

Elektrárny B1M15ENY

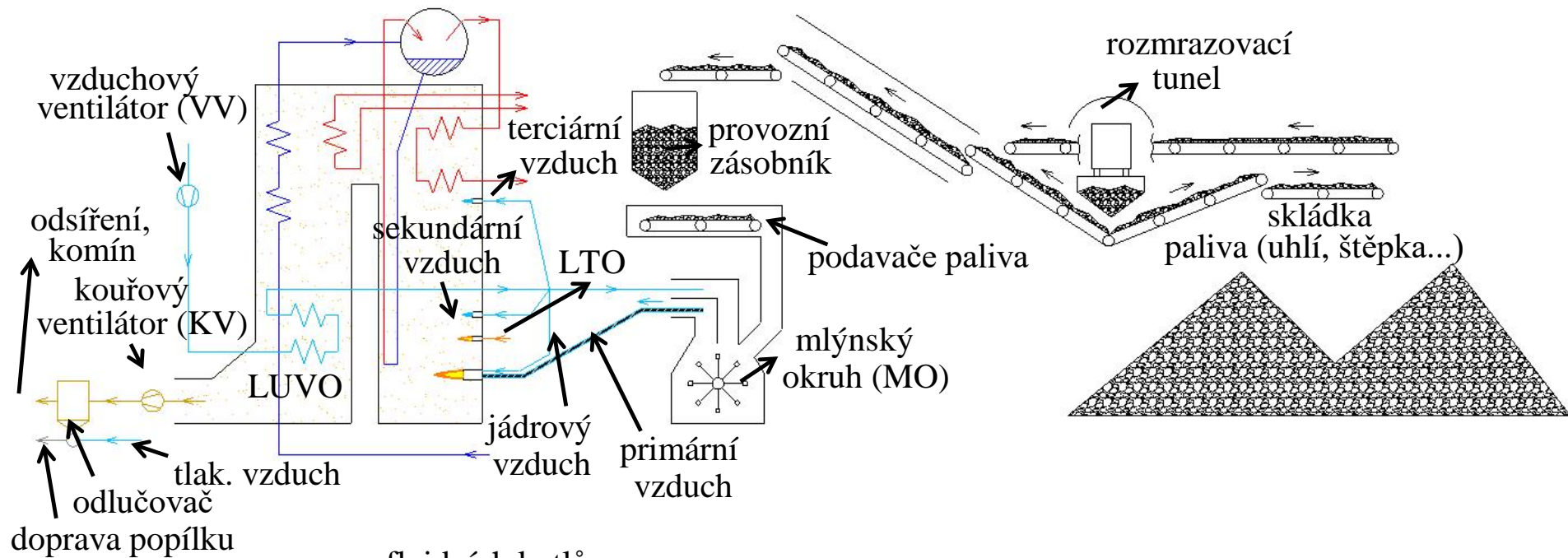
přednáška č. 8

**Okruh paliva a spalin
Technologie čištění spalin**

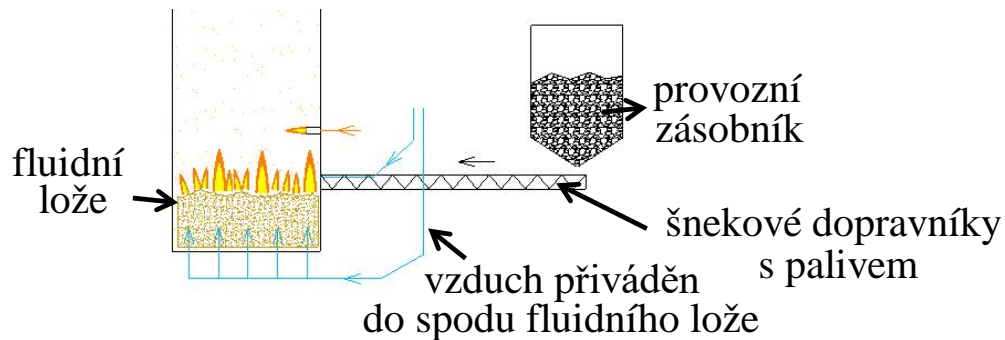


Ing. Jan Špetlík, Ph.D.
ČVUT FEL Katedra elektroenergetiky
E-mail: spetlij@fel.cvut.cz

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:

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

↑ ↑ ↙
sírnatost 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:

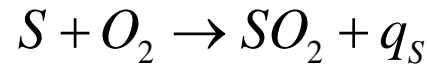
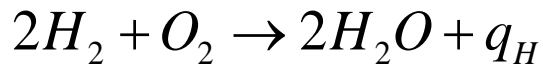
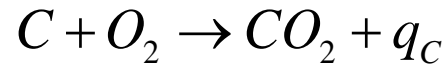
$$A^r = A^d \cdot (1 - W^r)$$

Indexy:

r	surový stav
daf	sušina bez obsahu popela
d	sušina

Principy spalování

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



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

spotřeba kyslíku

mol/mol	m ³ /mol	m ³ /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:

molární objemy

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

Indexy:

vz	vzduch
sn	spaliny
s	suché
t	teoretické

Principy spalování

Skutečná spotřeba vzduchu ale závisí na:

a) *vlhkosti vzduchu*:

