

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF

**SNIŽOVÁNÍ OBSAHU  
SPALITELNÝCH LÁTEK V ÚLETOVÉM POPELU**  
REDUCING THE CONTENT OF COMBUSTIBLE SUBSTANCES IN THE FLYING ASH

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**MATEJ MUCHA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. MAREK BALÁŠ, PH.D.**

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/12

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Matej Mucha

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Snižování obsahu spalitelných látek v úletovém popelu**

v anglickém jazyce:

### **Reducing the content of combustible substances in the flying ash**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednou ze ztrát kotlů na tuhá paliva je tzv. ztráta mechanickým nedopalem. Ztráta vzniká neúplným vyhořením částic paliva. Hořlavina odchází v tuhých zbytcích.

Nejčastějším důvodem této ztráty je zavádění příliš malých částic uhlí do spalovací komory a to nestačí vyhořet a okamžitě odchází se spalinami.

Jakékoli opatření, které by ulétávání zabránilo, sníží tuto ztrátu a tak zvýší účinnost celého kotle.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je navrhnout taková opatření, která sníží podíl hořlaviny v tuhém úletu a tím zvýší celkovou účinnost kotle.

Seznam odborné literatury:

Černý, V.: Parní kotle. SNTL 1983.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Baláš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 17.10.2011



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

Práca pojednáva o vzniku, využití, výhodách a nevýhodách fluidnej vrstvy. Ďalej popisuje závod Elektrárne Vojany SE a.s., proces výroby a použitú technológiu cirkulačných fluidných kotlov s ich prevádzkovými nedostatkami. Práca zhŕňa návrhy riešenia nedostatkov podané Technologickou univerzitou v Czestochovej a zároveň poskytuje vlastný návrh riešenia príliš veľkého obsahu uhlíka v úletovom popole.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

fluidné lôžko, cirkulačná fluidná vrstva, spaľovanie, fluidný kotol, mechanický nedopal, úletový popolček, triedič paliva, primárny vzduch, granulácia popolčeka, tepelná elektrárňa, uhlie

## **ABSTRACT**

The thesis deals with formation, usage, advantages and disadvantages of fluidized bed. It describes power plant Vojany, the process of generation power, used technology of fluidized bed boilers and their technical problems.

The thesis summarizes the solutions given by University of technology Czestochova and also gives suggestion to solve the problem of large content of combustible coal parts in fly ash.

## **KEYWORDS**

fluidized bed, circulating fluidized bed, combustion, fluidized bed boiler, unburned coal , fly ash, coal separator, primary air, fly ash granulation, coal power plant, coal

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

MUCHA, M. *Snižování obsahu spalitelných látek v úletovém popelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Mareka Baláše Ph.D. a konzultanta Ing. Mareka Bežovského Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 25. mája 2012

.....

Meno a priezvisko

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem vedúcemu práce, Ing. Marekovi Balášovi Ph.D., za konzultačné hodiny, ochotu poskytnúť podklady, jeho čas a cenné rady pri tvorbe textu práce.

Ďakujem konzultantovi, Ing. Marekovi Bežovskému Ph.D., za zoznámenie s prevádzkou Elektrárne Vojany, za jeho čas a informácie.

## Obsah

Úvod.....	11
1. Spaľovanie vo fluidnej vrstve.....	12
1.1 História.....	12
1.2 Princíp fluidnej vrstvy.....	12
1.3 Výhody fluidnej technológie.....	14
1.3.1 Špecifické výhody CFBC.....	15
1.4 Nevýhody.....	16
1.4.1 Popis straty horľavinou v tuhých zbytkoch.....	16
2. Závod Elektrárne Vojany.....	18
2.1. Popis.....	18
2.2. História.....	18
2.3 Súčasný závod.....	20
2.3.1 Spoluspaľovanie biomasy.....	20
2.3.2 Fotovoltaika vo Vojanoch.....	21
2.4 Stručný popis výroby.....	21
2.4.1 Palivo.....	22
2.4.2 Kotolňa.....	23
2.4.3 Strojovňa.....	23
2.4.4 Systém kontroly a riadenia.....	23
2.4.5 Zložisko stabilizátu.....	24
2.5 Detailný popis fluidných kotlov Elektrárne Vojany.....	24
2.5.1 Spaľovací systém CFB (výroba tepla).....	24
2.5.2 Dodávka spaľovacieho vzduchu.....	26
2.5.3 Cyklóny.....	26
2.5.4 Spaľovacia komora.....	26
2.5.5 Druhý ťah - prehrievač a prihrievač.....	26
2.5.6 Ohrievač vzduchu.....	27
2.5.7. Nedostatky fluidných kotlov.....	27
3. Návrhy riešenia vysokého obsahu spaliteľných látok v úletovom popole (mechanický nedopal).....	27
3.1 Návrhy riešenia Technologickej univerzity Czestochowa.....	27

3.1.1 Inštalácia „políc“ do spaľovacej komory .....	29
3.1.2 Granulácia popolčeka.....	30
3.1.3 Zhrnutie návrhov univerzity Czestochowa .....	32
3.2 Optimalizácia vstupnej granulometrie uhlia do fluidných kotlov .....	32
3.2.1 Popis súčasného stavu .....	32
3.2.2 Možnosti riešenia.....	33
3.2.3 Prepočet materiálovej bilancie .....	34
3.2.4 Prieskum trhu.....	35
Záver .....	37
Použité informačné zdroje .....	39

# Úvod

Dostatok elektrickej energie v rýchlo rozvíjajúcej sa spoločnosti bol nevyhnutný v minulosti a úmerne s tempom vývoja ekonomickej situácie rastie aj dnes. Je dôležité klásť dôraz na vyčerpatelnosť neobnoviteľných zdrojov a preto z roka na rok sa zväčšuje podiel výroby elektrickej energie zo zdrojov obnoviteľných. Slovensko prevažnú časť neobnoviteľných zdrojov musí dovážať zo zahraničia. Následne sa využívajú hlavne v elektrárňstve a teplárňstve. [18]

Elektrárne Vojany ako súčasť SE a.s. a člen skupiny ENEL sú už roky neodmysliteľným zdrojom elektriny dodávanej do siete elektrizačnej sústavy (ES) východnej časti Slovenka. Ich účelom je s čo možno najmenším vplyvom na životné prostredie vyrábať požadované množstvo elektriny a vyhovieť požiadavkám prevádzkovateľa ES.

V záujme zvyšovania ekonomickej prevádzky a zníženia dopadu na životné prostredie boli v roku 2001 prestavané práškové kotly 5 a 6 na kotly využívajúce fluidnú cirkulačnú vrstvu. Táto technológia umožňuje spoluspaľovanie biomasy (v súčasnosti až do cca 10 % kalorickej hmoty), čím sa rapídne znížili emisie CO<sub>2</sub>.

Na druhej strane je to nová technológia, ktorá ešte nemá úplne „vychytané muchy“. Jedným z hlavných nedostatkov je príliš vysoký obsah uhlíka v úletovom popole tzv. mechanický nedopal – jedna z piatich základných strát kotla.

Cieľom tejto práce je navrhnúť také opatrenie, ktoré by pomohlo znížiť nedopal a tým zvýšiť celkovú účinnosť premeny energie chemickej väzby paliva na tepelnú energiu vody a vodnej pary.

V práci bude detailne popísaná technológia fluidnej vrstvy, jej výhody a nevýhody. Ďalej bude popísaná elektráreň, jej história, použité fluidné kotly a ich nedostatky. Rešeršným spôsobom budú spracované a zhodnotené návrhy riešenia, ktoré podala Technologická univerzita v Czestochovej. Vlastný návrh, ktorý bol vytvorený v spolupráci s pracovníkmi závodu, bude uvedený na záver.

# 1. Spaľovanie vo fluidnej vrstve

## 1.1 História

Za otca fluidnej technológie sa považuje Fritz Winkler (Nemecko), ktorý v decembri 1921 predstavil nový spôsob výroby plynných produktov splyňovaním vo fluidnej vrstve. Aj napriek evidentným výhodám a vysokej účinnosti sa táto technológia dostávala do procesu výroby so značným oneskorením. Hlavným dôvodom bolo riziko a ekonomická náročnosť zväčšovania zariadenia z laboratórnych veľkostí na reálne.

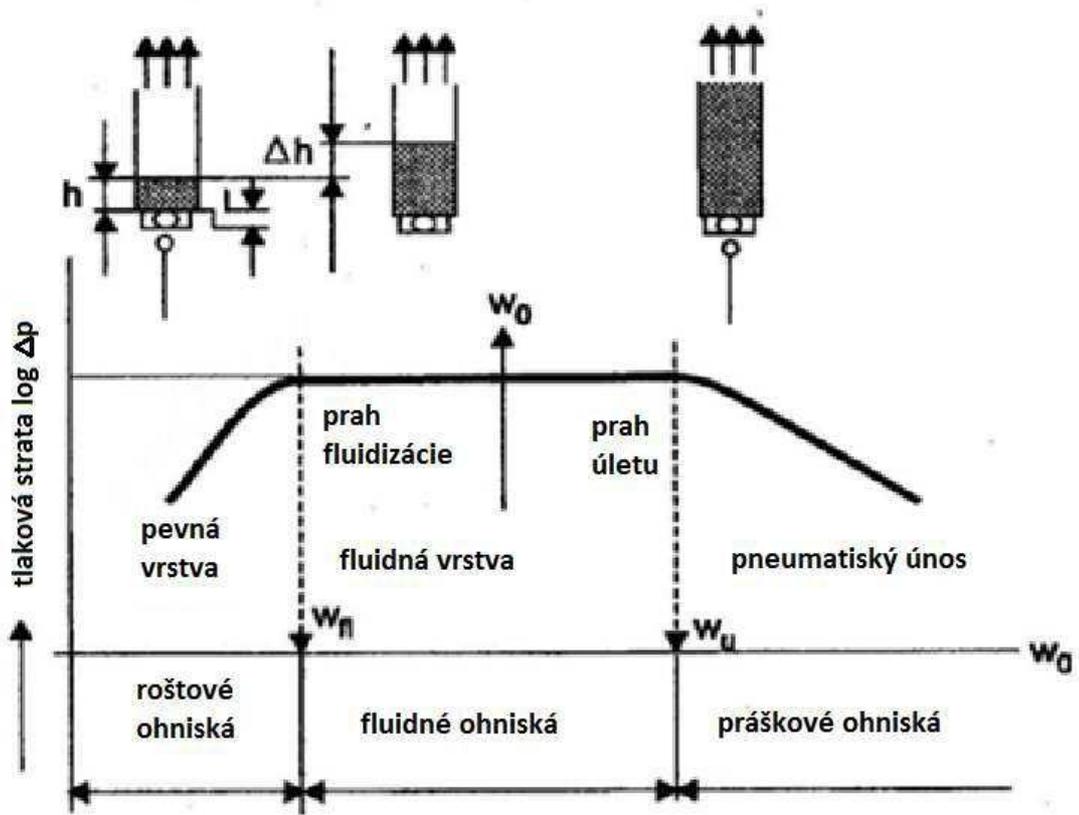
Väčšieho rozvoja sa fluidnej technológii dostalo počas druhej svetovej vojny v oblasti petrochémie, energetiky i v ďalších odvetviach, ktoré aplikujú fluidné spaľovanie. Elliott Douglas posunul vývoj energetiky o krok vpred ponorením prehrievača pary do stacionárnej fluidnej vrstvy (BFBC – bubbling fluidized bed combustion) začiatkom 60tých rokov. Týmto predstavil nový spôsob výroby pary potrebnej pre výrobu elektrickej energie. Niekoľko rokov neskôr bolo objavené spaľovanie v cirkulujúcej fluidnej vrstve (CFBC – circulating fluidized bed combustion) , ktoré sa začalo veľmi často aplikovať pre možnosti odsírenia a separácie jemných častíc. Rozvoj technológie zároveň prebiehal aj v ZSSR, Číne či USA. [13]

