

## Využití odpadního tepla spalín

Cílem je dochladiť spaliny pod teplotní úroveň, s níž běžně opouštějí kotel, tedy řádově pod 150°C. S tím jsou spojeny dva zásadní problémy :

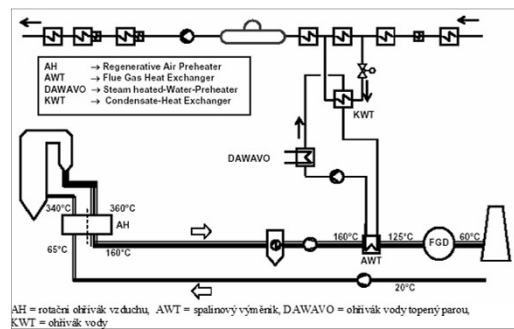
- teplota v dochlazovacím výměníku klesá pod úroveň teploty rosného bodu spalín
- při volbě vysoké teploty napájecí vody nelze již odpadní teplo spalín v rámci klasické koncepce kotle uplatnit

Nabízí se tyto možnosti

- uplatnění tepla z dochlazení spalín v rámci nízkotlakého či vysokotlakého regeneračního ohřevu napájecí vody (NTO)
- uplatnění tepla z dochlazení spalín pro předehřev vratné vody ze systému CZT

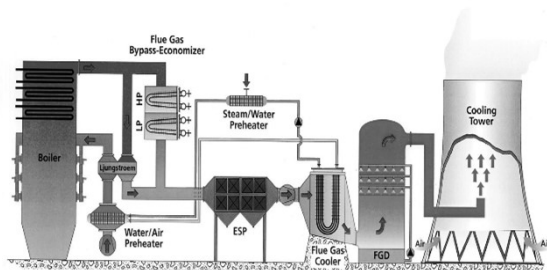
1

## System uplatnění odpadního tepla spalín v NTO



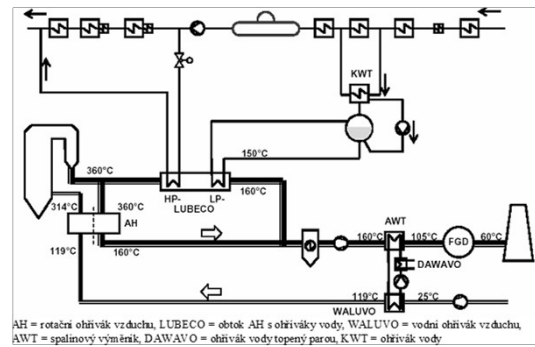
2

## Uplatnění odpadního tepla spalín v NTO a VTO System LUBECO



3

## System LUBECO



4

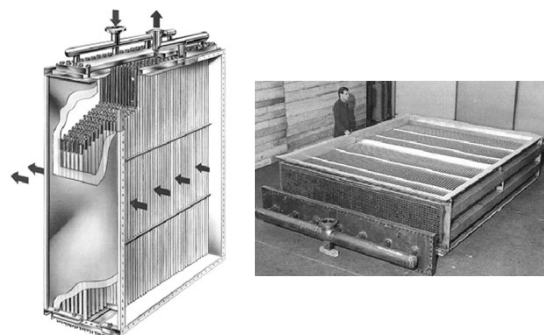
## Zjištěné aplikace

System uplatnění tepla z dochlazení spalín v NTO s použitím výměníků PFA byl aplikován na následujících zdrojích spalujících hnědé uhlí:

- Schwarze Pumpe, 2 x 816 MWel,
- Lippendorf, 2 x 933 MWel,
- Neurath, 2 x 640 MWel.

5

## Výměník spaliny / voda z PFA



6

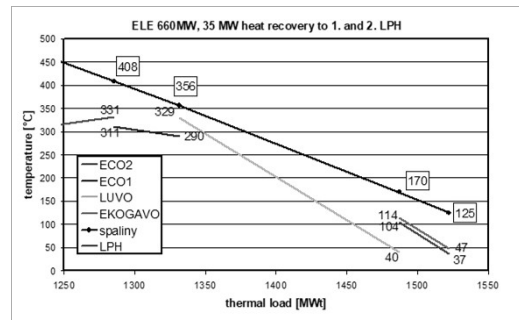
## Posouzení potenciálního zvýšení účinnosti oběhu využitím odpadního tepla spalin v NT regeneraci

Posouzení bylo provedeno porovnáním několika variant:

- aplikace tohoto systému neovlivní účinnost kotle, u všech porovnávaných variant bude uvažován kotel s koncovou teplotou spalin 170°C, tedy s účinností 91,24 %
- výkon dochlazovacího výměníku s U vlásečkami z PFA bude navržen pro výkon
  - 35 MW – dochlazení spalin ze 170°C na 125°C
  - 50 MW – dochlazení spalin ze 170°C na 105°C
- teplo bude převáděno do NT regenerace prostřednictvím vnořeného vodního okruhu, okruh bude připojen paralelně vždy přes dva NTO :
  - přes 1.a 2. NTO – ohřev turbinového kondenzátu z 37°C na 104 °C
  - přes 2.a 3. NTO – ohřev turbinového kondenzátu z 81°C na 129 °C

