

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ  
TECHNOLÓGIE**

**PARNÉ KOTLE, EMISIE A ÚČINNOSTI**

**Zadanie z predmetu „Riešenie procesových problémov v praxi“**

**2016/2017**

**Jaroslav Cvaniga  
Viktória Lazoríková**

## OBSAH

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY .....	3
ZOZNAM SKRATIEK A ZNAČIEK .....	11
ÚVOD .....	12
1 ÚČINNOSŤ PARNÉHO KOTLA.....	13
2 PARNÝ OBEH V TEPELNEJ (PARNEJ) ELEKTRÁRNI .....	16
2.1 OPTIMALIZÁCIA PARNÉHO OKRUHU V TEPLÁRNI .....	18
2.1.1 METODIKA.....	18
3 NÍZKOTEPLTNÁ KORÓZIA .....	20
4 KONTROLA KVALITY NAPÁJACEJ VODY.....	22
5 VPLYV USADENÍN NA VÝKON TEPELNÝCH ELEKTRÁRNÍ.....	25
6 REDUKCIA EMISÍ .....	26
6.1 Inštalovaný príkon .....	26
6.2 Zariadenia na redukciu NO <sub>x</sub> .....	26
6.3 Matematické modelovania .....	27
6.4 Spaľovanie uhlia s kyslíkom .....	28
6.5 Spoluspaľovanie .....	29
6.6 Spaľovanie nízko sírneho vykurovacieho oleja.....	31
6.7 Spaľovanie stredne sírneho vykurovacieho oleja a zemného plynu.....	31
6.8 Korózia.....	31
ZÁVER .....	33

## ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] M. Siddharta Bhatt: *Energy audit case studies I- steam systems*; Central Power Research Institute, Energy Research Centre, Trivandrum, 695017, India (Received 10 June 1998; accepted 18 February 1999); *Applied Thermal Engineering* 20 (2000) 285±296
- [2] T. Price – T. Majozi: *Using Process Integration for Steam System Network Optimization with Sustained Boiler Efficiency*; Department of Chemical Engineering, University of Pretoria, Lynnwood Road, Pretoria 0002, South Africa, thoko.majozi@up.co.za, Department of Computer Science, University of Pannonia, Veszprém, Hungary; 19th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE19 J. Jeřowski and J. Thullie (Editors) © 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.
- [3] S. Vidojkovic – A. Onija – B. Matovic – N. Grahovac – V. Maksimovic et al.: *Extensive feedwater quality control and monitoring concept for preventing chemistry related failures of boiler tubes in a subcritical thermal power plant*; Institute of Chemistry, Technology, and Metallurgy, University of Belgrade, Njegoseva 12, 11001 Belgrade, P.O.B. 473, Serbia; Laboratory of Chemical Dynamics and Permanent Education, “Vinca” Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, P.O. Box 522, 11001 Belgrade, Serbia; Laboratory of Material Science, “Vinca” Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, P.O. Box 522, 11001 Belgrade, Serbia; *Applied Thermal Engineering* 59 (2013) 683e694
- [4] J. M. Blanco – F. Pena: *Increase in the boiler’s performance in terms of the acid dew point temperature: Environmental advantages of replacing fuels*; Dpto. Ma’quinas y Motores Te’rmicos, Escuela Te’cnica Superior de Ingenierı’a, Universidad del Pa’ıs Vasco/E.H.U., Alameda de Urquijo s/n (48013) Bilbao, Spain; Received 3 November 2006; accepted 1 June 2007, Available online 3 July 2007; *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 777–784
- [5] M. Siddharta Bhatt: *Effect of water side deposits on the energy performance of coal fired thermal power plants*; Central Power Research Institute, Field Engineering Services, P.O. Box 8066, Sadashivanagar PO, Sir CV Raman Road, Bangalore 560 080, India; Received 7 July 2004; received in revised form 20 January 2005; accepted 28 July 2005 Available online 28 September 2005; *Energy Conversion and Management* 47 (2006) 1247–1263
- [6] Ma, Z.Z., et al., *Characteristics of NOx emission from Chinese coal-fired power plants equipped with new technologies*. *Atmospheric Environment*, 2016. **131**: p. 164-170.
- [7] Stupar, G., et al., *Assessing the impact of primary measures for NOx reduction on the thermal power plant steam boiler*. *Applied Thermal Engineering*, 2015. **78**: p. 397-409.
- [8] Hu, Y., et al., *CO2, NOx and SO2 emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases*. *Fuel*, 2000. **79**(15): p. 1925-1932.
- [9] Zhang, S.R., et al., *SO2, NOx, HF, HCl and PCDD/Fs emissions during Co-combustion of bituminous coal and pickling sludge in a drop tube furnace*. *Fuel*, 2016. **186**: p. 91-99.

- [10] Kaewboonsong, W., V.I. Kuprianov, and N. Chovichien, *Minimizing fuel and environmental costs for a variable-load power plant (co-)firing fuel oil and natural gas - Part I. Modeling of gaseous emissions from boiler units*. Fuel Processing Technology, 2006. **87**(12): p. 1085-1094.
- [11][http://www.sps-ko.cz/documents/SPS\\_prazak/23.%20ZA%C5%98%C3%8DZEN%C3%8D%20PRO%20V%C3%9DROBU%20P%C3%81RY.pdf](http://www.sps-ko.cz/documents/SPS_prazak/23.%20ZA%C5%98%C3%8DZEN%C3%8D%20PRO%20V%C3%9DROBU%20P%C3%81RY.pdf)
- [12] <http://www.usdidactic.com/teaching-lab-equipment/p4996.htm>
- [13] Shang, Z. and Kokossis, A. (2004), A transshipment model for the optimisation of steam levels of total site utility system for multiperiod operation, Computers and Chemical Engineering 28, pages 1673-1688.
- [14] Coetzee, W.A. and Majozi, T. (2008) Steam System Network Design Using Process Integration, Ind. Eng. Chem. Res 2008, 47, 4405-4413.
- [15] Cycle Chemistry Guidelines for Fossil Plants: All-Volatile Treatment: Revision 1 (EPRI Report TR-1004187), Palo Alto, CA, USA, November, 2002.
- [16] Niagara Falls, Canada Volatile Treatments for the Steam-water Circuits of Fossil and Combined Cycle/HRSG Power Plants, IAPWS Technical Guidance Document (2010).
- [17] Pattison, J. R. and Sharma, V. (1980) Selection of boiler plant and overall system efficiency. Studies in energy efficiency in buildings, British Gas.

## **Energy audit case studies I-steam systems [1]**

### **Abstract**

This paper presents an analytical diagnostic tool for energy audit of steam systems. The circuit efficiency is determined as a product of the segment efficiencies. The analysis is applied to a few industrial cases. These will provide clear indication on the pattern of energy losses and will aid in decision support for evolution of energy conservation measures. The results indicate that contrary to the popular thrust areas, the steam lines and the condensate loss are the major causes of fuel energy wastage and these offer considerable potential for conservation. #1999 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** Steam circuit; Boiler; Circuit efficiency; Energy conservation

## **Using Process Integration for Steam System Network Optimization with Sustained Boiler Efficiency [2]**

### **Abstract**

The traditional steam system comprises of a steam boiler and the associated heat exchanger network (HEN). Most research published in literature tends to address both the elements of the steam system as separate entities instead of analyzing, synthesizing and optimizing the overall system in a holistic manner. This paper presents a process integration technique using conceptual and mathematical analysis without compromising boiler efficiency. It was found that the steam flowrate could be reduced whilst maintaining boiler efficiency by utilizing sensible heat from the high pressure steam leaving the boiler. In the event of too little sensible energy being available a compromise in either minimum steam flowrate or boiler efficiency must be made.

**Keywords:** steam system, heat exchanger network, boiler efficiency

## **Extensive feedwater quality control and monitoring concept for preventing chemistry-related failures of boiler tubes in a subcritical thermal power plant [3]**

### **Abstract**

Prevention and minimizing corrosion processes on steam generating equipment is highly important in the thermal power industry. The maintenance of feedwater quality at a level corresponding to the standards of technological designing, followed by timely respond to the fluctuation of measured parameters, has a decisive role in corrosion prevention. In this study, the comprehensive chemical control of feedwater quality in 210 MW Thermal Power Plant (TPP) was carried out in order to evaluate its potentiality to assure reliable function of the boiler and discover possible irregularity that might be responsible for frequent boiler tube failures. Sensitive on-line and off-line analytical instruments were used for measuring key and diagnostic parameters considered to be crucial for boiler safety and performances. Obtained results provided evidences for exceeded levels of oxygen, silica, sodium, chloride, sulfate, copper, and conductivity what distinctly demonstrated necessity of feedwater control

improvement. Consequently, more effective feedwater quality monitoring concept was recommended. In this paper, the explanation of presumable root causes of corrosive contaminants was given including basic directions for their maintenance in proscribed limits.

