

# Elektrárny B1M15ENY

## přednáška č. 7

Okruh pára - voda:  
Turbíny  
Kotle



Ing. Jan Špetlík, Ph.D.  
ČVUT FEL Katedra elektroenergetiky  
E-mail: [spetlij@fel.cvut.cz](mailto:spetlij@fel.cvut.cz)

První případ bez přehřívání:

$$p_2 = 12 \text{ MPa}$$

$$T_2 = 530 \text{ °C}$$



$$i_2 = 3429 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$s_2 = 6,591 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$

Známe s do dalšího děje:

$$s_5 = 6,591 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$

$$p_5 = 3,5 \text{ kPa}$$



$$T_5 = 27 \text{ °C}$$

$$i_5 = 1971 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

Známe T do dalšího děje:

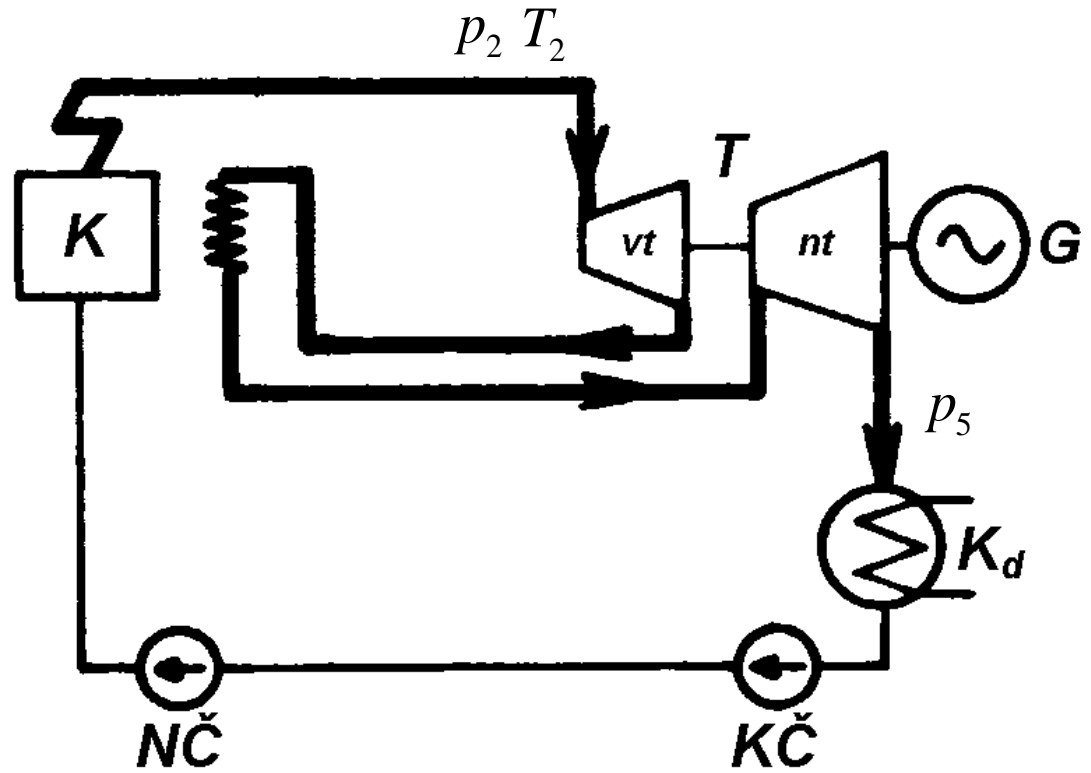
$$T_1 = 27 \text{ °C}$$

$$x = 0 \quad (\text{kondenzace})$$



$$i_1 = 111,8 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$s_1 = 0,3906 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$



Celková účinnost bude tedy:

$$\eta = \frac{i_2 - i_5 - (p_2 - p_1) \cdot v}{i_2 - i_1 - (p_2 - p_1) \cdot v} = \frac{3429 - 1971 - 1,2 \cdot 10^4 \cdot 0,001}{3429 - 111,8 - 1,2 \cdot 10^4 \cdot 0,001} = \frac{1446}{3305} = 43,7\%$$

Druhý případ s přehříváním:

$$p_3 = 2,3 \text{ MPa}$$

$$s_3 = 6,591 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$

⇓

$$i_3 = 2959 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$T_3 = 277 \text{ °C}$$

Známe  $p, T$  do dalšího děje:

$$p_4 = 2,3 \text{ MPa}$$

$$T_4 = 480 \text{ °C}$$

⇓

$$i_4 = 3420 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$s_4 = 7,308 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$

Známe  $s$  do dalšího děje:

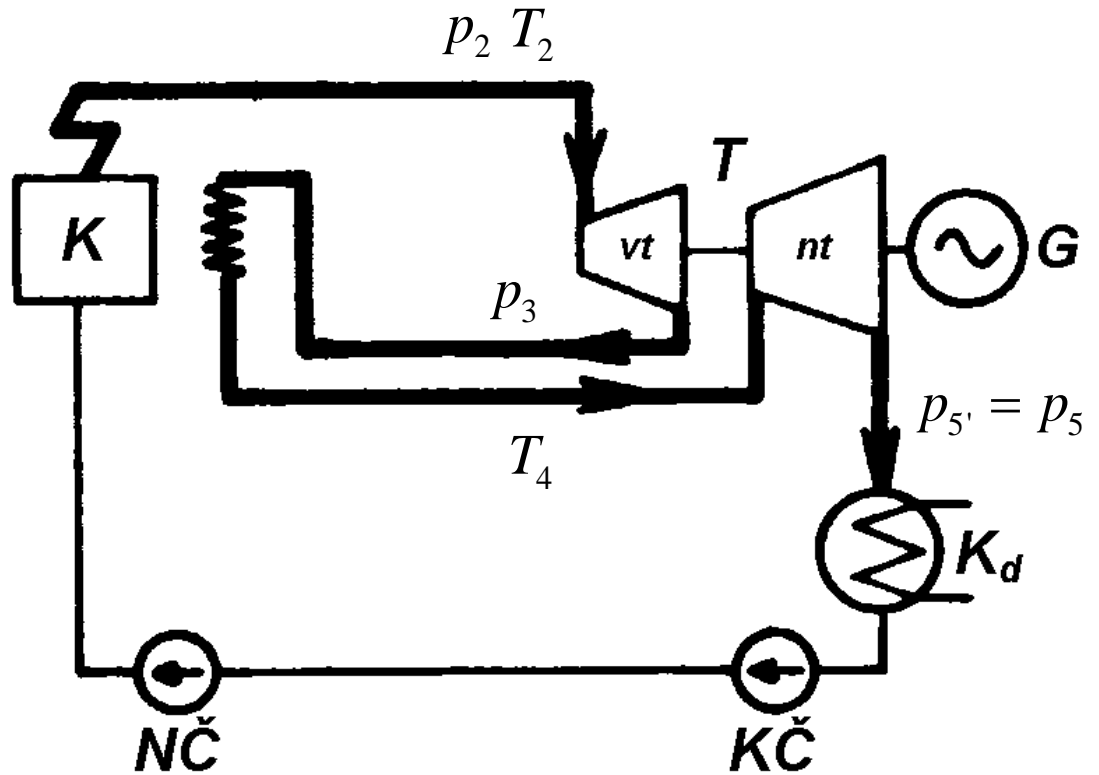
$$s_{5'} = 7,308 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$$