7

## Q-t diagram pro převod odpadního tepla spalin do 1. a 2. NTO, výkon 35 MW



8

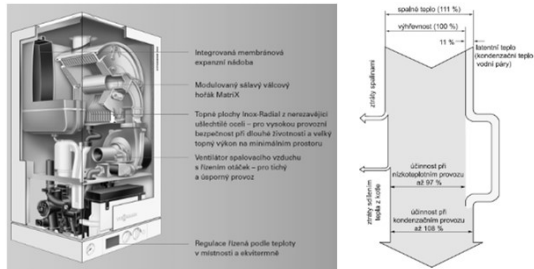
## Změna účinnosti oběhu a velikosti výhřevných ploch

Varianta		1	2	3	4	
	290°C bez dochlazení	290°C 35MW 1+2NTO	290°C 50MW 1+2NTO	290°C 35MW 2+3NTO	290°C 50MW 2+3NTO	
furnace	%	-8,2	-8,9	-9,2	-9,2	-9,6
SH1b	%	-12,5	-13,2	-13,5	-13,5	-13,9
SH3	%	-15,5	-16,1	-16,3	-16,3	-16,7
RH2	%	-20,8	-21,4	-21,6	-21,6	-22,0
SH2	%	-27,1	-27,8	-27,9	-27,9	-28,3
RH1	%	-40,3	-41,0	-41,1	-41,2	-41,6
ECO2	%	15,0	13,2	13,2	12,8	11,7
ECO1	%	15,0	12,8	12,9	12,4	11,0
LUVO	%	-2,4	-4,8	-4,6	-5,2	-6,7
LPH	%	-	0,0	67,2	106,5	337,0
účinnost bloku	%	45,19	45,47	45,61	45,59	45,75

9

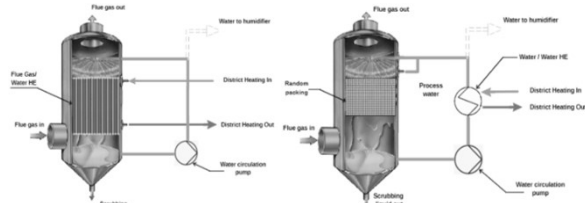
## Využití odpadního tepla ze spalin biomasových kotlů

- spaliny biomasových kotlů obsahují minimum SO<sub>2</sub> a tuhých částic
- nízká teplota turbinového kondenzátu či vratné vody z CZT umožňují spaliny ochladit až pod teplotu rosného bodu a využít i část skupenského kondenzačního tepla ze spalin
- kondenzační technika se dnes uplatňuje zejména u kotlů na plyn



## Využití odpadního tepla ze spalin biomasových kotlů

- pro využití odpadního tepla lze užít
  - dodatkový trubkový výměník – musí být z nerezů
  - sprchový kondenzátor – umožňuje částečný záchyt plynných i tuhých emisí

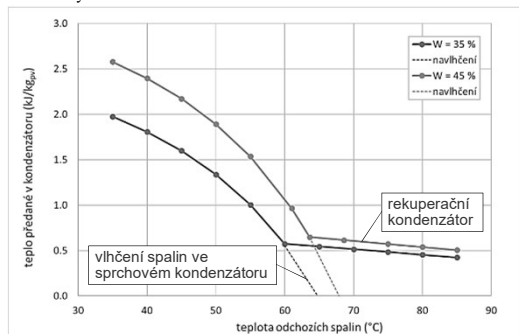


11

## Využití odpadního tepla ze spalin biomasových kotlů

Výkon získaný ve spalinovém kondenzátoru

- teplota spalin za kotlem 160 °C,  $\alpha = 1,35$
- obsah vody v biomase W = 35 a 45 %



12

### Využití odpadního tepla ze spalin biomasových kotlů

- zapojení se sprchovým kondenzátorem
- potenciální zlepšení účinnosti kotle až na 95 %
- podmínkou je dostatečně nízká teplota vratné vody ze systému (max. 55°C)

Do komína 1-25 mg/Nm<sup>3</sup> -53-55°C      Z kotle 250 mg/Nm<sup>3</sup> -200°C

- výhodou je snížení emise TZL z 250 na 25 mg/Nm<sup>3</sup>
- nevýhodou je nutnost čištění přebytečné vody – nutná
  - filtrace
  - neutralizace

Čistá voda do kanalizace

### Využití odpadního tepla ze spalin biomasových kotlů

Zapojení parou poháněného tepelného čerpadla do systému se sprchovým spalínovým kondenzátorem

- TČ snižuje teplotu chladicí vody a zvyšuje teplotní úroveň zísaného odpadního tepla

### Využití odpadního tepla ze spalin biomasových kotlů

rekuperaci tepla lze podpořit zvlhčováním spalovacího vzduchu

- spalovací vzduch se ohřeje a nasatí vlhkostí ve sprchovém zvlhčovači
- do kotle se tím rekuperuje teplo z dochlazovače
- zvýší se teplota rosného bodu spalin – v dochlazovači lze získat více tepla na vyšší teplotní úrovni

Heat Recovery, % of the boiler output  
Flue gas end temperature, °C

- Wood fuel
- Fuel moisture 50 %
- Flue gas O<sub>2</sub>=4, 5 %

15

### Využití odpadního tepla ze spalin biomasových kotlů

Zapojení spalínového sprchového kondenzátoru v kombinaci se zvlhčovačem spalovacího vzduchu