Okolo roku 1982 bolo v Indii použité spoluspaľovanie biomasy na výrobu pary. Stalo sa to fenoménom doby a mnoho fluidných kotlov sa zrekonštruovalo spoluspaľovanie, či dokonca sa začali vyrábať kotly iba na biomasu. [17]

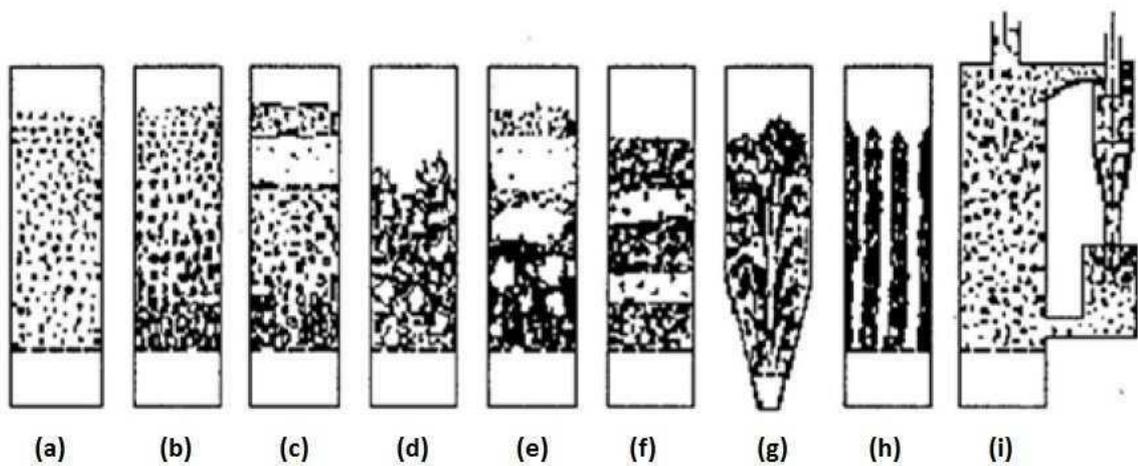
V súčasnosti sa fluidné kotly využívajú veľmi často hlavne kvôli ich výhodám, ktoré sú popísané v kapitole 1.3

## 1.2 Princíp fluidnej vrstvy

Fluidná vrstva je súbor pevných látok udržiavaný vo vznose prúdom fluidizačnej tekutiny. Pri správnom nastavení rýchlosti média sa fluidná vrstva správa ako tekutina - vytvára hladinu. V závislosti na rýchlosti toku tekutiny, tvaru a mernej hmotnosti častíc, zložení častíc, zrnitosti, veľkosti a type pórovitej prepážky, tvare a veľkosti ohniska, fyzikálnych vlastnostiach tekutiny a iných je možné dosiahnuť niekoľkých stavov. *Prah fluidizácie* je stav, kedy začína byť v rovnováhe gravitačná sila so silou prúdiaceho média (vzduchu). Dochádza k expanzii, objem fluidnej vrstvy je väčší ako objem nehybnej vrstvy a častice sú vo vznose. Minimálna potrebná rýchlosť prúdiaceho média sa nazýva *prahová rýchlosť fluidizácie*. So zväčšujúcou sa rýchlosťou vzduchu rastie aj tlaková strata. Pri prekročení *prahovej rýchlosti úletu* začína tekutina unášať častice (Obr. 1.1), čo je nežiaduce. *Rovnomerná vrstva* je stav, kedy sa koncentrácia častíc v čase nemení. Tento stav je požadovaný. Pri fluidizácii kvapalinami sa dá dosiahnuť takmer v celom rozsahu rýchlostí od prahovej rýchlosti fluidizácie až po prahovú rýchlosť úletu. Pri fluidizácii plynmi je to obtiažnejšie, vhodná je rýchlosť len o málo väčšia než prahová rýchlosť fluidizácie. Často však dochádza ku vzniku nerovnomernej vrstvy, hlavne pri fluidizácii plynmi (Obr. 1.2). [17]



Obr. 1.1 - Vznik fluidnej vrstvy [12]



a - rovnomerná (monodisperzná), b - roztriedená (polydisperzná), c - roztriedená s hrubým spodným lôžkom a riedkym mrakom nad ním, d - vriaca, e - bublinková, f - piestujúca, g - fontánová - tryskujúca, h - kanáliková, i - cirkulujúca

Obr. 1.2 Typy vrstiev [12]

### 1.3 Výhody fluidnej technológie

Uvedené výhody sú čerpané z knihy „Combustion and gasification in fluidized beds“, ktorej autorom je Prabir Basu. [13]

- *Rôznorodosť paliva*

Toto je jednou z hlavných výhod spaľovania vo fluidnej vrstve. Táto vlastnosť je spôsobená výborným premiešavaním vzduchu a paliva, čo má za následok aj ďalšiu výhodu a to spaľovanie nízkokvalitného uhlia s obsahom 1 až 3 % hmotnosti spáliteľných pevných látok v palive. Niektoré možné palivá sú uvedené v Tab. 1.1

Tab. 1.1 Palivá fluidných kotlov [13]

uhlie	uhľné zvyšky	dreviny	odpad	komunálny odpad	ropné produkty	plyny	agrárny odpad
antracit	čierno-uhľná hruda	kôra	papierový	odpadové palivo	ropa	plyn z ťažby	slama
čierne uhlie	antracitové zvyšky	drevná štiepka	zo splyňovania	triedený odpad	koks	zemný plyn	olivový odpad
hnedé uhlie	uhľný prach	piliny	komunálny	papier	olej z bridlíc	iné plyny	plevy
lignit		lesné zvyšky	demolačný odpad	drvené pneumatiky			

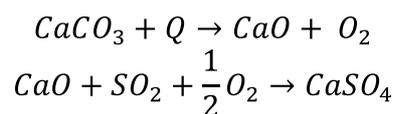
- *Vysoko efektívne spaľovanie*

Účinnosť spaľovania v kotloch s cirkulujúcou fluidnou vrstvou sa pohybuje od 97,5 do 99,5 %. Účinnosť kotlov so stacionárnou fluidnou vrstvou sa pohybuje od 90 do 98 %. Rozdiel v účinnostiach je zapríčinený relatívne vysokým obsahom jemných častíc uhlia, ktoré sa nachádzajú v surovom palive alebo vzniknú oterom. U BFBC sa jemné častice dostanú veľmi ľahko mimo fluidného lôžka do zadného palivového ťahu, kde už nezhoria a následne dôjde k ich ochladeniu. Pre zvýšenie účinnosti je možné nezhorené častice zrecyklovať späť do kotla, aj keď po ochladení už tak dobre nehoria.

Vyššia účinnosť CFBC je spojená s tým, že sa uhlie zdržiava v spaľovacej komore po dobu kým preletí od vstupu do kotla až po strop, kde v celom priestore dochádza k výbornému miešaniu so vzduchom a teda aj ku horeniu. Nezhorené častice sa odseparujú zo spalín v horúcom cyklóne a vrátia sa teplé do spaľovacej komory.

- *Priame zníženie obsahu síry*

Len fluidné kotly sú schopné priameho odstránenia SO<sub>2</sub> už pri procese spaľovania. Pridaním vápenca za teplôt 800 až 900°C vzniká síran vápenatý. Stupeň odsírenia závisí na: teplote fluidnej vrstvy, pomere Ca/S, veľkosti uhlia a dobe zdržania sa v komore



- *Nízke emisie NO<sub>x</sub>*  
Nezanedbateľnou výhodou jak CFBC, tak BFBC je nízka tvorba oxidov dusíka (NO<sub>x</sub>), ktorá je spôsobená nízkou spaľovacou teplotou (800 až 900°C), čo nestačí na to, aby vzdušný dusík zoxidoval. Hodnoty emisií NO<sub>2</sub> sa pohyujú od 50 do 150 ppm alebo od 20 do 150 mg/MJ. [11]

### 1.3.1 Špecifické výhody CFBC

- *Menší roštový priestor*  
Merný tepelný výkon roštu je dôležitá návrhová charakteristika ohniska. Popisuje množstvo vzniknutého tepla na jednotku plochy. Atmosférické fluidné kotly s cirkulujúcou vrstvou majú merný tepelný výkon od 3,0 do 4,5 MW/m<sup>2</sup>, čo je skoro rovnaký ako u stacionárnej vrstvy. Rápidny rozdiel však nastáva, ak sú tieto systémy pretlakové. U oboch sa merný tepelný roštový výkon zvýši priamo úmerne tlaku. Na dosiahnutie rovnakého výkonu pretlakových BFB by sme potrebovali 2 až 3 násobnú plochu roštu. Tento rozdiel spôsobuje intenzívne miešanie paliva so vzduchom u CFBC, ktoré podporuje vysoký stupeň produkcie a uvoľnenia tepla z lôžovej oblasti. Vďaka menšej roštovej ploche je možné prispôbiť starú technológiu práškového spaľovania alebo spaľovania topných olejov na CFBC.
- *Menej násypiek*  
Zásobovací systém je jednoduchší vďaka menšiemu počtu násypiek a menšej roštovej ploche, potrebnej na požadovaný tepelný výkon. Navyše dobré miešanie a spaľovanie v celom objeme kotla prispievajú k tomu, aby násypky poskytli väčší výkon.
- *Dobrá schopnosť regulácie a rýchleho nábehu*  
Vysoká fluidizačná rýchlosť a jednoduché kontrolovanie absorpcie tepla dovoľujú rýchlu zmenu výkonu CFBC. Niektoré komerčné kotly sú schopné zmeny výkonu 4 až 6% za minútu. Nábeh vychladnutého kotla trvá 6 až 7 hodín, čo je dosť veľká výhoda oproti 9 až 10 hodinám u práškových kotlov. CFBC môže nabehnúť po 12 hod odstavke do 2 hod, zatiaľ čo práškovému kotlu by to trvalo 5 až 6 hod po 8 hod odstavke. [13]

## 1.4 Nevýhody

- *Abrázia výparníkových trubiek*  
Trubky výparníka sú priamo ponorené do fluidnej vrstvy, čím dochádza za vysokej turbulencie ku veľkému oteru pevných častíc paliva o trubky a steny kotla.
- *Vyššia energetická spotreba*  
Stlačený vzduch potrebný na výrobu fluidnej vrstvy sa vyrába v elektrických kompresoroch, čím sa zvyšujú prevádzkové náklady. [10]
- *Fluidné kotly dosahujú obecné nižšie výkony ako práškové*  
Pre porovnanie výkonov rôznych typov kotlov viď Tab. 1.2

Tab. 1.2 Výkony rôznych kotlov [22]

typ kotla	výkon [t/h]
roštové	5 - 200
fluidné	40 - 1500
práškové	22 - 4000
na zemný plyn	50 - 400
na topné oleje	50 - 400

### 1.4.1 Popis straty horľavinou v tuhých zbytkoch

Strata horľavinou v tuhých zbytkoch (alebo mechanický nedopal) je jedna z piatich základných strát kotlov využívaných v energetike. Ďalšie straty sú: strata fyzickým teplom tuhých zbytkov, strata chemickým nedopalom, strata sálaním a vedením do okolia, strata citelným teplom spalín (komínová strata). Tieto straty s ohľadom na konštrukčné podmienky by sme mali vedieť počas návrhu kotla a výpočtu jeho účinnosti. [9]

Strata mechanickým nedopalom je u fluidných kotlov značná, preto sa jej budeme v tejto podkapitole venovať podrobnejšie. Vzniká nespálením uhlíka, ktorý následne odchádza z kotla v škvare alebo struske (š,s), popolčeku v spalinách (ú) a roštoštvom prepade (r). Počíta sa podľa vzorca (1). Príčinou jej vzniku môžu byť nesprávne spaľovacie podmienky, nesprávna granulometria, krátky čas pobytu častice v spaľovacej komore, nesprávne množstvo prebytku vzduchu a iné.

