



MINISTERSTVO
PRŮMYSLU A OBCHODU



Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Ing. Roman Šubrt a kolektiv

“Dílo bylo zpracováno za finanční podpory Státního programu
na podporu úspor energie na období 2017 - 2021 – Program
EFEKT II. pro rok 2021“

OBSAH

“Dílo bylo zpracováno za finanční podpory Státního programu na podporu úspor energie na období 2017 - 2021 – Program EFEKT II. pro rok 2021“ 1

Obsah.....	2
1 ÚVOD.....	3
2 Legislativa	4
3 TEORIE.....	5
4 SPALOVÁNÍ.....	8
4.1 Spalování uhlí.....	8
4.2 Spalování dřeva	9
5 Měřené zdroje tepla	20
5.1 Kalorimetr	20
5.2 Kotel na zemní plyn.....	21
5.3 Kotel na uhlí	22
6 Účinnost kotlů.....	25
6.1 Kotel na zemní plyn.....	25
6.2 Kotel na uhlí	25
OBRAZOVÁ PŘÍLOHA.....	26

1 ÚVOD

Tato publikace je výsledkem celoročního přímého měření účinnosti kotlů o nízkém výkonu, typickém pro rodinné domy a má přispět k zamyšlení, nad možnostmi zvyšování energetické účinnosti právě u těchto zdrojů tepla.

Měření bylo prováděno po období jednoho roku u dvou kotlů, z nichž jeden je plynový a druhý na pevná paliva, konkrétně je spalováno převážně uhlí. Kotle bylo poměrně obtížné nalézt, neboť na uživatele byly kladeny nároky vyplývající z podstaty věci. U plynového kotle se muselo jednat o objekt, kde zemní plyn slouží pouze po vytápění, neboť jinak by bylo nutné instalovat plynoměr před kotel, což by znamenalo zásah do rozvodů plynu se všemi důsledky. U kotle na pevná paliva bylo potřeba nalézt takový zdroj, kde je využíváno především uhlí, neboť při spalování dřeva je obtížné určit alespoň s přibližnou pravděpodobností jeho výhřevnost. Vždy záleží na druhu dřeva a zejména na jeho aktuální vlhkosti, což by v praxi znamenalo často tuto vlhkost měřit.

Publikaci nelze vztáhnout obecně na všechny zdroje tepla, nicméně ukazuje, jaká je realita u běžných kotlů v běžných rodinných domech. Pro přesnější znalost situace v ČR v oblasti účinnosti malých zdrojů tepla by bylo potřeba provést měření na statisticky významnějším vzorku. Do budoucna se pravděpodobně ukáže, že by bylo vhodné zjistit sezónní účinnost i dalších zdrojů tepla, a to zejména tam, kde může jít o velké výkyvy, jako jsou např. kotle na dřevo i kotle na peletky.

Vzhledem k povaze měření jsou údaje anonymizovány tak, aby majitelé objektů neměli pocit, že z měření mohou mít jakoukoliv škodu či nepopulární medializaci.

2 LEGISLATIVA

Vzhledem k tomu, že tento text nemá vztah k legislativě a je určen pouze pro orientační informaci energetickým specialistům a poradcům ve střediscích EKIS, nejsou v něm obsaženy žádné odkazy na dodržování legislativy. I tak je však vhodné zmínit, že jej lze využít v rámci zákona 406/2000 Sb. o hospodaření energií, a to zejména v části týkající se kontrol systémů vytápění a systémů klimatizace. V době zpracovávání této příručky není v platnosti vyhláška týkající se této části. I tak však měření bylo prováděno na malých zdrojích nepřekračujících jmenovitý výkon 70 kW, takže na tyto zdroje není povinnost zpracovávat periodické kontroly.

3 TEORIE

Pro pochopení níže uváděného textu je nutné znát i určitou teorii. Lze předpokládat, že většina energetických specialistů, kteří se zabývají vytápěním, tuto teorii znají. Nicméně pokud by se tato publikace dostala do ruky absolutnímu laikovi, je potřeba ji zmínit. Proto prosím odborníky, aby přeskočili na další kapitoly.

Dle wikipedie je **účinnost** fyzikální veličina. Udává poměr mezi energií získanou (užitečnou), což může být například strojem vykonaná práce (v tomto případě teplo posílané do topného systému, tedy do rozvodů tepla a do otopných těles) a energií dodanou. Dodanou energií je v tomto případě o energii dodanou v palivu, přičemž se měří výhřevnost. Výhřevnost je energie, která se uvolní spálením paliva a ochlazením produktů hoření na původní teplotu paliva a vzduchu použitého pro hoření, bez využití energie vznikající skupenskou přeměnou páry v kapalinu. Zde je ještě vhodné upozornit na to, že existuje pojem spalné teplo. To je energie uvolněná z paliva spálením a ochlazením produktů hoření na povodní teplotu paliva a vzduchu použitého pro hoření s využitím kondenzačního tepla. Tato hodnota je např. u zemního plynu cca o 14 % vyšší, než je výhřevnost a je to dáno tím, že zemní plyn je tvořen především metanem, chemický vzorec CH_4 , při jehož hoření vzniká reakcí s kyslíkem (O_2) voda (H_2O) ve formě páry.

Pokud posuzujeme zařízení (systém), které nedokáže energii akumulovat, můžeme účinnost brát jako poměr mezi výkonem a příkonem, v tomto případě poměr mezi teplem vyrobeným a dodaným do otopné soustavy a energií dodanou v palivu.

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Energie dodaná je vždy větší než energie získaná (v opačném případě bychom mluvili o tzv. perpetuum mobile). To je dáno ztrátami v systému, v tomto případě se jedná o teplo unikající komínovou ztrátou (nedochází k ochlazení spalin na původní teplotu paliva a vzduchu, navíc ve spalinách je i vzduch, který byl marně ohřát z teploty okolí na teplotu spalin), teplem unikajícím z kotle do okolí a energií unikajícím nespálenými zbytky paliva, a to jak propadlými roštem, tak i unikajícím do vzduchu jako důsledek nedokonalého shoření, kdy uhlík obsažený v uhlí shoří na oxid uhelnatý (CO) a nikoliv na oxid uhličitý (CO₂). Další méně podstatnou ztrátou je i teplota popela propadlého roštem kotle na uhlí.

Kvůli ztrátám – přeměně energie na neúčinné druhy je účinnost vždy menší než 100 %.

Účinnost se zapisuje značkou η (éta) jako bezrozměrná veličina buď bez jednotky (jako desetinné číslo v rozmezí od 0 do 1), případně v procentech (%).

Výpočet:

$$\eta = E_z / E_D,$$

kde E_z je získaná energie

a E_D je dodaná energie.

Dále je nutné podotknout, že z hlediska možností zjišťování účinnosti kotlů existují 2 metody:

1) Přímá metoda stanovení účinnosti

Poměr množství tepla předaného teplotonosné látce k množství tepla přivedeného do kotle palivem a vzduchem ve stejném časovém úseku.

2) Nepřímá metoda stanovení účinnosti

Stanovení jednotlivých ztrát dle technické normy ČSN 07 0305.

- a) ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
- b) hořlavinou ve spalinách
- c) fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování
- d) citelným teplem spalin (komínová ztráta)
- e) teplem chladicí vody
- f) sdílení tepla do okolí

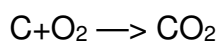
Metoda přímá je přesnější, neboť lze měřit jak na jedné straně vyrobené teplo, tak na druhé straně energii obsaženou v palivu.

Metoda nepřímá je méně přesná, neboť zjišťování jednotlivých druhů ztrát je problematické. Ještě si lze představit zjištění komínové ztráty, avšak zjišťování ztrát hořlavinou jak ve spalinách, tak i v tuhých zbytcích, zjišťování tepelných ztrát sdílením do okolí a další, je velmi problematické.

4 SPALOVÁNÍ

4.1 Spalování uhlí

Teoretické množství vzduchu potřebného k úplnému spálení nějakého paliva lze vypočítat z rovnice popisující příslušnou reakci. Jednoduché je to v případě kdy spalujeme například černé uhlí či antracit tj. téměř čistý uhlík.



Ke spálení 1 molu uhlíku t.j. 12 g je třeba 1 mol kyslíku. 1 mol plynu má za normálních podmínek objem 22,4 litru. Normální podmínky jsou 0 °C a tlak 100 kPa, což je natolik blízké podmínkám zimního topení, že asi není třeba dělat opravy na odlišnou teplotu a tlak. Pokud ano, pak použijeme k přepočtu stavovou rovnici $pV=nRT$, p je tlak, V objem n počet molů, T absolutní teplota v K a R univerzální plynová konstanta ($R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$).

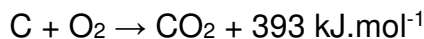
Z výše uvedeného vyplývá, že na spálení 1kg uhlíku je třeba 1,86 m³ čistého kyslíku. Protože vzduch obsahuje jen 21% kyslíku, je třeba přibližně 9 m³ vzduchu.

Pokud je uhlí pouze 96% hmotnosti a zbytek je popel, pak je třeba jen 7,3m³ vzduchu. Podobná oprava se udělá na obsah vody (především v případě dřeva).

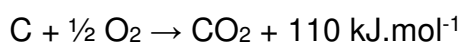
Obvykle se ovšem spaluje s určitým přebytkem vzduchu a výsledná potřeba spalovacího vzduchu je tudíž vyšší. Čím je přebytek kyslíku vyšší, tím je nižší účinnost kotle (neboť se musí přebytečný vzduch ohřát).

U hnědého uhlí je výpočet trochu komplikovanější, protože jde o směs celé řady různých sloučenin, i když převážkou část tvoří uhlík. Lze využít

termochemické rovnice, kdy uhlík reaguje s kyslíkem za vzniku kysličníku uhličitého a uvolnění energie:



Tedy dokonalým spálením 1 molu uhlíku (cca 12 g) vznikne přibližně 393 kJ tepla. Obdobně lze uvést i energii vzniklou nedokonalým spálením uhlíku za vzniku oxidu uhelnatého.



4.2 Spalování dřeva

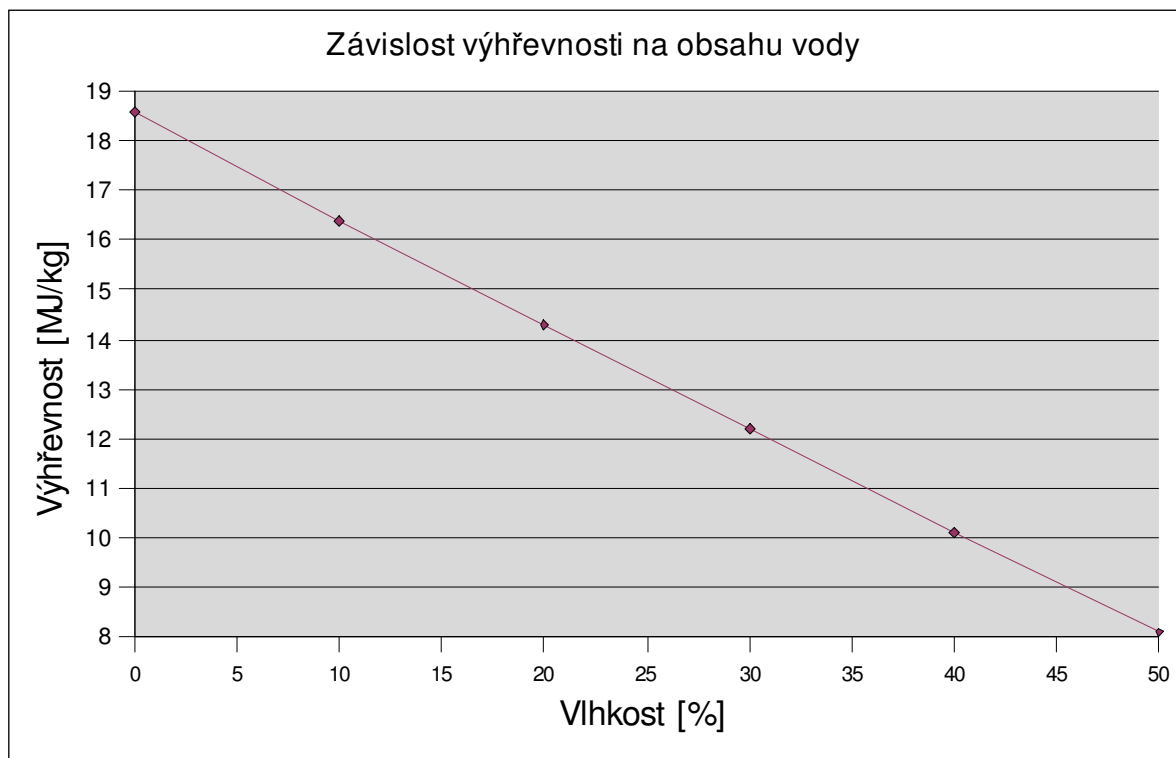
U spalování dřeva se jedná o složitější proces, už proto, že dřevo je vlastně organická směs různých sloučenin o různém zastoupení, tedy má pokaždé jiné chemické složení. Navíc součástí dřeva je vždy voda, která je zastoupená různým procentem. Vlhkost dřeva má zásadní vliv na výhřevnost dřeva, neboť voda má velké výparné teplo (potřeba tepla na přeměnu vody ve vodní páru), s rostoucím obsahem vody se snižuje energetický zisk.