16

### Vlhčení spalovacího vzduchu u plynového kotle

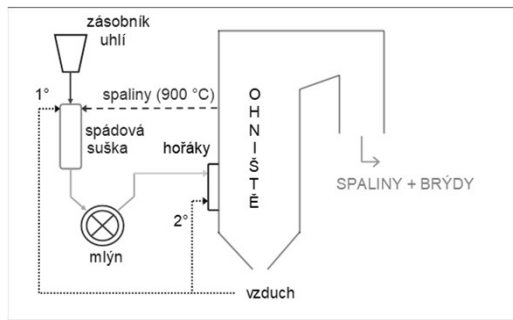
- za kotel je zapojen kondenzační výměník pro dochlazení spalin, který ohřívá vodu na teplotu cca 45 - 50 °C
- vodou se sprchuje spalovací vzduch, který se ohřeje a navlhčí
- kromě rekuperace tepla a zvýšení TRB je pozitivním efektem snížení emise NO<sub>x</sub> až o 80 %

## Perspektivní metody sušení pevných paliv

### PROČ sušení pevných paliv ?

- zvýšení výhřevnosti
- snazší vzněcování
- spalování při vyšší teplotě
- menší objem spalin
- menší kotel, filtr spalin a ventilátor
- nižší vlastní spotřeba

### Klasická metoda sušení horkými spalinami Uzavřený mlecí okruh



19

### Energetická náročnost sušení je značná

Většina dodané energie se ztrácí

#### Příklad

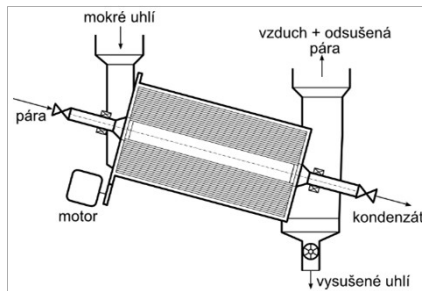
při obsahu vlhkosti v uhlí  $W^r = 0,3$   
ztráta činí přibližně 6 ÷ 8 % tepla v palivu

Pokud se podaří pro odstranění vody z paliva  
použít odpadní teplo, zvýší se využitelný  
energetický obsah paliva

20

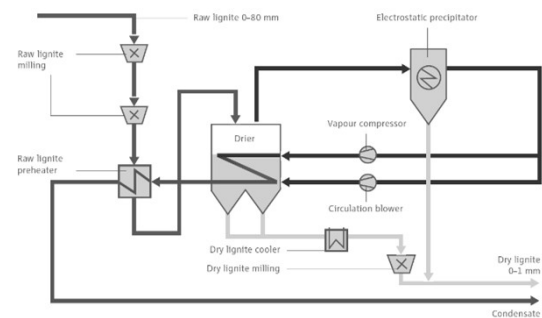
### Otevřená parní bubnová suška

- klasické řešení pro briketárny – palivový kombinát Vřesová
- uhlí se přivádí do trubek shora a posouvá se rotací bubny
- syťá páry kondenzuje v mezitrubkovém prostoru



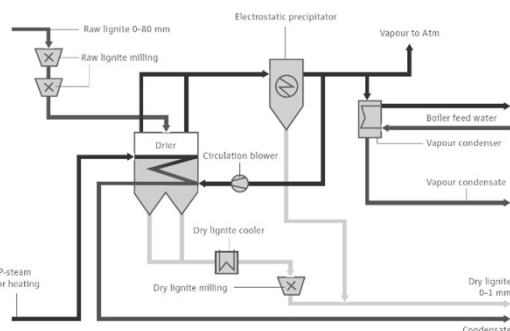
21

### Fluidní sušení odpadním teplem (WTA) s kompresí páry



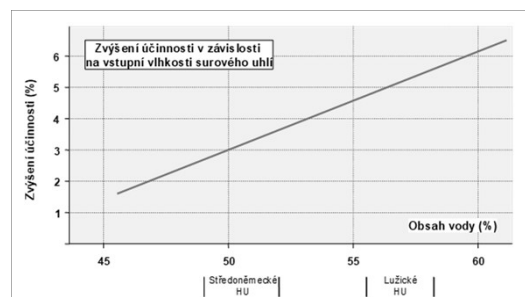
22

### Fluidní sušení odpadním teplem (WTA) s kondenzací páry



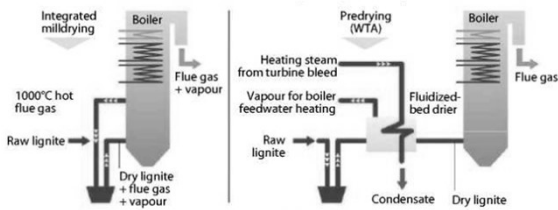
23

### Parní fluidní suška na hnědé uhlí zvýšení účinnosti dle RWE



24

## Porovnání klasického sušení s WTA



- sušení horkými spaliny
  - vede k velké exergetické ztrátě => zhoršení účinnosti
  - pára se dostává do kotle => zvětšuje objem spalin
- sušení parou WTA
  - využívá se nízkopotenciální teplo
  - pára jde mimo kotle k energetickému využití => menší kotel

25

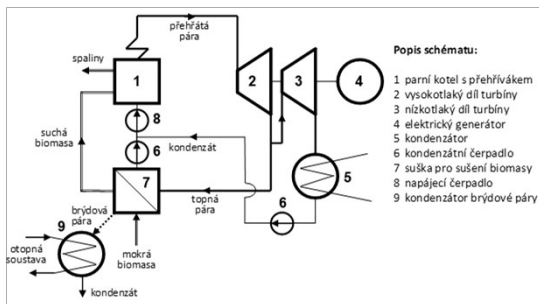
## Výhody principu WTA

- menší a levnější kotel
- vyšší účinnost kotle
- zvýšení účinnosti výroby elektřiny
- jednodušší parní turbína – menší NT díl
- významné snížení spotřeby chladicí vody
- ekologický přínos

