



VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA



Účinnost spalovacích zařízení

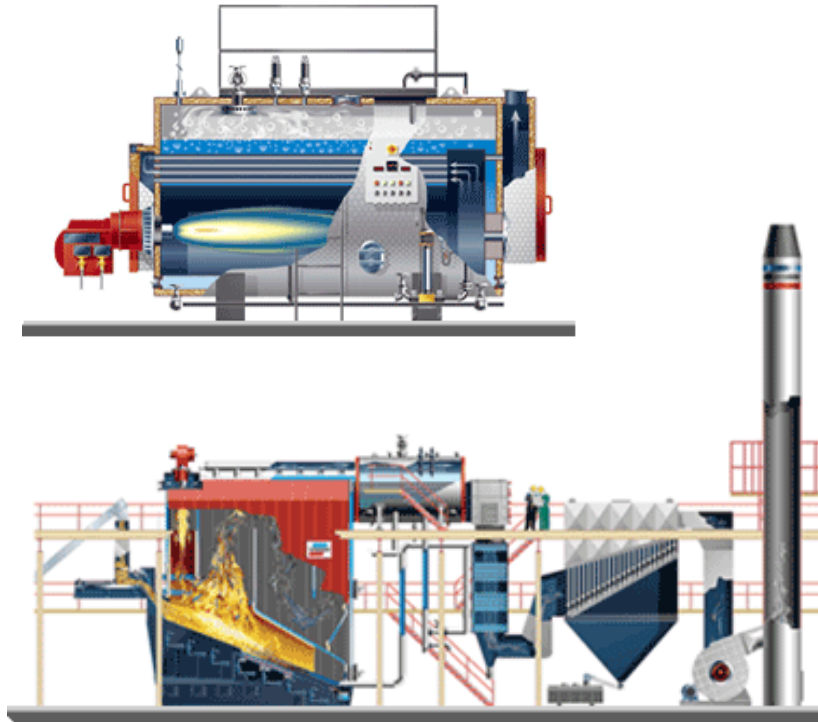
Doc. Dr. Ing. Tadeáš Ochodek

Účinnost je ukazatelem míry dokonalosti transformace energie v zařízení. Jedná se o technicko-ekonomický parametr. Vyjadřuje poměr mezi energií využitou a energií přivedenou do zařízení, tedy mezi výkonem a příkonem.

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

V uvažovaném případě (spalovací zařízení) bude vždy příkon dán energií z paliva a výkon bude dán množstvím tepla ve vyrobené páře nebo vodě.

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).



Normy pro výpočet účinnosti

ČSN 070305 – Hodnocení kotlových ztrát

Tato norma je přizpůsobena pro stanovení účinnosti velkých energetických zařízení. Další výklad vychází z této normy.

ČSN EN 303-5

ČSN EN 13240

Tyto normy jsou určeny pro stanovení účinnosti a pro obecná měření spalovacích zařízení malých výkonů (krby, kamna, kotle).

Způsob určení účinnosti

Přímá metoda

!!! Neplést s přímou účinností !!! – přímá a porovnávací účinnost se určuje u energetických strojů, ve kterých dochází ke kompresi či expanzi plynů.

Tato metoda je založena na znalosti přesného množství paliva dodávaného do kotle a jeho kvalitě, respektive výhřevnosti, účinnost se pak určí prostým poměřením příkonu a výkonu. Výkon lze měřit snadno.

$$\eta = \frac{P_v}{P_p} \quad [1]$$

P_v ...výkon [kW]

P_p ...příkon [kW]

Tento způsob lze s dostatečnou přesností použít pouze u **plynových** či **olejových kotlů** a při laboratorním měření malých spalovacích zařízení uložených na měřicí váze, kde lze určit množství spáleného paliva.