Vlhkost dřeva lze vyjadřovat jako hmotnostní procento vody k celkové hmotnosti vlhkého dřeva. V dřevařském průmyslu se vlhkost dřeva vyjadřuje jako hmotnostní procento vody k hmotnosti suchého dřeva.

Při takovémto způsobu vyjádření pak může vyjít vlhkost i vyšší než 100 %. Například při 60% vlhkosti (to je stále ještě reálně se vyskytující hodnota) vychází podle „dřevařského“ vzorce hodnota vlhkosti 150 %, což vypadá na pohled trochu nelogicky.

Před použitím je tedy třeba dřevo nechat alespoň částečně vyschnout. Všeobecně se doporučuje vlhkost pod 30 % a za optimální se považuje vlhkost do 20 % protože té lze ještě dosáhnout běžným sušením pod přístřeškem.

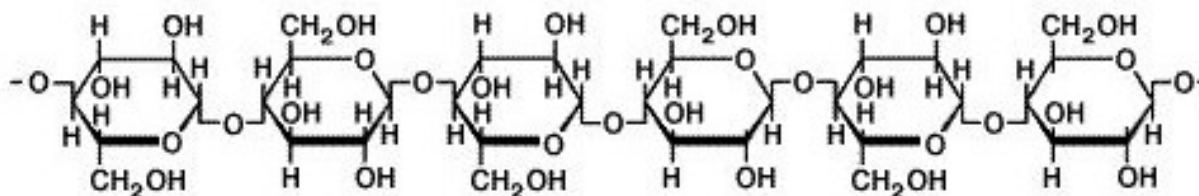
Graf závislosti výhřevnosti biomasy na obsahu vody



Z grafu je patrné, jak je výhřevnost dřeva závislá na vlhkosti.

Z chemického hlediska je rostlinná biomasa, tedy i dřevo, tvořena řadou různých sloučenin. Ze spalitelných látek mají největší význam celulóza, lignin a pryskyřice. Z nespalitelných látek je pro výhřevnost dřeva významný obsah především vody a dále pak obsah anorganických látek, které tvoří popel.

Celulóza je nejvýznamnější složka dřeva. Je to základní stavební materiál rostlinných buněk. Z chemického hlediska jde o polysacharid složený z velkého počtu navzájem spojených molekul glukózy.

struktura celulózy:

Celulóza je hygroskopická, snadno přijímá vodu a vlhne. V suchém stavu je velmi stálá, existuje nicméně řada mikroorganismů, které ji umějí rozložit na jednoduché cukry a energeticky využít (tyto mikrobiální procesy se uplatňují při hnití nebo tlení dřeva). Vzhledem k tomu, že v celulóze připadá na každý atom uhlíku jeden atom kyslíku, je výhřevnost suché celulózy jen asi 18 MJ/kg.

Lignin je významnou složkou dřeva stromů. Jednou z jeho funkcí je mechanické zpevnění buněčných stěn a také tvoří součást kapilár, které v rostlině vedou vodu a živiny. Tvoří zhruba třetinu hmotnosti dřeva.

Tabulka obsahu jednotlivých složek ve dřevu

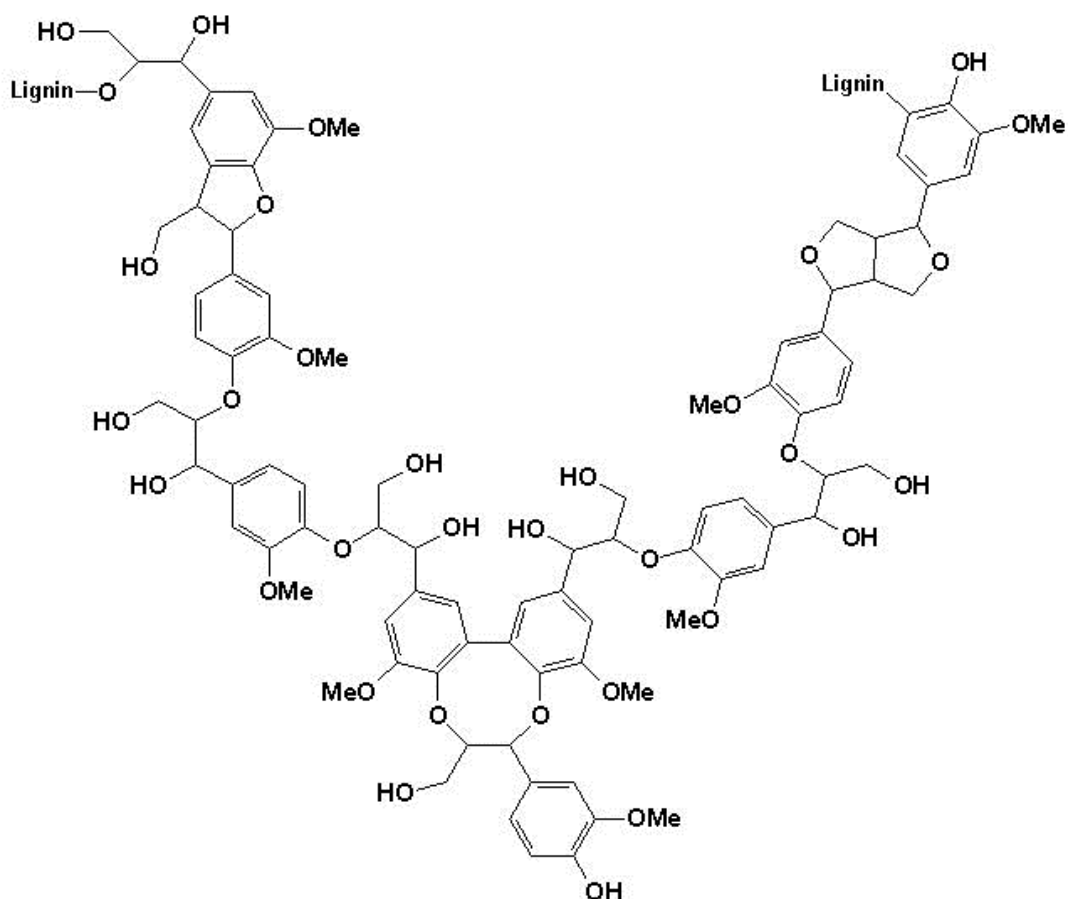
druh dřeva	Celulóza	Lignin
měkké dřevo	45%	30%
tvrdé dřevo	42%	20%

Z chemického hlediska je lignin komplikovaný polymer respektive směs polymerů. Není tvořen ze sacharidů jako celulóza, ale převážně z aromatických alkoholů. Díky tomu není tak hydrofilní (navlhavý) a má i trochu větší výhřevnost než celulóza. Při nedokonalém spalování (pyrolýze) dřeva se z něj uvolňují různé aromatické sloučeniny, např. methoxyfenoly jako je syringol, který je údajně

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

nejvíce zodpovědný za charakteristickou vůni uzeného masa, nebo guajakol, který přispívá k jeho chuti.

Struktura ligninu



Pryskyřice je obsažena ve dřevě jehličnatých stromů a je tvořena převážně směsí uhlovodíků (terpeny). Vzhledem k tomu, že uhlovodíky mají znatelně větší výhřevnost než celulóza nebo lignin, má dřevo jehličnatých stromů obsahujících pryskyřici o trochu větší výhřevnost, než dřevo listnatých stromů.

Významnou vlastností dřeva (a obecně všech forem biomasy) je značný podíl takzvané prchavé hořlaviny. Při zahřátí na teplotu přes 200 °C dochází k rozkladu a tvorbě hořlavých plynů. V důsledku toho, hoří dřevo dlouhým plamenem což trochu komplikuje konstrukci topenišť na jeho spalování. Do

plamene se totiž musí přivést dostatečné množství vzduchu a musí dojít k jeho promíšení, aby mohly všechny těkavé složky vyhořet. K tomu je také třeba dostatečná teplota, plamen se nesmí příliš ochladit.

Obsah prchavé hořlaviny v různých druzích paliva:

palivo	výhřevnost [MJ/kg]	prchavá hořlavina [%]
koks	28,5	1,5
černé uhlí	28	20
hnědé uhlí	17	55
dřevo	18	75
sláma	16	80

Další nepříjemnou vlastností dřeva je obsah vody. To souvisí jednak s jeho vznikem (rostliny vždy obsahují velký podíl vody) a jednak s hygroskopičností hlavní komponenty dřeva, celulózy. Vysušené dřevo opět snadno zvlhne, když je v prostředí s vysokou vlhkostí vzduchu. Obsah vlhkosti ve dřevě má, jak bylo uvedeno výše, zcela zásadní vliv na jeho výhřevnost. Třeba uhlí může při skladování zmoknout, aniž by došlo k nějakému významnému snížení jeho výhřevnosti. Spalováním dřeva v mokřém stavu ovšem ztratíme významnou část tepla, které je v něm obsažené.

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Při spalování dřeva probíhají následující procesy:

Při zahřívání nejprve nastane odpařování vody, která je ve dřevě přítomná. Protože dřevo má poměrně špatnou tepelnou vodivost a voda má vysoké výparné teplo, dochází u větších kusů dřeva k tomuto procesu ještě dlouho potom, kdy dřevo již na povrchu hoří. Odpařování vody spotřebuje mnoho tepla a velmi efektivně dřevo chladí. Teprve po odpaření vody proto ve vysušené zóně vzroste teplota a začne docházet k uvolňování dalších prchavých látek (např. pryskyřice) a k tepelnému rozkladu (pyrolýza) jednotlivých látek ze kterých se dřevo skládá. Vzniká směs hořlavých plynů a na roštu zbývá dřevěné uhlí. Udává se, že uvolněná prchavá hořlavina (plyny) v sobě nese přes polovinu energie ve dřevě obsažené. Hořlavé plyny se vzduchem přiváděným pod rošt (primární vzduch) hoří ve formě dlouhého plamene (primární spalování). Při tom ale nedojde ke spálení všech spalitelných složek, protože k tomu zpravidla není dostatek kyslíku nebo dostatečně vysoká teplota. Pokud je pod rošt přiváděn nadbytek vzduchu, tak se plamen příliš ochladí a část hořlaviny se vyloučí ve formě sazí (uhlík). Když je kyslíku málo, tak zase nemůže dojít k úplnému spálení (oxidaci až na oxid uhličitý). V každém případě to znamená, že ztratíme část energie v palivu obsažené. Z tohoto důvodu je třeba zajistit aby spalovací komora v níž hoření probíhá měla dostatečně vysokou teplotu t.j. aby byla rozumně tepelně izolována a do plamene se v určité vzdálenosti nad roštem přimíchává takzvaný sekundární vzduch, který umožní dohoření zbylých, dosud nespálených plynů. Tím se uvolní i zbylá energie v palivu obsažená a do komína pak odchází jen oxid uhličitý, vodní pára a dusík. Vzdušný dusík se spalování prakticky neúčastní, pokud je ovšem teplota plamene dostatečně vysoká dochází v určité míře k reakci dusíku a kyslíku za vzniku směsi oxidů dusíku. Tato reakce je z hlediska energetického nevýznamná, nicméně velmi zásadní je z hlediska emisí (oxidy dusíku jsou považovány za škodlivé emise).

