

# Elektrárny A1M15ENY

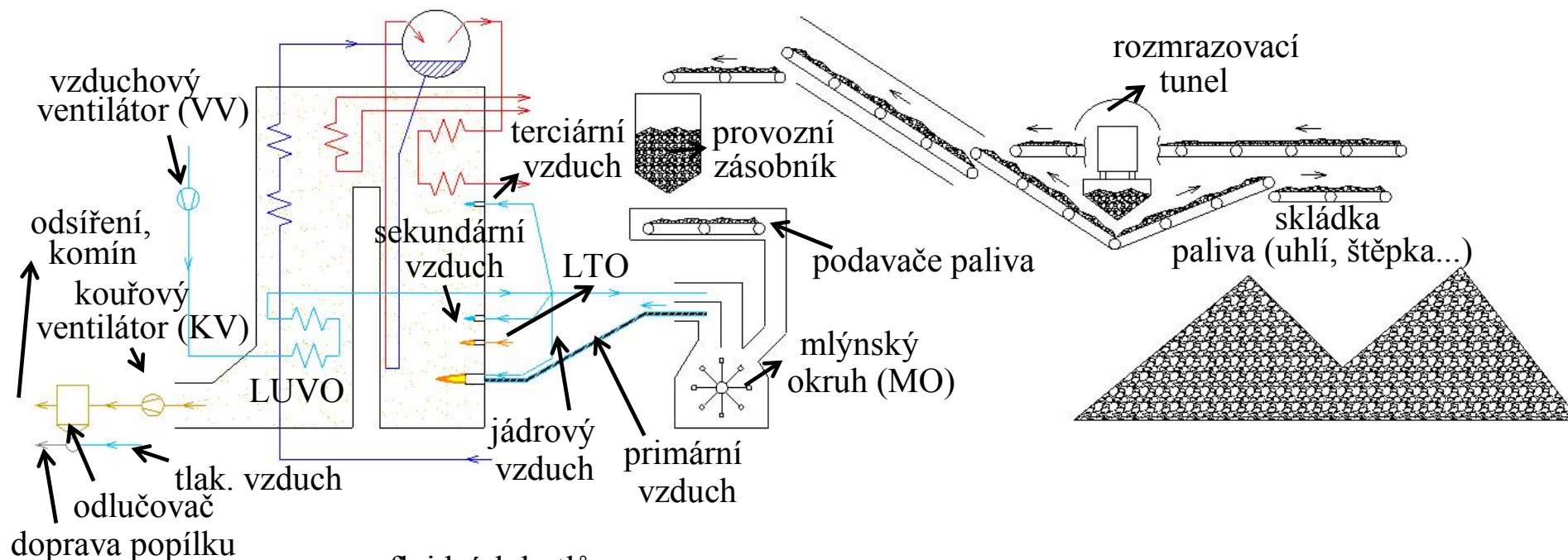
## přednáška č. 9

*Jan Špetlík*

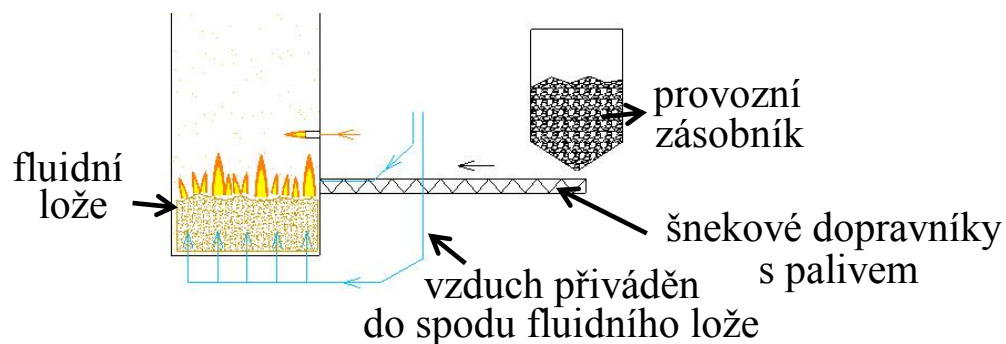
[spetlij@fel.cvut.cz](mailto:spetlij@fel.cvut.cz) - v předmětu emailu „ENY“

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky ČVUT, Technická 2, 166 27 Praha 6

# Palivo a spaliny



u fluidních kotlů:



# Principy spalování

Hořlavé složky jsou určeny prvkovým složením *hořlaviny*:

$$C^{daf} + H^{daf} + N^{daf} + S^{daf} + O^{daf} = 1 \text{ [kg/kg]}$$

V *surovém stavu* obsahuje palivo ještě podíl vody a popelovin:

$$C^r + H^r + N^r + S^r + O^r + W^r + A^r = 1 \text{ [kg/kg]}$$

↑  
sirnatost paliva

↑  
obsah vody

↙  
popelnatost paliva

Platí:

$$C^r = C^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \quad H^r = H^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \quad N^r = N^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r)$$
$$S^r = S^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r) \quad O^r = O^{daf} \cdot (1 - W^r - A^r)$$

Obsah popela v surovém stavu:

$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r)$$

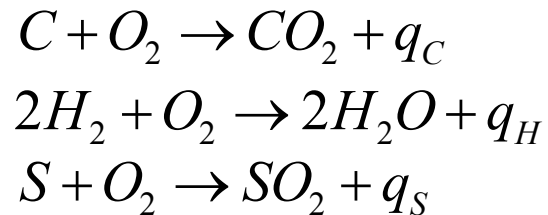
Indexy:

$r$	surový stav
$daf$	sušina bez obsahu popela
$d$	sušina

# Principy spalování

Při *dokonalém spalování* dochází k okysličování (exotermní reakce):

spotřeba kyslíku



teplo	MJ/mol	MJ/kg
$q_C$	405,9	33,8
$q_H$	572,4	141,9
$q_S$	29,7	9,25

mol/mol	m <sup>3</sup> /mol	m <sup>3</sup> /kg
1	22,4	1,87
0,5	11,2	5,55
1	22,4	0,698

Při uvažované koncentraci kyslíku ve vzduchu 21% obj. je spotřeba suchého vzduchu pro dokonalé spalování:

$$V_{vzst} = \frac{22,4}{0,21} \cdot \left( \frac{C^r}{12} + \frac{H^r}{4} + \frac{S^r}{32} - \frac{O^r}{32} \right) \text{ [m}^3\text{/kg paliva]}$$

Za těchto předpokladů vzniknou suché spaliny o objemu:

$$V_{snst} = \frac{22,3}{12} \cdot C^r + \frac{21,9}{32} \cdot S^r + \frac{22,4}{28} \cdot N^r + 0,79 \cdot V_{vzst} \text{ [m}^3\text{/kg paliva]}$$

molární objemy

Indexy:

$vz$	vzduch
$sn$	spaliny
$s$	suché
$t$	teoretické

# Principy spalování

Skutečná spotřeba vzduchu ale závisí na:

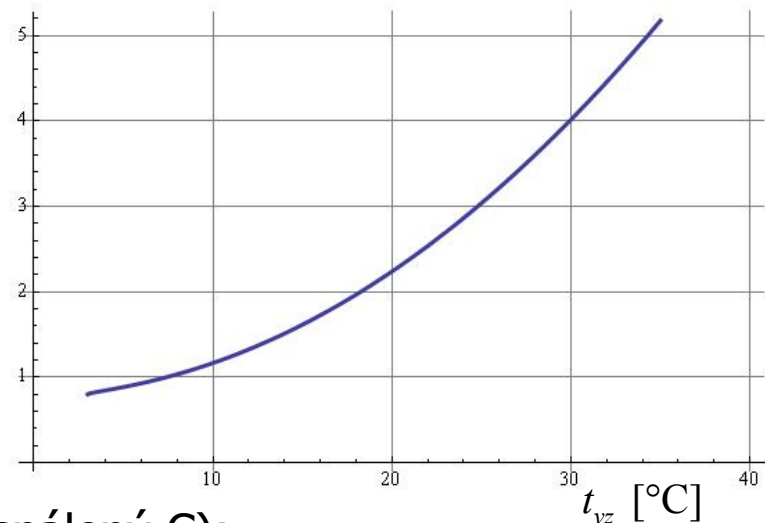
a) *vlhkosti vzduchu*:

Součinitel vlhkosti vzduchu:

$$v = 1 + \frac{\varphi \cdot p_s}{p_c - \varphi \cdot p_s}$$

$\varphi$  relativní vlhkost vzduchu  
 $p_s$  parciální tlak syté páry pro danou teplotu vzduchu  
 $p_c$  celkový tlak vzduchu  $\approx 1$  atm.