Příkon se určí tedy z množství paliva a jeho výhřevnosti, pokud se zanedbává citelné teplo paliva a spalovacího vzduchu, které představuje cca 1% vstupní energie.

$$P_p = \dot{m}_{pal} \cdot Q_i^r \quad [kW]$$

m_{pal} ...množství paliva [kg/s]
 Q_i^r ...výhřevnost [kJ/kg]

Výkon kotle je poměrně snadné určit z množství pracovního média a jeho teploty (u vody) či entalpie (u páry). Výkon se prakticky nedá určit u lokálních topenišť.

$$P_V = \dot{m}_v \cdot c_v \cdot \Delta t \quad [kW]$$

m_v ...množství vody [kg/s]

c_v ...tepelná kapacita vody [kJ/(kg.K)]

Δt ...rozdíl teploty vstupní a výstupní vody [K]

$$P_V = \dot{m}_p \cdot \Delta i \quad [kW]$$

m_p ...množství páry [kg/s]

Δi ...rozdíl entalpie kondenzátu a výstupní páry [kJ/kg]

Tato metoda jak bylo řečeno není použitelná u všech spalovacích zařízení a navíc nedává vědět jaký podíl mají jednotlivé ztráty. Z těchto důvodů se užívá nepřímá metoda vycházející z následujícího předpokladu.

Nepřímá metoda

$$P_V = P_P - \sum_1^i Z_i \quad [kW]$$

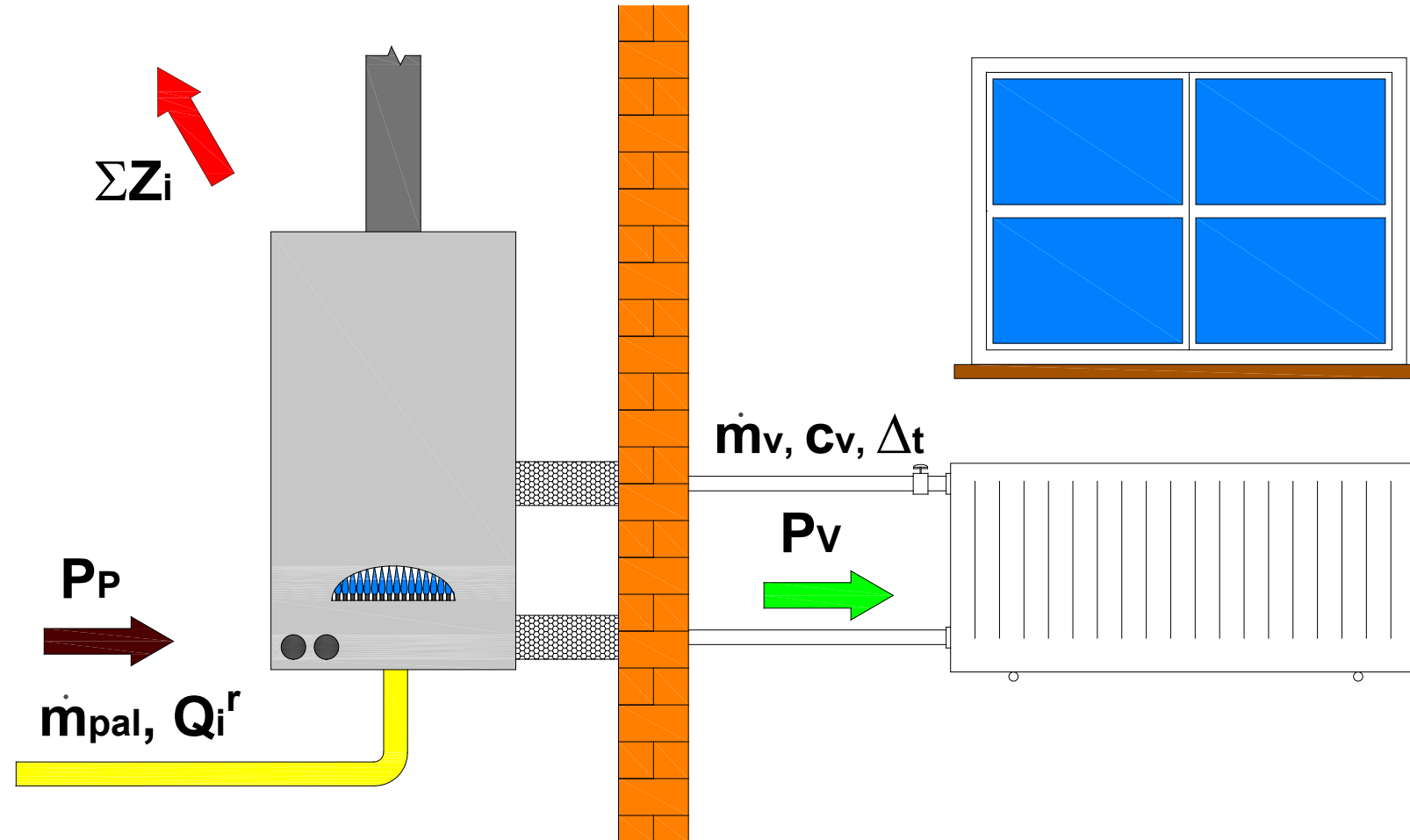
$$\eta = \frac{P_V}{P_P} = 1 - \frac{\sum_1^i Z_i}{P_P} \quad [1]$$

$$\eta = 1 - \sum_1^i \xi_i \quad [1]$$

Z_i ...ztráta kotle [kW]

