

Účinnost spalovacích zařízení

Pro předmět Spalování a spalovací zařízení

Prof. Ing. Pavel Noskovič, CSc

Spalovací zařízení slouží k transformaci chemicky vázané energie paliv na tepelnou energii média, vhodného k žádoucí distribuci tepla pro vytápění (kotle pro vytápění, lokální topeniště), nebo pro další transformaci na jiné formy energie (parní kotle). Pracovním médiem je ve většině případů voda (všechny druhy kotlů), nebo vzduch (lokální topeniště).

Účinnost transformace energie je nejvýznamnějším technicko-ekonomickým parametrem uvedených zařízení, neboť udává míru využití energie paliva a je logické, že nevyužitá energie představuje ztráty, ať už ve formě tepla, nebo nespáleného paliva. Obecně je definována **účinnost jako poměr výkonu ku příkonu**, lze tedy zapsat

$$\eta = \frac{\text{výkon}}{\text{příkon}} = \frac{P_v}{P_p} \quad [-] \quad (1)$$

a v uvažovaných případech bude příkonem vždy množství energie, dodané do zařízení v palivu, zatímco výkonem bude množství tepla, obsaženého ve vyrobené páře, horké vodě, nebo v ohřátém vzduchu.

Stanovení účinnosti kotle, či kamen zdaleka není jednoduchou záležitostí. Vyžaduje provedení náročných měření a analýz a protože musí být získané výsledky navzájem srovnatelné, také použití jednotné metodiky výpočtu. Celý postup je podrobně stanoven v příslušných normách a přestože mají normy obecně charakter doporučení, je výhodné a užitečné normativní metodiku používat. Pro kotle je to norma ČSN 070305 – Hodnocení kotlových ztrát a pro lokální topeniště např. ČSN EN 13229 – Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva – Požadavky a zkušební metody.

Další výklad má za cíl objasnit a vysvětlit používaný způsob stanovení účinnosti a je proto poněkud zjednodušený. Tam, kde to bylo zapotřebí, jsou jednotlivá zjednodušení zdůrazněna a objasněna tak, aby bylo snazší pochopit postup normativního výpočtu.

Použijeme-li ke stanovení účinnosti definičního výrazu (1), musíme znát příkon v palivu a tepelný výkon zařízení, zvolili jsme zdánlivě nejjednodušší (a proto také nepřesnější) postup. Hovoříme v tomto případě o **přímé metodě stanovení účinnosti**. Příkon v palivu bude dán množstvím a výhřevností paliva, takže

$$P_p = m_{pal} \cdot Q_i^r \quad [\text{kW}], \quad (2)$$

pokud bude vyjádřeno množství paliva m_{pal} v $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ a jeho výhřevnost Q_i^r $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$.

V případě kotlů bude tepelný výkon snadné vyjádřit jako množství tepla, obsaženého ve vyrobené horké vodě, nebo páře. Je však nutné vzít na vědomí, že voda již při vstupu do kotle obsahuje jisté množství tepla a počítat proto s teplotním rozdílem „vstup-výstup“. Tepelný výkon horkovodního kotle jednoduše určíme vztahem

$$P_v = m_v \cdot c_v \cdot \Delta t \quad [\text{kW}], \quad (3)$$

když vyjádříme množství vody m_v v $[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$, měrnou teplotou kapacitu c_v $[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}]$ a příslušné teploty $(t_2 - t_1) = \Delta t$ ve $[\text{°C}]$.

V případě parního kotle je samozřejmě praktičtější vyjádřit tepelný obsah páry entalpií a bude

$$P_v = m_p \cdot \Delta i \quad [\text{kW}]. \quad (4)$$

Přitom vyjádříme množství páry m_p v $[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$ a příslušné entalpie vstupní vody a výstupní páry $(i_2 - i_1) = \Delta i$ v $[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$.