$$p_{5'} = 3,5 \text{ kPa}$$

⇓

$$i_{5'} = 2186 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

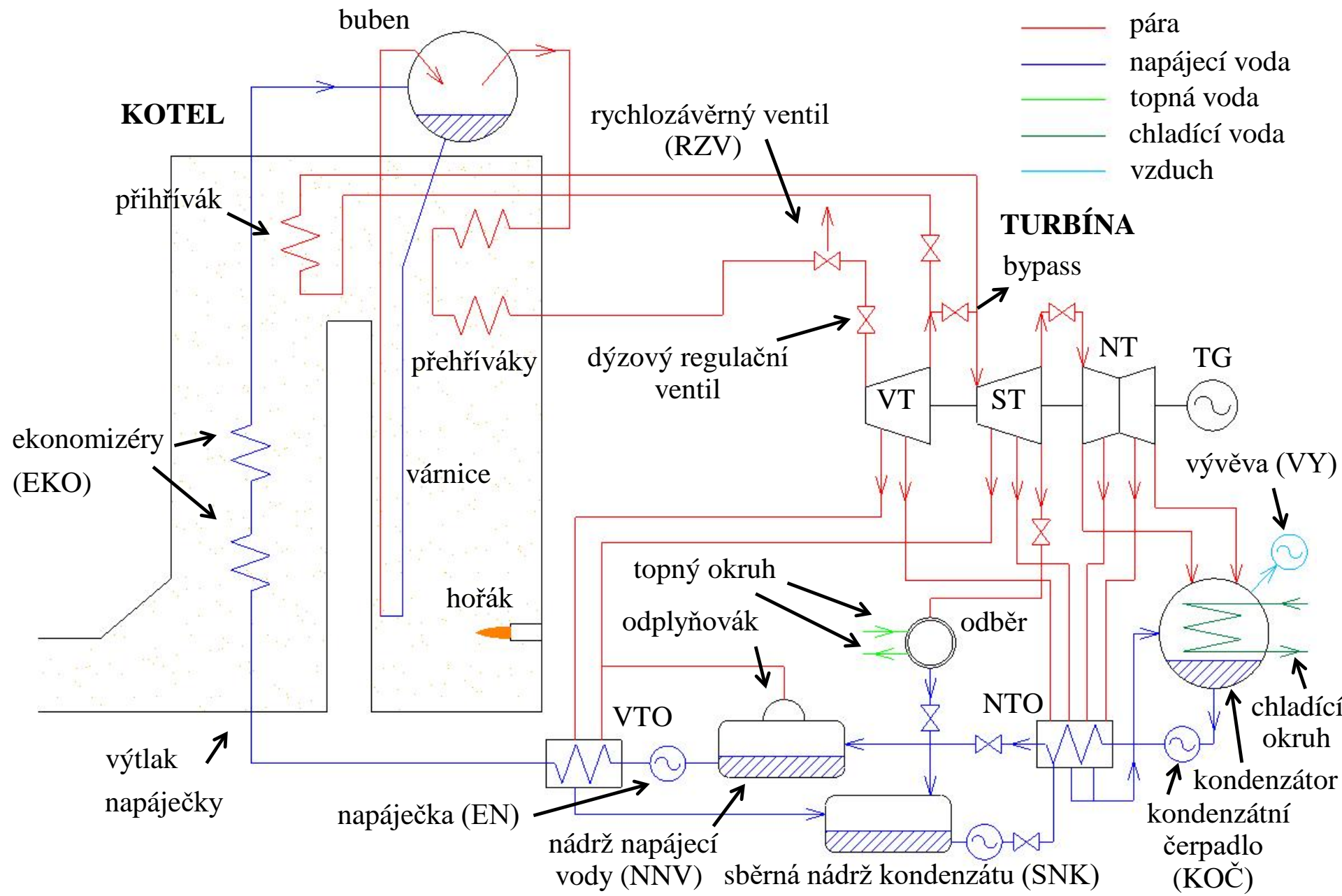
$$T_{5'} = 27 \text{ °C}$$



Celková účinnost bude tedy:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{i_2 - i_{5'} + i_4 - i_3 - (p_2 - p_1) \cdot v}{i_2 - i_1 + i_4 - i_3 - (p_2 - p_1) \cdot v} = \\ &= \frac{3429 - 2186 + 3420 - 2959 - 12}{3429 - 111,8 + 3420 - 2959 - 12} = \\ &= \frac{1701}{3766} = 45,2\% \end{aligned}$$

# Okruh páry a napájecí vody



# Turbíny – základní klasifikace

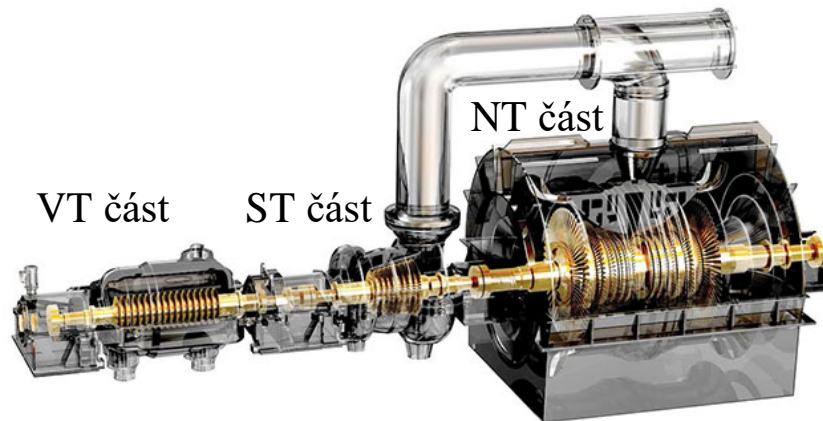
**Turbína** = rotační lopatkový stroj (tepelný motor), kde pára (plyn) protéká mezilopatkovými kanály, expanduje a předává svou energii rotoru. Při tom se mění entalpický spád páry (plynu) v kinetickou energii, která se odvádí jako točivý moment na hřídeli turbíny.

## Podle pracovní látky:

**Plynové** (plynná nebo kapalná paliva, vst. teplota 600-1400°C, výst. teplota 450-600°C)

**Parní** (přehřátá pára, vst. teplota 400-650°C, výst. teplota 28-42°C)

**Parní na mokrou páru** (v JE, vst. teplota 300°C, výst. teplota dtto)



Příklad vícetělesové parní turbíny



Příklad plynové turbíny

## Podle tlaku výstupní páry:

**Protitlaké turbíny** (výst. tlak 0,11-0,6MPa)

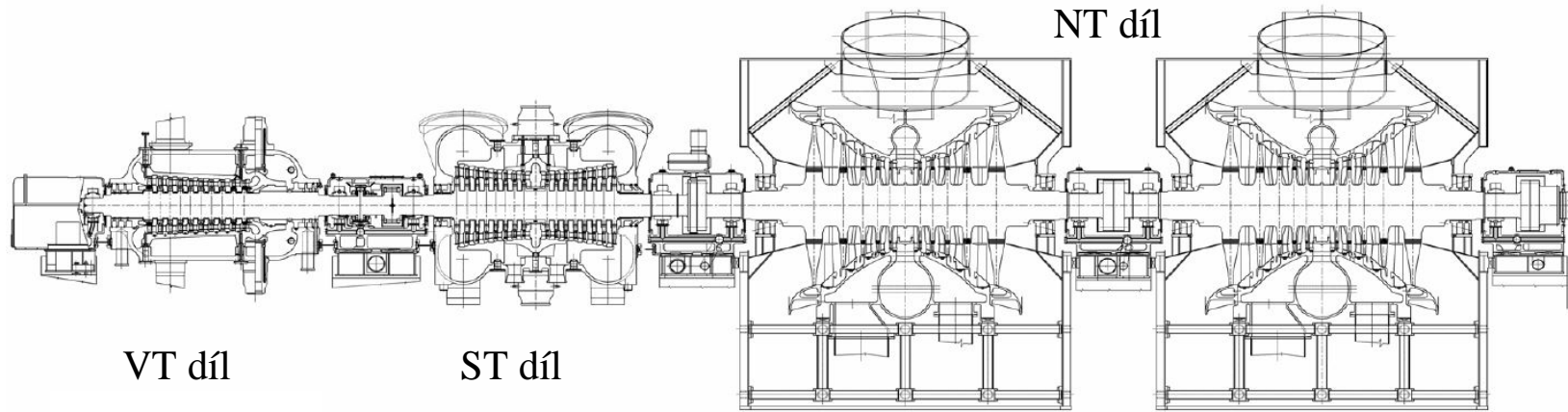
**Kondenzační turbíny** (výst. tlak 0,11-0,6MPa)

# Turbíny – základní klasifikace

## Podle počtu těles:

**Jednotělesové** (pro menší výkony)

**Vícetělesové** (VT, ST, NT díly)



## Stupeň turbíny:

= dvojice rozváděcí + oběžné kolo

**Rozváděcí kola** jsou tvořena pevnou rozváděcí lopatkovou mříží (součást statoru) = soustava paralelních trysek, které s minimálními ztrátami přeměňují tlakovou energii na energii kinetickou

**Oběžná kola** jsou tvořena soustavou lopatek (součást rotoru), kde se kinetická energie páry přeměňuje na rotační energii turbínového tělesa

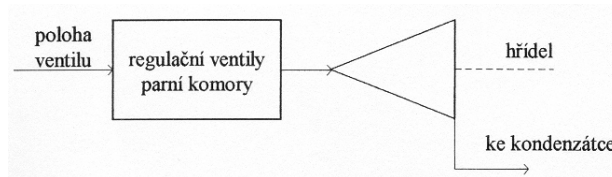




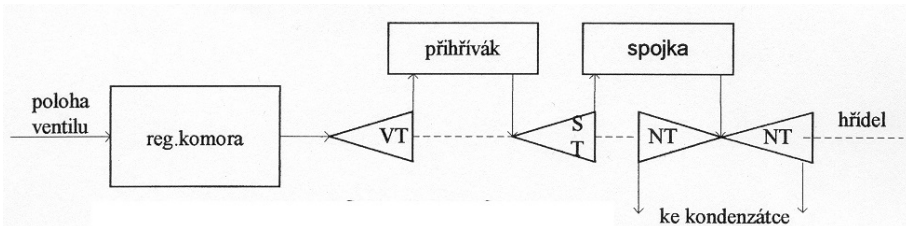
# Turbíny – základní klasifikace

Příklady provedení:

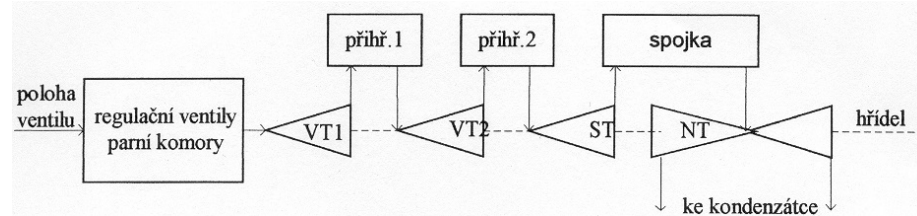
a) bez mezipřihřátí



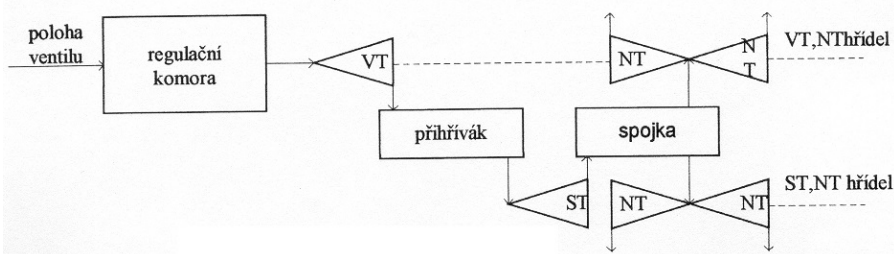
b) jednoduchý hřídel, jednoduchý přehřívák



