

## ŠKODLJIVI VPLIVI NENADZOROVANEGA VDORA ZRAKA V KOTEL S PREMOGOVO PRAŠNO KURJAVO

Igor KUŠTRIN, Andrej SENEGAČNIK, Miran JAMŠEK

### POVZETEK

*V prispevku so predstavljeni vzroki in posledice nenadzorovanega vdora zraka v kotel. Obravnavani so parni kotli s premogovo prašno kurjavo oziroma zgorevanjem trdnih goriv zmletih v prah. Prašna kurjava z zgorevanjem v prostoru je naprednejša od zgorevanja v plasti ali na rešetki. Omogoča doseganje večjih toplotnih moči in višjih izkoristkov kotlov. Za kvalitetno zgorevanje mora biti izpolnjeno več pogojev. Eden od pogojev je optimalno razmerje goriva in zgorevalnega zraka. Ta pogoj je mogoče izpolniti v primeru dobrega nadzora nad razporejanjem zgorevalnega zraka med gorilnike oziroma šobe gorilnikov. Večinoma je s stališča vgrajene merilne in regulacijske opreme to možno izvajati, vendar veliko oviro pri tem predstavlja nenadzorovan vdor zraka v kotel, zaradi katerega je količina nadzorovanega zraka manjša. To neposredno onemogoča vzpostavitev optimalnih pogojev za zgorevanje.*

### ABSTRACT

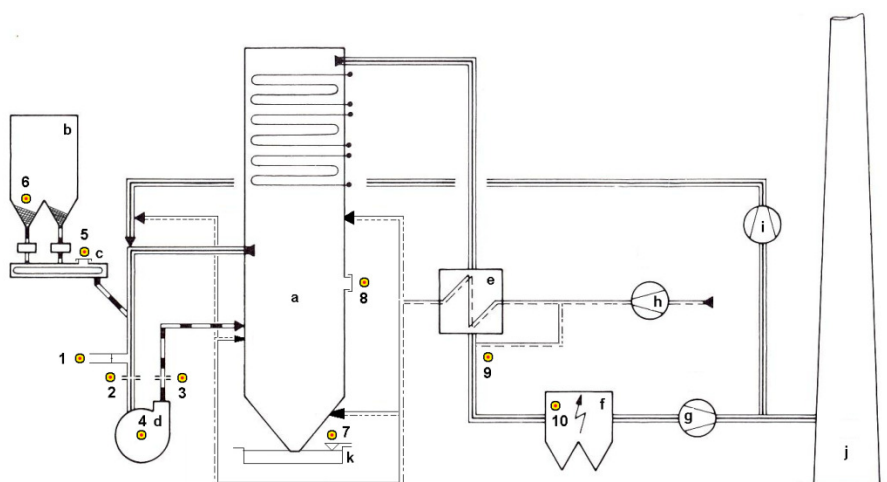
*The paper presents the reasons and consequences of uncontrolled air on the operation of steam boilers with dust firing i.e. combustion of coal crushed into powder. This type of combustion is more advanced than the combustion of solid fuels of larger granulation. It enables achieving higher output and efficiency. Several conditions must be fulfilled to enable quality combustion. One of these conditions is the optimum fuel to air ratio. This condition can be met if good control over the allocation of combustion air to the burner nozzles is possible. Usually it is possible to achieve from the perspective of installed measurement and control equipment but a major obstacle to this is an entry of uncontrolled air into the boiler. This makes it impossible to maintain optimum conditions for quality combustion.*

### 1. UVOD

Preizkusi parnih kotlov s prašno kurjavo, ki se jih izvaja v okviru projekta periodičnega monitoringa kvalitete obratovanja slovenskih termoelektrarn, so privedli do mnogih zanimivih in koristnih spoznanj. Nekontroliran vdor zraka v katerokoli kurišče ali gorilnik ima vedno negativen prizvok, čeprav ni vedno na prvi pogled jasno, zakaj. V nadaljevanju tega prispevka je obravnavanih nekaj teh negativnih vplivov na primeru parnih kotlov s premogovo prašno kurjavo.

