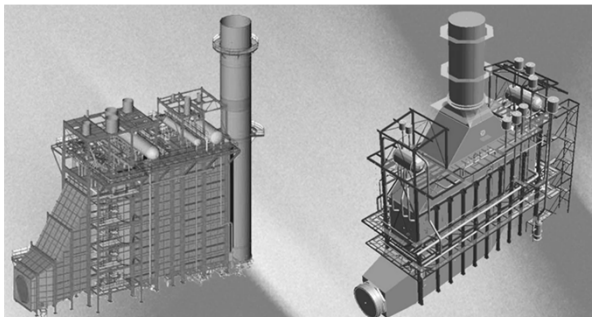


## Kotel na odpadní teplo pro PPC



1

## Kotel na odpadní teplo pro PPC

### Označení

- KNOT (Doc. Kolovratník)
- HRSG = Heat Recovery Steam Generator

### Funkce

- dochladiť spaliny odcházející z plynové turbíny
- vyrobit páru pro pohon parní turbíny

### Dvě základní koncepce

- bez přitápění – pro PPE
- s přitápěním – teplárenské aplikace

2

## Zemní plyn

- je nejčastěji užívaným palivem pro pohon plynových turbín
- typické složení a výhřevnost zemního plynu

CH <sub>4</sub>	0,980830
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,005910
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,002020
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,000791
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,000212
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,000172
CO <sub>2</sub>	0,001380
N <sub>2</sub>	0,008680
Výhřevnost plynu	35 900 kJ/Nm <sup>3</sup>
	46 800 kJ/kg

3

## Spalování zemního plynu

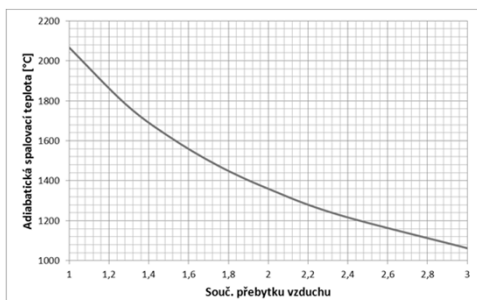
- výsledky stechiometrického výpočtu

	Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup>	Nm <sup>3</sup> /kg
<b>Spotřeba vzduchu :</b>		
minimální objem kyslíku	2,0009	2,7401
minimální objem suchého vzduchu	9,5282	13,0792
minimální objem vlhkého vzduchu	9,6418	13,2885
<b>Vzniklé spaliny :</b>		
objem oxidu uhličitého	1,0022	1,3680
objem oxidu siřičitého	0,0000	0,0000
objem dusíku	7,4454	10,2299
objem vzácných plynů	0,0877	0,1205
objem suchých spalin	8,5353	11,7185
objem vodní páry ve spalinách	2,1075	2,9411
objem vlhkých spalin	10,6428	14,6596

4

## Spalování zemního plynu

Závislost adiabatické spalovací teploty na součiniteli přebytku vzduchu



5

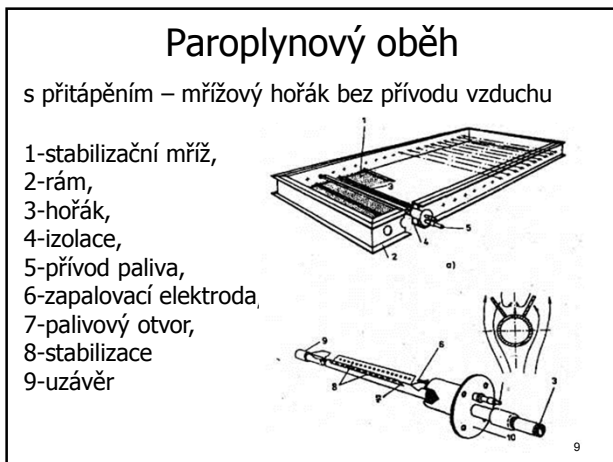
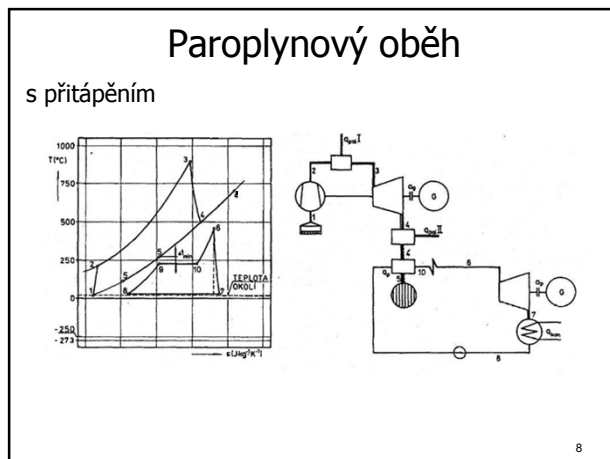
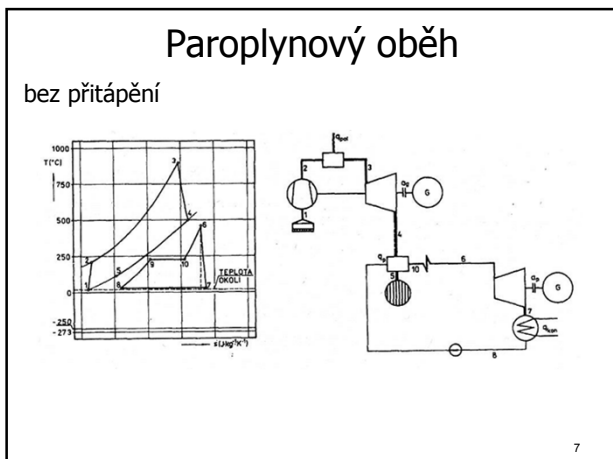
## Spalování zemního plynu

složení spalin na výstupu ze spalovací turbíny

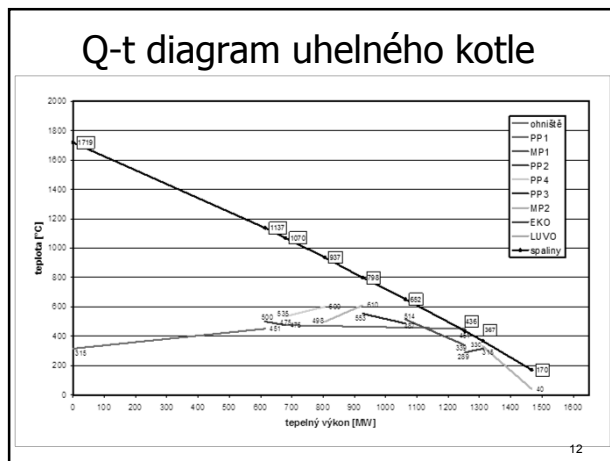
Teplota	550 - 600 °C	
Tlak	max. 0,03500 bar	
Složení	N <sub>2</sub>	74,59 %vol.
	O <sub>2</sub>	12,62 %vol.
	CO <sub>2</sub>	3,73 %vol.
	H <sub>2</sub> O	8,19 %vol.
	Ar	0,87 %vol.

