



# *Účinnost spalovacích zařízení*



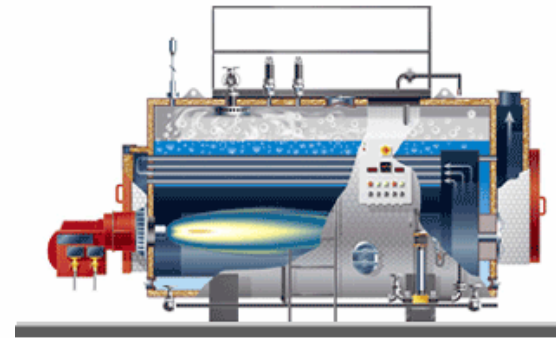
**Účinnost** je ukazatelem míry dokonalosti transformace energie v zařízení. Jedná se o technicko-ekonomický parametr. Vyjadřuje poměr mezi energií využitou a energií přivedenou do zařízení, tedy mezi výkonem a příkonem.

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

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).



Účinnost spalovacích zařízení



## **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)]  
 $\Delta t$ ...rozdíl teploty vstupní a výstupní vody [K]

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

$m_p$ ...množství páry [kg/s]  
 $\Delta i$ ...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

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

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

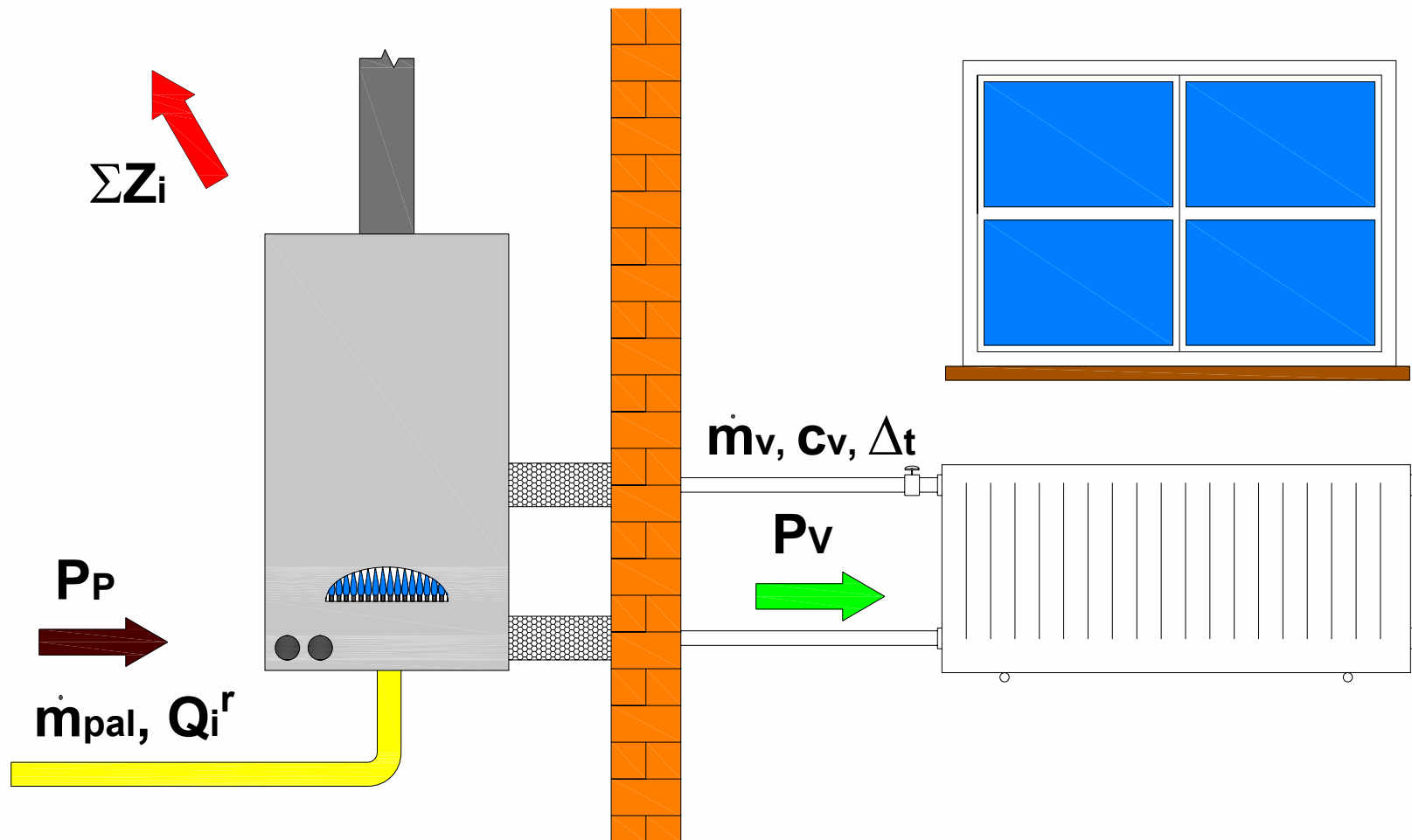
$$\eta = 1 - \sum_1^i \xi_i \quad [1]$$

$Z_i$ ...ztráta kotle [kW]

$\xi_i$ ...poměrná ztráta [1]

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

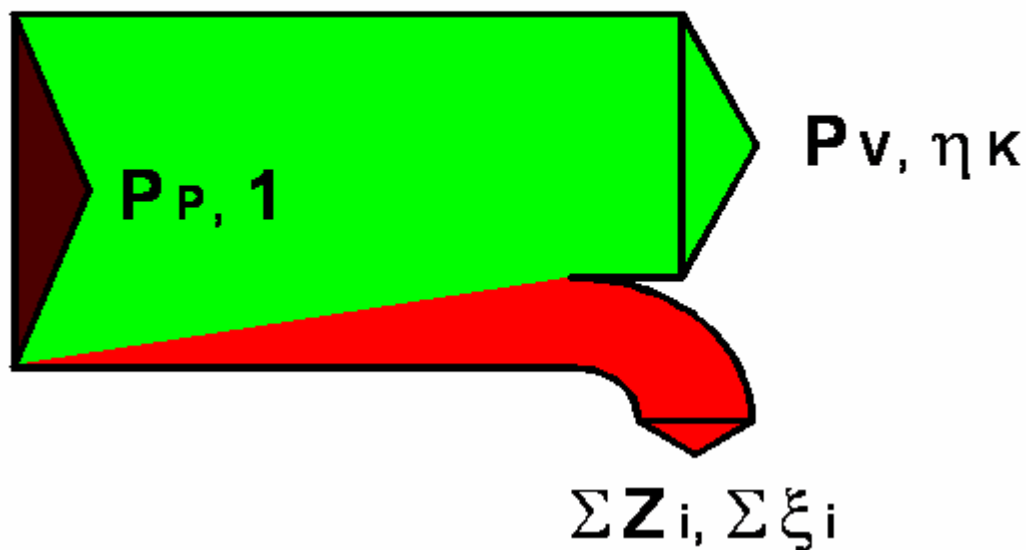




**Naprosto stejně je tomu u kotlů na tuhá paliva.**



## Sankeyův diagram



**Vždy platí:  $P_p > P_v$  tedy  $\eta < 1$**



## 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<sup>-1</sup>

**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 [ $m^3_M/kg$ ]

$\xi_{MN}$ ...poměrná ztráta mechanickým nedopalem [%]

$\omega_{CO}$ ...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  $100 - \xi_{MN}$  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)

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

$\xi_{MN}$ ...poměrná ztráta mechanickým nedopalem [%]

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

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

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

$q_1$ ...teplo přivedené do kotle spálením 1 kg paliva [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]

**Teplo přivedené do kotle spálením 1 kg paliva je:**

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

$\Delta i_p, \Delta i_{VZ}$  ...přírůstek entalpie paliva a vzduchu po ohřátí cizím zdrojem [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ,  $\text{kJ}/\text{m}^3_M$ ]

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

$Q_i^r$ ...výhřevnost paliva [ $\text{kJ}/\text{kg}$ ]

**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.

$$\xi_{0jm} = k \cdot P_{jm}^{-0,35} \quad [ \% ] \qquad \xi_0 = \xi_{0jm} \cdot \frac{P_{jm}}{P_{sk}} \quad [ \% ]$$

$\xi_{0jm}$ ...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 mínus suma všech poměrných ztrát.