$$\zeta_{MN} = \frac{Q_C \cdot A^r}{Q_r^i} \frac{C_i \cdot X_i}{1 - C_i} = \frac{C_i \cdot X_i}{C_i} \cdot \left( \frac{C_s}{1 - C_s} X_s - \frac{C_r}{1 - C_r} X_r - \frac{C_u}{1 - C_u} X_u \right) \quad (1)$$

kde  $Q_C = 32700 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  je výhrevnosť uhlíka,  $C_i$  [-] je obsah uhlíka v uvažovanom druhu tuhého zvyšku ( $i = s, r, u$ ),  $X_i$  [-] je pomer hmotnosti popola v uvažovanom tuhom zvyšku,  $A^r$  [-] je obsah popolovín v palive. [16]

## Obecné možnosti snížení mechanického nedopalu

Priemerné hodnoty mechanického nedopalu sa pohybujú okolo 2,5 %. U kotlov na zemný plyn a topné oleje sa táto strata neuvažuje. Ak je odchýlka od tejto hodnoty príliš veľká, tak sa daný kotol musí zrevidovať, stanovisko sa musí zaujať na základe aktuálneho stavu a zistených nedostatkov. [9]

Na nedopal vplývajú:

- *Spaľovacie podmienky* – majú najväčší vplyv na množstvo spáleného paliva
  - dostatočný prebytok vzduchu
  - turbulencia v kotly – správna hydrodynamika
- *Spaľovanie* je izobarický dej, ktorý môže prebiehať za atmosférického tlaku alebo pretlaku. Zvýšením tlaku sa intenzifikuje rýchlosť spaľovania a tým aj rýchlosť horenia.
- *Dĺžka pobytu paliva v spaľovacej komore* má zásadný vplyv na množstvo vyhoreného paliva. Čas potrebný na spálenie je závislý od veľkosti frakcie paliva, čím menšie častice, tým kratší je potrebný čas. Celková doba pobytu paliva v spaľovacej komore sa skladá zo sušiacej doby, kedy dochádza ku úplnému odpareniu vody, doby odplynovania, kedy sa z paliva uvoľnia prchavé látky a nakoniec doba horenia. Celý tento proces môže trvať menej ako jednu sekundu. [15]
- *Spaľovacia teplota* ovplyvňuje rýchlosť reakcie kyslíka a uhlíka. Čím je vyššia teplota, tým je potrebný čas kratší. Na druhej strane, teplota sa nesmie dvíhať nad teplotu tavenia popola (ak sa nejedná o výtavné kotly), pretože palivo by sa povrchovo spieklo a jadro zrníčok paliva by ostalo nevyhorené. [9]
- *Veľkosť roštových očí* má priamy vplyv na mechanický nedopal spôsobený roštovým prepadom u roštových ohnísk. Ich veľkosť je závislá od veľkosti frakcie paliva.
- *Granulometria* je veľmi zásadná u všetkých typov kotlov. CFBC sú špecifické tým, že ak sú frakcie paliva príliš malé tak sú odlúčené v cyklóne a unášané mimo spaľovaciu komoru bez toho, aby vyhoreli. Opatrením môže byť zmena nastavenia drviča alebo inštalácia separátora jemných častíc. [19]
- *Zavedenie recirkulácie prepadu* nemá priamy vplyv na mechanický nedopal, no dokáže zvýšiť účinnosť kotla opätovným spálením uhlíka, ktorý sa nachádza v popole jak prepadovom, tak úletovom. Toto riešenie je vhodné, ak sa nedá vykonať žiadne opatrenie ktoré by odstránilo primárnu príčinu nedopalu.

## 2. Závod Elektrárne Vojany

### 2.1. Popis

Elektrárne Vojany (EVO) sa nachádzajú na východe Slovenska v okrese Michalovce. Tvoria ich dve samostatné výrobné: Elektrárne Vojany I (EVO I) – 6x110 MW na čierne uhlie a Elektrárne Vojany II (EVO II) – 6 x 110 MW na zemný plyn a mazut, ktorá je odstavená mimo prevádzky. Ich celkový inštalovaný výkon je 1320 MW, čím predstavujú najväčšiu tepelnú elektrárne na Slovensku. Poloha je výhodná z hľadiska malej vzdialenosti od ukrajinských hraníc, možnosti odberu chladiacej vody z rieky Laborec, maximálneho skrátenia širokorozchodnej trate na dovoz poloantracitového uhlia z ruskej Donbasko - Kuzbeckej ťažobnej oblasti. Na základe týchto aspektov sa rozhodlo o výstavbe EVO.

Hlavnými úlohami EVO je zabezpečenie výroby elektrickej energie pre východ Slovenska a poskytovanie podporných služieb pre ES. Vďaka širokému regulačnému rozsahu 50 – 110 MW fluidných kotlov (FK) na blokoch 5. a 6. EVO I predstavujú elektrárne dôležitý prvok pre udržanie elektrizačnej sústavy v rovnováhe.

V minulosti sa EVO II používala ako regulačná elektrárne. Jej bloky boli spustené počas plánovaných opráv alebo výpadkoch iných zdrojov. Napriek čistote prevádzky plynových a mazutových kotlov musí byť z dôvodu neekonomickej výroby EVO II odstavené mimo prevádzku. [3]

### 2.2. História

- **EVO I**

november 1959	vypracovaný pôvodný návrh výstavby Elektrárne Vojany s výkonom 4x110
február 1960	výstavba schválená Ministerstvom energetiky a vodného hospodárstva
koniec 50. rokov	rýchlo rozvíjajúci sa priemysel Československa a nedostatok elektriny bol dôvodom, že Ministerstvo energetiky a palív rozhodlo o navýšení výkonu na 6x110 MW
1961 – 1966	výstavba elektrárne hlavný projektant – Energoprojekt Praha montáž technologických častí – ŠKODA Plzeň stavebné práce – Chemkostav Humenné a iné
1965 – 1966	postupné uvádzanie blokov do prevádzky
koniec 80. rokov	komplexná generálka na blokoch 1 a 2 + výmena mechanických odlučovačov za elektrostatické + modernizácia turbogenerátorov
1997 – 2001	rozsiahla rekonštrukcia – odsírenie a denitrifikácia blokov 1 a 2, modernizácia spaľovania klasickej , práškovej technológie na spaľovanie vo fluidnej cirkulujúcej vrstve u blokov 5 a 6

- **EVO II**

začiatok 60. rokov	nezlepšujúca sa energetická bilancia, dobre vybudované vodné hospodárstvo a širokorozchodná koľajnica boli podnety pre výstavbu druhej elektrickej výroby rovnakého typu. Keďže zo Rusko nebolo schopné zabezpečiť potrebné množstvo poloantracitového uhlia, tak sa v priebehu výstavby uspôsobili horáky na spaľovanie ťažkého topného oleja (mazutu), čo podnietilo výstavbu Destilačnej jednotky Slovnaft, závod Vojany.
1968	začiatok výstavby EVO II
1973 – 1974	uviedenie do prevádzky
september 1974	dosiahnutý plný výkon 6x110 MW
1978	energetická kríza spôsobila obmedzenie dodávok mazutu, preto sa bloky EVO II museli zrekonštruovať na spaľovanie zemného plynu
1997 – 2000	rekonštrukcia horákov za nízkoemisné

[3]



Obr. 2.1 Letecký pohľad na EVO [18]

## 2.3 Súčasnosť závodu

Súčasný stav závodu Elektrárne Vojany vyplýva z najmä z dvoch aspektov. V roku 2006 boli Slovenské elektrárne a.s. (pod ktoré spadá aj EVO) sprivatizované a ich väčšinový podiel od tej doby vlastní talianska energetická skupina Enel. Preto sa zmenila aj prioritná funkcia Elektrárne Vojany z výroby bázovej a regulačnej elektriny na výrobu elektriny za účelom dosiahnutia čo najväčšieho zisku. Preto bola aplikovaná metóda „downsizing-u“, čo znamená globálne znižovanie počtu zamestnancov a zvýšenie efektivity výroby.

EVO II je kompletne odstavená mimo prevádzku pre nerentabilnosť nákupu zemného plynu a mazutu. Zo šiestich blokov EVO I je možné vyrábať elektrinu len na blokoch 5 a 6, pretože stará metóda výroby pary v práškových kotloch 1 až 4 je neekonomická. V roku 2009 bola na bloku 5 závažná havária, ktorá ochromila výrobu daného bloku. Jej oprava by mala byť ukončená v júli 2012.

Druhým významným aspektom vplývajúcim na slovenskú energetiku bol vstup Slovenskej republiky do Európskej únie (EU). Tým sme sa zapojili do rôznych programov. Jedným z nich je zvyšovanie podielu výroby elektriny z obnoviteľných zdrojov. Sú to napríklad: energia slnečného žiarenia, vetra, vody, morských vln, geotermálna energia, biomasa (palivá ktoré vznikli premenou slnečného žiarenia na energiu viazanú v uhlíkových väzbách – napríklad v dreve, obilí, olejnatých rastlinách a pod.) – podľa skupenstva existuje tuhá, kvapalná a pevná biomasa. V roku 2007 sa predstavitelia EU zhodli na tom, že do roku 2020 chcú dosiahnuť podiel výroby elektriny z obnoviteľných zdrojov 20% v členských krajinách. Tým by sa mala znížiť produkcia oxidu uhličitého, ktorý je považovaný za hlavný plyn prispievajúci ku skleníkovému efektu. [7]

### 2.3.1 Spoluspaľovanie biomasy

Tento projekt je v prevádzke od roku 2009. Spoluspaľovanie biomasy je možné v zrekonštruovaných CFB. Aj vďaka tomu sa spoločnosť Enel podieľa na naplnení plánu EÚ. Slovenská republika sa zaviazala voči EU zvýšiť podiel obnoviteľných zdrojov o cca 14 %. Vzhľadom na recirkuláciu uhlíka sa tento proces spaľovania považuje za obnoviteľný zdroj energie, aj napriek tomu, že sa jedná o spaľovanie. Množstvo uvoľneného CO<sub>2</sub> zo spálenia biomasy je rovné množstvu CO<sub>2</sub>, ktoré sa absorbovalo v rastlinách pri raste. Na rozdiel od fosílnych palív, ktoré sa formovali pred dlhým obdobím a spaľujú sa dnes. Preto sa dá energia biomasy považovať za ekologický zdroj energie. Investičný plán 1. etapy projektu Spoluspaľovania biomasy a čierneho uhlia bol schválený v roku 2008 a realizovaný v roku 2009. Zámerom projektu bolo spoluspaľovanie drevnej štiepky s čiernym uhlím v podiele 4 – 5 % kalorickej hmoty. V rámci projektu bolo potrebné vybudovať pevnú skládku na biomasu s protipožiarnou stenou a kapacitou 400 t a zaradenie linky s kapacitou 45 t/h na odber, triedenie, drvenie veľkých kusov, váženie a dopravu biomasy do jestvujúceho hlbinného zásobníka. K miešaniu biomasy a uhlia dochádza na dopravníkoch zauhľovania. [4]

Jeden blok s výkonom 110 MW pri spoluspaľovaní biomasy vo fluidných kotloch môže ročne ušetriť približne 21 000 ton emisií oxidu uhličitého. Spoločnosť Enel v blízkej budúcnosti zvažuje možnosť spoluspaľovania 9 až 20 % kalorického podielu

biomasy. [7] Z prieskumov okolia vyplýva, že región Východoslovenskej nížiny je vhodný na pestovanie rýchlorastúcich energetických plodín.