Právě délka plamene a nutnost zajistit jeho vysokou teplotu znamená nutnost používat větší ohniště a teplosměnné plochy umístit až za koncem plamene, aby plamen zbytečně neochlazovaly, jinak se tvoří saze, které je zanášejí a pochopitelně se tím také snižuje účinnost spalování.

Na roštu zbývající žhavé uhlí se spaluje pomaleji a nevytváří už dlouhý plamen. V zásadě je jeho spalování analogické jako třeba u koksu. Zpravidla při tom vzniká z části oxid uhelnatý, který se spálí až v místě přívodu sekundárního vzduchu. Pokud došlo k uvolnění veškerých těkavých složek a v topeništi zůstává již jen dřevěné uhlí, je možné snadno regulovat výkon kotle v poměrně širokém rozsahu změnou v přívodu primárního vzduchu.

Zajistit, aby spalování probíhalo výše uvedeným způsobem není v malých topeništích vůbec jednoduché. U velkých kotlů je více možností jak zamezit přílišnému ochlazení plamene a jak dokonale dávkovat do plamene vzduch potřebný k optimálnímu spalování. Např. u kotlů s výkonem 1MW jsou plameny zhruba 5m dlouhé, do horní části plamene se přidává ještě terciární vzduch a celý systém dávkování vzduchu je řízen počítačem na základě údajů o složení spalin a obsahu kyslíku.

Dobře vyřešené spálení prchavé hořlaviny je proto důležitou podmínkou dosažení vysoké účinnosti při topení dřevem ve všech jeho formách.

Při spalování dřeva se tvoří také velmi jemný polétavý popílek, který může zanášet kouřové tahy a teplosměnné plochy. Mnohé, zvláště velké, kotle mají proto různá důmyslná zařízení na odstraňování popílku z povrchu tepelného výměníku (lamel) kotle. U malých kotlů se zpravidla spokojíme s občasným ručním vyčištěním. Většina popela zůstává nicméně na roštu a obecně platí, že ve srovnání s běžným hnědým uhlím produkuje spalování dřeva jen málo popela. Popel je navíc možno využít jako hnojivo na zahradu (má velký obsah draslíku).

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Pro orientaci zde ještě uvádíme výhřevnosti různého dřeva a dále tabulky pro přepočítání objemových měr dřeva.

Výhřevnost různých druhů dřeva

Druh paliva	Obsah vody	Výhřevnost	Měrné hmotnosti		
	[%]	[MJ/kg]	[kg/m ³]=[kg/plm]	[kg/prm]	[kg/prms]
Listnaté dřevo	15	14,605	678	475	278
Jehličnaté dřevo	15	15,584	486	340	199
borovice	20	18,4	517	362	212
vrba	20	16,9			
olše	20	16,7			
habr	20	16,7			
akát	20	16,3			
dub	20	15,9	685	480	281
jedle	20	15,9			
jasan	20	15,7			
buk	20	15,5	670	469	275
smrk	20	15,3	455	319	187
bříza	20	15,0			
modřín	20	15,0			
topol	20	12,9			

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Vysvětlení pojmů označujících množství dřeva

jednotka	název	přepočet	popis
Plm	plnometr – m ³		krychle o hraně 1 m vyplněná dřevem bez mezer, 1 m ³ skutečné dřevní hmoty
Prm	prostorový metr	1 prm = 0,6 až 0,7 plm	krychle o hraně 1 m vyplněná polenovým dřevem (štípaného nebo neštípané) s mezerami
Prms	prostorový metr sypaný	1 prms ~ 0,4 plm	1 m ³ volně sypaného drobného nebo drceného dřeva

převodní tabulka pro převody mezi jednotlivými druhy dřeva a skutečného objemu dřeva v jednotce

	m³ (plm) dřeva bez kůry	prm polen do běla odkorně- ných	prm polen v kůře	prm pilař- ských odřezků	prm polen v kůře ve volně sypaných hromadách	prm volně sypaných štěpků
m ³ (plm) dřeva bez kůry =	1	1,30	1,55	1,90	2,25	3,00
prm polen do běla odkorněných =	0,77	1	1,20	1,45	1,75	2,30
prm polen v kůře =	0,66	0,85	1	1,25	1,45	2,00
prm pilařských odřezků =	0,52	0,70	0,80	1	1,20	1,55
prm polen v kůře ve volně sypaných hromadách =	0,45	0,60	0,70	0,85	1	1,35
prm volně sypaných štěpků =	0,33	0,45	0,50	0,65	0,75	1

5 MĚŘENÉ ZDROJE TEPLA

5.1 Kalorimetr

Pro měření množství tepla dodávaného do systému vytápění byly použity kalorimetry Siemens, typ WFM503-J000H0, které byly nejprve osazeny do otopného systému. Tyto kalorimetry jsou určeny pro měření do průtoku 2,5 m³/h a jsou osazeny přípojovacím závitem G 1".

Měřič tvoří dvojice teplotních snímačů, v přívodu a ve zpátečce a průtokoměrná část instalovaná do zpátečky topného okruhu. Vyhodnocovací jednotka trvale počítá teplotní rozdíl mezi teplotou přívodu a zpátečky a násobí ho hodnotou průtoku. Výsledek (okamžitý tepelný výkon) je trvale načítán v čase a zobrazen na displeji jako kumulovaná tepelná energie, případně prostřednictvím přídatného komunikačního modulu dálkově přenášen do nadřazeného monitorovacího systému a to bezdrátově (radiově) nebo po drátech (M-Bus). Vyhodnocovací jednotka je napájena baterií s dlouhodobou životností – 10 let.

Měřič pracuje na základě jednovtokového měřicího principu, kdy proud vody je veden tangenciálně na lopatkové kolečko. Rychlost otáčení lopatkového kolečka je snímána elektronicky bez využití magnetického pole. Nesprávný směr proudění vody měřičem je detekován pomocí autodiagnostiky a zobrazen ve formě poruchového hlášení na displeji. Mikroprocesor v elektronické jednotce vypočítá teplotní rozdíl přívodu a zpátečky, který se použije se střední hodnotou průtoku a tepelnou konstantou k výpočtu množství spotřebované tepelné energie zobrazené na displeji ve fyzikálních jednotkách (kWh / MWh nebo MJ / GJ). Pro zvýšení přesnosti, se při každém měření využívají hodnoty hustoty a entalpie, které jsou zahrnuty do výpočtu.

Teplota je měřena v intervalech 36 sekund. Průtok je mřen spojitě. Množství měřené energie je zobrazováno v reálném čase. Případné poruchy jsou zobrazovány na displeji okamžitě. Vyhodnocovací jednotka je z boku zajištěna tovární nebo metrologickou plombou, její poškození je bráno jako neoprávněná manipulace a dochází ke ztrátě záruky.

5.2 Kotel na zemní plyn

Kotel na zemní plyn je umístěn v řadovém rodinném domě. Objekt má částečně zapuštěný suterén, zvýšené přízemí, patro a obytné podkroví. Kotel je umístěn v suterénu. Objekt byl několik let po instalaci kotle zateplen (zateplení stěn Eticsem, zateplení střechy nadkrokovním systémem, výměna oken za plastová s izolačními pokovenými dvojskly). Kotel je tedy zcela evidentně předimenzován. Jeho provoz je řízen ekvitermní regulací. Jednotlivé radiátory jsou osazené termostatickými hlavicemi. Objekt má výpočtovou tepelnou ztrátu přibližně třetinovou, proti tepelné ztrátě před zateplením.

Vzhled kotle je patrný z obrázků v příloze číslo 1 až 4. Kotel je umístěn v suterénu, odkouření je provedeno vyvločkováním komínem nad střechu. Na rozvody vytápění byl v blízkosti kotle osazen kalorimetr, který měří průtok otopné vody a teplotu na přívodu a odvodu teplé vody do systému a z těchto údajů dopočítává množství energie dodané do systému vytápění. Odečet spotřebovaného zemního plynu je prováděn denně ve stejný čas, jako odečet instalovaného kalorimetru a je rovnou zapisován do excelu.

Jedná se o kotel Protherm, typ Tiger 24 KOZ vyrobený v roce 2007 o jmenovité účinnost 90,7 %. Kotel je využíván pouze pro vytápění. I když má kotel modulovaný výkon, je jasné, že kotel je značně předimenzován a proto i modulování výkonu není dostatečné.

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Pro zajímavost je možné uvést informace z Průkazu energetické náročnosti budovy, který byl zpracován v rámci celkového zateplení objektu v roce 2013:

Plocha obálky budovy: 396,12 m²

Objemový faktor tvaru A/V: 0,45 m²/m³

Celková energeticky vztažná plocha: 272,79 m²

Energie ze zemního plynu potřebná

na vytápění (bez pomocné energie): 26,05 MWh/rok Průměrný součinitel

prostupu tepla U_{em} : 0,348 W/(m²·K)

Roční spotřeby plynu jsou následující:

topná sezóna	spotřeba zemního plynu [m ³]	spotřeba zemního plynu [kWh]
2018/2019	1345	14007
2019/2020	1255	13069
2020/2021	1399	14569

Z uvedeného přehledu je patrné, že výpočtová spotřeba tepla uvažovaná v PENBu je přibližně dvojnásobná, než je skutečnost, přitom je nutné zdůraznit, že PENB byl zpracováván v roce 2013, tedy jeho chybovost by měla být menší, než jak byly výsledky dřívějších méně přesných a podrobných výpočtů.

5.3 Kotel na uhlí

Kotel na uhlí je umístěn ve venkovském statku stojícím uvnitř obce. Tudiž z obou stran sousedí s dalšími statky, přitom jde o klasický statek do čtverce, kdy

po stranách jsou zděné obytné a hospodářské části, vstup je průjezdem mezi těmito částmi a zadní stranu vnitřního dvoru tvoří opět hospodářské stavení, avšak provedené jako dřevostavba. Stavba je nezateplená, patrová. Kotel je umístěn v hospodářské části, pravděpodobně v bývalém chlévě, stejně jako uhelna a místo pro uskladnění dřeva připraveného na zátop či na přikládání.

Vzhled kotle je patrný z obrázků v příloze číslo 5 až 8. Kotel je regulován manuálně přivíráním přívodu vzduchu. Majitel se snaží kotel provozovat bez přerušení provozu tak, že vždy ráno dá do kotle dřevo na žhavé uhlíky z minulého dne a ty zasype uhlím. Uhlí je nasypáváno kbelíkem, jehož obsah byl několikrát zvážen na závěsných vahách a průměr hmotnosti je 11 kg. Každý den je vždy spotřebováno dřevo o hmotnosti 10-11 kg o různé vlhkosti i druhu, kterým se uhlí prokládá, zejména při ranním zátopu. Na rozvody vytápění byl opět v blízkosti kotle osazen kalorimetr, který měří průtok otopné vody a teplotu na přívodu a odvodu teplé vody do systému a z těchto údajů dopočítává množství energie dodané do systému vytápění.

Na objekt nebyl zpracováván Průkaz energetické náročnosti, takže není známá výpočtová spotřeba energie na vytápění.

Spotřebu paliva poznamenává majitel objektu vždy při přikládání počtem čárek, přičemž každá čárka znamená jeden kbelík uhlí. Ukázka tohoto záznamu je na obr. 9.