**Keywords:** Thermal power plant, Feedwater quality

**Increase in the boiler's performance in terms of the acid dew point temperature:  
Environmental advantages of replacing fuels [4]**

**Abstract**

The aim of air pre-heaters is to raise the temperature of the combustion air in boilers, using heat recovered from the power plant combustion gases. On the one hand, this paper compares the effects of the acid dew point temperature (ADT) on pre-heaters in a reference thermal power plant for two types of fuel, "fuel No. 2" and "low sulphur fuel" respectively and on the other hand, it shows how a changeover to this latter fuel would increase the useful lifetime of this equipment, reducing this way cost of maintenance due to the considerable decrease in the area exposed to ADT with the subsequent increase in the boiler's performance.

**Keywords:** Acid dew point; Pre-heaters; Low sulphur fuel

**Effect of water side deposits on the energy performance of coal fired thermal power plants [5]**

**Abstract**

This paper presents the effects of water side deposits in the 210 MW coal fired thermal power plant components (viz., boiler, turbine, feed water heaters, condensers and lube oil coolers) on the energy efficiency of these components and that of the overall system at 100% maximum continuous rating (MCR). The origin, composition and rate of build up of deposits on the water side are presented. A linear growth rate of deposits is assumed for simplicity. The effects of the reduction in heat transfer, increased pressure drop and increased pumping power/reduced power output in the components are quantified in the form of curve fits as functions of the deposit thickness (lm). The reduction in heat transfer in the boiler components is in the range of 0.2–2.0% under normal scaling. The increased pumping power is of the order of 0.6–7.6% in the boiler components, 29% in the BFP circuit, 26% in the LPH circuit, 21% in the HPH circuit and 18% in the lube oil cooler circuits. The effects on the overall coal fired plant is quantified through functional relations between the efficiencies and the notional deposit thickness. The sensitivity indices to the notional deposit thickness are: boiler efficiency:0.0021% points/lm, turbine circuit efficiency:0.0037% points/ lm, auxiliary power efficiency:0.00129% points/lm, gross overall efficiency:0.0039% points/lm and net overall efficiency:0.0040% points/lm. The overall effect of scale build up is either increased power input of 68 kW/lm (at a constant power output) or decreased power output 25 kW/lm (at a constant power input). Successful contaminant control techniques are highlighted. Capacity reduction effects due to water side deposits are negligible.

**Keywords:** Water side deposits; Scaling; Heat transfer; Pressure drop; Boiler efficiency; Turbine efficiency; Gross overall efficiency; Net overall efficiency; Contaminant control

### **Characteristics of NO<sub>x</sub> emission from Chinese coal-fired power plants equipped with new technologies [6]**

#### **Abstract**

Coal combustion in coal-fired power plants is one of the important anthropogenic NO<sub>x</sub> sources, especially in China. Many policies and methods aiming at reducing pollutants, such as increasing installed capacity and installing air pollution control devices (APCDs), especially selective catalytic reduction (SCR) units, could alter NO<sub>x</sub> emission characteristics (NO<sub>x</sub> concentration, NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio, and NO<sub>x</sub> emission factor). This study reported the NO<sub>x</sub> characteristics of eight new coal-fired power-generating units with different boiler patterns, installed capacities, operating loads, and coal types. The results showed that larger units produced less NO<sub>x</sub>, and anthracite combustion generated more NO<sub>x</sub> than bitumite and lignite combustion. During formation, the NO<sub>x</sub> emission factors varied from 1,81 to 6,14 g/kg, much lower than those of older units at similar scales. This implies that NO<sub>x</sub> emissions of current and future units could be overestimated if they are based on outdated emission factors. In addition, APCDs, especially SCR, greatly decreased NO<sub>x</sub> emissions, but increased NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratios. Regardless, the NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratios were lower than 5%, in accordance with the guidelines and supporting the current method for calculating NO<sub>x</sub> emissions from coal-fired power plants that ignore NO<sub>2</sub>.

**Keywords:** Coal-fired power plants, NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio, NO<sub>x</sub> emission factor, Selective catalytic reduction (SCR)

### **Assessing the impact of primary measures for NO<sub>x</sub> reduction on the thermal power plant steam boiler [7]**

#### **Abstract**

The European normatives prescribe content of 200 mg/Nm<sup>3</sup> NO for pulverized coal combusting power plants. In order to reduce content of NO<sub>x</sub> in Serbian thermal power plant (TPP) square Kostolac B square it's necessary to implement particular measures until 2016. The mathematical model of lignite combustion in the steam boiler furnace is defined and applied to analyze the possibility of implementing certain primary measures for reducing nitrogen oxides and their effects on the steam boiler operation. This model includes processes in the coal-fired furnace and defines radiating reactive two-phase turbulent flow. The model of turbulent flow also contains sub-model of fuel and thermal NO<sub>x</sub> formation and destruction. This complex mathematical model is related to thermal and aerodynamic calculations of the steam boiler within a unified calculation system in order to analyze the steam boiler overall work. This system provides calculations with a number of influential parameters. The steam boiler calculations for unit 1 (350 MWe) of TPP square Kostolac B square are implemented for existing and modified combustion system in order to achieve effective, reliable and ecological facility work. The paper presents the influence analysis of large number of parameters on the steam boiler operation with an accepted concept of primary measures. Presented system of calculations is verified against measurements in TPP square Kostolac B square.

**Keywords:** Steam boiler, NO<sub>x</sub>, Primary measures, Mathematical model, Calculation system, Efficiency

### **CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases [8]**

#### **Abstract**

The emissions of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> from the combustion of a high-volatile coal with N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>-based, high O<sub>2</sub> concentration (20, 50, 80, 100%) inlet gases were investigated in an electrically heated up-flow-tube furnace at elevated gas temperatures (1123-1573 K). The fuel equivalence ratio,  $\phi$ , was varied in the range of 0.4-1.6. Results showed that CO<sub>2</sub> concentrations in Rue gas were higher than 95% for the processes with O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>-based inlet gases. NO<sub>x</sub> emissions increased with  $\phi$  under fuel-lean conditions, then declined dramatically after  $\phi = 0.8$ , and the peak values increased from about 1000 ppm for the air combustion process and 500 ppm for the O<sub>2</sub> (20%) + CO<sub>2</sub> (80%) inlet gas process to about 4500 ppm for the oxygen combustion process. When  $\phi > 1.4$  the emissions decreased to the same level for different O<sub>2</sub> concentration inlet gas processes. On the other hand, NO<sub>x</sub> emission indexes decreased monotonically with  $\phi$  under both fuel-lean and fuel-rich combustion. SO<sub>2</sub> emissions increased with  $\phi$  under fuel-lean conditions, then declined slightly after  $\phi > 1.2$ . Temperature has a large effect on the NO<sub>x</sub> emission. Peak values of the NO<sub>x</sub> emission increased by 50-70% for the N<sub>2</sub>-based inlet gas processes and by 30-50% for the CO<sub>2</sub>-based inlet gas process from 1133 to 1573 K. However, there was only a small effect of temperature on the SO<sub>2</sub> emission.