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

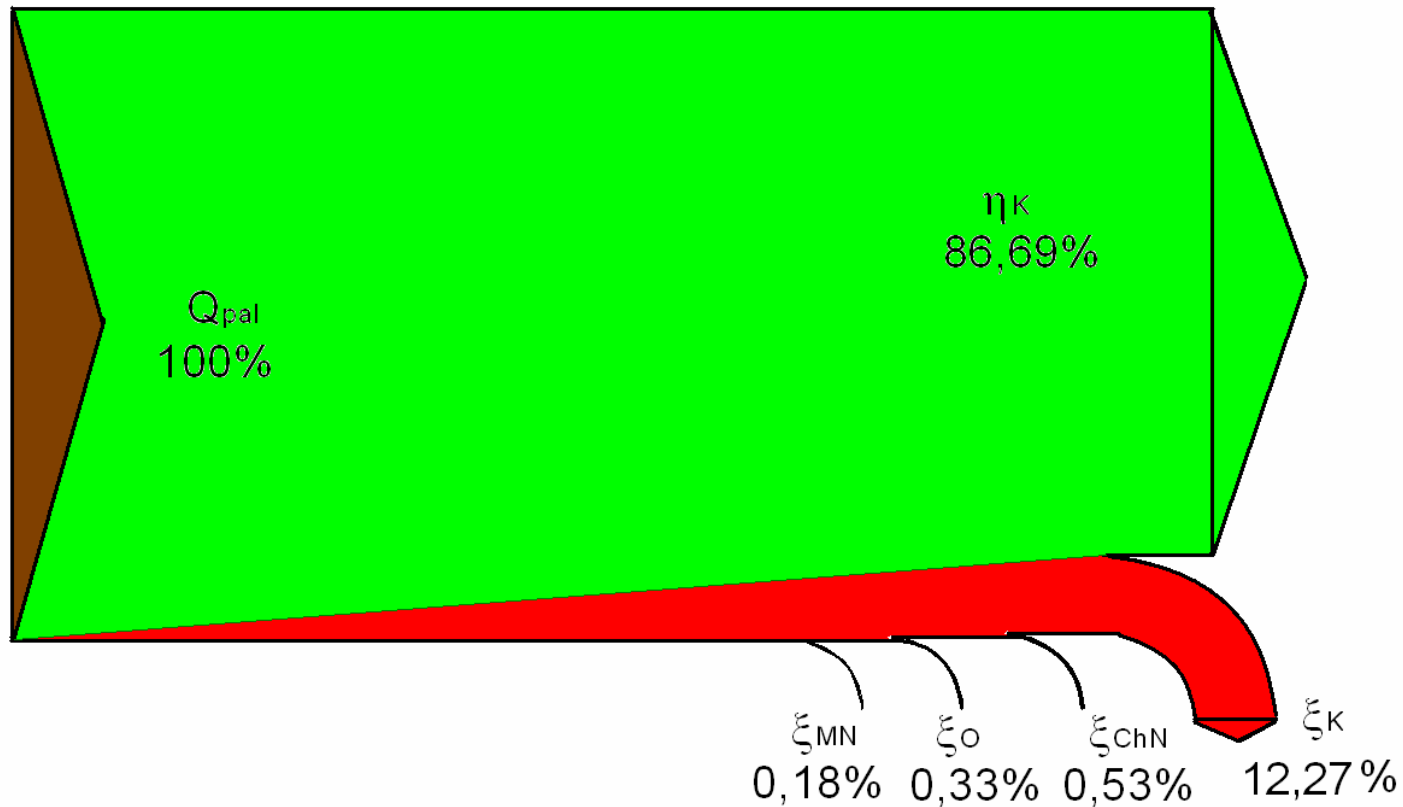
**Naprosto dominantní ztrátou všech spalovacích zařízení je ztráta citelným teplem spalin (komínová).**

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



Účinnost spalovacích zařízení



## Zvyšování účinnosti

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

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

### -množství spalin

Snížím množství spalin (snížením přebytku vzduchu) → roste  $\xi_{MN}$   
→ omezený prostor pro zásah

### -tepelná kapacita spalin

Je dána složením spali, které je dáno palivem. Tepelnou kapacitu ovlivňuje vodní pára → 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]  
 $m_k$ ...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

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

-nemají ztrátu sdílením do okolí

-pokud je spalováno dřevo  $\xi_{MN}$  se blíží nule

-ztrátu tvoří pouze komínová ztráta a ztráta plyným nedopalem

## 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.

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



**Děkuji za pozornost.**