Jedná se o kotel DAKON, typ DOR 25 max vyrobený v roce 2005 o jmenovité účinnosti 74 %. Kotel má dle výrobce emisní třídu 2. Kotel je využíván pouze pro vytápění.

Na tento objekt nebyl nikdy zpracováván Průkaz energetické náročnosti, ani není k dispozici projektová dokumentace, z níž by bylo možné spočítat energetickou náročnost budovy, proto u tohoto objektu lze pouze zjistit účinnost

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

vytápění na základě spáleného paliva a jeho množství. Zde je nutné podotknout, že sklad uhlí je navlhlý, a tak se i v uhlí může vyskytovat vlhkost. Stejně tak spálené dřevo není možné přesně zjistit, a není možné zjišťovat ani jeho reálnou vlhkost a kvalitu. Jedná se o dřevo převážně z prořezu lesa a ze soušek. Vzhledem k tomu, že není ani zjišťován přesný zůstatek paliva po zimní sezóně, není možné evidovat roční spotřebu paliva tak, jako tomu je u kotle na zemní plyn.

6 ÚČINNOST KOTLŮ

6.1 Kotel na zemní plyn

U kotle na zemní plyn je velmi jednoduché spočítat účinnost, neboť, přestože byly odečty prováděny každý den, postačuje vzít do výpočtu počáteční a koncový stav. Při denním odečtu vznikaly určité nepřesnosti (pravděpodobně chybným přečtením čísel na plynoměru), ale tyto hodnoty nejsou pro určení účinnosti nutné.

Celosezónní účinnost kotle byla změřena přímou metodou na hodnotu:

$$\eta = 85,9 \%$$

6.2 Kotel na uhlí

U kotle na uhlí je složitější zjistit účinnost, neboť, jak již bylo uvedeno výše, nebylo přesně měřeno palivo, a to ani co do hmotnosti, ani co do zjištění přesné výhřevnosti. Navíc, pravděpodobně vlivem zápisu (chybějící zaznamenání příkládání či naopak zapsání více příkládání, než jaká byla skutečnost) docházelo i k dalšímu zkreslení. Při zjišťování celoroční účinnosti byly tyto hodnoty, které příliš vybočovaly z obvyklého rozmezí, zanedbány a nebylo s nimi dále počítáno (vyskytovaly se hodnoty účinnosti na jednu stranu přes 110 %, na druhou stranu pod 6 %). I tak lze konstatovat, že celosezónní účinnost odpovídá hodnotě:

$$\eta = 44 \%$$

OBRAZOVÁ PŘÍLOHA

obrázek 1 – pohled na plynový kotel

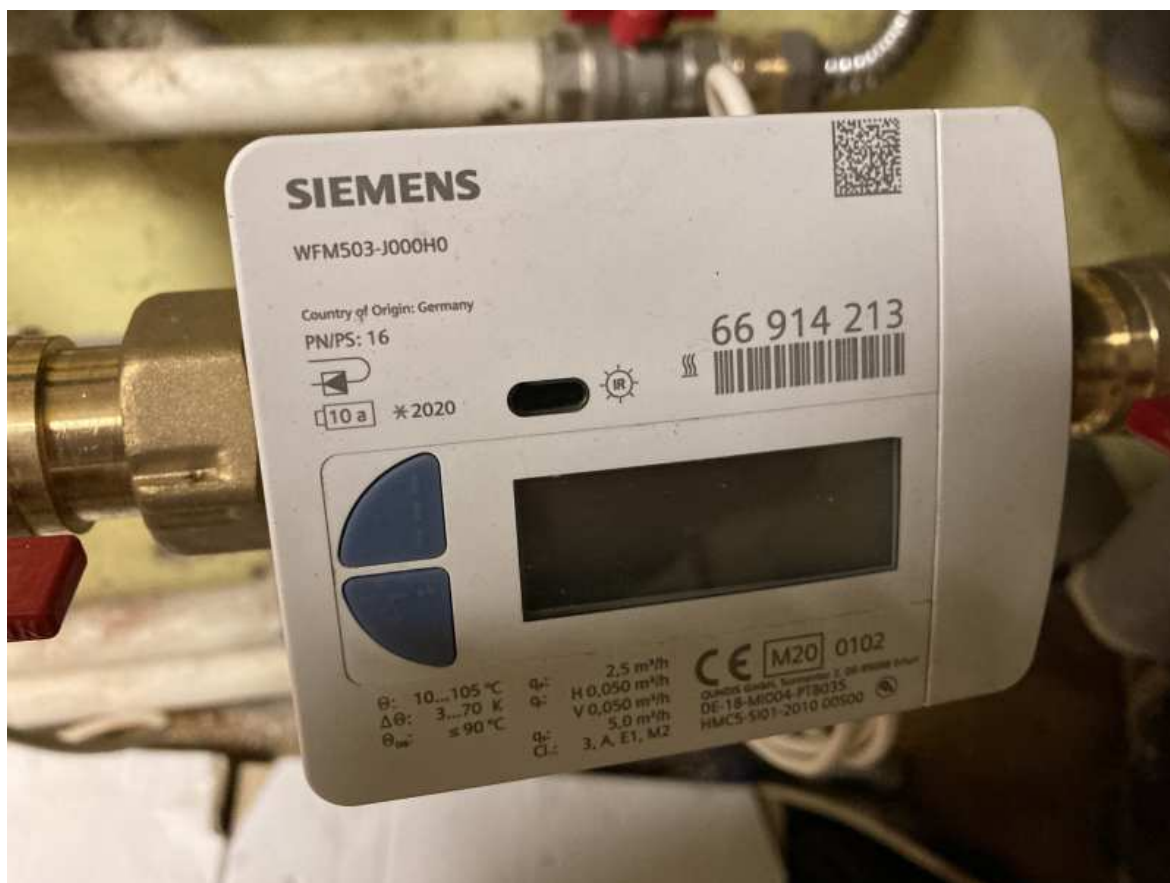


obrázek 2 – pohled na kalorimetr plynového kotle

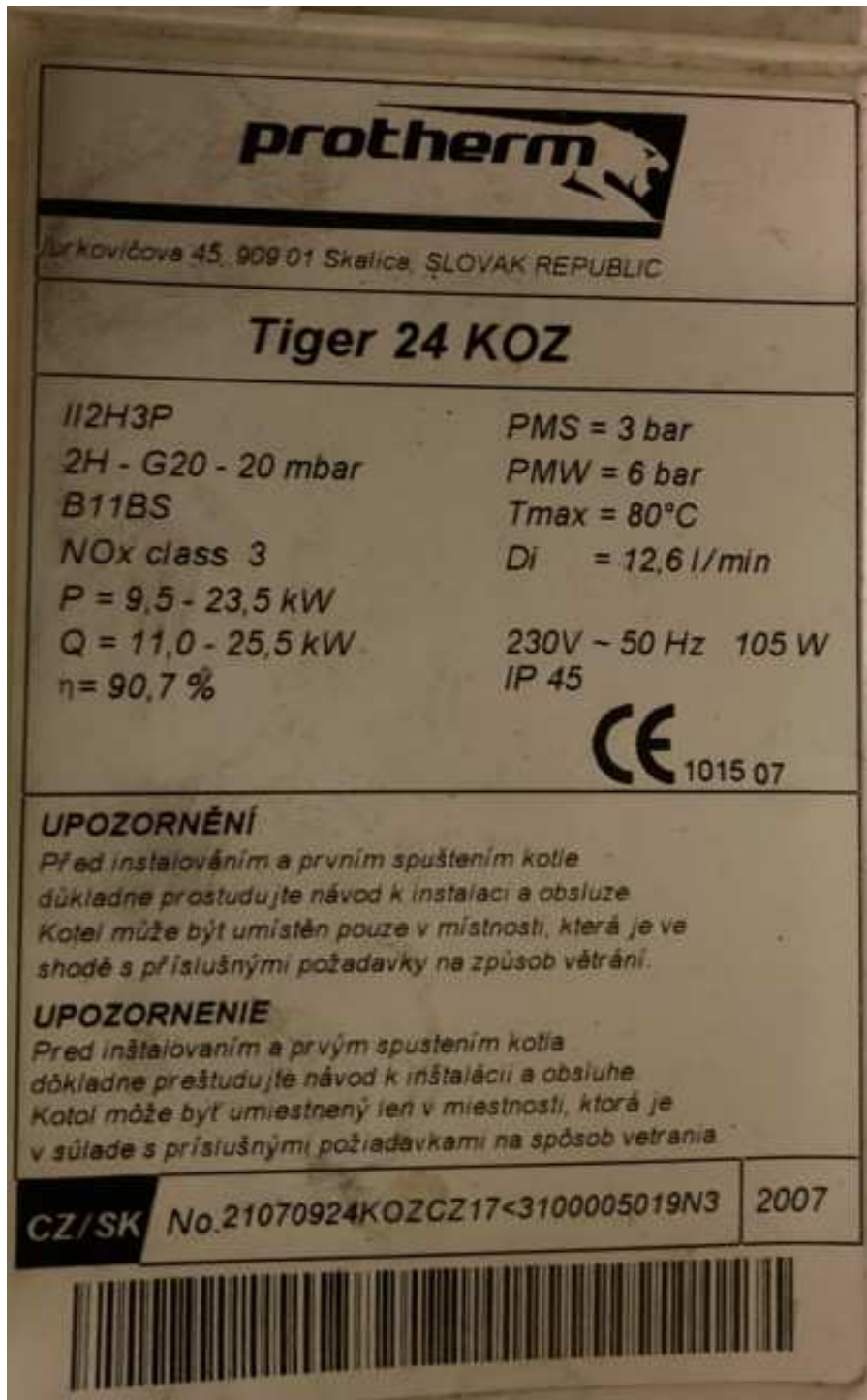


Přímé zjišťování účinnosti kotlů

obrázek 3 – detailní pohled na kalorimetr plynového kotle



Obrázek 4 – štítek plynového kotle



Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Obrázek 5 – pohled na kotel na uhlí



Obrázek 6 – pohled na kotel na uhlí



Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Obrázek 7 – pohled na kalorimetr instalovaný na kotli na uhlí



Obrázek 8 – demontovaný štítek kotle na uhlí

DAKON		DAKON s.r.o., Ve Vrbině 588/3, KRNOV Pod Cvilínem				CE C _{SK} V P	
OCELOVÝ TEPLOVODNÍ KOTEL DOR							
Typ:	DOR 20	DOR 25	DOR 25 MAX	DOR 32	Palivo: hnědé uhlí - třech 1	Výrobní číslo:	
Jmenovitý výkon:	20 kW	24 kW	27 kW	32 kW	Max. prac. přetlak: PMS = 2 bar	227495	
Výhřevná plocha:	1,7 m ²	1,8 m ²	1,9 m ²	2,0 m ²	Max. prac. teplota: 95°C		
Vodní objem:	56 l	57 l	63 l	64 l	Třída kotle: 1	Rok výroby:	
Hmotnost:	200 kg	215 kg	232 kg	240 kg	Minimální vzdálenost kotle a kpuřovodu od hořlavých stěn, stropů a konstrukcí je 200 mm.	2005	
Pracovní tah:	0,20 mbar	0,26 mbar	0,26 mbar	0,26 mbar			

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

obrázek 9 – ukázka záznamu spáleného uhlí

DATUM	KALORIMETR	kg dřeva 11 SPALENĚNO
10.11	5506.1	///
11.11.	5701.2	///
12.11.	5878.5	///
15.11.	5999.4	///
19.11.	6132.8	///
15.11.	6205.1	///
16.11	6444.2	///
17.11	6042.5	///
18.11.	6793.1	///
19.11.	6809.6	///
20.11.	6935.8	///
21.11	7299.1	///
22.11.	7381.6	///
23.11.	7502.8	///
24.11.	7690.1	///
25.11	7825.3	///
26.11.	7995.9	///
27.11.	8125.6	///
28.11.	8301.5	///
29.11.	8487.9	///
30.11	8610.2	///



MINISTERSTVO
PRŮMYSLU A OBCHODU



Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Ing. Roman Šubrt a kolektiv

“Dílo bylo zpracováno za finanční podpory Státního programu
na podporu úspor energie na období 2017 - 2021 – Program
EFEKT II. pro rok 2021“

OBSAH

“Dílo bylo zpracováno za finanční podpory Státního programu na podporu úspor energie na období 2017 - 2021 – Program EFEKT II. pro rok 2021“ 1

Obsah.....	2
1 ÚVOD.....	3
2 Legislativa	4
3 TEORIE.....	5
4 SPALOVÁNÍ.....	8
4.1 Spalování uhlí.....	8
4.2 Spalování dřeva	9
5 Měřené zdroje tepla	20
5.1 Kalorimetr	20
5.2 Kotel na zemní plyn.....	21
5.3 Kotel na uhlí	22
6 Účinnost kotlů.....	25
6.1 Kotel na zemní plyn.....	25
6.2 Kotel na uhlí	25
OBRAZOVÁ PŘÍLOHA.....	26

1 ÚVOD

Tato publikace je výsledkem celoročního přímého měření účinnosti kotlů o nízkém výkonu, typickém pro rodinné domy a má přispět k zamyšlení, nad možnostmi zvyšování energetické účinnosti právě u těchto zdrojů tepla.