**Keywords:** Coal combustion; Pollutant emissions; High oxygen concentration gas

### **SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HF, HCl and PCDD/Fs emissions during Co-combustion of bituminous coal and pickling sludge in a drop tube furnace [9]**

#### **Abstract**

The influence of co-combustion of bituminous coal and pickling sludge on SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HF, HCl and PCDD/Fs emissions was studied in a drop tube furnace. To simulate the combustion condition of suspension firing boilers, the experiment was performed at 1100-1400 °C with the share of sludge in the feed ranging from 0 to 10% by weight. The combustion characteristics of coal and of blended fuels were studied by TG analysis. The results showed that the average combustion efficiency of co-combustion of bituminous coal and pickling sludge in the drop tube furnace is larger than 99%. SO<sub>2</sub>, NO and HCl emissions had an increasing tendency with the temperature rising, but HF emissions were not sensitive to temperature. SO<sub>2</sub> and HF emissions had a rising trend with increasing share of sludge, while NO and HCl emissions had an opposite trend. No obvious effect of temperature and the share of sludge on the total TEQ of PCDD/Fs was found, and the emissions of the seventeen congeners were basically stable under different experimental conditions. TG results showed that the combustion characteristics of coal and blended fuels were basically the same. XRD results showed that the ash composition changed significantly with the addition of sludge. Compared to the national standard, when co-combusting of bituminous coal and pickling sludge in commercial power plant, desulphurization and denitrification equipment, activated carbon injection and baghouse should be provided. (C) 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

**Keywords:** Co-combustion, Hazardous waste, Pickling sludge, Pollutants emission, PCDD/Fs



## **Minimizing fuel and environmental costs for a variable-load power plant (co-)firing fuel oil and natural gas - Part 1. Modeling of gaseous emissions from boiler units [10]**

### **Abstract**

This work was aimed at modeling of major gaseous emissions ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) from boiler units of a power plant firing (or co-firing) fuel oil and natural gas for variable operating conditions (load and load-related variables: excess air, flue gas recirculation, etc.). The emission rate of the pollutants for the co-firing was estimated for a particular boiler using these characteristics for the burning of each fuel in the boiler on its own and taking into account energy fractions (contributions) of fuel oil and natural gas to the boiler heat input. The gaseous emissions (in terms of emission concentrations, emission rates and specific emissions) from a 200 MW boiler unit firing low-S fuel oil and from a 310 MW boiler unit firing (or co-firing) medium-S fuel oil and natural gas were estimated and compared for 50-100% unit loads based on actual fuel properties and load-related operating variables of these units. Upper limit for the energy fraction of medium-S fuel oil was determined for the 310 MW boiler unit co-firing the two fuels with the aim to meet the national emission standard for  $\text{SO}_2$ .

**Keywords:** Boiler units;  $\text{NO}_x$ ;  $\text{SO}_3$ ;  $\text{SO}_2$  and  $\text{CO}_2$  emissions; Emission models; Emission rates

## **ABSTRAKT**

This papers deals with steam boilers, their efficiency, low-temperature corrosion, quality feedwater, the influence of deposits on the power boiler and emissions. Each topic was explained through experimental work / study to the proposals for improvements. Results gained from these measures should not only increase efficiency of steam boilers, but also improve working of the whole steam circuit, respectively. thermal power plan.

**Keywords:** steam boiler, boiler efficiency, emissions, deposits

## ZOZNAM SKRATIEK A ZNAČIEK

$\eta_K, \eta_b$	Účinnosť kotla	
$\eta_{fyz}$	Účinnosť pomerných strát tepla horľavinou v tuhých zvyškoch	
$\eta_C$	Účinnosť pomerných strát tepla mech. nedopalom	
$\eta_{CO}$	Účinnosť pomerných strát tepla horľavinou v spalinách	
$\eta_{oko}$	Účinnosť pomerných strát tepla do okolia	
$\eta_{Kom}$	Účinnosť pomerných strát tepla v komíne	
$m_p$	Hmotnostný prietok pary	[kg/s]
$m_{palivo}$	Hmotnostný prietok paliva	[kg/s]
$h_p = h_{sup}$	Entalpia prehriatej pary	[kJ/kg]
$h_{NV}$	Entalpia napájacej vody	[kJ/kg]
$Q_n$	Výhrevnosť paliva	[kJ/Nm <sup>3</sup> ]
$q$	Tepelný obsah pary	[kJ/kg]
$M$	Hmotnostný prietok pary	[kg/s]
$M^{max}$	Kapacita kotla	[kg]
$a, b$	Parametre [17]	
$T_{proc}$	Teplota na výstupe z procesu	[K]
$T_{turb}$	Teplota na výstupe z turbíny	[K]
$M_{turb}$	Hmotnostný prietok na výstupe z turbíny	[kg/s]
$Q_{preheat}$	Teplo odovzdané v prehrievači	[kJ]
$h_{sat}$	Entalpia nasýtenej pary	[kJ/kg]
$O$	Podiel energie pary	
$O_{ADT}$	Teplota rosného bodu	[°C]

## ÚVOD

Parný kotol je zariadenie na výrobu prehriatej pary o požadovanom tlaku a teplote. Využíva sa buď na vykurovacie, technologické alebo energetické účely. Pozostáva zo spaľovacieho zariadenia s príslušenstvom (ohnisko, ohrievače vzduchu, vzduchové a sacie ventilátory, atď.), z výmenníkovej časti (ohrev a odparenie vody, prehrievanie vzniknutej pary) a samozrejme z regulačnej časti.

Medzi hlavné typy kotlov patria valcové, plameňové, žiarotrúbkové, kombinované (do 1,5 MPa) a vodorúrkové (10 MPa a viac). Parné kotly môžeme rozdeliť podľa viacerých hľadísk a to napríklad podľa použitia, kedy sa kotle rozdeľujú na elektrárenské, teplárenské, alebo vykurovacie. Podľa spôsobu spaľovania sa kotle spaľujúce pevné palivo rozdeľujú na roštové, granulačné a fluidné. Taktiež sú to kotle spaľujúce tekuté a plynné palivá. Zároveň sa môžu kotle deliť podľa tlaku na nízkotlakové (do 2,5 MPa), strednotlakové (do 6,4 MPa), vysokotlakové (do 22,15 MPa) a s nadkritickým tlakom (nad 22,15 MPa).

Parný výkon kotla je taký výkon (v kg/s, alebo v t/h), ktorý musí kotol nepretržite dodávať pri dodržaní menovitých hodnôt základných parametrov. Medzi základné parametre kotla patrí tlak a teplota prehriatej pary, teplota prihriatej pary a teplota napájacej vody.

# 1 ÚČINNOSTĚ PARNÉHO KOTLA

Účinnost parného kotla vyjadruje pomer medzi využitou energiou a energiou privedenou do zariadenia (výkon/príkón). Je to technicko – ekonomický parameter, ktorý sa určuje dvomi spôsobmi

## a) Priama metóda

Priamu metódu využívame vtedy, ak vieme určiť príkón aj výkon parného kotla. Príkón sa určuje z množstva paliva a jeho výhrevnosti, pričom sa zanedbáva zjavné teplo paliva a spaľovacieho vzduchu, ktoré predstavuje cca 1% vstupnej energie. Výkon kotla možno ľahko určiť zo známeho množstva pracovného média, entalpie napájajúcej vody a entalpie prehriatej pary. Avšak nedá sa určiť, ak sú prítomné lokálne vykurovacie zariadenia. Vtedy sa pre výpočet účinnosti používa nepriama metóda.

$$\eta_K = \frac{\dot{m}_p(h_p - h_{NV})}{\dot{m}_{palivo}Q_n} \quad (1)$$

## b) Nepriama metóda

Účinnost parného kotla sa určí rozdielom jednotky a sumy podielov všetkých pomerných strát. Pri spaľovaní tuhých palív uvažujeme hlavne o stratách tepla horľavinou v tuhých zvyškoch (troska, škvara, popolček), stratách tepla mechanickým nedopalom, stratách horľavinou v spalínach (splynené palivo, prevažne CO odchádzajúce v spalínach), stratách tepla do okolia a komínových stratách. Najväčší podiel predstavujú komínové straty.

$$\eta_K = 1 - \eta_{fyz} - \eta_C - \eta_{CO} - \eta_{oko} - \eta_{kom} \quad (2)$$

Cieľom prípadovej štúdie [1] pána Siddhartha bol energetický audit parných obehov, ktorý sa zameriaval na určenie celkovej účinnosti parných systémov z jednotlivých čiastkových účinnosti podsystemov. Jednou z častí energetického auditu bolo aj určenie účinnosti parných kotlov v parnej elektrárni, ako aj v teplárni v závislosti od typu paliva. Výsledky tejto časti

auditu sú uvedené v Tab. 1. V tejto tabuľke môžeme vidieť, že účinnosti parných elektrární sú o dosť väčšie ako u teplární pre všetky tri typy paliva. Zároveň je v tabuľke uvedený pomer vyrobenej pary ku spotrebovanému palivu, špecifická spotreba pary, pomer spaľovacieho vzduchu ku palivu, atď.