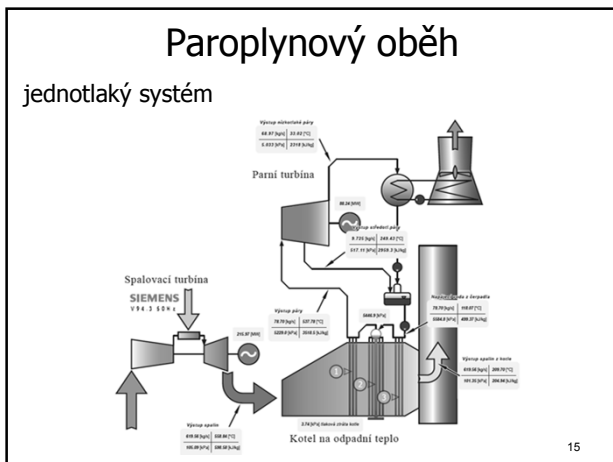
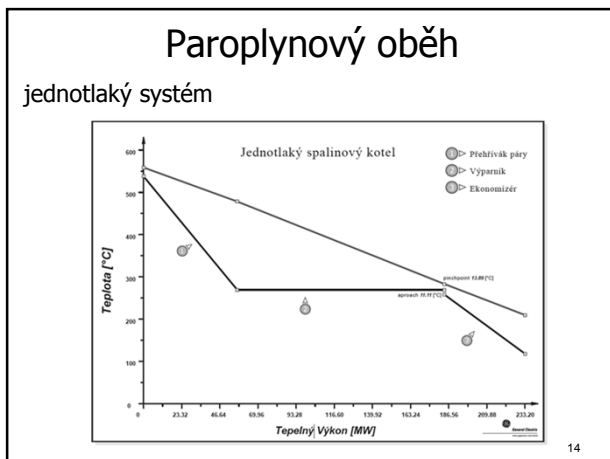
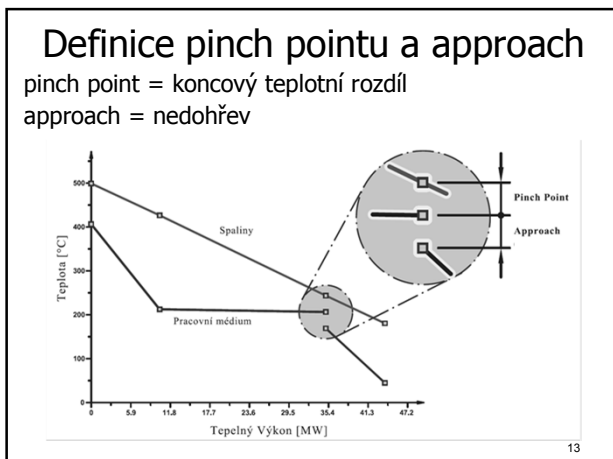
obsah O<sub>2</sub> = 12,62 % odpovídá spalování s přebytkem vzduchu ~ 2,35

6



- ### Specifika kotle na odpadní teplo
- kotel nemá spalovací zařízení
  - rozdíly proti klasickým kotlům jsou
    - výrazně nižší teplotní úroveň spalin v kotli => důsledky
      - nižší parametry páry
      - pokles teplotních spádů na výhřevných plochách
      - použití žebrovaných trubek
      - obvykle vícetlaký systém
    - přísně protiproudé uspořádání a zapojení výhřevných ploch v kotli
    - ryze konvekční charakteristika všech ploch
    - chybí ohřívák vzduchu => horší podmínky pro dochlazení spalin za kotlem





- ### Teplotní poměry v HRSG
- určení optimálních teplotních poměrů je složitá úloha
  - výsledek je funkcí řešení
    - energetických bilančních rovnic
    - podmínek přenosu tepla ve spalnovém kotli
  - do výpočtu vstupuje
    - hmotnostní průtok spalin z plynové turbíny  $M_s$
    - hmotnostní průtok vody vstupující do kotle  $M_w$
    - jejich podíl  $\gamma = M_w / M_s$
    - teploty médií v uzlových bodech
- 16

### Tepelná bilance HRSG

$$c_p \cdot (t'_4 - t'_5) = \gamma \cdot (i_6 - i_8)$$

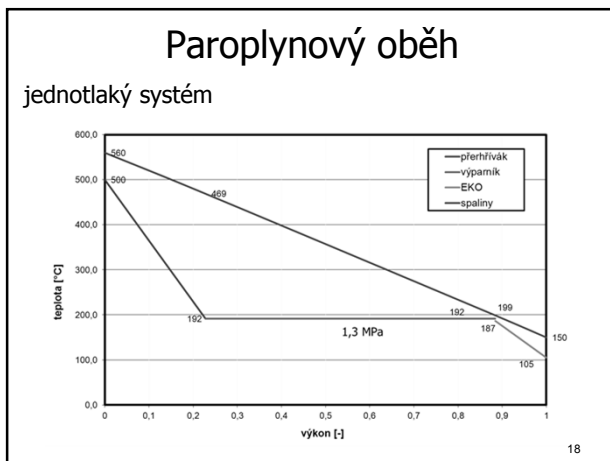
$$c_p \cdot (t'_4 - t'_5) = \gamma \cdot (i_6 - i_9)$$

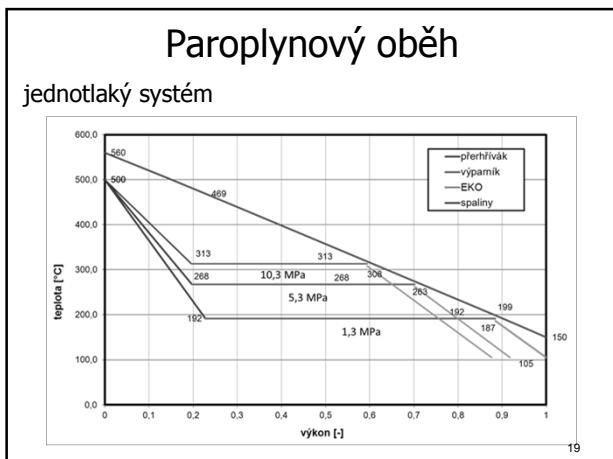
$$c_p \cdot (t'_5 - t'_5) = \gamma \cdot (i_9 - i_8) = \gamma \cdot c_w \cdot (t_9 - t_8)$$

současně musí platit  
 $(t_5 - t_8); (t'_5 - t_9); (t_4 - t_6) > \Delta t_{min}$