## 2. LOKACIJE MOŽNEGA VDORA ZRAKA

Za zgorevanje kateregakoli goriva je potreben kisik. Najpogosteje se uporablja kisik iz zraka, ki se ga čim bolj nadzorovano primešava gorivu v čim bolj optimalnem razmerju. V idealnem primeru bi se ves zrak dovedel nadzorovano – torej brez nenadzorovanega vdora zraka v kotel. Ker so parni kotli v termoelektrarnah običajno zelo velike naprave, je težko zagotavljati popolno tesnost in tako vedno obstajajo mesta, kjer zrak nenadzorovano vdira v kotel. Proizvajalci kotlov s prašno kurjavo predvidevajo, da nenadzorovano vstopa v kotel 10 % do 20 % zraka. Slika 1 prikazuje zelo poenostavljeno shemo parnega kotla z nekaterimi pomembnejšimi spremljajočimi stroji in napravami z označenimi mesti možnega vdora zraka.



| Parni kotel in spremljajoče naprave |                                            | Mesta nenadzorovanega vdora zraka |                                                   |
|-------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|
| a                                   | parni kotel                                | 1                                 | lopute za hlajenje mlinov s hladnim zrakom        |
| b                                   | zalogovniki premoga                        | 2                                 | stiki ohišij mlinov z vpadnim jaškom              |
| c                                   | dodajalniki premoga                        | 3                                 | stiki ohišij mlinov s prahovodnim kanalom         |
| d                                   | mlini za premog                            | 4                                 | vrata mlinov in ostale reže na ohišjih mlinov     |
| e                                   | grelniki zraka                             | 5                                 | inšpekcijske odprtine na ohišjih dodajalnikov     |
| f                                   | elektrofiltiri                             | 6                                 | prenizek nivo premoga v zalogovnikih              |
| g                                   | ventilatorji vleka                         | 7                                 | prenizek nivo tesnilne vode lijaka kotla          |
| h                                   | ventilatorji podpiha                       | 8                                 | inšpekcijske odprtine na kurišču in dimnem traktu |
| i                                   | ventilatorji hladnih recirkuliranih plinov | 9                                 | slabo tesnenje grelnika zraka                     |
| j                                   | dimnik                                     | 10                                | ohišja elektrofiltrov in stiki z dimnimi kanali   |

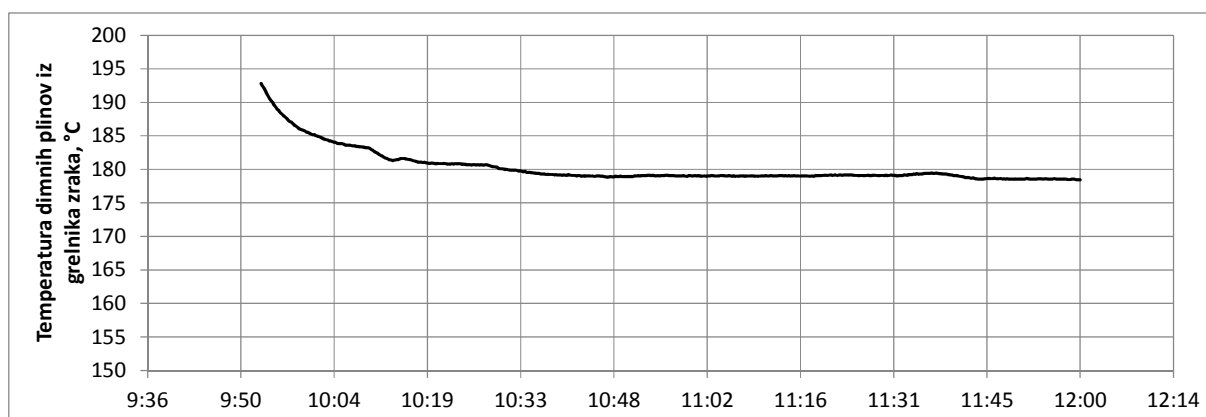
Slika 1: Poenostavljena shema kotla s spremljajočimi stroji in napravami

### 3. VPLIVI NENADZOROVANEGA VDORA ZRAKA

#### 3.1 Vdor zraka v kurišče in dimni trakt

##### 3.1.1 Povečane izgube s toploto dimnih plinov

Regulacija zgorevanja vzdržuje vsebnost kisika v dimnih plinih na nivoju, ki je odvisen od toplotne moči oziroma obremenitve kotla. Vsebnost kisika v dimnih plinih se ugotavlja z meritvijo v kanalu dimnih plinov pred grelnikom zraka. Če zrak nenadzorovano vstopa v kurišče ali dimni trakt pred meritvijo vsebnosti kisika, se zmanjša pretok nadzorovanega zgorevalnega zraka. Zgorevalni zrak se segreva v grelnikih zraka s toploto, ki jo oddajo dimni plini. Če je količina zraka manjša, se dimni plini v grelnikih zraka manj ohladijo. Posledično se povečajo izgube s toploto dimnih plinov in izkoristek kotla se zmanjša.