Tab. 1 “Charakteristické hodnoty dôležitých ukazovateľov výkonu parných kotlov “

Sl. No.	Particular	Process boilers			Power boilers		
		Oil	Gas	Coal	Oil	Gas	Coal
01	Boiler efficiency (%)	65–85	60–70	20–50	80–92	70–78	75–86
02	Steam to fuel ratio (t/t)	10–15	13–14	4–6	12–16	14–16	5–6
03	Specific steam consumption (t/MWh)	6.0–15.0			3.0–6.0		
04	Air to fuel ratio (theoretical)	14–15	12–13	5–7	14–15	12–13	5–7
05	Excess air (% of theoretical air)	2–100	2–30	100–400	2–20	2–20	25–300
06	Heat to power ratio (MW <sub>t</sub> /MW <sub>e</sub> )	0.5–40.0			0.0–0.2		

Účinnosť parného kotla závisí ako od účinnosti spaľovania, tak aj od účinnosti prestupu tepla a účinnosti materiálu (odluh, ventilácia, atď.). Podiel jednotlivých strát pre kotol spaľujúci drevené uhlie sú uvedené v Tab. 2.

Tab. 2 “Časť tabuľky výsledkov testu účinnosti parného kotla spaľujúceho drevené uhlie“

Sl. No.	Particular	Unit	Design (210 MW)	Operating (172.8 MW)
Combustion related losses				
01	Loss due to hydrogen in the fuel	%	5.15	6.63
03	Loss due to moisture in fuel	%	0.00	0.96
03	Loss due to moisture in air	%	0.22	0.23
04	Loss due to unburnt fuel in bottom ash	%	1.00	0.25
05	Loss due to unburnt fuel in fly ash	%	1.00	0.98
Heat transfer related losses				
06	Heat equivalent of auxiliary power	%	0.00	–0.65
07	Dry flue gas loss	%	4.95	7.25
08	Loss due to furnace skin radiation and convection	%	0.21	0.11
Material related energy losses				
09	Blow down losses	%	0.00	0.52
10	Venting and losses	%	0.50	0.50
11	Extraction steam losses	%	1.00	0.00
12	Total losses	%	14.02	16.78
13	Combustion efficiency	%	92.64	90.95
14	Heat transfer efficiency	%	94.84	93.29
15	Material efficiency	%	97.86	98.08
16	Boiler efficiency	%	85.98	83.22

Z energetického auditu zároveň vyplynuli opatrenia na úsporu energie, resp. zvýšenie účinnosti kotla. Pre zvýšenie účinnosti spaľovania:

- Zlepšenie rozprašovania plynného/kvapalného paliva, resp. rozomieľanie tuhého paliva
- Udržiavanie optimálnej hodnoty teploty a tlaku paliva a vzduchu privádzaných do horákov
- Kontrola znečistenia paliva a spaľovacieho vzduchu zaistí vyššiu konverziu spaľovania v peci

Zvýšenie účinnosti prestupu tepla:

- Zaistenie dostatočnej teplovýmennej plochy
- Udržiavanie vysokej čistoty v peci, ako aj na strane pracovného média (voda/para)
- Minimalizácia strát tepla z pece radiáciou

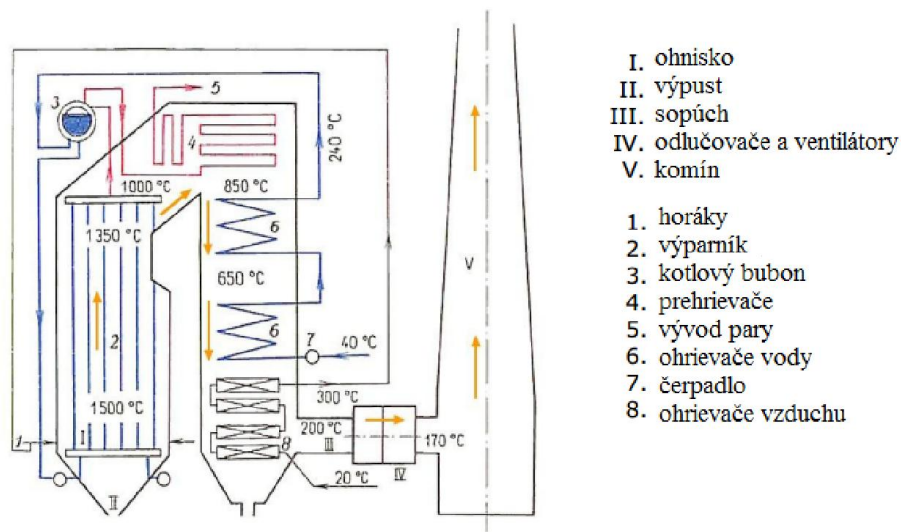
Zvýšenie účinnosti materiálu:

- Minimalizácia strát pary odkalom, ventiláciou, častým používaním poistných tlakových ventilov
- Minimalizácia strát odkalom prostredníctvom optimálnej kontroly znečistenia

Ďalšie opatrenia sú uvedené v práci [1] v Tab. 8.

## 2 PARNÝ OBEH V TEPELNEJ (PARNEJ) ELEKTRÁRNI

Medzi klasické tepelné elektrárne patrí parná elektráreň, tepláreň, elektrárne so spaľovacími turbínami, alebo paroplynové elektrárne. V klasickej parnej elektrárni je do kotla pomocou napájacích čerpadiel dodávaná chemicky upravená (demineralizovaná) voda, ktorá sa ohrieva v ekonomizéri a vstupuje do výparníka kotla, kde sa mení na paru. Vzniknutá para však obsahuje veľmi málo energie a preto je ďalej ohrievaná spalinami v prehrieváčoch na teplotu, ktorá u vysokotlakových kotlov dosahuje až 650 °C. Táto para následne prechádza do turbíny, kde odovzdá svoju vnútornú energiu najprv vysokotlakovej časti a potom nízkotlakovej časti parnej turbíny, ktorú roztáča. Pre vyššiu účinnosť sa para vedie späť do kotla (k medziprehriatiu), kde sa opäť zvýši teplota pary. Tá sa opäť vedie do strednotlakovej a nízkotlakovej časti turbíny. Po odovzdaní všetkej využiteľnej energie para kondenzuje a vracia sa späť do kotla. Teplo sa odoberá prostredníctvom chladiacich veží vonkajším okruhom do ovzdušia. Spaľovací vzduch sa pred vstupom do kotla predhrieva spalinami vo výmenníku tepla, ktorý je zaradený ako posledný. Schéma tepelnej elektrárne bez znázornenej chladiacej veže, turbín a kondenzátora je znázornená na Obr. 1.



Obr. 1 “Schéma parného kotla [11]“

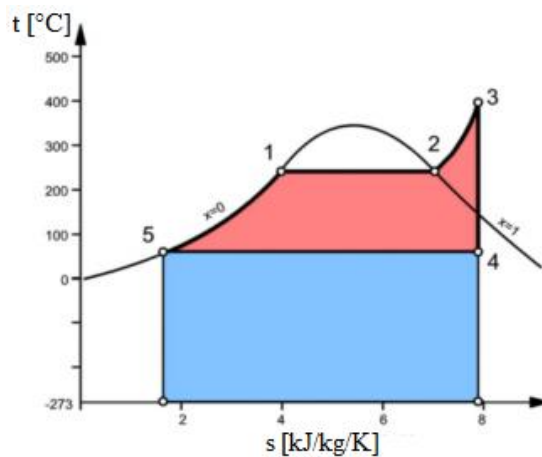


Účinnosť takéhoto parného obehu je priemerne okolo 20-30%. Vyhodnotením energetického auditu [1] sa zistilo, že hlavnou príčinou poklesu celkovej účinnosti parného systému sú straty v parných potrubíach a straty pri neefektívnom procese kondenzácie pary. Tieto straty sa dajú minimalizovať zabezpečením dostatočne prehriatej pary na výstupe z kotla, ako aj dostatočným podchladením kondenzátu. Zároveň z výsledkov auditu vyplynuli ďalšie opatrenia:

- Minimalizácia strát pri odvádzačoch pary/kondenzátu
- Minimalizovať prietok pary by-passom do kanála pri zníženom zaťažení prevádzky
- Zabezpečenie efektívneho odplyňovania v odplyňovačoch
- Použitie vhodného tesniaceho materiálu pri regulačných/recirkulačných/bezpečnostných ventiloch

Ďalšie opatrenia sú uvedené v práci [1] v Tab. 8.