$p_s$  [kPa]



b) *nedokonalosti spalování* (CO) a *nedopalu* (nespálený C):

**Součinitel přebytku vzduchu** pro suchý vzduch:  $\lambda$

**Skutečná spotřeba vzduchu** bude potom:

$$V_{vz} = v \cdot \lambda \cdot V_{vzst} \text{ [m}^3\text{/kg paliva]}$$

Pro spaliny je nutné uvažovat ještě vlhkost v palivu (voda, hydrátová voda) a vzdušnou vlhkost nasávaného vzduchu:

$$V_{H_2O} = 11,11 \cdot H^r + 1,24 \cdot W^r + (v - 1) \cdot \lambda \cdot V_{vzst} \text{ [m}^3\text{/kg paliva]}$$

**Celkový objem spalin:**

$$V_{sn} = V_{snst} + (\lambda - 1) \cdot V_{vzst} + V_{H_2O} \text{ [m}^3\text{/kg paliva]}$$

Pozor! U fluidních kotlů s přímým odsířením je třeba ještě započítat spotřebu kyslíku na oxidaci  
 $2 \cdot \text{CaSO}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \cdot \text{CaSO}_4$

# Paliva

**Spalné teplo**  $Q_s$  je teplo uvolněné spálením 1 kg paliva na CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a kapalnou vodu H<sub>2</sub>O (uvádí se  $Q_s^{daf}$ )

**Výhřevnost**  $Q_i$  je teplo uvolněné za stejných podmínek jen s tím rozdílem, že místo vody se uvolňuje pára

Černé uhlí:

palivo	$Q_i$ [MJ.kg <sup>-1</sup> ]	$A^d$ [%]	$S^r$ [%]	$W^r$ [%]
Černé uhlí Důl Lazy	30,06	6,5	0,6	4,0
Ořech 1 Dukla	31,76	5,0	0,4	2,5
OP1 Kladno	23,07	13,5	0,6	14,0



biomasa v peletkách

Biomasa:

palivo	$Q_i$ [MJ.kg <sup>-1</sup> ]	$A^d$ [%]	$S^r$ [%]	$W^r$ [%]
dřevní štěpka suchá	9,5	3,0	-	40,0
dřevní štěpka syrová	7	3,0	-	60,0
pelety triticales	15	5,0	0,2	6,3
kompost z kalů ČOV	9,5	44,0	0,42	30,0

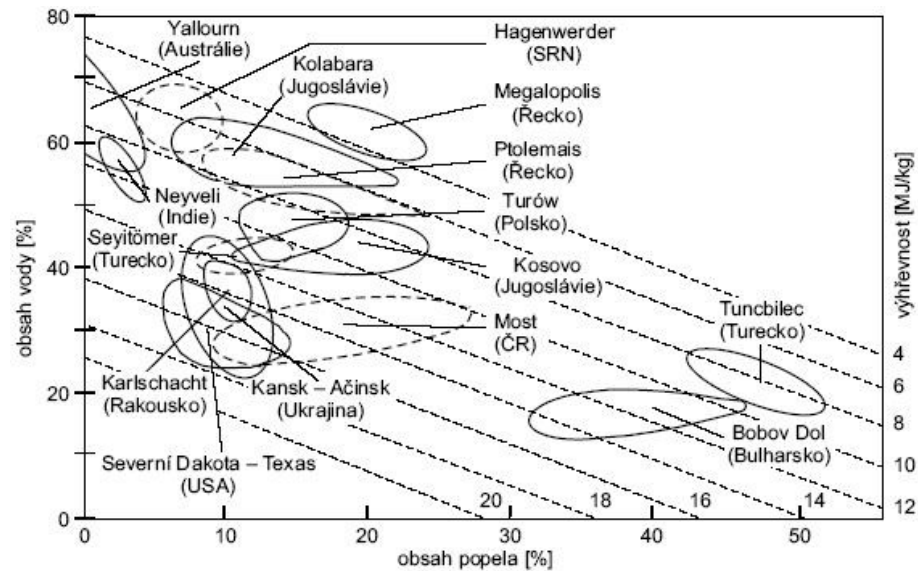


dřevní štěpka

# Paliva

Hnědé uhlí:

palivo	$Q_i^r$ [MJ.kg <sup>-1</sup> ]	$A^d$ [%]	$S^r$ [%]	$W^r$ [%]
HP1AD Bílina	16,4	15,0	0,84	29,7
PS3AD Bílina	15,6	18,6	0,85	29,5
PS3 SD Chomutov	12,5	35,3	0,82	25,5
HP1AD Most	15,9	24,0	1,1	26,0
HP2AD Most	12,9	35,0	1,0	25,5
HP3AD Most	11,0	38,5	1,0	28,3
Ořech 01 Lignit Mikulčice	9,9	24,0	1,1	49,0



# Paliva

Ušlechtilá paliva:

palivo	$Q_i^r$ [MJ.kg <sup>-1</sup> ]	$A^d$ [%]	$S^r$ [%]	$W^r$ [%]
LTO	42	0,04	0,1-0,5	1,5
mazut	40,5	0,03	1,5	0,6
LPG	50 (39 MJ/m <sup>3</sup> )	-	max. 200 mg/kg	-
Zemní plyn	55 (33-36 MJ/m <sup>3</sup> )	-	max. 0,2 mg/m <sup>3</sup>	-

Orientační hodnoty součinitele  $\lambda$  :

kotel (ohniště)	palivo	$\lambda$ [-]
granulační	antracit	1,2-1,25
	černé uhlí	1,2
	hnědé uhlí	1,2-1,25
	lignit	1,25
roštový	černé uhlí	1,4-1,5
	hnědé uhlí	1,4-1,5
fluidní CFB	černé uhlí	1,2
	hnědé uhlí	1,2
plynové / olejové	z. plyn / LTO	1,05-1,15

Výpočet  $\lambda$  z přebytku kyslíku ve spalinách:

$$\lambda = \frac{0,21}{0,21 - \omega_{O_2}}$$

kde 
$$\omega_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{sn}}$$

se vzrůstajícím měrným objemem kyslíku ve spalinách měrný objem CO<sub>2</sub> naopak klesá!

