



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

AUTOMATICKÉ KOTLE NA TUHÁ PALIVA

AUTOMATIC SOLID FUEL BOILERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Klíma

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Otakar Štelcl

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **David Klíma**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Otakar Štelcl**
Akademický rok: 2017/18

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 bakalářské práce:

Automatické kotle na tuhá paliva

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Část práce se bude zabývat rozdělením a popisem automatických kotlů na tuhá paliva. Pozornost bude zaměřena na ekonomiku a ekologii provozu.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše automatických kotlů na pevná paliva
- měření na zkušebně

Seznam doporučené literatury:

LACKNER, Maximilian, Franz WINTER a Avinash K. (Avinash Kumar) AGARWAL. Handbook of combustion. Weinheim: Wiley-VCH, 2010, 5 sv. : il. (některé bar.) ; 25 cm. ISBN 978-3-527-32449-1.

VAN LOO, Sjaak a Jaap KOPPEJAN. Handbook of biomass combustion and co-firing. London: Earthscan, 2008, xix, 442 s. : il., čb. fot. ISBN 978-1-84407-249-1.

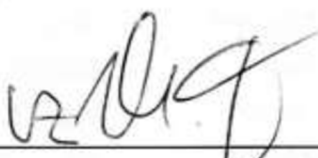
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 8. 11. 2017





doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá automatickými kotly na tuhá paliva. V první části jsou popsány jednotlivá tuhá paliva, která jsou vhodná pro spalování v automatických kotlech. Ve druhé části jsou popsány a rozděleny automatické kotle a jejich části. Třetí část je zaměřena na ekonomii a ekologii kotlů. V poslední části bakalářské práce je popsán experiment měřený na zkušebně.

Klíčová slova

tuhá paliva, automatické kotle, spalování, hořák, emise

Abstract

This bachelor thesis deals with automatic solid fuel boilers. In the first part describes individual solid fuels, which are suitable for combustion in automatic boilers. In the second part is described and divided automatic boilers and their parts. The third part focuses on the economics and ecology of boilers. The last part of the bachelor thesis describes the experiment measured at the testing room.

Key words

Solid fuel, automatic boilers, combustion, burner, emission of pollutants

Bibliografická citace

KLÍMA, D. *Automatické kotle na tuhá paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Otakar Štelcl.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Automatické kotle na tuhá paliva vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne: 23.5.2018

Podpis:

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Otakarovi Štelcovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Paliva.....	10
2.1	Rozdělení paliva.....	10
2.1.1	Tuhá paliva.....	10
2.1.1.1	Uhlí.....	10
2.1.1.1.1	Černé uhlí.....	11
2.1.1.2	Dřevo.....	11
2.1.1.2.1	Pelety.....	11
2.1.1.3	Biomasa.....	11
2.1.2	Kapalná paliva.....	12
2.1.3	Plynná paliva.....	12
3	Kotle.....	13
3.1	Základní rozdělení kotlů.....	13
3.1.1	Dle podávání paliva.....	13
3.1.2	Rozdělení podle použitého paliva.....	13
4	Automatické kotle.....	14
4.1	Automatický kotel.....	14
4.2	Druhy topenišť.....	15
4.2.1	Topeniště se spodním přívodem paliva.....	15
4.2.2	Topeniště s příčným přívodem paliva.....	16
4.2.3	Topeniště se shazováním paliva.....	17
4.2.4	Topeniště s otočným válcovým roštem.....	18
4.3	Typy hořáků v automatických kotlech.....	18
4.3.1	Univerzální samočisticí (žlabový) hořák.....	18
4.3.2	Retortový hořák.....	19
4.3.3	Univerzální čtvercový hořák.....	19
	Ekvitermní regulace.....	20
5	Ekologie a ekonomie automatických kotlů.....	23
5.1	Ekologie.....	23
5.1.1	Požadavky na emise znečišťujících látek.....	23
5.1.2	Ekodesign.....	25
5.2	Ekonomika.....	26
5.2.1	Energetické štítky.....	26
5.2.2	Grafika energetických štítků.....	27
6	Experiment.....	28
6.1	Automatický kotel VERNER A251.1.....	28
6.1.1	Popis kotle.....	28
6.1.1.1	Kotlové těleso.....	28
6.1.1.2	Hořák.....	28
6.1.1.3	Pohon.....	28
6.1.1.4	Násypka.....	28
6.1.1.5	Vzduchování.....	29
6.1.1.6	Turbulátory.....	29

6.1.1.7	Regulátor	29
6.1.2	Funkce kotle	30
6.1.3	Parametry	31
6.1.4	Předepsaná paliva.....	31
6.2	Měření	32
6.2.1	Nepřetržitý provoz při sníženém výkonu.....	33
6.2.1.1	Výkon kotle	33
6.2.1.2	Spotřeba elektrické energie	34
6.2.1.3	Emise	35
6.2.1.4	Účinnost.....	36
6.2.2	Přerušovaný provoz při maximálním výkonu 25 kW	41
6.2.2.1	Výkon kotle	41
6.2.2.2	Spotřeba elektrické energie	42
6.2.2.3	Emise	43
6.2.2.4	Účinnost.....	45
	Závěr:	49
	Seznam použitých zdrojů a literatury	50
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	52

1 Úvod

V dnešní době máme několik možností, jak vytápět naše obydlí. S technologickým vývojem se i vytápění stává jednodušší a mezi populací jsou oblíbené automatické kotle na tuhá paliva, které usnadní čas i peníze.

S vývojem technologií je kladen důraz na vysokou účinnost a s tím spojená energetická a ekologická náročnost provozu kotlů. I když je pořizovací cena automatických kotlů větší než u běžných kotlů, provozní náklady jsou následně menší. Díky automatickému dávkování paliva a systémem řízené spalování, je provoz ekonomičtější a také ekologičtější, což je velmi důležité, vzhledem k zpřísnujícím normám a požadavkům, které se snaží globálně zlepšit životní prostředí.

Cílem této práce je popsat automatické kotle na tuhá paliva a v následném experimentu provést měření při dvou různých chodech automatického kotle. V závěru je vyhodnocena energetická a ekologická náročnost provozu.

2 Paliva

Palivo je obecně každá látka, jejímž spalováním se za hospodářsky a hygienicky přijatelných podmínek uvolňuje teplo. Během spalování dochází k uvolnění a přeměně chemické energie na energii tepelnou. Paliva představují sluneční energii nahromaděnou buď v dobách nedávných (dřevo), nebo pravěkých. Hlavními přirozenými palivy jsou dřevo, rašelina, uhlí, ropa, zemní plyn a biomasa. [1]

2.1 Rozdělení paliva

Základní rozdělení paliv

- tuhá
- kapalná
- plynná

Dále je také možno rozdělit paliva podle jejich původu

- fosilní (neobnovitelné) – těžené palivo (uhlí, ropa, zemní plyn)
- obnovitelné – biomasa
- odpadní – paliva, která vznikla, jako vedlejší produkt lidské činnosti (odpadní plyny, komunální odpady, průmyslové odpady ...) [2]

2.1.1 Tuhá paliva

Mezi základní tuhá paliva patří dřevo, rašelina, uhlí, biomasa, zemědělské, průmyslové a komunální odpady. Složení paliv se určuje:

- hrubým rozbořem – určení poměrného obsahu vody W^r popelovin A^r a výhřevnost paliva a prchavá a neprchavá hořlavina
- elementárním obsahem hořlaviny – v němž se navíc ještě určují poměrné obsahy prvků hořlaviny [1]

Hrubý rozbor se určuje poměr mezi hořlavinou – h , popelovinou – A^r a vodou – W^r obsažených v palivu.

$$h + A^r + W^r = 100\%$$

2.1.1.1 Uhlí

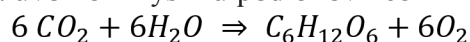
Uhlí je nejvyužívanější tuhé palivo na světě. Uhlí rozlišujeme černé a hnědé a jeho upravené formy brikety a koks. Podle geologického stáří jeho vzniku se rozděluje na černé uhlí, hnědé uhlí, lignit a rašelina, kde černé uhlí je geologický nejstarší a rašelina nejmladší. Se stářím roste výhřevnost, spálené teplo obsah uhlíku, a naopak klesá prchavý podíl hořlaviny a obsah kyslíku a vodíku. Výhodou geologický mladších paliv je snazší zapálení, delší plamen a nižší spalovací teploty. [1]

2.1.1.1.1 Černé uhlí

Černé uhlí patří mezi jedno z nejdůležitějších fosilních paliv, které se využívalo v minulosti. Černé uhlí těží hlavně v podzemí. Nerostné bohatství v tuhé podobě vzniklo dlouhodobým procesem z odumřelých živočichů a rostlin v bažinách. Černé uhlí se skládá hlavně z uhlíku, v menším množství z vody, jílových hornin a sloučenin síry. V dnešní době je černé uhlí jedním z hlavních surovin při výrobě elektřiny a lze jej zušlechťovat na koks. Těžba uhlí má i u nás velkou historii a na našem území se „černé zlato“ těží dodnes. Celosvětové zásoby uhlí se odhadují na 200-300 let. Kromě možné přeměny uhlí na koks se dá uhlí využít v mnoha oborech jako hutnictví, plynárenství nebo v chemickém průmyslu. [4]

2.1.1.2 Dřevo

Je nejstarší známé palivo, které vzniká asimilací, což je proces, kdy dochází k přeměně výchozí látky na jinou (zpravidla pro život typické). Účinkem slunečního světla se slučuje kyslíčnan uhličitý s vodou za uvolnění kyslíku podle rovnice



Hlavní součástí dřeva je celulóza, jejíž množství se pohybuje v rozmezí od 55 % do 62 %. Více celulózy obsahují jehličnaté stromy. Kromě celulózy dřevo obsahuje hemicelulózy – polysacharidy provázající celulózu a jsou nerozpustné ve vodě – lignin, pryskyřice a vosky. Plynné zplodiny obsahují vlivem velkého množství kyslíku ve dřevě jen zřídka a nepatrné množství nespálených látek. [2]

2.1.1.2.1 Pelety

Pelety jsou malé válečky drcených pilin a hoblin s vysokou výhřevností a minimálním podílem vody a popela. Mají průměr 6 nebo 8 mm a délku 20 až 30 mm. Vyrábějí se lisováním z odpadu při zpracování dřeva. Díky své standardizované velikosti pelety umožňují plně automatické vytápění dřevem, bez štípání polínek i přikládání do kotle. [3]

2.1.1.3 Biomasa

Biomasa je obecně veškerá organická hmota na naší planetě, účastníci se koloběhu živin v biosféře. Jsou to těla všech organismů – živočichů, rostlin, bakterií, hub a sinic. Z hlediska energetického je důležitá pouze biomasa, která je energeticky využitelná. Teoreticky je možné získávat energii ze všech forem biomasy, jelikož základem veškeré živé hmoty je uhlík a jeho chemické vazby, obsahující energii. Za energetickou biomasu jsou však většinou považovány rostliny. Ty jsou schopny využívat slunečního záření k fotosyntéze, při které je využito jednoduchých anorganických látek – oxidu uhličitého a vody k tvorbě energeticky bohatých sloučenin – cukrů. [5]



Obrázek 2.1 Dřevěné peletky [15]

2.1.2 Kapalná paliva

V energetice je základní surovinou pro výrobu kapalných paliv ropa. Tato surovina je směs uhlovodíků s malou příměsí organických sloučenin kyslíku, síry, dusíku a minerálních látek. Destilací ropy se získávají frakce různého bodu varu (topný olej, plynový olej, petrolej, benzín, LPG, ...) Dále existují množství spalitelných odpadů (dehtové odpady, sulfátové výluhy). [6]

2.1.3 Plynná paliva

Tyto druhy paliv jsou všechny plyny obsahující hořlavé složky – oxid uhličitý, vodík a plynné uhlovodíky.