Na Obr. 2 je znázornený T-s diagram, v ktorom je vyznačený parný cyklus. Zatiaľ čo modrá plocha predstavuje straty tepla v kondenzátore, tak červená predstavuje užitočnú energiu na turbíne. Cieľom je maximalizovať červenú časť diagramu a minimalizovať modrú. Stav 4-5 predstavuje kondenzáciu pár, ktorá by mala prebiehať pri čo najnižšej teplote, zatiaľ čo vyparovanie (1-2) by malo prebiehať vo výparníku pri čo najvyššej teplote. Prehriatie (2-3) v prehrievačoch by malo byť čo najvyššie vzhľadom k technickým možnostiam systému. Časť 5-1 predstavuje ohrev napájajúcej vody, a časť 3-4 expanziu na turbíne.



Obr. 2 “T-s diagram [12]“

## 2.1 OPTIMALIZÁCIA PARNÉHO OKRUHU V TEPLÁRNI

Cieľom práce [2] pána Pricea, Majozih a spol. bola optimalizácia ohrevného okruhu v teplárni so snahou zachovať konštantnú účinnosť parného kotla minimalizovaním prietoku pary. Znižovanie prietoku pary má veľký vplyv na teplotu a prietok vratného kondenzátu, od ktorých závisí vo veľkej miere výkon parného kotla. Výhodou takejto minimalizácie je zníženie spotreby vody, a teda aj potreba menšieho objemu kotla.

Nasledujúci vzťah vyjadruje závislosť účinnosti kotla od spotreby pary, kapacity a prevádzkových podmienok [13]

$$\eta_b = \frac{q(M/M^{\max})}{(c_p \Delta T_{sat} + q)(1+b)(M/M^{\max}) + a} \quad (3)$$

### 2.1.1 METODIKA

Prvým krokom výpočtu je zníženie prietoku pary do parného obehu pomocou modelu pána Coetzeeho a Majozih tvoreného jednoduchými MB a EB [14].

Teplota na výstupe z procesu sa vypočíta podľa vzťahu (4).

$$T_{proc} = \frac{\sum_{ie1} FRS_i T_{sat} + \sum_{ie1} FRL_i T_{out_i}^L}{TS} \quad (4)$$

Teplota pred vstupom do predhrievača sa vypočíta nasledovne

$$T_{pump} = \frac{(T_{proc} TS) + (T_{turb} M_{turb})}{(TS + M_{turb})} \quad (5)$$

Výsledná teplota vratného kondenzátu do kotla sa vypočíta podľa vzťahu (6)

$$T_{boil} = T_{pump} + \frac{Q_{preheat}}{(TS + M_{turb})c_p} \quad (6)$$

Následne sa môže vypočítať účinnosť kotla

$$\eta_b = \frac{q((TS + M_{turb})/M^{\max})}{(c_p(T_{sat} - T_{boil}) + q)((1+b)((TS + M_{turb})/M^{\max}) + a)} \quad (7)$$

Keďže znižovanie spotreby pary spôsobuje zníženie teploty vratného kondenzátu, odporúča sa vratný kondenzát pred vstupom do kotla ohrievať zjavným teplom časťou prehriatej pary vystupujúcej z kotla. Vo väčšine prípadov je aj tak tato energia marená v dôsledku škrtenia pary pri odbere do prevádzky. Nová teplota vratného kondenzátu pred vstupom do kotla sa potom vypočíta nasledovne

$$T_{boil} = T_{pump} + \frac{TS(h_{sup} - h_{sat})\theta}{(TS + M_{turb})c_p} \quad (8)$$

Rovnice (4)-(8) môžu byť použité pri vytvorení druhej časti matematického modelu, pričom pripadajú do úvahy dva prípady.

- A. Hlavným cieľom je zachovať účinnosť parného kotla, čo však môže znamenať, že pri nedostatku zjavného tepla nemusíme dosiahnuť minimálny prietok pary na výstupe z kotla. Najprv treba nájsť minimálny prietok pary, a následne stanoviť účinnosť kotla, zatiaľ čo sa odchýlka od minimálneho prietoku pary minimalizuje [14].
- B. Hlavným cieľom je zníženie prietoku pary pri čo najmenšom poklese účinnosti kotla. So zisteným prietokom sa následne minimalizuje odchýlka účinnosti kotla [14].

V experimentálnej práci [2] sa pomocou použitého modelu sledovali zmeny v minimálnom prietoku pary a v účinnosti kotla pri zmenšení množstva zjavného tepla odovzdaného kondenzátu pred vstupom do kotla. Vo všeobecnosti platí, že v prípade nedostatku takéhoto tepla je potrebné robiť kompromis v minimálnom prietoku pary a v účinnosti parného kotla.

### 3 NÍZKOTEPLTNÁ KORÓZIA

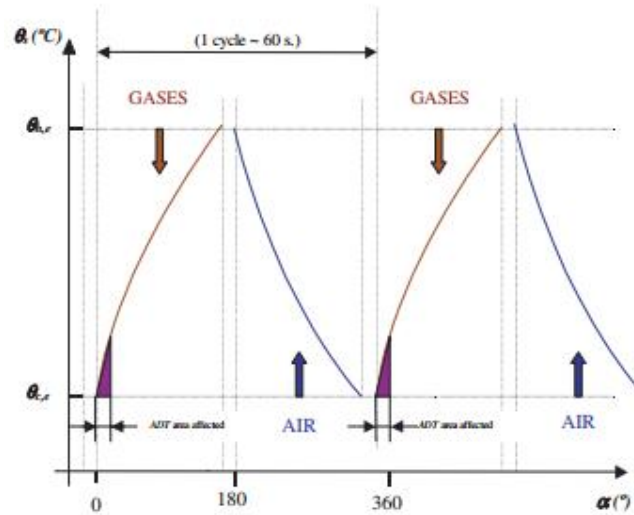
Pri návrhu výmenníka tepla (regeneračný rotačný výmenník tepla) pre ohrev spaľovacieho vzduchu musíme brať do úvahy najmä tieto skutočnosti, a to obsah síry prítomný v palive, nadbytok spaľovacieho vzduchu a taktiež teplotu napájacej vody vstupujúcu do parného kotla. Tento rotačný regenerátor sa inštaluje za ekonomizérom, a je poslednou časťou parného kotla. Vzhľadom k tomu, že spaliny obsahujú najmenšiu teplotu pred vypustením do okolia, je tento výmenník tepla veľmi citlivý na rosný bod spalín. Pri znížení teploty spalín pod teplotu rosného bodu dochádza ku kondenzácii kyseliny sírovej/siričitej (vznik reakciou  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  s vlhkosťou obsiahnutou v spalínach), pričom tieto kyseliny sú silne korozívne a poškadzujú samotný výmenník. Zvýšenú tvorbu  $\text{SO}_3$  v spalínach priaznivo podporuje zvýšený nadbytok spaľovacieho vzduchu, pokles teploty plameňa, alebo aj prítomnosť katalyzátora. Zvýšený obsah síry v palive zvyšuje parciálny tlak  $\text{SO}_3$  v spalínach, čo vedie k nárastu teploty rosného bodu. Musíme teda zabezpečiť dostatočne vysokú teplotu spalín na výstupe z rotačného regenerátora. S týmto je ale spojený problém s „mrhaním“, tepla obsiahnutého v spalínach, ktoré odchádza do okolia. Má to negatívny vplyv na parný kotol, lebo sa znižuje jeho účinnosť.

Výpočtom teploty rosného bodu spalín pre rôzne typy paliva, ako aj teplotným profilom v rotačnom regenerátore sa zaoberal vo svojej štúdií [4] pán Blanco a spol. Z experimentálnych dát pre referenčnú tepelnú elektrárňu zostrojil závislosť teploty rosného bodu od koncentrácie  $\text{SO}_3$  (ppm) v spalínach. Výsledkom je, že pre koncentrácie  $\text{SO}_3$  v spalínach väčšie ako 5 ppm je tvar krivky logaritmický a pri koncentráciách nižších ako 5 ppm má krivka parabolický tvar. Potom príslušné matematické rovnice majú nasledujúci tvar (rovnica (9) je pre koncentrácie vyššie ako 5 ppm)

$$\theta_{\text{ADT},1} = 12.065 \cdot \ln[\text{SO}_3]_{\text{V}} + 107.46 \quad (9)$$

$$\theta_{\text{ADT},2} = 0.1297 \cdot [\text{SO}_3]_{\text{V}}^4 - 0.7236 \cdot [\text{SO}_3]_{\text{V}}^3 - 5.2272 \cdot [\text{SO}_3]_{\text{V}}^2 + 45.912 \cdot [\text{SO}_3]_{\text{V}} + 36.269 \quad (10)$$

Na základe zostrojenej závislosti povrchovej teploty teplovýmenných plôch panelov v regenerátore od celkového uhla otočenia rotačného regenerátora (Obr. 3), bolo možné určiť aj zónu teplovýmenných panelov, ktorá je vystavená rosnému bodu spalín. Pre palivo s nižším obsahom síry vyšla o 25 % menšia zóna, ako pre palivá s obsahom síry okolo 3 % v palive.