Součinitel vlhkosti vzduchu:

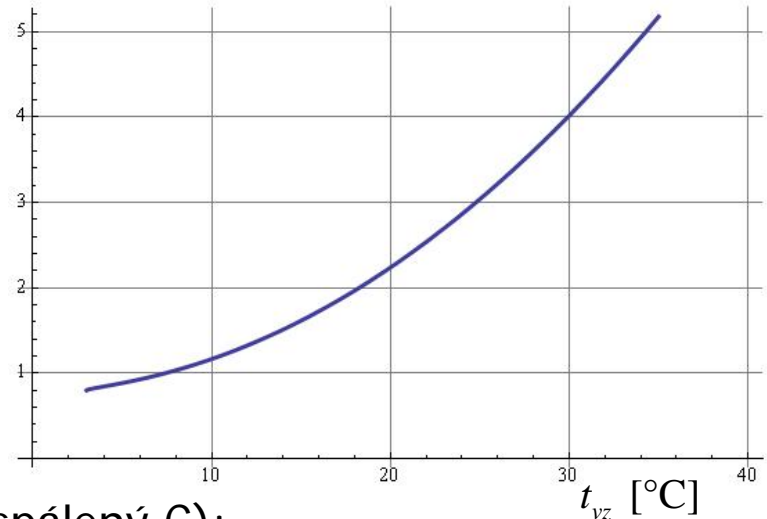
$$\nu = 1 + \frac{\varphi \cdot p_s}{p_c - \varphi \cdot p_s}$$

φ relativní vlhkost vzduchu

p_s parciální tlak syté páry pro danou teplotu vzduchu

p_c celkový tlak vzduchu
 $\approx 1 \text{ atm.}$

p_s [kPa]



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

Součinitel přebytku vzduchu pro suchý vzduch: λ

Skutečná spotřeba vzduchu bude potom:

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

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

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

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_2 , SO_2 , N_2 a kapalnou vodu H_2O (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^r [MJ.kg ⁻¹]	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^r [MJ.kg ⁻¹]	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

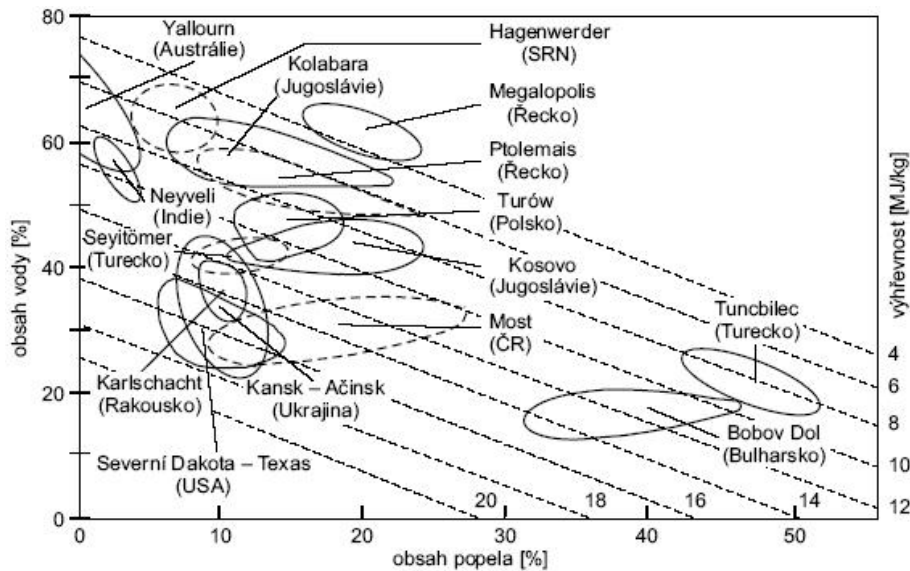


dřevní štěpka

Paliva

Hnědé uhlí:

palivo	Q_i^r [MJ.kg ⁻¹]	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 ⁻¹]	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 ³)	-	max. 200 mg/kg	-
Zemní plyn	55 (33-36 MJ/m ³)	-	max. 0,2 mg/m ³	-

Orientační hodnoty součinitele λ :

kotel (ohniště)	palivo	λ [-]
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 λ z přebytku kyslíku ve spalinách:

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

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

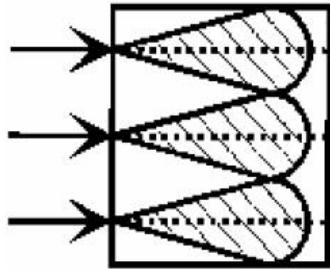
se vzrůstajícím měrným objemem kyslíku ve spalinách měrný objem CO₂ naopak klesá!

