

## Zmanjševanje emisij dušikovih oksidov z rekonstrukcijo zgorevalnega sistema kotlov v Termoelektrarni toplarni Ljubljana

### The Reduction of Nitrogen Oxide Emissions by the Boiler Firing System Reconstruction at the Power Plant Ljubljana

Janez Oman - Igor Kuštrin - Igor Bole - Primož Gostinčar

*Do konca leta 2007 bo v Sloveniji dovoljena emisija  $NO_x$  znašala  $650 \text{ mg/m}^3$ , od 2008 naprej pa  $600 \text{ mg/m}^3$ , za kurilne naprave z močjo od 50 do 500 MW. V Termoelektrarni toplarni Ljubljana, katere emisije so pogosto presegle zgoraj napisane meje, je bilo potrebno izvesti rekonstrukcijo zgorevalnih sistemov kotlov 1 in 2. Po rekonstrukciji zgorevalnega sistema kotla 3, ki je bila izvedena z uvoženim znanjem, sta bila kotla 1 in 2 glavna vira emisij  $NO_x$  in CO. Rekonstrukcija je bila na obeh kotlih v celoti izvedena z znanjem strokovnjakov Termoelektrarne toplarne Ljubljana in Fakultete za strojništvo Ljubljana. V prispevku je opisana izvedba in rezultati rekonstrukcije, ki je imela za posledico, poleg zmanjšanja emisij daleč pod dopustne meje, tudi opazno povečanje izkoristkov obeh kotlov.*

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: emisije  $NO_x$ , sistemi zgorevalni, učinkovitost zgorevanja, gorilniki)**

*In Slovenia,  $NO_x$  emissions from boilers of 50 to 500 MW must be under  $650 \text{ mg/m}^3$  by the end of year 2007. Afterwards, the limit will be  $600 \text{ mg/m}^3$ . The emissions of the Power Plant Ljubljana have often exceeded the stated limiting values. After the reconstruction of the firing system of boiler 3, which was carried out using knowledge from abroad, it was necessary to reconstruct the firing systems of boilers 1 and 2, which remained the main sources of  $NO_x$  and CO emissions. The reconstruction based on domestic knowledge was carried out by experts from the Power Plant Ljubljana and the Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana. The paper describes the essence of the reconstruction and its results. Besides lower emissions there was also a significant improvement in the efficiencies of the boilers.*

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords:  $NO_x$  emission, combustion systems, efficiency, burners)**

#### 0UVOD

Visokotlačna parna kotla 1 in 2 v Termoelektrarni toplarni Ljubljana (TETOL) sta bila izdelana leta 1964 in dograjena leta 1967. V sklopu toplarniškega postrojenja sta namenjena za proizvodnjo pare, ki se uporablja za proizvodnjo električne energije in toplote za ogrevanje mesta Ljubljana. Vsak kotel proizvaja 180 t/h pare s tlakom 95 bar in temperaturo  $530 \text{ }^\circ\text{C}$ , imenska toplotna moč kotlov je 128 MW, gorivo je premog s kurilnostjo 18 MJ/kg. Da bi zmanjšali onesnaževanje okolja, so se od leta 1993 dalje v TETOLu preusmerjali na uporabo ekološko bolj sprejemljivih uvoženih premogov z

majhnim deležem žvepla in pepela. Problem prevelikih emisij prašnih delcev so na kotlih 1 in 2 odpravili v letih 1994 in 1995 z zamenjavo elektrofiltrov z vrečastimi filtri.

Problem prevelikih emisij  $NO_x$  pa je bil v TETOL še vedno opazen. Iz poročila [1] je razvidno, da je bila v poletnih mesecih leta 2002, ko je obratoval samo blok 1, izmerjena povprečna koncentracija dušikovih oksidov,  $NO_x$ ,  $746 \text{ mg/m}^3$ . Pri spremembi obremenitve kotla pa se je koncentracija  $NO_x$  zvečala tudi do  $900 \text{ mg/m}^3$ . Dovoljena emisija  $NO_x$  bo do konca leta 2007 znašala  $650 \text{ mg/m}^3$ , od 2008 naprej pa  $600 \text{ mg/m}^3$  za kurilne naprave z močjo od 50 do 500 MW.

Temelj za odločitev za rekonstrukcijo zgorevalnih sistemov na kotlih 1 in 2 so bili preizkusi in meritve [2], iz katerih je razvidno, da je mogoče že s sedanjim sistemom zgorevanja opazno zmanjšati emisijo  $NO_x$ . Eden od pogojev za zmanjšanje emisije  $NO_x$  je bilo zmanjšanje količine zgorevalnega zraka. V času meritev je bilo z dodatnimi nastavitvami prerazporeditve zgorevalnega zraka pri največji obremenitvi kotla doseženo zmanjšanje  $NO_x$  iz  $658 \text{ mg/m}^3$  na  $441 \text{ mg/m}^3$ . Bistvo posega je bilo zmanjšanje pretoka zgorevalnega zraka na 68% običajnega pretoka. Drugi ukrep za zmanjšanje emisije  $NO_x$  pa se je nanašal na ustrežnejšo razporeditev zgorevalnega zraka, česar pa s tedanjo regulacijo zgorevalnega sistema in konstrukcijsko zasnovo gorilnikov ni bilo mogoče avtomatično doseči.

Odločitev za rekonstrukcijo zgorevalnih sistemov je bila sprejeta z gospodarskim načrtom TETOL za leto 2003, na kotlu 1 je bil izveden projekt v letu 2003 in na kotlu 2 v letu 2004. Analiza pretokov zgorevalnega zraka kotla bloka 2 je pokazala, da je mogoče z rekonstrukcijo zgorevalnega sistema izboljšati izkoristek kotla za najmanj 1%, kar bi skupaj za kotla 1 in 2 pomenilo za 2500 t/leto manjšo porabo premoga, za 4,5 t/leto manjšo emisijo  $CO_2$  in tudi ustrežno zmanjšanje emisije trdnih delcev.

Odločeno je bilo, da bo projekt rekonstrukcije izpeljan na podlagi lastnih izkušenj in

lastnega znanja. Začetek montažnih del na kotlu 1 je bil v avgustu 2003, konec pa v oktobru istega leta, ko je bil kotel 1 dan v obratovanje.

V prispevku so predstavljena tudi teoretična izhodišča nastajanja dušikovih oksidov in splošni ukrepi pri postopku zgorevanja premogovega prahu, s katerimi je bistveno zmanjšana možnost nastajanja dušikovih oksidov. Prikazane so pomanjkljivosti starih zgorevalnih sistemov na kotlih blokov 1 in 2. Predstavljena so izhodišča, ki so bila uporabljena kot osnova za rekonstrukcijo sedanjih zgorevalnih sistemov v teh kotlih. Predstavljeni rezultati meritev na kotlu 1, izvedeni po rekonstrukciji kurjave, potrjujejo uspešnost izvedene predelave sistema za zgorevanje.

### 1 VPLIVNI DEJAVNIKI IN POGOJI ZA NASTAJANJE $NO_x$ PRI KURJAVAH NA PREMOGOV PRAH

Dušikove okside  $NO$  in  $NO_2$  označujemo s skupno oznako  $NO_x$ . Delež  $NO_2$  v skupni količini  $NO_x$  je običajno manjši od 5 %, prevladuje torej  $NO$ . Mehanizmi nastanka  $NO$  so raznovrstni, dejansko pa ločimo tri osnovne postopke [3]:

- termični  $NO$ ,
- tako imenovani takojšni  $NO$  in
- $NO$  iz goriva, ki nastaja iz dušikovih spojin v gorivu.