Obr. 3 “Závislosť povrchovej teploty TV panelov od celkového uhla otočenia rotačného regenerátora“

Zároveň z práce vyplynulo, že pri výmene paliva s vyšším obsahom síry (2,9 %) za palivo s nižším obsahom (<1 %) sa predĺži životnosť rotačného regenerátora zo 4 na 5 rokov. Taktiež sa na základe údajov z analyzátora spalín ukázalo zníženie emisií až o 72 % pri použití paliva s nižším obsahom síry.

## 4 KONTROLA KVALITY NAPÁJACEJ VODY

Úlohou práce [3] pána Vidojkovica a spol. bola komplexná chemická kontrola napájacej vody v kritickej tepelnej elektrárni, ktorej výsledkom boli návrhy na zlepšenie v monitorovaní kvality vody. Na základe experimentálnych údajov sa ukázala nedostatočná kvalita NV v príslušnej elektrárni, výsledkom čoho bola znížená účinnosť elektrárne a tvorba korózie v parných rozvodoch. Pri zavádzaní nového kotla vzniká na začiatku na kovovom povrchu pasívna vrstva oxidu železnato-železitého, ktorá slúži ako ochranná vrstva povrchu. Avšak pod vplyvom rôznych zložiek (parametrov) prítomných v napájacej vode dochádza k postupnému rozrušeniu tejto vrstvy a následne vplyvom korózie k poškodeniu materiálu zariadenia. Pravidelné sledovanie hladín dôležitých parametrov je veľmi podstatné z hľadiska prevencie proti korózii a zníženiu tvorby usadenín na teplovýmennej ploche.

V Tab. 3 môžeme vidieť hodnoty jednotlivých meraných parametrov vo vratnom kondenzáte pred vstupom do ekonomizéra, resp. na výstupe z odlučovača kondenzátu v porovnaní s údajmi v Tab. 4, meranie ktorých vykonával vo svojej práci [5] pán Bhatt (hodnoty meraných parametrov v závislosti od typu NV).

Tab. 3 “Merané hodnoty parametrov v NV“

Feedwater quality parameters, ppb	Sampling points	
	Economizer inlet	Condensate polisher outlet
Sodium	10	20
	30	40
	75	28
Chloride	12	22
	40	42
	90	80
Sulfate	95	61
	94	82
	30	10
Iron	20	10
	130	130
	148	119
Copper	2.7	4.2
	0.5	7.5
	3	16
TOC	5.5	6.3
	1.5	2.5
	5.3	<0.5
	12	<2
	3.1	3.2
	<300	<300
	<300	<300
	<300	<300
	<300	<300

Bold entries represent exceeded target values of measured parameters.

Tab. 4 “Typické hodnoty meraných parametrov v rôznych typoch NV“

Sl. no.	Particular	Borewell water	Lake water	Canal water	River water
1	Alkalinity (pH)	8.0	8.0	8.1	8.0
2	Total dissolved solids (ppm)	355	250	160	453
3	Electrical conductivity ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	466	365	235	903
4	Turbidity (NTU)	3.0	10.0	6.0	6.0
5	Sodium (ppm)	27.0	38.0	11.0	93.7
6	Calcium (ppm)	38.0	28.0	30.0	68.8
7	Magnesium (ppm)	15.0	10.0	7.0	21.6
8	Potassium (ppm)	2.0	3.0	1.0	21.1
9	Silicon (ppm)	5.8	6.5	3.8	6.5
10	Aluminium (ppm)	0.2	0.4	0.1	2.4

V Tab. 5 sú uvedené limitné hodnoty jednotlivých sledovaných parametrov, ich vplyv na zariadenia, resp. účel ich merania. Ďalšie mnohé údaje sú k dispozícii v samotnej exp. práci v tabuľke č.3.

Tab. 5 “Vplyv meraných parametrov na zariadenia a ich limitné hodnoty“

Parameter	limity	Vplyv na materiál	Účel merania
pH	9 - 9,3 [15]	Zvyšovanie korozívnych účinkov pri znižovaní pH	Regulácia dávkovania amoniaku, resp. hydrazínu
Katiónová vodivosť	0,2 mS/cm > ... [16]	Zvyšovanie vodivosti spôsobuje zvyšovanie kor. účinkov	Kontrola chodu chemickej úpravy vody
Rozpus.O <sub>2</sub>	< 5 ppb [15]	Zvýšená konc.O <sub>2</sub> v kombinácií s chloridmi podporuje kys. korózie	Meranie konc. na výstupe z odplyn. a na vstupe do ekonomizéra
Na	< 3 ppb [16]	Tvorba hydroxidu a chloridu sodného, ktoré spôsobujú koróziu	Hovorí o kvalite napájacej vody (NV)
SiO <sub>2</sub>	< 20 ppb	Kremičitanové usadeniny znižujú účinnosť parných turbín	Zaistenie požadovanej koncentrácie v napájacej vode
Cl <sup>-</sup>	< 3 ppb [15]	Chloridy kys. spôsobujú poškodenie rúrok, účinnosť turbín	Hovorí o účinnosti odlučovača kondenzátu
Síran	< 3 ppb [15]	Vznik usadenín tvorených síranom sodným	Kontrola konc. v NV
Fe	< 20 ppb	Tvorba usadenín s následnou koróziou	Kontrola kvality NV
Cu	< 3 ppb	Tvorba usadenín v turbínach znižuje ich účinnosť	Udržiavanie hodnoty konc. pod limitom
COU*	< 300 ppb	Tvorba kys. octovej a CO <sub>2</sub>	Ochrana pred kontamináciou

\*celkový organický uhlík



## 5 VPLYV USADENÍN NA VÝKON TEPELNÝCH ELEKTRÁRNÍ

Jednou z prísnych požiadaviek pre optimálny chod elektrární je kontrola kontaminácie zariadení. Tá vzniká v dôsledku nedostatočnej úpravy napájacej vody, únikmi chladiacej vody v kondenzátore do prúdu demineralizovanej vody, obsahu rôznych chemických látok vo vzniknutej pare, alebo koróziou zariadení v parnom obehú. Znečistenie napájacej vody vyúsťuje do tvorby usadenín na vnútornom povrchu parného/vodného potrubia/zariadenia, predhrievačov NV, alebo v kondenzátore. V praxi sa usadeniny o hrúbke 100  $\mu\text{m}$  považujú za bezvýznamné. Za významné sa považujú až usadeniny s hrúbkou 300  $\mu\text{m}$ . Výsledkom tvorby usadením je mnoho negatívnych prejavov, a to napr. zníženie prestupu tepla v parných kotloch, predhrievačov vody, turbínach, kondenzátore, atď. Ďalej je to zvýšený hydrodynamický odpor v prietokovom okruhu, čo má za následok zvýšený príkon (väčšia spotreba paliva) a znížený výkon (na turbínach). Výsledkom usadenín sú taktiež poruchy rúrok v kotle spôsobené koróziou a vznikom horúcich miest, alebo napríklad nesprávna odozva termostatov.

Vplyvom usadenín na energetickú účinnosť elektrárne sa vo svojej štúdií zaoberal aj pán Bhatt, ktorý zistil nasledujúce skutočnosti:

- Priemerná hrúbka usadenín v parných kotloch v Indických elektrárnach je 300-500  $\mu\text{m}$  (20 rokov), v turbínach 600-1000  $\mu\text{m}$  (5 rokov), v kondenzátoroch 300-600  $\mu\text{m}$  (1 rok), olejové chladiče 300-500  $\mu\text{m}$  (1 rok)
- Najkritickejšie miesto z pohľadu tvorby usadenín je prehrievač, kde usadeniny urýchľujú poškodenia potrubia v dôsledku korózie a prítomných „hot spots“
- Zníženie teplovýmenej plochy v dôsledku usadenín je v rozsahu 0,2-3 %.
- Takisto dochádza k vyššej spotrebe paliva 0,6-7% (pri 210 MW ele.), ako aj k zníženiu výkonu parných turbín (10-12 MW z 210 MW) vplyvom hydrodynamického odporu
- Zhoršenie chodu kondenzátora, ako aj znížená efektívnosť práce ohrievačov NV
- Spol'ahlivé zariadenia na meranie kontaminácie dokážu znížiť rýchlosť tvorby usadenín až o 25 %

## 6 REDUKCIA EMISÍ

### 6.1 Inštalovaný príkon

Politika v oblasti úspor energií a znižovania emisií zaviedla množstvo zásad a metód s cieľom znižovať znečistenie, ako je zvýšenie inštalovaného príkonu a inštalácia zariadení na reguláciu emisií. Preto potrebná kapacita pre novopostavené jednotky v Číne je 300 MW a tie s menšími inštalovanými príkonmi boli zatvorené.