26

## Aplikace kontaktního sušení u biomasové teplárny

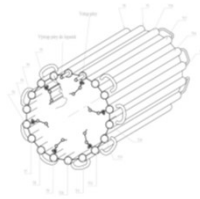
- je použita kontaktní sušička otápěná nízkotlakou odběrovou parou



27

## Aplikace kontaktního sušení u biomasové teplárny

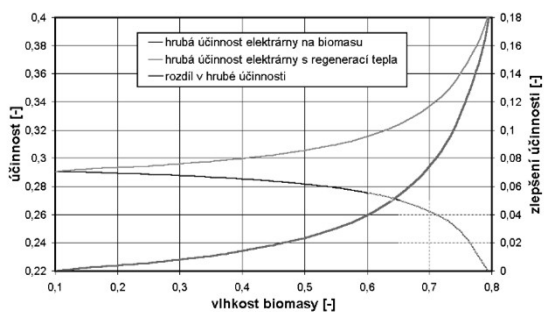
- je použita kontaktní sušička otápěná nízkotlakou odběrovou parou



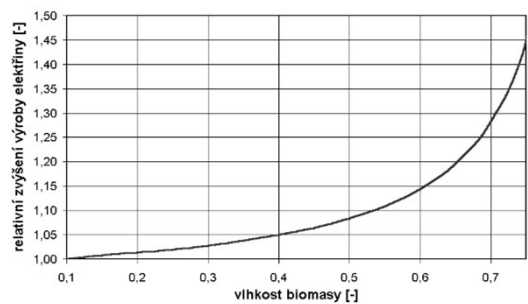
28

## Potenciální zlepšení účinnosti

- bez využití tepla břídové páry ze sušičky



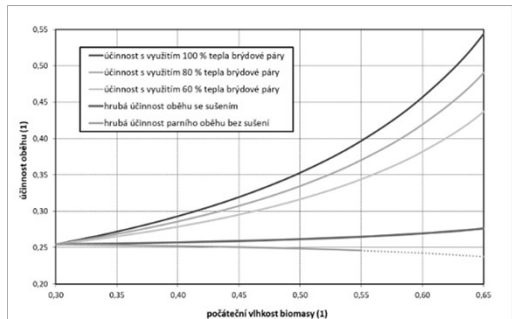
## Relativní zvýšení výroby elektřiny z biomasy



30

## Potenciální zlepšení účinnosti

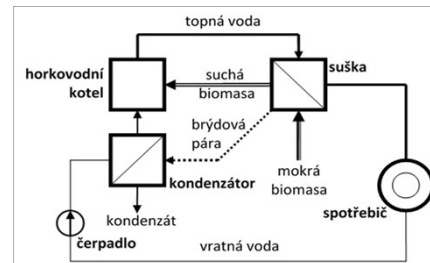
- s využitím tepla brýdové páry ze sušky



31

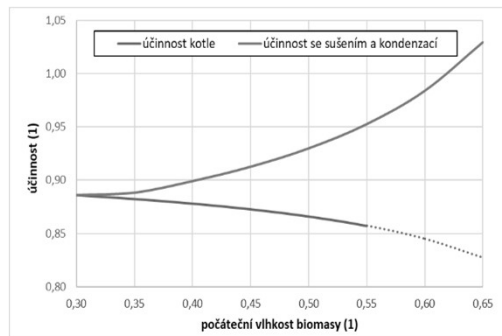
## Aplikace kontaktního sušení u biomasové výtopny

- topná voda se v kotli o 30 až 40 °C nad požadovanou teplotu
- biomasa se suší v kontaktní sušce otopěné topnou vodou
- brýdová pára se vede do kondenzátoru pro předehřev vratné vody



32

## Potenciální zlepšení účinnosti

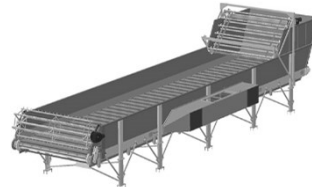


33

## Sušení dřevní štěpky

- sušení biomasy v Plzeňské teplárenské

- kapacita 14 t mokré štěpky za hodinu.
- délka 20,0 m
- šířka 4,0 m
- výška 2,5 m
- výška vrstvy sušeného paliva 1,5 m
- doba zdržení štěpky 8 hodin
- snížení obsahu vody z 50 na 20 %



34

## CCS-U

carbon capture and storage - utilization  
zachycování a ukládání - využití CO<sub>2</sub> ze spalovacích procesů

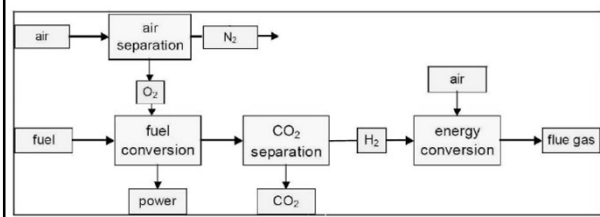
### Základní metody

- pre-combustion – odstranění C (CO<sub>2</sub>) před spalováním => vodíkové technologie
- post-combustion - odstranění CO<sub>2</sub> ze spalin
- oxyfuel – spalování s kyslíkem