Topné plyny

- plyny málo výhřevné
- plyny středně výhřevné
- plyny velmi výhřevné
- plyny velmi vysoce výhřevné [6]

Palivo	Výhody	Nevýhody
zemní plyn	automatická regulace kotle, velice nízké emise, vysoká účinnost	růst ceny, nutná přípojka plynu
propan-butan	automatická regulace kotle, vysoká účinnost	nutný zásobník, nutný dovoz paliva, cena závislá na vývoji ceny ropy a kurzu měny
kapalná paliva	automatická regulace kotle, vysoká účinnost	vysoká cena, nutný zásobník, nutný dovoz paliva
uhlí	průměrná cena	vysoké emise, dovoz a skladování paliva, vynášení popela
dřevo	nízká cena, obnovitelný zdroj energie	dovoz a skladování paliva, možné problém s regulací, u neautomatických kotlů časté přikládání
biomasa	nízká cena, obnovitelný zdroj energie	dovoz a skladování paliva
elektrina	snadná regulace, vysoká účinnost	vysoká cena, nutná přípojka o dostatečné kapacitě

Tabulka 2.1 Výhody a nevýhody jednotlivých paliv [7]

3 Kotle

Kotel je zařízení sloužící k ohřevu vody, k výrobě páry z vody a ohřevu jiného média. Teplo se získává spalováním paliva, ze kterého uvolňujeme chemickou reakcí teplo. V kotli dochází k transformaci chemické energie paliva na tepelnou energii spalin a k následnému přenosu tepla spalin do pracovního média. [1]

3.1 Základní rozdělení kotlů

3.1.1 Dle podávání paliva

- kotle s ruční obsluhou
- automatické kotle

3.1.2 Rozdělení podle použitého paliva

- na tuhá paliva
- kapalná paliva
- plynná paliva [2]

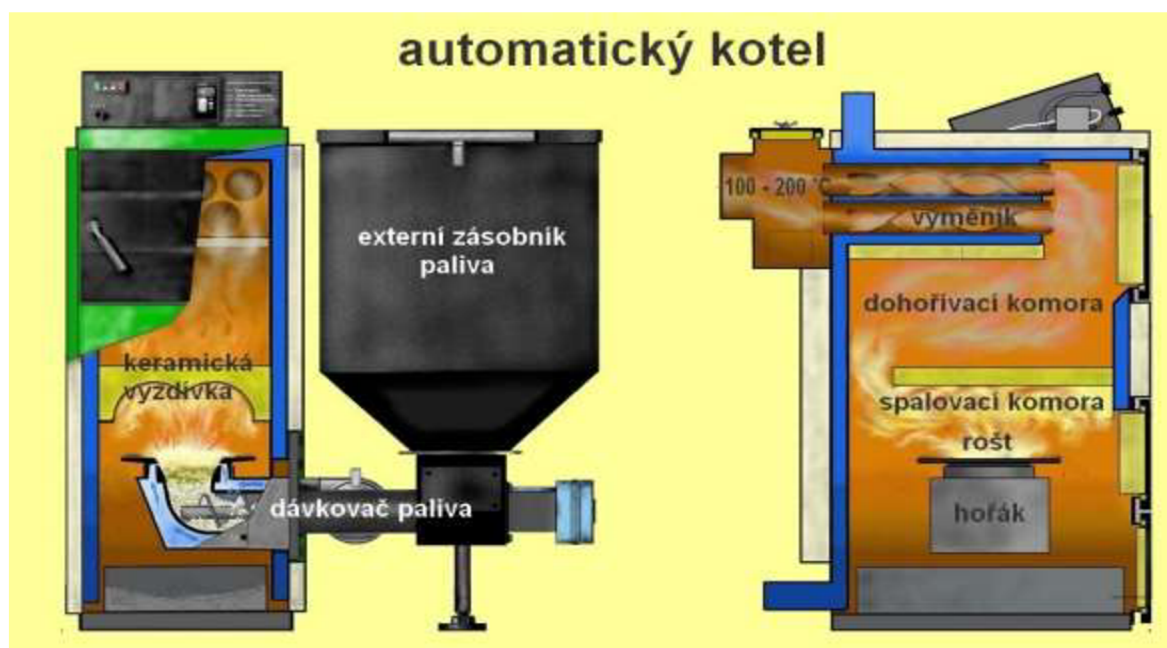
4 Automatické kotle

4.1 Automatický kotel

Automatické kotle na tuhá paliva jsou s v dnešní době stále se rozšiřující variantou vytápění rodinných domů. Jejich výkony, s výjimkou interiérových kamen, obvykle začínají na 14kW.

Obecně platí, že jsou velice choulostivé na kvalitu, nebo konkrétní značku paliva. Nejčastěji jsou v těchto zařízeních spalovány takzvané, bílé peletky“ z měkkého dřeva s minimem kůry a pryskyřice, nebo hnědé uhlí „Ořech 2“. Spalovací proces v těchto typech zařízení, je citlivý na chemické složení paliva.

Vlastnosti jako výhřevnost a rychlost odhořívání paliva musí být v souladu s rychlostí podávání paliva na hořák kotle. Stejně tak musí odpovídat i množství tlakově dodávaného spalovacího vzduchu. Nevhodné palivo, špatné nastavení kotle, případně nestálý tah komína pak mohou vést neekonomickému provozu zařízení, zanášení hořáku, nízkému výkonu, vyhasínání kotle, či úplně nejhůře v případě selhání bezpečnostních prvků a požárů zásobníku paliva. [8]



Obrázek 4.1 Schéma automatického kotle [8]

Elektrická energie je pro tento typ tepelného zdroje nezbytná. Napájí podavače paliva, ventilátory pro přívod vzduchu, řídicí jednotku, pohony ventilů i oběhová čerpadla. Pokud je kotel vybaven zapalovacím zařízením, pak je do celkové spotřeby pomocné elektrické energie zapotřebí kalkulovat i příkon žhavicí spirály pro toto zařízení. S ohledem na počet pohyblivých součástí tohoto typu zdroje tepla, nebo tření paliva v podavači jsou známy případy provozního hluku, citelného především v nočních hodinách, které se nepodařilo dlouhodobě na konkrétních instalacích odstranit.

Nákup paliva je vhodné načasovat na léto, kdy je cena s ohledem na malou poptávku nejnižší. V případě uhlí, také není nasáklé vodou. Je tedy vhodné suché skladovací prostory. Vlhké palivo obecně způsobuje nižší účinnost hoření. Rozmočené palety jsou fakticky nepoužitelné.

Moderní kotle na spalování pevných paliv používají systém kontinuálního přívodu paliva do ohniště. Ve většině případů se jedná o dopravu pomocí šnekových dopravníků a pomocí otočného válcového roštu. Automatická doprava paliva do kotle zajišťuje stabilitu spalovacího procesu, stabilitu požadovaného výkonu, vysokou účinnost spalování, nízkou produkci škodlivin a komfort pro uživatele.

Automatické kotle na pevná paliva pro ústřední vytápění mohou využívat jak spalování na roštu, tak speciálních hořáků či hořákového provedení spalovací komory, dále spodního přívodu paliva nebo zplyňování. Velice důležitá je řídicí jednotka, která všechny systémy koordinuje a zajišťuje komunikaci kotle s uživatelem. Stupeň a preciznost automatizace je hlavním důvodem odlišnosti cen u kotlů stejné výkonové úrovně.

Kotle s automatickým řízením se vyznačují tím, že kromě regulace tepelného výkonu, resp. i procesu spalování, jsou schopny řídit přívod paliva a to, buď kontinuálně nebo stupňovitě. Automatické dodávce paliva musí být přizpůsobena i samotná forma paliva. U zdrojů tepla s automatickým řízením se můžeme setkat s různými typy konstrukcí topenišť. [7]

4.2 Druhy topenišť

- Topeniště se spodním přívodem paliva
- Topeniště s příčným přívodem paliva
- Topeniště se shazováním paliva
- Topeniště s otočným válcovým roštem.

4.2.1 Topeniště se spodním přívodem paliva

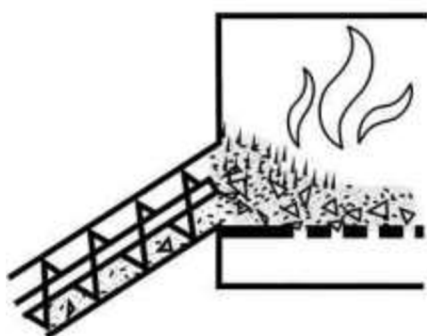
V topeništích se spodním přívodem paliva se palivo dopravuje do spalovací pánve pomocí šnekového dopravníku. Primární spalovací vzduch se přivádí do spalovací pánve pomocí otvorů a postupně dochází k vysušování paliva, pyrolytickému rozkladu, zplyňování paliva a hoření dřevěného uhlí. Uvolněné hořlavé plyny se okysličují sekundárním spalovacím vzduchem před vstupem do dohořivací komory. Odchozí spaliny na cestě do komína předávají teplo ve výměníku, kde se ohřívá teplotonosné médium. [7]



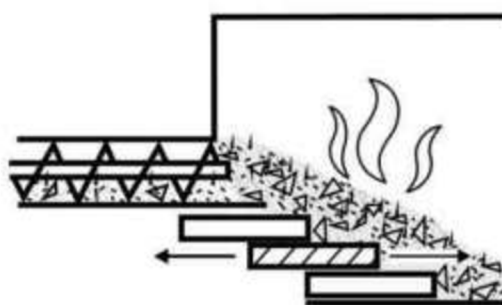
Obrázek 4.2 Topeniště se spodním přívodem paliva [19]

4.2.2 Topeniště s příčným přívodem paliva

Do kotlů s topeništěm s příčným přívodem je palivo dodávané ze strany. Při tomto typu topeniště se používá buď spalování roštové nebo bezroštové. Doprava paliva do topeniště se při palivech s jemnozrnnou a rovnoměrnou strukturou realizuje převážně pomocí šnekového dopravníku. U roštových topenišť převažují systémy s pevným roštem. Topeniště s posuvem paliva po pevném roštu mohou být realizována jako nechlazená nebo chlazená vodou. Konstrukce vodou s chlazeným topeništěm jsou vhodné kromě spalování štěpky a pelet i pro spalování paliva s vysokým obsahem popela a paliva se sklonem k tvorbě škváry (obilí, zrno). Primární spalovací vzduch je vhodným způsobem přiváděn do prostoru primární zóny spalování paliva, a to buď přes rošt přívodními vzduchovými kanály nebo tryskami. U roštových konstrukcích splňuje primární vzduch také funkce roštového chlazení, což zmenšuje riziko tvorby škváry a přehřívání materiálu. Sekundární vzduch se přivádí do prostoru před vstupem do dohořovací komory. Při palivech bohatých na popel může popel pomocí šneku vynést do velkého zásobníku popela. [7]



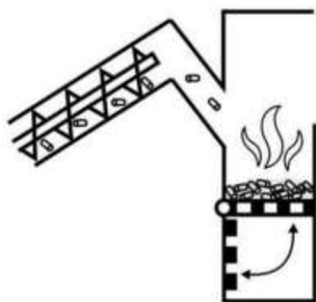
Obrázek 4.3 Topeniště s pevným roštem příčným přívodem paliva [19]



Obrázek 4.4 Topeniště s posuvným roštem příčným přívodem paliva [19]

4.2.3 Topeniště se shazováním paliva

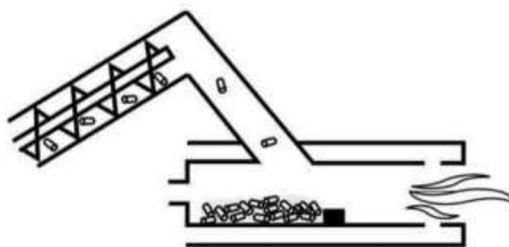
Topeniště se shazováním paliva, někdy označováno jako horní přívod, byla speciálně vyvinuta pro spalování dřevních pelet. Tato konstrukce topeniště není vhodná pro spalování dřevní štěpky. Pelety se dopravují šnekovým dopravníkem do horní polohy tak, aby pelety padaly troubou nebo šachtou shora do rozžhavené grilu. Ten se může nacházet buď ve vyměnitelné pánvi ohniště, na překlápěcím roštu nebo ve spalovacím tunelu. Přívod primárního a sekundárního spalovacího vzduchu je zajišťován buď odspodu nebo přes boční vzduchové trysky. Tento typ topeniště se používá pro malé tepelné výkony, přibližně do 30 kW. Přívod primárního a sekundárního spalovacího vzduchu je zajišťován buď odspodu, respektive přes boční vzduchové trysky. [7]



Obrázek 4.5 Topeniště se shazováním paliva na překlápěcí rošt [19]



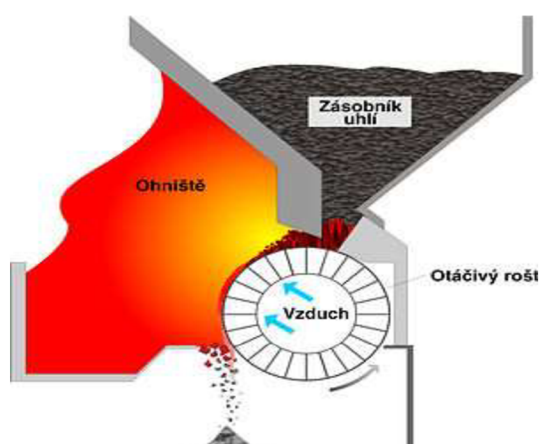
Obrázek 4.6 Topeniště se shazováním paliva do pánevního ohniště [19]



Obrázek 4.7 Topeniště se shazováním paliva do spalovacího tunelu [19]

4.2.4 Topeniště s otočným válcovým roštem

Topeniště s otočným válcovým roštem se oproti klasickým roštům liší v konstrukci otáčivého roštu, na které probíhá hoření. Palivo se automaticky sesouvá z násypky na rošt nebo je podáváno dávkovacím šnekem. Na roštu tedy hoří jen optimální množství paliva. Otáčivý pohyb roštu zajišťuje přísun paliva ze zásobníku a odvod popela. U správně nastaveného krokování roštu musí být popel odcházející do popelníku do šeda vyhořelý. Z komína by neměl vycházet tmavý kouř. U moderních kotlů řídí spalování automatická regulace kotle a topný výkon je utlumován postupně. V případě snížení odběru tepla je oheň v topeništi utlumený a doutná pouze několik uhlíků. Palivo v kotli nevyhasne ani v případě 12 hodinového výpadku elektrické energie a poté se bez zapálení a zásahu obsluhy automaticky spustí. Doplnění paliva je buď ruční nebo mechanické, šnekovými, popř. pásovými dopravníky. Účinnost kotlů přesahuje 80 % a svědčí o velmi dobré konstrukci a kvalitním spalování. [7]