Měření bylo prováděno po období jednoho roku u dvou kotlů, z nichž jeden je plynový a druhý na pevná paliva, konkrétně je spalováno převážně uhlí. Kotle bylo poměrně obtížné nalézt, neboť na uživatele byly kladeny nároky vyplývající z podstaty věci. U plynového kotle se muselo jednat o objekt, kde zemní plyn slouží pouze po vytápění, neboť jinak by bylo nutné instalovat plynoměr před kotel, což by znamenalo zásah do rozvodů plynu se všemi důsledky. U kotle na pevná paliva bylo potřeba nalézt takový zdroj, kde je využíváno především uhlí, neboť při spalování dřeva je obtížné určit alespoň s přibližnou pravděpodobností jeho výhřevnost. Vždy záleží na druhu dřeva a zejména na jeho aktuální vlhkosti, což by v praxi znamenalo často tuto vlhkost měřit.

Publikaci nelze vztáhnout obecně na všechny zdroje tepla, nicméně ukazuje, jaká je realita u běžných kotlů v běžných rodinných domech. Pro přesnější znalost situace v ČR v oblasti účinnosti malých zdrojů tepla by bylo potřeba provést měření na statisticky významnějším vzorku. Do budoucna se pravděpodobně ukáže, že by bylo vhodné zjistit sezónní účinnost i dalších zdrojů tepla, a to zejména tam, kde může jít o velké výkyvy, jako jsou např. kotle na dřevo i kotle na peletky.

Vzhledem k povaze měření jsou údaje anonymizovány tak, aby majitelé objektů neměli pocit, že z měření mohou mít jakoukoliv škodu či nepopulární medializaci.

2 LEGISLATIVA

Vzhledem k tomu, že tento text nemá vztah k legislativě a je určen pouze pro orientační informaci energetickým specialistům a poradcům ve střediscích EKIS, nejsou v něm obsaženy žádné odkazy na dodržování legislativy. I tak je však vhodné zmínit, že jej lze využít v rámci zákona 406/2000 Sb. o hospodaření energií, a to zejména v části týkající se kontrol systémů vytápění a systémů klimatizace. V době zpracovávání této příručky není v platnosti vyhláška týkající se této části. I tak však měření bylo prováděno na malých zdrojích nepřekračujících jmenovitý výkon 70 kW, takže na tyto zdroje není povinnost zpracovávat periodické kontroly.

3 TEORIE

Pro pochopení níže uváděného textu je nutné znát i určitou teorii. Lze předpokládat, že většina energetických specialistů, kteří se zabývají vytápěním, tuto teorii znají. Nicméně pokud by se tato publikace dostala do ruky absolutnímu laikovi, je potřeba ji zmínit. Proto prosím odborníky, aby přeskočili na další kapitoly.

Dle wikipedie je **účinnost** fyzikální veličina. Udává poměr mezi energií získanou (užitečnou), což může být například strojem vykonaná práce (v tomto případě teplo posílané do topného systému, tedy do rozvodů tepla a do otopných těles) a energií dodanou. Dodanou energií je v tomto případě o energii dodanou v palivu, přičemž se měří výhřevnost. Výhřevnost je energie, která se uvolní spálením paliva a ochlazením produktů hoření na původní teplotu paliva a vzduchu použitého pro hoření, bez využití energie vznikající skupenskou přeměnou páry v kapalinu. Zde je ještě vhodné upozornit na to, že existuje pojem spalné teplo. To je energie uvolněná z paliva spálením a ochlazením produktů hoření na povodní teplotu paliva a vzduchu použitého pro hoření s využitím kondenzačního tepla. Tato hodnota je např. u zemního plynu cca o 14 % vyšší, než je výhřevnost a je to dáno tím, že zemní plyn je tvořen především metanem, chemický vzorec CH_4 , při jehož hoření vzniká reakcí s kyslíkem (O_2) voda (H_2O) ve formě páry.

Pokud posuzujeme zařízení (systém), které nedokáže energii akumulovat, můžeme účinnost brát jako poměr mezi výkonem a příkonem, v tomto případě poměr mezi teplem vyrobeným a dodaným do otopné soustavy a energií dodanou v palivu.

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Energie dodaná je vždy větší než energie získaná (v opačném případě bychom mluvili o tzv. perpetuum mobile). To je dáno ztrátami v systému, v tomto případě se jedná o teplo unikající komínovou ztrátou (nedochází k ochlazení spalin na původní teplotu paliva a vzduchu, navíc ve spalinách je i vzduch, který byl marně ohřát z teploty okolí na teplotu spalin), teplem unikajícím z kotle do okolí a energií unikající nespálenými zbytky paliva, a to jak propadlými roštem, tak i unikajícím do vzduchu jako důsledek nedokonalého shoření, kdy uhlík obsažený v uhlí shoří na oxid uhelnatý (CO) a nikoliv na oxid uhličitý (CO₂). Další méně podstatnou ztrátou je i teplota popela propadlého roštem kotle na uhlí.

Kvůli ztrátám – přeměně energie na neúčinné druhy je účinnost vždy menší než 100 %.

Účinnost se zapisuje značkou η (éta) jako bezrozměrná veličina buď bez jednotky (jako desetinné číslo v rozmezí od 0 do 1), případně v procentech (%).

Výpočet:

$$\eta = E_z / E_D,$$

kde E_z je získaná energie

a E_D je dodaná energie.

Dále je nutné podotknout, že z hlediska možností zjišťování účinnosti kotlů existují 2 metody:

1) Přímá metoda stanovení účinnosti

Poměr množství tepla předaného teplotonosné látce k množství tepla přivedeného do kotle palivem a vzduchem ve stejném časovém úseku.

2) Nepřímá metoda stanovení účinnosti

Stanovení jednotlivých ztrát dle technické normy ČSN 07 0305.

- a) ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
- b) hořlavinou ve spalinách
- c) fyzickým teplem tuhých zbytků po spalování
- d) citelným teplem spalin (komínová ztráta)
- e) teplem chladicí vody
- f) sdílení tepla do okolí

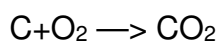
Metoda přímá je přesnější, neboť lze měřit jak na jedné straně vyrobené teplo, tak na druhé straně energii obsaženou v palivu.

Metoda nepřímá je méně přesná, neboť zjišťování jednotlivých druhů ztrát je problematické. Ještě si lze představit zjištění komínové ztráty, avšak zjišťování ztrát hořlavinou jak ve spalinách, tak i v tuhých zbytcích, zjišťování tepelných ztrát sdílením do okolí a další, je velmi problematické.

4 SPALOVÁNÍ

4.1 Spalování uhlí

Teoretické množství vzduchu potřebného k úplnému spálení nějakého paliva lze vypočítat z rovnice popisující příslušnou reakci. Jednoduché je to v případě kdy spalujeme například černé uhlí či antracit tj. téměř čistý uhlík.



Ke spálení 1 molu uhlíku t.j. 12 g je třeba 1 mol kyslíku. 1 mol plynu má za normálních podmínek objem 22,4 litru. Normální podmínky jsou 0 °C a tlak 100 kPa, což je natolik blízké podmínkám zimního topení, že asi není třeba dělat opravy na odlišnou teplotu a tlak. Pokud ano, pak použijeme k přepočtu stavovou rovnici $pV=nRT$, p je tlak, V objem n počet molů, T absolutní teplota v K a R univerzální plynová konstanta ($R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$).

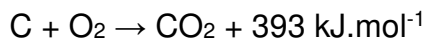
Z výše uvedeného vyplývá, že na spálení 1 kg uhlíku je třeba 1,86 m³ čistého kyslíku. Protože vzduch obsahuje jen 21% kyslíku, je třeba přibližně 9 m³ vzduchu.

Pokud je uhlí pouze 96% hmotnosti a zbytek je popel, pak je třeba jen 7,3 m³ vzduchu. Podobná oprava se udělá na obsah vody (především v případě dřeva).

Obvykle se ovšem spaluje s určitým přebytkem vzduchu a výsledná potřeba spalovacího vzduchu je tudíž vyšší. Čím je přebytek kyslíku vyšší, tím je nižší účinnost kotle (neboť se musí přebytečný vzduch ohřát).

U hnědého uhlí je výpočet trochu komplikovanější, protože jde o směs celé řady různých sloučenin, i když převážkou část tvoří uhlík. Lze využít

termochemické rovnice, kdy uhlík reaguje s kyslíkem za vzniku kysličníku uhličitého a uvolnění energie:



Tedy dokonalým spálením 1 molu uhlíku (cca 12 g) vznikne přibližně 393 kJ tepla. Obdobně lze uvést i energii vzniklou nedokonalým spálením uhlíku za vzniku oxidu uhelnatého.



4.2 Spalování dřeva

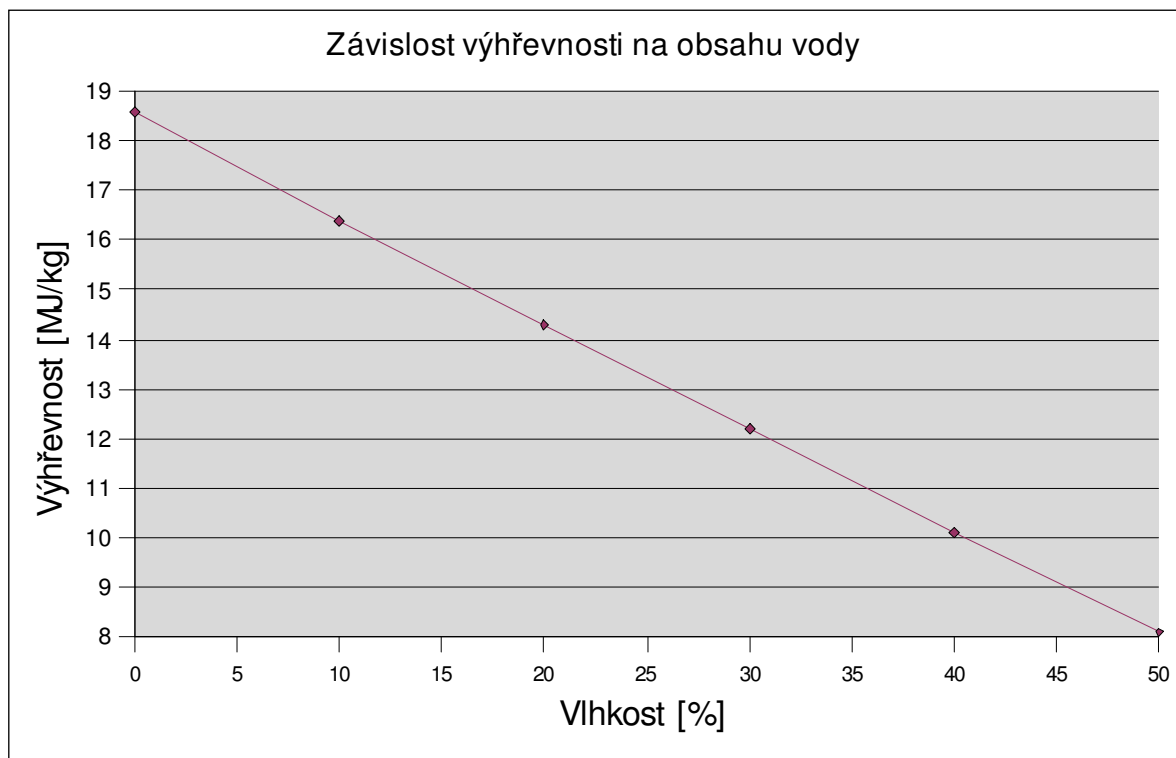
U spalování dřeva se jedná o složitější proces, už proto, že dřevo je vlastně organická směs různých sloučenin o různém zastoupení, tedy má pokaždé jiné chemické složení. Navíc součástí dřeva je vždy voda, která je zastoupená různým procentem. Vlhkost dřeva má zásadní vliv na výhřevnost dřeva, neboť voda má velké výparné teplo (potřeba tepla na přeměnu vody ve vodní páru), s rostoucím obsahem vody se snižuje energetický zisk.