35

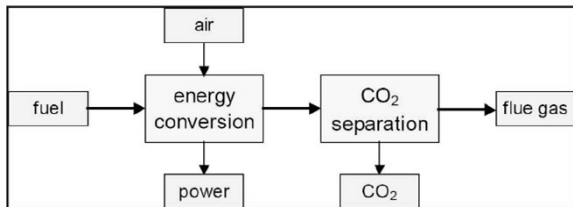
## Pre-combustion

- Zachycení uhlíku ve formě CO<sub>2</sub> před spalovacím procesem (IGCC – integrovaná paroplynová zařízení).
  - zplyňování uhlí,
  - konverze CO na CO<sub>2</sub> reformingem vodní parou,
  - čištění plynu
  - separace CO<sub>2</sub>
  - „zbylý“ plyn obsahující převážně H<sub>2</sub> je spalován



## Post-combustion

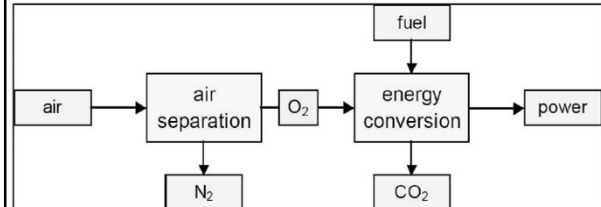
- zachycování CO<sub>2</sub> ze spalin po spalování paliva vzduchem ve spalovacích zařízeních



37

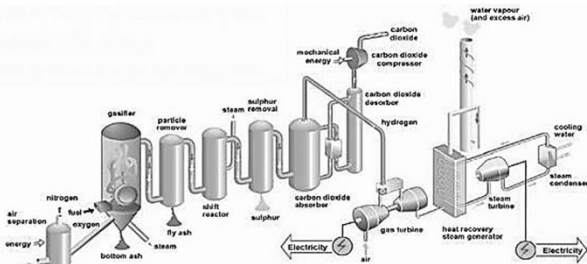
## Oxyfuel

- spalování s kyslíkem



38

## Metoda pre-combustion



- zatím ve vývoji – řešené problémy
  - vysokoteplotní čištění plynu
  - separace CO<sub>2</sub> z plynu
  - využití syngasu

39

## Metody post-combustion

- Absorbční procesy = vypíráním kapalným absorbentem
  - fyzikální a chemické (rozpuštědlo nebo chemický reagent)
- Adsorpční procesy = adsorpce na povrchu tuhé látky
  - fyzikální a chemické
  - fyzikální sorbent – aktivní uhlí, molekulová síta atd.
  - chemická vazba – CaO, NaOH a další
- Fyzikální separace, např.:
  - membránová separace,
  - kryogenní separace
- Biologický záchyt – fotosyntéza
  - klasická = řasy (obrovská plocha)
  - nově zakotvené enzymy, nanočástice
- Nově vyvíjené metody
  - nová činidla (ab- a ad-sorbenty)
  - elektrochemické metody
  - Ca looping

40

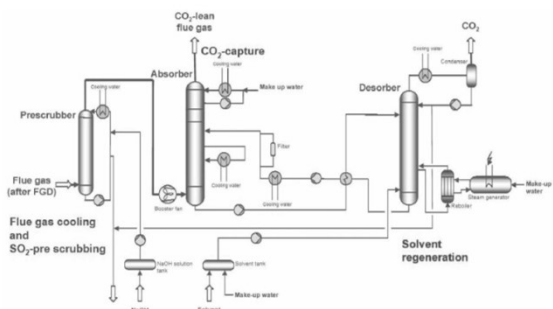
## Metody post-combustion

- Nejčtenější nové postupy využívají jako absorbční činidlo různé AMINY – hlavní problémy
  - degradace kyslíkem
  - degradace SO<sub>2</sub>
  - degradace NO<sub>x</sub>
  - korozivnost, toxicita
  - drahé
- Variantu představuje použití AMONIÁKu – hlavní problémy
  - korozivnost
  - toxicita
  - těkavost

41

## Příklad aminové metody

- Pilotní zařízení RWE



42

## Příklad aminové metody

**Společnost AkerSolution** - aminová vypírka s reagentem S26

- 6 pilotních jednotek s více jak 50 000 hodin provozu
- Čistota CO<sub>2</sub> až 99 %.
- Společnost vyvíjí novou modulární jednotku o kapacitě od 10 000 až 100 000 t CO<sub>2</sub> za rok.



**Společnost Compact Carbon Capture AS** - aminová vypírka

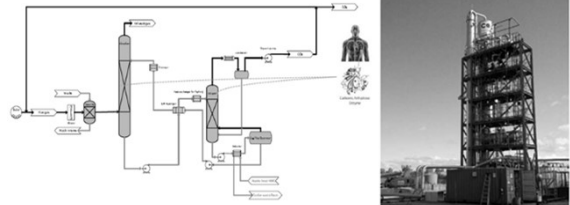
- Pilotní jednotka k dispozici
- Společnost plánuje postavení jednotky o kapacitě až 100 000 tun CO<sub>2</sub> za rok.



## Příklad aminové metody

**Společnost CO<sub>2</sub> Solutions Ltd.** - absorpční metoda na bázi enzymů (carbonic anhydrase)

- Solvent netoxický, nekorozivní a s nízkou degradací na znečišťující látky
- Desorpce při 80°C (u aminů 140°C a adsorpční metody až 180°C)
- Čistota CO<sub>2</sub> až 99,5 %
- Komerční jednotka až 30 t CO<sub>2</sub> denně.