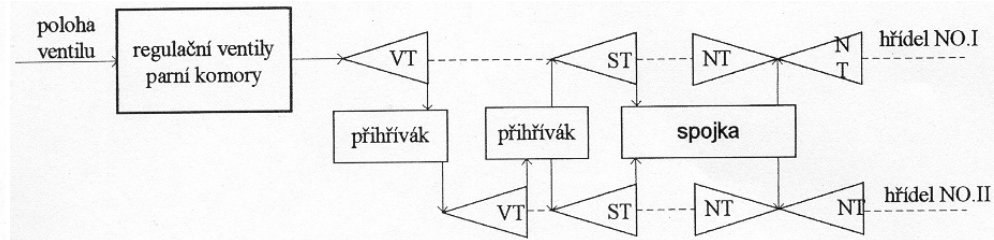
c) jednoduchý hřídel, dvojitý přehřívák



d) dvojitý hřídel, jednoduchý přehřívák



e) dvojitý hřídel, dvojitý přehřívák



# Turbíny – základní klasifikace

## Podle odběrů páry:

**Turbína s neregulovanými odběry** (pro regeneraci, ucpávková pára atd.)

**Turbína s regulovanými odběry** (kromě výše uvedených odběrů ještě navíc jeden nebo více regulovaných výfuků pro teplárenské odběry)

## Podle principu přeměny energie:

**Rovnotlaké (impulsní)** entalpický spád stupně se celý přemění na rychlost v rozváděcích lopatkách, tlak páry je na vstupu i výstupu oběžného kola stejný (*Lavalova t.*)

**Přetlakové (reakční)** část entalpického spádu se přemění na rychlost i v oběžných kolech (*Parsonova t.*)

Pozn. Z konstrukčních důvodů a dosažení optimální účinnosti se volí pro VT části rovnotlaké lopatkování a pro NT části přetlakové lopatkování

Zvláštním typem rovnotlakého lopatkování pro vysoké entalipické spády je tzv. *Curtisovo kolo*



# Princip přeměny energie v turbíně

## Proudění za rozváděcí tryskou:

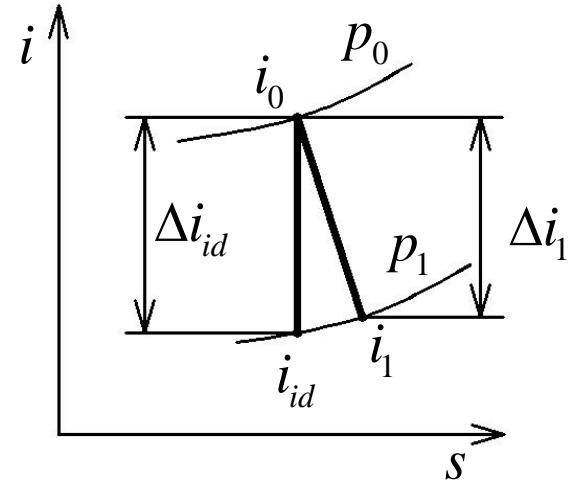
Obecně platí:

$$\delta q = di + \delta a + d\left(\frac{1}{2}c^2\right)$$

Pro adiabatickou expanzi:

$$0 = di + d\left(\frac{1}{2}c^2\right) \quad \text{a} \quad c_1 = \sqrt{c_0^2 + 2 \cdot (i_0 - i_1)}$$

Ve skutečnosti není děj adiabatický, entropie stoupá např. okrajovou ztrátou, třením v rozváděcích a oběžných kolech, změnou směru proudění apod.



# Princip přeměny energie v turbíně

Výtoková rychlost pro  $c_0=0$ , dosažení ze stavové rovnice:

$$c_1 = \sqrt{2 \cdot (i_0 - i_1)} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_0 - T_1)} = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \cdot r \cdot T_0 \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_0}\right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \cdot p_0 \cdot v_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}$$

Saint Vénantova-Wantzelova rovnice

Max. rychlost proudění id. plynu je tedy do vakua  $p_1=0$ :

$$c_{1\max} = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \cdot p_0 \cdot v_0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \cdot r \cdot T_0}$$

Tlakový poměr:  $\beta = \frac{p_1}{p_0}$

Zavedeme-li hustotu hmotnostního toku  $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$ :

$$\frac{\dot{m}}{A} = \rho \cdot c_1 = \frac{1}{v_0} \cdot \beta^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \cdot p_0 \cdot v_0 \cdot \left[1 - \beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}$$

# Princip přeměny energie v turbíně

Maximum hmotnostního toku nastává pro hodnotu:

$$\beta_k = \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = \frac{p_k}{p_0} \rightarrow \text{kritický tlak}$$

Při dalším snižování výstupního tlaku již hustota hmotnostního toku neroste.

Ostatní kritické parametry:

$$T_k = T_0 \cdot \frac{2}{\kappa + 1} \quad c_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa + 1} \cdot p_0 \cdot v_0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa + 1} \cdot r \cdot T_0}$$

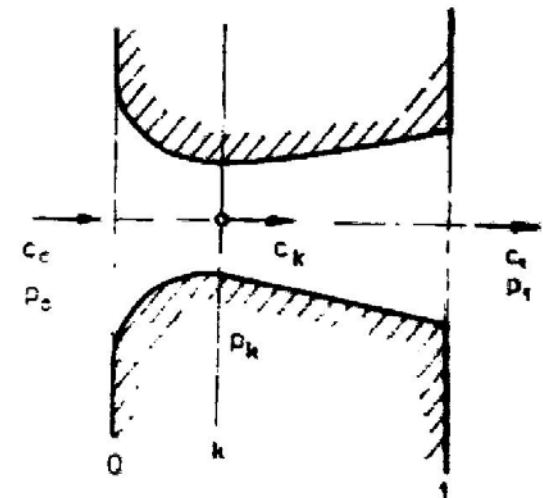
Rychlost zvuku v id. plynu:

$$a = \sqrt{\left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s} = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T} \quad \text{a tedy } a|_{T=T_k} = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T_k} = \sqrt{\kappa \cdot p_0 \cdot v_0 \cdot \beta_k^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}} = c_k$$

Ve zužující se trysce po dosažení kritických parametrů k dalšímu zvyšování rychlosti už nedochází – dojde k aerodynamickému zahlcení. Část tlakové energie se ztrácí vířením => pro další navyšování rychlosti je nutné použít *Lavalovu trysku*.

Machovo číslo:  $Ma = \frac{c}{a}$

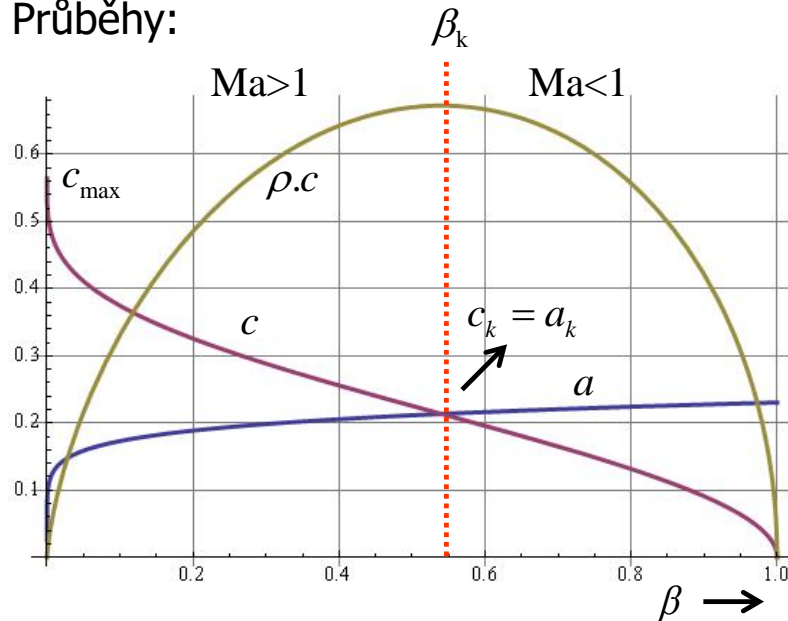
$\rightarrow$   $Ma > 1$  nadzvukové proudění  
 $\leftarrow$   $Ma < 1$  podzvukové proudění



Lavalova tryska

# Princip přeměny energie v turbíně

Průběhy:



Hodnoty  $\beta_k$ :

$\beta_k$	$\kappa$	Plyn
0,487	1,667	ideální jednoatomový
0,528	1,4	ideální dvouatomový
0,540	1,333	ideální víceatomový
0,528	1,4	vzduch
0,546	1,3	přehřátá pára
0,577	1,135	sytá pára
dle $x$	$1,035+0,1 \cdot x$	mokrá pára