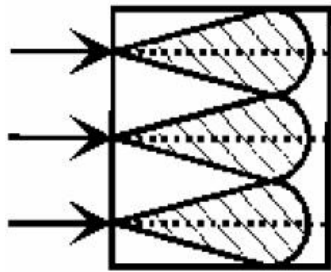
$$\omega_{CO_2} = \omega_{CO_2 \max} \frac{0,21 - \omega_{O_2}}{0,21} = \frac{\omega_{CO_2 \max}}{\lambda}$$



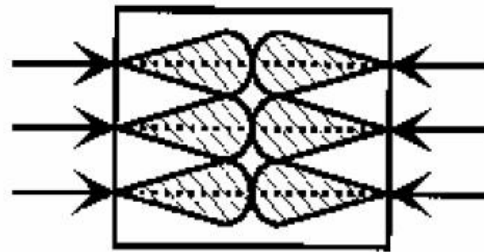
# Kotle - spalování

## Spalovací komora:

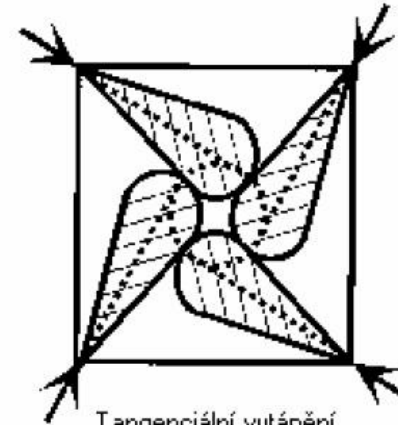
v uhelných hořácích se směs paliva a plynu vhání dýzami do spalovací komory a hoří s přídatným spalovacím vzduchem



Vytápění z jedné  
čelní stěny



Vytápění z protilehlých  
stěn



Tangenciální vytápění  
(z rohů stěn topeniště)



dno spalovací komory fluidního kotle  
vzduch se vhání tryskami zespod



dno spalovací komory granulačního kotle  
s pom. hořákem LTO

# Kotle - spalování

- teplota spalování (u granulačních cca 1400°C, u fluidních 750-900°C, plynové turbíny 1200-1400°C)
- palivo: uhlí + stabilizace (LTO, plyn)
- s kouřovými plyny odchází **popílek**, ostatní pevné produkty obsahuje **struska** (u granulačních cca 10%, u roštových 60-70%)
- v celé spalovací komoře se udržuje podtlak (cca -10 – -100 Pa), podle žádané hodnoty se přivírají/otvírají regulační věnce KV

## Hrubá účinnost kotle:

$$\eta = 1 - \zeta_{MN} - \zeta_{CN} - \zeta_f - \zeta_k - \zeta_{sv}$$

$\zeta_{MN}$  ztráta mechanickým nedopalem  
odpovídá nespálenému uhlíku v tuhém zbytku  
 $\approx$  do 1% u granulačních, do 5% u roštových

$\zeta_{CN}$  ztráta chemickým nedopalem  
 $\approx$  0,3-1,5% u granulačních i roštových  
3 až 7% u spalování dřeva

$\zeta_f$  ztráta citelným teplem tuhých zbytků  
= teplo zmařené chladnutím strusky a popílku  
 $\approx$  0,1% až 1%

výhřenost nespáleného uhlíku

$$\zeta_{MN} = \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot \frac{A^r}{Q_n^r} \cdot Q_C^r$$

poměrný obsah uhlíku v tuhém zbytku

# Kotle - spalování

$\zeta_k$  komínová ztráta (ohřívání vzduchu) - u velkých kotlů NEJVÝZNAMNĚJŠÍ  
 $\approx 7\%$  až  $15\%$ !

Empirický Gumzův vztah:

$$\zeta_k = \left( \frac{A_1}{\omega_{CO_2}} + B \right) \cdot (t_{sn} - t_{vz})$$

$\nearrow$  t. spalin       $\nwarrow$  t. vzduchu

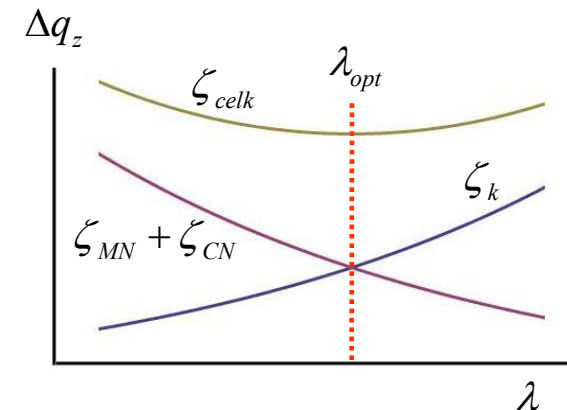
palivo	A1	B
Hnědé uhlí	1,17	0,0024
Černé uhlí	0,6281	0,0051
Topný olej	0,497	0,0063
Zemní plyn	0,3263	0,0106

$\zeta_{sv}$  ztráta tepla do okolí  
 $\approx 0,1\%$  až  $0,8\%$

Celková hrubá účinnost kotlů (tj. bez VS):

kotel	palivo	$\eta$	$t_{sn}$ [°C]
granulační	Zemní plyn, mazut	0,94	110 – 125
	Černé uhlí	0,89 – 0,93	< 135
	Hnědé uhlí $A^r < 0,13$	0,88 – 0,91	< 150
	Hnědé uhlí $A^r > 0,13$	0,86 – 0,89	< 160
fluidní	CFB	0,93	130 – 140

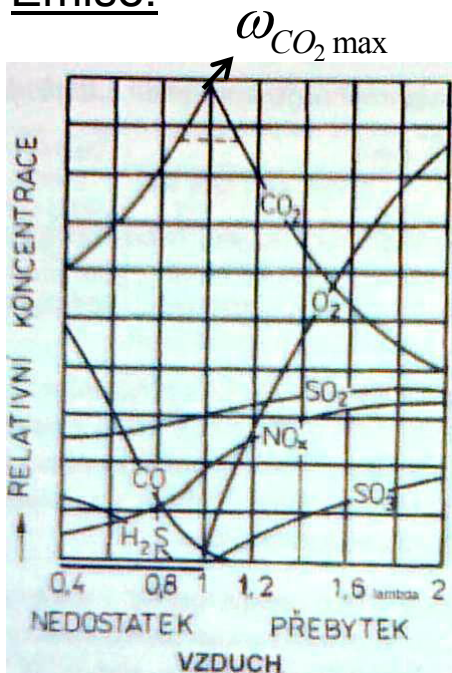
Volba optimálního  $\lambda$  :



$\lambda_{opt}$  se mění s výkonem  
 kotle

# Kotle - spalování

Emise:



Se vzrůstajícím  $\lambda$  roste koncentrace  $\omega_{NO_x}$ ,  $\omega_{SO_2}$  i  $\omega_{O_2}$  ve spalinách a při přebytku vzduchu naopak klesá  $\omega_{CO_2}$

S klesajícím  $\lambda$  naopak roste koncentrace  $\omega_{CO}$  a to zejména je-li  $\lambda < 1$

Emisní limity a emisní stropy:

**Emisní limity** stanovuje NV 146/2007, se změnami 475/2009 Sb. A rozlišuje zdroje dle tepelného příkonu, tak například pro nový zdroj o příkonu 100-300 MWt platí:

TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO
30 mg.m <sup>-3</sup>	200 mg.m <sup>-3</sup>	200 mg.m <sup>-3</sup>	250 mg.m <sup>-3</sup>

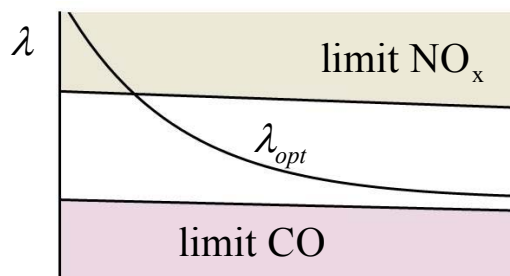
limity se vztahují na suché spaliny s obsahem kyslíku ve spalinách  $\omega_{O_2} = 6\%$   
 $\omega_{O_2ref} = 6\%$ . Jednotlivé hmotnostní koncentrace se spočítají podle vztahu:

$$c_{Xref} = c_{Xměř} \frac{0,21 - \omega_{O_2ref}}{0,21 - \omega_{O_2měř}}$$

Kromě výše uvedených látek, které se měří *kontinuálně*, existují limity na ostatní znečišťující látky jako:

HCl, PAH, PCB, PCCD, Hg, Cd, As+Pb (měří 2x ročně)

**Emisní stropy** jsou součástí integrovaného povolení (IPPC) konkrétního znečišťovatele (elektrárny) a stanovují roční úhrnná množství těchto látek



emisní limity jako omezující faktory optimálního přebytku vzduchu

# Kotle – příprava paliva

## Roštové technologie:

Kromě vysoušení není nutná žádná zvláštní příprava paliva

## Fluidní technologie:

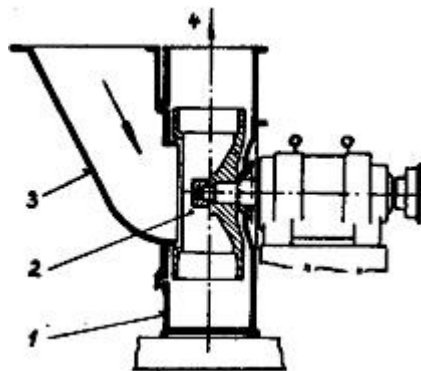
Palivo se drtí v drtičích paliva nebo má-li předepsané rozměry se přímo dopravuje do kotle pomocí šnekových dopravníků nebo pneumaticky

## Práškové technologie:

Palivo se suší a mele v mlýnech, **uhelný prášek** musí mít požadovanou vlhkost a jemnost.

