

# Kontrola regulacije razmernika zraka z uporabo kisikove sonde

Glogovac B., Kolenko T., Koroušič B., Rus F.

UDK: 621.78.019.2

ASM/SLA: W27n



*Eden od učinkovitih načinov za racionalno porabo primarne energije je optimizacija regulacije razmernika zraka. Razmernik zraka je odnos med dejansko porabljeno količino zraka in teoretično potrebno količino za popolno zgorevanje goriva. Vsako odstopanje razmernika zraka od optimalne vrednosti pomeni izgubo primarne energije oziroma neopravičeno visoko specifično porabo. Vedno strožje zahteve po racionalni porabi primarne energije je možno doseči samo, če sta dovolj razvita tehnika merjenja in sistem testiranja.*

## 1. MERJENJE PRETOKA PLINA IN ZRAKA

Za računalniško kontrolo in vodenje procesa so potrebne informacije o procesu. Te informacije dobimo v obliki merilnih signalov. Pri fizikalnih veličinah, ki jih ne moremo meriti direktno, uporabljamo indirektno metode, ki bazirajo na funkcionalni matematični povezavi med veličino, ki jo želimo meriti, in veličino, ki je meritvi dostopna. V primeru merjenja količine plina in zraka v večini primerov računamo pretok iz merjene vrednosti diferenčnega tlaka  $\Delta p$  na merilnih zaslonkah po enačbi:

$$V_n = 0,39986 \cdot \alpha \cdot m \cdot D^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_n}} \cdot k_i \cdot k_p \cdot k_f \quad (1)$$

v enačbi (1) je:

D premer cevi (cm)

$\Delta p$  – diferenčni tlak na merilni zaslonki (Pa)

$$k_i = \sqrt{\frac{T_n}{T}}, \quad k_p = \sqrt{\frac{p}{p_n}}$$

$$k_f = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f}{0,804 + f} \cdot \frac{0,804}{\rho_n} - 1}}$$

$\alpha$  – pretočno število

m – razmerje presekov zaslonke in cevi

T – temperatura (K)

n – indeks za normalne pogoje ( $1,013 \cdot 10^5$  Pa, 273 K)

$V_n$  – pretok v normalnih pogojih ( $m^3/h$ )

$\rho_n$  – gostota plina ali zraka ( $kg/m^3$ )

f – vlaga v plinu ali zraku ( $kg/m^3$ )

Znano je, da se parametri, za katere je izračunana merilna zaslonka, spreminjajo in da večina meritev pretoka plina in zraka nima vrednostno izmerjene avtomatske korekcije, glede na spremembe tlaka, temperature, vlažnosti in gostote medija. Zato je potrebna dodatna kontrola razmernika zraka preko analize dimnih plinov.

V praksi se pogosto zadovoljimo z merjenjem ene ali dveh komponent ( $CO_2$ , CO ali  $O_2$ ) in iz teh vrednosti ocenjujemo pogoje zgorevanja in delovanja regulacije. Pri analizi dimnih plinov je v zadnjem času z razvojem  $ZrO_2$  kisikove sonde dosežen velik napredek. Merjenje vpl. %  $O_2$  lahko poteka brez odsesavanja vzorca plina z visoko natančnostjo in hitrim odzivom (< 1 sek).

## 2. IZRAČUN PARAMETROV ZGOREVANJA

### 2.1 Zgorevanje mazuta

Za izračun z matematičnim modelom zgorevanja je uporabljena naslednja sestava mazuta:

C = 84,00 %, H = 11,60 %, S = 0,80 %, pepel = 1,10 % in vlaga = 2,50 %.

Kurilnost mazuta, izračunana iz sestave, znaša:

Hsp = 42592,32 kJ/kg

Kisik, potreben za stehiometrično zgorevanje:

$O_n = 2,22 m^3/kg$

Zrak, potreben za stehiometrično zgorevanje:

$Z_n = 10,60 m^3/kg$

Minimalna količina dimnih plinov ( $n = 1,0$ ):

$V_n = 11,30 m^3/kg$

Odvisnost vol. %  $O_2$  v dimnih plinih od razmernika zraka je prikazana na sl. 1

### 2.2 Zgorevanje zemeljskega plina

Za izračun z matematičnim modelom zgorevanja je uporabljena naslednja sestava zemeljskega plina:

$CH_4 = 93,54$  %,  $C_2H_6 = 2,82$  %,

$C_3H_8 = 0,76$  %,  $C_4H_{10} = 0,25$  %,

$C_5H_{12} = 0,07$  %,  $C_6H_{14} = 0,05$  %,

$N_2 = 2,21$  %,  $CO_2 = 0,30$  %.