Z uvedeného je zřejmé, že popsany postup nelze použít pro stanovení účinnosti lokálních topenišť, protože není reálně možné určit tepelný výkon, tj. množství tepla předávaného do místnosti. Stejně tak je často obtížné určit, zejména při palování tuhých paliv, spotřebu paliva pro stanovení tepelného příkonu v palivu. Určit účinnost zařízení z definičního vztahu (1), tj. přímou metodou, tedy na první pohled vypadá jako nejjednodušší postup, nelze ho však vždy použít a navíc, což je nejdůležitější, nemá takový postup dostatečnou vypovídací hodnotu. Zjistíme sice hodnotu účinnosti, ale nevíme na příklad proč je tak nízká, kde se energie ztrácí.

Proto byla vyvinuta metoda stanovení účinnosti ze ztrát, tzv. **metoda nepřímá**. Ta vychází z jednoznačné skutečnosti, vyjádřené bilancí

$$\text{příkon} = \text{výkon} + \text{ztráty}$$

a jestliže označíme jednotlivé ztráty jako Z_i , můžeme zapsat vztah

$$P_p = P_v + \sum_1^i Z_i \quad [\text{kW}]. \quad (5)$$

S použitím definice účinnosti (1) lze snadno vyjádřit

$$\eta = \frac{P_v}{P_p} = \frac{P_p - \sum_1^i Z_i}{P_p} = 1 - \frac{\sum_1^i Z_i}{P_p} \quad [-] \quad (6)$$

a protože zlomek $\frac{\sum_1^i Z_i}{P_p}$ představuje poměrné ztráty, připadající na jednotku příkonu, vyjadřujeme jednoduše účinnost vztahem

$$\eta = 1 - \sum_1^i \xi_i \quad [-] \quad (6a)$$

Nejjednodušším a také nepraktičtějším způsobem, jak vyjádřit jednotku příkonu ve jmenovateli zlomku vztahem (6), je zvolit příkon, odpovídající jednomu kilogramu paliva, tedy jeho výhřevnosti. Je to jednoduché a navíc se všechny bilanční výpočty spalování rovněž vždy provádí pro kilogram paliva.

Normativní výpočet také volí jako jednotku příkonu množství energie, přivedené jedním kilogramem paliva, nemůže však opomenout současně s ním přiváděné fyzické teplo paliva, ani fyzické teplo příslušného množství spalovacího vzduchu.

Jak již bylo řečeno, jsou ztráty způsobeny nedokonalostí spalování a nemožností využít veškeré spalováním paliva uvolněné teplo. Základní rozdělení kotlových ztrát představuje následující výčet:

- ztráta komínová (ztráta citelným teplem spalin), která vyjadřuje ztrátu tepla ve spalinách za kotlem (přesněji za poslední teplosměnnou plochou), které již není dále využito a odchází komínem do ovzduší,
- ztráta nedopalem (ztráta nespálenou hořlavinou), udávající jakou část z původní hořlaviny se nepodařilo spálit a tato část původní hořlaviny opouští kotel ve formě tuhých a plynných hořlavých složek,
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků, respektující skutečnost, že také zbytky po spalování (v ideálním případě popelovina) opouštějí kotel s nezanedbatelnou teplotou a odvádějí tak značné množství nevyužitého tepla,
- ztráta sdílením tepla do okolí, vyjadřující množství tepla, předaného do okolí z vnějšího povrchu kotle.

V zjednodušeném, a tedy méně přesném, výkladu lze vyjádřit způsob stanovení jednotlivých ztrát poměrně snadno a srozumitelně. Chceme-li vyjádřit **komínovou ztrátu**, musíme stanovit množství tepla ve spalinách za kotlem, což je formálně snadné

$$Q_{sp} = V_{sp} \cdot c_{sp} \cdot t_{sp} \quad [\text{J}] \quad (7)$$

a porovnat ho s množstvím energie, přivedeným palivem. A protože vztahujeme výpočet k jednomu kilogramu paliva, abychom přivedenou energii mohli vyjádřit výhřevností, musí množství spalin vyjadřovat takové množství, které vznikne spálením jednoho kilogramu paliva. Tedy skutečné množství spalin $V_{sp,sk}$ [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]. Je také zapotřebí vzít do úvahy vstupní teplotu spalovacího vzduchu, ze kterého spaliny vznikly, tedy teplotu okolí t_{vz} a počítat s teplotním rozdílem. Komínovou ztrátu pak vyjádříme

$$\xi_K = \frac{V_{sp,sk} \cdot C_{sp} \cdot (t_{sp} - t_{vz})}{Q_i^r} \quad [-] \quad (8)$$