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

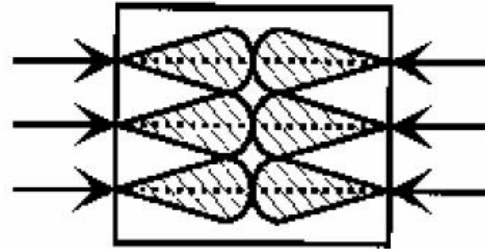
Kotle - spalování

Spalovací komora:

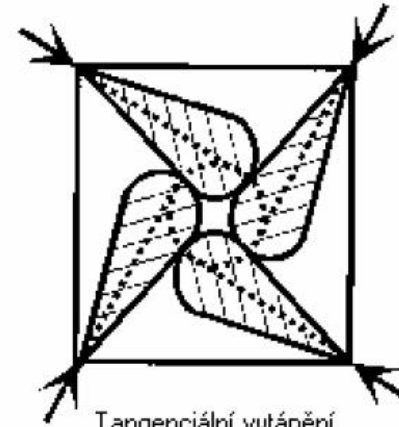
v uhelných hořácích se směs paliva a plynu vhání dýzami do spalovací komory a hoří s přidavným spalovacím vzduchem



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:

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

ζ_{MN} ztráta mechanickým nedopalem
odpovídá nespálenému uhlíku v tuhém zbytku
≈ do 1% u granulačních, do 5% u roštových

ζ_{CN} ztráta chemickým nedopalem
≈ 0,3-1,5% u granulačních i roštových
3 až 7% u spalování dřeva

ζ_f ztráta citelným teplem tuhých zbytků
= teplo zmařené chladnutím strusky a popílku
≈ 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

ζ_k

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

Empirický Gumzův vztah:

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

\nearrow t. spalin \nwarrow t. vzduchu

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

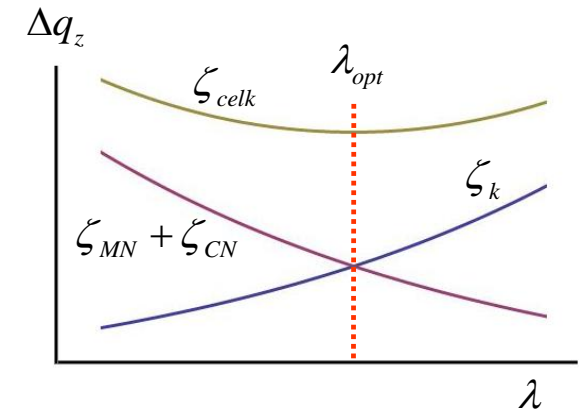
ζ_{sv}

ztráta tepla do okolí
 $\approx 0,1\%$ až $0,8\%$

Celková hrubá účinnost kotlů (tj. bez VS):

kotel	palivo	η	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

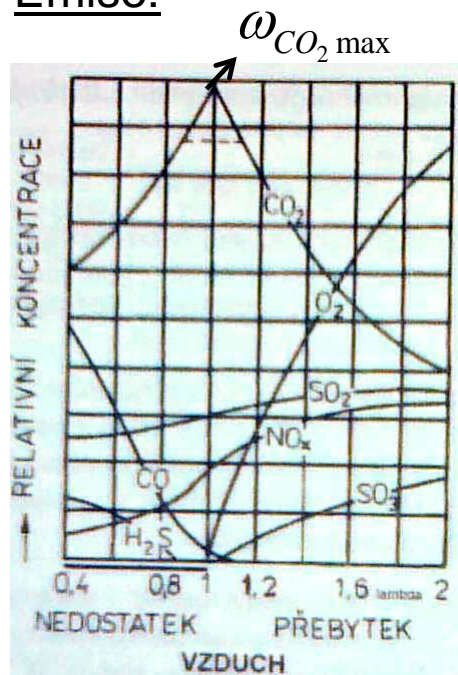
Volba optimálního λ :



λ_{opt} se mění s výkonem
 kotle

Kotle - spalování

Emise:



Se vzrůstajícím λ roste koncentrace ω_{NO_x} , ω_{SO_2} i ω_{O_2} ve spalinách a při přebytku vzduchu naopak klesá ω_{CO_2}

S klesajícím λ naopak roste koncentrace ω_{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 ₂	NO _x	CO
30 mg.m ⁻³	200 mg.m ⁻³	200 mg.m ⁻³	250 mg.m ⁻³

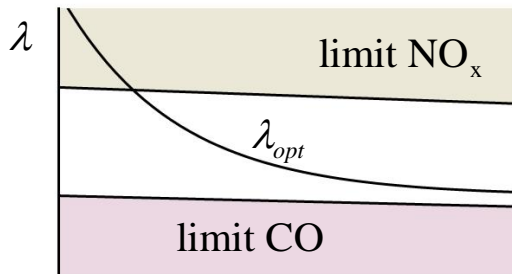
limity se vztahují na suché spaliny s obsahem kyslíku ve spalinách $\omega_{O_2} = 6\%$
 $\omega_{O_2ref} = 6\%$. Jednotlivé hmotnostní koncentrace se spočítají podle vztahu:

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

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



P

emisní limity jako omezující faktory optimálního přebytku vzduchu

Kotle – příprava paliva

Roštové technologie:

Kromě vysoušení není nutná žádná zvláštní příprava paliva

Fluidní technologie:

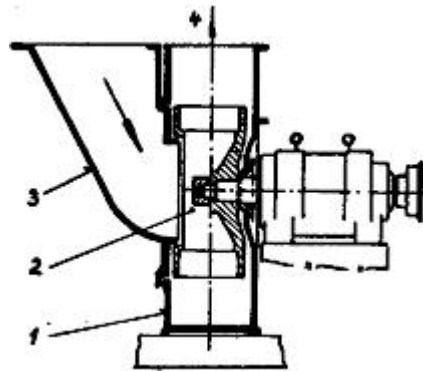
Palivo se drtí v drtičích paliva nebo má-li předepsané rozměry se přímo dopravuje do kotle pomocí šnekových dopravníků nebo pneumaticky

Práškové technologie:

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

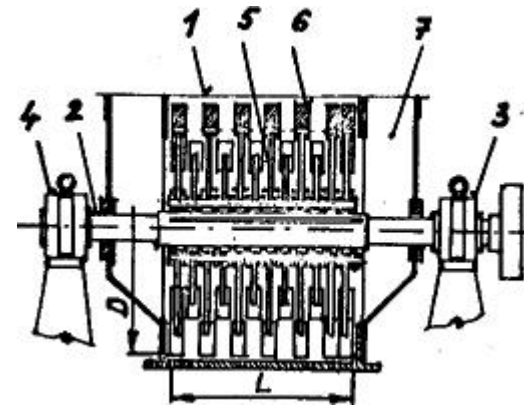
Typy mlýnů:

- 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. SO₂

probíhá přímo v kotli (CFB) nebo v odsiřovacích zařízeních

3. NO_x

není potřeba nebo probíhá v DeNOx jednotkách (dávkování čpavku)

4. CO₂

souvisí s náklady na emisní povolenky (v ČR jsou přidělovány a tedy není potřeba), odstraňování CO₂ 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

$$O_c = \frac{m_p - m_v}{m_p} = \frac{c_p - c_v}{c_p}$$

m_p, c_p hmotnost resp. koncentrace přivedených tuhých zbytků
 m_v, c_v hmotnost resp. koncentrace odvedených tuhých zbytků

Ve velkých elektrárnách dosahovaná odlučivost $O_c \geq 0.99$

Křivka tuhých zbytků ve spalinách:

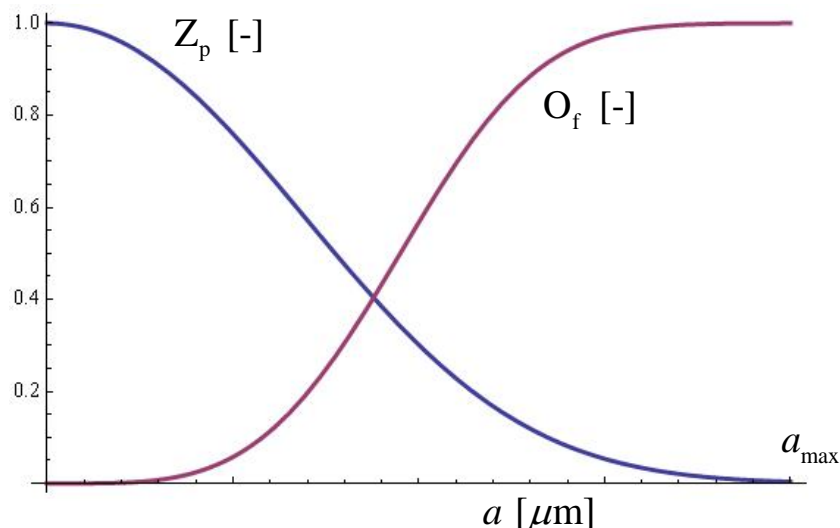
Vyjadřuje kolik hmotnostních procent je částic s velikostí zrn větší než a :

$$Z_p = Z_p(a)$$

Frakční odlučivost:

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

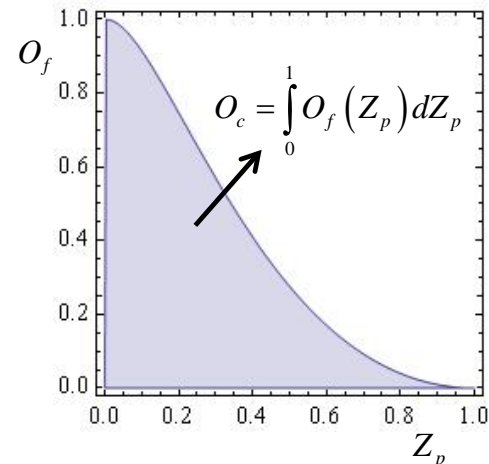
$$O_f = O_f(a)$$



Odlučovače

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

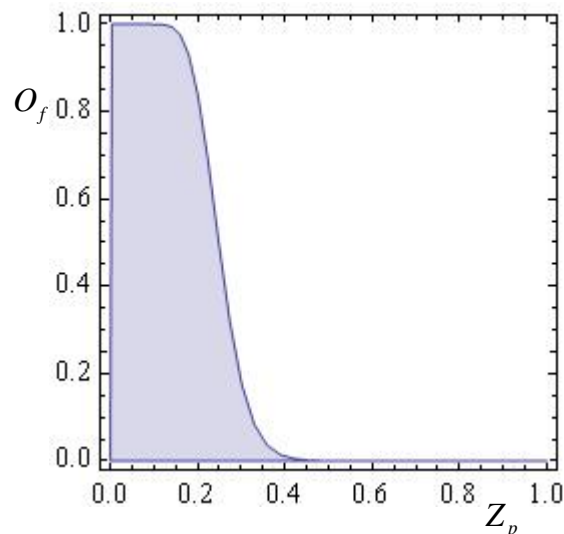
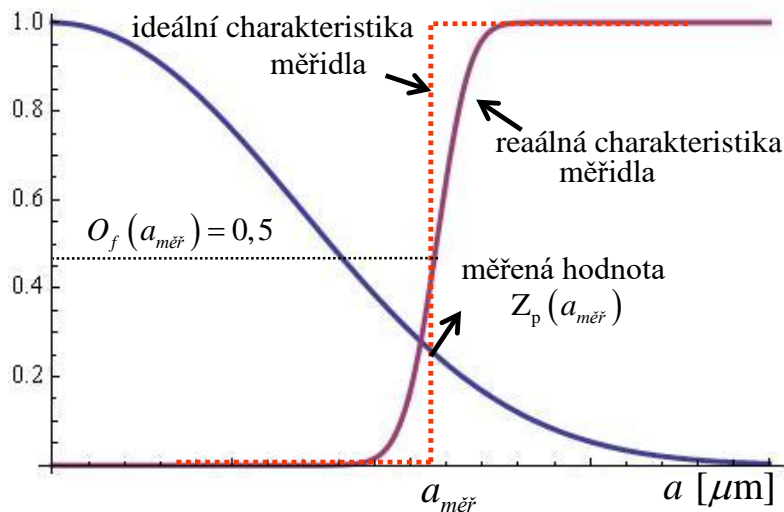
$$O_c = \int_0^1 O_f(Z_p) dZ_p$$



Měřené frakce TZL ve spalinách:

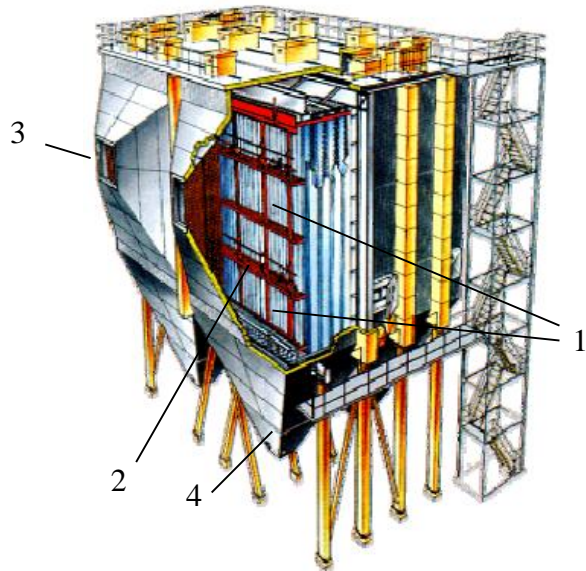
Měří se frakce PM10 a frakce PM2,5.

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.



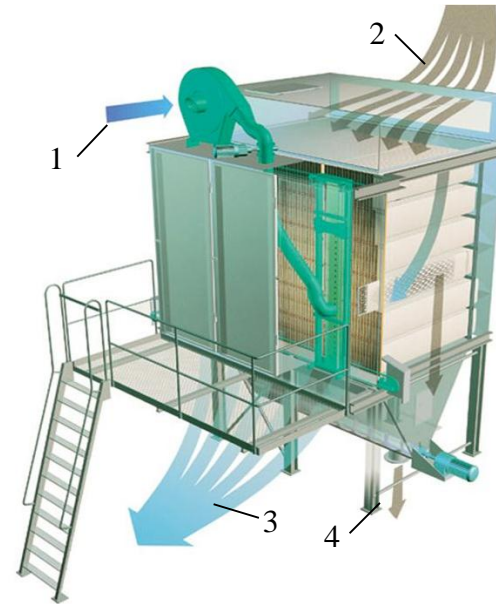
Na stejných principech probíhá měření uhlého prášku, vápence, ...