Iz dane sestave izračunana kurilnost plina znaša:

Hsp = 36499,62 kJ/m<sup>3</sup> (Vn).

Kisik, potreben za stehiometrično zgorevanje:

$O_n = 2,03 m^3/m^3$

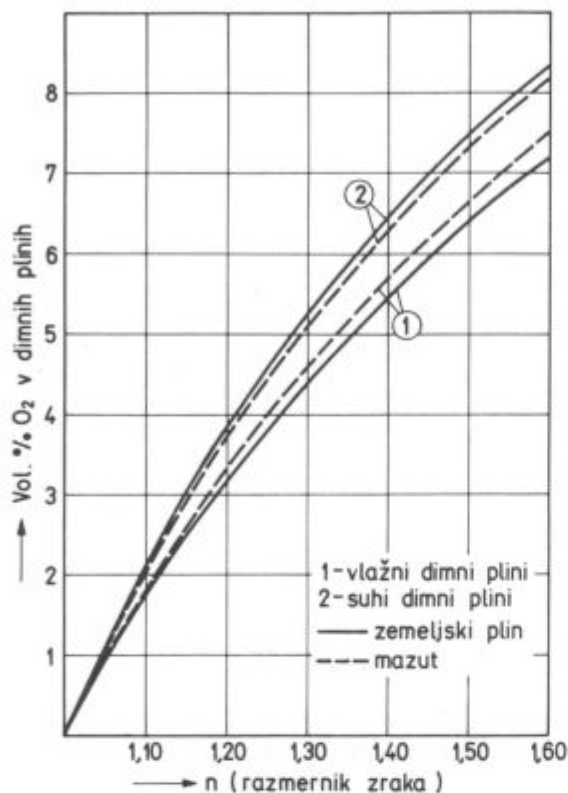
Zrak, potreben za stehiometrično zgorevanje:

$Z_n = 9,73 m^3/m^3$

Minimalna količina dimnih plinov pri stehiometričnem zgorevanju:

$V_n = 10,89 m^3/m^3$

Odvisnost vol. %  $O_2$  v dimnih plinih od razmernika zraka je prikazana na sl. 1



Slika 1  
Odpisnost vol. % O<sub>2</sub> v dimnih plinih od razmernika zraka za podane sestave zemeljskega plina in mazuta  
Fig. 1  
Relationship between the volum. % of oxygen in flue gases and the air ratio for given compositions of natural gas and heavy fuel oil.

### 3. OPIS METODE MERJENJA KISIKA V DIMNIH PLINIH

Pri visokih temperaturah v cirkonovem oksidu, ki je stabiliziran s CaO, zaradi vrzeli v kisikovi podmreži nastopa velika mobilnost ionov. Pod vplivom temperature se pozicije praznih mest lahko spremenijo od ene do druge točke mreže, kljub temu da statistično ostajajo v istem razmerju. Če ima trdni elektrolit sorazmerno majhno debelino (reda velikosti nekaj mm) in če je obkrožen z dvema plinskima medijema različnih koncentracij kisika, se zasedba prostega mesta na strani z večjo koncentracijo kisika kompenzira z izstopanjem kisika na nasprotni strani (sl. 2). Tako nastopa tok ionov kisika. Če na obeh straneh trdnega elektrolita uporabimo dve elektrodi, dobimo diferenco potenciala. Na sl. 2 je prikazana shema kisikove sonde. Cev iz stabiliziranega ZrO<sub>2</sub> oksida ima dve elektrodi iz porozne platine. Zunanja elektroda je v kontaktu s plinom, ko ga kontroliramo skozi odprtino v zaščitni cevi. Notranja elektroda je v kontaktu z zrakom, ki ima 20,9 % O<sub>2</sub>. Med elektrodami nastane potencial:

$$E = \frac{RT}{zF} \ln \left( \frac{p_{O_2}'}{p_{O_2}''} \right) \quad (2)$$

V enačbi (2) pomenijo:

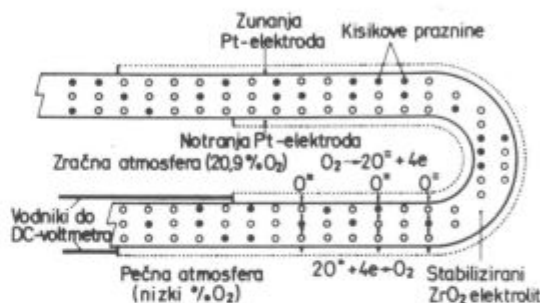
- E — elektromotorska napetost (V)
- F — Faradayeva konstanta (J/mol K)

- R — plinska konstanta (J/mol K)
- T — absolutna temperatura (K)
- z — število elektronov (O<sub>2</sub> + 4e = 2 O<sup>2-</sup>, z = 4)
- p<sub>O<sub>2</sub>'</sub> — parcialni tlak kisika referenčne elektrode (za zrak p<sub>O<sub>2</sub>'</sub> = 0,209 bar)
- p<sub>O<sub>2</sub>''</sub> — parcialni tlak kisika, ki ga merimo (bar)

Kot referenčni plin se pri meritvah kisika v dimnih plinih uporablja zrak. Tako dobimo odvisnost med E, T in p<sub>O<sub>2</sub>'</sub>:

$$E = 0,0496 \cdot T \cdot \log \left( \frac{0,209}{p_{O_2}'} \right) \quad (3)$$

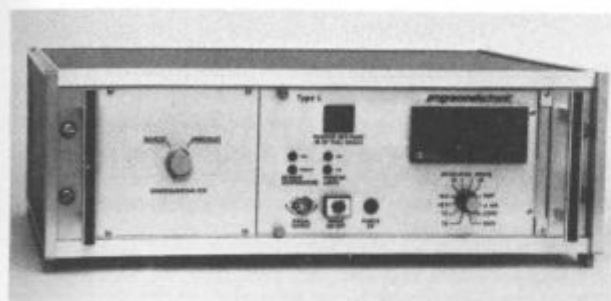
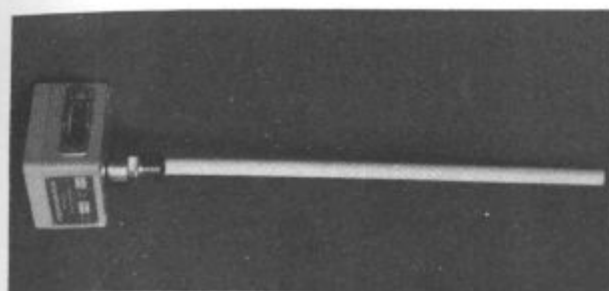
$$\log p_{O_2}' = -0,679 - 20,167 \frac{E}{T} \quad (4)$$



Slika 2  
Shema kisikove sonde  
Fig. 2  
Scheme of oxygen probe.

### 4. REZULTATI MERITEV

Meritve smo izvajali z visokotemperaturno plinsko kisikovo sondo, firme »Programmelectronic«, ki je prikazana na sl. 3. Sonda se vgradi direktno v peč, tako da je merilna celica iz stabiliziranega ZrO<sub>2</sub> oksida v stalnem kontaktu z atmosfero peči in ni potrebno odsesavanje vzorca plina. Tako sonda meri vol. % O<sub>2</sub> v vlažnih dimnih plinih pri dejanskih pogojih v peči. Skupaj z merilno celico je v sondo vgrajen termoelement PtRh-Pt, ki v povezavi z mikroprocesorjem omogoča izračun trenutne vrednosti kisika v dimnih plinih po enačbi 4. Slaba stran sonde je občutljivost na termične šoke in zahteve po dobri izolaciji priključne glave na merilnem mestu v steni peči. Zaradi visoke točnosti in hitrega odziva izmerjene vrednosti se je sonda pokazala zelo uporabna za kontrolo delovanja regulacije. Primer uporabe sonde v ogrevni coni valjarniške peči z dviznimi mizami pri storilnosti peči ca. 18 t/h kaže sl. 4. Na sliki so prikazane registrirane vrednosti temperature sonde v K in vol. % O<sub>2</sub> v vlažnih dimnih plinih. Iz rezultatov meritev je razvidno, da je v tem primeru pri spreminjanju toplotne obremenitve cone (Q) regulacija deluje nestabilno. V kratkih časovnih intervalih se pri spremembah porabe plina poruši razmerje zrak/plin, kar ima lahko številne negativne posledice. Z izračuni in rezultati meritev smo ugotovili, da je v tem primeru glede na tlačne razmere potrebno uskladiti pretočne karakteristike loput v zračnem in plinskem vodu. Na sl. 5 je prikazan primer delovanja regulacije razmernika zraka v ogrevni coni podobne peči, ko so dimenzije loput in pretočne karakteristike glede na tlačne razmere medijev dobro izbrane. Nestabilnosti v sistemu regulacije ni. V nobenem primeru se ne pojavlja reduktivna atmosfera in dolg plamen,