Preglednica 1:

Vrsta dušikovega oksida		Mesto nastajanja	Okoliščine	Pogoji za nastanek
NO	termični	v plamenu in v poznejših reakcijah	presežek kisika: $O + N_2 = NO + N$ $N + O_2 = NO + O$ presežek goriva: $N + OH = NO + H$	prisotnost atomarnega kisika * zadrževalni čas, temperatura nad $1300 \text{ }^\circ\text{C}$
	takojšni	v plamenu	zaradi prisotnosti $HCN$ skupine, ki nastaja iz: $CN + H_2O = HCN + OH$ $CH + N_2 = HCN + N$	prisotnost atomarnega kisika * potek zgorevanja, $\lambda$
	iz goriva	v plamenu	zaradi $HCN$ in $NH_3$ skupine	prisotnost $N, O_2$ čas zadrževanja
$NO_2$		dimni kanali, katalitično okolje	$O + N_2 + M = N_2O + M$ $M$ - tretja snov $NO + O_2 = 2NO_2$	prisotnost $O_2$ temperatura pod $650 \text{ }^\circ\text{C}$ , čas

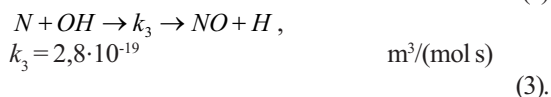
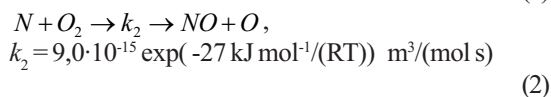
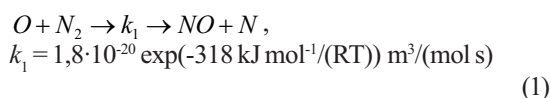
\* - atomarni kisik se pojavlja zaradi disociacije molekul  $O_2$

V preglednici 1 so prikazane okoliščine nastajanja dušikovih oksidov pri zgorevanju v kotlih.

Hitrost nastajanja NO<sub>x</sub> je odvisna od vrste reakcije. V splošnem velja, da najhitreje potekajo reakcije nastajanja takojšnih dušikovih oksidov, najbolj počasi pa poteka reakcija nastanka termičnega NO.

### 1.1 Termični NO

Osnovne reakcije zaporednega nastajanja termičnega NO, ki so prikazane v preglednici 1. potekajo v naslednjem zaporedju [4]:



Reakcija (1) je izhodiščna, torej prva v verigi reakcij. Hitrost poteka te reakcije določa količino termičnega NO, ki nastaja po reakcijah (2) in (3). Zaradi visoke aktivacijske energije reakcije, 318 kJ/mol, poteka reakcija (1) le pri visokih temperaturah, kar daje ime nastalim dušikovim oksidom. Hitrost poteka

reakcije in količina nastalih dušikovih oksidov je odvisna predvsem od višine temperature.

V reakcijah (2) in (3) sodeluje atomarni dušik v navidezno stabilnem stanju, zato je potek teh reakcij zelo hiter, kar omogoča, da reakcijsko hitrost nastajanja termičnega NO lahko zanesljivo opišemo le kot funkcijo hitrosti poteka reakcije (1) [5]:

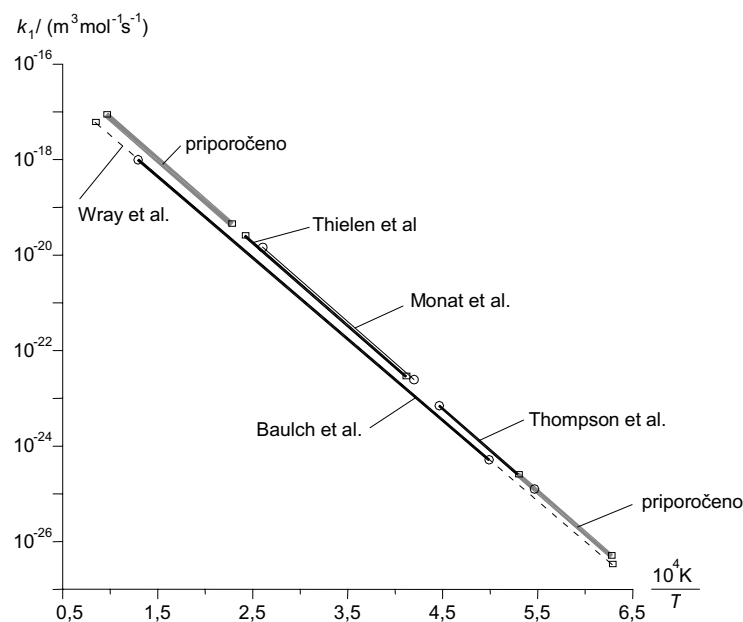
$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[O][N_2] \quad (4)$$

Iz izraza (4) je vidno, da je reakcijsko hitrost nastajanja termičnega NO mogoče zmanjšati z zmanjševanjem koncentracij [O] in [N<sub>2</sub>] ter z zniževanjem ravnotežne konstante k<sub>1</sub>. Vrednost ravnotežne konstante se hitro zmanjšuje z nižanjem temperature.

Pojav termičnega NO lahko pričakujemo v plamenih, kjer so temperature nad 1300 °C, zato so koncentracije termičnega NO v kuriščih z višjo toplotno obremenitvijo večje kakor v manj toplotno obremenjenih kuriščih.

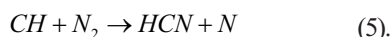
### 1.2 Takojšni NO

Takojšne dušikove okside imenujemo tudi zgodnje, ker nastajajo že na čelu plamena. Mehanizem nastajanja takojšnega NO je bolj zapleten od mehanizma nastajanja termičnih dušikovih oksidov. Nastanek takojšnih NO je posledica navzočnosti radikala CH, ki je rezultat vmesnih reakcij na čelu



Sl. 1. Odvisnost  $k_1 = k(1/T)$  za reakcijo  $O + N_2 \rightarrow NO + N$  [13]

plamena. CH reagira najprej z dušikom iz zraka, nakar v navzočnosti kisika nastaja tudi NO [6]. Iz obširnega spiska mogočih reakcij s hidrokarbonatnimi skupinami šteje kot pomembna za nastanek dušikovih oksidov [7], predvsem naslednja reakcija:



Tu nastaja atomarni dušik, ki je v navidezno stabilnem stanju. Atom dušika se nagiba k oddajanju elektronov in se zelo hitro veže s kisikom v NO. Osnova za nastajanje takojšnjega NO je torej navzočnost ogljikovodikovih radikalov in atomarnega dušika. Taka stanja so značilna za plamen, v katerem poteka zgorevanje pri razmerniku zraka manjšem od 1, to je plamen, ki je bogat z gorivom. Aktivacijska energija reakcije (5) je majhna, zato takojšnji NO nastaja tudi pri sorazmerno nizkih temperaturah, okrog 700 °C. Atomarni dušik nastaja tudi pri reakciji:

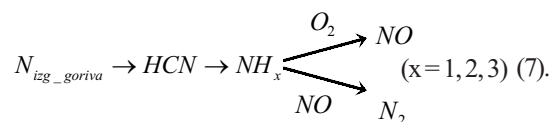


ki pa šteje kot manj pomembna. Višanje temperature izrazito pospeši nastajanje takojšnjega NO po obeh reakcijah. V takih plamenih je od skupno nastalih dušikovih oksidov delež takojšnjega NO lahko pri visokih temperaturah večji od deleža termičnega NO [8]. Pomembna ugotovitev je, da je za nastanek termičnih in takojšnjih dušikovih oksidov ključna navzočnost atomarnega dušika v plamenu.

