3,75
52	7,1	139,7	0,492	4,33	15,32	3,90
53	7,3	137,8	0,522	4,2	15,51	4,02
54	6,8	135,2	0,544	4,14	15,61	4,07
55	6,3	134,1	0,556	4,08	15,69	4,13
56	6,5	133,1	0,554	3,99	15,81	4,23
57	6	130,8	0,566	3,93	15,89	4,29
58	6,7	129,1	0,568	3,88	15,95	4,35
59	6,5	127,2	0,588	3,9	15,91	4,32
60	6,6	124,9	0,592	3,84	16,01	4,39

Tab. 19. Naměřené hodnoty pro 3. měření

t	P	T	CO	CO ₂	O ₂	α
[min]	[kW]	[°C]	[%]	[%]	[%]	
0	6	82,2	0,226	0,75	19,94	23,05
1	6,6	146,7	2,93	10,99	8,28	1,59
2	6,9	165,9	4,34	15,93	2,07	1,10
3	6,6	184,7	4,466	16,72	1,37	1,05
4	7,5	192,7	4,532	17,17	0,93	1,02
5	8,3	199	4,71	17,39	0,88	1,01
6	7,8	208,3	4,8	17,54	0,81	1,00
7	8,8	217,8	4,4	17,43	0,84	1,01
8	8,6	222	3,762	17,09	0,99	1,03
9	9,6	229,7	3,022	16,51	1,39	1,06
10	11	234,7	2,38	15,92	1,77	1,10
11	10	239,3	1,978	15,38	2,21	1,14
12	11,7	241,6	1,57	14,96	2,39	1,17
13	16,2	239,7	1,672	15,03	2,28	1,17
14	15,5	242,5	1,7	14,94	2,5	1,17
15	15,3	242,5	1,054	13,75	3,33	1,27
16	15,9	242,1	0,73	12,8	4	1,37
17	14,8	240,6	0,478	11,99	4,58	1,46
18	12,6	236	0,308	11,04	5,6	1,58
19	16,4	237,6	0,226	10,71	5,73	1,63
20	15,5	237,7	0,19	10,56	5,85	1,65
21	11,8	235,2	0,152	10,19	6,27	1,71
22	17,9	234,9	0,168	10,51	5,63	1,66
23	17	232,7	0,11	9,97	6,4	1,75
24	15,4	227,7	0,106	9,5	7,33	1,83
25	10,2	225,4	0,096	9,13	7,94	1,91
26	10	222,4	0,104	8,84	8,43	1,97
27	10,3	217,7	0,128	8,5	9,22	2,05
28	11	214,6	0,138	8,24	9,65	2,11
29	10,2	211,7	0,154	7,93	10,27	2,19
30	11	209,1	0,17	7,56	10,83	2,30
31	10,2	205	0,184	7,48	10,97	2,33
32	10,1	200,4	0,232	7,17	11,58	2,42
33	10,1	193,3	0,324	6,69	12,4	2,60
34	10	189,3	0,362	6,28	13	2,77
35	9,9	185,5	0,372	6,01	13,33	2,89
36	9,9	182,2	0,368	5,88	13,51	2,95
37	9,7	176,9	0,386	5,51	14,01	3,15
38	9,4	173,2	0,416	5,2	14,43	3,34
39	9,8	169,9	0,482	4,77	14,99	3,64
40	9,1	164,3	0,544	4,29	15,58	4,04
41	8,3	160,8	0,572	3,89	16,08	4,46
42	8,8	157,7	0,544	3,68	16,34	4,71
43	9,3	153,1	0,554	3,36	16,75	5,16
44	8,5	149,7	0,538	3,22	16,89	5,38
45	7,8	145,4	0,532	3,1	17,08	5,59
46	8,5	141,4	0,496	2,97	17,24	5,83
47	7,5	138,8	0,49	2,78	17,51	6,23
48	7,1	136,6	0,45	2,67	17,68	6,49
49	7,2	133,7	0,412	2,62	17,79	6,61
50	7	130,8	0,434	2,61	17,8	6,63
51	7,2	127,4	0,402	2,65	17,71	6,53
52	6,8	125	0,392	2,63	17,73	6,58
53	7	122,5	0,384	2,47	17,91	7,01
54	6,5	118,5	0,41	2,24	18,18	7,73
55	6,7	116,3	0,386	2,1	18,36	8,24
56	5,7	112,7	0,362	1,91	18,56	9,06
57	6,3	109,7	0,35	1,77	18,68	9,78
58	5,4	107,2	0,344	1,75	18,7	9,89
59	5,7	105,1	0,336	1,69	18,77	10,24
60	5,5	102,8	0,328	1,63	18,86	10,61

Tab. 20. Naměřené hodnoty pro 4. měření