Obrázek 4.8 Topeniště s otočným válcovým roštem [9]

4.3 Typy hořáků v automatických kotlech

4.3.1 Univerzální samočisticí (žlabový) hořák

Hořák se skládá ze spalovacího roštu z litiny a vzduchové směšovací komory umístěné pod roštem a šnekového podavače, který tlačí materiál před sebe na rošt, kde se spálí. Zároveň dochází k samočištění hořáku, popel totiž přepadává otevřenou stranou do popelníku. Tento typ nejlépe spaluje dřevní pelety, rostlinné pelety, uhlí, ale i dřevní štěpku. Není určen pro drobné a lehké materiály. Díky své konstrukci dokáže jednoduše vytlačit případně vzniklé



Obrázek 4.9 Samočisticí hořák [10]

spékance. Vzduch je primárně vháněn ze dvou spodních stran hořáku, proto má nižší účinnost spalování. Spalování je méně účinné z důvodu horší podpory vzduchu pro hoření a kotel se více zanáší. [10]

4.3.2 Retortový hořák

Pro retortový typ hořáku je navržena typická kulatá pec určená pro spalování uhlí a velmi kvalitní dřevní pelety. Hořák funguje na principu uložení šneku pouze na jedné straně u převodovky a tlačí materiál do pece ve tvaru kolene. Zde se materiál pěchuje a drtí. Směr vytlačení materiálu není dán, tím pádem nelze spalovat více spékavé materiály, které se nedokáží vytlačit a dochází často k vyhasnutí. Popel přepadává přes límec retorty do popelníku pod hořákem. Tento hořák má účinné spalování díky podpoře vzduchu ze všech stran směrem do středu. Nedosahuje vysokých teplot při hoření, a proto se používá nad hořák deflektor, který částečně vrací teplo zpět do pece hořáku a zvyšuje teplotu hoření a účinnost. Nevýhodou je zde uložení šneku na jedné straně, což může mít za následek nepříjemné pískání při chodu podavače.

Na trhu existuje ještě otočná retorta, která funguje na stejném principu, kde se při spalování méně kvalitních dřevních pelet dokáží eliminovat vzniklé spékance, ale pro alternativní paliva není určen. Díky pootočení vrchního límce se v místě nadzvednutí odstraní vzniklé spékance, ale nikdy ne zcela, hořák se proto musí často čistit. [10]



Obrázek 4.10 Retortový hořák [10]

4.3.3 Univerzální čtvercový hořák

Univerzální hořák čtvercového tvaru se taktéž skládá z litinové pece, směšovače vzduchové komory a podavače. Šnek podavače je uložen po celé délce podavače až po spalovací pec – konstrukčně je podávací šnek v místě litinové pece opatřen opačným závitem, který tlačí materiál daným směrem nahoru. Eliminují se tak vzniklé spékance, které jsou vytlačeny přes okraj do popelníku. Díky prodloužené hřídeli je pevně ukotven a nedochází k pískání při chodu podavače. Hořáky spalují veškeré materiály jako uhlí, dřevěné pelety všech druhů, rostlinné pelety, štěpku, piliny, hobliny, rostlinné materiály. U alternativních materiálů jako jsou piliny či hobliny musí být zajištěno volné padání materiálu ze zásobníku do šneku. Důležité je předimenzovat dostatečně rychlou převodovku z důvodu nízké hmotnosti

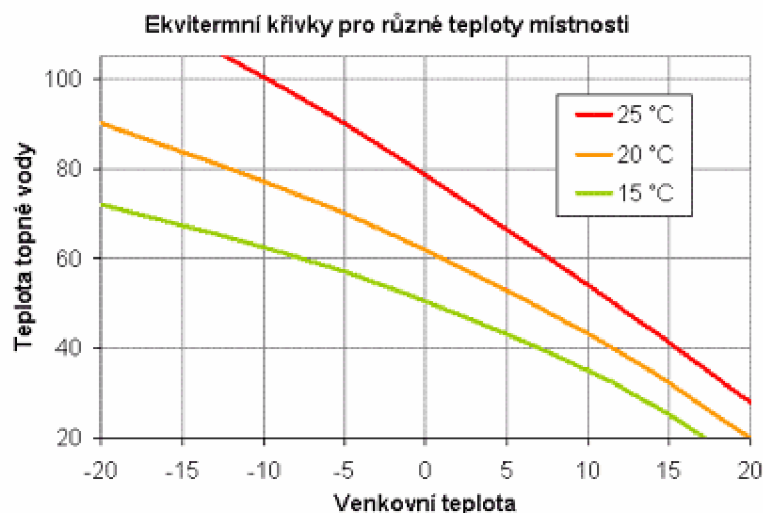
materiálu. Díky čtvercovému tvaru a foukání vzduchu pro podporu hoření ze čtyř stran směrem do středu má hořák vysokou spalovací teplotu a účinnost spalování i bez použití deflektoru. [10]



Obrázek 4.11 Univerzální čtvercový hořák [10]

Ekvitermní regulace

Ekvitermní regulace teploty v místnosti spočívá v nastavení teploty topné vody (regulací zdroje tepla) na základě venkovní teploty. Při nižší venkovní teplotě je požadována vyšší teplota dodávané topné vody, aby došlo k rovnováze mezi dodaným teplem a tepelnými ztrátami místnosti a teplota místnosti tak zůstala konstantní.



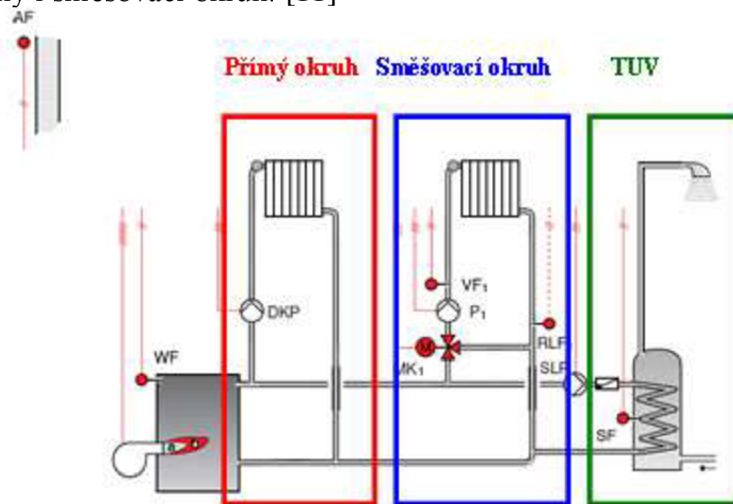
Graf 5.1 Ekvitermní křivka pro různé teploty místností [11]

Pro danou místnost lze stanovit soustavu tzv. ekvitermních křivek (topných křivek), které popisují vzájemnou závislost teploty topné vody, místnosti a venkovní teploty. Na základě požadované teploty místnosti lze zvolit určitou křivku a podle venkovní teploty regulovat teplotu topné vody. Soustava topných křivek se stanovuje na základě jednak požadované teploty v místnosti a také na základě znalosti nejnižší venkovní teploty, která byla v dané oblasti kdy dosažena. Typický průběh závislosti teploty topné vody na venkovní teplotě, tedy ekvitermních křivek, je uveden na grafu 5.1. Na tomto obrázku jsou uvedeny tři ekvitermní charakteristiky pro požadované teploty místnosti 25 °C, 20 °C a 15 °C. Uvedené ekvitermní charakteristiky jsou implementovány v odpovídajících zařízeních nejčastěji označovaných jako ekvitermní regulátory. V těchto ekvitermních regulátorech jsou jednotlivé ekvitermní křivky implementovány a nejčastěji označeny určitými čísly.

Vypočtené teploty topné vody je dosahováno ve zdroji tepla, kterým nejčastěji bývá tepelný výměník nebo kotel (elektrický, plynový nebo na tuhá paliva). Takovýto zdroj tepla tedy ohřívá topnou vodu na požadovanou vypočtenou teplotu.

V systémech vytápění se setkáváme pojmy směřovaný a přímý okruh. Součástí obou typů okruhů je otopné těleso. Každé otopné těleso obsahuje dva otvory pro připojení. Do jednoho otvoru je připojeno potrubí s topnou vodou. Toto potrubí se nazývá přívodní. Druhý otvor v otopném tělese slouží pro připojení vratného potrubí. Vratným potrubím se odvádí topná voda, jejíž teplota je snížena o teplo, které bylo prostřednictvím otopného tělesa předáno do prostoru. Může se stát, že pro různé otopné plochy potřebujeme různou teplotu topné vody. Větší teplotu pro radiátory a nižší pro podlahové vytápění. Tento požadavek se dá snadno splnit

vytvořením dvou topných větví, z nichž ta, kde vždy bude vyšší teplota, se zapojí přímo a teplota v ní je regulována ovládáním zdroje tepla. Směšovaný okruh je přednostně ovládán pomocí směšovacího ventilu, který řídí průtok topné vody ze zdroje tepla do směšovacího okruhu. Směšovací ventil je ovládán dle principu ekvitemní regulace, a to podle teploty topné vody v přívodním potrubí. Přímý okruh již směšovací ventil nemá a teplota topné vody je určena zdrojem tepla. Na obrázku 5.1 je možné pozorovat příklad hydraulického schématu, které obsahuje přímý i směšovací okruh. [11]



Obrázek 5.1 Hydraulické schéma [11]

- AF – venkovní teplota
- DKP – čerpadlo přímého okruhu
- VF – teplota přívodní topné vody
- RLF – teplota vratné vody
- MK – směšovací ventil
- P – čerpadlo směšovacího okruhu
- SLP – čerpadlo pro okruh TV
- SF – teplota zásobníku TV



Obrázek 5.2 Ekvitemní regulátor [12]

5 Ekologie a ekonomie automatických kotlů

5.1 Ekologie

Během každého spalovacího procesu, kdy je palivo spalováno za přítomnosti vzduchu, dochází k produkci určitého množství látek, které jsou považovány za škodliviny. Tyto škodliviny jsou obsaženy ve spalinách a dále vypouštěny do ovzduší.

Jedná se o mnoho složek, jako jsou dusík, oxid uhličitý, vodní pára a při spalování nevyužitý vzdušný kyslík. Tyto složky jsou podstatné a ve spalinách vždy přítomné. Ostatní složky jsou ve výrazně menším množství.

Z důvodu produkce škodlivin je vydáno legislativní opatření realizované zákonem o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. Tento zákon zapracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje:

- přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší
- způsob posuzování přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší a jejich vyhodnocení,
- nástroje ke snížení znečištění a znečišťování ovzduší
- práva a povinnosti osob a působnost orgánů veřejné správy při ochraně ovzduší
- práva a povinnosti dodavatelů pohonných hmot a působnost orgánů veřejné správy při sledování a snižování emisí skleníkových plynů z pohonných hmot v dopravě. [13]

Způsob kontroly dodržování je lehké uplatnit u velkých průmyslových zdrojů a menších podnikatelů. V občanské sféře je toto však složité. Každý typ vyráběného spalovacího zařízení musí být před uvedením na trh podroben zkouškám v autorizované zkušebně. Tyto zkoušky prokazují, že výrobcem předepsaným způsobem provozování a při spalování předepsaného paliva zařízení splňuje zákonné podmínky.

Emisní faktory jednotlivých škodlivin jsou vyjádřeny produkcí škodliviny v takových jednotkách, ve kterých je produkce porovnatelná pro jednotlivá paliva, druhy spalovacích zařízení a tepelné výkony. Emisní faktor může být vyjádřen jako množství škodliviny vyprodukované spálením jednotky paliva (t, m^3), např. $kg_{CO}/t_{\text{paliva}}$. Jelikož mají paliva různou výhřevnost, je výhodnější používat vyjádření dané jako množství škodliviny vyprodukované spálením paliva o jednotkovém energetickém obsahu např. $kg_{CO}/GJ_{\text{v palivu}}$. [6]

5.1.1 Požadavky na emise znečišťujících látek

V současné době pro teplovodní kotle na tuhá paliva je nutné provést „Zkoušku typu“, v Evropské unii platí EN 303-5:2012 (kotle do výkonu 500 kW). V normě jsou popsány způsoby zkoušení kotlů, požadavky na konstrukční materiály a bezpečnost. Dále jsou zde uvedeny základní emisní limity, které musí kotle plnit při jmenovitém i sníženém výkonu (až 30 % P_{jm}).