- $\Delta t_{min}$  má rozhodující vliv na velikost výhřevných ploch
- $\Delta t_{min}$  se volí 5 až 40 °C
- teplota  $t_5$ 
  - určuje velikost komínové ztráty, a tedy i účinnosti HRSG
  - je funkcí  $\gamma$  a  $\Delta t_{min}$

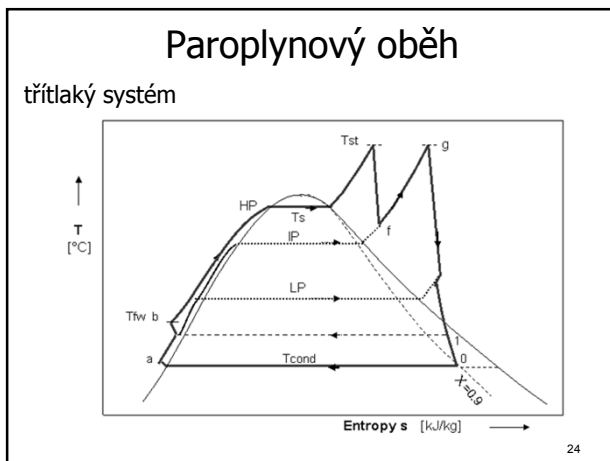
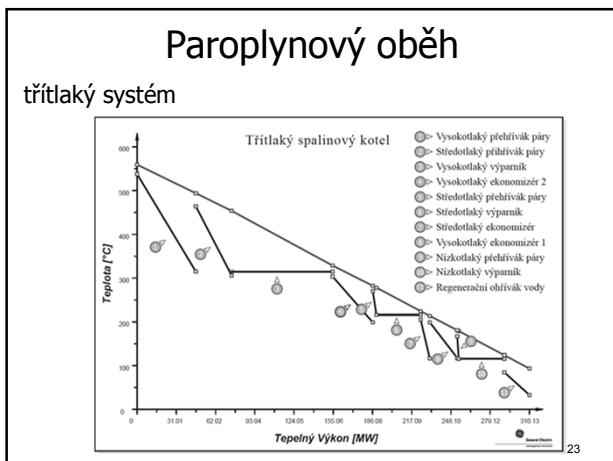
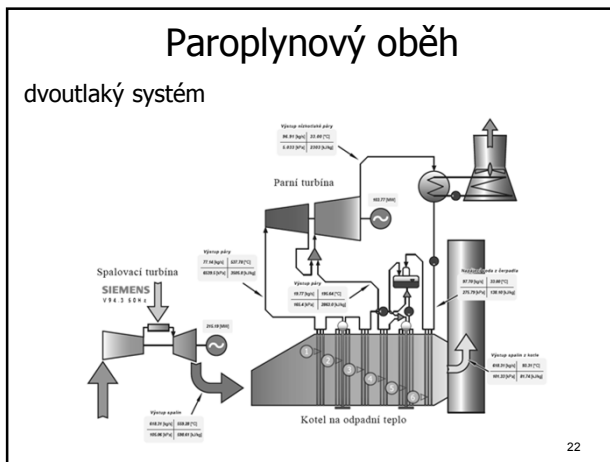
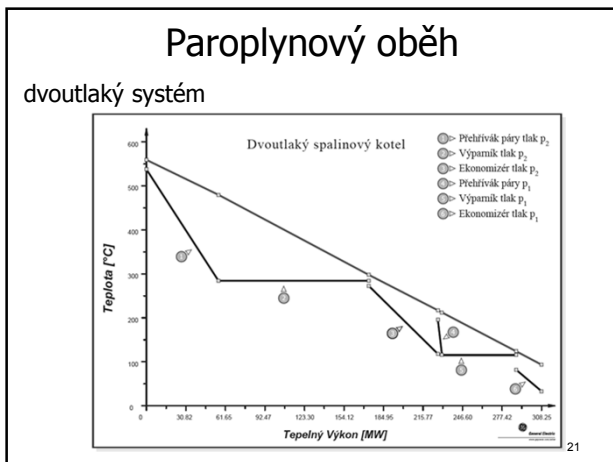
17