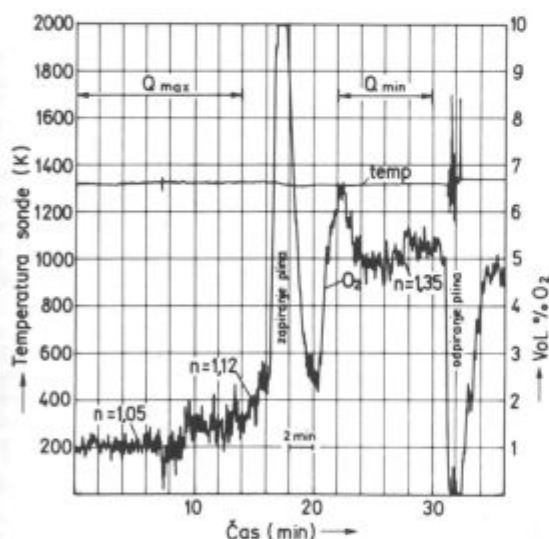


Slika 3

Kisikova sonda za meritve v temperaturnem področju 900–1500 °C

Fig. 3

Oxygen probe for measurements in the 900 to 1500 °C interval.



Slika 4

Rezultati meritev vol. % O<sub>2</sub> v ogrevni coni pri ogrevanju z zemeljskim plinom

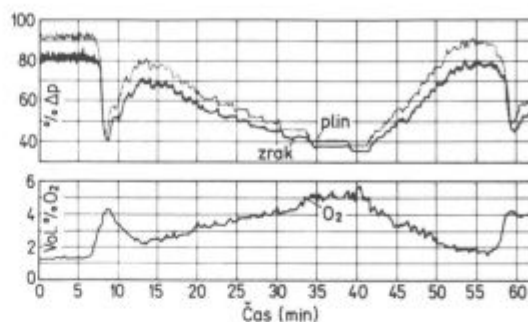
Fig. 4

Results of measurements of volum. % of oxygen in the heating zone at heating with natural gas.

tako da pri tej stabilni regulaciji ni nevarnosti za poškodbo sonde. Problemi pri regulaciji razmernika zraka se pojavljajo pri starih pečeh z neurejeno regulacijo tlaka v peči, pri zmanjšani toplotni obremenitvi cone, ko vsebnost kisika v dimnih plinih narašča zaradi podtlaka v peči in nasesavanja sekundarnega zraka. Z ureditvijo funkcionalnosti in pretočnih karakteristik zasnov oziroma loput na strani dimnih plinov je potrebno z avto-

matsko regulacijo zagotoviti v nivoju vložka vsaj minimalni nadtlak v peči 0,05 mbar.

Razen drugih številnih prednosti regulacije vleka dimnih plinov je to tudi pogoj za uspešno uporabo kisikove sonde pri kontroli delovanja regulacije razmernika zraka.



Slika 5

Rezultati meritev vol. % O<sub>2</sub> v ogrevni coni in Δp na merilnih zaslonkah (20 % ... O Pa, 100 % ... 980,67 Pa)

Fig. 5

Results of measurements of volum. % of oxygen in the heating zone, and Δp on measuring orifices (20 % ... O Pa, 100 % ... 980,67 Pa).