Kotel je při „zkoušce typu“ podroben testování a dle výsledků spalovacích zkoušek je mu přiřazena třída. Znamená to tedy, že pokud by bylo vše optimální (podmínky na zkušebně), hodnoty emisí by byly menší než emisní limit dané třídy. Znamená to, že je v možnostech daného kotle tyto parametry dosáhnout, ale nic to neříká o tom, jaké budou skutečné emise u konkrétního provozovatele (vliv kvality paliva, obsluhy, instalace a údržby). Proto některé státy vyžadují pravidelné prokazování splnění limitu také v reálném provozu – což se autorům jeví jako velmi smysluplné. V dnešní době se již pracuje na úpravě normy EN 303-5:2012, mimo jiné se zatím jedná o emisních limitech pro třídu 6 a o kondenzačních kotlech na tuhá paliva. [17]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)		
			CO		
			mg/m ³ _N při 10% O ₂ (mg/m ³ _N při 13% O ₂)		
			Třída 3	Třída 4	Třída 5
Ruční	Biologické	≤ 50	5 000 (3 636)	1 200 (873)	700 (509)
		> 50 až 150	2 500 (1 818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		
	Fosilní	≤ 50	5 000 (3 636)		
		> 50 až 150	2 500 (1 818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	3 000 (2 182)	1 000 (727)	500 (364)
		> 50 až 150	2 500 (1 818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		
	Fosilní	≤ 50	3 000 (2 182)		
		> 50 až 150	2 500 (1 818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		

Tabulka 6.1 Emisní limity CO dle EN 303-5:2012 [17]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)		
			OGC		
			mg/m ³ _N při 10% O ₂ (mg/m ³ _N při 13% O ₂)		
			Třída 3	Třída 4	Třída 5
Ruční	Biologické	≤ 50	150 (109)	50 (36)	30 (22)
		> 50 až 150	100 (73)		
		> 150 až 500	100 (73)		
	Fosilní	≤ 50	150 (109)		
		> 50 až 150	100 (73)		
		> 150 až 500	100 (73)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	100 (73)	30 (22)	20 (15)
		> 50 až 150	80 (58)		
		> 150 500	80 (58)		
	Fosilní	≤ 50	100 (73)		
		> 50 až 150	80 (58)		
		> 150 až 500	80 (58)		

Tabulka 6.2 Emisní limity OGC dle EN 303-5:2012 [17]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)		
			Prach		
			mg/m ³ _N při 10% O ₂ (mg/m ³ _N při 13% O ₂)		
			Třída 3 ¹⁾	Třída 4	Třída 5
Ruční	Biologické	≤ 50	150 (109)	75 (55)	60 (44)
		> 50 až 150	150 (109)		
		> 150 až 500	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	125 (91)		
		> 50 až 150	125 (91)		
		> 150 až 500	125 (91)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	150 (109)	60 (44)	40 (29)
		> 50 až 150	150 (109)		
		> 150 500	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	125 (91)		
		> 50 až 150	125 (91)		
		> 150 až 500	125 (91)		

Tabulka 6.3 Emisní limity prachu dle EN 303-5:2012 [17]

5.1.2 Ekodesign

Od 1. ledna 2020 budou muset kotle na tuhá paliva splňovat požadavky uvedené v příloze II Nařízení Komise (EU) č. 2015/1189, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign kotlů na tuhá paliva

Od 1. ledna 2020 musí kotle na tuhá paliva splňovat tyto požadavky při 10% podílu O₂:

- sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostorů u kotlů se jmenovitým tepelným výkonem 20 kW nebo menším nesmí být menší než 75 %;

- sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostorů u kotlů se jmenovitým tepelným výkonem větším než 20 kW nesmí být menší než 77 %;
- sezónní emise částic z vytápění vnitřních prostorů nesmí být vyšší než 40 mg/m^3 u kotlů s automatickým přikládáním
- sezónní emise organických plynných sloučenin (OGC) z vytápění vnitřních prostorů nesmí být vyšší než 20 mg/m^3 u kotlů s automatickým přikládáním
- sezónní emise oxidu uhelnatého (CO) z vytápění vnitřních prostorů nesmí být vyšší než 500 mg/m^3 u kotlů s automatickým přikládáním
- sezónní emise oxidů dusíku (NO_x) z vytápění vnitřních prostorů vyjádřené ekvivalentem oxidu dusičitého (NO_2) nesmí být vyšší než 200 mg/m^3 u kotlů na biomasu a vyšší než 350 mg/m^3 u kotlů na fosilní [20]

5.2 Ekonomika

Při vyhodnocování ekonomiky výroby tepla jsou většinou samostatně vyčísleny palivové a nepalivové náklady spojené s provozem daného zdroje. V případě domácností nejsou do nepalivových nákladů zahrnovány náklady spojené s obsluhou zdroje, případně přípravou a skladováním paliva tzv. mzdové náklady. V tomto případě je navíc provedeno vyhodnocení ekonomiky variantně pouze pro palivové náklady a dále pro kompletní vyhodnocení včetně shrnutí ostatních palivových položek, a to zejména odpovídající části nákladů spojených s pořízením nového kotle. [6]

5.2.1 Energetické štítky

Evropské společenství přijalo v průběhu devadesátých let 20. století několik směrnic, které definovaly nové požadavky na označování spotřebičů pro domácnosti. Konkrétně byla zavedena povinnost označovat vybrané kategorie energetických spotřebičů tzv. energetickými štítky, jejichž účelem je poskytnout spotřebiteli informace o energetické účinnosti nakupovaného spotřebiče.

Od 1. dubna 2017 byla zavedena povinnost štítkování pro teplovodní kotle na pevná paliva, a to podle Nařízení Komise 2015/1187. Pro lokální topidla na pevná, kapalná a plynná paliva (vyjma elektrických) začala povinnost „štítkování“ podle Nařízení Komise 2015/1186 platit od 1. ledna 2018.

Dodavatelé kotlů na tuhá paliva musí zajistit, že pro každý kotel musí být vypočítán tzv. index energetické účinnosti EEI, který vychází ze sezónní energetické účinnosti vypočtené dle NK 2015/1189 (požadavky na ekodesign kotlů na pevná paliva). Podle zjištěného EEI se poté zařadí do příslušné třídy energetické účinnosti. Každý kotel musí být opatřen energetickým štítkem, v návodu k obsluze musí být nově přidán Technický list, přičemž štítek i technický list musí být v elektronické podobě přístupné i obchodníkům. Potřeba dostupnosti v elektronické formě je dána tím, že bude nutné opatřit energetickými štítky a technickými listy i výrobky vyrobené před datem působnosti, tedy před 1. dubnem 2017, protože jinak by musely být vyřazeny z trhu. Informace o energetické účinnosti musí od 1. dubna 2017 obsahovat také všechny reklamní a propagační materiály. [18]

EEI se vypočte pro preferované palivo a zaokrouhli se na nejbližší celé číslo takto:

$$EEI = \eta_{\text{son}} \times 100 \times \text{BLF} - F(1) - F(2) \times 100 + F(3) \times 100$$

Třída energetické účinnosti	Index energetické účinnosti (EEI)
A+++	$EEI \geq 150$
A++	$125 \leq EEI < 150$
A+	$98 \leq EEI < 125$
A	$90 \leq EEI < 98$
B	$82 \leq EEI < 90$
C	$75 \leq EEI < 82$
D	$36 \leq EEI < 75$
E	$34 \leq EEI < 36$
F	$30 \leq EEI < 34$
G	$EEI < 30$

Tabulka 6.4 Tabulka energetické účinnosti dle EEI [18]

5.2.2 Grafika energetických štítků

Přesné grafické ztvárnění energetických štítků pro kotle na pevná paliva je v podstatě shodné s již používanými štítky například pro plynové kotle. Důležité je časové rozvržení štítkování. Od 1.dubna 2017 lze používat energetické štítky pro kotle na pevná paliva se stupnicí A++ (nejvyšší účinnost) do G (nejnižší účinnost), od 26.zář 2019 pak bude tato energetická stupnice pozměněna na A+++ až D. [18]



Obrázek 6.1 Příklad energetického štítku pro soupravu v třídě A++, sestávající z kotle na tuhá paliva třídy A+, solárních kolektorů a zásobníku teplé vody [18]

6 Experiment

6.1 Automatický kotel VERNER A251.1

Automatický teplovodní kotel VERNER A251.1 je určen pro komfortní, úsporné a ekologické vytápění rodinných domků, bytových jednotek, dílen, malých provozoven a obdobných objektů.

6.1.1 Popis kotle

6.1.1.1 Kotlové těleso

Je svařeno z ocelových plechů, které jsou tlusté 4 a 5 mm. Stěny, které jsou ve styku s plamenem jsou dvojitě, chlazené vodou. Ve spodní části tělesa je hořákový prostor, na který navazuje svislý plamenec. V horní části tělesa je dvoutahový žárotrubný spalinový výměník, jenž tvoří 21 trubek o světlosti 40 mm. Součástí tělesa je trubka šnekového dopravníku s hrdlem pro násypku a přírubou pro převodovku s elektromotorem.

6.1.1.2 Hořák

Tvoří ocelové těleso vyložené tvarovkami z jakostní keramiky. Boční tvarovky hořáku jsou opatřeny otvory přívodu sekundárního vzduchu. Zadní tvarovka je opatřena otvory pro vstup zapalovacího vzduchu. Dno spalovacího prostoru tvoří rošt opatřený 6 pohyblivými roštnicemi. Pod výstupem z hořáku je umístěn popelník.

6.1.1.3 Pohon

Základem je převodovka s elektromotorem, v jejímž výstupu je uložena hřídel šnekového dopravníku. Na hřídeli dopravníku je uložen náboj s dvojicí naklopených disků. Náboj je s hřídelí dopravníku propojen spojkou s rohatkou a západkou, umožňující otáčení náboje jen při zpětném chodu dopravníku. Pod šnekovým dopravníkem je tyč pohonu roštnic, umístěná v posuvném uložení. Pohon roštovacího mechanismu je opatřen koncovým spínačem, který zajišťuje, že se roštnice po roštování zastaví v zadní poloze tak, aby nedocházelo k jejich opalování.

6.1.1.4 Násypka

Násypka je svařena z ocelového plechu. Ve vrchní části je opatřena vzduchotěsným víkem pro doplňování paliva. Víko je možné přemontovat, aby se otvíralo na opačnou stranu. Násypka je opatřena bezpečnostním spínačem, který po otevření dvířek odstaví kotel z provozu. Násypka umožňuje namontování vnitřní přepážky k přimíchávání stabilizačního paliva. [14]



Obrázek 7.1 Automatický kotel Verner A251.1 [14]

6.1.1.5 Vzduchování

Tvoří obdélníkové těleso, které obsahuje ventilátor se zpětnou klapkou, komoru pro ohřev zapalovacího vzduchu se spirálovou zapalovací tyčí a regulační clonu primárního vzduchu. Vzduchování je propojeno s násypkou hadicí, což zajišťuje v násypce přetlak a zabraňuje tak pronikání kouře do násypky během provozu.

6.1.1.6 Turbulátory

Slouží k lepšímu vychlazení spalin a dosažení maximální účinnosti kotle. Jejich použití není vhodné v instalacích, kde není využito jmenovitého výkonu kotle a tam, kde není komín odolný proti kondenzátu ze spalin. Turbulátory se umísťují do výstupního tahu spalinového výměníku. Jsou zavěšeny na pohyblivém držáku s ovládací pákou, což umožňuje snadné čištění výstupního tahu výměníku během provozu.

6.1.1.7 Regulátor

S řídicí mikroprocesorovou jednotkou je umístěn pod regulačním panelem v čelní stěně kotle. Zajišťuje automatický provoz kotle včetně roztápění a odstavení. K regulátoru je možné připojit následující zařízení:

- Systémové a kotlové čerpadlo
- Pokojový termostat

- Přídavné čidlo teploty vody
- Přídavné odpopelovací zařízení
- Lambda sonda (pro optimalizaci spalování)
- Řídicí jednotku přídavného doplňovacího zařízení
- Výstup pro externí signalizaci poruchy [14]

6.1.2 Funkce kotle

Šnekový dopravník dopravuje palivo z násypky do hořáku. V hořáku se palivo spaluje a nespalitelné zbytky jsou vytlačovány roštnicemi do popelníku. K roštování dochází v nastavených intervalech reverzním chodem elektromotoru. Spaliny proudí plamencem a výměníkem, kde předávají teplo do topné vody. Ochlazené spaliny odchází výstupním hrdlem do komína. Vzduch potřebný pro spalování dodává přetlakový ventilátor. Primární vzduch se přivádí do paliva spárami v roštu. Sekundární vzduch se přivádí do plamene otvory v bočních tvarovkách hořáku.