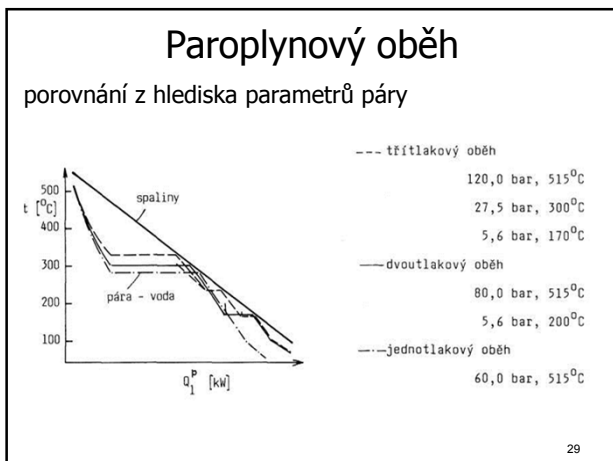
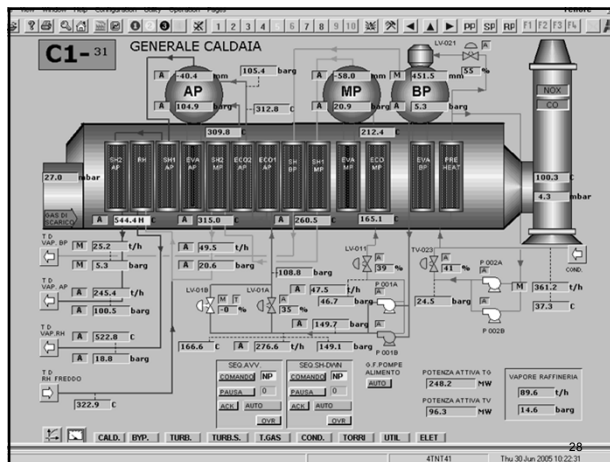
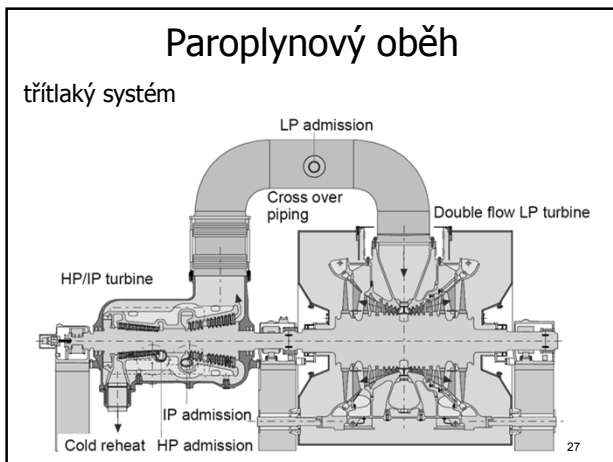
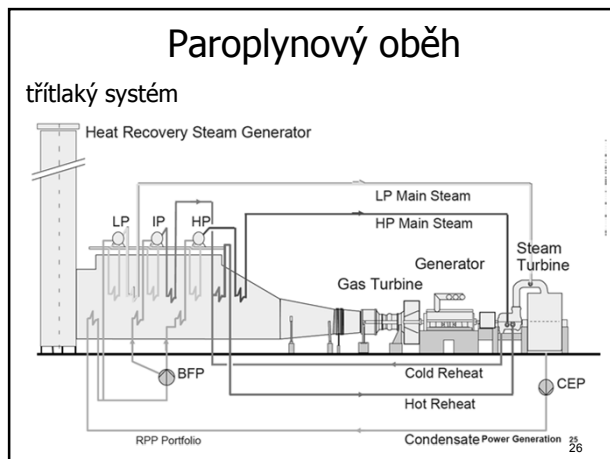
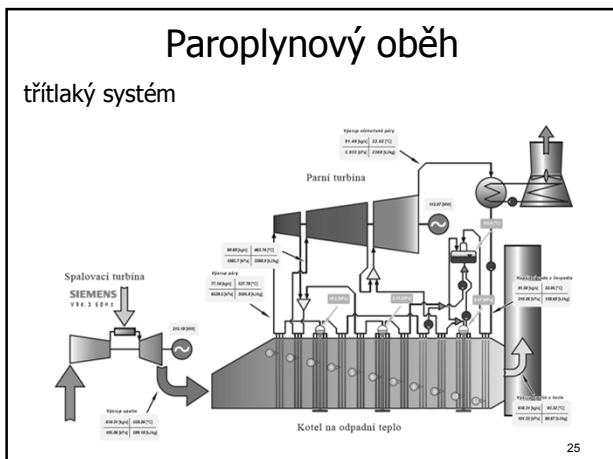




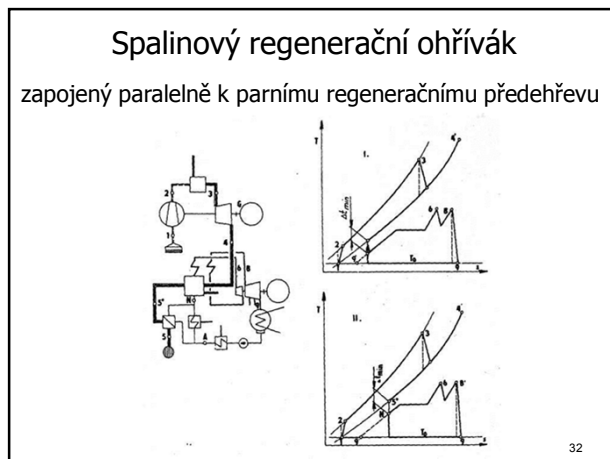
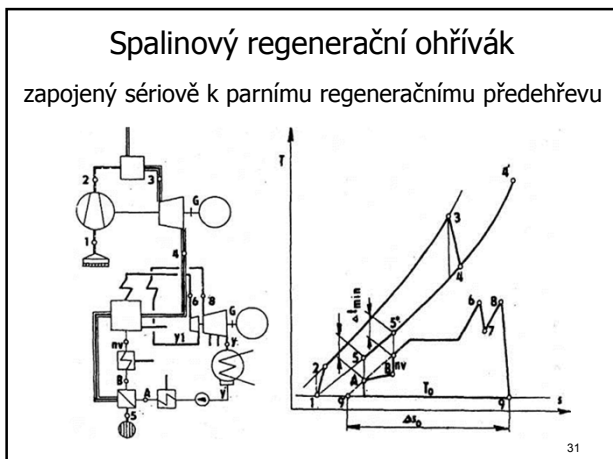
### Tepelná bilance HRSG

- při zmenšování  $\gamma$  teplota  $t_5$  roste
- při  $\gamma = 0$  oběh přechází v oběh spalovací turbíny
- při daných  $t_4$ ,  $\gamma$  a  $\Delta t_{min}$  dostaneme malou hodnotu komínové ztráty
  - v případě jednotlakového systému nízkými parametry parního oběhu –  $t_9$
  - použitím dvoutlakového oběhu

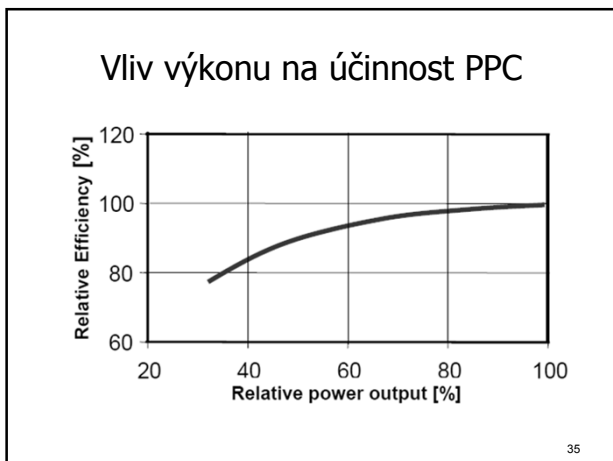
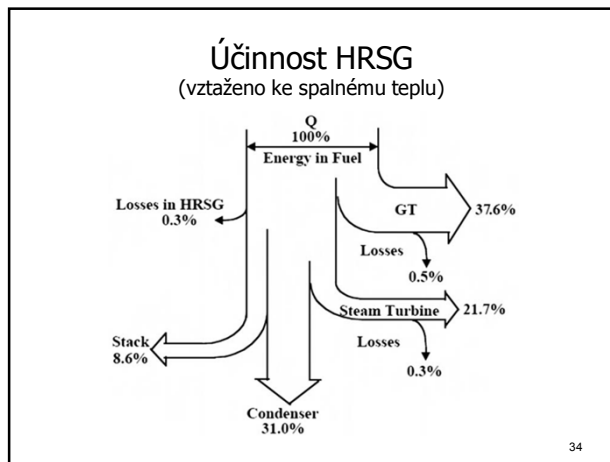