## 5. ZAKLJUČKI

Z matematičnim modelom zgorevanja in z rezultati meritev vol. % O<sub>2</sub> v vlažnih dimnih plinih z visokotemperaturno plinsko kisikovo sondo na bazi stabiliziranega cirkonovega oksida je analizirano delovanje regulacije razmernika zraka na valjarniških ogrevnih pečeh. Pokazalo se je, da kontinuirna meritev vsebnosti kisika v dimnih plinih s hitrim odzivom pomeni velik napredek v optimizaciji regulacije razmernika zraka. Pri maksimalni toplotni obremenitvi peči, ko je v peči nadtlak, lahko na podlagi meritev vsebnosti kisika v dimnih plinih in rezultatov izračuna parametrov zgorevanja z matematičnim modelom določimo dejanski razmernik zraka na gorilniku in kontroliramo natančnost meritev pretokov plina in zraka. Rezultati meritev kažejo, da je v tej fazi ogrevanja zgorevanje zemeljskega plina oziroma mešanice zemeljski plin-zrak potekalo z razmernikom zraka, ki je zelo blizu optimalni vrednosti glede na porabo energije. V večini primerov pri starih pečeh nastopajo problemi v regulaciji razmernika zraka pri minimalni toplotni obremenitvi peči. Zaradi podtlaka v peči pride do nasesavanja sekundarnega zraka in sonda registrira skupni kisik, ki je večji od realnega. Za pravilno interpretacijo rezultatov meritev s kisikovo sondo, pri kontroli in korekciji regulacije razmernika zraka je potrebno z avtomatsko regulacijo vleka dimnih plinov zagotoviti vsaj minimalni nadtlak v peči v vseh fazah ogrevanja vložka.

## Literatura

1. Koroušič B., Glogovac B.: Kontrola plinske atmosfere z direktnim merjenjem parcialnega tlaka kisika s kisikovo sondo, Rudarsko metalurški zbornik, vol. 26, št. 1 (1979), 49–58
2. Kolenko T., Glogovac B., Strah J., Miklavc M.: Analiza ogrevanja Ofag peči, kurjene s plinskim gorivom, Poročilo Met. inštituta v Ljubljani, 1983

3. Woelk G., Uetz G.: Führung von Wärmeanlagen mit Prozessrechnern Gas wärme international 33 (1984) Heft 6/7, 322—326
4. Glogovac B., Koroušič B., Jagodic A., Kolenko T. Rus F., Šranc J., Logar V., Veber Z.: Aplikacija plinske kisikove sonde na kontrolo procesa zgorevanja v pečeh, Poročilo Met. inštituta v Ljubljani, 1983
5. Glogovac B., Hribar K., Kolenko T., Finžgar D., Sekloča P., Tolar R.: Možnosti izboljšanja regulacije zgorevanja na podajalni peči, Poročilo Met. inštituta v Ljubljani, 1984

### ZUSAMMENFASSUNG

Mit der Einführung der Hochtemperatursauerstoffmesssonde auf der Basis von Stabilisiertem Zirkonoxid ( $ZrO_2$ ) in das System der Kontrolle der wärmetechnischen Prozesse ist ein grosser Fortschritt erreicht worden. Die Möglichkeit der kontinuierlichen Messung des Sauerstoffvolumenanteiles in feuchten Abgasen ohne Absaugung von Gasproben und mit der Erwidern in realer Zeit macht eine gute Kontrolle der

Wirkung der Regelung des Luftverhältnisses möglich. Die Messungen haben sehr nützliche Informationen über die Wirkung des Regelungssystems bei verschiedenen Phasen des Erwärmungsprozesses ergeben. Bei niedrigen Wärmebeanspruchungen des Ofens hat sich eine Optimierung der Wirkung der automatischen Ofenraum- Druckregelung als nötig erwiesen.

### SUMMARY

Introduction of high-temperature oxygen probe with stabilized zirconia into the system of controlling thermal processes represents a great step forward. Availability of continuous measurements of volume percentage of oxygen in wet flue gases without sucking the gas samples and with in the response in real time enables the quality control of air-ratio re-

gulation. The measurements gave useful informations on the operation of the regulation system in various phases of heating. At low thermal loads of the furnace a need appeared to optimize the operation of automatic regulation of pressure in the furnace.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С введением высокотемпературного кислородного зонда на базе стабилизированного циркониевого окиса ( $ZrO_2$ ) в систем контроллі тепловых технических процессов достигнут значительный прогресс.

Имеющие в распоряжении непрерывные объёмные измерения %  $O_2$  в влажных дымовых газах без отсасывания образца газа и при возвращении в реальном времени позво-

ляют выполнить качественную проверку действия соотношения воздуха. Измерения дали полезные информации о действии система регулировки в различных фазах нагрева.

При низких тепловых нагрузках печи оказалась необходимость оптимизации действия автоматической регулировки давления печи.