Dopravník pracuje přerušovaně: Plní (např. 3s) a pak následuje prodleva (např. 12 s). Regulátor samočinně přizpůsobuje výkon požadavku odběru: Prodlužuje, případně zkracuje dobu prodlevy a řídí otáčky ventilátoru. Zapálení a hoření paliva v hořáku probíhá automaticky. K pohybu roštnic dochází v nastavitelných intervalech reverzním chodem motoru (např. po 10 min). [14]

6.1.3 Parametry

Jmenovitý výkon (standardní paliva)	25 kW
Regulovatelnost	
<ul style="list-style-type: none"> • kontinuálním provozem • elektronicky řízeným odstávkovým režimem 	7,5 – 30kW 0 – 7,5 kW
Účinnost	92%
Spotřeba paliva (při jmenovitém výkonu)	
<ul style="list-style-type: none"> • pelety dřevní (17,5 MJ/kg) • pelety rostlinné (15,5 MJ/kg) • obilniny (kukuřice, pšenice 14,5 MJ/kg) 	5,8 kg/h 6,3 kg/h 6,8 kg/h
Maximální konstrukční přetlak	0,3 MPa
Objem vodní náplně	60 l
Objem násypky (celkový)	240 dm ³
Teplota spalin na výstupu při jmenovitém výkonu	120 °C
Minimální teplota vratné vody v provozu	60°C
Celková hmotnost	520 kg
Maximální hladina hluku	54 dB
Předepsaný provozní tah komína	15 PA
Přívodní napětí	230 V / 50 Hz
Maximální elektrický příkon (při zapalování)	1500 W
Průměrný příkon při provozu	100 W
Druh krytí elektrických součástí IP41	IP41
Třída účinnosti	3
Emisní třída	3
Doba hoření 1 násypky (při jm.výkonu)	28 hod
Hmotnostní tok spalin (při jm. výkonu)	0,016 kg/s
Prostředí (dle ČSN 332000-3)	základní AA5 / AB5
Hmotnost přídavného odpopelovacího zařízení	55kg
Objem popelnice (přídavného odpopelovacího zařízení) 60 dm³	60 dm ³

Tabulka 7.1 Parametry automatického kotle Verner A251.1

6.1.4 Předepsaná paliva

Standardní palivo: pelety dřevní, průměr 6–14 mm

Alternativní palivo: pelety z energetických travin, průměr 6–14 mm [14]

6.2 Měření

V tomto experimentu byla zkoumána energetická a ekologická náročnost provozu automatického kotle Verner A251.1 při dvou různých nastaveních kotle. Během měření byly použity dřevěné pelety A1. K měření elektrické energie byl použit záznamník kvality elektrické energie PEL 103

- Nepřetržitý provoz při sníženém konstantním výkonu 8,5 kW
- Přerušovaný provoz (doba chodu/odstávka) při maximálním výkonu 25 kW



Obrázek 7.2 Automatický kotel Verner A251.1



Obrázek 7.3 Průtokoměr Flomag



Obrázek 7.4 Záznamník kvality elektrické energie

6.2.1 Nepřetržitý provoz při sníženém výkonu

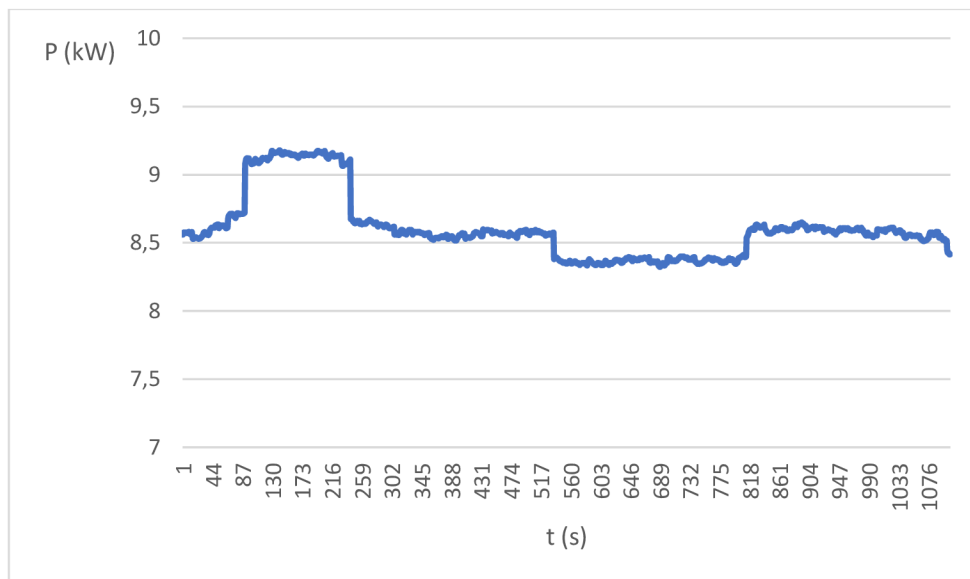
Postupným vyladěním a nastavením parametrů byl kotel v manuálním provozu po dobu 60 minut, tak aby byly změřeny výsledky potřebné k porovnání dvou provozů. Teplota vody byla průměrně 77,6 °C.

Parametry nastavení:

- Interval jednoho cyklu: 30 s
- Doba plnění: 1,5 s
- Ventilátor: 2
- Rošt: 30

6.2.1.1 Výkon kotle

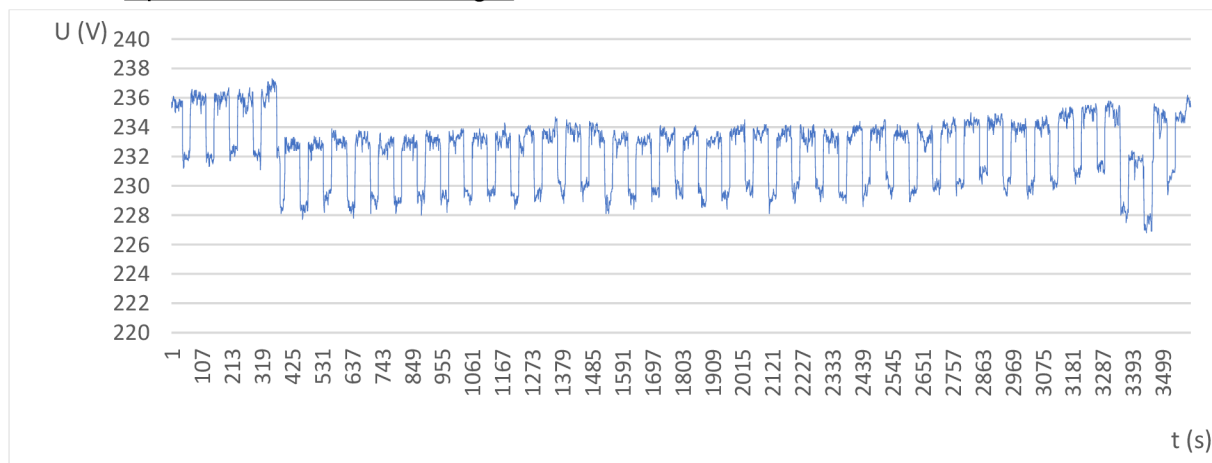
$$\begin{aligned}Q &= 418\text{m}^3/\text{h} \\c_v &= 4180\text{ J/kgK} \\Q &= mc\Delta T \\P &= \frac{Qc\Delta T}{3600}\end{aligned}$$



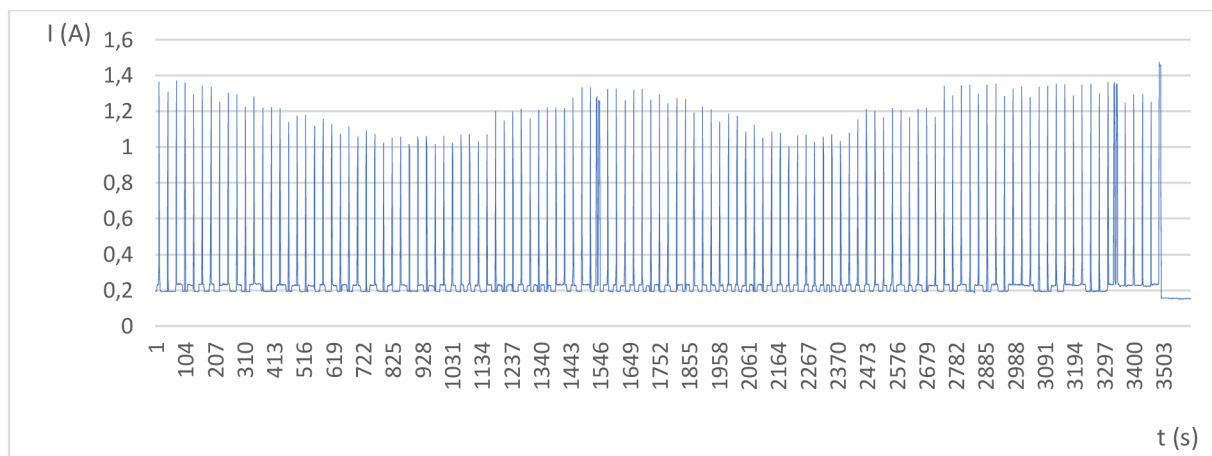
Graf 7.1 Výkon kotle při sníženém výkonu

$$P_a = 8,606 \text{ kW}$$

6.2.1.2 Spotřeba elektrické energie



Graf 7.2 Vývoj napětí během měření



Graf 7.3 Vývoj proudu během měření

$$U_a = 232,4697 \text{ V}$$

$$I_a = 0,2672 \text{ A}$$

$$W = UIt = 232,4697 \cdot 0,2672 \cdot 3600 = 223\,630,4 \text{ Ws} \rightarrow 0,06212 \text{ kWh}$$

6.2.1.3 Emise

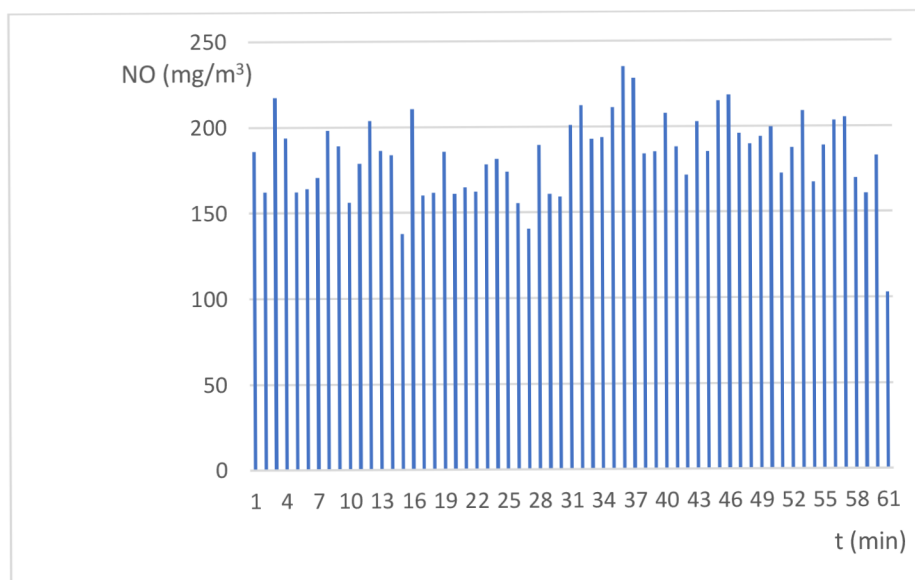
Průměrné hodnoty

- $\text{NO}_a = 183,51 \text{ mg/m}^3$
- $\text{CO}_a = 256,79 \text{ mg/m}^3$
- $\text{O}_{2a} = 13,13 \%$
- $\text{SO}_{2a} = 0 \text{ mg/m}^3$

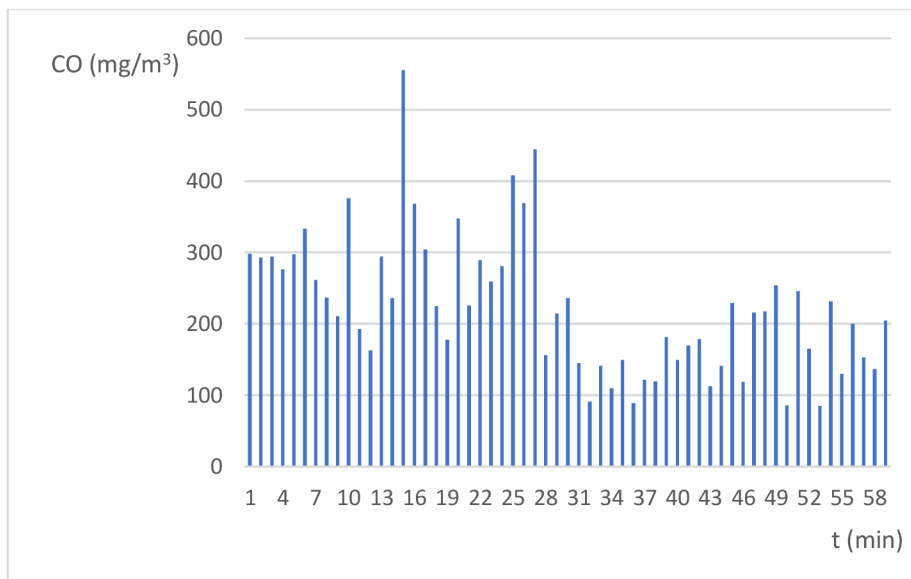
Přepočet emisí na 10 % O_2

$$\text{NO}_{10\% \text{O}_2} = \text{NO}_a \cdot \frac{21 - \text{O}_{2r}}{21 - \text{O}_{2a}} = 183,51 \cdot \frac{21 - 10}{21 - 13,13} = 262,155 \text{ mg/m}^3$$