Ve skutečnosti nastávají při průtoku tryskou ztráty třením a vířením, takže výstupní rychlost je menší než adiabatická, což se vyjadřuje rychlostním součinitelem:

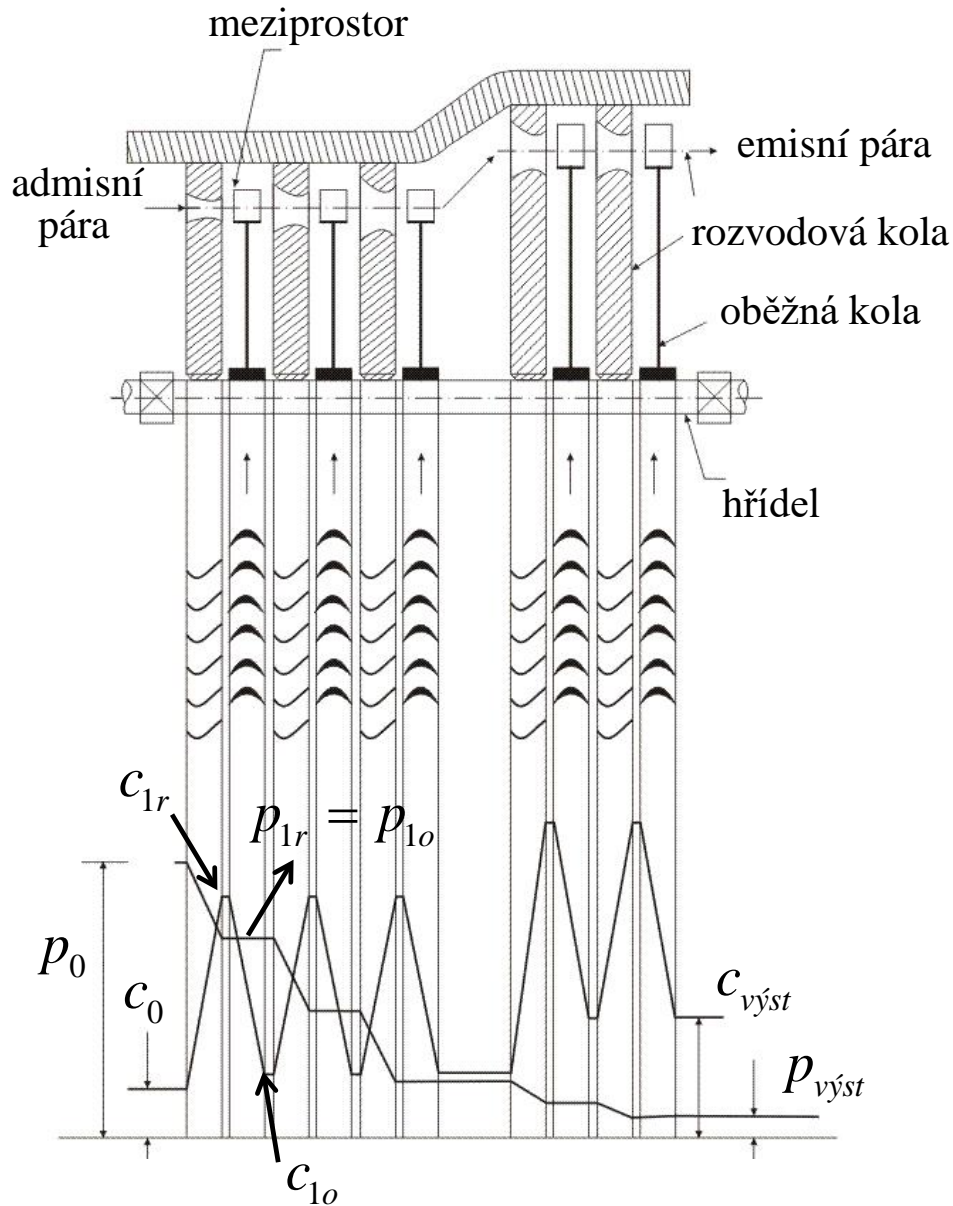
$$\varphi = \frac{c_1}{c_{id}}$$

a účinností trysky:

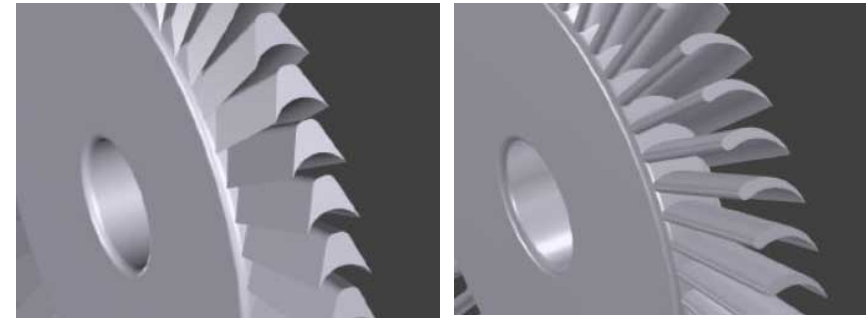
$$\eta = \varphi^2 = \frac{i_0 - i_1}{i_0 - i_{id}}$$

# Princip přeměny energie v turbíně

Rovnotlaká turbína:



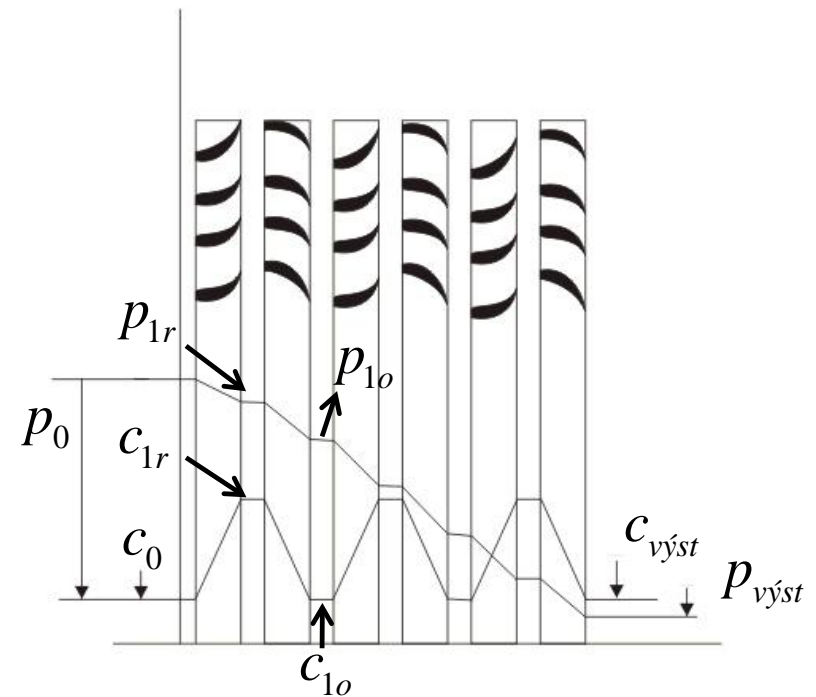
Oběžná kola:



rovnotlaké lopatkování

přetlakové lopatkování

Reakční turbína:



# Princip přeměny energie v turbíně

## Stupeň reakce:

U reakčních turbín definujeme *stupeň reakce*:

$$R = \frac{i_0 - i_{1r}}{i_0 - i_1} = \frac{\text{entalpický spád v rotoru}}{\text{celkový entalpický spád stupně}}$$

## Kroutící moment a výkon stupně:

Pracovní látka vystupující z trysek rozváděcích lopatek s rychlostí  $c_{1r}$  vstupuje do lopatkové mříže oběžného kola, kde se přeměňuje její kinetická energie na kroutící moment. V oběžných lopatkách vzniká obvodová síla:

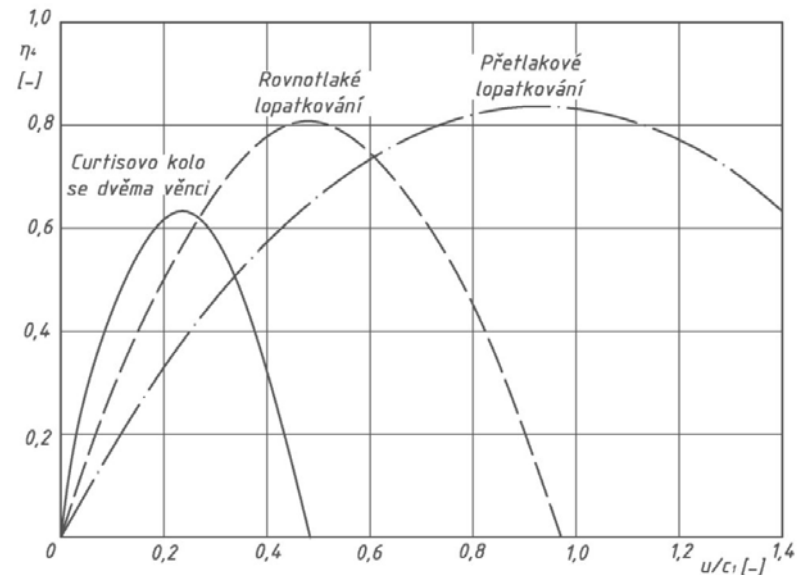
$$F_o = \dot{m} \cdot (c_{1r} - c_{1o}) \quad \text{a kroutící moment} \quad M_o = F_o \cdot r = \dot{m} \cdot (c_{1r} - c_{1o}) \cdot r$$

takže výkon stupně je

$$P_o = M_o \cdot \omega = \dot{m} \cdot (c_{1r} \cdot u_{o1} - c_{1o} \cdot u_{o2})$$

kde  $u_{o1}, u_{o2}$  jsou příslušné obvodové rychlosti

Na poměru  $u/c$  závisí celková účinnost stupně



# Olej a systém ucpávkové páry turbíny

## Olej:

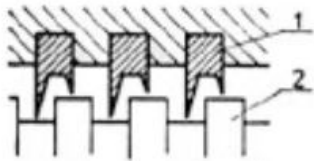
Dvě funkce:

- **Mazací olej** slouží k mazání ložisek turbosoustrojí
- **Rozvodový (regulační) olej** pracovní olej pro regulaci turbíny – řídicí veličinou je tlak oleje
  - Primární olej - otáčky turbíny
  - Sekundární olej - úhel otevření dýzových ventilů
  - Rychlozávěrný olej
  - Ovládací olej - regulace prvků turbíny

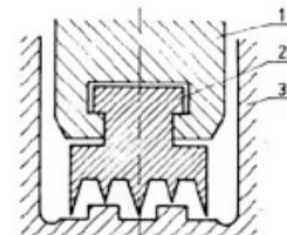
## Ucpávková pára:

- Do podtlakové části turbíny vniká netěsnostmi vzduch a z přetlakové části uniká pára
- Pro zamezení tohoto efektu je každý díl turbínové části soustrojí vybaven labyrintovými ucpávkami napájenými parou o ST parametrech (tj. ~2 MPa)
- Ucpávková pára zahlcuje (nebo naopak je odsávána) ucpávku a tím zatěsňuje prostor mezi rotorem a statorem

Příklady labyrintových ucpávek:



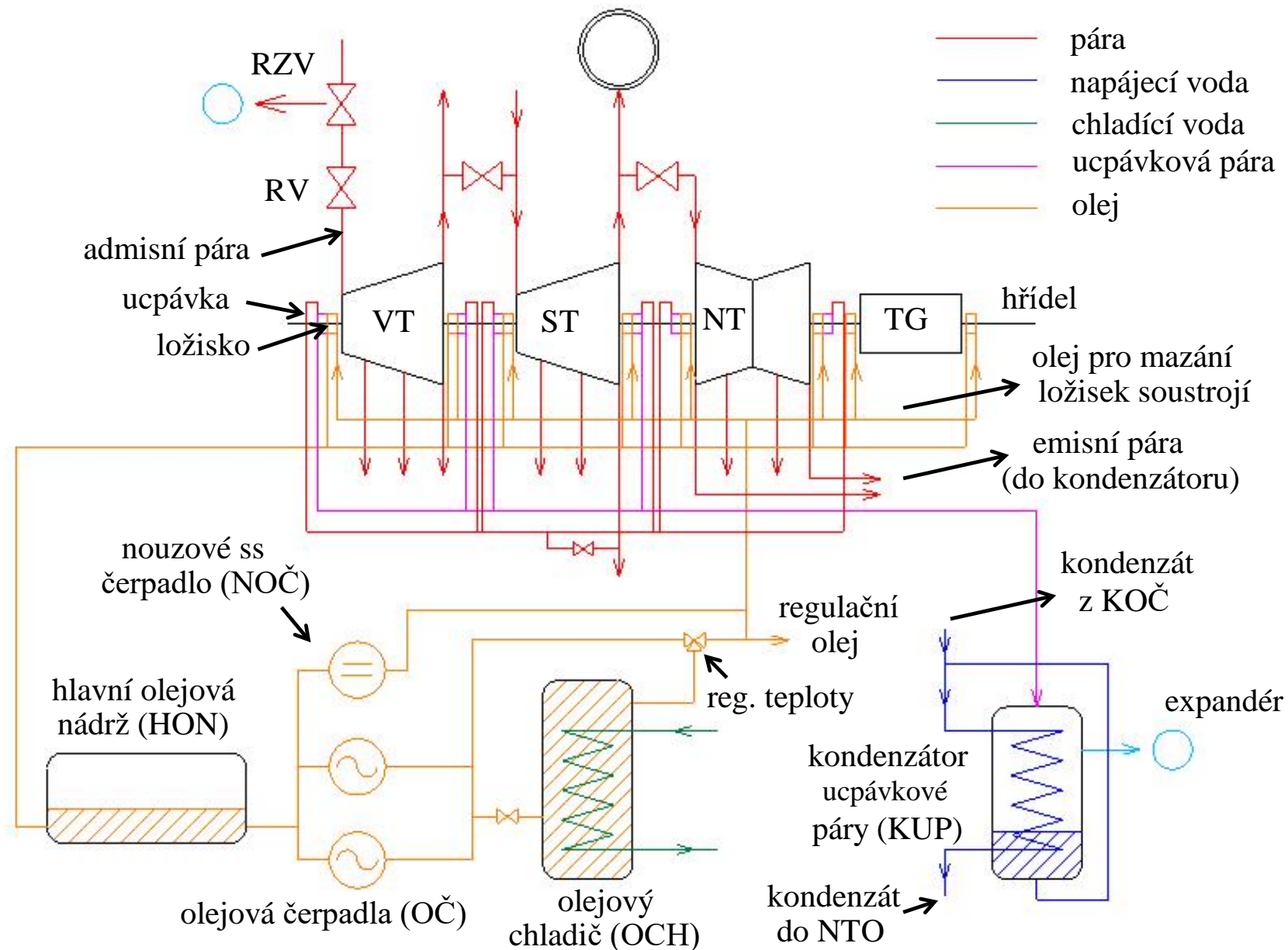
odděluje vnější a vnitřní část  
1 - břity, 2 - hřídel rotoru



odděluje 2 prostory s rozdílným tlakem uvnitř turbíny  
1 - mezistěna, 2 - ucpávkový kroužek, 3 - hřídel rotoru



# Olej a systém ucpávkové páry turbíny



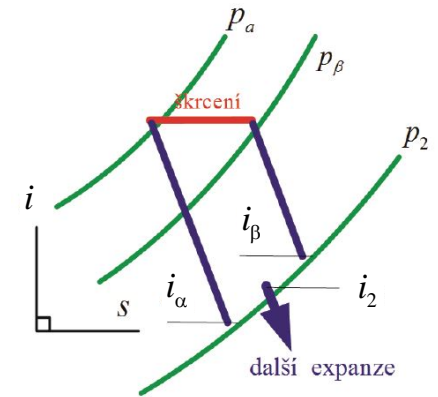
# Prostředky regulace výkonu turbíny

## Rychlozávěrný ventil:

- Uzavírá přívod páry do turbíny, bezpečnostní funkce
- Pára je odvedena mimo strojovnu, expanze do atmosféry

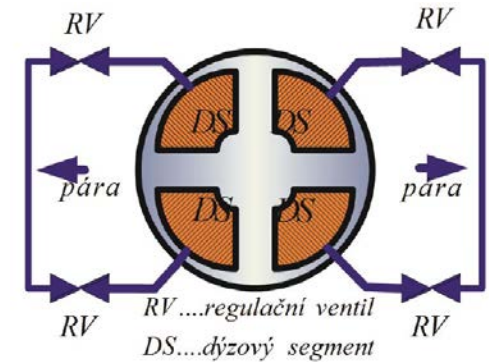
## Regulace škrcením (kvalitativní):

- Současné otevření všech ventilů ovládajících přívod páry do turbíny
- Zmenšení průřezu, zvýšení hydraulického odporu =>  $\Delta p = p_\alpha - p_\beta$
- Izoentalpický děj => málo se mění teplota, ztrátová regulace



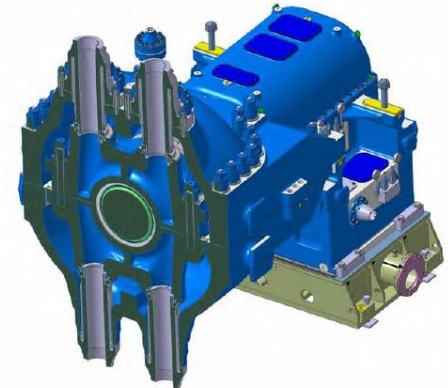
## Regulace skupinová (kvantitativní):

- Regulační ventily se otvírají postupně se změnou zatížení
- Nedochozí k tlakové ztrátě (částečný ostřík)
- Izobarický děj => teplota roste
- Celkově se kombinuje s regulací škrcením