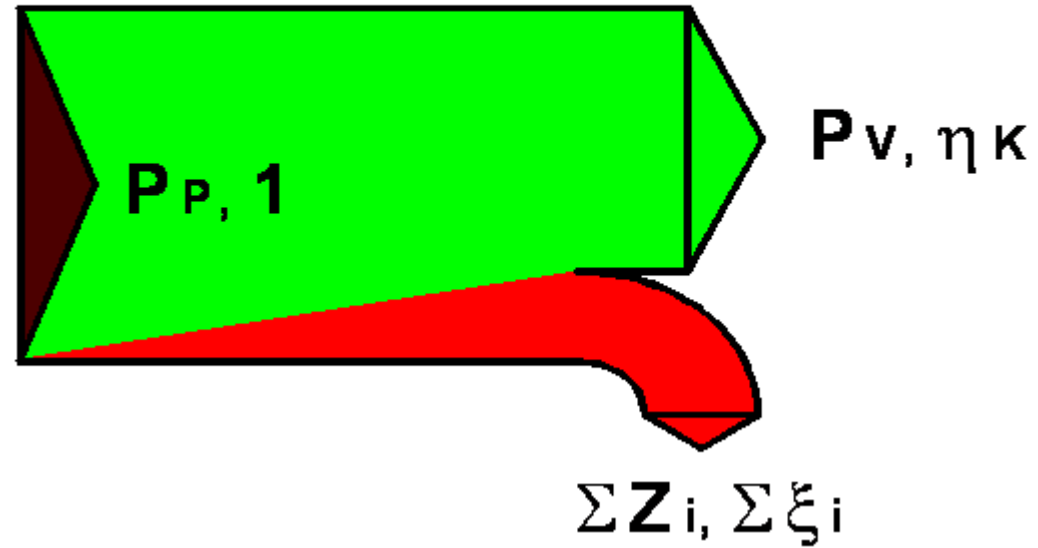
ξ_i ...poměrná ztráta [1]

Místo příkonu se užívá výhřevnost 1 kg paliva a ztráty se taktéž určují v poměru na 1 kg paliva.



Naprostu stejně je tomu u kotlů na tuhá paliva.

Sankeyův diagram



Vždy platí: $P_p > P_v$ tedy $h < 1$

Jednotlivé poměrné ztráty kotle

- **ztráta komínová** (ztráta citelným teplem spalin) – spaliny mají za poslední teplosměnnou plochou teplotu vyšší než je teplota okolí
- **ztráta chemickým nedopalem** – ztráta vzniklá nevyužitím hořlavých složek ve spalinách
- **ztráta mechanickým nedopalem** – ztráta vzniklá nevyužitím hořlavých složek v tuhých zbytcích
- **ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků** – tuhé zbytky opouštějí spalovací zařízení s teplotou vyšší než je teplota okolí
- **ztráta sdílením tepla do okolí** – spalovací zařízení předává svým povrchem část tepla do okolí

Poměrná ztráta mechanickým nedopalem

- nespálený uhlík v tuhých zbytcích.

$$\xi_{MNi} = \frac{C_i}{100 - C_i} \cdot \frac{A^R \cdot X_i \cdot Q_{iC}}{100 \cdot q_1} \quad [\%]$$

C_i ...obsah hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků [%]

X_i ...podíl popela z celkového podílu popela přivedeného palivem, tzv. stupeň zachycení [%]

A^R ...množství popela v palivu [%]

q_1 ...teplo přivedené do kotle spálením 1 kg paliva [kJ/kg]

Q_{iC} ...výhřevnost hořlaviny v tuhém zbytu, uvažuje se výhřevnost C, 32600 kJ.kg⁻¹

Člen $100 - C_i$ ve jmenovateli představuje zvětšení množství popela o nespálenou hořlavinu.