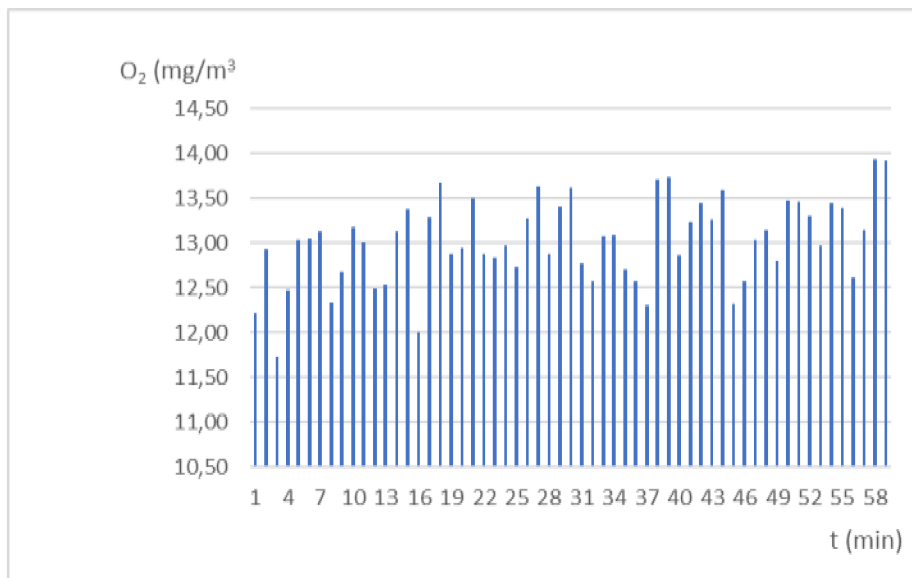
$$\text{CO}_{10\% \text{O}_2} = \text{CO}_a \cdot \frac{21 - \text{O}_{2r}}{21 - \text{O}_{2a}} = 256,79 \cdot \frac{21 - 10}{21 - 13,13} = 366,837 \text{ mg/m}^3$$



Graf 7.4 Hodnoty NO během měření



Graf 7.5 Hodnoty CO během měření



Graf 7.6 Hodnoty O2 během měření

6.2.1.4 Účinnost

$$\eta = 1 - \xi_{mn} - \xi_f - \xi_{cn} - \xi_k - \xi_{sv}$$

- Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)

$$X_r = 1$$

$$C_r = 0,12$$

$$Q_c = 32600 \text{ kJ/kg}$$

$$A^r = 0,007$$

$$Q_i^r = 16500 \text{ kJ/kg}$$

$$\xi_{mn} = \frac{Q_c \cdot A^r \cdot C_r \cdot X_r}{Q_i^r \cdot (1 - C_r)}$$

$$\xi_{mn} = \frac{32600 \cdot 0,007 \cdot 0,12 \cdot 1}{16500 \cdot (1 - 0,12)}$$

$$\xi_{mn} = 0,00189$$

- Ztráta citelným teplem tuhých zbytku

$$\xi_f = 0$$

- Ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal)

$$\omega_{CO} = 0,0000366$$

$$Q_{nCO} = 12610 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_i^r = 16500 \text{ kJ/kg}$$

$$\xi_{mn} = 0,00189$$

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right)$$

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,4979}{12,01} + \frac{0,0574}{4,032} + \frac{0,0010}{32,06} - \frac{0,4236}{32} \right)$$

$$V_{O_2min} = 0,9576 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliv

$$V_{SVmin} = \frac{V_{O_2min}}{21} \cdot 100$$

$$V_{SVmin} = \frac{V_{O_2min}}{21} \cdot 100$$

$$V_{SVmin} = 4,560 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Součinitel přebytku vzduchu

$$\alpha = \frac{21}{21 - wO_2}$$

$$\alpha = \frac{21}{21 - 13,13}$$

$$\alpha = 2,668$$

Objem oxidu uhličitého

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,003 \cdot V_{SVmin}$$
$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,4979 + 0,003 \cdot 4,560$$

$$V_{CO_2} = 0,937 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem oxidu siřičitého

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r$$
$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,001$$
$$V_{SO_2} = 0,00068 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem dusíku

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot N_2^r + 0,7805 \cdot V_{SVmin}$$
$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot 0,020 + 0,7805 \cdot 4,560$$
$$V_{N_2} = 3,575 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem argonu

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{SVmin}$$
$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot 4,560$$
$$V_{Ar} = 0,042 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem suchých spalin

$$V_{SSmin} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar}$$
$$V_{SSmin} = 0,937 + 0,00068 + 3,575 + 0,042$$
$$V_{SSmin} = 3,618 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem suchých spalin za přebytku vzduchu

$$V_{SS} = V_{SSmin} \cdot \alpha$$
$$V_{SS} = 3,618 \cdot 2,668$$
$$V_{SS} = 9,623 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\xi_{cn} = (1 - \xi_{mn}) \cdot \frac{V_{ss} \cdot \omega_{CO} \cdot Q_{nCO}}{Q_i^r}$$

$$\xi_{cn} = (1 - 0,00189) \cdot \frac{9,623 \cdot 0,0000366 \cdot 12610}{16500}$$

$$\xi_{cn} = 0,00027$$

- Ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta)

$$c_{sp} = 1,022 \text{ kJ/kgK}$$

$$t_{sp} = 133,020 \text{ °C}$$

$$t_{vz} = 23,424 \text{ °C}$$

$$Q_i^r = 16500 \text{ kJ/kg}$$

Objem vodní páry v minimální objemu spalin

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H_2^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + (f - 1) \cdot V_{SVmin}$$

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,0574 + \frac{22,41}{18,015} \cdot 0,0860 + (1,01619 - 1) \cdot 4,560$$

$$V_{H_2O}^S = 0,819 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimální objem vlhkých spalin

$$V_{VSmin} = V_{SSmin} + V_{H_2O}^S$$

$$V_{VSmin} = 3,618 + 0,819$$

$$V_{VSmin} = 4,437 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{VVmin} = f \cdot V_{VSmin}$$

$$V_{VVmin} = 1,01619 \cdot 4,437$$

$$V_{VVmin} = 4,509 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem spalin z 1 kg paliva za přebytku vzduchu

$$V_{VS} = V_{VSmin} + (\alpha - 1) \cdot V_{VVmin}$$

$$V_{VS} = 4,437 + (2,668 - 1) \cdot 4,509$$

$$V_{VS} = 7,278 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Skutečný objem spalín

$$V_{SP} = V_{VS} \cdot \frac{273 + t_{sp}}{273} \cdot \frac{0,101325}{p_b}$$
$$V_{SP} = V_{VS} \cdot \frac{273 + t_{sp}}{273} \cdot \frac{0,101325}{0,10218}$$
$$V_{SP} = 10,734 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\xi_k = (1 - \xi_{mn}) \cdot \frac{V_{SP} \cdot c_{sp} \cdot (t_{sp} - t_{vz})}{Q_i^r}$$

$$\xi_k = (1 - 0,00189) \cdot \frac{10,734 \cdot 1,022 \cdot (133,020 - 23,424)}{16500} =$$

$$\xi_k = 0,073$$

- Ztráta sdílením tepla do okolí sáláním a vedením

$$\xi_{sv} = 0,06$$

Celková účinnost

$$\eta = 1 - \xi_{mn} - \xi_f - \xi_{cn} - \xi_k - \xi_{sv} = 1 - 0,00189 - 0 - 0,00027 - 0,073 - 0,06 = \mathbf{0,865} \rightarrow$$
$$\eta = 86,5 \% [22]$$

s

6.2.2 Přerušovaný provoz při maximálním výkonu 25 kW

V druhém měření bylo zapotřebí, aby se teplota pohybovala kolem 77 °C, tak aby bylo možné porovnat výsledky s prvním měřením. Byly nastaveny parametry a zvolena hystereze 5 °C. Kotel byl zapínán při teplotě 74,5 °C a vypínán při teplotě 79,5 °C. Kotel měl určitý doběh jak při zapnutí, tak vypnutí, ale průměrná požadovaná hodnota 77 °C byla dosáhnuta. Doba chodu byla průměrně 6 min a doba odstávky trvala 10 min. Čas experimentu byl nebyl 60 minut, jako v předešlém případě ale 69 minut, z důvodu dokončení cyklu zapnutí a vypnutí.

Parametry

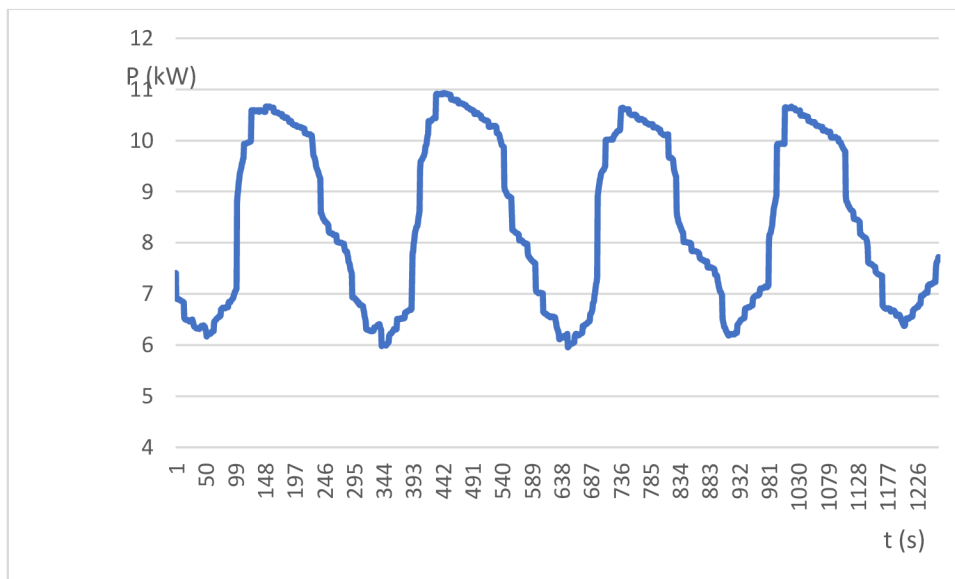
- Interval jednoho cyklu: 17 s
- Doba plnění: 3 s
- Ventilátor: 3
- Rošt: 20

Čas	Zapnutí/vypnutí
11:43	Zapnutí
11:49	Vypnutí
11:59	Zapnutí
12:05	Vypnutí
12:15	Zapnutí
12:21	Vypnutí
12:31	Zapnutí
12:37	Vypnutí
12:46	Zapnutí
12:52	Vypnutí

Tabulka 7.2 Časy zapnutí a vypnutí kotle

6.2.2.1 Výkon kotle

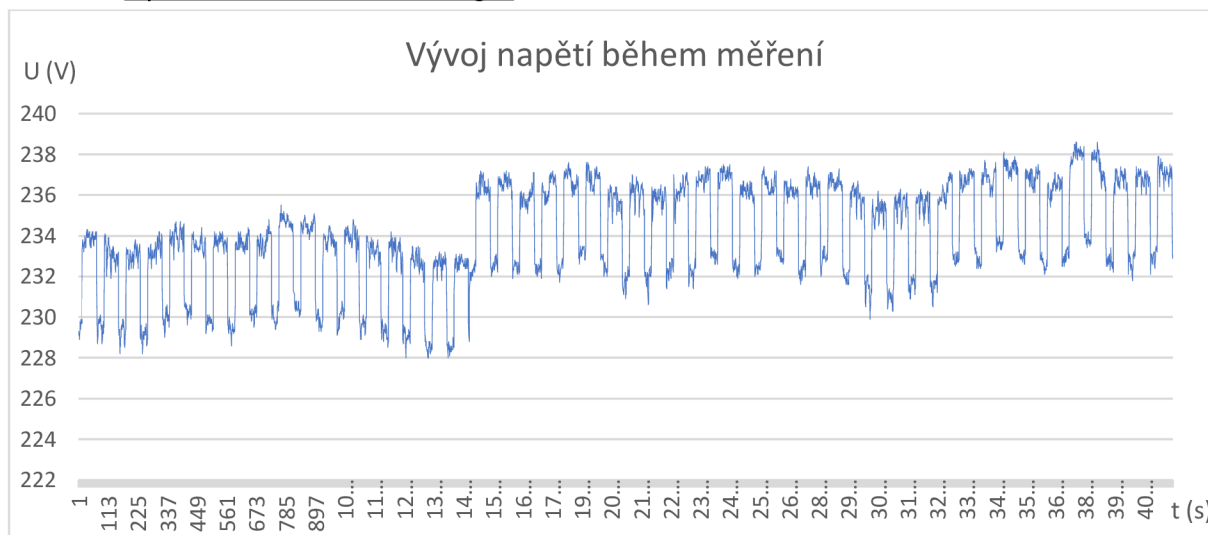
$$Q = 418m^3/h$$
$$c_v = 4180 J/kgK$$
$$Q = mc\Delta T [21]$$
$$P = \frac{Qc\Delta T}{3600}$$



