

# KURS ZA ENERGETSKI AUDIT 3.2

Izvori energije: KOTLOVI

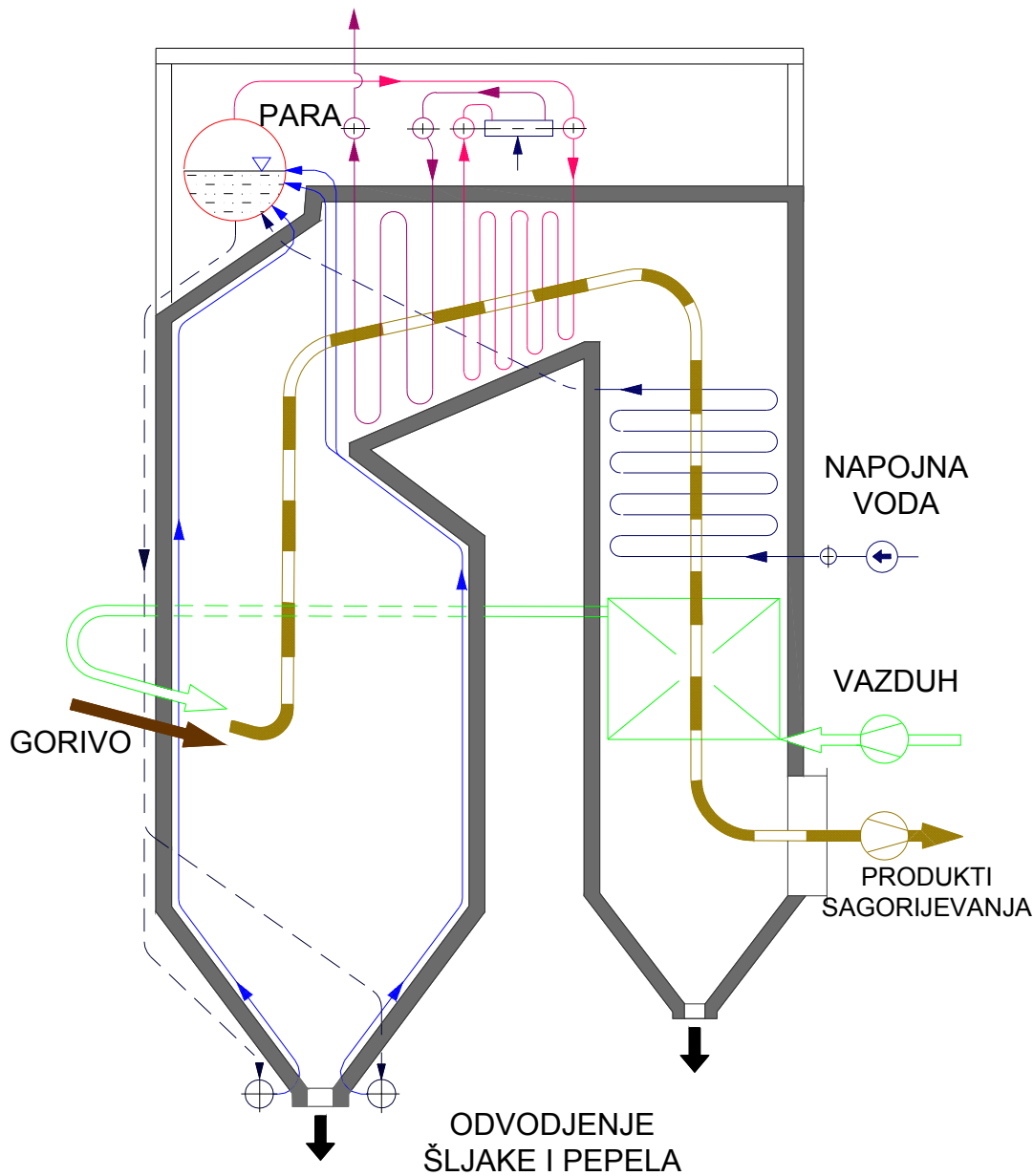
Pripremio: Dr Vladan Ivanović

# UVOD

- **Parni kotao predstavlja uređaj u kome se toplotna energija dobijena sagorijevanjem fosilnih goriva, transformiše u toplotnu energiju produkata sagorijevanja visoke temperature. Ona se posredstvom grejnih površina, predaje radnom fluidu za njegovo zagrijavanje, isparavanje i pregrijavanje na pritisku višem od atmosferskog.**
- **Kotlovsko postrojenje pretstavlja složen sklop raznih mašina i uređaja priključenih uz ložište i grejne površine parnog kotla (rešetke, mlinovi za ugalj, dozatori dodavači, ventilatori za vazduh i dimne gasove i sl.).**
- **Kao radni fluid isključivo se primenjuje voda, tako da se kao finalni produkt dobija suvozasićena ili pregrijana para.**
- **Za proizvodnju toplotne energije za grijanje koriste se i kotlovi koji proizvode zagrijanu vodu, a u zavisnosti od temperature vode na izlazu iz kotla postoje toplovodni i vrelovodni kotlovi.**

# PRINCIP RADA PARNOG KOTLA

- Tokovi svih materija koje učestvuju u proizvodnji pare u kotlovima nazivaju se traktovima. Razlikujemo sledeće traktove:
  - trakt goriva,
  - trakt produkata sagorijevanja,
  - trakt vode i pare,
  - trakt vazduha i
  - trakt odvođenja šljake i pepela.
- Djelovi pojedinih traktova zavise od vrste goriva, sistema sagorijevanja i organizacije strujanja vode pri njenom isparavanju.