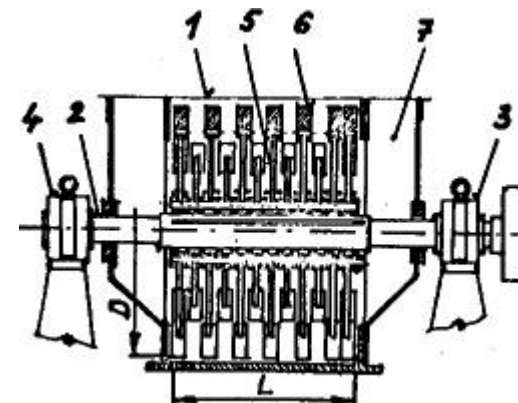
### Typy mlýnů:

- Tlukadlový
- Ventilátorový
- Kroužkový
- Trubnatý



ventilátorový mlýn

1. skříň ventilátorů, 2. lopatkové kolo, 3. přívod sušícího a nosného média s palivem, 4. výstup do třídiče



tlukadlový mlýn

1. pancéřovaná skříň, 2. hřídel, 3. pevné ložisko, 4. volné ložisko, 5. ramena, 6. kladiva, 7. axiální sušícího a nosného média

# Čištění spalin

Pro dodržení emisních limitů je třeba spaliny zbavit znečišťujících látek:

**1. TZL (tuhé znečišťující látky)**

probíhá v odlučovačích prachových částic

**2. SO<sub>2</sub>**

probíhá přímo v kotli (CFB) nebo v odsiřovacích zařízeních

**3. NO<sub>x</sub>**

není potřeba nebo probíhá v DeNO<sub>x</sub> jednotkách (dávkování čpavku)

**4. CO<sub>2</sub>**

souvisí s náklady na emisní povolenky (v ČR jsou přidělovány a tedy není potřeba), odstraňování CO<sub>2</sub> ze spalin rapidně snižuje celkovou účinnost

# Odlučovače

## Typy odlučovačů:

- Suchý mechanický (gravitační, setrvačné, vírové...)
- Mokrý mechanický (sprchové, proudové, pěnové...)
- Elektrostatický
- Tkaninový

## Odlučivost:

Vyjadřuje schopnost odlučovat prachové částice

$$O_c = \frac{m_p - m_v}{m_p} = \frac{c_p - c_v}{c_p} \quad \begin{array}{l} m_p, c_p \text{ hmotnost resp. koncentrace přivedených tuhých zbytků} \\ m_v, c_v \text{ hmotnost resp. koncentrace odvedených tuhých zbytků} \end{array}$$

Ve velkých elektrárnách dosahovaná odlučivost  $O_c \geq 0.99$

## Křivka tuhých zbytků ve spalinách:

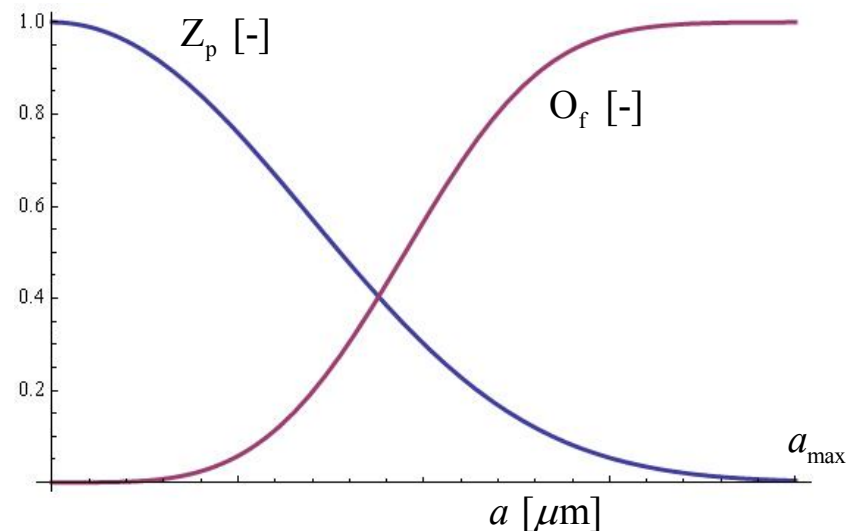
Vyjadřuje kolik hmotnostních procent je částic s velikostí zrn větší než  $a$ :

$$Z_p = Z_p(a)$$

## Frakční odlučivost:

Vyjadřuje kolik procent tuhých zbytků o velikosti zrn  $a$  se v odlučovači zachytí:

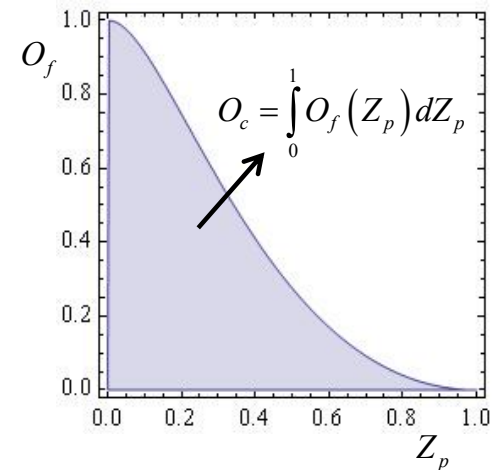
$$O_f = O_f(a)$$



# Odlučovače

Vyjádříme-li si  $O_f = O_f(Z_p)$  odlučivost bude potom:

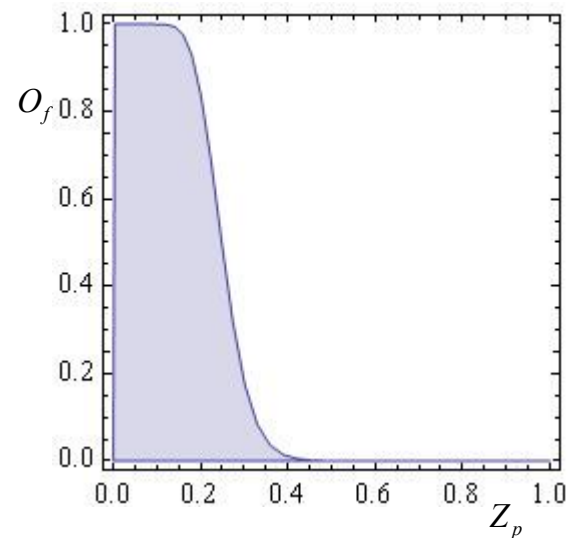
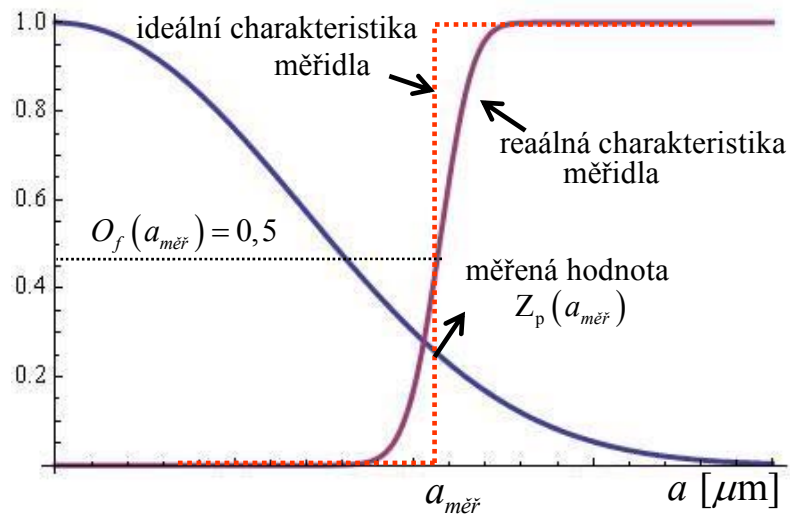
$$O_c = \int_0^1 O_f(Z_p) dZ_p$$



## Měřené frakce TZL ve spalinách:

Měří se frakce PM10 a frakce PM2,5.