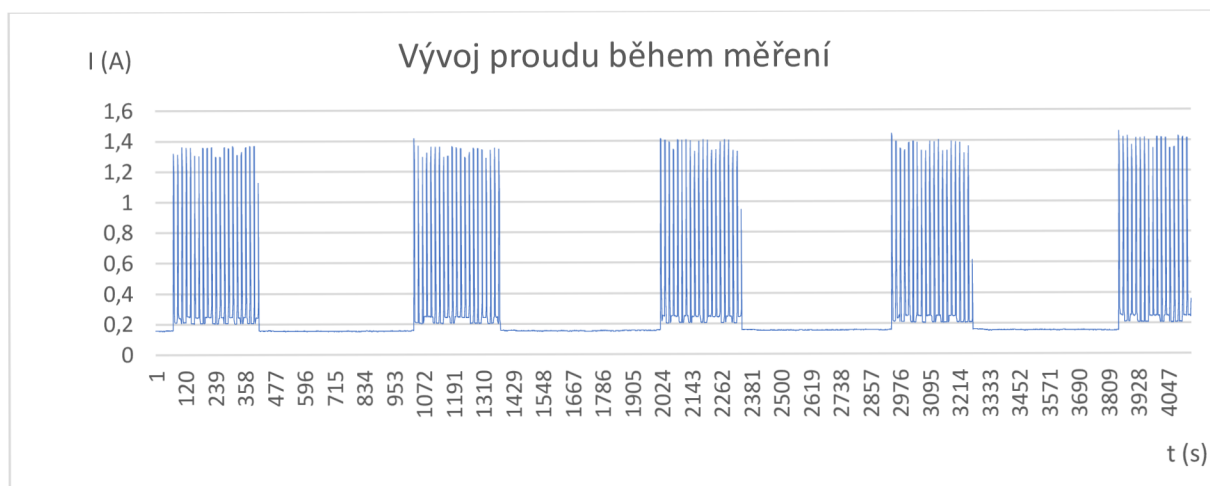
Graf 7.7 Výkon kotle při maximálním výkonu

$$P_a = 8,418 \text{ kW}$$

6.2.2.2 Spotřeba elektrické energie



Graf 7.8 Vývoj napětí během měření



Graf 7.9 Vývoj proudu během měření

$$U_a = 234,0998 \text{ V}$$

$$I_a = 0,25927 \text{ A}$$

Pro 4140 s

$$W = U I t = 234,0998 \cdot 0,25927 \cdot 4140 = 251\,277,1 \text{ Ws}$$

Pro 3600 s

$$W = 251\,277,1 \cdot \frac{3600}{4140} = 218\,501,8 \text{ Ws} \rightarrow 0,06069 \text{ kWh}$$

6.2.2.3 Emise

Průměrné hodnoty

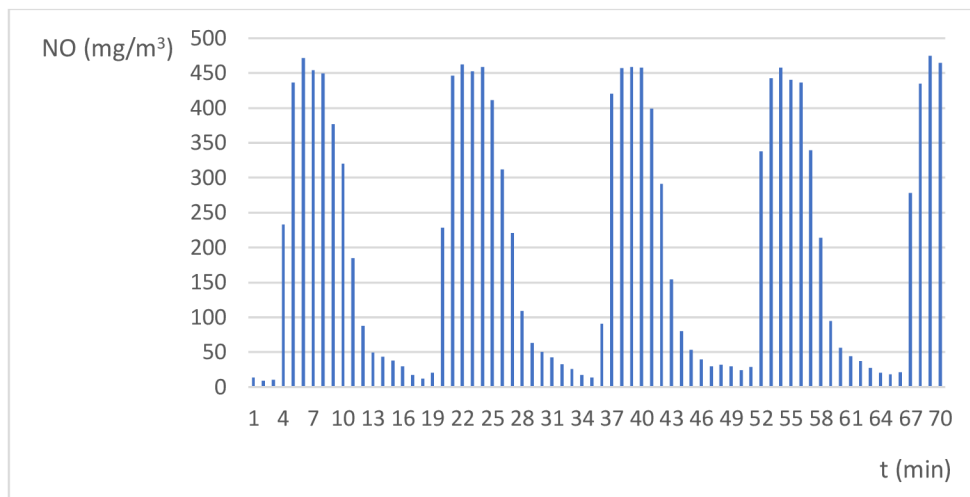
- $\text{NO}_a = 204,15 \text{ mg/m}^3$
- $\text{CO}_a = 2888,40 \text{ mg/m}^3$
- $\text{O}_{2a} = 13,25 \%$
- $\text{SO}_{2a} = 47,79 \text{ mg/m}^3$

Přepoččet emisí na 10 % O_2

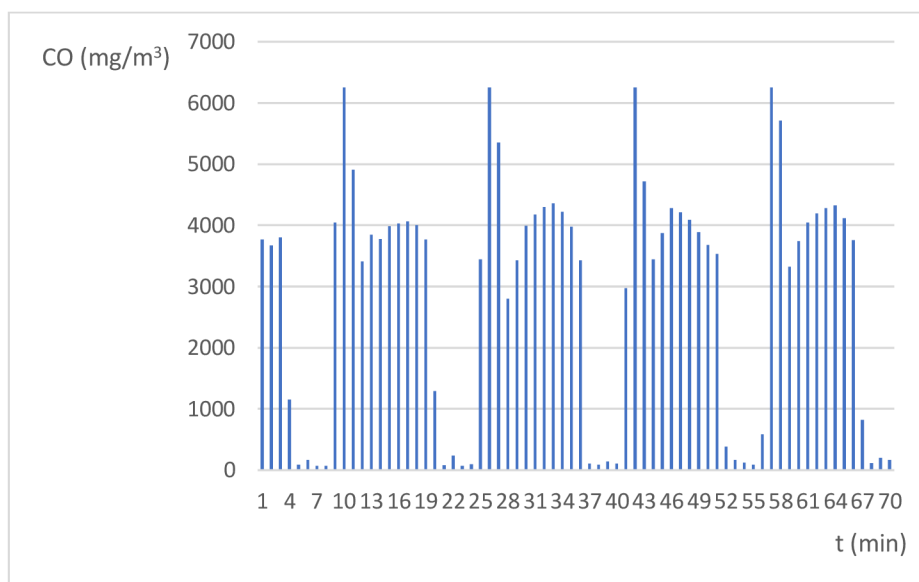
$$\text{NO}_{10\% \text{O}_2} = \text{NO}_a \cdot \frac{21 - \text{O}_{2r}}{21 - \text{O}_{2a}} = 204,15 \cdot \frac{21 - 10}{21 - 13,25} = 289,7625 \text{ mg/m}^3$$

$$\text{CO}_{10\% \text{O}_2} = \text{CO}_a \cdot \frac{21 - \text{O}_{2r}}{21 - \text{O}_{2a}} = 2888,40 \cdot \frac{21 - 10}{21 - 13,25} = 4099,6660 \text{ mg/m}^3$$

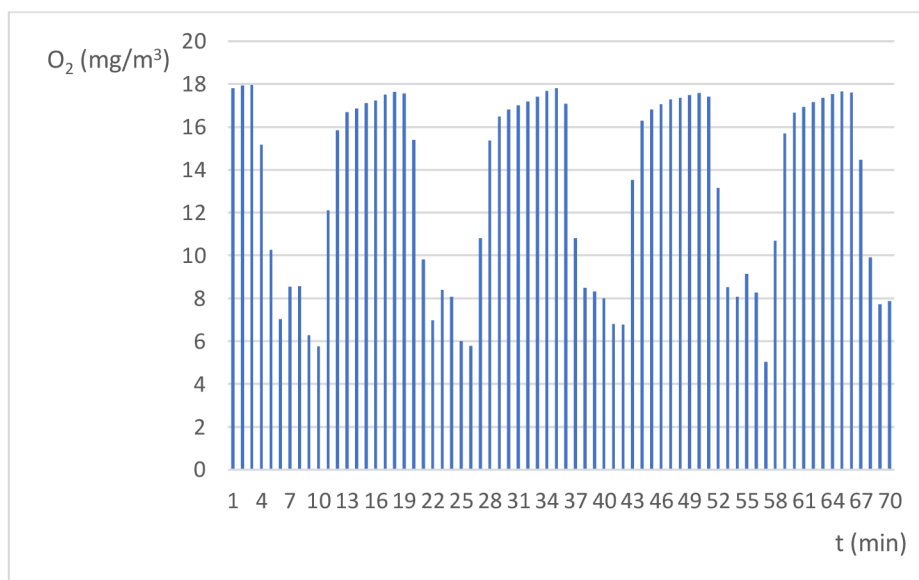
$$\text{SO}_{210\% \text{O}_2} = \text{SO}_{2a} \cdot \frac{21 - \text{O}_{2r}}{21 - \text{O}_{2a}} = 47,79 \cdot \frac{21 - 10}{21 - 13,25} = 67,8324 \text{ mg/m}^3$$



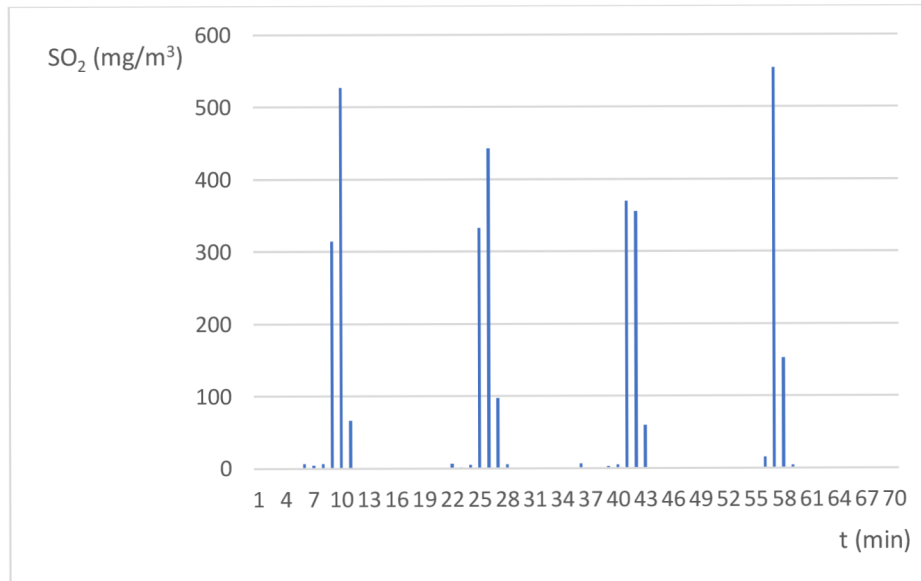
Obrázek 2 Graf 7.10 Hodnoty NO během měření



Graf 7.11 Hodnoty CO během měření



Graf 7.12 Hodnoty O₂ během měření



Graf 7.13 Hodnoty SO₂ během měření

6.2.2.4 Účinnost

$$\eta = 1 - \xi_{mn} - \xi_f - \xi_{cn} - \xi_k - \xi_{sv}$$

- Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)

$$X_r = 1$$

$$C_r = 0,12$$

$$Q_c = 32600 \text{ kJ/kg}$$

$$A^r = 0,007$$

$$Q_i^r = 16500 \text{ kJ/kg}$$

$$\xi_{mn} = \frac{Q_c \cdot A^r}{Q_i^r} \cdot \frac{C_r \cdot X_r}{1 - C_r}$$

$$\xi_{mn} = \frac{32600 \cdot 0,007}{16500} \cdot \frac{0,12 \cdot 1}{1 - 0,12}$$

$$\xi_{mn} = 0,00189$$

- Ztráta citelným teplem tuhých zbytku

$$\xi_f = 0$$

- Ztráta hořlavinou ve spalinách (chemický nedopal)
- $\omega_{CO} = 0,0000366$
- $Q_{nCO} = 12610 \text{ kJ/kg}$
- $Q_i^r = 16500 \text{ kJ/kg}$
- $\xi_{mn} = 0,00189$

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right)$$
$$V_{O_2min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,4979}{12,01} + \frac{0,0574}{4,032} + \frac{0,0010}{32,06} - \frac{0,4236}{32} \right)$$
$$V_{O_2min} = 0,9576 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliv

$$V_{SVmin} = \frac{V_{O_2min}}{21} \cdot 100$$
$$V_{SVmin} = \frac{0,9576}{21} \cdot 100$$
$$V_{SVmin} = 4,560 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Součinitel přebytku vzduchu

$$\alpha = \frac{21}{21 - wO_2}$$
$$\alpha = \frac{21}{21 - 13,25}$$
$$\alpha = 2,710$$

Objem oxidu uhličitého

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,003 \cdot V_{SVmin}$$
$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,4979 + 0,003 \cdot 4,560$$
$$V_{CO_2} = 0,937 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem oxidu siřičitého

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r$$
$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,001$$
$$V_{SO_2} = 0,00068 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem dusíku