Slika 2: Temperatura dimnih plinov na izstopu iz grelnikov zraka

Diagram na sliki 2 prikazuje potek temperature dimnih plinov iz grelnika zraka po zatesnitvi vrat mlina, ki je bil pred tem v remontu [Error! Reference source not found.]. Pred pričetkom snemanja je temperatura presegala 200 °C, po zatesnitvi vrat mlina pa se je ustalila na nivoju pod 180 °C. Podoben učinek povzroči vdor zraka na kateremkoli mestu od 1 do 8, ki je označeno na sliki 1. Povišanje temperature dimnih plinov je odvisno od pretoka nenadzorovanega zraka, ki je nadalje odvisen od velikosti odprtine in razlike med tlakom okolice in tlakom znotraj naprave na mestu vdora. Mesta, kjer najpogosteje nenadzorovano vdirajo največje količine zraka so na sesalni strani mlinov (mesta 1,2,4,5 in 6), ker je tam največja tlačna razlika. Temperatura nenadzorovanega zraka je odvisna od mesta vdora in je relativno nizka (20 °C do 50 °C) v primerjavi s temperaturo zraka, ki se je segrel v grelniku zraka (200 °C do 300 °C). Zaradi nižje temperature ima nenadzorovani zrak večjo gostoto. Masni tok nenadzorovanega zraka je zato lahko velik in ima lahko nepričakovano velik vpliv na delovanje kotla.

### 3.1.2 Povečane izgube z gorljivimi snovmi v izgorkih

Zgorevalni zrak mora priti v stik z gorivom nadzorovano na točno določenih mestih [Error! Reference source not found.], [Error! Reference source not found.], [Error! Reference source not found.]. Da zgorevanje poteče do konca, morajo biti izpolnjeni določeni pogoji in sicer ustrezna temperatura, koncentracija kisika in ostalih reaktantov, ter ustrezni zadrževalni čas delčka goriva pri teh pogojih. Termoelektrarniški kotli s prašno premogovo kurjavo imajo izjemno velika kurišča. Prostornina kurišča lahko presega 50000 m<sup>3</sup> (dimenzije npr. 23×23×95 m). Zgorevanje prašnega delca premoga je razdeljeno na več faz. Vsaka faza zgorevanja ima svoje zahteve. Če le-te niso izpolnjene, se povečajo izgube z gorljivim v žlindri in letečem pepelu, kar poslabša izkoristek kotla. Zaradi neustreznih pogojev gorivo ne zgori popolnoma. Vzrok za to pa ni samo razporeditev zgorevalnega zraka, pač pa tudi nekateri drugi npr. velikost delcev, sestava goriva, itd.

### 3.1.3 Povečane emisije CO in NO<sub>x</sub>

V okviru primarnih ukrepov za zmanjševanje emisij NO<sub>x</sub> je med drugim zelo veliko pozornosti namenjeno razporejanju zgorevalnega zraka [Error! Reference source not found.]. Za doseganje nižjih emisij NO<sub>x</sub> je potrebno zgorevalni zrak dovajati v področje gorenja postopoma in nadzorovano. Primarni zrak na primer spodbuja nastajanje termičnih NO<sub>x</sub>. Primarni zrak vstopa v kurišče pomešan z gorivom in najlažje pride v stik z njim. Če je tega zraka preveč, je gorenje oziroma sproščanje toplote zelo intenzivno. Posledično je temperatura plamena relativno visoka in pogoji za nastajanje termičnih NO<sub>x</sub> so ugodni [Error! Reference source not found.], [Error! Reference source not found.]. Vsak nenadzorovan vdor zraka na mestih od 1 do 6 poveča količino primarnega zraka in spodbuja nastajanje NO<sub>x</sub>.

Po drugi strani pa lahko na nekaterih mestih v kurišču primanjkuje kisika za popolno zgorevanje in pride do lokalnega nastajanja večjih količin CO, kar po nepotrebnem povečuje emisije CO.