### 1.3 NO iz dušikovih spojin v premogu

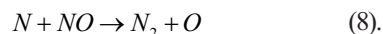
Večina raziskovalcev šteje dušik, vezan v snovi goriva, za najpomembnejši vir dušikovih oksidov pri zgorevanju premogov, pri katerih imajo NO iz goriva tudi preko 75-odstotni delež od skupnih NO<sub>x</sub> v dimnih plinih [7]. Vzrok nastanka NO je razpad komponent, ki vsebujejo dušik. Razlog je v sorazmerno nizkih temperaturah zgorevanja in lokalnih pojavih s premogom prebogatih mešanic v plamenu. NO iz goriva nastaja hitreje od termičnega, ker so N - H in N - C vezi dušika v premogu bistveno šibkejše od vezi v molekuli dušika, ki morajo pri nastajanju termičnega NO disociirati. Reakcije potekajo med snovmi plinaste faze, torej med hlapnimi komponentami premoga, zato prispevajo k nastanku tovrstnih dušikovih oksidov le dušikove spojine v letečih delcih.

V začetni fazi gorenja dušik izpareva iz katranov kot HCN v obliki letečih delcev. Sprememba v HCN spojine je neodvisna od oblike vezanosti dušika v izvornih snoveh. Reakcije potekajo naprej:



HCN razpada v amine, NH<sub>x</sub>, ti pa naprej ali oksidirajo v NO ali reagirajo z NO in ustvarjajo N<sub>2</sub>. Iz reakcije (7) je vidno, da pri večjih koncentracijah dušikovih spojin prihaja do njihovih medsebojnih reakcij, v katerih zopet nastaja molekularni dušik N<sub>2</sub>.

Molekularni dušik nastaja tudi pri reakciji, ko se NO veže z atomarnim dušikom:



Dušik je v premogu večinoma vezan v stabilnih krožnih aromatskih spojinah. V fazi termičnega razpada se večina dušika iztrga iz teh spojin in se primeša preostalim letečim delcem. Dušikovi ostanki pirolize so HCN, NH<sub>3</sub> in tudi nitroskupine v katranu. Pri kurjavah s premogovim prahom je prav to glavni razlog, da nastaja največ NO<sub>x</sub> iz dušikovih spojin v letečih delcih, ki se pri zgorevanju delcev premoga izplinjajo v fazi pirolize.

## 2 DUŠIKOVI OKSIDI PRI KURJAVAH NA PREMOGOV PRAH

### 2.1 Kemične reakcije in vpliv sestave premoga na nastajanje NO<sub>x</sub>

Dejstvo je, da delež dušika v gorivu vpliva na koncentracijo dušikovih oksidov v dimnih plinih. Rezultati meritev pri premogih, ki vsebujejo 1 % dušika, v primerjavi s premogi, ki vsebujejo 2 % dušika, pokažejo približno 50 % različne emisije NO<sub>x</sub>. Čeprav so rezultati preizkusov pokazali, da pri premogih z enakim deležem dušika vendar z različnim deležem letečih delcev ni zaznati bistvenih razlik emisij dušikovih oksidov, pa se po drugi strani izkaže, da so leteči delci glavni vir dušikovih oksidov. Dušik, vezan v plinastih spojinah, je bolj nagnjen k oksidiranju kakor dušik, ki je trdno vezan v koksnih strukturi premoga. Pri povezavi med deležem dušika v premogu in emisijami NO<sub>x</sub> je torej najbolj pomembno dejstvo, koliko dušika je v izparljivi masi premoga. Večji deleži izparljive mase, letečih delcev,

kar je npr. lastnost bituminoznih premogov, neposredno ne vplivajo na povečanje količine dušikovih oksidov. Vpliv količine letečih delcev je le posreden, saj je večja količina letečih delcev vzrok za višje lokalne temperature v plamenu, ki najprej povzročijo, da se upari več dušika, potem pa pospešujejo oksidacijo dušika iz goriva in tudi dušika iz zgorevalnega zraka.

Zaradi zapletenih razmerij med dinamiko v gorilniku in kemičnimi reakcijami v splošnem ni preprosto določiti, katera reakcija je pri nastajanju dušikovih oksidov prevladujoča. Pri kurjavah na premogov prah vseeno velja, da je dušik v izparljivih dušikovitih spojinah premoga najpomembnejši vir dušikovih oksidov. Koncentracije termičnega NO so v splošnem pri kurjavah na premogov prah majhne, delno pa prevladujejo v reakcijah za plamenom tam, kjer se dodaja dodatni zrak nad plamenom. Pomembnejše količine termičnega NO nastajajo v premogovih plamenih le pri temperaturah nad 1650 K. Mehanizem nastajanja takojšnjega NO pri kurjenju s premogom oziroma pri kurjavah na premogov prah ni tipičen in tudi ne zelo pomemben pojav [7].

Pomembni so torej postopki nastajanja dušikovih oksidov iz kemično vezanega dušika v premogu. V neugodnih razmerah se v NO lahko spremeni do 50 % dušika iz letečih delcev premoga. Dejanska količina oksidiranega dušika iz letečih delcev pa je v praksi bistveno odvisna od postopkov mešanja v plamenu, od razporeditve in višine temperatur ter od stehiometričnih razmer pri zgorevanju.

Končna koncentracija NO iz dušikovih spojin premoga je manjša pri zgorevanju z gorivom bogatih mešanic. Koncentracijo NO iz goriva zmanjšuje tudi navzočnost drugih dušikovih spojin, ker prihaja do medsebojnih reakcij in nastajanja  $N_2$ , kakor je prikazano v enačbah (7) in (8). Čeprav v tem postopku temperatura plamena nima tako pomembne vloge kakor pri nastajanju termičnega NO, se je vseeno treba izogibati lokalnim pojavom visokih temperatur.