Při stanovení **ztráty nedopalem** je nutné si uvědomit, že nespálené zbytky ve formě uhlíku se vyskytují v popelu, který opouští kotel dílem jako škvára (struska) a dílem jako popílek. Toto rozdělení je nezbytné znát. Navíc se nespálená hořlavina objevuje ve spalinách také v plynné fázi, především jako oxid uhelnatý – produkt nedokonalého spalování uhlíku. Musíme tedy rozlišovat mezi tuhým a plynným nedopalem a dále ještě mezi tuhým nedopalem ve strusce (škváře) a v úletu.

V tuhých zbytcích po spalování nalezneme jako produkt nedokonalého spalování pouze uhlík, protože další spalitelné složky hořlaviny (síra a vodík) obvykle úspěšně shoří. Tento uhlík je obsažen v popelu, jehož obsah v jednom kilogramu paliva známe jako obsah popeloviny A [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$]. Z laboratorního rozboru popela, provedeného zvláště pro strusku a pro popílek (úlet), známe obsah uhlíku v jednotlivých tuhých zbytcích a víme-li jaká část popela „propadne roštem“ a jaká část „uletí komínem“, snadno určíme tomu odpovídající množství nevyužité energie.

Není ovšem snadné určit rozdělení popela na škváru a úlet. Lze si sice představit provozní měření, kterým by bylo možné toto rozdělení určit, nejčastěji se však vychází z dlouhodobých zkušeností. Udává se tzv. stupněm zachycení příslušné složky, tj. stupeň zachycení škváry X_s a stupeň zachycení úletu X_u a samozřejmě platí, že

$$X_s + X_u = 1. \quad [-] \quad (9)$$

Ztrátu tuhým nedopalem ve strusce (škváře) můžeme vyjádřit jednoduchým a logickým vztahem

$$\xi_{NS} = \frac{A^r \cdot X_s \cdot C_s \cdot Q_c}{Q_i^r} \quad [-], \quad (10)$$

který v čitateli říká, že jedním kilogramem paliva bylo do kotle přivedeno A^r kg popeloviny, z tohoto množství část X_s „propadla roštem“ a bylo v ní C_s uhlíku, který má výhřevnost Q_c .

Analogicky se postupuje při stanovení ztráty tuhým nedopalem v úletu ξ_{NU} .

Podobně snadno lze vyjádřit ztrátu plyným nedopalem. Za předpokladu, že jedinou hořlavou složkou ve spalinách bude oxid uhelnatý a jeho koncentrace ve spalinách bude C_{co} bude tato ztráta dána výrazem

$$\xi_{NPI} = \frac{V_{sp,sk} \cdot C_{co} \cdot Q_{co}}{Q_i^r} \quad [-], \quad (11)$$

který podobně jako v (10) uvádí, že ve spalinách $V_{sp,sk}$ vzniklých spálením jednoho kilogramu paliva je obsaženo C_{co} oxidu uhelnatého, který má výhřevnost Q_{co} a výraz v čitateli udává množství energie nevyužité proto, že tento oxid uhelnatý neshořel.