## Příklad adsorpční metody - pevné sorbenty

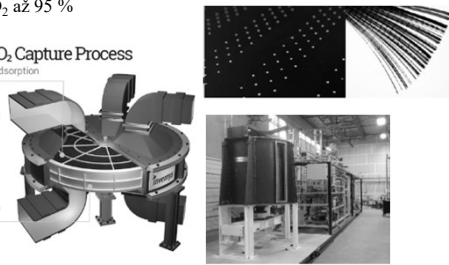
**Společnost Inventys**

- Pevná vrstva tvořena aktivním uhlím
- Technologie pod názvem VeloxoTherm™
- Rychlost cyklu až 60 s
- Čistota CO<sub>2</sub> až 95 %

**VeloxoTherm™ CO<sub>2</sub> Capture Process**  
Rapid Cycle Thermal Swing Adsorption

**Structured Adsorbent**  
Solid adsorbent + Low regeneration energy  
Disordered Adsorbent + Internalization (partial regeneration)

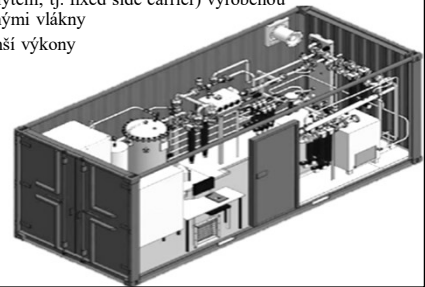
**Rotary Embodiment**  
Continuous process created by rotating beds  
Based on existing rotary air pollution control in power plants



## Příklad membránové technologie

**Společnost Air Products** - spolupráce s NTNU Trondheim

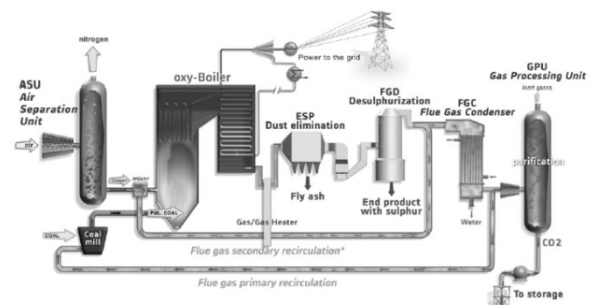
- Čistota CO<sub>2</sub> větší jak 90%
- Jedná o dvoustupňovou membránovou separaci pomocí PVAm (polyvinylamid membrány) s FSB (pevným nosičem/elektrolytem, tj. fixed side carrier) vyrobenou v modulu s pevnými vlákny
- Vhodná pro menší výkony
- Zatím ve vývoji



## Přehled dostupných technologií post-combustion

Hodnotící parametr/Společnost	Aker	C-Capture	CO <sub>2</sub> Solutions	Inventys	Air Products
TRL	9	7-8	9	7-8	7
Země licencování	EU/Norsko	EU/Norsko	Kanada/USA	Kanada/USA	USA/EU/Norsko
Spotřeba ex. tepla	ANO (~130 °C)	ANO (~130 °C)	ANO (~80 °C)	ANO (~180 °C)	NE
Spotřeba el.	ANO (nízká)	ANO (nízká)	ANO (nízká)	ANO (nízká)	ANO (střední)
Variabilita výstupního produktu	ANO (střední)	ANO (střední)	ANO (střední)	ANO (nízká)	ANO (vysoká)
Provozní zkušenosti	ANO*	NE	ANO	ANO	ANO
Modulární uspořádání	ANO	ANO	NE	NE	ANO
Provozní náklady (spotřeba médií)	střední	střední	nízké	nízké	velmi nízké
Kapacita modulů	25 až 273 tCO <sub>2</sub> /d	až 273 tCO <sub>2</sub> /d	1 až 30 tCO <sub>2</sub> /d	30 až 3000 tCO <sub>2</sub> /d	1 až 5 tCO <sub>2</sub> /d (návrhy i pro 2000 tCO <sub>2</sub> /d)

## Oxyfuel



48



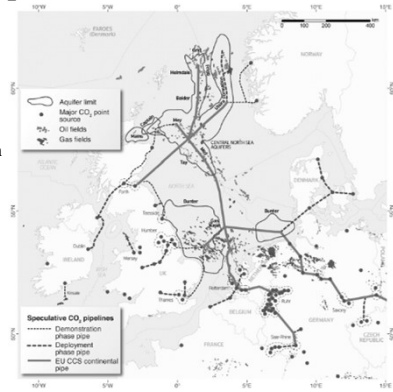
## Metoda oxyfuel

- **výhody**
  - vysoká koncentrace CO<sub>2</sub> ve spalinách zjednodušuje jeho separaci a zvyšuje její účinnost
- **komplikace**
  - výroba kyslíku
  - příliš vysoké teploty při spalování a malý průtok spalin – řeší se značnou recirkulací spalin
  - materiálové problémy a tvorba úsad u kotle

49

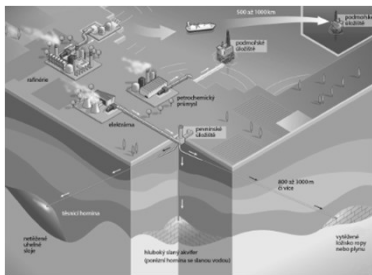
## Doprava k uložišti

- **možnosti**
  - komprese do nadkritického stavu a doprava potrubím
  - zkvalitnění a doprava v cisternách
- **centrálně plánováno ale zatím nedořešeno**