Obr. 2.2 Sklad biomasy [7]

### 2.3.2 Fotovoltika vo Vojanoch

Slovenské elektrárne, a.s., majú od marca 2010 v prevádzke dve vlastné fotovoltaické elektrárne – v Mochovciach a vo Vojanoch. Investície potrebné na ich výstavbu dosiahli približne 5,19 mil. eur a ročne každá z nich vyrobí takmer 1 000 MWh elektriny. Majú významné miesto v portfóliu zdrojov spoločnosti najmä pre prínos v oblasti ochrany životného prostredia – za rok prevádzky každá z nich ušetrí približne 1 200 až 1 300 ton skleníkového plynu CO<sub>2</sub> v porovnaní s výrobou elektriny z uhlia. [5]

Vo Vojanoch sa fotovoltaická elektráreň nachádza v areáli existujúcej tepelnej elektrárne Vojany. Na pozemku s rozlohou takmer 3 ha je umiestnených 3 402 panelov, každý s výkonom 280 Wp. Celkový inštalovaný výkon je rovnaký ako v prípade Mochoviec, t. j. 0,95 MWp. Treba však uviesť, že pre severnejšiu polohu Vojan je celková ročná výroba nižšia ako v Mochovciach. Vo Vojanoch je elektrina dodávaná do siete Východoslovenskej distribučnej, a.s. [5]

## 2.4 Stručný popis výroby

V tejto kapitole bude popísaná technológia výroby elektriny v EVO I. Všetky základné technologické časti a ich prepojenia sú schématicky znázornené na obr. 2.3.

## 2.4.1 Palivo

### *Palivová základňa*

Palivovú základňu pôvodne tvorilo čierne uhlie z uhoľného revíru Donbas v Ukrajine. V súčasnosti je dovážané čierne poloantracitové uhlie z Ruskej federácie širokorozchodnou traťou z revíru Kuzbas. Výhrevnosť tohto uhlia je  $25 \text{ GJ.t}^{-1}$ . Po dokončení prvej etapy projektu spoluspaľovania biomasy sa palivová základňa rozšírila o drevnú štiepku. [9]

Tab. 2.1 Projektované palivo z Ruska [9]

Výhrevnosť	20 - 30 GJ/t
Vlhkosť	10 - 22 %
Popol	4 - 10 %
Síra	0,5 - 2 %
Prchavé látky	8 - 30 %
Veľkosť častíc	0 - 40 mm

### *Prísun vykládka a manipulácie s palivom*

Uhlie sa priváža do elektrárne po závodnej širokorozchodnej vlečke, ktorá má výhybku vo Vojanoch, vlastné dopravné prostriedky a personál. Uhlie prichádza v ucelených súpravách vagónov, ktoré majú kapacitu 65 t. Dopravené uhlie sa váži na dynamickej váhe PIVOTEX. Vykládka paliva je vykonávaná rotačným výklopníkom s vykladacím výkonom  $780 - 1\,170 \text{ t.h}^{-1}$ . Vagóny sa ďalej dočisťujú vibrátorom, ktorý je súčasťou výklopníka. Posun vozňov do výklopníka sa uskutočňuje elektrickým rušňom. Zásobník pod rotačným výklopníkom je následne vyprázdňovaný vyhrňovacími vozíkmi na dopravné pásy.

### *Ďalšie úpravy a manipulácie s palivom spočívajú v:*

- možnosti drvenia a triedenia paliva, s tým, že drviaca stanica sa dá obísť
- doprave uhlia na skládku
- nakládke do vagónov normálneho rozchodu pre reexpedíciu paliva odberateľom
- doprave paliva do zásobníkov kotlov Elektrárne Vojany I.

Uhoľná skládka má kapacitu 400 000 t. To poskytuje rezervu uhlia na 60 dní prevádzka s plným výkonom, bez prísunu nového paliva. Na skládke sa manipuluje s palivom pomocou buldozéro, korčekovým nakladačom sa odoberá palivo zo skládky, ďalej ide cez zásobníky pod skládkou, vyhrňovacími vozmi a dopravnými pásmi. Dopravné pásy šírky 1000 mm majú výkon  $2 \times 600 \text{ t.hod}^{-1}$ . Biomasa sa dopravuje do závodu kamiónmi. Vedľa skládky uhlia bola postavená skládka biomasy so zastrešením. Zo skládky sa naberá závitovkovým dopravníkom a ďalej sa prepravuje po pásových dopravníkoch ku CFB. [9]

## 2.4.2 Kotolňa

Kotly K1 až K4 sú jednobubnové s prirodzenou cirkuláciou vody, práškovým kúrením, výtavným ohniskom, majú dvojťahové riešenie s taviacim a vychladzovacím priestorom. Z prednej a zadnej steny ja do spaľovacej komory zaústených 10 vírivých horákov, na kotloch K1 a K2 modernizované horáky pre zníženie oxidov dusíka konštrukcie LOW-NO<sub>x</sub>. Na nabehnutie a stabilizáciu kotla sa používajú plynové a mazutové horáky, ktoré sú nainštalované v osi práškových horákov. Odlúčenie popolčeka v K1 a K2 sa deje v dvojstupňovom elektrostatickom odlučovači s 98,5 % účinnosťou odlúčenia.

Likvidácia trosky prebieha hydraulicky bagrovacími čerpadlami na odkalisko, systémom vratnej vody, popolček suchým odberom s dopravou na výrobnú stabilizátu či pre prípadného odberateľa.

Kotly sú vybavené 2 mlynskými okruhmi s bubnovými guľovými mlynmi, 2 zásobníkmi uhoľného prášku, 2 vzduchovými, dymovými a primárnymi ventilátormi. Kotly K1 a K2 majú len jeden dymovod.

V rámci renovácie blokov č. 5 a č.6 boli vymenené práškové kotly za fluidné. Obnova ďalej predstavovala kompletnú výmenu: turbín, generátorov, vývodového transformátora, transformátora vlastnej spotreby, časti elektro a systému kontroly. Bližšiemu popisu FK sa bude venovať kapitola 2.5.

Do 200 m vysokého komína sú dymovodmi odvádzané spaliny z kotlov. [9]

## 2.4.3 Strojovňa

V strojovni je umiestnených 6 turboagregátov (parná turbína + generátor) v priečnom ostrovnom usporiadaní s jednotkovým výkonom 110 MW. Zapojenie turboagregátov je blokové (blok tvorí parný kotol, parná turbína, generátor, vývodový transformátor a transformátor vlastnej spotreby). Parná turbína je rovnotlaková, kondenzačná s ôsmimi neregulovanými odbermi, trojtelesová (VT, ST a NT diel), s regeneračným ohrevom kondenzátu a VT a NT prepúšťacími stanicami. Generátory č. 1 - 4 sú chladené vodíkom, generátory 4 a 5 vzduchom. Ich výstupné napätie je 13,8 kV. Výkon blokov č. 1 a č. 2 je vyvedený do distribučného systému 110 kV, u blokov č. 3 – 6 do prenosového systému 220 kV. [9]

## 2.4.4 Systém kontroly a riadenia

Na blokoch č. 1 a č. 2 EVO I je na riadenie použitý riadiaci systém DNA (Dynamic Network of Applications). Ide o riadiaci systém postavený na báze mikroprocesorov, ktorý pre svoju činnosť využíva hlavne programové produkty z prostredia Windows a UNIX. Procesné stanice zaisťujú riadiace funkcie vrátane ochrán a informačného systému. Pre styk s obsluhou slúži 5 operátorských staníc. Systém zaisťuje riadiace funkcie, informačné funkcie vrátane alarmových hlásení a funkciu ochrán. Súčasťou informačného systému je aj trojdimenzionálne zobrazovanie technologických schém. [9]



Vzduch a spaliny stúpajú nahor relatívne vysokou rýchlosťou. Spaliny unášajú značný podiel pevných častíc zo spaľovacej komory a tieto sú unesené do recyklačných cyklónov, kde sú od spalín oddelené. Veľmi vysoká rýchlosť pevných častíc, charakteristická pre CFB, má za následok rovnaké teploty v celej spaľovacej komore a systéme recyklácie pevných častíc.

V dôsledku vysokého rozdielu v rýchlosti medzi spalinami a pevnými časticami, prechádzajú pevné častice spaľovacou komorou oveľa pomalšie ako spaliny. Zotrvanie pevných častíc (v procese) sa násobí každým cyklom ich cirkulácie. Dlhé zotrvávanie a kontaktná doba, násobené malou veľkosťou častíc a dostatočnou výmenou hmoty a tepla majú za následok vysokú účinnosť spaľovania. Tieto efekty, spolu s tepelným účinkom, umožňujú tak rozklad vápenca, ako aj následnú tvorbu sadry. Maximálna teplota spaľovacieho systému je obmedzená na 950°C a je riadená systémom blokad.

Spaľovací vzduch sa do komory zavádza na dvoch úrovniach. Spaľovanie prebieha v dvoch zónach: primárnej redukčnej zóne v dolnej časti spaľovacej komory, a úplné spálenie za pomoci prebytkového vzduchu v hornej časti. Toto vrstvené spaľovanie pri riadených nízkych teplotách účinne potláča formovanie NOx.

Spaliny opúšťajú spaľovaciú komoru s teplotou, ktorá bola pri spaľovaní, v hornej časti spaľovacej komory. Následne vstupujú do recyklačných cyklónov, ktorých konštrukcia umožňuje odstránenie až 99% pevných častíc, ktoré sú unášané spalinami zo spaľovacej komory.

Teplota na výrobu pary sa zo systému odoberá tromi spôsobmi:

- výparníkmi stenami spaľovacej komory
- v konvekčnom ťahu, využívajúc teplo spalín a unášaných pevných častíc
- prechodom horúcich pevných častíc cez externý tepelný výmenník fluidnej vrstvy, nazývaný chladič fluidnej vrstvy (FBHE)

Chladič fluidnej vrstvy tvorí teplovýmenné plochy mimo spaľovacej komory a umožňuje riadené odoberanie tepla z popola, čím udržuje optimálne podmienky pre spaľovanie pre široký rámec palív alebo výkonu.

Výberovým riadením prietoku pevných častíc do dvoch FBHE môže byť teplota z prihrievača pary a spaľovacia teplota nezávisle regulovaná, a tým sa udržiavajú optimálne podmienky spaľovania a zachytávania síry. Toto je veľmi dôležité, zvlášť keď sa berie do úvahy rozličné zloženie paliva a podmienky požadovaného čiastočného výkonu.

Tab.2.2 Hlavné technické údaje CFB [7]

Prietok pary	325 t/h
Maximálny prietok pary	340 t/h
Minimálny prietok pary	126 t/h
Tlak pary	14,3 MPa
Teplota pary	540 °C
Účinnosť kotla pri 100% zaťažení	92,7 %
Účinnosť kotla pri 40% zaťažení	89,4 %
Spotreba paliva pri 100% zaťažení	41,53 t/h
Spotreba paliva pri 40% zaťažení	18,10 t/h
Spotreba vápenca pri 100% zaťažení	4,5 t/h
Spotreba vápenca pri 40% zaťažení	0,58 t/h

### 2.5.2 Dodávka spaľovacieho vzduchu

Asi 40 % spaľovacieho vzduchu prichádza cez roštové otvory na dne spaľovacej komory ako primárny fluidizačný vzduch. Zvyšok je privádzaný ako sekundárny vzduch cez rozličné otvory na bočných stenách spaľovacej komory ako fluidizačný vzduch pre tepelné výmenníky fluidnej vrstvy, chladiče popola a sifónové uzávery.

Podľa vstupnej rýchlosti paliva sa automaticky prispôsobuje prietok vzduchu, aby sa udržal stály prebytok vzduchu ( $m = 1,2$ ) pre spaľovanie.

Primárny a sekundárny vzduchový ventilátor sú odstredivého typu. Všetky ostatné sú objemové dúchadlá.

### 2.5.3 Cyklóny

Boli zvolené dva cyklóny. Ich konštrukcia predstavuje vírivé komory za účelom zlepšenia vyhorenia uhlíka a využitia vápenca.