Pro plynná paliva je vždy a pro kapalná je obvykle tato poměrná ztráta rovna nule.

Podle druhu spalovacího zařízení může být ztrát mechanickým nedopalem několik:

ztráta **v úletu** (u všech kotlů – odchází komínem)

-ztráta **ve strusce** nebo škváře (z ohniště)

-ztráta **v popílku** (popílek z odlučovačů)

-ztráta **v propadu** (u roštových kotlů)

-ztráta **v brýdách** (u pr. kotlů s otevřeným mlecím okruhem)

Pro stupeň zachycení platí:

$$\sum X_i = 1$$

Pro různé druhy kotlů se liší i stupeň zachycení jednotlivých druhů tuhých zbytků. U práškových je například největší stupeň zachycení v popílku, u roštových ve škváře.

Poměrná ztráta chemickým nedopalem

$$\xi_{ChN} = \frac{100 - \xi_{MN}}{100} \cdot \frac{V_{SP,SK}^S \cdot \omega_{CO} \cdot Q_{iCO}}{q_1} \quad [\%]$$

$V_{SP,SK}^S$...množství skutečných suchých spalin [m^3_M/kg]

x_{MN} ...poměrná ztráta mechanickým nedopalem [%]

w_{CO} ...koncentrace oxidu uhelnatého ve spalinách [%]

Q_{iCO} ...výhřevnost oxidu uhelnatého, 12610 [kJ/m^3_N]

q_1 ...teplo přivedené do kotle spálením 1 kg paliva [kJ/kg]

Pokud se ve spalinách objevují i jiné hořlavé složky, jako jsou uhlovodíky nebo vodík, je třeba je do výpočtu zahrnout. Podíl těchto látek je však minimální a jejich zanedbání ve výpočtu výsledek ovlivní jen minimálně.

Člen $100 - x_{MN}$ představuje snížení množství spalin vlivem nespálené hořlaviny.

Poměrná ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$\xi_{FTi} = \frac{A^r}{100 - C_i} \cdot \frac{X_i}{q_1} \cdot c_i \cdot t_i \quad [\%]$$

C_i ...obsah hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků [%]

X_i ...podíl popela z celkového podílu popela přivedeného palivem, tzv. stupeň zachycení [%]

A^R ...množství popela v palivu [%]

q_1 ...teplo přivedené do kotle spálením 1 kg paliva [kJ/kg]

c_i ...tepelná kapacita uvažovaných tuhých zbytků [kJ/(kg.K)]

t_i ...teplota uvažovaných tuhých zbytků [°C]

Člen $100 - C_i$ ve jmenovateli představuje zvětšení množství popela o nespálenou hořlavinu.

Tuhými zbytky může být škvára, struska, popílek, úlet či propad.

Poměrná ztráta citelným teplem spalin (komínová)

$$\xi_K = (100 - \xi_{MN}) \cdot \frac{V_{SP,SK}^V \cdot c_{pSP} \cdot (t_{sp} - t_0)}{q_1} \quad [\%]$$

x_{MN} ...poměrná ztráta mechanickým nedopalem [%]

$V_{SP,SK}^V$...množství skutečných vlhkých spalin [m^3_M/kg]

c_{pSP} ...tepelná kapacita spalin [$kJ/(m^3_N \cdot K)$]

t_{sp} t_0 ...teplota spalin za poslední teplosměnnou plochou a teplota okolí [$^{\circ}C$]

q_1 ...teplo přivedené do kotle spálením 1 kg paliva [kJ/kg]

Teplo přivedené do kotle spálením 1 kg paliva je:

$$q_1 = Q_i^r + \Delta i_p + x \cdot V_{VZ} \Delta i_{VZ} \quad [kJ / kg]$$

Δi_p Δi_{VZ} ...přírůstek entalpie paliva a vzduchu po ohřátí cizím zdrojem [kJ/kg , kJ/m^3_M]

$x \cdot V_{VZ}$...podíl vzduchu ohřátého cizím zdrojem [m^3_M/kg]

Q_i^r ...výhřevnost paliva [kJ/kg]

NEJČASTĚJI

$$q_1 = Q_i^r$$

Poměrná ztráta sdílením tepla do okolí

U spalovacích zařízení malých a středních výkonů se určí z povrchových teplot zařízení, velikosti povrchu zařízení a součinitele přestupu tepla.