- ### Koncová teplota spalin
- HRSG nemá ohřívák vzduchu
  - koncovou plochou kotle je EKO
  - při  $t_{Nmin} = 105 \text{ °C}$  by byla koncová teplota spalin příliš vysoká a účinnost kotle nízká
  - pro lepší dochlazení spalin se za EKO řadí ještě spalinový regenerační ohřívák napájecí vody, který je zapojen k parnímu regeneračnímu ohřevu
    - sériově
    - paralelně
- 30

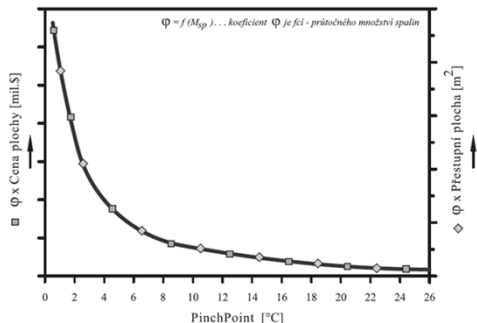


- ### Účinnost HRSG
- účinnost závisí na
    - vstupní teplotě spalin
    - výstupní teplotě spalin
    - přebytku spalovacího vzduchu
    - velikosti a teplotě povrchu kotle
- Příklad:**
- vstupní teplota spalin 580 °C
  - výstupní teplota spalin 90 °C
  - přebytek spalovacího vzduchu 2,35
  - ztráta sdílením tepla do okolí 0,5 %
  - účinnost HRSG vztažená k teplu spalin na vstupu 88 %
  - účinnost HRSG vztažená k výhřevnosti plynu 93,5 %
  - účinnost samotného HRSG se obvykle negarantuje a není předmětem přejímacího řízení – garantuje se účinnost PPC
- 33



- ### Optimalizace návrhu HRSG
- složitá úloha s velkým počtem stupňů volnosti
  - optimalizovanými parametry jsou
    - koncová teplota spalin
    - počet tlakových hladin
    - pinch point a nedohřev na výhřevných plochách
    - dělení a řazení výhřevných ploch
- Provádí se pomocí výpočtových softwarů
- Thermoflow (GT PRO)
  - Gate Cycle (GE)
  - Tempo Cycle (volně šiřitelný)
- 36

### Vliv pinch pointu na velikost a cenu plochy



37

### Konstrukční provedení HRSG

#### Konstrukční varianty

- horizontální uspořádání
- vertikální uspořádání

#### Provedení výparníku

- bubnové s přirozenou nebo nucenou cirkulací
- průtočné

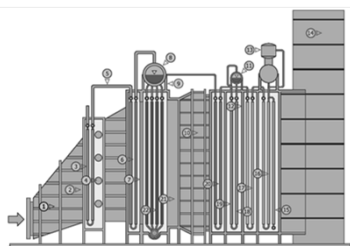
#### Pracovní tlak

- podkritický
- nadkritický

38

### Horizontální HRSG

- výparník s přirozenou cirkulací
- je z technického hlediska jednodušší



- |                                   |                                   |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| ① Vstup spalin z plynové turbíny  | ⑩ Nosná konstrukce kotle          |
| ② Spalinový kanál                 | ⑪ Odplyňovací nádrž               |
| ③ Vysokotlaký přehřívák páry      | ⑫ Komin                           |
| ④ Plynové hořáky                  | ⑬ Regenerační obřívk              |
| ⑤ Vysokotlaký parní potrubí       | ⑭ Nizkotlaký výparník             |
| ⑥ Vysokotlaký přehřívák páry      | ⑮ Vysoko a středotlaký ekonomizér |
| ⑦ CO katalyzátor                  | ⑯ Středotlaký výparník            |
| ⑧ Vysokotlaký buben               | ⑰ Středotlaký přehřívák páry      |
| ⑨ Nosná konstrukce kotle          | ⑱ Vysokotlaký ekonomizér          |
| ⑫ SCR katalyzátor NO <sub>x</sub> | ⑲ Vstup N <sub>2</sub> do spalin  |
| ⑬ Středotlaký buben               | ⑳ Vysokotlaký výparník            |

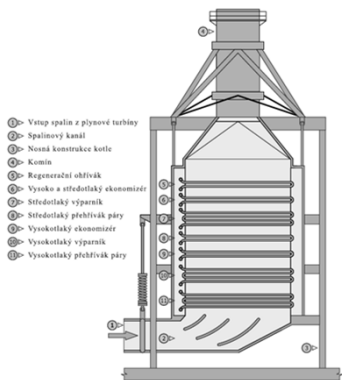
39

### Horizontální HRSG



### Vertikální HRSG

- výparník s nucenou cirkulací
- vhodné pro případy s prostorovým omezením
- ohyb proudu spalin před vstupem je zdrojem větší nerovnoměrnosti proudění v prvních plochách



- |                                   |
|-----------------------------------|
| ① Vstup spalin z plynové turbíny  |
| ② Spalinový kanál                 |
| ③ Nosná konstrukce kotle          |
| ④ Komin                           |
| ⑤ Regenerační obřívk              |
| ⑥ Vysoko a středotlaký ekonomizér |
| ⑦ Středotlaký výparník            |
| ⑧ Středotlaký přehřívák páry      |
| ⑨ Vysokotlaký ekonomizér          |
| ⑩ Vysokotlaký výparník            |
| ⑪ Vysokotlaký přehřívák páry      |

41

### Vertikální HRSG



### Horizontální x vertikální konstrukce

Výhody vertikálního provedení

- menší zastavěný půdorys
- menší velikost kotle z důvodu použití trubek menšího průměru
- menší citlivost na vznik parních zátek v EKU při najíždění

Výhody horizontálního provedení

- rovnoměrnější průřezové rozdělení spalin za GT
- přirozená cirkulace nevyžaduje čerpadlo – platí do tlaku 100 bar
- vertikální orientace trubek ve výparníku podporuje cirkulaci v tepelně více zatížených trubkách

Zásadní rozdíl není – výrobci nabízejí obě provedení  
Celosvětově převažují instalace horizontálních kotlů s přirozenou cirkulací