Veľkosť zvolených cyklónov bola overená v mnohých elektrárňach s CFB, ktoré sú v súčasnosti v prevádzke a ich prevádzku je možné presne definovať. Cyklóny zabezpečujú jednoduchú manipuláciu s pevnými časticami a ich vhodné rozloženie vo vnútri spaľovacej komory. Vysoká schopnosť odseparovania voľného nezreagovaného CaO zo spalín a dobré symetrické rozloženie pevných častíc a spalín vo vnútri spaľovacej komory taktiež prispievajú k využitiu vápenca.

### 2.5.4 Spaľovacia komora

Spaľovacia komora má pôdorys 6,24 x 10,65 m, vychádzajúci z rýchlosti asi 5 - 6 m/s a má 9 m vysokú výmurovku v dolnej časti. Spaľovacia komora je tvorená výparníkovými plochami, to znamená, je chladená vodou.

### 2.5.5 Druhý ťah - prehrievač a prihrievač

Usporiadanie konvekčného ťahu vychádza z praxe konvekčných práškových kotlov. Spaliny postupne prechádzajú cez koncový prehrievač 3, koncový prihrievač, prehrievač a zväzky ekonomizéra

Koncový prehrievač a prihrievač sú inštalované v konvekčnom ťahu kotla. Tento druh konštrukcie zabezpečuje rovnomerné parné podmienky aj pri prevádzke na malý výkon aj v prípade, že FBHE sú mimo prevádzky.

### **2.5.6 Ohrievač vzduchu**

Ohrievač vzduchu je určený pre ohriatie vzduchu dodaného jedným primárnym a jedným sekundárnym ventilátorom spaľovacieho vzduchu.

### **2.5.7. Nedostatky fluidných kotlov**

V priebehu 11 rokov používania fluidných kotlov vo Vojanoch sa objavilo niekoľko prevádzkových problémov, ktoré je potrebné riešiť. V prvom rade sú to nasledujúce tri:

1. problém príliš vysokej teploty spalín za cyklónmi
2. príliš dlhý čas nábehu kotla a nutné časté opravy výmurovky
3. vysoká koncentrácia nespáleného uhlíka v popolčeku (cca 15 - 20 %).

## **3. Návrhy riešenia vysokého obsahu spaliteľných látok v úletovom popole (mechanický nedopal)**

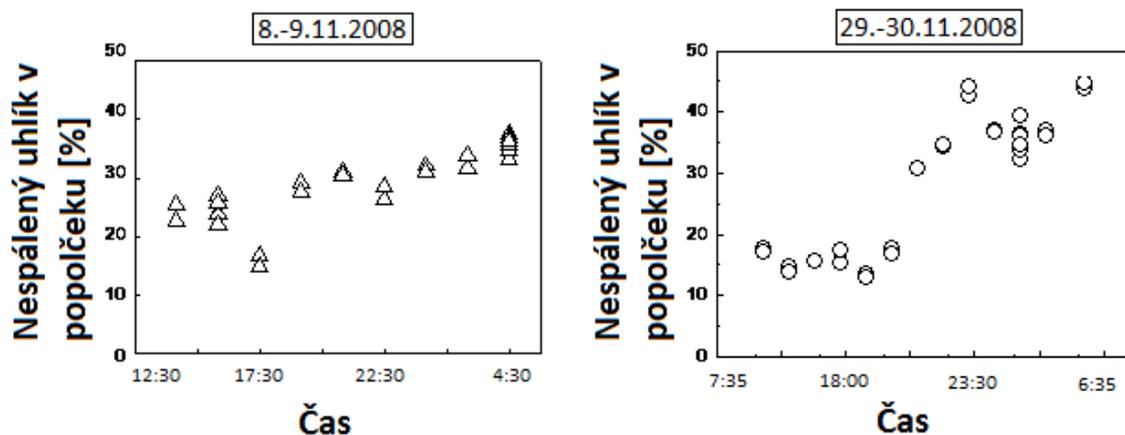
### **3.1 Návrhy riešenia Technologickej univerzity Czestochowa**

Strata mechanickým nedopalom, princíp jej vzniku, výpočet a obecné možnosti riešenia boli detailne popísané v kapitole 1.4.1.

Na základe požiadavky EVO Vojany pracovníci Technologickej univerzity Czestochowa vykonali analýzu procesov spaľovania a samotnej technológie spaľovania vo fluidných kotloch EVO. [14]

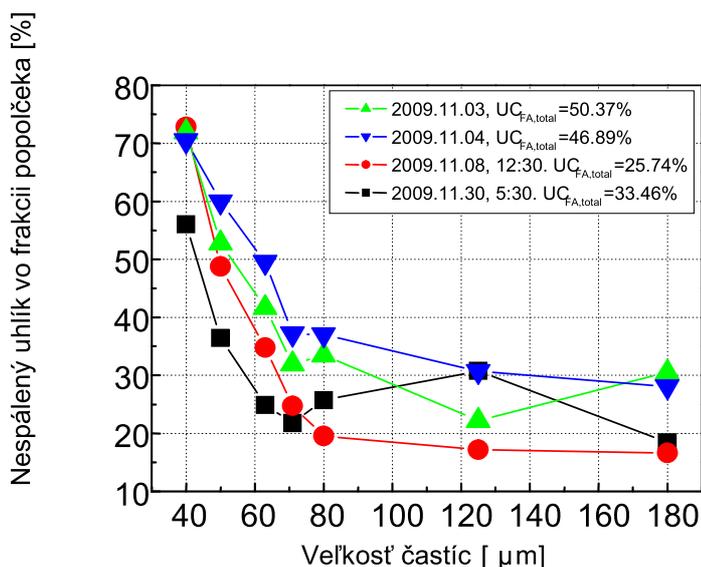
V ďalšej časti bakalárskej práce bude uvedené zhrnutie poznatkov prezentovaných v technickej správe *Fluidné kotle K5,6 EVO1 – Riešenie prevádzkových problémov*.

Podľa výsledkov získaných z inšpekcie kotlov z novembra 2008 bolo zistené, že v rôznych častiach kotla (v roštovom prepade, za odlučovačom a chladičom fluidnej vrstvy) koncentrácia nespáleného uhlíka nepresahuje 1 %. Výnimkou sú spaliny, ktoré unášajú často viac než 30 %. Vid' Obr. 3.1 na ktorom je znázornený obsah uhlíka v spalinách pri komerčnom nábehu kotla po pravidelnej odstávke.[14]



Obr. 3.1 Obsah uhlíka v spalinách pri nábehu kotla [14]

Výsledky výskumov jasne ukazujú, že veľkosť frakcie paliva má zásadný vplyv na obsah uhlíka v spalinách. Pre rôzne vzorky popolčeka boli prepočítané hodnoty nedopalu v závislosti na veľkosti častíc, ktoré sú zobrazené na obr.3.2 Je možné vidieť, že hodnoty najhrubších frakcií nepresahujú hranicu 30 %. Pričom najjemnejšie frakcie sa dostávajú až na 70 %. Obecne sa dá tvrdiť (bez ohľadu na vzorku popolčeka), že čím jemnejšie sú častice, tým je väčší nedopal. Častice s veľkosťou menšou ako 40  $\mu\text{m}$  sú nevhodné a výrazne prispievajú k nedopalu. [14]



Obr.3.2. Koncentrácia nespáleného uhlíka vo frakciách popolčeka [14]

Koncentrácia kyslíka v spaľovacej komore má zásadný vplyv na vyhorenie uhlíka. Ak by sa častice uhlíka, alebo častice popolčeka s nevyhoreným uhlíkom (Kap. 3.1.2) dostali do zóny, kde je koncentrácia kyslíka menšia ako 5 %, tak by jej vyhorenie nebolo možné. [14] S týmto problémom sa však EVO nestretá.

Vlastnosti uhlia predstavujú ďalší možný zdroj nespálených častíc. Uhlie bolo preto laboratórne preskúmané. Výsledky ukazujú, že v priebehu spaľovania uhlie prechádza fázou zmäkčovania, pri ktorej dochádza ku značnej tvorbe dechtu. Ten

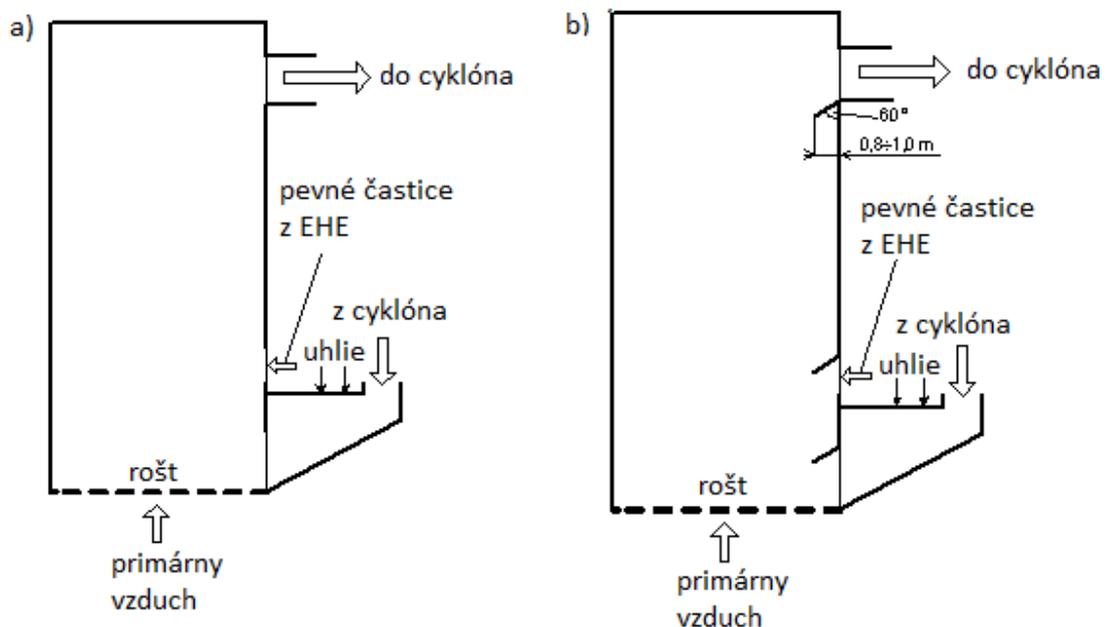
prispieva ku zväčšeniu nedopalu. Prítomnosť dechtu v kotloch bola potvrdená aj inšpekciou počas pravidelnej odstávky.

### 3.1.1 Inštalácia „políc“ do spaľovacej komory

Jedným z navrhovaných riešení bola inštalácia „policového“ systému, ktorý by riešil viaceré problémy naraz.

Častice paliva, ktoré sú menšie ako  $40\ \mu\text{m}$  majú pri vstupe do spaľovacieho priestoru rýchlosť až  $40\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , čo spôsobí, že preletia spaľovacou komorou za 1 sekundu. To je príliš krátky čas na to aby stihli zhorieť a tak ulietavajú spolu so spalinami, čím sa zvyšuje koncentrácia nezhorého uhlíka v popolčeku. Niektoré častice čiastočne vyhoria v priestoroch cyklónového odlučovača. Teplo uvoľnené v týchto miestach nie je možné absorbovať do pary, pretože odlučovač neobsahuje teplotné plochy. Tým pádom sa navýši teplota spalín, čo je ďalší z veľkých nedostatkov kotla. Zároveň sa viac poškodzuje žiaruvzdorná výmurovka v zóne prechodu medzi cyklónom a sekciou výmeny tepla. [14]

Na Obr. 3.3.a) je znázornený súčasný stav fluidných kotlov. Obr. 3.3.b) znázorňuje „policové“ riešenie problémov. Police by mali byť naklonené pod uhlom  $60^\circ$  vzhľadom na membránovú stenu ohniska. Konce políc by mali byť od steny vzdialené maximálne 0,8 až 1 m.