U větších zařízení se hodnota odečítá z nomogramu nebo se určuje dle empirického vzorce.

$$\xi_{Ojm} = k \cdot P_{jm}^{-0,35} \quad [\%] \qquad \xi_O = \xi_{Ojm} \cdot \frac{P_{jm}}{P_{sk}} \quad [\%]$$

ξ_{Ojm} ...poměrná ztráta sdílením tepla do okolí při jmenovitém výkonu [%]

P_{jm} ...jmenovitý výkon [MW]

P_{sk} ...skutečný výkon [MW]

k ...konstanta (3,5 lignit a HU, 2,5 – ČU, 1,5 – olej a plyn)

Účinnost nepřímou metodou je tedy:

$$\eta = 100 - \sum \xi_i \quad [\%]$$

$$\eta = 100 - \xi_{MN} - \xi_{ChN} - \xi_K - \xi_{FT} - \xi_O \quad [\%]$$

Účinnost spalovacího zařízení se tedy vypočte jako 100 minus suma všech poměrných ztrát.

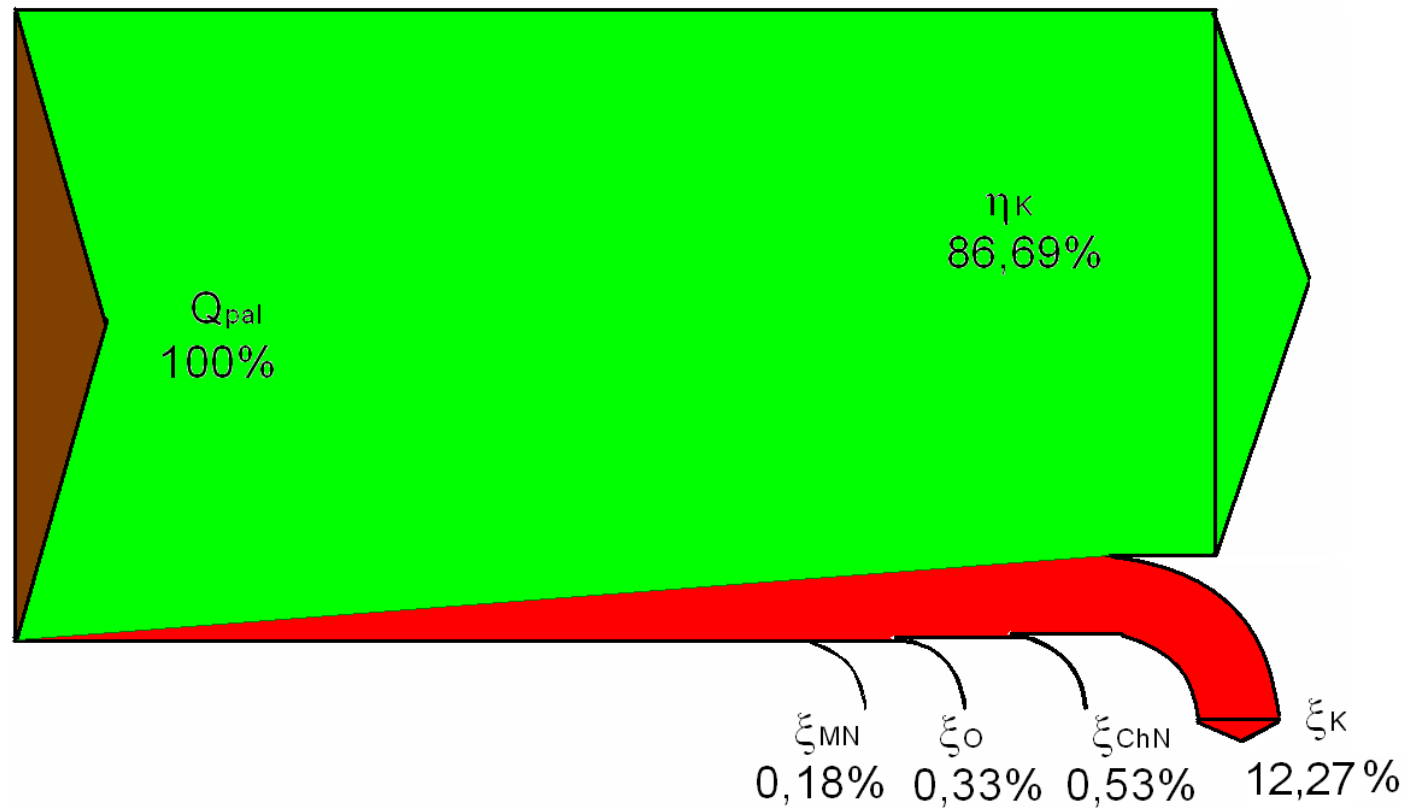
Jednotlivé poměrné ztráty samozřejmě nejsou stejné, některé mají významný vliv na účinnost, jiné zanedbatelný.