## 3.2 Vdor zraka v grelniki zraka in elektrofiltrih

### 3.2.1 Grelniki zraka

Vdor zraka v dimni kanal v grelniki zraka nima vpliva na proces zgorevanja in izkoristek kotla, ima pa negativen vpliv na izkoristek termoelektrarne zaradi povečane porabe električne energije za pogon ventilatorjev podpiha in vleka. Zaradi tega vdora ventilatorji podpiha in vleka transportirajo večje količine zraka in dimnih plinov, kot je potrebno. Izkušnje kažejo, da ventilatorji podpiha, v nekaterih skrajnih primerih, zaradi puščanja v grelniki zraka, včasih ves čas obratujejo z maksimalno močjo. Celo 50 % zraka, ki ga načrpajo ventilatorji podpiha, lahko zaradi netesnosti v grelniki zraka preide na stran dimnih plinov. Ventilatorji vleka nato to, po nepotrebnem povečano količino dimnih plinov, transportirajo skozi elektrofiltre, napravo za razžveplanje dimnih plinov in dimnik v okolico. Vdor zraka v grelniki zraka je

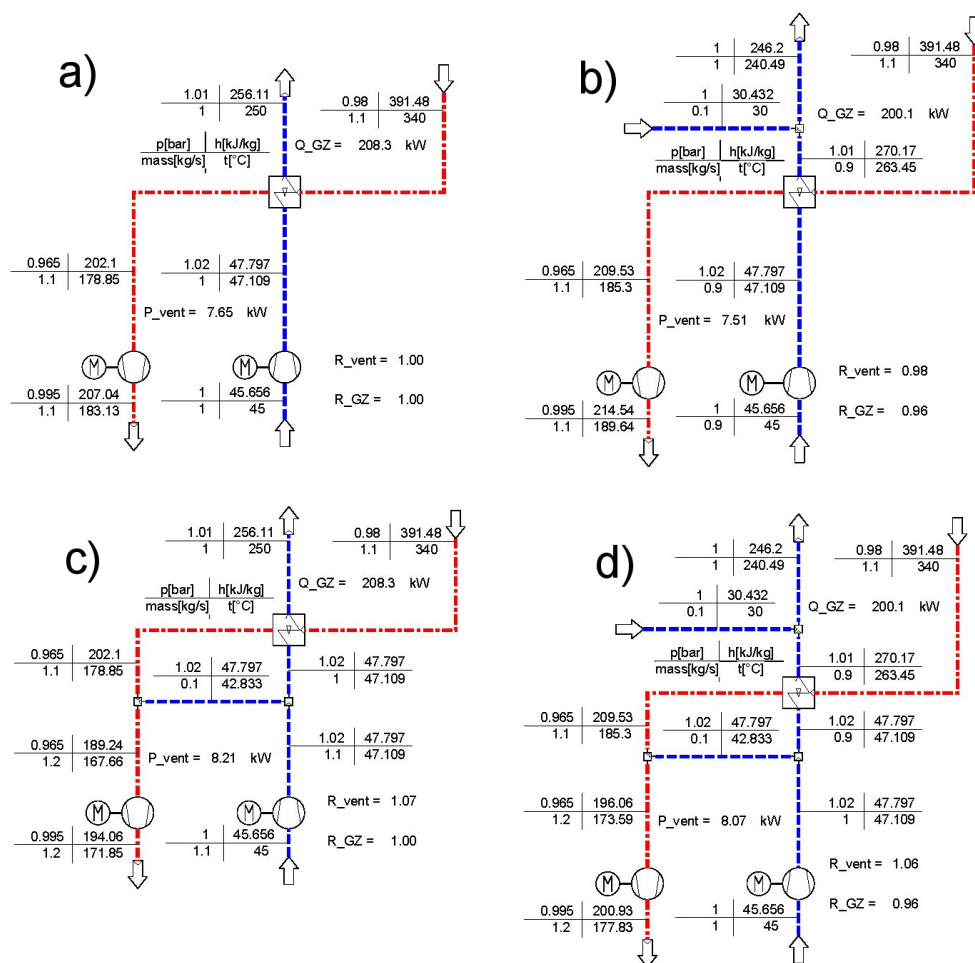
pogost in se lahko dogaja tudi pri dobro delujočem sistemu za tesnenje grelnikov zraka, če se, na primer, vzdržuje previsok tlak zgorevalnega zraka in je posledično tlačna razlika med zrakom in dimnimi plini prevelika.

### 3.2.2 Elektrofiltri

Vdor zraka v dimni kanal v elektrofiltrih prav tako nima vpliva na proces zgorevanja in izkoristek kotla. Vpliva le na povečano porabo električne energije za pogon ventilatorjev vleka in s tem na izkoristek termoelektrarne. To mesto vdora ni zelo pogosto, lahko pa se pojavi zaradi slabo zatesnjenih odprtin na ohišju in/ali zaradi dotrajanosti pločevine ohišja elektrofiltrov.