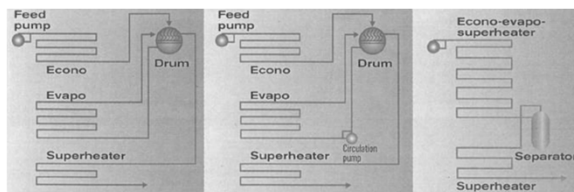
43

### System výparníku HRSG

s přirozenou cirkulací

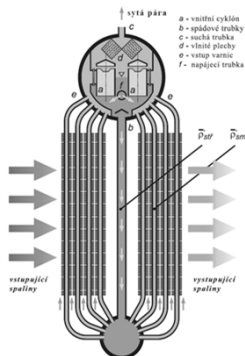
s nucenou cirkulací

průtočný



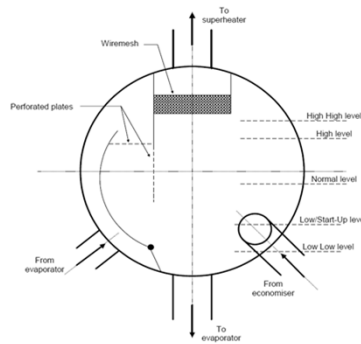
44

### Výparník s přirozenou cirkulací



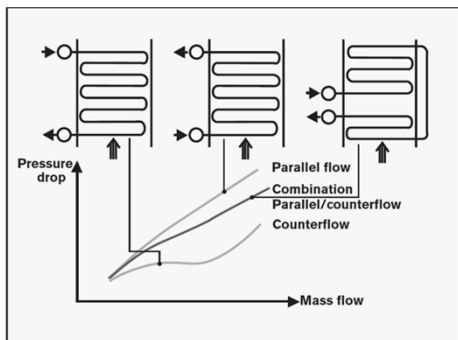
45

### Výparník s přirozenou cirkulací



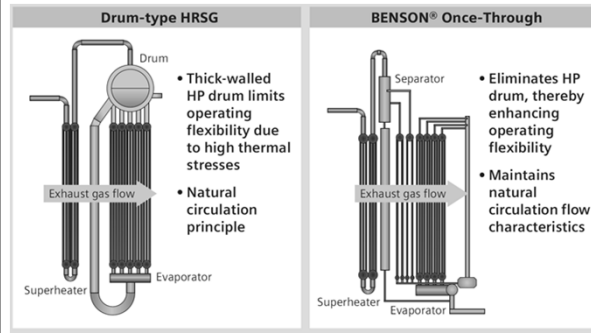
46

### Výparník s nucenou cirkulací



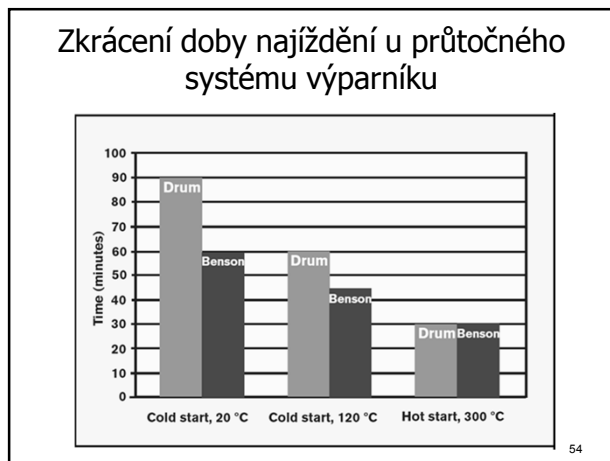
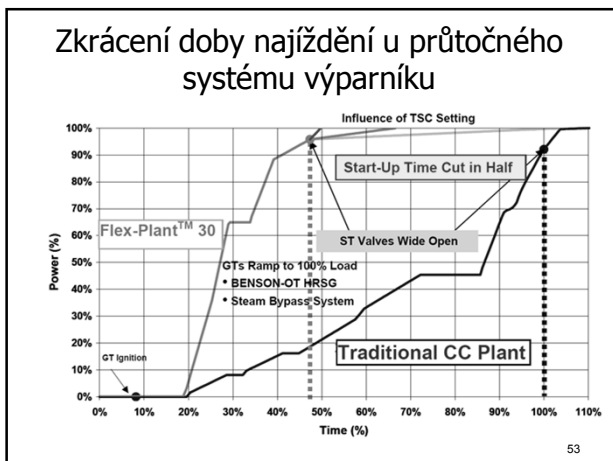
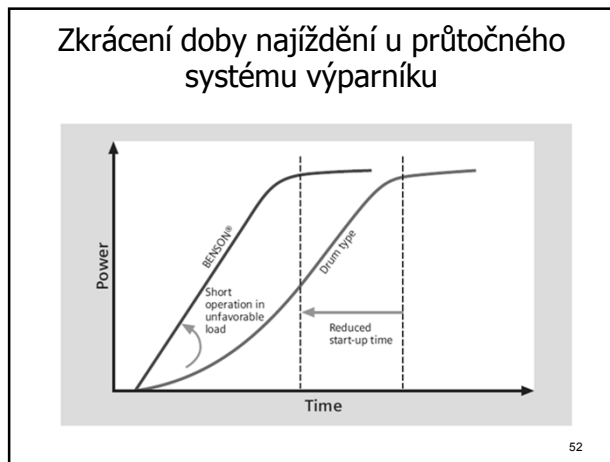
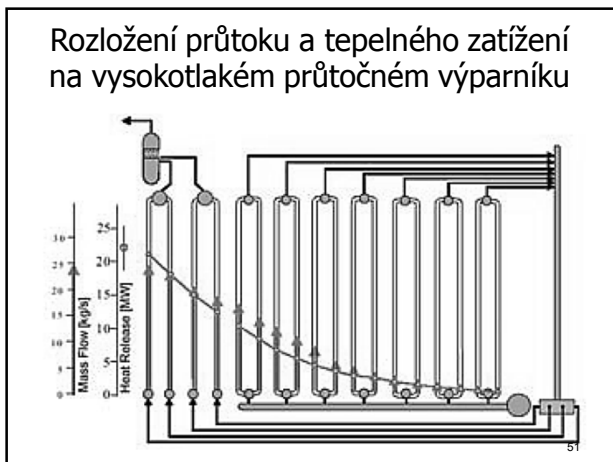
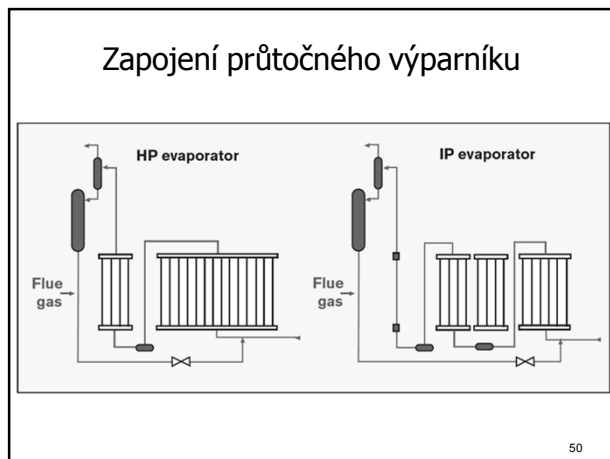
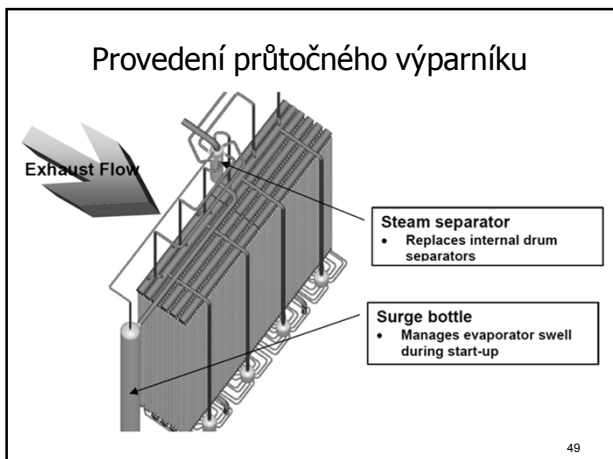
47