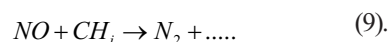
## 2.2 Primarni ukrepi za zmanjševanje emisije dušikovih oksidov

Ugotovili smo, da je pri kurjavah na premogov prah glavni vir dušikovih oksidov dušik iz goriva, ki je kemično vezan v izparljivi masi premoga. Rezultati osnovnih raziskav in strokovnih izkušenj, ki so predstavljeni v prejšnjih poglavjih, pokažejo, da je mogoče skonstruirati kurilne naprave in

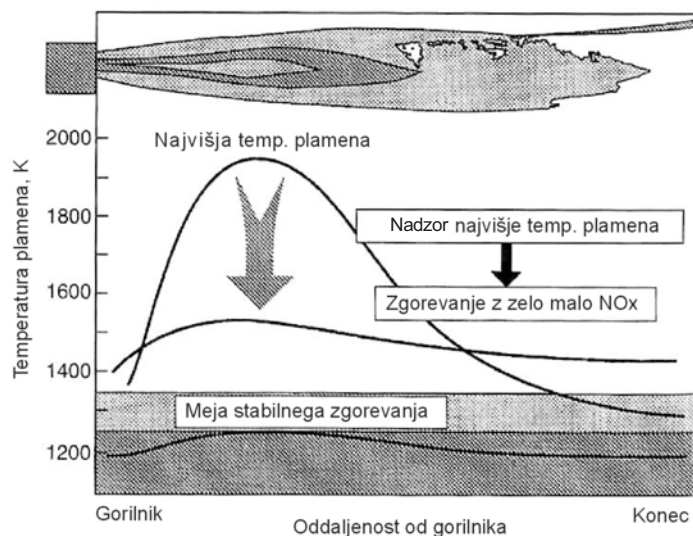
postopek kurjenja tako, da v postopku kurjenja nastanejo pogoji za zmanjšanje količine dušikovih oksidov, ki nastanejo iz dušikovih spojin v gorivu. Preurediti je treba dovode goriva, spremeniti obliko in velikost gorilnikov, prilagoditi dovode zgorevalnega zraka in rekonstruirati sistem obtoka vročih in hladnih dimnih plinov. Neprijetno je, da prav načelo kakovostnega kurjenja premoga, ki je povezano z zgorevanjem pri visokih temperaturah in z zadostno količino zraka za zgorevanje, pospešuje nastajanje dušikovih oksidov.

Za zmanjševanje nastajanja dušikovih oksidov iz dušikovih spojin v gorivu in takojšnih dušikovih oksidov je pri kurjavah na premogov prah osnovni ukrep stopenjsko zgorevanje. S preoblikovanjem običajnih kurilnih naprav je mogoče tako zmanjšati emisijo dušikovih oksidov za 50 do 80 odstotkov.

Postopek poteka v več stopnjah. Na prvi stopnji, takoj po izstopu iz gorilnikov, vzpostavimo razmere z gorivom bogate mešanice, v kateri je razmernik zraka manjši od teoretično potrebnega in se giblje okoli vrednosti 0,7. Namen te faze kurjenja je, da se zmanjša nastajanje zmesi  $NO_x + HCN + NH_3$ . Po tej stopnji se vzpostavijo razmere zgorevanja s kisikom bogatejšo mešanico, tako da se na tej drugi stopnji razmernik zraka giblje okoli vrednosti 1.  $N_2$  in  $N$ , ki sta nastala v prvi fazi, bosta oksidirala v NO, ker je na tem mestu v kurišču temperatura plamena zaradi prenosa toplote s sevanjem v uparjalnik že nižja. Če na koncu te stopnje poskrbimo še za presežek kisika, se bo nekoliko zmanjšal tudi delež že nastalih NO. Na tretji stopnji zopet dodamo gorivo, kar vzpostavi razmere za ponovno redukcijo NO. V mešanicah, bogatih z gorivom, nastajajo  $CH_i$  radikali, ki povzročajo redukcijo dušikovih oksidov po reakciji [9]:



Za zmanjšanje nastanka termičnih dušikovih oksidov so ukrepi nekoliko drugačni. Reakcija nastajanja termičnega NO potrebuje veliko energijo aktiviranja, zato nižanje temperaturnih konic v plamenu bistveno pripomore k zmanjševanju nastajanja termičnih NO. Ukrepi nižanja temperaturnih konic v plamenu so različni. Lahko dodajamo neaktivne snovi, npr. dušik, vodo ali hladne dimne pline, ki prevzemajo presežke sproščene energije v plamenu in znižajo temperaturo. Temperaturne konice nižamo tudi tako, da se gorivo in zgorevalni zrak ne mešata pred izstopom iz gorilnika, temveč neposredno v območju zgorevanja.



Sl. 2. Vpliv temperature plamena na nastanek NOx

### 2.3 Posledice ukrepov za zmanjšanje emisije dušikovih oksidov

Okoliščine, ki nastanejo v kurišču po vzpostavitvi razmer za zmanjšanje emisije dušikovih oksidov, niso v skladu z optimalnimi razmerami za zgorevanje pri kurjavah na premogov prah. Pričakujemo lahko, da se bodo hkrati z ukrepi za zmanjšanje NO pojavitve v kurišču in na kotlu določene težave in neželeni stranski pojavi [10]. Mogoče neželene in škodljive učinke lahko strnemo v naslednje skupine:

- Znižanje temperatur in manjši presežki zgorevalnega zraka povzročijo povečanje izgub zaradi nezgorelih deležev v pepelu, žlindri in dimnih plinih ter s tem znižanje izkoristka kotla.
- Zaradi spremembe značilnic plamena se prerazporedijo toplotni tokovi med ogrevalne površine kotla, kar lahko povzroči, da se s sedaj vgrajenimi ogrevalnimi površinami in krmilno opremo težko vzdržuje ali imenske količine ali imenske parametre sveže pare.
- Redukcijska atmosfera v kurišču povzroča znižanje temperature taljenja pepela in povečuje možnost zažlindranja grevalnih površin. Redukcijska atmosfera pospešuje tudi korozijo sten cevi na strani dimnih plinov.
- Pri najmanjših obremenitvah kotla se zmanjša stabilnost plamena, zaradi česar je treba omejiti najmanjšo moč kotla.
- Plamen se podaljša, kar lahko povzroča težave na ogrevalnih površinah za kuriščem.

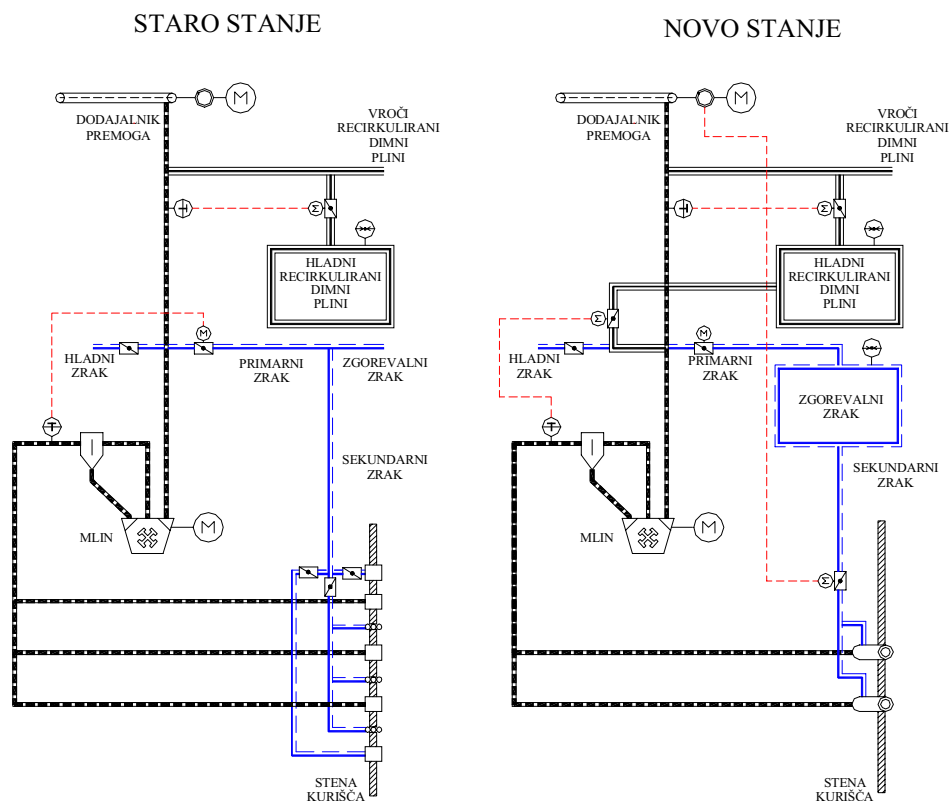
- Zaradi povečanja masnega pretoka obtočnih dimnih plinov, povečanja pretočnih uporov skozi gorilnike in zaradi zahtevane večje drobnosti mletja premoga se poveča lastna raba električne moči kotla.