Celková ztráta nedopalem je pak určena součtem dílčích ztrát

$$\xi_N = \xi_{NS} + \xi_{NU} + \xi_{NPI} \quad [-] \quad (12)$$

Podobně jako u stanovení ztráty tuhým nedopalem lze postupovat při vyjádření **ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků**. S využitím znalosti rozdělení popela do strusky a úletu (stupeň zachycení) je snadné vyjádřit množství tepla, odvedeného z kotle horkou struskou a úletovým popílkem. K výpočtu je nutné znát měrnou tepelnou kapacitu c_i příslušného tuhého zbytku a jeho teplotu t_i , se kterou opouští kotel. Ztrátu fyzickým teplem strusky pak určíme vztahem

$$\xi_{fs} = \frac{A^r \cdot X_s \cdot c_s \cdot t_s}{Q_i^r} \quad [-] \quad (13)$$

obdobně ztrátu fyzickým teplem úletu a celková ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků bude

$$\xi_f = \xi_{fs} + \xi_{fu} \quad [-]. \quad (14)$$

Zbývá už jen **ztráta sdílením tepla do okolí** (ξ_o). Tepla je z povrchu kotle předáváno do okolí všemi známými mechanismy přenosu tepla a přímým měřením, dostatečně přesným

a spolehlivým, není možné tuto ztrátu určit. Využívá se proto zkušeností a dlouhodobých poznatků.

Po určení všech relevantních dílčích ztrát je snadné vypočítat účinnost kotle, protože podle (6a) platí

$$\eta = 1 - \sum_1^i \xi_i = 1 - (\xi_k + \xi_N + \xi_f + \xi_o) \quad [-] \quad (15)$$

Naznačený postup stanovení účinnosti je zjednodušením normativního výpočtu a má sloužit k jeho snazšímu pochopení. Je nutné upozornit, že v zájmu objektivního hodnocení jednotlivých ztrát upřesňuje normativní výpočet jednotlivé ztráty tím, že bere do úvahy množství skutečně spálené hořlaviny (viz členy typu $(100 - C_i)$, $(100 - \xi_i)$ a další).

Uvedený postup výpočtu je obecně použitelný pro všechny typy kotlů a všechny druhy paliva. V jednotlivých případech je nutné výpočet přizpůsobit podmínkám. Například u plynových kotlů ztrácí význam ztráta nedopalem v tuhých zbytcích, stejně jako ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků. Při stanovení účinnosti lokálního topeniště (kamen) je sdílení tepla do okolí základní funkcí zařízení a nelze jej samozřejmě hodnotit jako ztrátu. Vždy však bude mít největší vliv na účinnost komínová ztráta. Je dominantní a pro přibližné stanovení účinnosti lze použít vztahu

$$\eta \cong 1 - \xi_k \quad [-] \quad (16)$$

Z uvedeného plyne, že při hledání možností **zvýšení účinnosti kotlů** je neefektivnější zaměřit se na snížení komínové ztráty. Vztah (8) ukazuje, že snížit hodnotu čitatele uvedeného výrazu je možné snížením množství spalin $V_{sp,sk}$ a snížením teploty spalin t_{sp} . Protože je skutečné množství spalin jednoznačně dáno složením paliva, které určuje teoretické množství spalin a součinitelem přebytku vzduchu n ,

$$V_{sp,sk} = V_{sp,t} + (n - 1) V_{vz,t} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}] \quad (17)$$

Lze snížit množství spalin snížením přebytku vzduchu. Takové opatření je však dosti omezené, protože snižování přebytku vzduchu vede k nedokonalému spalování, produkci oxidu uhelnatého a růstu ztráty nedopalem.

Praktičtějším řešením je **snížení teploty spalin za kotlem**. I toto opatření má svůj limit: teplota spalin musí být spolehlivě vyšší, než teplota rosného bodu, aby nedošlo ke kondenzaci vody ve spalinách. Ne však za kotlem, ale na celé trase kouřovodu, včetně komína. Teplota rosného bodu je závislá na druhu a složení paliva a také na kvalitě spalovacího procesu. Ve spalinách, vzniklých spalováním zemního plynu je to cca 40 °C, v případě spalování uhlí zhruba 120 °C. Uvedené hodnoty naznačují, že již z tohoto důvodu nemůže v soutěži o nejvyšší účinnost zvítězit uhelný kotel.

Většina provozovaných kotlů respektuje teplotu rosného bodu s velkou rezervou, což často svádí k úvahám o dodatečném výměníku pro snížení teploty spalin. Každé takové řešení, jakkoliv je žádoucí, musí vycházet z kvalifikované analýzy provozních podmínek, aby skutečně přineslo užitek.