### Přechod z cirkulačního na Bensonův průtočný systém výparníku



48





### Cirkulační x průtočný výparník

Nevýhody cirkulačního systému výparníku

- vyžaduje buben
- s rostoucím tlakem (nad 100 bar) klesá cirkulační číslo – riziko špatného chlazení trubek
- menší provozní pružnost v důsledku většího vodního objemu

Výhody průtočného systému výparníku

- odpadá buben
- neexistuje tlakové omezení
- zkrácení doby pro najíždění a změnu výkonu

55

### Nadkritický HRSG

Podmínkou výroby páry s nadkritickým tlakem v HRSG je

- užití průtočného systému výparníku
- vyšší teplota spalin na výstupu z GT

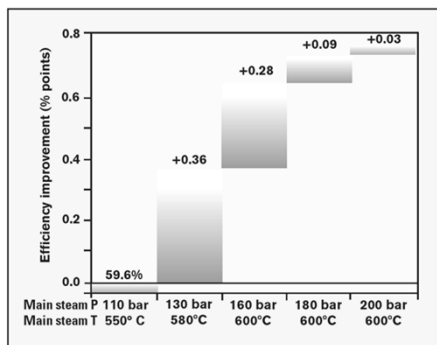
Motivace

- zvýšení účinnosti bloku
- zjednodušení koncepce HRSG

Z pohledu klasických bloků se jedná pouze o mírně nadkritické parametry

56

### Vliv parametrů páry na účinnost PPC

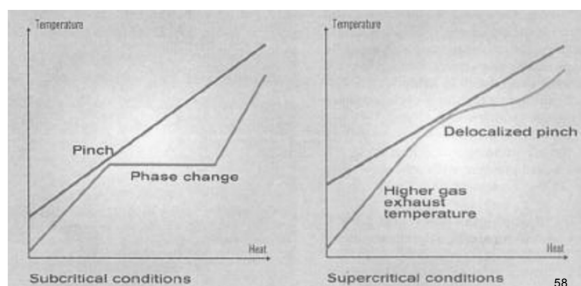


57

### Nadkritický HRSG

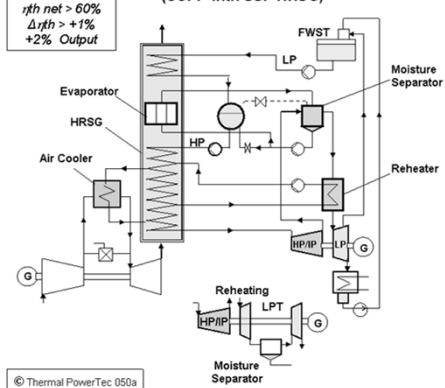
přechodem na nadkritický tlak

- mizí pinch point na začátku výparníku
- roste teplota spalin za VT



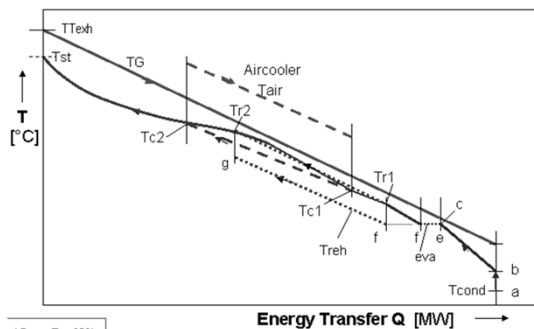
58

### New Combined Cycles Power Plant with a single-supercritical-pressure HRSG (CCPP with SSP HRSG)



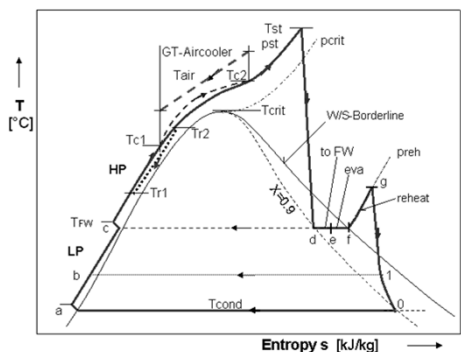
59

### Nový jednotlakový nadkritický HRSG



60

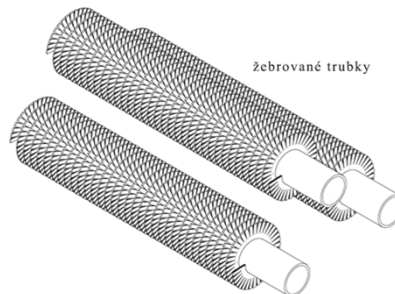
### Nový jednotlakový nadkritický HRSG



61

### Provedení výhřevných ploch HRSG

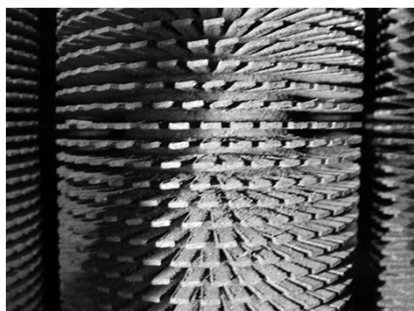
- základním stavebním prvkem je žebrovaná trubka