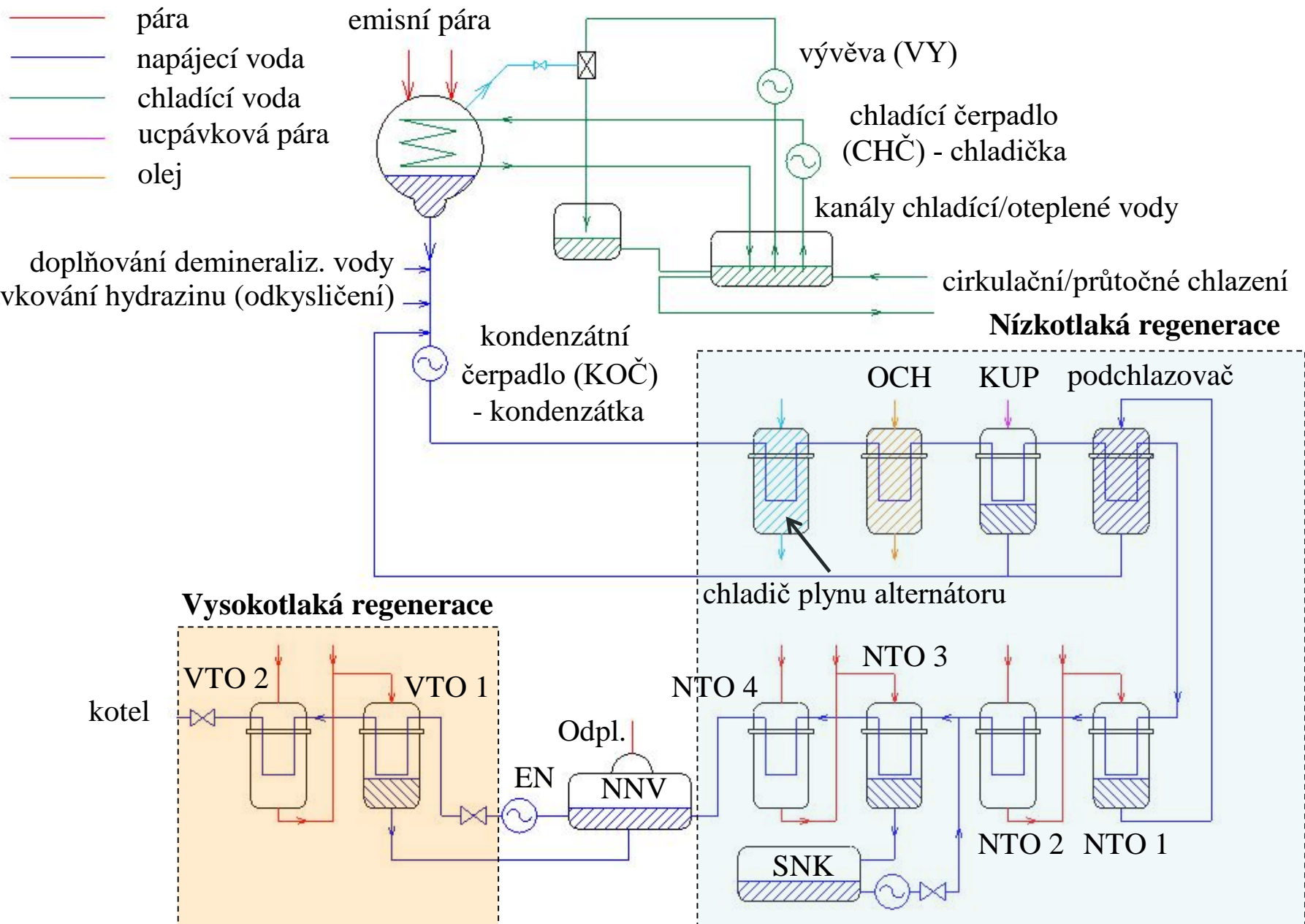


## Regulace klouzavým tlakem:

- Tlak páry se mění regulací výkonu kotle
- Teplota na vstupu se příliš nemění, dobrá účinnost
- Pomalejší regulace (časová konstanta kotle)



# Kondenzace a regenerace NTO, VTO



# Kotle – základní klasifikace

## Podle druhu paliva:

- **Tuhé** (uhlí, koks, biomasa, odpady)
- **Plynné** (zemní plyn)
- **Kapalné** (LTO)

## Podle tlaku výstupní páry:

- **Nízkotlaké** (výst. tlak do 1,6 MPa)
- **Středotlaké** (výst. tlak 1,6-5 MPa)
- **Vysokotlaké** (výst. tlak 5-13 MPa)
- **Velmi vysokotlaké** (výst. tlak 13-22,5 MPa)
- **Nadkritické** (výst. tlak nad 22,5 MPa)

## Podle typu výparníku:

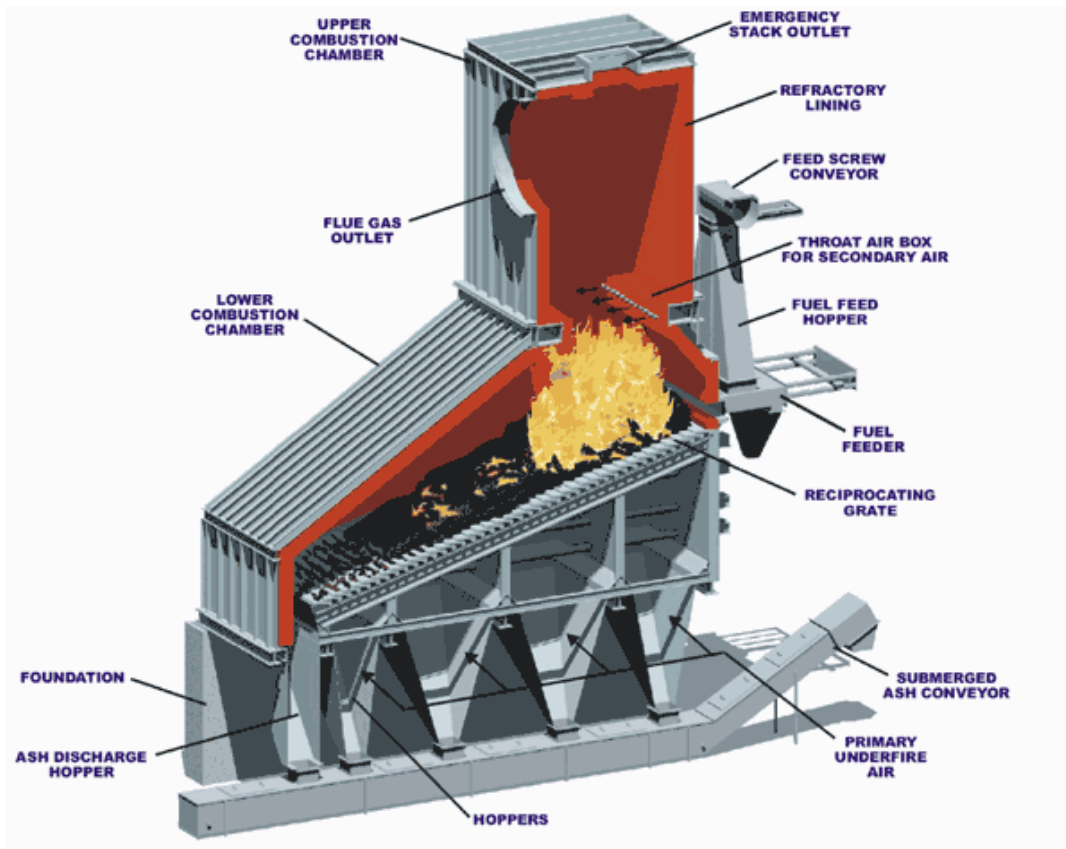
- |  |   |                             |
|--|---|-----------------------------|
| - <b>Kotle s přirozeným oběhem vody</b> (strmotrubné)        | } | kotle s malým obsahem vody  |
| - <b>Kotle s vnuceným oběhem vody</b> (La Mont)              |   |                             |
| - <b>Kotle průtočné</b> (Sulzer, Benson)                     |   |                             |
| - <b>Kotle plamencové</b> (přestup tepla přes vlnité plechy) | } | kotle s velkým obsahem vody |
| - <b>Kotle žárotrubné</b> (spaliny proudí trubkami)          |   |                             |

# Kotle roštové

## Podle typu spalovacího zařízení:

- Roštové (pro menší výkony)
- Práškové (granulační – várnice na stěnách, výtavné – várnice i po dně)
- Fluidní (méně citlivý na změnu paliva, odsíření přímo v kotli)

## Roštové kotle:



## Základní části:

- spalovací prostor vymezený stěnami
- rošt s palivovou násypkou, hradítkem, škvárovým jízdem a výsypkou
- zařízení pro přívod spalovacího vzduchu