Je přirozené, že nejnižší kotlové ztráty nabízí kotle, spalující zemní plyn. Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků neexistuje, ztráta nedopalem se redukuje na ztrátu

nespáleným oxidem uhelnatým, kterou lze úspěšně minimalizovat kvalitně vedeným spalovacím procesem a rovněž ztrátu sdílením tepla do okolí lze minimalizovat vhodnou tepelnou izolací stěn kotle. Poslední, komínová ztráta nebude také příliš vysoká, díky nízké teplotě rosného bodu t_s . Ta je závislá na přebytku vzduchu v ohništi a s rostoucím součinitelem přebytku vzduchu n klesá. Orientačně tuto závislost naznačují údaje v Tab. 1.

Součinitel přebytku vzduchu n [-]	Teplota rosného bodu t_s [°C]
1	57
2	45
3	38

Tab. 1 Teplota rosného bodu ve spalinách ZP

Protože je zemní plyn velmi čistým palivem s minimem nežádoucích složek a jeho hořlavina je tvořena uhlovodíky, dominantně metanem, jsou produkty spalování oxid uhličitý a voda. Spaliny pak budou navíc obsahovat dusík (79 % spalovacího vzduchu) a nevyužitý přebytek spalovacího vzduchu. Složení a čistota spalin nabídlý ojedinělou příležitost extrémního ochlazení spalin pod teplotu rosného bodu. Vnikly tak **kondenzační kotle**.

Jejich konstrukční řešení musí zajistit intenzivní ochlazování spalin a předání spalinám odebraného tepla teplé vodě v topném systému. Výměník tepla spaliny/voda musí být odolný proti korozi a musí zajistit odvod kyselého kondenzátu do kanalizace. (U výkonů nad 200 kW je nutná neutralizace kondenzátu.) Protože jsou spaliny extrémně vychlazené, vytváří se tah v komíně vzduchovým, nebo spalinovým ventilátorem. Výhody kondenzačního kotle lze využít pouze tehdy, je-li použit nízkoteplotní systém vytápění. Protože je chladícím médiem topná voda, musí být její vratná teplota (před vstupem do kotle) dostatečně nižší, než teplota rosného bodu. Současné zkušenosti potvrzují, že v celém regulovaném rozsahu výkonu kotle lze teoreticky dosáhnout kondenzačního provozu při teplotách topné vody 55/45 °C a nižším a nad hodnotami 70/60 °C již pracuje kotel zcela bez kondenzace.

Je samozřejmé, že se provoz takového systému bude měnit podle teplotních poměrů a individuálních požadavků, stejně tak se bude měnit teplota spalin, teplota vratné vody a také množství kondenzátu. Spálením 1 m³ zemního plynu a ochlazením vzniklých spalin ($n = 1$) na 25 °C zkondenzuje 1,36 kg vody. Takový provozní režim není ovšem reálný, ale můžeme ho považovat za ideální limit. Opačným limitem je provoz bez kondenzace, tj. provoz s teplotou spalin nad teplotou rosného bodu. Provozní režim kondenzačního kotle lze dobře charakterizovat tzv. stupněm kondenzace, který udává jaká část z celkového obsahu vody zkondenzovala a stupeň kondenzace se podle okamžitých provozních podmínek mění.

Použijeme-li ke stanovení účinnosti kotle běžně používané vztahy (1), (2), (3), čeká nás překvapení, protože u kvalitních dobře provozovaných kondenzačních kotlů bude účinnost větší než jedna. Je to překvapení zajímavé, ne však znepokojivé. Výkon kotle se zvýšil o uvolněné kondenzační teplo vodní páry ve spalinách, která zkondenzovala. Množství kondenzačního tepla je možné zahrnout do celkové bilance zavedením dalšího členu – kondenzačního výkonu P_k , který lze snadno vyjádřit vztahem

$$P_K = m_K l, \quad [\text{kW}] \quad (18)$$

ve kterém představuje m_K množství kondenzátu $[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$ a l kondenzační teplo $[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$. Definiční vztah (1) pak získá tvar

$$\eta = \frac{P_v - P_K}{P_p} \quad [-] \quad (1a)$$

a všechno bude v pořádku. Praktičtější a běžně užívaným postupem je vyjádření příkonu (2) nikoliv výhřevností, ale spalným teplem, které již kondenzační teplo obsahuje (viz definice výhřevnosti a spalného tepla).