Vlhkost dřeva lze vyjadřovat jako hmotnostní procento vody k celkové hmotnosti vlhkého dřeva. V dřevařském průmyslu se vlhkost dřeva vyjadřuje jako hmotnostní procento vody k hmotnosti suchého dřeva.

Při takovémto způsobu vyjádření pak může vyjít vlhkost i vyšší než 100 %. Například při 60% vlhkosti (to je stále ještě reálně se vyskytující hodnota) vychází podle „dřevařského“ vzorce hodnota vlhkosti 150 %, což vypadá na pohled trochu nelogicky.

Před použitím je tedy třeba dřevo nechat alespoň částečně vyschnout. Všeobecně se doporučuje vlhkost pod 30 % a za optimální se považuje vlhkost do 20 % protože té lze ještě dosáhnout běžným sušením pod přístřeškem.

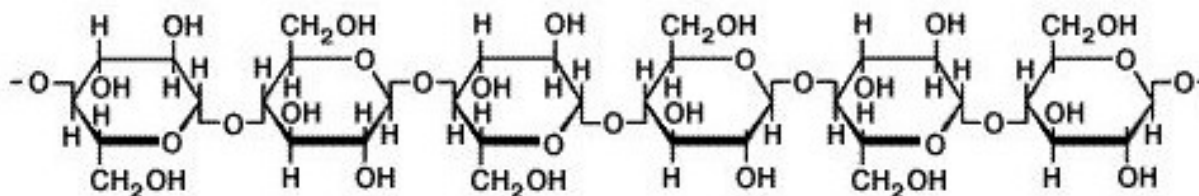
Graf závislosti výhřevnosti biomasy na obsahu vody



Z grafu je patrné, jak je výhřevnost dřeva závislá na vlhkosti.

Z chemického hlediska je rostlinná biomasa, tedy i dřevo, tvořena řadou různých sloučenin. Ze spalitelných látek mají největší význam celulóza, lignin a pryskyřice. Z nespalitelných látek je pro výhřevnost dřeva významný obsah především vody a dále pak obsah anorganických látek, které tvoří popel.

Celulóza je nejvýznamnější složka dřeva. Je to základní stavební materiál rostlinných buněk. Z chemického hlediska jde o polysacharid složený z velkého počtu navzájem spojených molekul glukózy.

struktura celulózy:

Celulóza je hygroskopická, snadno přijímá vodu a vlhne. V suchém stavu je velmi stálá, existuje nicméně řada mikroorganismů, které ji umějí rozložit na jednoduché cukry a energeticky využít (tyto mikrobiální procesy se uplatňují při hnití nebo tlení dřeva). Vzhledem k tomu, že v celulóze připadá na každý atom uhlíku jeden atom kyslíku, je výhřevnost suché celulózy jen asi 18 MJ/kg.

Lignin je významnou složkou dřeva stromů. Jednou z jeho funkcí je mechanické zpevnění buněčných stěn a také tvoří součást kapilár, které v rostlině vedou vodu a živiny. Tvoří zhruba třetinu hmotnosti dřeva.

Tabulka obsahu jednotlivých složek ve dřevu

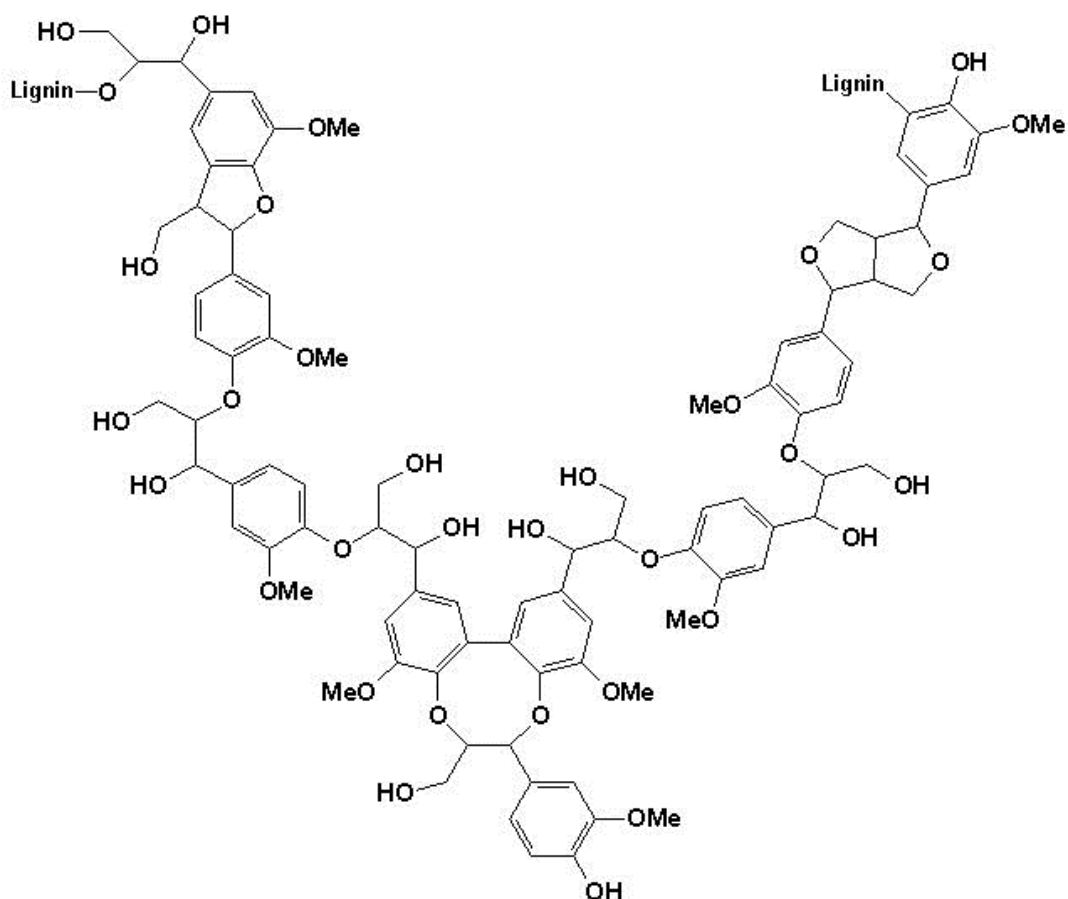
druh dřeva	Celulóza	Lignin
měkké dřevo	45%	30%
tvrdé dřevo	42%	20%

Z chemického hlediska je lignin komplikovaný polymer respektive směs polymerů. Není tvořen ze sacharidů jako celulóza, ale převážně z aromatických alkoholů. Díky tomu není tak hydrofilní (navlhavý) a má i trochu větší výhřevnost než celulóza. Při nedokonalém spalování (pyrolýze) dřeva se z něj uvolňují různé aromatické sloučeniny, např. methoxyfenoly jako je syringol, který je údajně

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

nejvíce zodpovědný za charakteristickou vůni uzeného masa, nebo guajakol, který přispívá k jeho chuti.

Struktura ligninu



Pryskyřice je obsažena ve dřevě jehličnatých stromů a je tvořena převážně směsí uhlovodíků (terpeny). Vzhledem k tomu, že uhlovodíky mají znatelně větší výhřevnost než celulóza nebo lignin, má dřevo jehličnatých stromů obsahujících pryskyřici o trochu větší výhřevnost, než dřevo listnatých stromů.

Významnou vlastností dřeva (a obecně všech forem biomasy) je značný podíl takzvané prchavé hořlaviny. Při zahřátí na teplotu přes 200 °C dochází k rozkladu a tvorbě hořlavých plynů. V důsledku toho, hoří dřevo dlouhým plamenem což trochu komplikuje konstrukci topenišť na jeho spalování. Do

plamene se totiž musí přivést dostatečné množství vzduchu a musí dojít k jeho promíšení, aby mohly všechny těkavé složky vyhořet. K tomu je také třeba dostatečná teplota, plamen se nesmí příliš ochladit.

Obsah prchavé hořlaviny v různých druzích paliva:

palivo	výhřevnost [MJ/kg]	prchavá hořlavina [%]
koks	28,5	1,5
černé uhlí	28	20
hnědé uhlí	17	55
dřevo	18	75
sláma	16	80

Další nepříjemnou vlastností dřeva je obsah vody. To souvisí jednak s jeho vznikem (rostliny vždy obsahují velký podíl vody) a jednak s hygroskopičností hlavní komponenty dřeva, celulózy. Vysušené dřevo opět snadno zvlhne, když je v prostředí s vysokou vlhkostí vzduchu. Obsah vlhkosti ve dřevě má, jak bylo uvedeno výše, zcela zásadní vliv na jeho výhřevnost. Třeba uhlí může při skladování zmoknout, aniž by došlo k nějakému významnému snížení jeho výhřevnosti. Spalováním dřeva v mokřém stavu ovšem ztratíme významnou část tepla, které je v něm obsažené.

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Při spalování dřeva probíhají následující procesy:

Při zahřívání nejprve nastane odpařování vody, která je ve dřevě přítomná. Protože dřevo má poměrně špatnou tepelnou vodivost a voda má vysoké výparné teplo, dochází u větších kusů dřeva k tomuto procesu ještě dlouho potom, kdy dřevo již na povrchu hoří. Odpařování vody spotřebuje mnoho tepla a velmi efektivně dřevo chladí. Teprve po odpaření vody proto ve vysušené zóně vzroste teplota a začne docházet k uvolňování dalších prchavých látek (např. pryskyřice) a k tepelnému rozkladu (pyrolýza) jednotlivých látek ze kterých se dřevo skládá. Vzniká směs hořlavých plynů a na roštu zbývá dřevěné uhlí. Udává se, že uvolněná prchavá hořlavina (plyny) v sobě nese přes polovinu energie ve dřevě obsažené. Hořlavé plyny se vzduchem přiváděným pod rošt (primární vzduch) hoří ve formě dlouhého plamene (primární spalování). Při tom ale nedojde ke spálení všech spalitelných složek, protože k tomu zpravidla není dostatek kyslíku nebo dostatečně vysoká teplota. Pokud je pod rošt přiváděn nadbytek vzduchu, tak se plamen příliš ochladí a část hořlaviny se vyloučí ve formě sazí (uhlík). Když je kyslíku málo, tak zase nemůže dojít k úplnému spálení (oxidaci až na oxid uhličitý). V každém případě to znamená, že ztratíme část energie v palivu obsažené. Z tohoto důvodu je třeba zajistit aby spalovací komora v níž hoření probíhá měla dostatečně vysokou teplotu t.j. aby byla rozumně tepelně izolována a do plamene se v určité vzdálenosti nad roštem přimíchává takzvaný sekundární vzduch, který umožní dohoření zbylých, dosud nespálených plynů. Tím se uvolní i zbylá energie v palivu obsažená a do komína pak odchází jen oxid uhličitý, vodní pára a dusík. Vzdušný dusík se spalování prakticky neúčastní, pokud je ovšem teplota plamene dostatečně vysoká dochází v určité míře k reakci dusíku a kyslíku za vzniku směsi oxidů dusíku. Tato reakce je z hlediska energetického nevýznamná, nicméně velmi zásadní je z hlediska emisí (oxidy dusíku jsou považovány za škodlivé emise).