62

### Provedení výhřevných ploch HRSG

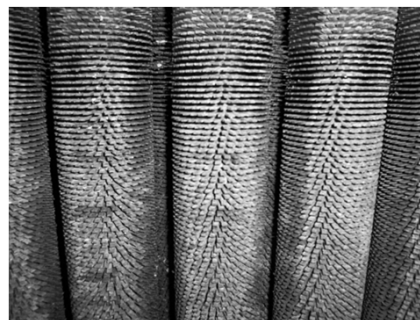
- základním stavebním prvkem je žebrovaná trubka



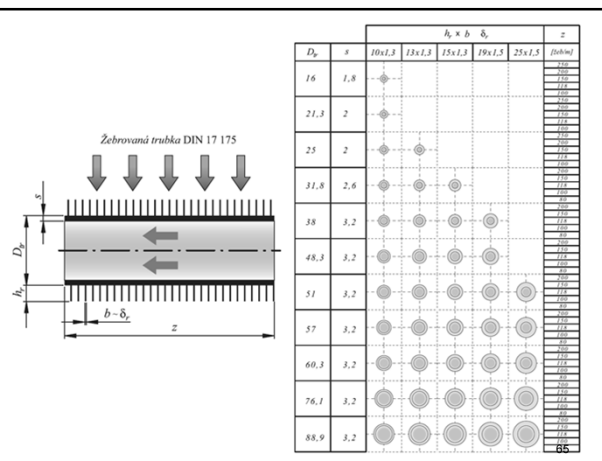
63

### Provedení výhřevných ploch HRSG

- základním stavebním prvkem je žebrovaná trubka



64



65

### Provedení stěn HRSG

Stěny HRSG jsou většinou nechlazené  
Dvě možnosti

- studené provedení s vnitřní izolací
- horké provedení s vnější izolací

Studené provedení stěn

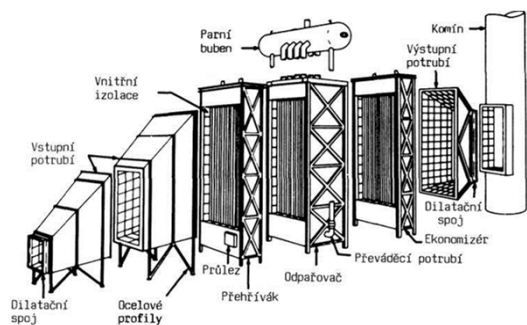
- výhodné při vysoké teplotě spalin za GT
- běžnější u kotlů s přirozenou cirkulací

Horké provedení stěn

- výhodné při nižší teplotě spalin za GT
- běžnější u vertikálních kotlů
- může trpět korozí na studeném konci

66

### Modulová koncepce HRSG



67

### Modulová koncepce HRSG



68

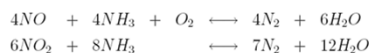
### Modulová koncepce HRSG



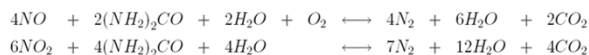
69

### DeNOx

- preferována metoda SCR
- redukčním činidlem je
  - čpavek – levnější



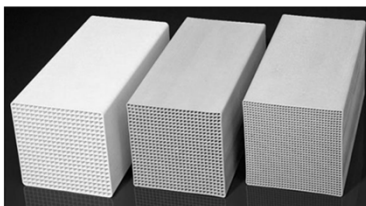
- močovina



70

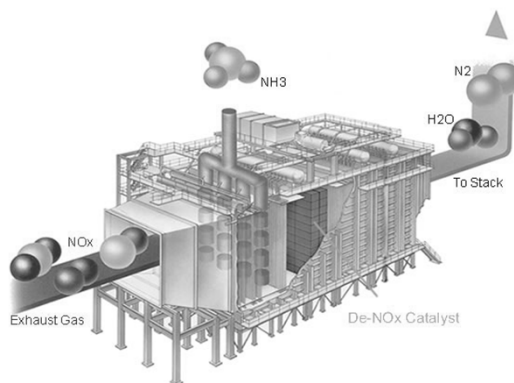
### DeNOx

- katalyzátorem jsou
  - oxidy těžkých kovů (Ti, V, W, Mo, Cu, Cr) (300 až 450°C)
  - zeolity – aluminosilikáty (350 až 600°C)
  - oxidy železa s obsahem fosforečnanů železa
  - aktivní uhlí (100 až 220°C)

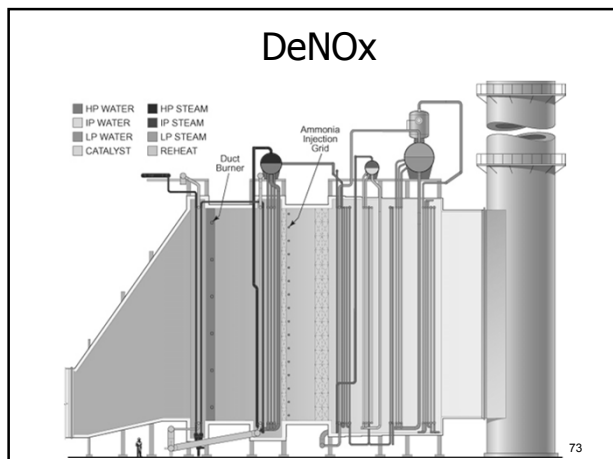


71

### DeNOx



72



### Provozní rizika HRSG

#### vysokoteplotní koroze

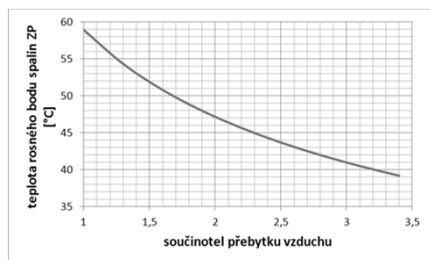
- u ZP při vhodné volbě materiálu riziko malé
- spalování oleje a mazutu
  - riziko vanadové koroze ( $V_2O_5$ ) na přehřívácích s teplotou nad  $500\text{ }^\circ\text{C}$
  - riziko sírové koroze v kombinaci s chlorem

74

### Provozní rizika HRSG

#### nízkoteplotní koroze

- u ZP riziko malé – nízká teplota rosného bodu spalin
- riziko roste při spalování sirnatých plynů nebo mazutu

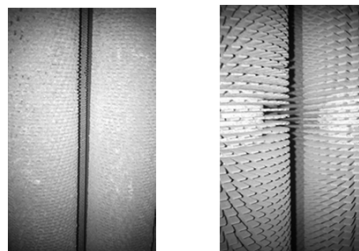


75

### Provozní rizika HRSG

#### zanášení výhřevných ploch

- u ZP riziko malé
- při spalování oleje zanášení žebrovaných trubek – je třeba volit větší rozteč žeber a plochy čistit



76