## 3 REKONSTRUKCIJA GORILNIKOV IN KURJAVE NA KOTLIH 1 IN 2

### 3.1 Kurjava pred rekonstrukcijo

Na temelju opisanih teoretičnih spoznanj in praktičnih izkušenj strokovnjakov iz TE-TO je bila izvedena rekonstrukcija gorilnikov in kurjave, najprej na kotlu 1, potem pa še na kotlu 2.

Pred rekonstrukcijo razvoda zgorevalnega zraka in gorilnikov na kotlih 1 in 2 je vsak mlin napajal tri gorilnike. Dovajanje sekundarnega zraka se je krmililo z ročnimi loputami. Sekundarni zrak je bil razdeljen na zrak nad zgornjim gorilnikom, zrak pod spodnjim gorilnikom in sredinski zrak. Z daljinskim krmiljenjem je bilo obremenitvi mogoče prilagajati le količino primarnega zgorevalnega zraka. Ker se je temperatura prašne zmesi za mlino uravnavala z dodajanjem primarnega zraka pred mlino (sl. 3), je bilo tega zraka vedno preveč, oziroma več kolikor bi ga bilo treba za kakovostno zgorevanje. Zaradi prevelikega presežka zgorevalnega zraka so bile izgube s toploto dimnih plinov prevelike, izkoristek kotla pa nižji. Prevelika količina primarnega zraka je povzročala tudi velike emisije NO<sub>x</sub>, včasih pa tudi samovžig premoga pred gorilnikom. Zaradi



Sl. 3. Razvod zgorevalnega zraka in hladnih obtočnih plinov pred rekonstrukcijo in po njej

samovžigov so se pojavljale deformacije prahovodnih kanalov in poškodbe na obzidavi gorilnikov, kar je zmanjševalo zanesljivost obratovanja.

Pred rekonstrukcijo se je količina zgorevalnega zraka prilagajala obremenitvi kotla. Pretok zgorevalnega zraka je bil merjen v sesalnih kanalih vetril podpiha. Dejanska količina zgorevalnega zraka, ki je vstopala v kotel, je bila vedno precej manjša od izmerjene. Vzrok za to so bile vedno navzoče netesnosti vrtilnih obnovljivih grelnikov zraka. Razlika med izmerjeno in dejansko količino je bila odvisna od absolutnega tlaka v zračnih in dimnih kanalih na vstopu v grelnik zraka. Pri večji tlačni razliki je bil vdor zraka v dimni kanal večji in nasprotno, tako da ni bilo nikoli zanesljivo, koliko nadzorovanega zgorevalnega zraka je dejansko vstopilo v kotel.

### 3.2 Rekonstrukcija kurjave

Rekonstrukcija gorilnikov, sistema krmiljenja in razvoda zgorevalnega zraka ter sistema obtoka dimnih plinov je bila načrtovana in izvedena

tako, da so bili doseženi naslednji učinki:

- manjši presežki zgorevalnega zraka in boljši izkoristek kotla,
- doseganje zakonsko dovoljenih emisij dušikovih oksidov in ogljikovega monoksida.

Prvi cilj je mogoče doseči z nadzorovanim dovajanjem zgorevalnega zraka, temperatura v mlinih pa se uravnava s primešavanjem hladnih obtočnih dimnih plinov.

Drugi cilj je dosegljiv z novo konstrukcijo gorilnikov, ki omogočajo nadzorovano dovajanje zgorevalnega zraka in so izdelani v skladu z naj sodobnejšimi spoznanji o gorilnikih, ki dajejo malo dušikovih oksidov.

#### 3.2.1 Gorilniki

Prvotno sta imela kotla štiri gorilnike s štirimi pravokotnimi izstopnimi šobami, ki so jih zaradi premajhnih izstopnih hitrosti iz gorilnikov in nestabilnega plamena leta 1992 zamenjali s tremi pravokotnimi šobami, kakor je prikazano na sliki 4, levo. Vsak gorilnik je imel razporeditev sekundarnega zraka zgoraj, spodaj in med izstopnimi šobami.



Sl. 4. Fotografiji starih in novih gorilnikov

To staro obliko gorilnikov so pri rekonstrukciji nadomestili z gorilniki vrtničnega tipa. V vsak vogal kurišča so namestili po dve gorilniški šobi s toplotno močjo 35 MW (sl. 4, desno). Šobe so izdelane posebej za indonezijski premog, katerega uporabljajo v vseh treh kotlih. Zmes premogovega prahu, vročih dimnih plinov in primarnega zraka se vrtniči iz osrednjega dela šobe gorilnika, po zunanjem kolobarju pa se dovaja sekundarni zrak, ki se vrtniči v nasprotni smeri. Tako se premog in sekundarni zrak zmešata šele v območju zgorevanja in ne prej, doseženo pa je tudi dobro mešanje zraka in premogovega prahu. Odločitev za dve šobi v gorilniku namesto treh je temeljila na dejstvu, da je tako lažje in preprosteje uravnoteženo porazdeliti premogov prah in sekundarni zrak med šobe. Pri optimiranju zgorevanja na kotlu 1 in kotlu 2, se je potrdila pravilnost odločitve za dve šobi v vsakem gorilniku.

### 3.2.2 Sekundarni zrak

Za uravnavanje količine sekundarnega zraka, ki vstopa v gorilnike, so vgrajene daljinsko krmiljene lopute. Z vsako posamezno loputo se uravnava količina sekundarnega zraka za obe šobi posameznega gorilnika. Količina sekundarnega zraka, oziroma odprtost loput v kanalih sekundarnega zraka, se prilagaja obremenitvi dodajalnikov po algoritmu, vgrajenem v sistem za krmiljenje zgorevanja.

Namesto vgradnje neposrednih meritev pretoka sekundarnega zraka so bile opravljene enkratne meritve odvisnosti pretoka zraka od

odprtosti lopute. Meritve so bile opravljene v času preizkusnega obratovanja pri znanem in nespremenljivem tlaku zraka pred loputami in v kurišču. Z uporabo podatkov o tlaku in temperaturi zgorevalnega zraka v kanalu ter odprtosti lopute se med obratovanjem sproti izračunava pretok sekundarnega zraka skozi loputo. Enak tlak pred vsako loputo je zagotovljen s sklenjenim obročnim kanalom sekundarnega zraka okoli kotla. Krmiljenje dovoda zgorevalnega zraka je bila spremenjena tako, da vetrili podpiha sedaj vzdržujeta stalen tlak zgorevalnega zraka v tem obročnem kanalu.