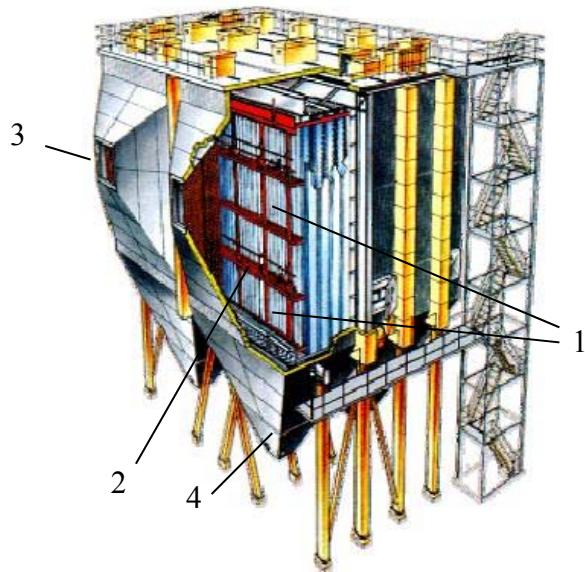
Měření u frakce PM10 probíhá na odlučovacím zařízení kde  $O_f(10 \mu\text{m}) = 0,5$  a charakteristika  $O_f(a)$  má velkou (definovanou) strmost.



Na stejných principech probíhá měření uhelného prášku, vápence, ...

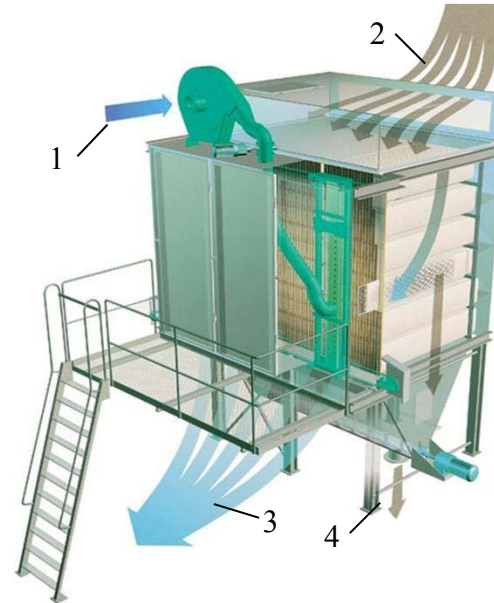


# Odlučovače



**elektrostatický filtr**

1. sběrné elektrody (uzemněné), 2. vybíjecí elektrody,  
3. přívod kouřových plynů, 4. zásobník s popílkem



**tkaninový filtr**

1. vzduch pro oklepy tkaniny, 2. nevyčištěné spaliny,  
3. přečištěné spaliny, 4. popílek

# Odsíření

## Odsiřovací metody podle způsobů zachycování SO<sub>2</sub>:

**regenerační** - aktivní látka se po reakci s oxidem siřičitým regeneruje a vrací zpět do procesu, oxid siřičitý se dále zpracovává

**neregenerační** - aktivní látka reaguje s SO<sub>2</sub> na dále využitelný nebo nevyužitelný produkt a zpět do procesu se nevrací

**mokrý** - SO<sub>2</sub> se zachycuje v kapalině nebo vodní suspenzi aktivní látky

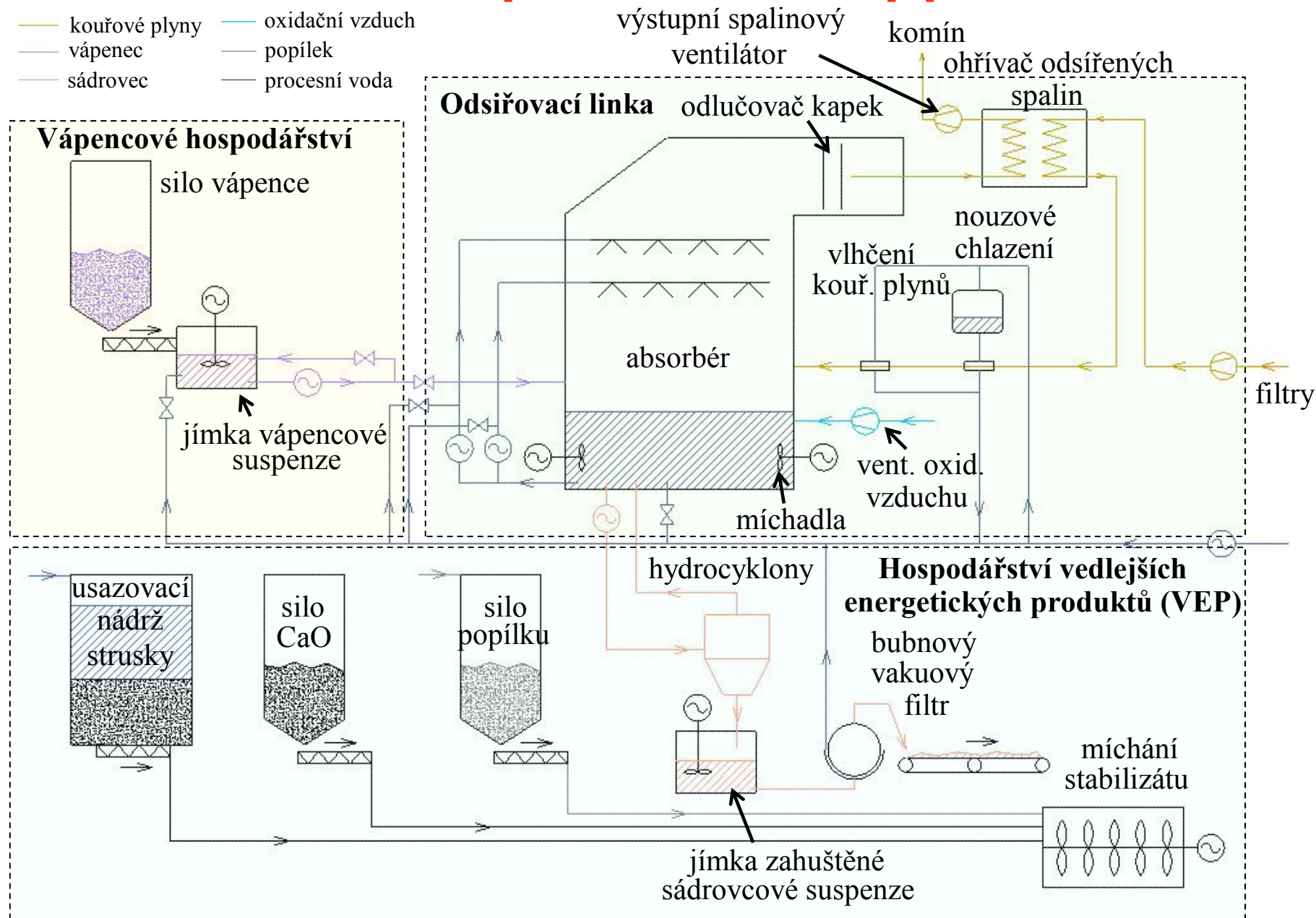
**polosuché** - aktivní látka je ve formě vodní suspenze vstříkována do proudu horkých spalin, kapalina se poté odpaří a produkt reakce se zachycuje v tuhém stavu

**suché** - SO<sub>2</sub> reaguje s aktivní látkou v tuhém stavu

České elektrárny používají jako metodu pro odsíření spalin převážně *mokrou vápencovou vypírku*. V absorberu (nádobě o průměru 15 m a výšce 40 m) procházejí kouřové plyny několikasupňovou sprchou, která rozstříkuje vápencovou suspenzi, tj. rozemletý vápenec ve vodě. Oxid siřičitý reaguje a vzniká siřičitan vápenatý (CaSO<sub>3</sub>), který dále oxiduje na dihydrát síranu vápenatého (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O). Vzniklý produkt - tzv. *energósádovec* – lze výhodně využít pro výrobu sádry, stavebních dílů, cementu a stabilizátu.