Naprosto dominantní ztrátou všech spalovacích zařízení je ztráta citelným teplem spalin (komínová).

Pokud chceme zvýšit účinnost kotle, má pro toto komínová ztráta největší potenciál.

Sankeyův diagram skutečného kotle

- automatický kotel na dřevní pelety o výkonu 35 kW



Zvyšování účinnosti

Naprosto dominantní ztrátou všech spalovacích zařízení je tedy komínová ztráta, kterou ovlivňuje:

-množství spalin

$$\xi_K = (100 - \xi_{MN}) \cdot \frac{V_{SP,SK}^V \cdot c_{p,SP} \cdot (t_{sp} - t_0)}{q_1} \quad [\%]$$

Snížím množství spalin (snížením přebytku vzduchu) \rightarrow roste x_{MN} \rightarrow omezený prostor pro zásah

-tepelná kapacita spalin

Je dána složením spali, které je dáno palivem. Tepelnou kapacitu ovlivňuje vodní pára \rightarrow pokud možno suché palivo

-a teplota výstupních spalin

Spaliny mohou být vychlazeny na takovou teplotu, aby v žádném případě nedocházelo ke kondenzaci vodní páry, a to nikde ve spalinovém traktu za kotlem. Rosný bod je ovlivněn složením spalin a přebytkem vzduchu.

Teplota rosného bodu

uhlí – přibližně 120°C

ZP – přibližně 40°C, viz. tabulka

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

Poznámka ke kondenzačním kotlům

-klasicky počítaná účinnost je větší než 100%

-způsobeno využitím kondenzačního tepla vodní páry

-kondenzační režim nastává, pokud podchladíme spaliny pod rosný bod, a to pracovním médiem → nízkoteplotní systémy vytápění

Dva možné výpočty účinnosti:

$$\eta = \frac{P_V - P_K}{P_P} \quad [\%] \quad P_K = l_V \cdot \dot{m}_K \quad [kW]$$

P_K ...kondenzační výkon [kW]
 \dot{m}_K ...množství kondenzátu [kg/s]
 l_V ...kondenzační teplo vody [kJ/kg]

$$\eta = \frac{P_V}{P_{Pn}} \quad [\%] \quad P_{Pn} = \dot{m}_{pal} \cdot Q_n^r \quad [kW]$$

P_{Pn} ...příkon ze spalného tepla [kW]
 Q_n^r ...spalné teplo [kJ/kg]

Poznámka k lokálním topeništím

- nemají ztrátu sdílením do okolí
- pokud je spalováno dřevo x_{MN} se blíží nule
- ztrátu tvoří pouze komínová ztráta a ztráta plynným nedopalem

$$\eta = 100 - \xi_{MN} - \xi_K \quad [\%]$$

Poznámka k účinnosti využití PEZ

Využití ložiska	Dopravy	Elektrárny	Rozvodu	Konečného využití
30-50 % ropa, 50 % ČU až 80 % HU, (50%)	$\eta_D > 90 \%$ (95 %)	$\eta_{EL} = 35 \%$	$\eta_R = 90 \%$	$\eta_R = 0-100 \%$ (20 %)
$\eta_{VPEZ} = \eta_{VL}$	$\cdot \eta_D$	$\cdot \eta_{EL}$	$\cdot \eta_R$	$\cdot \eta_{KV} \quad [\%]$

$$\eta_{VPEZ} = 3\%$$

Důležitým technicko ekonomickým měřítkem je energetická náročnost ekonomiky.

$$EN = \frac{PEZ}{HDP} [J \cdot K\check{c}^{-1}]$$

Děkuji za pozornost