## 4. MODELIRANJE NEKONTROLIRANIH VDOROV ZRAKA

Vpliv nenadzorovanega vdora zraka na raznih lokacijah kotla je modeliran s programskim paketom IPSEPro 5.0 in prikazan na sliki 3.



Slika 3: Modeliranje неконтролirаних вдорів зрака

| Vrsta netesnosti                              | Rel. toplotni tok v GZ | Rel. moč ventilatorjev |
|-----------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| a) brez vdorov                                | 1,00                   | 1,00                   |
| b) vdor zraka v kurišče,                      | 0,96                   | 0,98                   |
| c) netesnost grelnika zraka                   | 1,00                   | 1,07                   |
| d) netesnost grelnika zraka in vdor v kurišče | 0,96                   | 1,06                   |

Vsak modeliran nenadzorovan vdor zraka znaša po 10 % odstotkov skupnega zgorevalnega zraka. Njihov vpliv na moč ventilatorjev vleka in podpiha, ter regeneracijo toplote dimnih plinov v grelnikih zraka je ovrednoten z razmerjema  $R_{vent}$  in  $R_{GZ}$ . V najslabšem primeru zrak nenadzorovano vdira v kurišče in grelnike zraka (primer d), kar skupaj znaša 20 % vsega zgorevalnega zraka, vključno z nenadzorovanim. Regeneracija toplote dimnih plinov se zmanjša za 4 %. Istočasno se poraba električne energije za pogon ventilatorjev podpiha in vleka poveča za 6 %.

## 5. ZAKLJUČKI

Laboratorij za termoeenergetiko Fakultete za strojništvo že desetletja sodeluje s slovenskimi termoelektrarnami na področju spremljanja, vzdrževanja in izboljševanja učinkovitosti njihovega obratovanja. Med preizkusi parnih kotlov in drugih komponent termoelektrarn ter analizami rezultatov teh preizkusov je bilo pogosto zabeleženo slabše in neučinkovito delovanje kotla iz ne povsem očitnih vzrokov. Nekoliko podrobnejša analiza rezultatov je dostikrat pokazala, da so anomalije povezane z zgorevalnim zrakom. Nenadzorovan vdor zraka škodljivo vpliva na izkoristek termoelektrarne in povečuje emisije škodljivih plinov  $CO_2$ ,  $NO_x$  in  $CO$ . Običajno so ukrepi za preprečevanje nenadzorovanega vdora zraka relativno ceneni, imajo pa velike in ugodne finančne in okoljske posledice.

## 6. LITERATURA

- [1] KUŠTRIN, Igor, SEKAVČNIK, Mihael, SENEGAČNIK, Andrej, MORI, Mitja. Termoeenergetski preizkusi 125 MW bloka : optimiranje obratovanja : Termoelektrarna Trbovlje (december 2011). Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2012.
- [2] Smoot L. D. (editor), Fundamentals of coal combustion, Elsevier, Amsterdam, 1993.
- [3] Rayaprolu K., Boilers for power and process, CRC Press, New York, 2009.
- [4] Joos F., Technische Verbrennung, Springer, Berlin, 2006.
- [5] Hill S.C., Smoot D., Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 26, 2000, pp.417–458.
- [6] Ribeirete A, Costa M. Impact of the air staging on the performance of a pulverized coal fired furnace. Proceedings of the Combustion Institute, 2009; vol. 32(2), pp.2667–73.

## **NASLOVI AVTORJEV**

dr. Igor Kuštrin, univ.dipl.inž.,  
Fakulteta za strojništvo, Ljubljana,  
Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana  
e-pošta: [igor.kustrin@fs.uni-lj.si](mailto:igor.kustrin@fs.uni-lj.si)

dr. Andrej Senegačnik, univ.dipl.inž.,  
Fakulteta za strojništvo, Ljubljana,  
Aškerčeva 6 , 1000 Ljubljana  
e-pošta: [andrej.senegacnik@fs.uni-lj.si](mailto:andrej.senegacnik@fs.uni-lj.si)

mag. Miran Jamšek, univ.dipl.inž.,  
Termoelektrarna Trbovlje,  
Ob železnici 27, 1420 Trbovlje  
e-pošta: [miran.jamsek@tet.si](mailto:miran.jamsek@tet.si)