Právě délka plamene a nutnost zajistit jeho vysokou teplotu znamená nutnost používat větší ohniště a teplosměnné plochy umístit až za koncem plamene, aby plamen zbytečně neochlazovaly, jinak se tvoří saze, které je zanášejí a pochopitelně se tím také snižuje účinnost spalování.

Na roštu zbývající žhavé uhlí se spaluje pomaleji a nevytváří už dlouhý plamen. V zásadě je jeho spalování analogické jako třeba u koksu. Zpravidla při tom vzniká z části oxid uhelnatý, který se spálí až v místě přívodu sekundárního vzduchu. Pokud došlo k uvolnění veškerých těkavých složek a v topeništi zůstává již jen dřevěné uhlí, je možné snadno regulovat výkon kotle v poměrně širokém rozsahu změnou v přívodu primárního vzduchu.

Zajistit, aby spalování probíhalo výše uvedeným způsobem není v malých topeništích vůbec jednoduché. U velkých kotlů je více možností jak zamezit přílišnému ochlazení plamene a jak dokonale dávkovat do plamene vzduch potřebný k optimálnímu spalování. Např. u kotlů s výkonem 1MW jsou plameny zhruba 5m dlouhé, do horní části plamene se přidává ještě terciární vzduch a celý systém dávkování vzduchu je řízen počítačem na základě údajů o složení spalin a obsahu kyslíku.

Dobře vyřešené spálení prchavé hořlaviny je proto důležitou podmínkou dosažení vysoké účinnosti při topení dřevem ve všech jeho formách.

Při spalování dřeva se tvoří také velmi jemný polétavý popílek, který může zanášet kouřové tahy a teplosměnné plochy. Mnohé, zvláště velké, kotle mají proto různá důmyslná zařízení na odstraňování popílku z povrchu tepelného výměníku (lamel) kotle. U malých kotlů se zpravidla spokojíme s občasným ručním vyčištěním. Většina popela zůstává nicméně na roštu a obecně platí, že ve srovnání s běžným hnědým uhlím produkuje spalování dřeva jen málo popela. Popel je navíc možno využít jako hnojivo na zahradu (má velký obsah draslíku).

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Pro orientaci zde ještě uvádíme výhřevnosti různého dřeva a dále tabulky pro přepočet objemových měr dřeva.

Výhřevnost různých druhů dřeva

Druh paliva	Obsah vody	Výhřevnost	Měrné hmotnosti		
	[%]	[MJ/kg]	[kg/m ³]=[kg/plm]	[kg/prm]	[kg/prms]
Listnaté dřevo	15	14,605	678	475	278
Jehličnaté dřevo	15	15,584	486	340	199
borovice	20	18,4	517	362	212
vrba	20	16,9			
olše	20	16,7			
habr	20	16,7			
akát	20	16,3			
dub	20	15,9	685	480	281
jedle	20	15,9			
jasan	20	15,7			
buk	20	15,5	670	469	275
smrk	20	15,3	455	319	187
bříza	20	15,0			
modřín	20	15,0			
topol	20	12,9			

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Vysvětlení pojmů označujících množství dřeva

jednotka	název	přepočet	popis
Plm	plnometr – m ³		krychle o hraně 1 m vyplněná dřevem bez mezer, 1 m ³ skutečné dřevní hmoty
Prm	prostorový metr	1 prm = 0,6 až 0,7 plm	krychle o hraně 1 m vyplněná polenovým dřevem (štípaného nebo neštípané) s mezerami
Prms	prostorový metr sypaný	1 prms ~ 0,4 plm	1 m ³ volně sypaného drobného nebo drceného dřeva

převodní tabulka pro převody mezi jednotlivými druhy dřeva a skutečného objemu dřeva v jednotce

	m³ (plm) dřeva bez kůry	prm polen do běla odkorně- ných	prm polen v kůře	prm pilař- ských odřezků	prm polen v kůře ve volně sypaných hromadách	prm volně sypaných štěpků
m ³ (plm) dřeva bez kůry =	1	1,30	1,55	1,90	2,25	3,00
prm polen do běla odkorněných =	0,77	1	1,20	1,45	1,75	2,30
prm polen v kůře =	0,66	0,85	1	1,25	1,45	2,00
prm pilařských odřezků =	0,52	0,70	0,80	1	1,20	1,55
prm polen v kůře ve volně sypaných hromadách =	0,45	0,60	0,70	0,85	1	1,35
prm volně sypaných štěpků =	0,33	0,45	0,50	0,65	0,75	1

5 MĚŘENÉ ZDROJE TEPLA

5.1 Kalorimetr

Pro měření množství tepla dodávaného do systému vytápění byly použity kalorimetry Siemens, typ WFM503-J000H0, které byly nejprve osazeny do otopného systému. Tyto kalorimetry jsou určeny pro měření do průtoku 2,5 m³/h a jsou osazeny přípojovacím závitem G 1".

Měřič tvoří dvojice teplotních snímačů, v přívodu a ve zpátečce a průtokoměrná část instalovaná do zpátečky topného okruhu. Vyhodnocovací jednotka trvale počítá teplotní rozdíl mezi teplotou přívodu a zpátečky a násobí ho hodnotou průtoku. Výsledek (okamžitý tepelný výkon) je trvale načítán v čase a zobrazen na displeji jako kumulovaná tepelná energie, případně prostřednictvím přídatného komunikačního modulu dálkově přenášen do nadřazeného monitorovacího systému a to bezdrátově (radiově) nebo po drátech (M-Bus). Vyhodnocovací jednotka je napájena baterií s dlouhodobou životností – 10 let.

Měřič pracuje na základě jednovtokového měřicího principu, kdy proud vody je veden tangenciálně na lopatkové kolečko. Rychlost otáčení lopatkového kolečka je snímána elektronicky bez využití magnetického pole. Nesprávný směr proudění vody měřičem je detekován pomocí autodiagnostiky a zobrazen ve formě poruchového hlášení na displeji. Mikroprocesor v elektronické jednotce vypočítá teplotní rozdíl přívodu a zpátečky, který se použije se střední hodnotou průtoku a tepelnou konstantou k výpočtu množství spotřebované tepelné energie zobrazené na displeji ve fyzikálních jednotkách (kWh / MWh nebo MJ / GJ). Pro zvýšení přesnosti, se při každém měření využívají hodnoty hustoty a entalpie, které jsou zahrnuty do výpočtu.

Teplota je měřena v intervalech 36 sekund. Průtok je měřen spojitě. Množství měřené energie je zobrazováno v reálném čase. Případné poruchy jsou zobrazovány na displeji okamžitě. Vyhodnocovací jednotka je z boku zajištěna tovární nebo metrologickou plombou, její poškození je bráno jako neoprávněná manipulace a dochází ke ztrátě záruky.

5.2 Kotel na zemní plyn

Kotel na zemní plyn je umístěn v řadovém rodinném domě. Objekt má částečně zapuštěný suterén, zvýšené přízemí, patro a obytné podkroví. Kotel je umístěn v suterénu. Objekt byl několik let po instalaci kotle zateplen (zateplení stěn Eticsem, zateplení střechy nadkrokovním systémem, výměna oken za plastová s izolačními pokovenými dvojskly). Kotel je tedy zcela evidentně předimenzován. Jeho provoz je řízen ekvitermní regulací. Jednotlivé radiátory jsou osazené termostatickými hlavicemi. Objekt má výpočtovou tepelnou ztrátu přibližně třetinovou, proti tepelné ztrátě před zateplením.

Vzhled kotle je patrný z obrázků v příloze číslo 1 až 4. Kotel je umístěn v suterénu, odkouření je provedeno vyvločkováním komínem nad střechu. Na rozvody vytápění byl v blízkosti kotle osazen kalorimetr, který měří průtok otopné vody a teplotu na přívodu a odvodu teplé vody do systému a z těchto údajů dopočítává množství energie dodané do systému vytápění. Odečet spotřebovaného zemního plynu je prováděn denně ve stejný čas, jako odečet instalovaného kalorimetru a je rovnou zapisován do excelu.

Jedná se o kotel Protherm, typ Tiger 24 KOZ vyrobený v roce 2007 o jmenovité účinnosti 90,7 %. Kotel je využíván pouze pro vytápění. I když má kotel modulovaný výkon, je jasné, že kotel je značně předimenzován a proto i modulování výkonu není dostatečné.

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Pro zajímavost je možné uvést informace z Průkazu energetické náročnosti budovy, který byl zpracován v rámci celkového zateplení objektu v roce 2013:

Plocha obálky budovy: 396,12 m²

Objemový faktor tvaru A/V: 0,45 m²/m³

Celková energeticky vztažná plocha: 272,79 m²

Energie ze zemního plynu potřebná

na vytápění (bez pomocné energie): 26,05 MWh/rok Průměrný součinitel

prostupu tepla U_{em} : 0,348 W/(m²·K)

Roční spotřeby plynu jsou následující:

topná sezóna	spotřeba zemního plynu [m ³]	spotřeba zemního plynu [kWh]
2018/2019	1345	14007
2019/2020	1255	13069
2020/2021	1399	14569

Z uvedeného přehledu je patrné, že výpočtová spotřeba tepla uvažovaná v PENBu je přibližně dvojnásobná, než je skutečnost, přitom je nutné zdůraznit, že PENB byl zpracováván v roce 2013, tedy jeho chybovost by měla být menší, než jak byly výsledky dřívějších méně přesných a podrobných výpočtů.

5.3 Kotel na uhlí

Kotel na uhlí je umístěn ve venkovském statku stojícím uvnitř obce. Tudiž z obou stran sousedí s dalšími statky, přitom jde o klasický statek do čtverce, kdy

po stranách jsou zděné obytné a hospodářské části, vstup je průjezdem mezi těmito částmi a zadní stranu vnitřního dvoru tvoří opět hospodářské stavení, avšak provedené jako dřevostavba. Stavba je nezateplená, patrová. Kotel je umístěn v hospodářské části, pravděpodobně v bývalém chlévě, stejně jako uhelna a místo pro uskladnění dřeva připraveného na zátop či na přikládání.

Vzhled kotle je patrný z obrázků v příloze číslo 5 až 8. Kotel je regulován manuálně přivíráním přívodu vzduchu. Majitel se snaží kotel provozovat bez přerušení provozu tak, že vždy ráno dá do kotle dřevo na žhavé uhlíky z minulého dne a ty zasype uhlím. Uhlí je nasypáváno kbelíkem, jehož obsah byl několikrát zvážen na závěsných vahách a průměr hmotnosti je 11 kg. Každý den je vždy spotřebováno dřevo o hmotnosti 10-11 kg o různé vlhkosti i druhu, kterým se uhlí prokládá, zejména při ranním zátopu. Na rozvody vytápění byl opět v blízkosti kotle osazen kalorimetr, který měří průtok otopné vody a teplotu na přívodu a odvodu teplé vody do systému a z těchto údajů dopočítává množství energie dodané do systému vytápění.

Na objekt nebyl zpracováván Průkaz energetické náročnosti, takže není známá výpočtová spotřeba energie na vytápění.

Spotřebu paliva poznamenává majitel objektu vždy při přikládání počtem čárek, přičemž každá čárka znamená jeden kbelík uhlí. Ukázka tohoto záznamu je na obr. 9.