# Mokrý vápencová vypírka

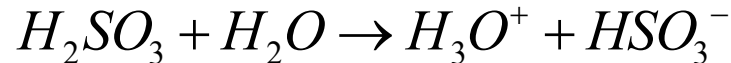
- kouřové plyny
- vápenec
- sádrovec
- oxidační vzduch
- popílek
- procesní voda



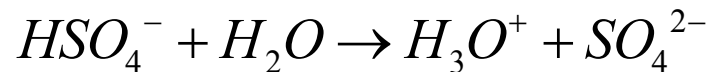
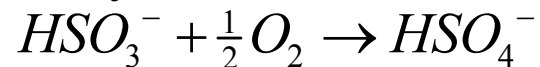
# Mokrý vápencová vypírka

## Reakce probíhající v odsiřovací jednotce:

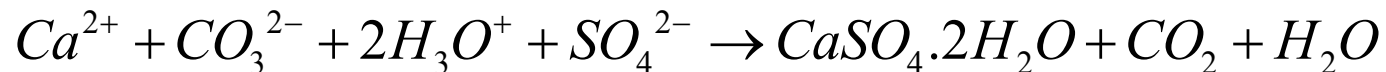
Suspenze absorbentu absorbuje většinu  $SO_2$  dle následujících rovnic:



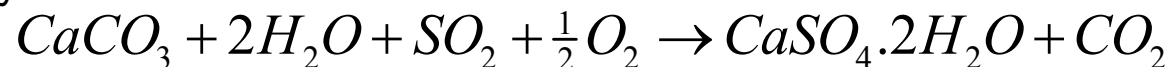
Část  $HSO_3^-$  vzniklého absorpcí  $SO_2$  se oxiduje ve sprchové části absorbéru kyslíkem, který je ve spalinách a zbytek  $HSO_3^-$  se zcela oxiduje v reakční nádrži absorbéru přiváděným oxidačním vzduchem dle následujících rovnic:



Reagující suspenze se přivádí ze systému vápence do absorbéru a neutralizuje vodíkový iont s výsledkem, že se udržuje konstantní hodnota pH suspenze absorbentu:



Sumárně tedy:



Spotřeba vápence závisí na jemnosti frakce vápence – tedy na jeho celkové reaktivitě  $r$  a čistotě jeho složení (vápence obsahují 90 – 98%  $CaCO_3$ , zbytek větš.  $MgCO_3$ )

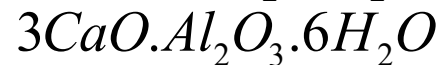
$$\dot{m}_{\text{vápeneč}} = \frac{\dot{m}_{CaCO_3}}{r \cdot c_{CaCO_3}}$$

Vzhledem k částečnému okysličování pomocí kyslíku ve spalinách, přebytek kyslíku v suchých spalinách na výstupu poklesne cca o 1-2%

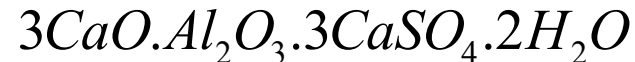
# Mokrý vápencová vypírka

## Reakce probíhající v hospodářství VEP:

Při reakci popílku s kyslíčkem vápenatým (CaO) a vodou vznikají přechodné reakční produkty typu:



To jsou stejné reakční produkty jako při tvrdnutí portlandského cementu, avšak reakční rychlosti probíhají při stabilizačním procesu podstatně pomaleji. Tyto přechodné reakční produkty reagují dále s dalšími složkami odvodněného sádrovce na konečné sloučeniny jako je např. etryngit



nebo jiné obdobné sloučeniny siřičitanů nebo síranu.

Výsledke jsou málo suspendovatelné *inertní sloučeniny* využitelné ve stavebnictví nebo jsou-li skládkovány, jsou klasifikovány jako *inertní odpady*.

# Denitrifikace spalin

**Denitrifikace spalin** je považována za technicky obtížnější, než odsíření  
Kouřové plyny obsahují různé oxidy dusíku:

- cca 95 % oxidu dusnatého NO
- cca 5 % oxidu dusičitého NO<sub>2</sub>
- při teplotách pod 900 °C vzniká i oxid dusný N<sub>2</sub>O

Organický dusík je obsažen v palivu i ve vzduchu při spalování.

Metody snížení NO<sub>x</sub>:

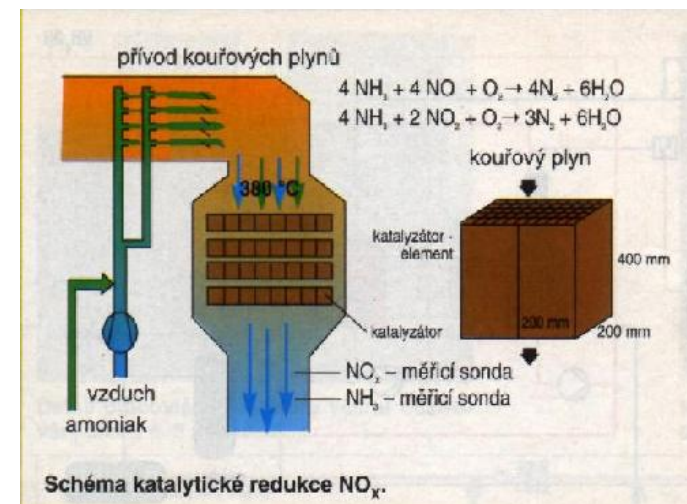
## Primární

kdy se snažíme zabránit jejich vzniku řízením průběhu spalování a konstrukcí kotlů (lze snížit emise NO<sub>x</sub> o 40-60 % při relativně nízkých nákladech)

## Sekundární

### *Selektivní katalytická redukce*

probíhá ve speciálním reaktoru, katalyzátorem jsou oxidy vanadu, molybdenu nebo wolframu na nosiči z oxidu titaničitého. Do spalin se vstříkne amoniak a směs se vede přes katalyzátory, kde vzniká elementární dusík a voda. Tato metoda je dražší, ale obsah NO<sub>x</sub> ve spalinách lze snížit o 80-90 %