## Základní části roštu:

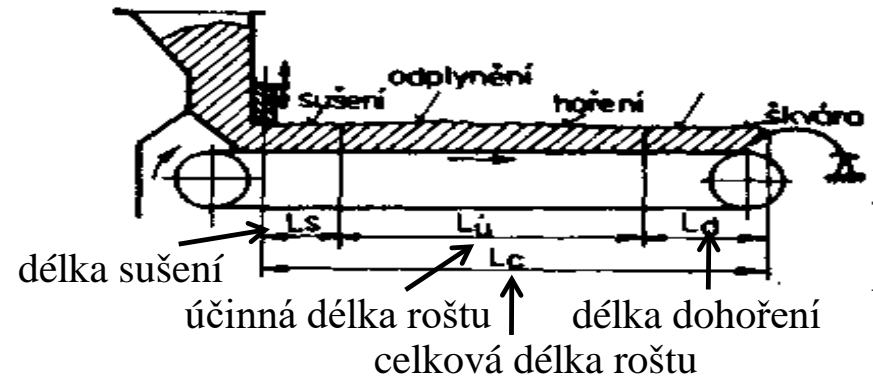
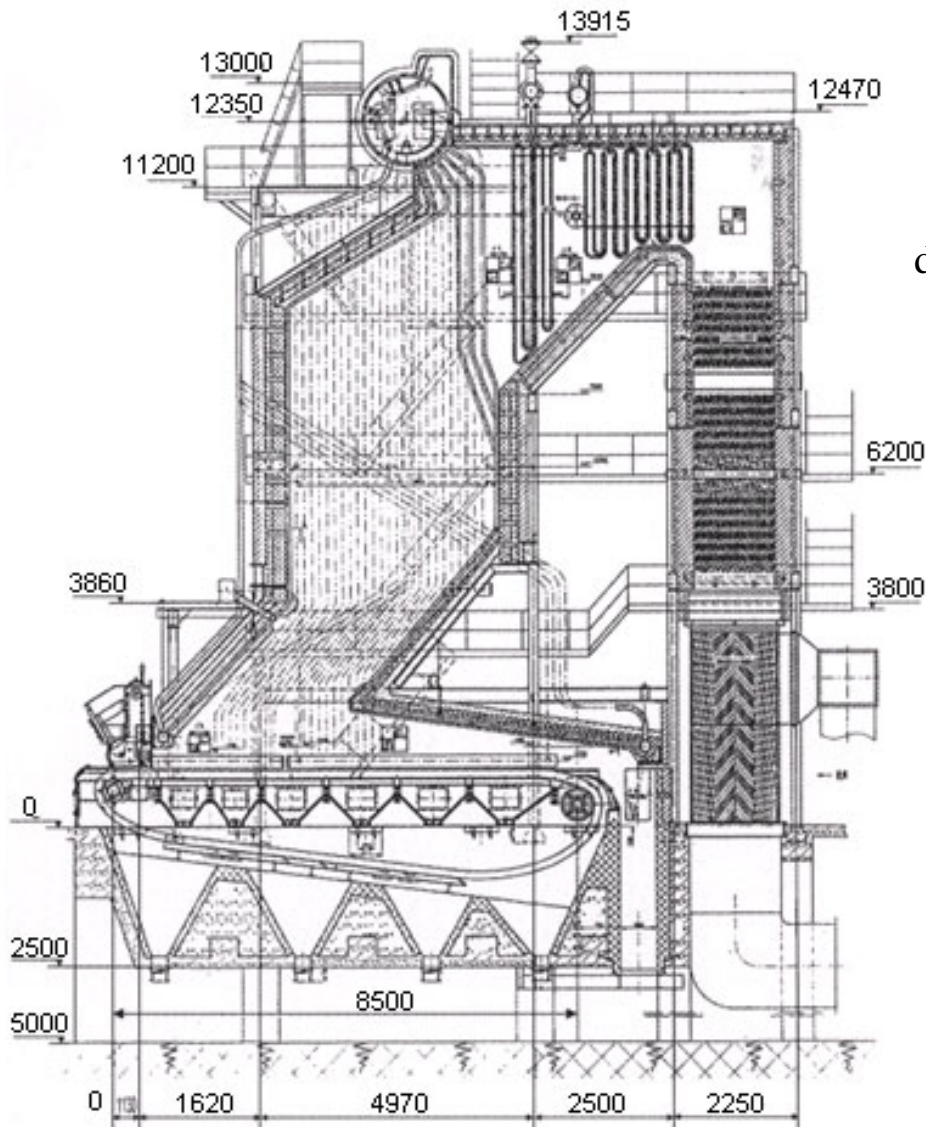
- nosná konstrukce (roštnice)
- hnací ústrojí (u mechanických roštů)

Pro elektrárenské aplikace  
vyhovuje rošt posuvný



# Kotle roštové

## Roštové kotle:



## Hrubá plocha roštu:

$$S_r = \frac{\dot{m}_{pal} \cdot Q_n}{\bar{q}_r} = a \cdot L \text{ [m}^2\text{]}$$

$\dot{m}_{pal}$  [kg.s<sup>-1</sup>] spalované množství paliva

$Q_n$  [MJ.kg<sup>-1</sup>] výhřevnost paliva

$\bar{q}_r$  [MW.m<sup>-2</sup>] střední jmenovitý tepelný výkon roštu  $\approx 0,7-1,6 \text{ MW.m}^{-2}$

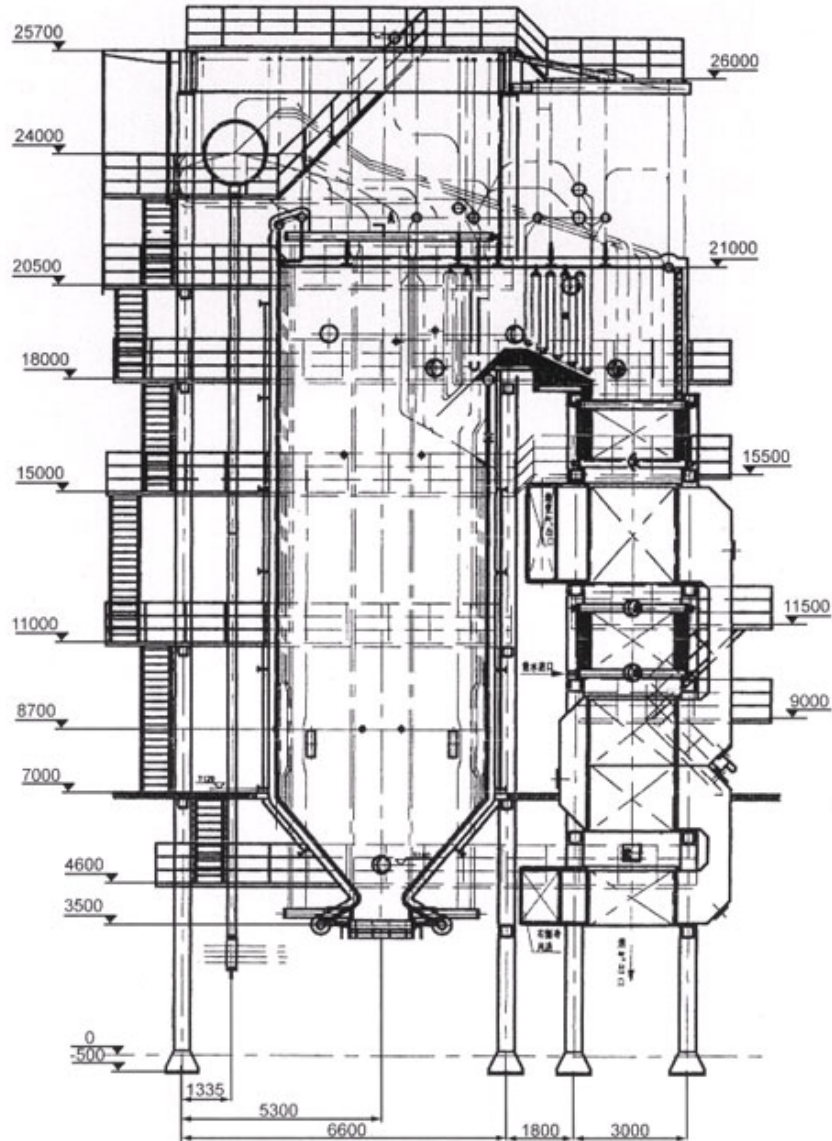
$a, L$  [m] šířka, délka roštu

Doba spalování u roštových kotlů:

desítky minut

# Kotle práškové

## Práškové kotle:



Pro spalování hnědého/černého uhlí jsou kotle vybaveny spalovacím zařízením s tlukadlovými mlýny a přímým foukáním prášku

Kotle mají velký regulační rozsah bez použití stabilizace (LTO).

Práškové kotle se stavějí od cca 50 t/h.

Doba spalování u práškových kotlů:  
1 - 3 s



# Kotle fluidní

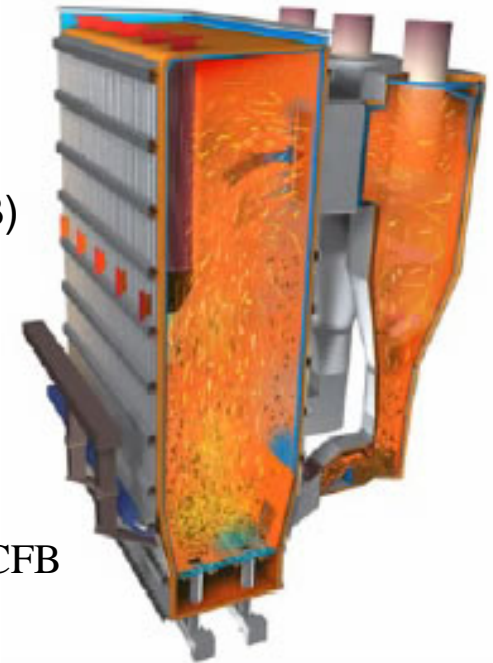
## Fluidní kotle:

Využívají vznosu, který vzniká vhnáním spalovacího vzduchu ze spodu kotle do vrstvy zrnitého odpadu. Vznikne tak fluidní vrstva s velkým reakčním povrchem a velmi intenzivním průběhem spalování v celé vrstvě. Takto lze spalovat kapalným i pevným odpadem (nadrčeným nebo rozemletým na stejnou zrnitost).

Fluidní spalování je vhodné pro odpady s vyšším obsahem síry, neboť produkty jejího hoření lze s výhodou zachycovat prostřednictvím mletého vápna nebo vápence přidaného do spalovaného odpadu. Nelze naopak použít pro spékavé odpady, které způsobují slinování fluidní vrstvy.