Jedná se o kotel DAKON, typ DOR 25 max vyrobený v roce 2005 o jmenovité účinnosti 74 %. Kotel má dle výrobce emisní třídu 2. Kotel je využíván pouze pro vytápění.

Na tento objekt nebyl nikdy zpracováván Průkaz energetické náročnosti, ani není k dispozici projektová dokumentace, z níž by bylo možné spočítat energetickou náročnost budovy, proto u tohoto objektu lze pouze zjistit účinnost

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

vytápění na základě spáleného paliva a jeho množství. Zde je nutné podotknout, že sklad uhlí je navlhlý, a tak se i v uhlí může vyskytovat vlhkost. Stejně tak spálené dřevo není možné přesně zjistit, a není možné zjišťovat ani jeho reálnou vlhkost a kvalitu. Jedná se o dřevo převážně z prořezu lesa a ze soušek. Vzhledem k tomu, že není ani zjišťován přesný zůstatek paliva po zimní sezóně, není možné evidovat roční spotřebu paliva tak, jako tomu je u kotle na zemní plyn.

6 ÚČINNOST KOTLŮ

6.1 Kotel na zemní plyn

U kotle na zemní plyn je velmi jednoduché spočítat účinnost, neboť, přestože byly odečty prováděny každý den, postačuje vzít do výpočtu počáteční a koncový stav. Při denním odečtu vznikaly určité nepřesnosti (pravděpodobně chybným přečtením čísel na plynoměru), ale tyto hodnoty nejsou pro určení účinnosti nutné.

Celosezónní účinnost kotle byla změřena přímou metodou na hodnotu:

$$\eta = 85,9 \%$$

6.2 Kotel na uhlí

U kotle na uhlí je složitější zjistit účinnost, neboť, jak již bylo uvedeno výše, nebylo přesně měřeno palivo, a to ani co do hmotnosti, ani co do zjištění přesné výhřevnosti. Navíc, pravděpodobně vlivem zápisu (chybějící zaznamenání příkládání či naopak zapsání více příkládání, než jaká byla skutečnost) docházelo i k dalšímu zkreslení. Při zjišťování celoroční účinnosti byly tyto hodnoty, které příliš vybočovaly z obvyklého rozmezí, zanedbány a nebylo s nimi dále počítáno (vyskytovaly se hodnoty účinnosti na jednu stranu přes 110 %, na druhou stranu pod 6 %). I tak lze konstatovat, že celosezónní účinnost odpovídá hodnotě:

$$\eta = 44 \%$$

OBRAZOVÁ PŘÍLOHA

obrázek 1 – pohled na plynový kotel

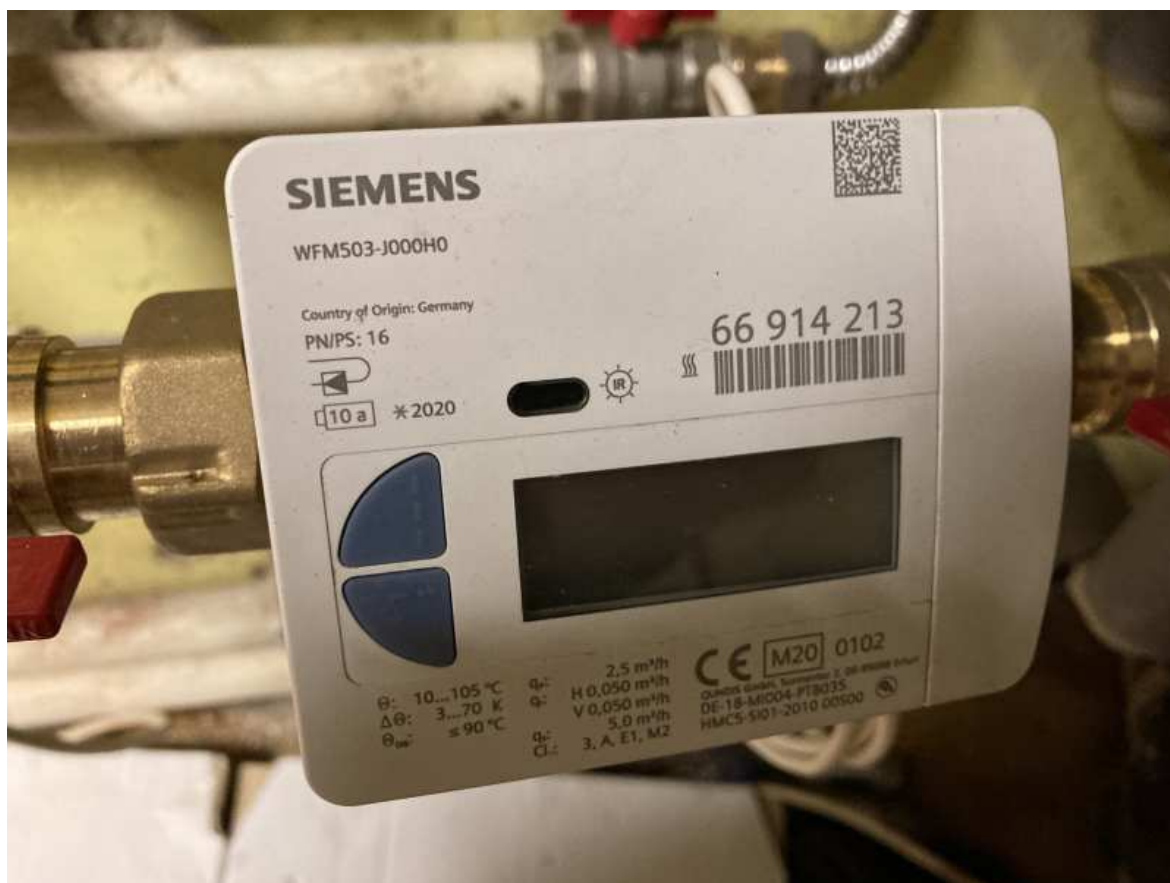


obrázek 2 – pohled na kalorimetr plynového kotle

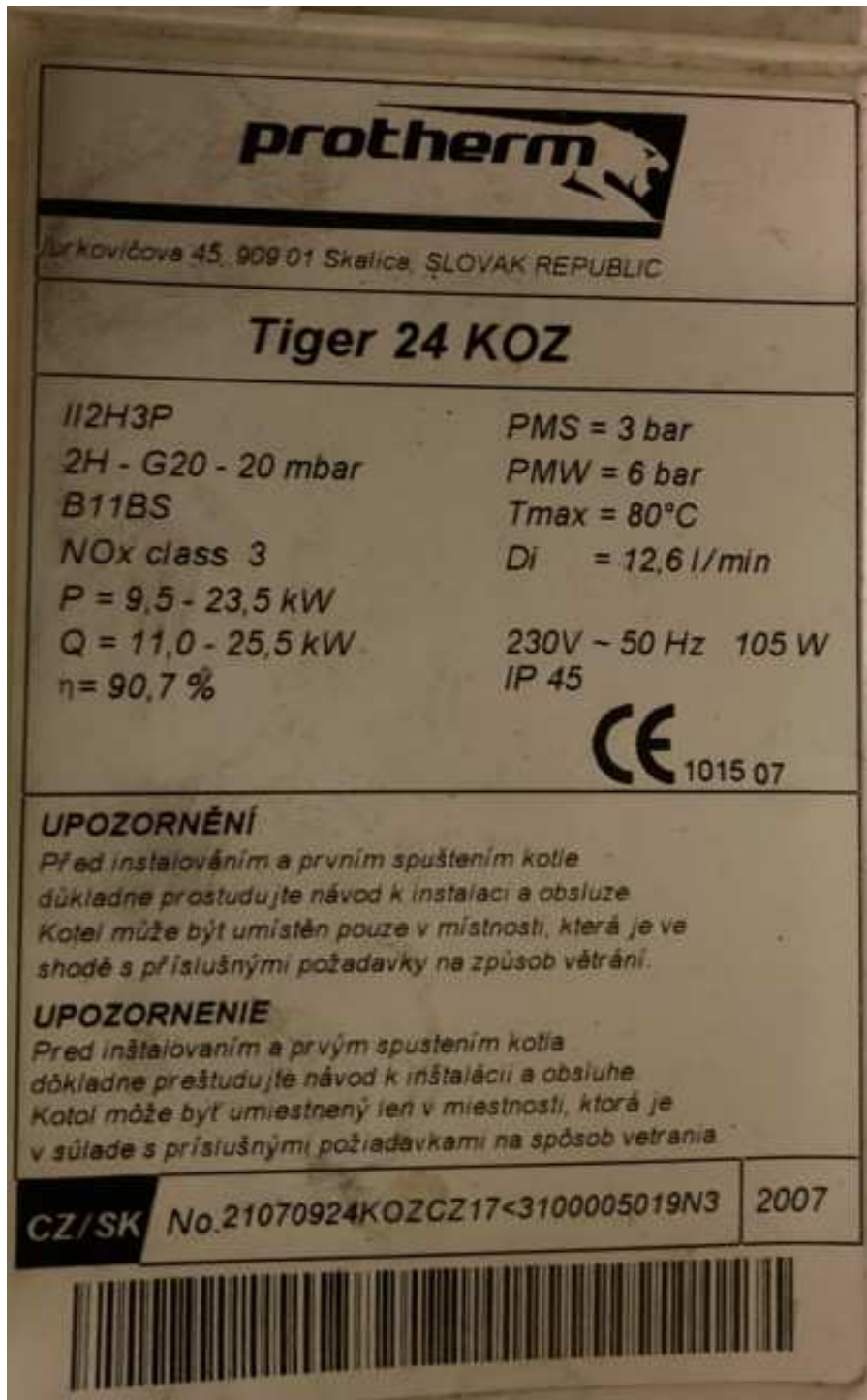


Přímé zjišťování účinnosti kotlů

obrázek 3 – detailní pohled na kalorimetr plynového kotle



Obrázek 4 – štítek plynového kotle



Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Obrázek 5 – pohled na kotel na uhlí



Obrázek 6 – pohled na kotel na uhlí



Přímé zjišťování účinnosti kotlů

Obrázek 7 – pohled na kalorimetr instalovaný na kotli na uhlí



Obrázek 8 – demontovaný štítek kotle na uhlí

DAKON		DAKON s.r.o., Ve Vrbině 588/3, KRNOV Pod Cvilínem				CE C _{SK} V P	
OCELOVÝ TEPLOVODNÍ KOTEL DOR							
Typ:	DOR 20	DOR 25	DOR 25 MAX	DOR 32	Palivo: hnědé uhlí - třech 1	Výrobní číslo:	
Jmenovitý výkon:	20 kW	24 kW	27 kW	32 kW	Max. prac. přetlak: PMS = 2 bar	227495	
Výhřevná plocha:	1,7 m ²	1,8 m ²	1,9 m ²	2,0 m ²	Max. prac. teplota: 95°C	Rok výroby:	
Vodní objem:	56 l	57 l	63 l	64 l	Třída kotle: 1	2005	
Hmotnost:	200 kg	215 kg	232 kg	240 kg	Minimální vzdálenost kotle a kpuřovodu od hořlavých stěn, stropů a konstrukcí je 200 mm.		
Pracovní tah:	0,20 mbar	0,26 mbar	0,26 mbar	0,26 mbar			

Přímé zjišťování účinnosti kotlů

obrázek 9 – ukázka záznamu spáleného uhlí

DATUM	KALORIMETR	kg dřeva 11 SPALENĚNO
10.11	5506.1	///
11.11.	5701.2	///
12.11.	5878.5	///
15.11.	5999.4	///
19.11.	6132.8	///
15.11.	6205.1	///
16.11	6444.2	///
17.11	6042.5	///
18.11.	6793.1	///
19.11.	6809.6	///
20.11.	6935.8	///
21.11	7299.1	///
22.11.	7381.6	///
23.11.	7502.8	///
24.11.	7690.1	///
25.11	7825.3	///
26.11.	7995.9	///
27.11.	8125.6	///
28.11.	8301.5	///
29.11.	8487.9	///
30.11	8610.2	///