V práci [6] sa autori zaoberajú charakterizáciou vytvorených a emitovaných  $\text{NO}_x$  emisií z nových elektrární s rôznymi typmi kotlov, inštalovanými príkonmi, prevádzkovými podmienkami, ako aj inštaláciou zariadení na redukciu emisií.

Kapacita kotlov bola rozdelená do troch skupín a pri 100% zaťažení boli namerané:

- < 600MW: koncentrácia  $\text{NO}_x$  - 481 ppm a emisný faktor - 4,97 g/kg
- 600-800MW: koncentrácia  $\text{NO}_x$  - 199 ppm a emisný faktor – 2,63 g/kg
- > 800MW: koncentrácia  $\text{NO}_x$  - 200 ppm a emisný faktor – 1,94 g/kg

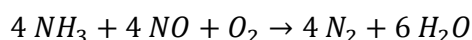
Prevádzkové podmienky ovplyvňujú koncentráciu  $\text{NO}_x$  zmenou obsahu kyslíka a teploty spalín. So znižujúcim sa zaťažením klesá teplota spalín, čo má za následok menej tepelného a palivového  $\text{NO}_x$ . Avšak prebytok vzduchu vzrastá s klesajúcim zaťažením, čo má za následok väčšiu tvorbu  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$ . Spojením dôsledkov zníženia teploty a zvýšenia koncentrácie kyslíka má za následok nepredvídateľné zmeny v charakteristike  $\text{NO}_x$ .

### 6.2 Zariadenia na redukciu $\text{NO}_x$

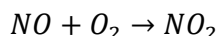
Mnohé nové jednotky boli inštalované s nízko  $\text{NO}_x$ -ovými horákmi - LNBS. Všeobecne platí, že účinnosť odstránenia  $\text{NO}_x$  pomocou LNB je v rozmedzí 30-50%. Účinnosť môže byť zlepšená až o 40% úpravou dizajnu LNB horákov.

Vo väčšine Čínskych elektrární boli inštalované zariadenia na kontrolu vzdušného znečistenia - APCDs, elektrostatické odlučovače - ESP, odsírovače spalín - FGD a jednotky selektívnej katalytickej redukcie - SCR.

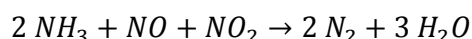
Tvorba NO<sub>2</sub> oxidáciou NO je zanedbateľná pri teplote spalín nad 800 K, pri ktorej produkcia NO presahuje NO<sub>2</sub>. Avšak prítomnosť SCR jednotky môže teoreticky urýchliť oxidáciu a vzhľadom na mechanizmus SCR, najviac NO sa odstráni štandardnou SCR reakciou:



Niektorý NO najskôr konvertuje na NO<sub>2</sub> pomocou kyslíka a SCR katalyzátora:



Pôvodne a novo produkovaný NO<sub>2</sub>, môže byť odstránený rýchlou SCR reakciou:



Vďaka prítomnosti kyslíka môže NO parciálne oxidovať na NO<sub>2</sub> aj v FGD jednotke.

### 6.3 Matematické modelovania

Úroveň NO<sub>x</sub> emisií z tepelných elektrární v Srbsku presahuje európsky štandard 200 mg/Nm<sup>3</sup>. Oxidy dusíka sú produkované hlavne oxidáciou dusíka pri spaľovaní vzduchom pri vysokej teplote - tepelný NO<sub>x</sub>, ktorý je priamo závislý na lokálnej teplote plameňa. Oxidáciou dusíka v palive vzniká palivový NO<sub>x</sub>, ktorý je dominantný pri kotloch spaľujúcich uhlie, vzniká pri nižšej teplote a je primárne závislý na obsahu dusíka v palive a kyslíka v plameni.

V porovnaní s experimentálnym výskumom, numerické simulácie sú lacnejšie, ľahšie aplikovateľné a poskytujú uspokojivejšie výsledky. Matematický model spaľovania hnedého uhlia v parných kotloch v práci [7] je definovaný a aplikovaný na analýzu a realizovanie istých primárnych opatrení na zníženie NO<sub>x</sub> a ich vplyvu na prevádzkovanie parného kotla. Tento komplexný matematický model sa vzťahuje k tepelným a aerodynamickým výpočtom vnútri parného kotla a spája výpočtový systém tak, aby bolo možné analyzovať kotol počas prevádzky.

Najväčší vplyv na koncentráciu NO<sub>x</sub> v spalínach v parných kotloch spaľujúcich práškové uhlie, má pomer paliva a kyslíka. Pôvodná hodnota súčiniteľa prebytku vzduchu je v neupravenom kotly 1,22. Emisie NO<sub>x</sub> z tohto neupraveného kotla výrazne prevyšujú európsky štandard (200 g/Nm<sup>3</sup>) a sú na hodnote 470 mg/Nm<sup>3</sup> s účinnosťou kotla 85,5%.

Analýza sa vykonávala pre 5 testovacích prípadov modifikácie spaľovacieho systému:

- Referenčný model - TC<sub>1</sub>, s hodnotou súčiniteľa prebytku vzduchu 1,15 (zníženie celkového množstva privádzaného vzduchu) spĺňa ekologické limity s účinnosťou 86,9%.
- Model s celkovým zvýšeným prebytkom vzduchu - TC<sub>2</sub>, nie je schopný splniť limity NO<sub>x</sub>.
- Model so zvýšeným prebytkom vzduchu v peci - TC<sub>3</sub>, je mimoriadne nepriaznivý z hľadiska efektívnosti (84,5%), zanášania predhrievača popolom a zvýšenou koncentráciou NO<sub>x</sub> a CO.
- Model bez recirkulácie studených spalín - TC<sub>4</sub>, je najpriaznivejší z hľadiska účinnosti (87,4%), ale hodnota NO<sub>x</sub> emisií dosahuje emisný limit.
- Model s maximálnou recirkuláciou spalín - TC<sub>5</sub>, spĺňa emisné limity, ale zároveň je vysoko nežiaduci z hľadiska zhoršených podmienok výmeny tepla v peci a intenzívnejšej tvorby korózie.

## 6.4 Spaľovanie uhlia s kyslíkom

Poslednej dobre prirahuje pozornosť proces spaľovania uhlia s kyslíkom (CCO) s vopred oddeleným dusíkom. V porovnaní s bežným procesom spaľovania uhlia so vzduchom (CCA), CCO proces vykazuje nasledujúce výhody:

1. Oddelenie CO<sub>2</sub> zo spalín je oveľa ľahšie, lacnejšie a môžu byť dosiahnuté nulové emisie.
2. Efektívnosť spaľovania je posilnená vyššou koncentráciou kyslíka pri spaľovaní a zvýši sa účinnosť kotla.
3. Množstvo vyprodukovaných emisií NO<sub>x</sub> je redukované, pretože je eliminovaná fixácia atmosférického dusíka.
4. Teplotu spaľovania môžeme kontrolovať recirkuláciou časti spalín – proces je viac flexibilnejší.

V článku [8] boli v experimentoch ako vstupné plyny okrem kyslíka použité zmesi O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> a O<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> s rôznymi koncentraciami.