# Technologie Carbon Capture & Storage

## CCS technologie:

### **post combustion capture**

spalování paliva se vzduchem a následná separace CO<sub>2</sub> ze spalin

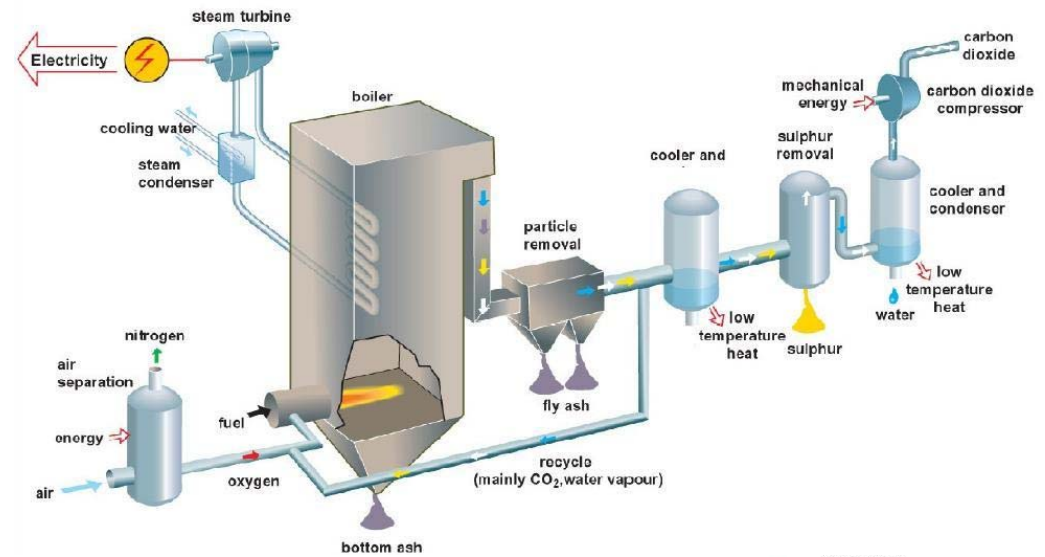
### **oxy-fuel technology**

spalování paliva s čistým kyslíkem a následná separace CO<sub>2</sub> ze spalin

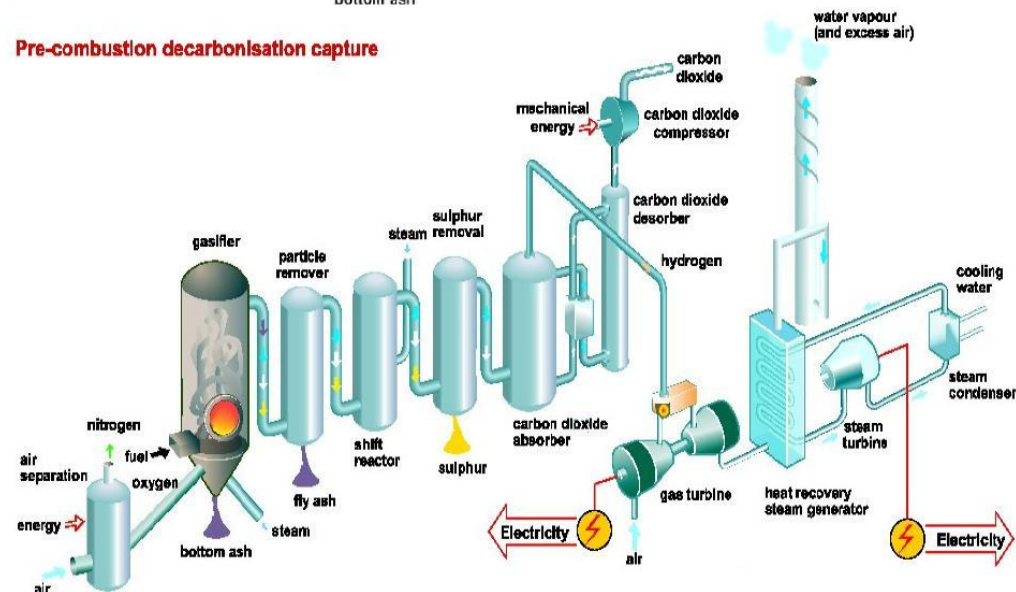
### **pre combustion capture**

zplynování paliva před spálením, konverze CO z plynu na CO<sub>2</sub>, separace CO<sub>2</sub> a vodíku a následné spalování čistého vodíku (IGCC – Integrated Gasification Combined Cycle).

O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> recycle (oxyfuel) combustion capture



Pre-combustion decarbonisation capture



# Technologie Carbon Capture & Storage

## Energetická bilance

- výrazné zvýšení vlastní spotřeby, tj. snížení čisté účinnosti elektrárny přibližně o 6-14% a navýšení spotřeby paliva o 20-40%

## Uhlíková bilance

- do celkové uhlíkové bilance je třeba započítat i emise CO<sub>2</sub> způsobené přepravou a skladováním!

## Kapacita a budoucí využití potenciálních úložišť

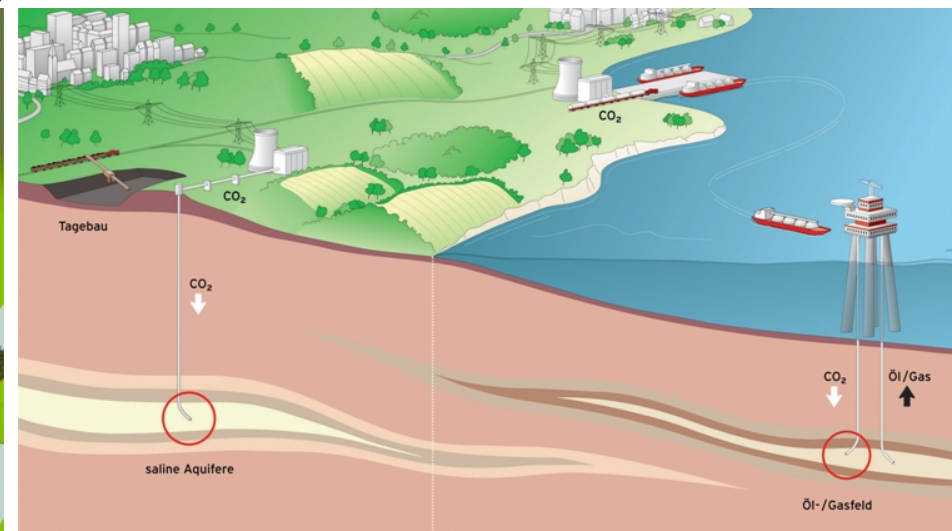
- v současné době je odhadována na zhruba 70-násobek celosvětové roční produkce CO<sub>2</sub>,
- po injektáži CO<sub>2</sub> budou bývalá ložiska v budoucnosti nevyužitelná pro další případnou těžbu

## Bezpečnostní rizika

- CO<sub>2</sub> bude v určité míře unikat podél geologických zlomů
- stlačený CO<sub>2</sub> může způsobit mikrozemětřesení s rizikem narušení nadložních vrstev
- objemová koncentrace CO<sub>2</sub> okolo 8% zabíjí člověka do 30-60 minut



Pilotní projekt: 30 MWt elektrárna Schwarze Pumpe (technologie CCS - oxy-fuel)



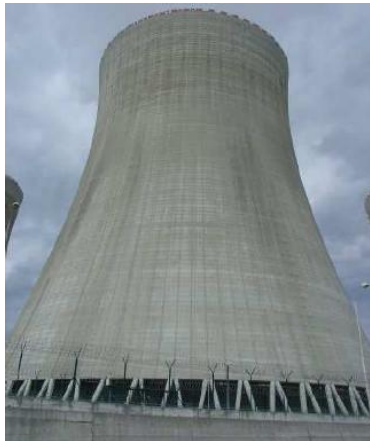
Ukládání CO<sub>2</sub> do podzemních ložisek