Skutečností, že použití běžně používaného postupu výpočtu účinnosti vede u kondenzačních kotlů k hodnotám, přesahujícím sto procent, využívají dodnes výrobci jako osvědčeného reklamního triku. V seriózních odborných publikacích by tam, kde mohou vzniknout pochybnosti mělo být vždy uvedeno, zda byla účinnost stanovena z výhřevnosti, nebo ze spalného tepla.

Jak již bylo řečeno, lze **účinnost lokálních topenišť** stanovit pouze s použitím nepřímé metody, protože přímé měření tepelného výkonu není možné. Normativní výpočet vychází ze vztahu (15), odlišně však definuje jednotlivé ztráty. Dominantní ztrátou je opět ztráta komínová, kterou lze jednoduše vyjádřit vztahem (8). Vyjádření ztráty nedopalem se omezuje na nespálenou hořlavinu ve škváře (popelu) a oxid uhelnatý ve spalinách. Další ztráty není nutné brát v úvahu, takže platí

$$\eta_K = 1 - \sum_1^i \xi_i = 1 - (\xi_K + \xi_{NS} + \xi_{NPI}) \quad [-] \quad (19)$$

Stojí za pozornost, že v případě spalování dřeva, které osahuje zhruba jedno procento popeloviny v sušině, bude ztráta nedopalem v tuhých zbytcích zanedbatelně malá (ve výrazu (10) bude $A' < 0,01$), zvláště když se popel ze dna ohniště pravidelně neodstraňuje a zbytkový uhlík má dostatek času na vyhoření. Moderní kamna na spalování dřeva jsou schopná dosáhnout emisní koncentrace oxidu uhelnatého ve spalinách pod 0,1 %, takže ani ztráta plyným nedopalem není významná a tak o účinnosti rozhoduje pouze hodnota komínové ztráty.

Zatímco v případě výpočtu účinnosti kotlů je popsána zjednodušená metodika velice blízká metodice normativní je normativní postup výpočtu pro lokální topeniště méně srozumitelný a jeho pochopení vyžaduje větší úsilí. V podobných případech jako je tento je vhodné připomenout, že žádná norma není závazná, ale je pouze doporučením. Nicméně jsou i zde popsané principy výpočtu zachovány.

Účinnost v energetice je vždy zajímavé a významné téma. Zvyšování účinnosti snižuje spotřebu paliv, snižuje environmentální zátěž a prodlužuje životnost palivových zásob. Hovoříme-li o účinnosti, nestačí věnovat pozornost pouze technickým aspektům, ale je nutné mít na zřeteli také aspekty ekonomické. Pouze tak je možné dobrat se užitečných závěrů.

Celková účinnost energetického systému je vyjádřena součinem účinností jednotlivých článků řetězce. Můžeme začít účinností (stupněm) využití ložisek fosilních paliv a pokračovat přes „účinnost dopravy“, účinnost kotle, bloku, elektrárny až po účinnost celého energetického systému. Stále více budeme cítit nedostatečnost čistě technického pohledu

(účinnost je poměr výkonu a příkonu) a stále více budeme postrádat nějakou další relevantní veličinu. Tou veličinou je koruna. A proto pokud hodnotíme energetický systém státu, nepoužíváme jako kritérium hodnocení účinnosti, ale určujeme energetickou náročnost ekonomiky EN, kterou vyjadřujeme jako podíl spotřeby primárních energetických zdrojů PEZ a hrubého domácího produktu HDP:

$$EN = \frac{PEZ}{HDP} \quad [\text{J.Kč}^{-1}] \quad (20)$$