### *NO<sub>x</sub> emisie*

- Koncentrácia NO<sub>x</sub> klesala s klesajúcou koncentráciou kyslíka:
  - o 4500 ppm pre proces s čistým kyslíkom,
  - o 1000 ppm pri vzduchu a
  - o 500 ppm pre proces s O<sub>2</sub> (20%) + CO<sub>2</sub> (80%).
- Emisie NO<sub>x</sub> pri spaľovaní s CO<sub>2</sub> sú vždy nižšie ako pri procesoch s dusíkom – nevzniká žiaden NO<sub>x</sub> fixáciou atmosférického dusíka.
- S rastúcou teplotou sa emisie NO<sub>x</sub> zvyšujú vo všetkých prípadoch, okrem procesu s O<sub>2</sub> (20%) + CO<sub>2</sub> (80%), kde sú nízke.
- Najviac emitovaného NO<sub>x</sub> je pri procese s O<sub>2</sub> (50%) + N<sub>2</sub> (50%).

### *SO<sub>2</sub> emisie*

- V oblasti bohatého spaľovania – pokles SO<sub>2</sub> emisií – vznik H<sub>2</sub>S, COS a CS<sub>2</sub>.

## **6.5 Spoluspaľovanie**

Pri spoluspaľovaní dochádza k spaľovaniu dvoch alebo viacerých palív v rovnakom čase na výrobu energie. Výhody spoluspaľovania paliva a odpadového materiálu zahŕňa redukciu CO<sub>2</sub> emisií z fosílnych palív, efektívnejšie zneškodnenie odpadu vzhľadom na životné prostredie a eliminuje potrebu spaľovní odpadov. Vzhľadom na fakt, že zloženie palív je rôzne, spoluspaľovanie dvoch palív môže viesť k pozitívnym alebo negatívnym efektom, čomu sa venovali autori v práci [9].

Jedným z množstva takéhoto odpadu je morený kal, ktorý vzniká pri neutralizácii odpadových vôd. Proces morenia kovov používa kyselinu sírovú a fluorovodíkovú a morený kal preto obsahuje veľké množstvo CaSO<sub>4</sub> a CaF<sub>2</sub>. Z tohto dôvodu je tento kal ťažké priamo recyklovať do procesu výroby ocele.

### *SO<sub>2</sub> emisie*

- Významne ovplyvnené teplotou v peci a množstvom kalu.
- Obsah síry v kale je 20x vyšší ako v uhlí – so zvyšujúcim sa podielom kalu nárast emisií SO<sub>2</sub>.

### *NO<sub>x</sub> emisie*

- Ovplyvnené teplotou v peci a obsahom kalu.
- Obsah dusíka a prchavých látok v kale je nižší – zried'ovací efekt, NO<sub>x</sub> emisie klesajú s obsahom kalu.
- Nižšia energetická hodnota kalu - vyšší obsah kalu redukuje tepelný obsah zmiešaného paliva – nižšia teplota plameňa – redukcia NO<sub>x</sub> emisií.

### *HCl emisie*

- Pridanie kalu redukuje HCl emisie vznikajúce z palivového chlóru.
- Množstvo emisií rastie s rastúcou teplotou.

Práca [10] sa zaoberá modelovaním koncentrácií emisií, emisnými sadzbami a mernými emisiami pre hlavné znečisťujúce látky z 200 a 310 MW kotlov na vykurovací olej a zemný plyn pri premenlivých prevádzkových podmienkach. Kotly tepelných elektrární v Thajsku spaľujúce vykurovací olej a zemný plyn, sú zvyčajne striedavo prevádzkované, a preto majú rozdielne zaťaženie.

### *NO<sub>x</sub> emisie*

- Pri spaľovaní vykurovacieho oleja pri 100% zaťažení, je celková koncentrácia NO<sub>x</sub> v spalinách na výstupe z pece daná prebytkom vzduchu v zóne horáka a množstvom dusíka v palive, zatiaľ čo vplyv recirkulácie spalín a teploty plameňa je minimálny.
- Spaľovaním zemného plynu sa oxidy dusíka tvoria pri plameni len termálnym mechanizmom a podiel palivového NO<sub>x</sub> je nulový.

### *SO<sub>x</sub> emisie*

- Spaľovaním zemného plynu sa neprodukujú oxidy síry.
- Koncentrácia SO<sub>3</sub> je pri spaľovaní vykurovacieho oleja priamo úmerná množstvu síry v palive a je ovplyvnené zaťažením kotla, prebytkom kyslíka v horiacej zóne a geometriou pece.

## 6.6 Spaľovanie nízko sírneho vykurovacieho oleja

SO<sub>3</sub> emisie z 200 MW kotla pri spaľovaní nízko sírneho vykurovacieho oleja sú zanedbateľné. Koncentrácia SO<sub>2</sub> sa zo zmenou zaťaženia v rozmedzí 50-100% nemenila. Podobný efekt bol zistený aj pri analýze emisií CO<sub>2</sub>. Tieto kotly spaľujúce nízko sírny vykurovací olej spĺňajú normy pre NO<sub>x</sub> a SO<sub>2</sub>.

## 6.7 Spaľovanie stredne sírneho vykurovacieho oleja a zemného plynu

Vzhľadom na rozdiely v obsahu dusíka v palive a prevádzkových podmienok, emisie NO<sub>x</sub> zo spaľovania stredne sírneho vykurovacieho oleja v 310 MW kotly boli mierne vyššie ako pri 200 MW kotly. SO<sub>3</sub> emisie z tohto kotla sú pomerne nízke, avšak pokiaľ ide o špecifickú koncentráciu, je 10-krát vyššia ako pri 200 MW kotly spaľujúcim nízko sírny vykurovací olej. Ak vezmeme do úvahy vyššiu toxicitu SO<sub>3</sub> ako SO<sub>2</sub>, príspevok na náklady na ochranu životného prostredia môže byť významný.

Koncentrácia SO<sub>2</sub> pre tento kotol a toto palivo je vysoká - 766-781 ppm a podstatne vyššia ako emisné normy pre SO<sub>2</sub>. Z tohto dôvodu, stredne sírny vykurovací olej môže byť použitý na spoluspaľovanie so zemným plynom.

## 6.8 Korózia

Olejové palivá obsahujú prvky ako uhlík, vodík ale aj malé množstvá síry. Počas procesu spaľovania, sú tieto prvky rýchlo oxidované a síra, ktorá je v palive, môže v kombinácii s kyslíkom reagovať za vzniku SO<sub>2</sub> pri parciálnej oxidácii, alebo pri úplnej na SO<sub>3</sub>.

SO<sub>2</sub> v kombinácii so vzdušnou vlhkosťou vytvára kyselinu siričitú H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, ktorá je silne korozívna. Približne 1 až 2% SO<sub>2</sub> ďalej oxiduje na SO<sub>3</sub>, ktorý v kombinácii s prehriatou vodnou parou vytvára pary kyseliny sírovej H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Kondenzácia týchto vyššie uvedených kyslých pár zo spalín je výsledkom kontaktu spalín s kovovými vykurovacími plochami rotačnej regeneračnej jednotky, ktorá využíva teplo zo spalín na predohrev spaľovacieho vzduchu. Táto kondenzácia prebieha s koncentráciou okolo 98% a za týchto okolností nie je príliš agresívna. Avšak pri odstávke kotlov H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> absorbuje

vzdušnú vlhkosť, jej koncentrácia sa zníži na asi 40%, pričom sa stáva vysoko korozívna pre všetky kovové steny.

#### *Palivo No.2*

- Používa sa v španielskych tepelných elektrárnach.
- Hmotnostný podiel síry 2,9 %.
- Emisie  $\text{SO}_2 = 1\,890$  ppm,  $\text{SO}_3$  (1%) = 18,9 ppm

#### *Nízko sírne palivo*

- Obsah síry do 1%.
- Emisie  $\text{SO}_2 = 455$  ppm a  $\text{SO}_3 = 4,55$  ppm.

Nahradením paliva No.2 za nízko sírne palivo, poklesnú emisie  $\text{SO}_2$  o 75% a výrazne sa zníži údržba rotačného regenerátora, vzhľadom na značné zníženie plochy, ktorá je vystavená korózii [4].



## ZÁVER

Cieľom našej práce bolo zaoberať sa problematikou parných kotlov, ich účinnosťou, a taktiež opísať problém s emisiami. Zároveň sme priblížili problém s nízkoteplotnou koróziou, ako aj monitorovanie kvality napájacej vody v parnom obeh, či problém s usadeninami v parných/vodných zariadeniach.

Pri vysvetľovaní súvislosti sme vychádzali z viacerých experimentálnych štúdií, ktoré boli vykonávané v reálnych tepelných elektrárnach. Výsledkom týchto štúdií boli väčšinou návrhové opatrenia pre zlepšenie účinnosti parného kotla, ako aj celkovej účinnosti parného obehu.