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot N_2^r + 0,7805 \cdot V_{SVmin}$$

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot 0,020 + 0,7805 \cdot 4,560$$

$$V_{N_2} = 3,575 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem argonu

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{SVmin}$$

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot 4,560$$

$$V_{Ar} = 0,042 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem suchých spalin

$$V_{SSmin} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar}$$

$$V_{SSmin} = 0,937 + 0,00068 + 3,575 + 0,042$$

$$V_{SSmin} = 3,618 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem suchých spalin za přebytku vzduchu

$$V_{SS} = V_{SSmin} \cdot \alpha$$

$$V_{SS} = 3,618 \cdot 2,710$$

$$V_{SS} = 9,805 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\xi_{cn} = (1 - \xi_{mn}) \cdot \frac{V_{SS} \cdot \omega_{CO} \cdot Q_{nCO}}{Q_i^r}$$

$$\xi_{cn} = (1 - 0,00189) \cdot \frac{9,805 \cdot 0,0000366 \cdot 12610}{16500}$$

$$\xi_{cn} = 0,00027$$

- Ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta)

$$c_{sp} = 1,022 \text{ kJ/kgK}$$

$$t_{sp} = 133,020 \text{ °C}$$

$$t_{vz} = 23,424 \text{ °C}$$

$$Q_i^r = 16500 \text{ kJ/kg}$$

Objem vodní páry v minimální objemu spalin

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot H_2^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + (f - 1) \cdot V_{SVmin}$$

$$V_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,0574 + \frac{22,41}{18,015} \cdot 0,0860 + (1,01619 - 1) \cdot 4,560$$

$$V_{H_2O}^S = 0,819 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimální objem vlhkých spalin

$$V_{VSmin} = V_{SSmin} + V_{H_2O}^h$$

$$V_{VSmin} = 3,618 + 0,819$$

$$V_{VSmin} = 4,437 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{VVmin} = f \cdot V_{VSmin}$$

$$V_{VVmin} = 1,01619 \cdot 4,437$$

$$V_{VVmin} = 4,509 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Objem spalin z 1 kg paliva za přebytku vzduchu

$$V_{VS} = V_{VSmin} + (\alpha - 1) \cdot V_{VVmin}$$

$$V_{VS} = 4,437 + (2,668 - 1) \cdot 4,509$$

$$V_{VS} = 7,278 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Skutečný objem spalin

$$V_{SP} = V_{VS} \cdot \frac{273 + t_{sp}}{273} \cdot \frac{0,101325}{p_b}$$

$$V_{SP} = V_{VS} \cdot \frac{273 + 144,214}{273} \cdot \frac{0,101325}{0,10218}$$

$$V_{SP} = 10,734 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\xi_k = (1 - \xi_{mn}) \cdot \frac{V_{SP} \cdot c_{sp} \cdot (t_{sp} - t_{vz})}{Q_i^r}$$

$$\xi_k = (1 - 0,00189) \cdot \frac{10,734 \cdot 1,022 \cdot (144,214 - 23,226)}{16500} =$$

$$\xi_k = 0,080$$

- Ztráta sdílením tepla do okolí sáláním a vedením

$$\xi_{sv} = 0,06$$

Celková účinnost

$$\eta = 1 - \xi_{mn} - \xi_f - \xi_{cn} - \xi_k - \xi_{sv} = 1 - 0,00189 - 0 - 0,00027 - 0,080 - 0,06 = \mathbf{0,858} \rightarrow$$

$$\eta = 85,8 \%$$

Závěr:

V dnešním světě dochází k vývoji technologií, a tak se mnoho odvětví snaží o automatizaci procesu. Vývoj pokročil i v energetice a taky již mnoho domácností využívá automatické kotle, které přináší mnoho výhod: úspora času, nižší náklady na provoz, nižší emise ... K automatickým kotlům je možnost dokoupit příslušenství, které usnadní provoz. V dnešní době je velký výběr a v závislosti na požadavcích zákazníka, je možno zvolit typ topeniště, hořáku, paliva a mnoho další. Je potřeba myslet i na ekologickou stránku. Postupem času dochází k zpřísnování norem a pravidel pro provoz kotlů. S tím související i změna štítkování. Od 1. dubna 2017 byla zavedena povinnost štítkování pro teplovodní kotle na pevná paliva, a to podle Nařízení Komise 2015/1187. Pro lokální topidla na pevná, kapalná a plynná paliva (vyjma elektrických) začala povinnost „štítkování“ podle Nařízení Komise 2015/1186 platit od 1. ledna 2018. Aby byly dosaženy potřebné hodnoty spojené s ekologií a ekonomikou provozu je potřeba se řídit pokyny výrobců a mít vyladěný systém, který řídí provoz kotle.

V experimentální části je pomocí grafů znázorněna ekonomická a ekologická náročnost provozu u dvou nastavení automatického kotle. Nepřetržitý provoz při sníženém výkonu kotle a přerušovaný provoz s maximálním výkonem kotle. Co se týče spotřeby elektrické energie, jsou výsledky velmi podobné a rozdíl se projeví až po provozu několika měsíců, a i tak je rozdíl mezi částkami na provoz minimální. U emisí je už rozdíl větší. Zatímco průměrná hodnota NO je lehce větší u přerušovaného provozu, tak hodnoty CO jsou v průměru mnohonásobně větší než u kontinuálního měření. V porovnání účinností se oba provozové režimy liší pouze o 0,7 % což můžeme také zanedbat. Z porovnaných hodnot tedy vyplývá, že výsledky ve spotřebě a účinnosti se příliš neliší. Jediné kritérium, kdy je výhodnější provoz při kontinuálním provozu jsou hodnoty emisí.

Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1a] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vydání druhé. Brno: Akademické nakladatelství CERM®, s.r.o. Brno, 2013, 119 stran : ilustrace. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [2a] LANDA, Stanislav. *Paliva: a jejich použití* /. 2. rozš.vyd. Praha: SNTL, 1956, 362 s.
- [3a] Vše o vytápění dřevními peletami. *TZBinfo* [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/peletky/14989-vse-o-vytapeni-drevnimi-peletami-a-proc-je-vyhodne-si-s-nimi-zacit8>
- [4a] Černé uhlí. *Černé uhlí* [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z: <http://www.cernehli.cz/>
- [5a] VOBOŘIL, David. Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. *Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR* [online]. 2017 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>
- [6a] KOLONIČNÝ, Jan, Veronika BOGOCZOVÁ a Jiří HORÁK. *Postupy správného topení*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2255-6.
- [7a] VACEK, Petr, Pavel MATOUŠEK a Ivo PAVERA. *Technická zařízení budov a energetika: vzdělávací materiály*. Ostrava: MSDK, Moravskoslezský dřevařský klastr, 2015. ISBN 978-80-906014-3-7.
- [8a] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta II: spalování v malých zdrojích tepla*. Krnov: LING Vydavatelství, 2011. ISBN 9788090491410.
- [9a] Uhlí za nic nemůže. *TZBinfo* [online]. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/942-uhli-za-nic-nemuze-ii>
- [10a] Porovnání hořáků pro automatické kotle. *TZB-info* [online]. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11812-porovnaní-horaku-pro-automaticke-kotle>
- [11] Ekvitermní regulace – princip a využití v systémech regulace vytápění. *TZB-info* [online]. [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/mereni-a-regulace/6294-ekvitermni-regulace-princip-a-vyuziti-v-systemech-regulace-vytapeni>
- [12] Honeywell SMILE SDC9-21N ekvitermní regulátor. *Topení levně* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.topenilevne.cz/honeywell-smile-sdc9-21n-ekvitermni-regulator-p28975/>
- [13] Ministerstvo pro životní prostředí. *Ministerstvo pro životní prostředí* [online]. 2012 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/9F4906381B38F7F6C1257A94002EC4A0/%24file/Z%20201_2012.pdf
- [14] Kotle Verner. *Kotle Verner* [online]. 2015 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/produkty/automaticke-kotle/verner-a251#tab1>
- [15] Dřevěné pelety. *Tonap* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.tonap.cz/drevene-pelety-15kg>
- [16] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta, aneb, Peleta mýtů zbavená*. Krnov: LING Vydavatelství, 2011. ISBN 9788090491403.
- [17] Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva?. *TZB-info* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/15865-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva>

- [18] Energetický štítek a kotel na pevná paliva. *TZB-info* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/15230-energeticky-stitek-a-kotel-na-pevna-paliva>
- [19] Kotle malých výkonů na pevná paliva. *Http://www.iczt.cz* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.iczt.cz/cs/doc/kotleMV.pdf>
- [20] Směrnice o ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva. *Http://www.iczt.cz: TZB-info* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva>
- [21] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s. ; il. ; 30 cm diagramy ([3] složené l.). ISBN 978-80-214-4300-6.
- [22] KUBIŠ, David. *Srovnání metod stanovování účinností kotlů* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/40391>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Martin Lisý.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
h	Hořlavina v palivu	[%]
Ar	Popelovina v palivu	[%]
Wr	Voda v palivu	[%]
AF	Venkovní teplota	[°C]
DKP	Čerpadlo přímého okruhu	[-]
RLF	Teplota vratné vody	[°C]
MK	Směšovací ventil	[-]
P	Čerpadlo směšovacího okruhu	[-]
SLP	Čerpadlo pro okruh teplé vody	[-]
SF	Teplota zásobníku teplé vody	[°C]
EEI	Energetická účinnost	-
η_{son}	sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostorů v aktivním režimu	[%]
BLF	Štítkový koeficient biomasy, který je rovný 1,45 pro kotle na biomasu a rovný 1 pro kotle na fosilní paliva	[-]
F(1)	Negativní příspěvek k indexu energetické účinnosti z důvodu upravených příspěvků regulátorů teploty	[-]
F(2)	Negativní příspěvek k indexu energetické účinnosti z důvodu spotřeby pomocné elektrické energie	[-]
F(3)	Pozitivní příspěvek k indexu energetické účinnosti vlivem elektrické účinnosti kogeneračních zařízení obsahujících kotle na tuhá paliva	[-]
Q	Průtok	[m ³ /h]
c_v	Měrná tepelná kapacita vody	[J/kgK]
Pa	Průměrný výkon	[kW]
Ua	Průměrné napětí	[V]
Ia	Průměrný proud	[A]
W	Průměrná spotřeba elektrické energie	[kWh]
NO _{10%O2}	Oxid dusnatý při 10% O ₂	[mg/m ³]
CO _{10%O2}	Oxid uhelnatý při 10% O ₂	[mg/m ³]
SO _{210%O2}	Oxid siřičitý při 10% O ₂	[mg/m ³]
NO _a	Průměrná hodnota oxidu dusnatého při 10% O ₂	[mg/m ³]
CO _a	Průměrná hodnota oxidu uhelnatého při 10% O ₂	[mg/m ³]
SO _a	Průměrná hodnota oxidu siřičitého při 10% O ₂	[mg/m ³]
X_r	množství popelu	[-]
C_r	Hodnota obsahu uhlíku v tuhých zbytcích	[-]
Q_c	výhřevnost hořlaviny uvažovaného druhu tuhých zbytků	kJ/kg
Q_i^r	výhřevnost spalovaného paliva	kJ/kg
A^r	celkový obsah popelovin v palivu	[-]
ξ_{mn}	Ztráta mechanickým nedopalem	[-]

ξ_f	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	[-]
ξ_{cn}	Ztráta chemickým nedopalem	[-]
ξ_k	Komínová ztráta	[-]
ξ_{sv}	Ztráta sdílením tepla do okolí	[-]
ω_{CO}	Objemový díl nespáleného plnu	[-]
Q_{nCO}	Výhřevnost jednotlivých složek nespáleného plynu	[kJ/kg]
Q_i^r	Čerpadlo směšovacího okruhu	[kJ/kg]
V_{O_2min}	minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1 kg paliva	[m ³ /kg]
V_{svmin}	minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva	[m ³ /kg]
α	součinitel přebytku vzduchu	[-]
V_{CO_2}	Objem oxidu uhličitého	[m ³ /kg]
V_{SO_2}	Objem oxidu siřičitého	[m ³ /kg]
V_{N_2}	Objem dusíku	[m ³ /kg]
V_{Ar}	Objem argonu	[m ³ /kg]
V_{SSmin}	Objem suchých spalín	[m ³ /kg]
V_{SS}	Objem suchých spalín za přebytku vzduchu	[m ³ /kg]
c_{sp}	Střední měrná kapacita spalín	[kJ/kgK]
t_{sp}	teplota spalín odcházejících z kotle	[°C]
t_{vz}	teplota vzduchu vstupujícího do kotelního zařízení	[°C]
$V_{H_2O}^s$	Objem vodní páry v minimální objemu spalín	[m ³ /kg]
V_{VSmin}	Minimální objem vlhkých spalín	[m ³ /kg]
V_{VVmin}	Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva	[m ³ /kg]
V_{VS}	Objem spalín z 1 kg paliva za přebytku vzduchu	[m ³ /kg]
V_{SP}	Skutečný objem spalín	[m ³ /kg]
η	Účinnost	[%]