### 3.2.3 Hitrosti v kanalih

Za dobro delovanje novih gorilnikov so potrebni nekateri pogoji. Hitrosti prašne zmesi v ustjih gorilnikov morajo biti okoli 18 m/s, zagotovljena mora biti tudi ustrezna kakovost mletja in enakomerna porazdelitev premogovega prahu in zraka med šobe gorilnika. Če so hitrosti prevelike, se plamen trga od ustja gorilnika, če pa so premajhne, se plamen širi v ustje gorilnika in ga poškoduje. Prevelike hitrosti v prahovodnih kanalih odnašajo tudi večji delež velikih delcev premogovega prahu iz mlina proti gorilniku. Preveliki delci v kurišču ne zgorijo in se izločijo kot nezagorelo v žilindri ali kot nezagorelo v pepelu, kar slabša izkoristek kotla. V času preizkusnega obratovanja so bile izvedene meritve hitrosti v prahovodnih kanalih pred posameznimi šobami gorilnikov [11]. Hkrati se je odesaval premogov prah za analizo kakovosti mletja in za ugotovitev porazdelitve premogovega prahu med



posamezne gorilnike in šobe. Pri prvem merjenju so bile hitrosti v ustjih gorilnikov prevelike in so se gibale med 24 in 28 m/s. Tudi kakovost mletja ni bila ustrezna, porazdelitev premogovega prahu med šobi posameznega gorilnika pa ni bila uravnovežena.

Da bi zmanjšali hitrosti v ustjih gorilnikov, so bile na rotorje mlinov nameščene udarne plošče z manjšo površino. Pri ponovnem merjenju so bile hitrosti v ustjih gorilnikov med 19 in 23 m/s. Zaradi manjših hitrosti se je zmanjšal delež večjih delcev v premogovem prahu. Z nastavitvijo lege prahovodnih loput med mlini in gorilniki, se je uravnovežila porazdelitev premogovega prahu med šobi posameznega gorilnika.

### 3.2.4 Uravnava temperatur v mlinih

Temperatura zmesi vročih plinov in premoga za mlinom, ki se je prej uravnava z dodajanjem primarnega zraka, se po rekonstrukciji vzdržuje s hladnimi obtočnimi dimnimi plini iz zveznega kanala dimnih plinov tik ob mlinih. Lopute primarnega zraka in hladnega zraka so sedaj ves čas zaprte. Spremenjen način vzdrževanja temperature za mlinom zahteva

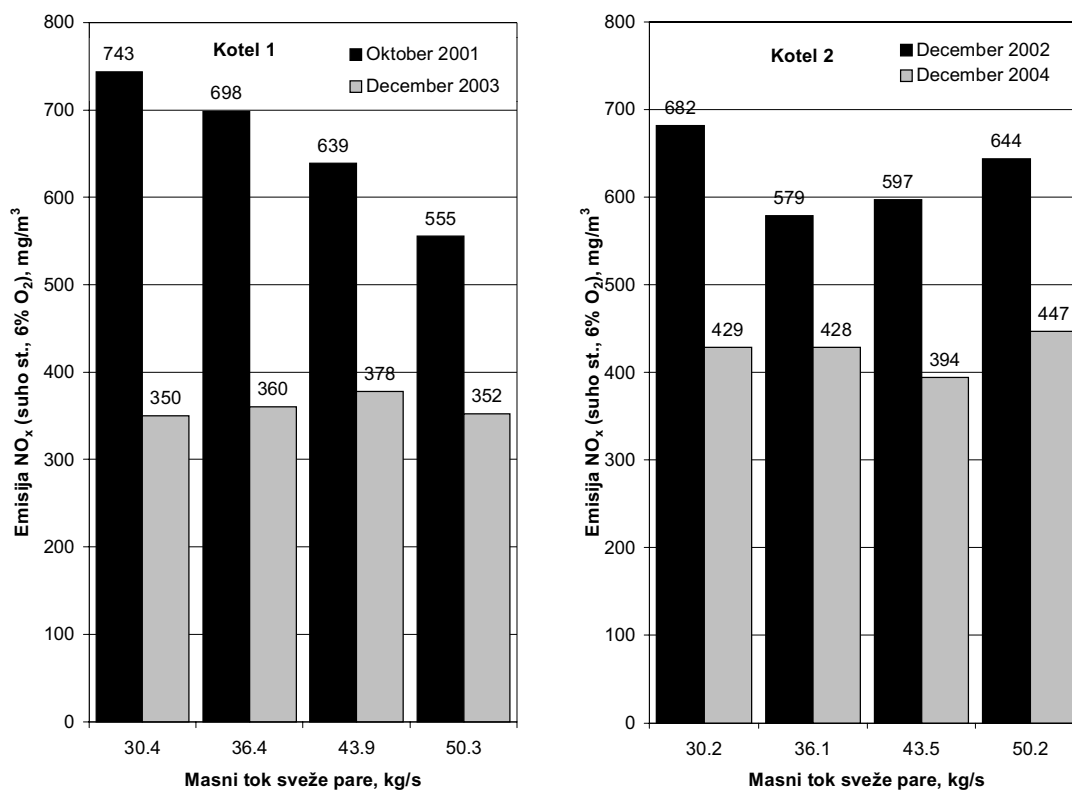
dobavo večje količine obtočnih dimnih plinov. Zato je bil prigrinjeno dodatno vetrilo. To je tudi povečalo zanesljivost obratovanja kotla, saj je okvara edinega vetrila hladnih obtočnih plinov prej ogrozila obratovanje kotla.

## 4 ANALIZA REZULTATOV MERITEV

Po končanih nastavitvah gorilnikov in porazdelitvah zgorevalnega zraka so bile na kotlu 1 opravljeni preizkusi kakovosti obratovanja kotla. Preizkuse je izvedla skupina Laboratorija za termoenergetiko Fakultete za strojništvo v Ljubljani. Analiza rezultatov preizkusov [12] je potrdila, da so bili zastavljeni cilji projekta v celoti doseženi.

### 4.1 Zakonski predpisi in omejitve

Na podlagi Zakona o varstvu okolja je bila izdana Uredba o emisiji snovi v zrak iz velikih kurilnih naprav, ki uvršča kotla 1 in 2 v TETOL med sedanje stare velike kurilne naprave [14]. Za te ostanejo do vključno 31. decembra 2007 v veljavi določbe 13. člena Uredbe o emisiji snovi v zrak iz kurilnih naprav



Sl. 5. Emisija NO<sub>x</sub> na kotlih 1 in 2 pred rekonstrukcijo in po njej

[15]. Mestna občina Ljubljana je sprejela tudi Odlok o zmanjšanju mejnih emisijskih koncentracij za sedanje velike kurilne naprave [16].

Na podlagi teh podzakonskih odredb so določene mejne vrednosti emisij, ki se pri obratovanju kotlov ne smejo presežati. Na državni ravni je za polutant  $\text{NO}_x$  omejitev  $650 \text{ mg/m}^3$  za polutant CO pa  $250 \text{ mg/m}^3$ . Na ravni mestne občine so omejitve strožje. Za  $\text{NO}_x$  je omejitev  $600 \text{ mg/m}^3$ , za CO pa  $150 \text{ mg/m}^3$ .