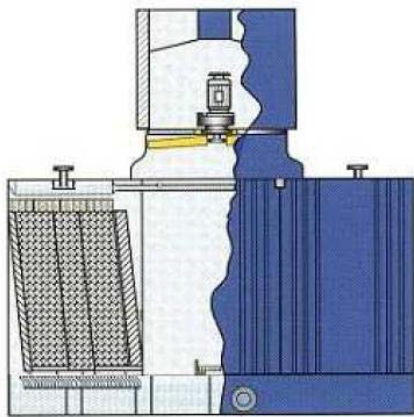
# Chladicí okruh

## Chladicí věže

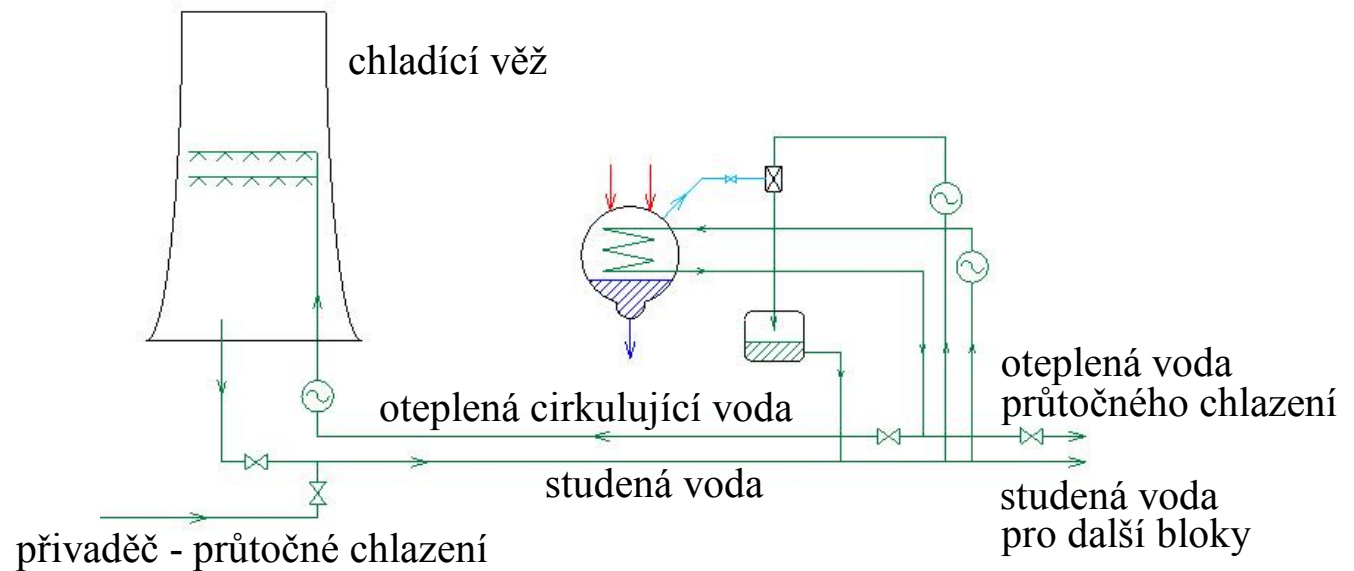
- s přirozeným tahem
- ventilátorové



chladicí věž  
s přirozeným tahem

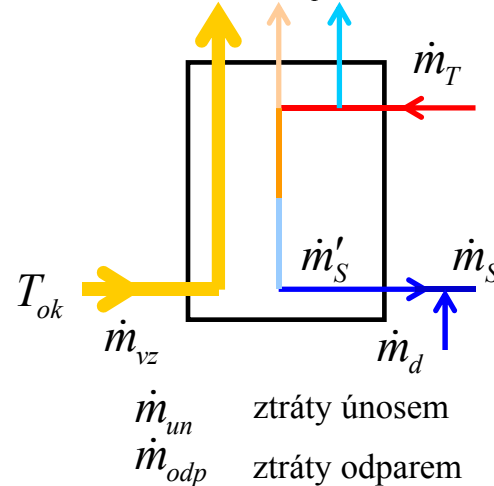


chladicí věž ventilátorová



## Bilance chladicí věže

$$T_{out} \approx T_T \quad \dot{m}_{odp} \quad \dot{m}_{un}$$



$\dot{m}_{un}$  ztráty únosem  
 $\dot{m}_{odp}$  ztráty odparem

Hmotnostní toky:

$$\dot{m}_T - \dot{m}_{odp} - \dot{m}_{un} - \dot{m}_d = \dot{m}_S$$

Tepelná bilance zjednodušeně:

$$\dot{m}_T \cdot c_v \cdot (T_T - T_S) = \dot{m}_{odp} \cdot \Delta i_{(p,T)odp}$$

$$+ \dot{m}_{vz} \cdot c_{vz} \cdot (T_T - T_{ok})$$

Ztráty odparem se zanedbáním přestupu tepla do vzduchu:

$$\frac{\dot{m}_{odp}}{\dot{m}_T} = \frac{c_v \cdot (T_T - T_S)}{\Delta i_{(p,T)odp}} \approx 1 - 3\%$$

Ztráty únosem:

$$\frac{\dot{m}_{un}}{\dot{m}_T} \approx 0,1\%$$

# Chladicí okruh

## Chladicí věže s přirozeným tahem

- využívají komínového efektu
- železobetonový monolitický skelet
- výška 30 – 150 m
- rozvody oteplené vody s rozstřikovacími tryskami
- nad nimi umístěny eliminátory pro omezení ztrát únosem
- spodní část - bazén s odtoky ochlazené vody



chladicí věž se zabudovaným odvodem spalin z odsíření (Elektrárna Chvaletice)



ventilátorová chladicí věž (Elektrárna Opatovice)

## Chladicí věže ventilátorové

- vnitřek tvoří chladicí výplň
- nad ní jsou rozstřikovací trysky
- nad nimi eliminátory
- nucený tah zajišťuje ventilátor
- usměrnění toku odváděného vzduchu zajišťuje difuzor



Difuzor (CHVV)



Eliminátory

## Poznámka:

V případě nedostupnosti potřebného množství vody pro chlazení se někdy používá vzduchové chlazení kondenzátorů, což je provozně i investičně náročnější řešení



Rozstřikovací tryska



Chladicí výplň

# Vody

## DEMI voda

- používá se do Rankinova tepelného oběhu (kotelní voda)
- upravuje se v chemické úpravně vod (CHÚV)
- požadavek na čistotu látek, jejichž usazeniny by zvyšovaly tepelný odpor při přestupu tepla (= **dem**ineralizovaná voda)

typické parametry DEMI vody:

ukazatel		max.	Ø
Měrná elektrická vodivost	( $\mu\text{S/cm}$ )	0,5	0,2
pH		8 - 9	
obsah $\text{SiO}_2$	( $\mu\text{g/kg}$ )	100	20
obsah železa	( $\mu\text{g/kg}$ )	200	20
obsah $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	( $\mu\text{g/kg}$ )	3	1
CHSK-(Mn)	( $\text{mgO}_2/\text{kg}$ )	1	0,5

## Filtrovaná voda (topná)

- v elektrárnách s teplotěnským provozem
- upravuje se v chemické úpravně vod (CHÚV)

## Chladicí voda (říční)

- Zbavená velkých mechanických nečistot

# Glosa k přednášce č. 9

Tepelná elektrárna o parametrech

Výkon bloku: 1000 MW (čistá výroba po odečtení VS)

Celková účinnost: 0,33 (čistá účinnost vztažená k výhřevnosti paliva)

Parametry hnědého uhlí:

$Q_i^r$ [MJ.kg <sup>-1</sup> ]	$A^d$ [%]	$S^r$ [%]	$W^r$ [%]
15	15	2	30

Přebytek vzduchu: 1,3

Popílek / Struska: 0,9 / 0,1

Účinnost odsíření: 0,95

Účinnost odlučovače: 0,999

Emisní limity pro nový zdroj dle NV 146/2007 (vztaženo k 6% přebytku O<sub>2</sub> obj. ve spalinách):

TZL	SO <sub>2</sub>
30 mg.m <sup>-3</sup>	200 mg.m <sup>-3</sup>

1. Rozhodněte, zda elektrárna bude plnit emisní limity pro TZL a SO<sub>2</sub>
2. Vypočítejte hmotnostní toky uhlí, vápence, produkci sádrovce a emise CO<sub>2</sub>
3. Jaké budou dodatečné náklady na 1 MWh bude-li si emisní povolenky elektrárna nakupovat (cena silové el. energie je cca 60 EUR/MWh a povolenky 25 EUR/t CO<sub>2</sub>)

**Zanedbejte:** ostatní nevyspecifikované složky paliva (vázaný dusík, chlór, hydrátovou vodu atd.) kromě uhlíku, vzdušnou vlhkost, odlučovací schopnost odsíření, reaktivitu a chemické nečistoty vápence, pro výslednou bilanci uvažujte okysličení v absorberu plně hrazenou přivedeným oxidačním vzduchem