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 SO₂:

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 SO₂ na dále využitelný nebo nevyužitelný produkt a zpět do procesu se nevrací

mokrý - SO₂ se zachycuje v kapalině nebo vodní suspenzi aktivní látky

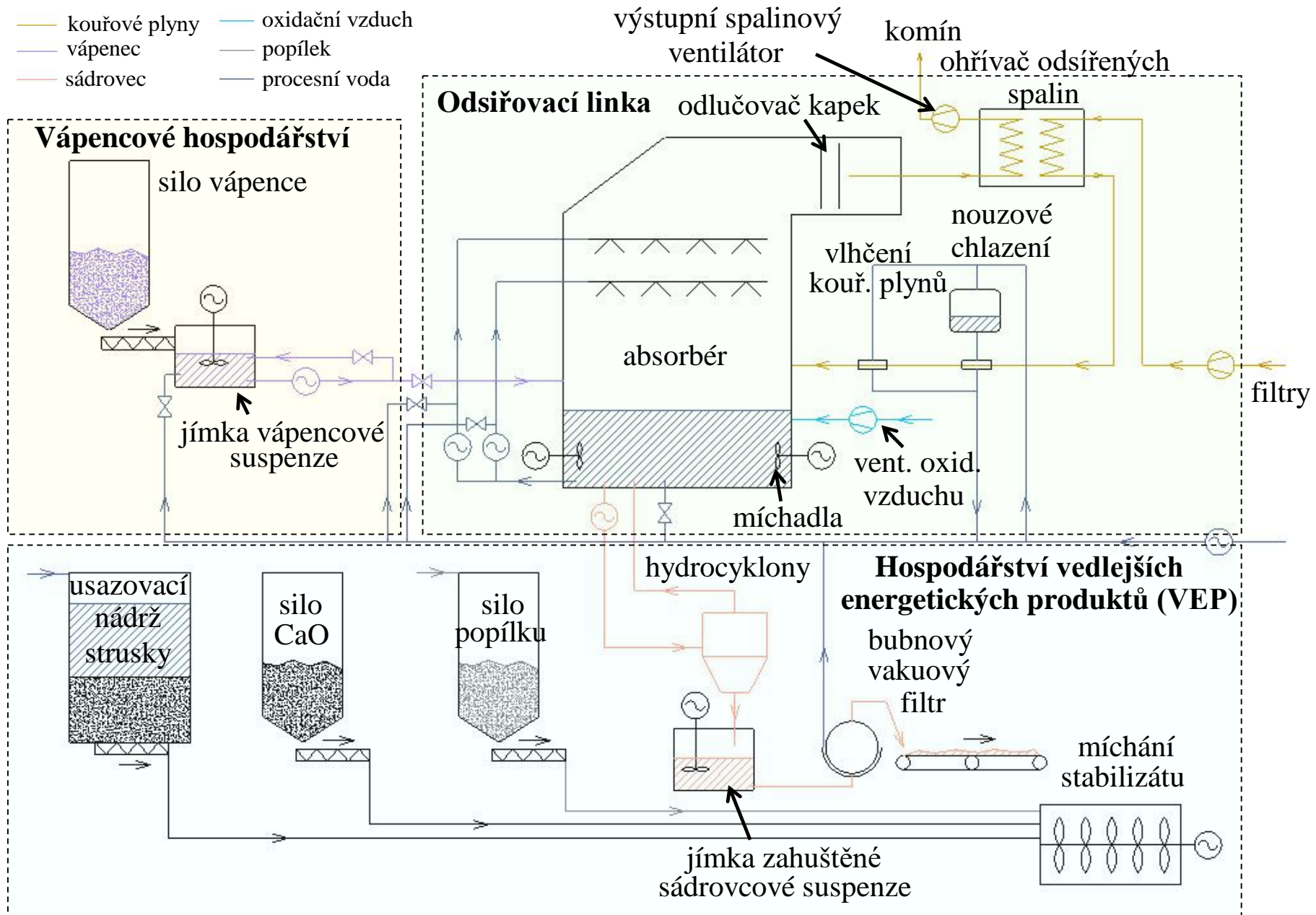
polosuchý - aktivní látka je ve formě vodní suspenze vstřikována do proudu horkých spalin, kapalina se poté odpaří a produkt reakce se zachycuje v tuhém stavu

suchý - SO₂ 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 (CaSO₃), který dále oxiduje na dihydrát síranu vápenatého (CaSO₄.2H₂O). Vzniklý produkt - tzv. *energósádovec* – lze výhodně využít pro výrobu sádry, stavebních dílů, cementu a stabilizátu.

Mokrý vápencová vypírka

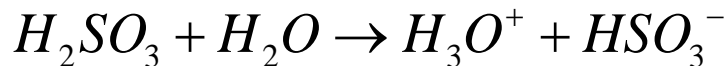
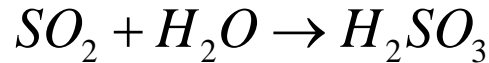
- kouřové plyny
- vápenec
- sádrovec
- oxidační vzduch
- popílek
- procesní voda



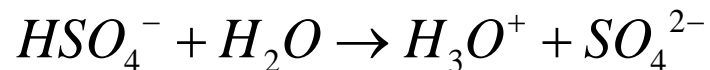
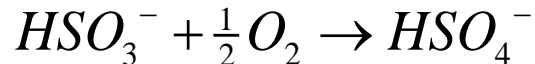
Mokrý vápencová vypírka

Reakce probíhající v odsiřovací jednotce:

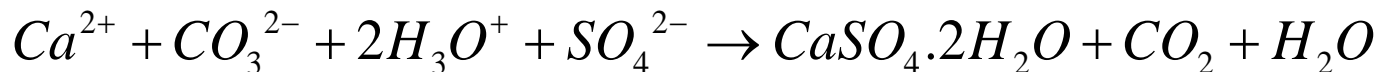
Suspenze absorbentu absorbuje většinu SO_2 dle následujících rovnic:



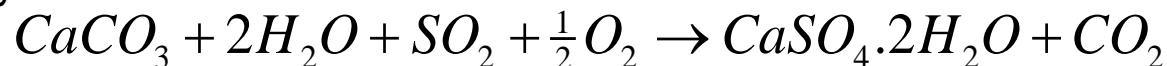
Část HSO_3^- vzniklého absorpcí SO_2 se oxiduje ve sprchové části absorbéru kyslíkem, který je ve spalinách a zbytek HSO_3^- se zcela oxiduje v reakční nádrži absorbéru přiváděným oxidačním vzduchem dle následujících rovnic:



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. $MgCO_3$)

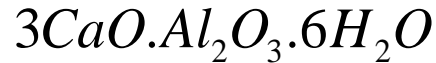
$$\dot{m}_{\text{vápenec}} = \frac{\dot{m}_{CaCO_3}}{r \cdot C_{CaCO_3}}$$

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

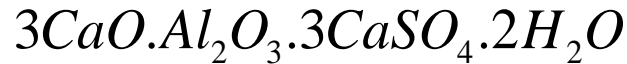
Mokrý vápencová vypírka

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 NO₂
- při teplotách pod 900 °C vzniká i oxid dusný N₂O

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

Metody snížení NO_x:

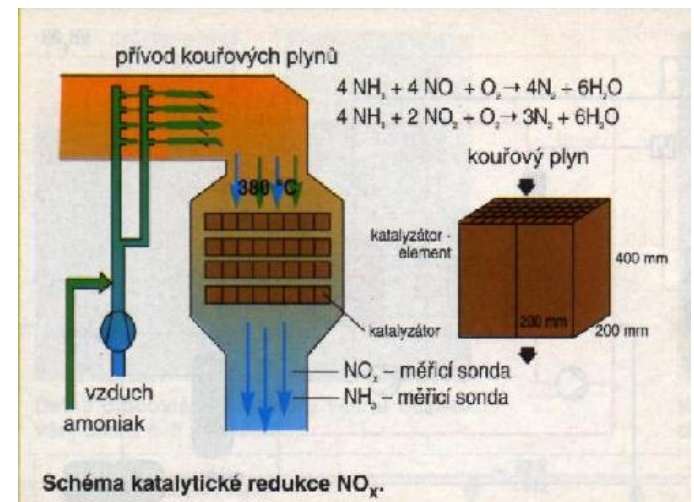
Primární

kdy se snažíme zabránit jejich vzniku řízením průběhu spalování a konstrukcí kotlů (lze snížit emise NO_x 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_x ve spalinách lze snížit o 80-90 %



Technologie Carbon Capture & Storage

CCS technologie:

post combustion capture

spalování paliva se vzduchem a následná separace CO₂ ze spalin

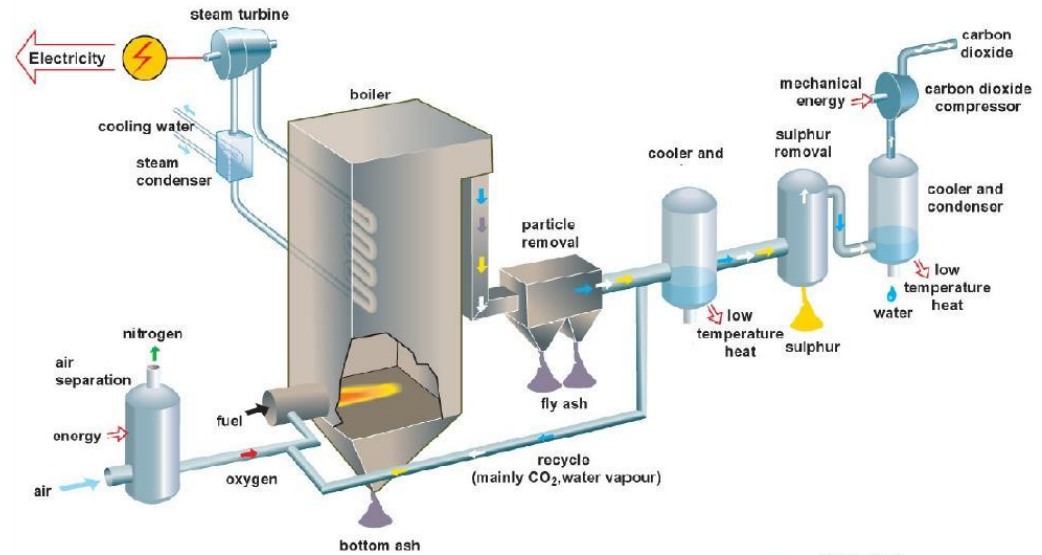
oxy-fuel technology

spalování paliva s čistým kyslíkem a následná separace CO₂ ze spalin

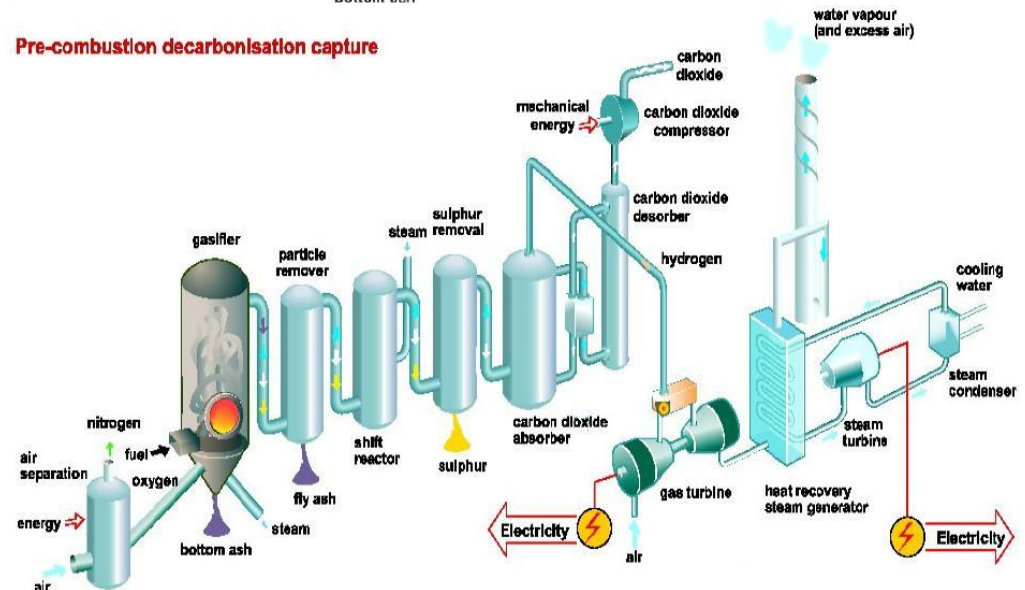
pre combustion capture

zplynování paliva před spálením, konverze CO z plynu na CO₂, separace CO₂ a vodíku a následné spalování čistého vodíku (IGCC – Integrated Gasification Combined Cycle).

O₂/CO₂ 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 CO₂ způsobené přepravou a skladováním!

Kapacita a budoucí využití potenciálních úložišť

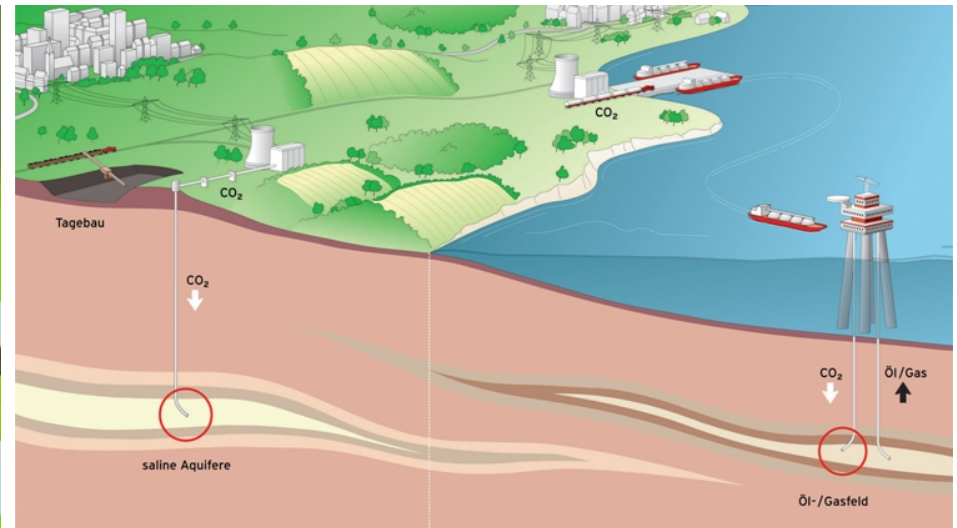
- v současné době je odhadována na zhruba 70-násobek celosvětové roční produkce CO₂,
- po injektáži CO₂ budou bývalá ložiska v budoucnosti nevyužitelná pro další případnou těžbu

Bezpečnostní rizika

- CO₂ bude v určité míře unikat podél geologických zlomů
- stlačený CO₂ může způsobit mikrozemětřesení s rizikem narušení nadložních vrstev
- objemová koncentrace CO₂ okolo 8% zabíjí člověka do 30-60 minut



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



Ukládání CO₂ do podzemních ložisek

Glosa k přednášce č. 8

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 ⁻¹]	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 O₂ obj. ve spalinách):

TZL	SO ₂
30 mg.m ⁻³	200 mg.m ⁻³

1. Rozhodněte, zda elektrárna bude plnit emisní limity pro TZL a SO₂
2. Vypočítejte hmotnostní toky uhlí, vápence, produkci sádrovce a emise CO₂
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 CO₂)

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 oksyličení v absorbéru plně hrazenou přivedeným oxidačním vzduchem