#### 4.2 Rezultati meritev emisij dušikovih oksidov in ogljikovega monoksida

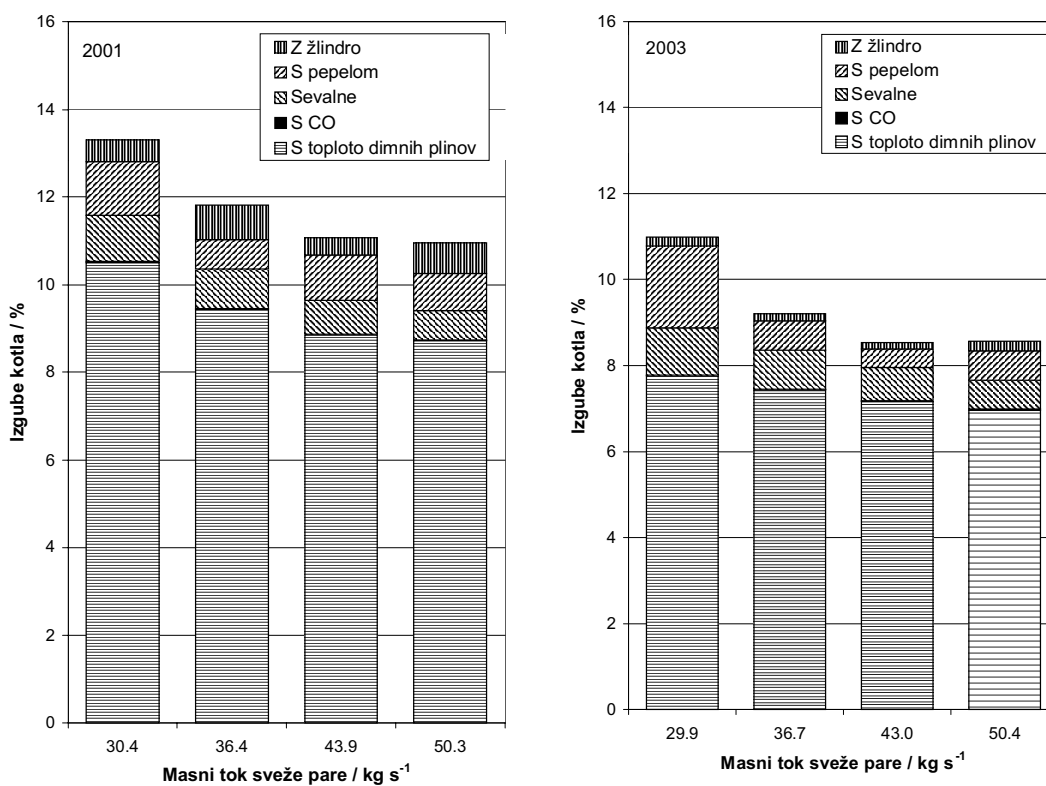
Na levi strani na sliki 5 so prikazani rezultati meritev koncentracije  $\text{NO}_x$  na kotlu 1, na desni strani pa koncentracije  $\text{NO}_x$  za kotel 2, v obliki masnih deležev v dimnih plinih na izstopu iz kotla. Za kotel 1 je prikazana primerjava med rezultati, dobljenimi pred rekonstrukcijo, oktober 2001, in rezultati po rekonstrukciji v decembru 2003, za kotel 2 pa rezultati pred rekonstrukcijo v decembru 2002 in po rekonstrukciji v decembru 2004. Pri obeh kotlih so rezultati pri štirih različnih obremenitvah. Sočasno se je merila tudi koncentracija CO.

Dobljeni rezultati kažejo, da je bila pred rekonstrukcijo zgorevalnega sistema emisija  $\text{NO}_x$  na kotlu 1 med  $555$  in  $743 \text{ mg/m}^3$ , po rekonstrukciji pa pri nobeni obremenitvi ni presežala  $378 \text{ mg/m}^3$ . Tudi po rekonstrukciji kotla 2 se je emisija  $\text{NO}_x$  na tem kotlu bistveno zmanjšala in v času preizkusov ni bila večja od  $450 \text{ mg/m}^3$ .

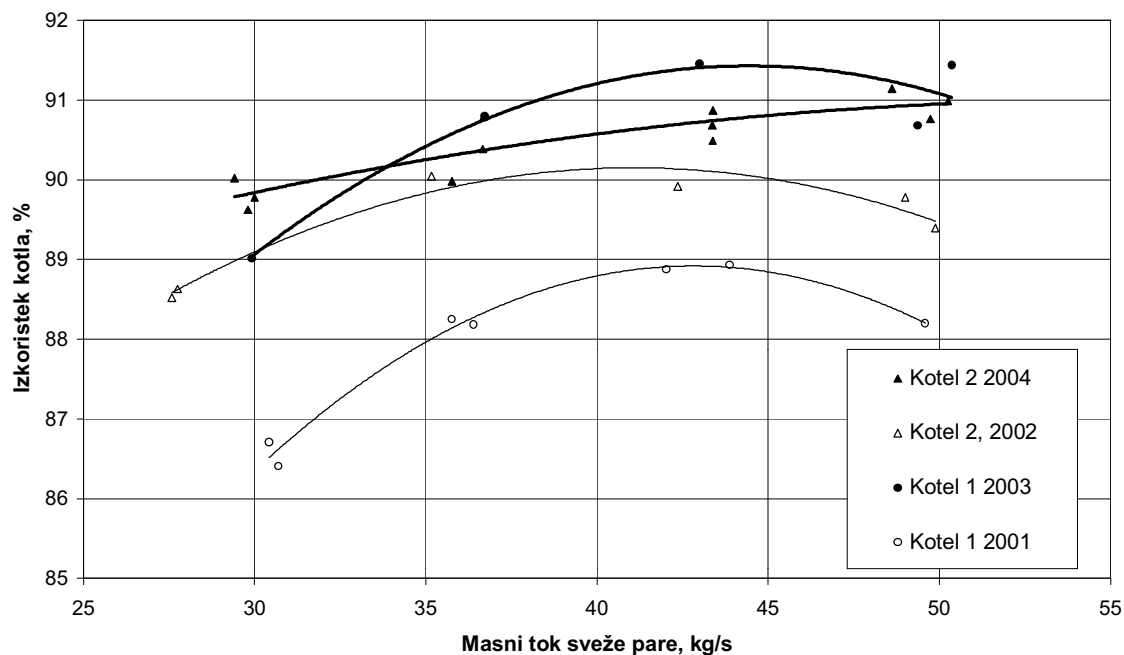
Koncentracija CO se je na obeh kotlih po rekonstrukciji nekoliko dvignila, vendar v nobenem primeru ni presežala polovične vrednosti dopustnih emisij. Ugotovimo torej lahko, da so po rekonstrukciji emisije  $\text{NO}_x$  in CO na obeh kotlih daleč pod dopustnimi vrednostmi.