Obr. 3.3. a), b) Súčasný a návrhový stav kotlov s policovým usporiadaním [14]

#### Zhrnutie navrhovaného „policového“ riešenia:

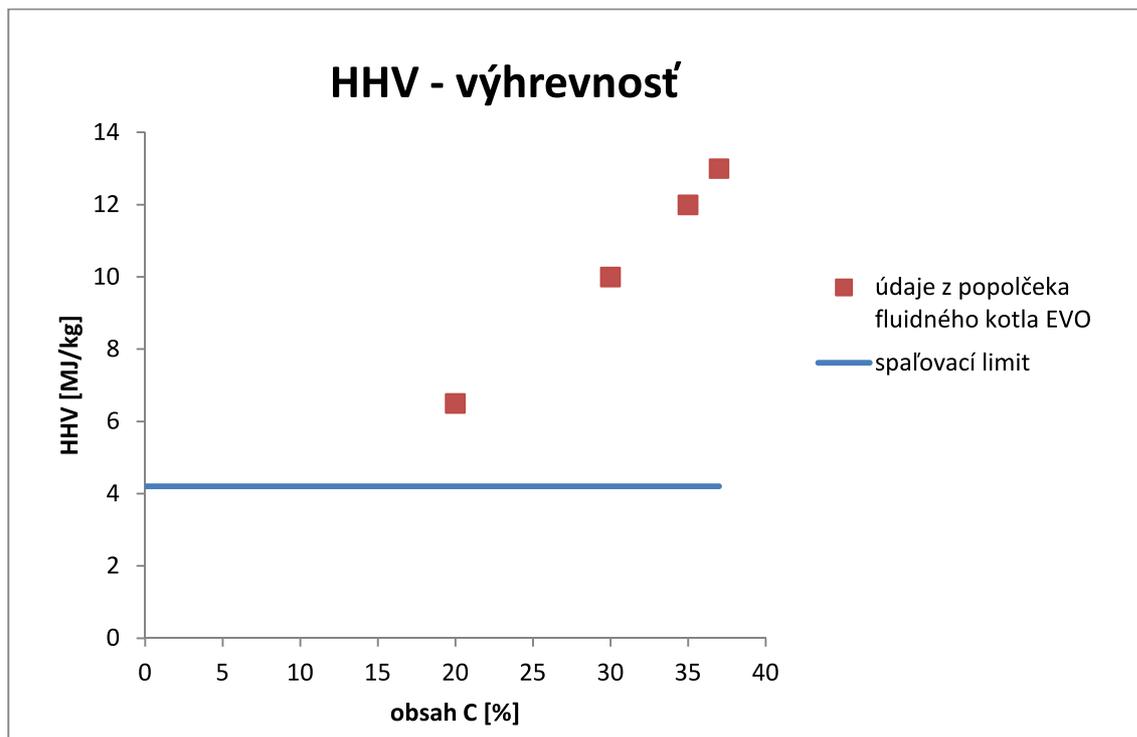
Inštaláciou políc by sa dosiahlo zlepšenie hydrodynamiky spaľovacieho lôžka, čoho dôsledkom by dochádzalo ku lepšiemu miešaniu pevných častíc a plynu. Ďalej by sa predĺžila doba pobytu častíc v spaľovacej komore. Viac častíc by sa prenášalo pri prednej stene, čím by sa zabránilo príliš rýchlemu úniku jemných častíc paliva popri zadnej stene.

Toto riešenie sa teoreticky zdá byť veľmi zaujímavé, lebo predpokladá kombinovaný účinok riešenia významných problémov. Proti jeho použitiu však stojí výrobca kotla SES a.s., ktorý daný zásah do kotla pravdepodobne nepovolí. Inštaláciou políc by sa totiž výrazne zväčšil oter pevných častíc o trubky výparníka a prehrievača pary, ktoré na to nie sú stavané. Bez povolenia od výrobcu vykonať takúto zmenu by Slovenské elektrárne a.s. stratili záruku na daný kotol, čo by pre podnik znamenalo neprípustné riziko.

### 3.1.2 Granulácia popolčeka

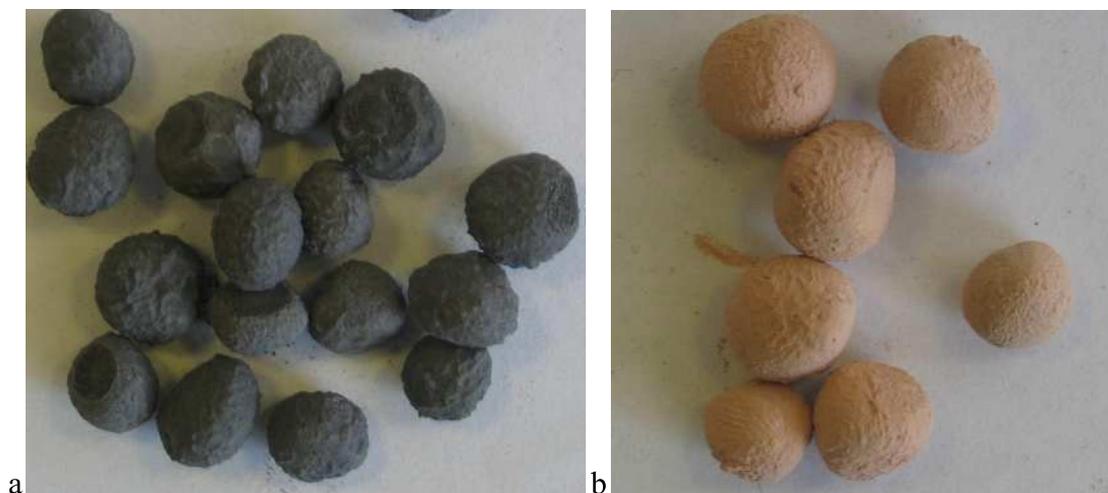
Ďalšou navrhovanou metódou zvýšenia účinnosti kotla bola granulácia úletového popolčeka, ktorý obsahuje veľké množstvo uhlíka. Pre spálenie je nutná minimálna výhrevnosť 4,2 MJ/kg. Ako možno vidieť na Obr. 3.4 popolček z CFB vo Vojanoch túto hranicu vysoko prekračuje. Obsah uhlíka v popolčeku bol nameraný pri nábehu kotla.

Výhodou tejto metódy je, že recirkulované granuly popolčeka môžu čiastočne nahradiť sorbent a tak znížiť jeho spotrebu. [14]



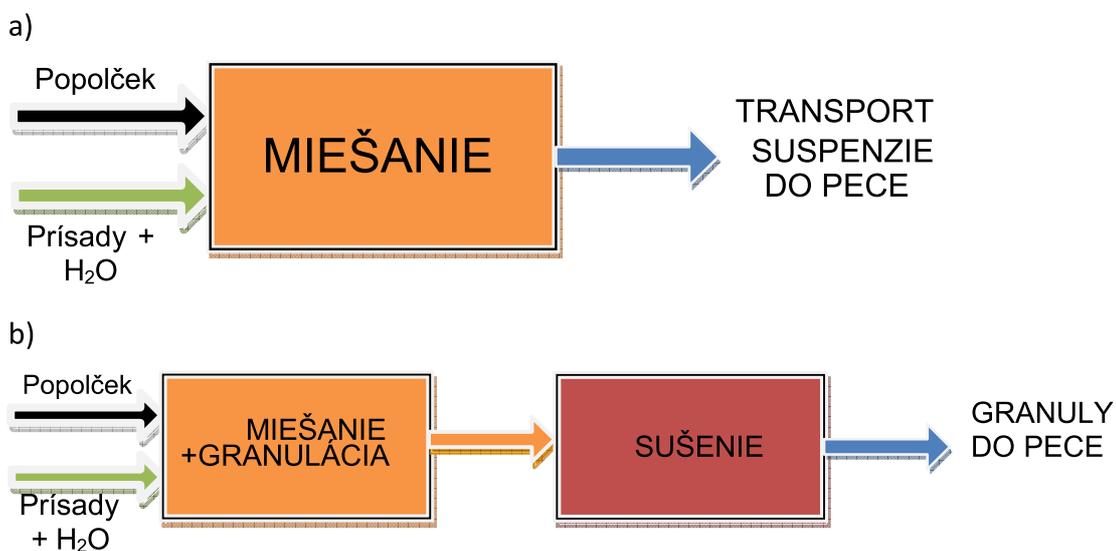
Obr. 3.4 Výhrevnosť popolčeka [14]

Na Obr. 3.5 sú príklady granúl, ktoré boli zhotovené v laboratórnych podmienkach. Ich veľkosť sa pohybuje od 6 do 10 mm.



Obr. 3.5 Granuly zhotovené z popolčeka a) pred vyhorením b) po spálení pri 850°C [14]

Spôsoby výroby granúl sú rôzne. Niektoré sú uvedené na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Niektoré možné spôsoby spracovania popolčeka

### Posúdenie navrhovaného granulačného riešenia:

Toto riešenie by malo prínos nielen na zníženie obsahu uhlíka v spalinách, ale aj na zníženie spotreby paliva v elektrárni. Recirkulovaný popolček by priniesol zároveň zníženie spotreby sorbentu.

Návrh však nerieši príčinu vzniknutého problému, ale iba jeho dôsledok.

### 3.1.3 Zhrnutie návrhov univerzity Czestochowa

Riešenia navrhnuté Technologickou univerzitou Czestochowa sa vzhľadom k negatívnemu stanovisku výrobcu kotlov SES Tlmače - vytvorenie „políc“ a nevhodnosti spätného spaľovania - recirkulované granuly popolčeka javia ako nevhodné pre aplikáciu v konkrétnych podmienkach EVO.

Z uvedeného dôvodu sa zo strany EVO hľadajú iné možnosti zvýšenia hospodárnosti prevádzky fluidných kotlov znížením obsahu spaliteľných látok v úletovom popole optimalizáciou vstupnej granulometrie uhlia do fluidných kotlov.

V rámci riešenia zadanej témy bakalárskej práce som sa podieľal na týchto prácach.

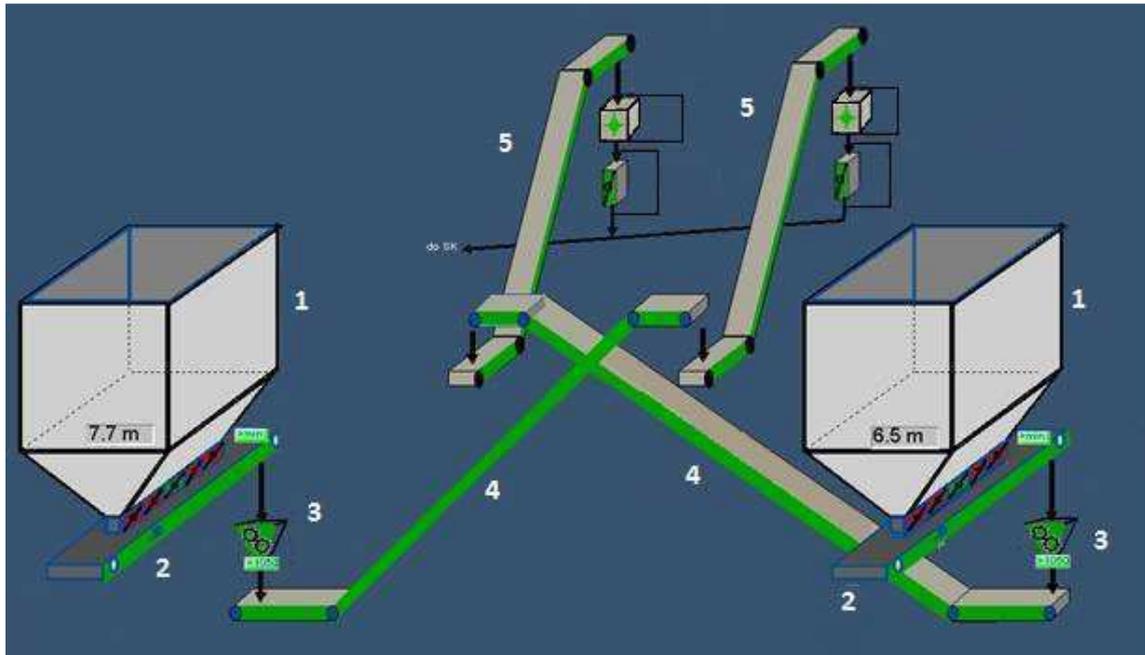
## 3.2 Optimalizácia vstupnej granulometrie uhlia do fluidných kotlov

### 3.2.1 Popis súčasného stavu

Uhlie dopravované z vonkajšieho zauhľovania cez dopravné pásy je skladované v zásobníkoch surového paliva, z ktorých sa prostredníctvom otvárania doskových uzáverov (tzv. šubrov) dávkuje na rovné reťazové podávače uhlia. Všetko uhlie sa rovnými reťazovými podávačmi následne dopravuje do kladivových drvičov, kde dochádza k jeho rozdrveniu. Kladivové drviče sú nastavené na hrúbku drvenia uhlia (napr. 8, 10, 12 mm).