## Podle technologie fluidní vrstvy dělíme fluidní kotle na:

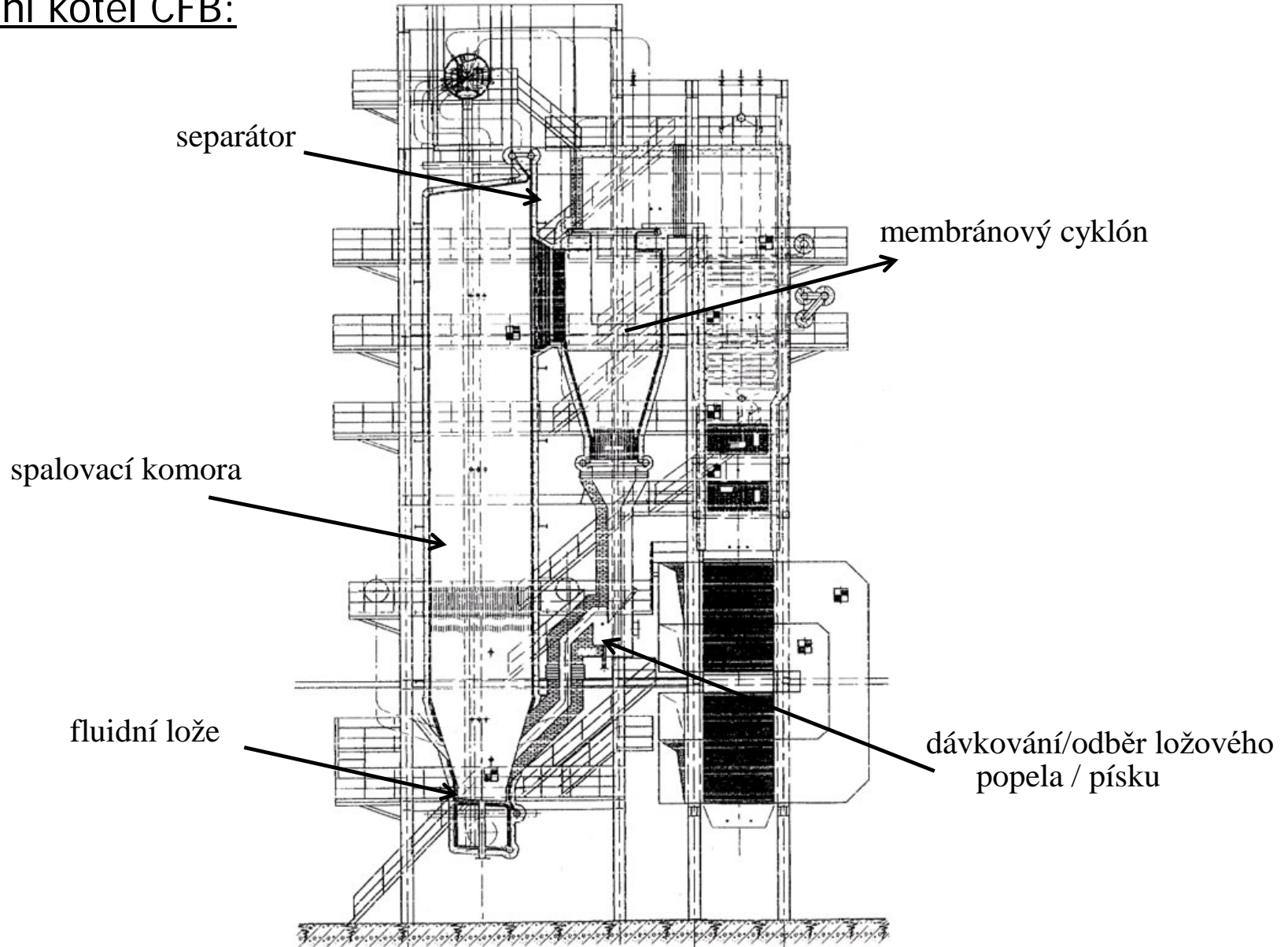
- **Kotle s vířícím ložem** (Bubbling Fluidized Bed - BFB)
- **Kotle s cirkulujícím ložem** (Circulating Fluidized Bed - CFB)



fluidní kotel CFB

# Kotle fluidní

Fluidní kotel CFB:



# Kotle – hydraulická část

## Tlakové ztráty:

Cílem je určit tlakové poměry v kotli nutných pro správné dimenzování napájecího čerpadla. Celková tlaková ztráta je dána součtem dílcích ztrát:

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_m \pm \Delta p_h \pm \Delta p_d \leftarrow \text{dynamický tlakový spád}$$

tření v potrubí  $\rightarrow$   $\Delta p_t$   
místní odpory (nátoky, výtoky, kolena...)  $\rightarrow$   $\Delta p_m$   
hydrostatický tlak  $\rightarrow$   $\Delta p_h$

### Voda:

$$\Delta p_t = \lambda \cdot \frac{l}{d_{ekv}} \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \rho$$

součinitel tření  $\uparrow$

Spec. pro laminární proudění:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

Reynoldsovo č.  $\leftarrow$

$$\text{Re} = \frac{c \cdot d}{\nu} \rightarrow \text{kinematická viskozita}$$

### Pára:

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T} \quad c = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\dot{m}}{A} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho}$$

$$\Delta p_t = p_1 - \sqrt{p_1 - \frac{16}{\pi^2} \cdot \lambda \cdot \frac{\dot{m}^2}{d^5} \cdot \frac{r \cdot T}{\rho} \cdot l}$$

### Trubkový výparník (várnice):

Složitější popis, aproximuje se pomocí kubické rovnice:

$$\Delta p_t = \frac{A}{\dot{Q}} \cdot \dot{m}^3 - B \cdot \dot{m}^3 + C \cdot \dot{Q} \cdot \dot{m} \quad A, B, C \quad \text{konstanty}$$

# Kotle – hydraulická část

**Místní odpory:**

$$\Delta p_m = \sum \zeta_m \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \rho$$

↑  
součinitel místních odporů

**Hydrostatický tlak:**

$$\Delta p_h = \Delta h \cdot \rho \cdot g$$

**Dynamický tlak:**

$$\Delta p_d = \frac{\rho_1 \cdot c_1^2}{2} - \frac{\rho_2 \cdot c_2^2}{2}$$

Přirozený oběh, oběhové číslo:

Tlakové ztráty vyvolané prouděním vody/páry ve várnici jsou funkcí rychlosti

$$\Delta p_{zc} = \Delta p_t + \Delta p_m = f_{zc}(c)$$

Rozdílem hydrostatických tlaků vzniká ve várnici statický přetlak

$$\Delta p_{sp} = h \cdot \rho_1 \cdot g - h \cdot \rho_2 \cdot g = f_{sp}(c)$$

Dimenzování přirozeného oběhu se provádí tak, že se najde taková hodnota rychlosti vody na vstupu do várnice  $c^*$ , že

$$f_{zc}(c^*) = f_{sp}(c^*)$$

Oběhové číslo se definuje jako

$$O = \frac{\dot{m}_z}{\dot{m}_v} \rightarrow \text{hmotnostní průtok v zavodňovacích trubkách}$$

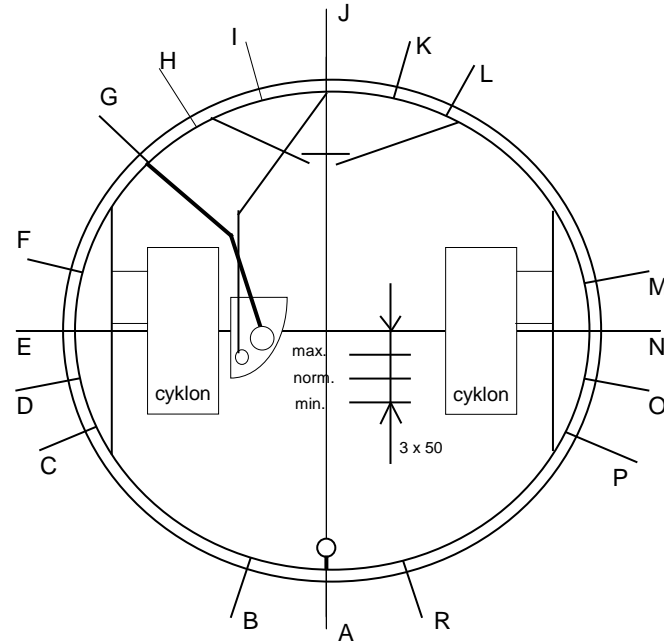
$\leftarrow$  hmotnostní průtok výparníku

Oběhové číslo se mění podle průtoku páry, jmenovité oběhové číslo bývá pro velké kotle 6-8.

# Kotle – hydraulická část

## Buben:

Buben kotle je silnostěnné válcové těleso (tloušťka stěny je kolem 10 cm) o průměru cca 1 m, umístěné v horní partii předního tahu kotle. Do spodní části bubnu jsou zaústěny varné a do horní přehřívákové trubky. *Hladina vody v bubnu* je rozhraní mezi dvěma stavy vody. Tuto hladinu je potřeba udržovat na stálé výši, cca uprostřed tělesa bubnu. Do varných trubek se nesmí dostat pára a do přehřívákových voda!



A - odvodnění bubnu  
B,R - zavodňovací trubky  
C,D - varnice pravé strany  
E,F - varnice přední stěny  
G - napájení bubnu

H - pojišťovací ventily  
I,K,L - parovody k PK 1  
J - alkalizace  
M,N - varnice levé strany  
O,P - varnice zadní stěny