## Ukládání – využití CO<sub>2</sub>

- **ukládání pod zem**
  - vytěžená ložiska ropy a plynu
  - porézní geologické struktury - akvifery
- **využití**
  - jako průmyslový technický plyn
  - ve sklenících
  - materiálové problémy a tvorba úsad u kotle



51

## Průmyslově využití CO<sub>2</sub> - dnes

- **EOR a další procesy v rámci zpracování ropy a zemního plynu – (30 – 300 Mtpa)**
- **Výroba amoniaku/močoviny (5-30 Mtpa)**
- **Potravinářský průmysl (výroba vína, zpracování, uchování a skladování jídla, výroba bezkofeinové kávy, výroba perlivých vod atd.) (1-9 Mtpa)**
- **Ostatní využití (< 1 Mtpa) – Farmaceutický průmysl, úprava vody, skleníky, výroba železa a oceli, svařování, solvent či chladicí plyn, výroba pneumatik, elektronických součástek atp.**

## Potenciální využití CO<sub>2</sub> – v blízké budoucnosti /TRL5-6

- **ECBM – Enhanced coal bed methane recovery (30 – 300 Mtpa)**
- **Kultivace řas pro další využití (farmaceutický průmysl, potravinářský, biopalivo) – (> 300 Mtpa)**
- **Teplonosné médium v EGS – Enhanced geothermal systems (5-30 Mtpa)**
- **Výroba polymerů (5-30 Mtpa)**
- **Mineralizace (Stavební, potravinářský, chemický průmysl) – výroba CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub> (>300 Mtpa), výroba jedlé sody (< 1 Mtpa), vytvrdzování betonu (30 – 300 Mtpa),**
- **Výroba plyných/kapalých paliv/láték (přímá metanolová syntéza, tzv. obnovitelný metan/metanol >300 Mtpa, výroba kyseliny mraveční (> 300 Mtpa), růst mikroorganismů produkující látky na bázi paliv (> 300 Mtpa) atp.**

## Spalování čpavku

- **spalné teplo amoniaku je 22,5 MJ/kg**

### Výhody

- při spalování nevzniká CO<sub>2</sub>
- snadno se ukládá a přepravuje
- lze využít existující infrastruktury skladovacích nádrží, přepravních lodí a potrubí

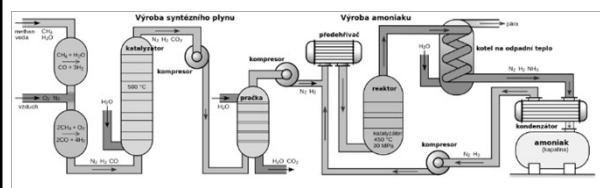
### Nevýhody

- **toxicita**
- vyšší produkce NO<sub>x</sub> při spalování
- konvenční metoda výroby čpavku je energeticky náročná

53

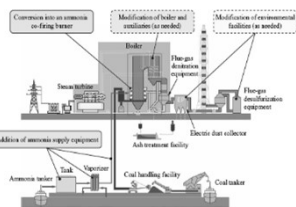
## Spalování čpavku

- **výroby amoniaku Haber-Boschovou metodou – přímou syntézou vodíku s dusíkem**
- **reakce exotermní, bez přítomnosti katalyzátorů však probíhá velmi pomalu**
- **jako katalyzátor slouží železo nebo ruthenium**
- **zdrojem vodíku je zemní plyn, který prochází za přítomnosti niklového katalyzátoru parní reformingem, konverzí vodního plynu a odstraněním CO<sub>2</sub>**
- **dusík a vodík procházejí čtyřmi vrstvami katalyzátoru, mezi každým průchodem jsou chlazeny kvůli udržení přijatelné rovnovážné konstanty**
- **konverze probíhá při tlaku 15–25 MPa a teplotě 400–500 °C**
- **během každého průchodu dochází ke jen asi 15% konverzi, nezreagované plyny jsou recyklovány a výsledná konverze dosahuje asi 97 %.**

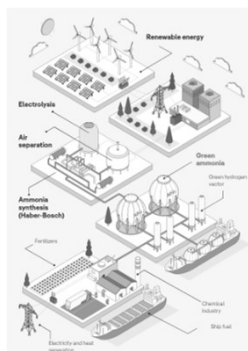


## Spalování čpavku

- v poslední době se intenzivně pracuje na výrobě „zeleného“ čpavku s využitím „zeleného“ vodíku
- Japonsko hodlá snížit spotřebu uhlí spoluspalováním 50 % čpavku ve svých elektrárnách



55

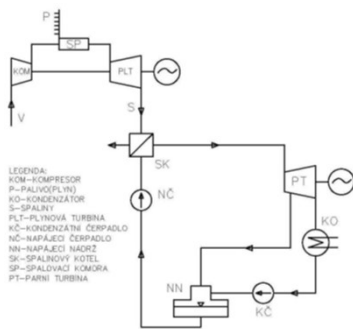


## Repowering

- jde o modernizaci provozovaných uhelných elektrárenských zařízení předřazením spalovacích turbín před existující dominantní parní oběh
- principiálně by bylo možné repowering řešit několika způsoby a to jako
  - site repowering – z původního zdroje je zachován pouze chladicí okruh, zbytek nahrazen paroplynovým zařízením
  - combined cycle repowering – stávající kotol nahrazen kotlem na odpadní teplo, který produkuje páru pro původní parní turbínu
  - hot windbox repowering – výstup horkých spalin z plynové turbíny je zaveden do stávajícího uhelného kotle
  - feed water repowering – využití odpadního tepla pro ohřev napájecí vody
  - parallel repowering – využití odpadního tepla pro výrobu páry, která se zavade do stávající turbíny