*V kladivových drvičoch však vzhľadom k ich konštrukčnému riešeniu dochádza nielen k rozdrveniu uhlia s hrubšou granulometriou ako je požadovaná, ale aj k ďalšiemu preddrvovaliu uhlia s jemnejšou zrnitosťou. Podľa prevádzkových skúseností až 60 % uhlia, ktoré nie je potrebné už drviť, sa predrví ešte na jemnejšie častice.*

Toto súčasné technologické riešenie prispieva k vytváraniu problémov s vyšším obsahom spaliteľných látok v úletovom popole na základe nasledujúceho mechanizmu: Rozdrvené uhlie sa ďalej dopravuje dlhými a krátkymi šikmými dopravníkmi do rotačných podávačov uhlia, ktorými sa dávkuje na šikminu zvedenú do spaľovacej komory (viď obr. 3.7). V spaľovacej komore nestihne palivo dostatočne zhorieť z vyššie popísaného problému, kedy sa jemné častice uhlia povrchovo spečú a sú unášané preč zo spaľovacej komory, bez možnosti ďalšieho vyhorenia a dlhšieho pobytu vo fluidnom lôžku, čím vzniká mechanický nedopal (viď kapitolu 3.1).



Obr. 3.7. 3D schéma zauhľovania: 1 – zásobník surového paliva, 2 – rovný reťazový podávač, 3 – kladivkový drvič, 4 – dlhý šikmý podávač, 5 – krátky šikmý podávač [2]

### 3.2.2 Možnosti riešenia

Na odstránenie tohto problému so zbytočným ďalším predrúvaním jemných častíc paliva ako najjednoduchšie riešenie by bola inštalácia triediča vhodného tvaru (valcového, roštového, s kruhovým pohybom, atd.), ktorý by mal dostatočnú triediacu kapacitu.

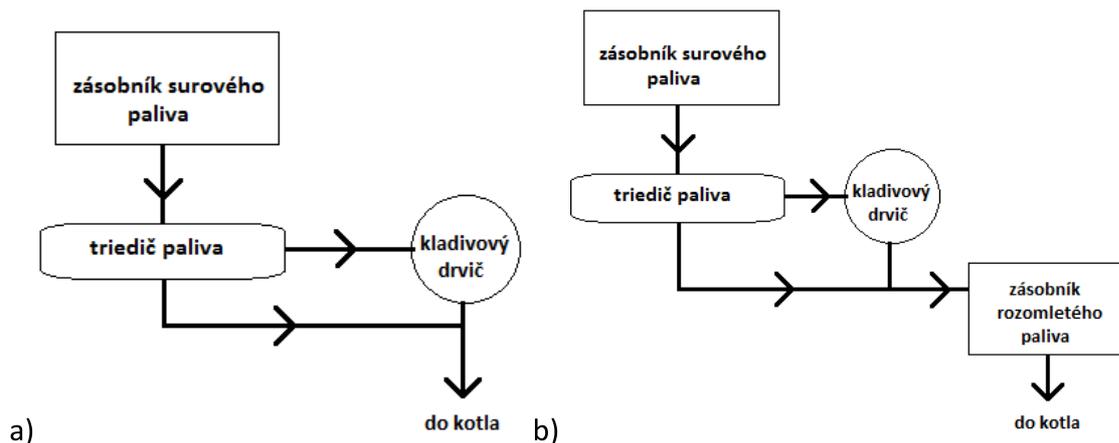
Navrhované riešenie by umožnilo, aby palivo s požadovanou granulometriou neprechádzalo technologickým uzlom drvenia a tým by sa odstránila jedna z príčin problému zvýšeného mechanického nedopalu.

Návrh postupu:

- vykonať prepočet materiálovej bilancie toku uhlia pre zadanie vstupných parametrov pre potencionálneho dodávateľa technológie triedenia
- vykonať prieskum trhu, či triediace zariadenie umožňujúce predtriedenie uhlia pred drvičom je vôbec dostupné na trhu

Na obr. 3.8 a),b) sú detailne schematicky zakreslené navrhované dve možnosti riešenia inštalácie triediča. Keďže je predpoklad, že do kladivového drviča by malo vstupovať až o 60 % menej paliva, tak bude potrebné znížiť jeho výkon. Daný drvič ma možnosť regulácie výkonu, ktorá by mala byť postačujúca. Ekonomickejšia prevádzka by však bola, ak by drvič pracoval na 100 % menovitého výkonu. To by sa teoreticky dalo zaručiť inštaláciou zásobníka rozomletého paliva (Obr. 3.8 b)

Toto riešenie však neprichádza do úvahy, pre nedostatok miesta v priestoroch zauhľovania.



Obr. 3.8 Schéma návrhu inštalácie triediča a) bez b) so zásobníkom rozomletého paliva

### 3.2.3 Prepočet materiálovej bilancie

Uhlie sa skladuje v dvoch zásobníkoch pre každý kotol o objeme  $506,8 \text{ m}^3$ . To odpovedá 932 tonám uhlia pri plných zásobníkoch.

Podľa technickej dokumentácie - miestny prevádzkový predpis výkon reťazových dopravníkov a drviča uhlia na jednej uholnej linke fluidného kotla je  $33 \text{ t/h}$  uhlia.

Limitujúcim faktorom sa stáva výkon rotačného podávača pred zaústením uholnej linky do spaľovacej komory – podľa miestneho prevádzkového predpisu je  $30,6 \text{ t/h}$  uhlia.

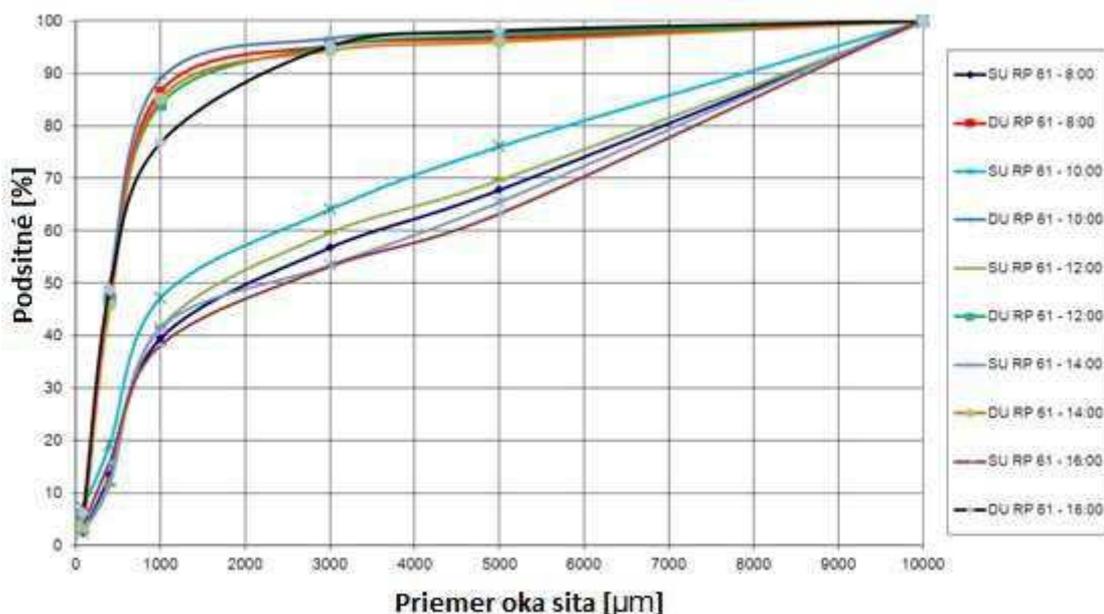
Z prevádzkových skúseností je však známe, že  $30,6 \text{ t/h}$  sa nedá dosiahnuť kvôli zahlteniu drviča uhlia a rotačného podávača.

Prevádzkou overená je hodnota  $25 \text{ t/h}$  – pri sypnej hmotnosti uhlia  $0,92 \text{ t/m}^3$  to odpovedá  $27 \text{ m}^3/\text{h}$  paliva.

Ak vychádzame z granulometrie paliva pri optimálnom nastavení medzery drviča  $8 \text{ mm}$  (Obr. 3.9) predstavuje podsitné  $85 \%$  celkového množstva.

Na základe tohto prepočtu bolo doporučené pre vhodné triediace zariadenie zadať tieto parametre:

Palivo:	čierne energetické uhlie
Vstupná granulometria paliva:	$0 - 100 \text{ mm}$
Maximálny hmotnostný tok na jeden triedič	$25 \text{ t/h}$ resp. $27 \text{ m}^3/\text{h}$
Hranica triedenia paliva	v rozmedzí $6$ až $14 \text{ mm}$
Podsitné na vstupe do triediča	priemerne $85 \%$ (od $80$ do $90 \%$ )



Obr. 3.9 Rozseková krivka ČEU pred a za drvičom RP 61, medzera drviča 8 mm, smer otáčania rotora drviča vľavo, čas odberu vzoriek 8:00 – 16:00 hod., 20.1.2012 [21]

### 3.2.4 Prieskum trhu

Na základe materiálovej bilancie, vstupných parametrov paliva a potrebnej triediacej kapacity bola nájdená firma Sandvick, ktorá sa zaoberá výrobou triediacej a drviacej techniky. V jej portfóliu sa nachádza triedič „SR roller screen“, ktorý údajne vykazuje vysokú kapacitu odlúčenia častíc najmä pre uhlie a vápenec. Triedič je rotačný, nevibrujúci a mal by správne fungovať aj s vlhkým či dokonca lepkavým materiálom. Jeho dizajn je kompaktný a rozmerovo sa zdá, že by mohol vyhovovať potrebám podniku. [6]

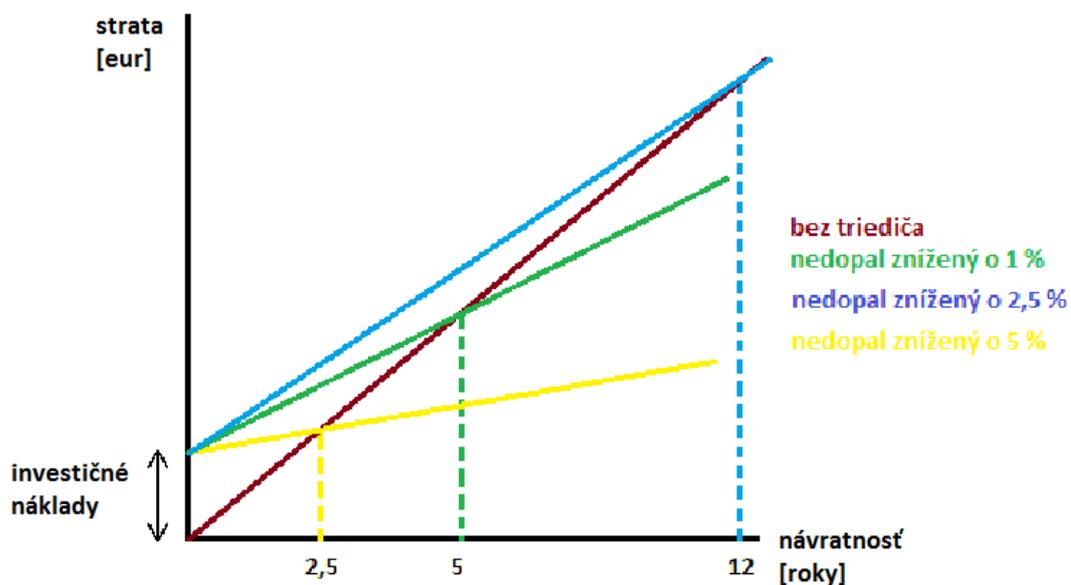
Princíp fungovania je možno vidieť z Obr. 3.10 . Palivo sa na triedič privádza zhora. Ideálne je, ak dopadová výška nie je príliš veľká a palivo je privádzané rovnomerne na celú šírku triediča. Rotačné valce posúvajú veľké časti dopredu, malé častice prepadnú do bypassu, čím sa vyhnú ďalšiemu drveniu v kladivovom drviči.