#### 4.3 Izgube in izkoristek

Na sliki 6 so prikazane izgube kotla 1, ki so na podlagi rezultatov meritev izračunane po DIN 1942. Po rekonstrukciji kurjave so se zmanjšale vse izgube. Predvsem je očitno zmanjšanje izgube s toploto dimnih plinov, ki so se pri vseh obremenitvah zmanjšale za več ko dva odstotka. To zmanjšanje najbolj vpliva na opazno zmanjšanje vsote vseh izgub. Manjše izgube s toploto dimnih



Sl. 6. Izgube kotla 1 pred rekonstrukcijo in po njej



Sl. 7. Izkoristek kotlov 1 in 2 pred rekonstrukcijo in po njej

plinov so posledica bolj nadzorovanega dovoda zraka in zato manjšega razmernika zraka. Zmanjšale so se tudi izgube z nezgorelim v žilindri in pepelu, predvsem zaradi prej omenjenih ukrepov na mlinih in zato boljšega mletja. Zaradi manjših izgub se je izboljšal izkoristek kotla 1 v povprečju za več ko dva odstotka (sl. 7).

## 5 SKLEPI

Nastajanje dušikovih oksidov pri kurjenju premogovega prahu je postopek, ki je predvsem posledica sestave in kurilnosti premogov. Postopek je specifičen, vzroki in mehanizmi pa nekoliko drugačni kakor jih poznamo pri drugih vrstah goriv. Glavna vzroka za pojav dušikovih oksidov v dimnih plinih kurjav na premogov prah sta delež dušika v izparljivi masi premoga in take razmere v plamenu, ki omogočijo oksidacijo prostega molekularnega dušika. V okviru ustvarjanja pogojev za zmanjševanje nastajanja dušikovih oksidov je treba najprej ustvariti redukcijsko atmosfero, ki omogoči redukcijo že nastalih oksidov, v naslednji fazi pa je treba preprečiti, da bi v plamenu prihajalo do oksidacije prostega molekularnega dušika. Hkrati je tudi treba preprečevati pojave območij v plamenu z visokimi temperaturami ter tudi v celotnem plamenu

vzdrževati tako nizke temperature, pri katerih še ne nastajajo termični dušikovi oksidi.

Taka so bila tudi izhodišča projekta rekonstrukcije kurjave na kotlih blokov 1 in 2 z vidika zmanjšanja emisije  $\text{NO}_x$ . Z vidika izboljšanja razmer obratovanja pa je bilo postavljenih še nekaj dodatnih zahtev. Želeni cilji so bili kakovostnejše in avtomatsko uravnavanje dovoda zgorevalnega zraka in hladnih obtočnih dimnih plinov, kar mora povečati zanesljivost obratovanja kotla, izboljšati izkoristek kotla, emisija  $\text{NO}_x$  pa se mora zmanjšati pri vseh obremenitvah kotla pod predpisane meje.

Da bi dosegli zastavljene cilje, je bilo treba v rekonstrukcijo vključiti gorilnike, sistem za dovod in razdelitev sekundarnega zraka in hladnih obtočnih plinov ter sistem krmiljenja temperature v mlinih.

Rezultati preizkusov na kotlih 1 in 2 so potrdili uspešnost rekonstrukcije. Emisije  $\text{NO}_x$  in CO so sedaj daleč pod dopustnima vrednostima, ki sta določeni z Odlokom mesta Ljubljane. Zaradi izboljšanja postopka kurjenja so se zmanjšale izgube v obeh kotlih. Izkoristek kotla 1 se je v povprečju izboljšal za več ko dva odstotka, prav tako je po rekonstrukciji večji tudi izkoristek kotla 2. Dosedanje obratovalne izkušnje iz kurilne sezone 2003/04 so potrdile, da se je povečala tudi zanesljivost obratovanja kotla 1.

## 6 LITERATURA

- [1] EIMV (2002) Ocena emisij snovi v zrak in rezultati meritev emisijskih koncentracij TETO Ljubljana v letu 2002, Tehnično poročilo št.: EKO 1148, *Elektroinštitut Milan Vidmar*, Ljubljana.
- [2] Kuštrin, I., J. Oman (2002) Pretoki zgorevalnega zraka kotla bloka 2 Termoelektrarne Toplarne Ljubljana; Tehnično poročilo št. 03-15/1-02/IK, UL, *Fakulteta za strojništvo*, Laboratorij za termoeenergetiko, Ljubljana.
- [3] Żelkowski, J. (1986) Kohleverbrennung, Band 8. der Fachbuchreihe Kraftwerkstechnik, *VGB-Kraftwerkstechnik*, Essen.
- [4] Warnatz, J., U. Maas, R.W. Dibble (2001), *Combustion*, 3<sup>rd</sup> Edition, *Springer-Verlag*.
- [5] Gardier, W.C. (1984) *Combustion chemistry*, *Springer-Verlag*.
- [6] Fenimore, C.P. (1979) Studies of fuel-nitrogen in rich flame gases. *Proc. Comb. Inst.* 17, 661.
- [7] Smoot, L.D. (1993) *Fundamentals of coal combustion*, *Elsevier*.
- [8] Glassman, I. (1996) *Combustion*, (third edition), *Academic Press*.
- [9] Kolb, T., P. Jansohn, W. Leuckel (1988) Reduction of NO<sub>x</sub> emission in turbulent combustion by fuel-scaling effects of mixing and stoichiometry in the reduction zone, 22<sup>th</sup> Symposium on Combustion, *The Combustion Institute*, 1193-1203.
- [10] Skorupska N M (1993) Coal specifications – impact on power station performance. *IEA Coal Research*, London.
- [11] Kuštrin, I., J. Oman (2004) Analiza razmer v prahovodnih kanalih mlinov in kanalih sekundarnega zraka kotla 1 po vgradnji novih gorilnikov, poročilo št.: 03-2/1-04/IK, UL, *Fakulteta za strojništvo*, Laboratorij za termoeenergetiko, Ljubljana.
- [12] Kuštrin, I., A. Senegačnik, J. Oman (2004) Analiza obratovanja kotla 1 po rekonstrukciji sistema za razvoj zgorevalnega zraka, poročil št.: 03-1/1-04/JO, UL, *Fakulteta za strojništvo*, Laboratorij za termoeenergetiko, Ljubljana.
- [13] Riedel, U., R. Schmidt, J. Warnatz (1992) Different levels of air dissociation chemistry and its coupling with flow models. In: Bertin J.J., Periaux J., Ballmann J. (eds), *Advances in Hypersonics - Vol. 2: Modeling Hypersonic Flows*, Birkhauser, Boston.
- [14] Uredba o emisiji snovi v zrak iz velikih kurilnih naprav (Ur.l. RS, št. 46/2002)
- [15] Uredba o emisiji snovi v zrak iz kurilnih naprav (Ur.l. RS, št. 73/94, 51/98, 105/00)
- [16] Odlok o znižanju mejnih emisijskih koncentracij za velike kurilne naprav (Ur.l. RS, št. 51/97)

Naslova avtorjev: prof.dr. Janez Oman  
dr. Igor Kuštrin  
Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana  
janez.oman@fs.uni-lj.si  
igor.kustrin@fs.uni-lj.si

Igor Bole  
Primož Gostinčar  
Termoelektrarna toplana Ljubljana  
Toplarniška ul. 19  
1000 Ljubljana

Prejeto: 15.11.2004  
Received:

Sprejeto: 24.2.2005  
Accepted:

Odperto za diskusijo: 1 leto  
Open for discussion: 1 year