56

## Site repowering



57

## Site repowering

### Výhody

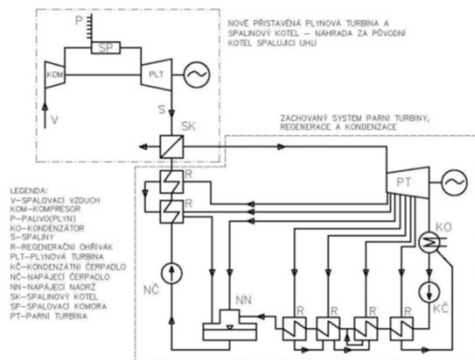
- snížení investičních nákladů na stavbu paroplynového cyklu díky zachování systému chlazení (chladicí věže, kondenzátory),
- vyšší tepelná účinnost paroplynového cyklu než původního parního cyklu,
- rychlé najetí bloku na plný výkon – použití jako špičkový zdroj

### Nevýhody

- pokud již nebyla přivedena plynová přípojka nutnost jejího vybudování,
- zvýšení výrobní ceny 1 kWh elektrické energie z důvodu nahrazení uhlí zemním plynem

58

## Combined cycle repowering



59

## Combined cycle repowering

- Opatření zvýší instalovaný výkon bloku o 150÷200%.
- Vhodné pro starší energobloky s elektrickým výkonem do 250 MW a tlaku páry do 12,4 MPa

### Výhody

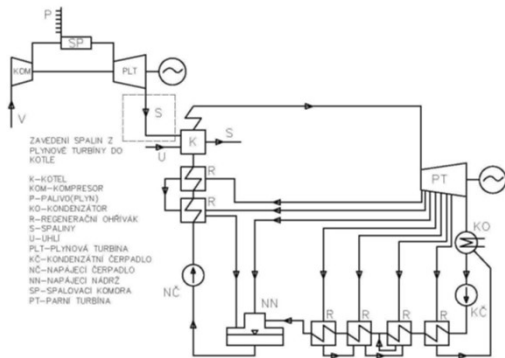
- velké navýšení instalovaného výkonu

### Nevýhody

- zvýšení výrobní ceny 1 kWh elektrické energie z důvodu nahrazení uhlí zemním plynem
- vysoká cena instalovaného výkonu

60

## Hot windbox repowering



## Hot windbox repowering

- navýšení instalovaného výkonu může dosáhnout hodnoty 25%
- varianta je vhodná pro bloky s vyšší tepelnou účinností v původním stavu
- tepelná účinnost oběhu se zvýší o 4-6% vůči

### Výhody

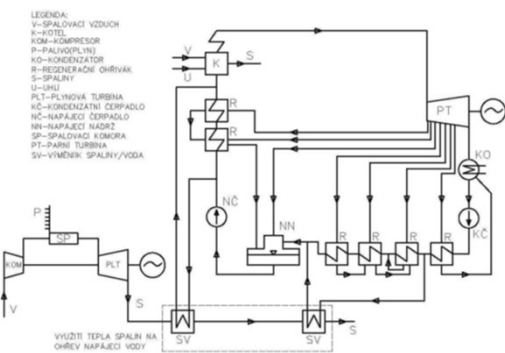
- zvýšení tepelné účinnosti – úspora uhlí
- snížení měrných emisí škodlivin
- zlepšení regulační schopnosti bloku

### Nevýhody

- technicky velmi komplikované řešení

62

## Feed water repowering



## Feed water repowering

- řešení je vhodné při požadavku na dodatečnou regulační kapacitu
  - základním zatížením využíváme původní parní cyklus
  - při odběrových špičkách se připojí spalovací turbína a ta pokryje potřebné navýšení výkonu
- navýšení instalovaného výkonu je na úrovni 15%
- zlepšení tepelné účinnosti parního oběhu při provozu spalovací turbíny je na úrovni 6%.

### Výhody

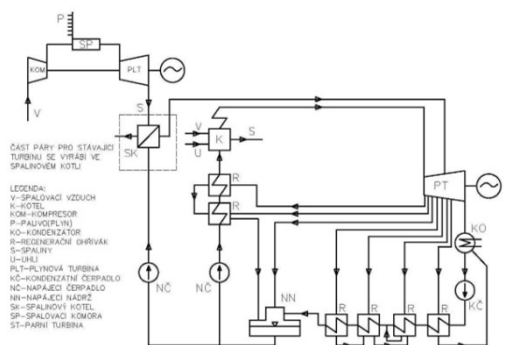
- technicky jednoduché řešení navýšení výkonu
- investičně nenáročné
- zvýšení tepelné účinnosti

### Nevýhody

- nutnost instalace výměníků spaliny – voda

64

## Paralel repowering



## Paralel repowering

- výkon paroplynové části je limitován maximálním průtokem páry stávající parní turbínou

### Výhody

- navýšení instalovaného elektrického výkonu
- snížení spotřeby uhlí

### Nevýhody

- omezené množství přidavné páry, které můžeme přivést do parní turbíny

66

## Porovnání jednotlivých variant repowering

metoda	nárůst účinnosti	cena inst. výkonu	nárůst výkonu
	[%]	[USD/kW]	[%]
SR	-	-	-
CCR	12	450 - 750	150 - 200
HWR	4 - 6	150 - 250	25
FHR	6	75 - 110	15
PR	-	-	-

67