Obr. 3.10 Triedič Sandvik SR roller screen [8]

Toto navrhované riešenie bolo zhodnotené a boli odhadnuté potrebné náklady na nákup triediča, prestavbu rovního pásového podavača a elektroinštaláciu. Na Obr. 3.11 je graficky znázornená krivka návratnosti investície v závislosti na percentuálnom znížení nedopalu.

Predpokladá sa, že nedopal by sa mohol znížiť o cca 2,5 %, čo by v praxi znamenalo 5 ročnú návratnosť investície.



Obr. 3.11 Graf návratnosti investícií

## Záver

Táto práca bola vytvorená pre účely Slovenských elektrární, a.s. závod Elektrárne Vojany. Jej cieľom bolo navrhnúť opatrenia, ktoré by znížili obsah uhlíka v úletovom popole. Aby bolo možné navrhovať nejaké vylepšenia je potrebné dôkladne poznať použitú technológiu. Z toho vyplýva trojdielna koncepcia práce.

V prvej časti je detailne popísaná technológia fluidnej vrstvy, jej vznik a aplikácia v praxi. Zhrnuté sú výhody aj nevýhody fluidnej technológie, špeciálne CFB. Medzi hlavné výhody parí možnosť použitia rôznorodého paliva (od uhlia, cez biomasu až po komunálny odpad, vid' tab. 1.1), vysoká efektivita spaľovania (v rozmedzí 90 až 98 %), a možnosť priameho odsírenia spalín použitím vápenca alebo vápna. Ako nevýhody boli uvedené: väčšia abrázia trubiek výparníka, väčšia spotreba na výrobu fluidizačného média či značná strata horľavinou v tuhých zvyškoch tzv. mechanický nedopal. Tejto strate sa práca venuje detailnejšie, pretože je to problematická záležitosť v EVO. Boli popísané obecné možnosti zníženia tejto straty, z ktorých následne v tretej kapitole sú niektoré vybrané ako navrhované riešenia pre EVO.

Druhá časť je venovaná závodu. Chronologicky je rozobraná jeho história od vzniku až po súčasnosť. Popísaná je schopnosť CFB kotlov spaľovať biomasu v 10% kalorickej hmotnosti paliva, čím závod prispieva ku zníženiu produkcie CO<sub>2</sub>. Novinkou roku 2010 v EVO je fotovoltická elektrárňa s výkonom 0,95 MWp. Ďalej je popísaný princíp výroby od palivovej základne, cez kotolňu a strojovňu až po skládkovanie odpadu a systém kontroly a riadenia. Na základe interných materiálov závodu je detailne popísaný systém spaľovania v CFB, ktorý je použitý na dvoch blokoch č. 5 a 6 s výkonmi 110 MW.

Obsah uhlíka v úletovom popole často prekračuje 30 %, čo je možné vidieť na obr. 3.1 . Návrhy na riešenie tohto problému sú podané v tretej časti práce, ktorá je rozdelená na dve podkapitoly.

Prvá podkapitola rešeršne spracúva návrhy podané Technologickou univerzitou v Czestochovej a podáva tiež zhodnotenia využiteľnosti týchto návrhových zmien. Prvou možnosťou ako znížiť nedopal by bola inštalácia „policového“ systému 3 políc do kotlového priestoru. Tým by došlo ku väčšej turbulencii a častice paliva by sa preto zdržali v spaľovacej komore dlhšie, vďaka čomu by stihli vyhoriť. Tento návrh je však nepoužiteľný, lebo jeho inštalácia vyžaduje súhlas výrobcu kotla SES a.s. Tlmače. V dôsledku zvýšenej turbulencie by dochádzalo ku veľkej abrázii trubiek výparníka, ktoré na to nie sú stavané a preto daný návrh nemôže byť schválený.

Druhým návrhom z univerzity v Czestochovej je granulácia a recirkulácia popolčeka do kotla. Toto riešenie vyžaduje aby granulát mal minimálnu výhrevnosť 4,2 MJ/kg. Podľa meraní vykonaných po komerčnom nábehu kotla popolček vo Vojanoch túto hranicu vysoko prekračuje. Problémom tejto metódy je, že nerieši príčinu ale iba následok nedostatku.

Hlavným dôvodom, prečo vzniká tak veľký obsah uhlíka v úlete je, že do kladivového drviča, ktorý je radený za zásobníkom surového paliva prichádza po rovinnom pásovom podávači uhlie, ktoré by sa už nemalo mlieť. Zo skúseností zamestnancov je takéhoto uhlia až 60 %. Toto uhlie sa v drviči rozomelie na častice, ktoré sú často menšie než 40 μm a v spaľovacej komore nestihnú zhorieť.

Prínosom tejto práce je navrhovaný triedič uhlia, ktorý by mohol byť zaradený medzi rovinný pásový podávač a drvič uhlia. Keďže do drviča by sa dostávalo o 40 až 60 % menej uhlia, ako je projektovaný, tak sa bude musieť znížiť jeho výkon. Pracovné rozpätie výkonov drviča túto zmenu umožňuje. Prevádzka by bola ekonomickejšia, ak by drvič pracoval na 100 % svojho menovitého výkonu a palivo by išlo ďalej do medzizásobníka rozdrveného paliva. Toto riešenie nie je možné z dôvodu nedostatku miesta.

Na základe materiálovej bilancie toku uhlia pre zadanie vstupných parametrov pre potencionálneho dodávateľa technológie triedenia bol nájdený triedič SR roller screen od firmy SANDVIK, ktorá sa zberá výrobou triediacej a drviacej techniky. Daný triedič podľa výrobcu vykazuje vysokú odlučivosť dokonca aj pre mokré a lepidlo materiály. Výrobca nemal skúsenosť s montážou triediča do existujúceho CFB systému za účelom zníženia nedopal, preto nevedel presne povedať, o koľko sa nedopal zníži. Za predpokladu že by sa nedopal znížil len o 2,5 % by to znamenalo návratnosť investície 5 rokov (viď obr. 3.11).

## Použité informačné zdroje

- [1] Biomasa. *Slovenské Elektrárne* [online]. © 2002–2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.seas.sk/sk/elektrarne/typy-elektrarni/biomasa>
- [2] Fluidné kotly FK5,6, Miestny prevádzkový predpis, Vojany, 2011
- [3] TE Vojany. *Slovenské Elektrárne* [online]. © 2002-2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.seas.sk/sk/elektrarne/typy-elektrarni/tepelne/te-vojany>
- [4] TE Vojany. *Slovenské Elektrárne* [online]. © 2002-2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.seas.sk/sk/elektrarne/typy-elektrarni/biomasa>
- [5] TE Vojany. *Slovenské Elektrárne* [online]. © 2002-2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.seas.sk/sk/elektrarne/typy-elektrarni/fotovoltika>
- [6] Triediče SANDVIK. *Sandvik* [online]. © 2009- [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.sandrok.cz/tridice/sl>
- [7] Vojany I - blok 5 (Slovensko) - 1x325 t/h. *Ses tkmače* [online]. © 2001-2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.ses.sk/sk/index.php?navID=2&id=7>
- [8] SR screens. *Sandvik Mining and Construction* [online]. © 2010- [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: [http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/Global/S003715.nsf/GenerateTopFrameset?ReadForm&menu=&view=http%3A//www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/global/S003713.nsf/Alldocs/Products\\*5CCrushers\\*and\\*screens\\*5CScreens\\*2ASR\\*screens&banner=/sandvik/0120/Internet/Global/S003715.nsf/LookupAdm/BannerForm%3FOpenDocument](http://www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/Global/S003715.nsf/GenerateTopFrameset?ReadForm&menu=&view=http%3A//www.miningandconstruction.sandvik.com/sandvik/0120/Internet/global/S003713.nsf/Alldocs/Products*5CCrushers*and*screens*5CScreens*2ASR*screens&banner=/sandvik/0120/Internet/Global/S003715.nsf/LookupAdm/BannerForm%3FOpenDocument)
- [9] ZÁVOD ELEKTRÁRNE VOJANY. *Propagačná brožúra SE, a.s.* Bratislava, 2011, 9 s.
- [10] Fotovoltická (solárna) elektrárň. *Slovenské Elektrárne* [online]. © 2002–2011 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.seas.sk/sk/elektrarne/typy-elektrarni/fotovoltika>
- [11] BALÁŠ, Marek. *Stavba a provoz energetických zařízení* [prednáška]. 3.10.2011.
- [12] BALÁŠ, Marek. *Stavba a provoz energetických zařízení* [prednáška]. 17.10.2011.
- [13] BASU, Prabir. *Combustion and gasification in fluidized beds*. Boca Raton: CRC, 2006, 473 s. ISBN 08-493-3396-2.

- [14] Bis, Z. a kol.: Fluidné kotly K5 a K6 EVO 1 - Riešenie prevádzkových problémov, technická správa, Technologická univerzita Czestochowa, Fakulta inžinierstva a životného prostredia, marec 2010
- [15] ČERNÝ, František a Karel BEMBENEK. *Provoz a opravy kotlů*. 2. vyd. Praha: Nakladatelstvo technické literatury, 1996. ISBN 06-137-69.
- [16] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 212 s. ISBN 80-010-2591-8.
- [17] KUBÍN, Miroslav. *Rozvoj fluidního spalování*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989. ISBN 06-110-89.
- [18] SLÁDEK, V. *Elektrárstvo na Slovensku 1920 – 1994*. Bratislava: Alfa - press, 1966. ISBN 8088811473.
- [19] TOBOLA, Karel a Emil ŘEHÁČEK. *Obsluha parních kotlů*. Praha: SNTL, 1963.
- [20] Vaszily, M. a kol.: *Power Plant Vojany*, SE Bratislava, 2010
- [21] Kováč, M.: *Vplyv granulometrie uhlia na nedopal kotla K6*, technická správa, Vojany, 2012
- [22] RAYAPROLU, Kumar. *Boilers for power and process*. Boca Raton: CRC Press, c2009, lxxv, 745 s. ISBN 978-1-4200-7536-6.

## Zoznam skratiek a symbolov

A <sup>r</sup>	obsah popolovín v palive
BFBC	bubbling fluidized bed combustion = spaľovanie v bublinkujúcej fluidnej vrstve
CFB	circulating fluidized bed = kotol s fluidnou cirkulačnou vrstvou
CFBC	circulating fluidized bed combustion = spaľovanie v cirkulačnej fluidnej vrstve
C <sup>i</sup>	obsah uhlíka v uvažovanom tuhom zvyšku (s, r, ú - škvára, prepád, úlet)
EU	Európska únia
EVO	Elektrárne Vojany
FBHE	fluidized bed heat exchanger = chladič fluidnej vrstvy
NT	nízkotlaký diel
QC	výhrevnosť uhlíka
ST	stredotlaký diel
VT	vysokotlaký diel