Šema tokova predajnika i prijemnika toplote parnog kotla sa prirodnom cirkulacijom za sagorijevanje uglja u letu

- trakt goriva
- trakt produkata sagorijevanja
- trakt vode i pare
- trakt vazduha
- trakt odvođenja šljake i pepela

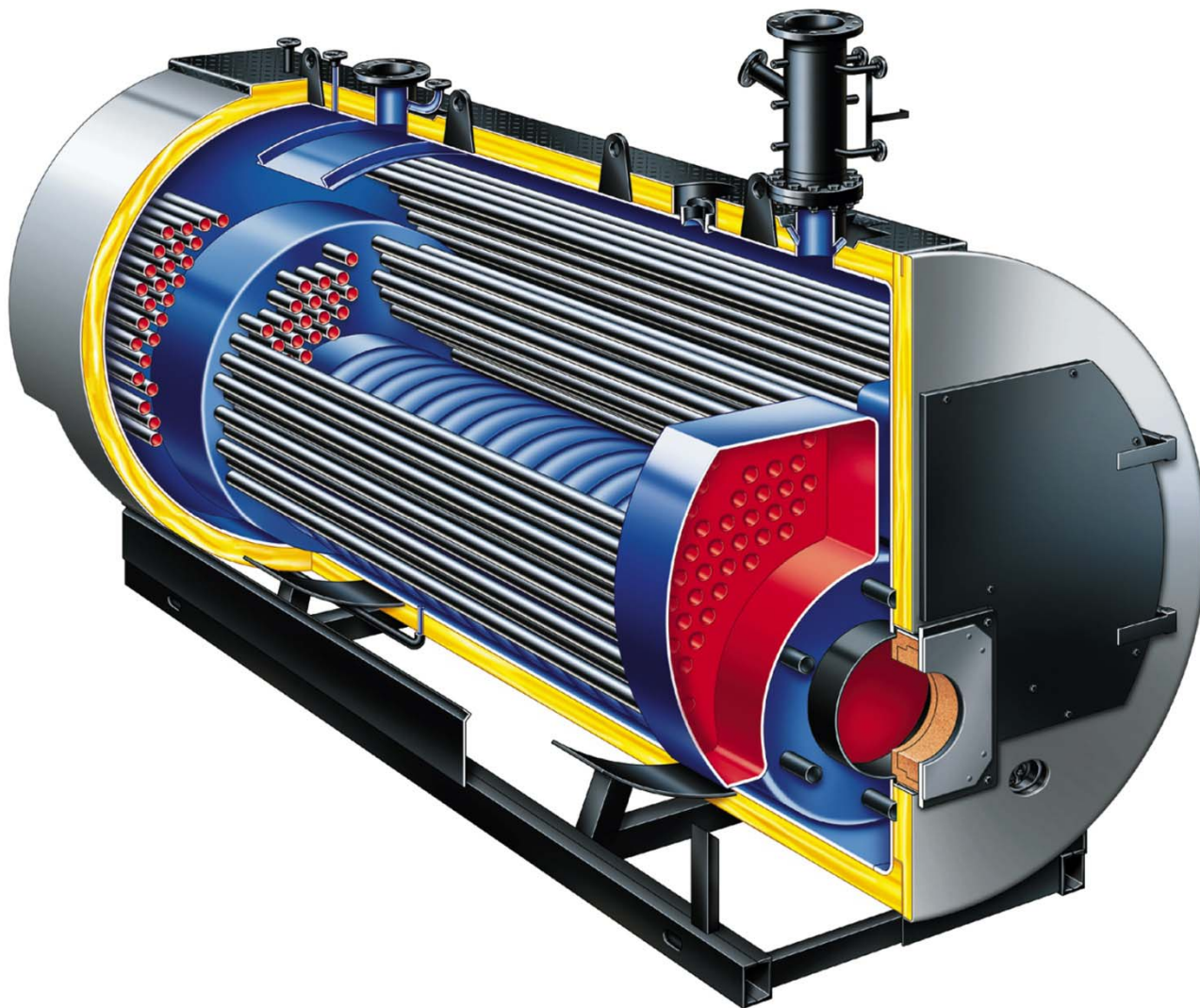
### KONSTRUKCIJA KOTLA

- kotlovski ozid sa izolacijom i oplatom
- fina armatura
- gruba armatura
- kotlovski skelet (konstrukcija koja nosi grejne površine, doboš, ozid i izolaciju)

## DEFINICIJE OSNOVNIH POJMOVA

- Najveća količina pare koju kotao može da proizvodi neograničeno vreme je nominalna produkcija ili nominalni kapacitet kotla i predstavlja maseni protok pare na izlazu iz parnog kotla  $D$  [kg/s].
- Najmanja produkcija pri kojoj kotao proizvodi paru projektovanih parametara je tehnički minimum kotla  $D_t$  [kg/s].
- Stanje vodene pare na izlazu iz kotla definisano je pritiskom pregrijane pare  $p_s$  [MPa] i temperaturom pregrijane pare  $t_s$  [°C].
- Stanje napojne vode na ulazu u kotao određeno je pritiskom napojne vode  $p_{nv}$  [MPa] i temperaturom napojne vode  $t_{nv}$  [°C].
- Pritisak na kome se vrši isparavanje vode u isparivaču sa prirodnom ili prinudnom cirkulacijom je radni pritisak  $p_k$  [MPa]. Radnom pritisku odgovara temperatura ključanja  $t_k$  [°C] (kriva napona).

*Kotlovi sa velikom vodenom zapreminom*



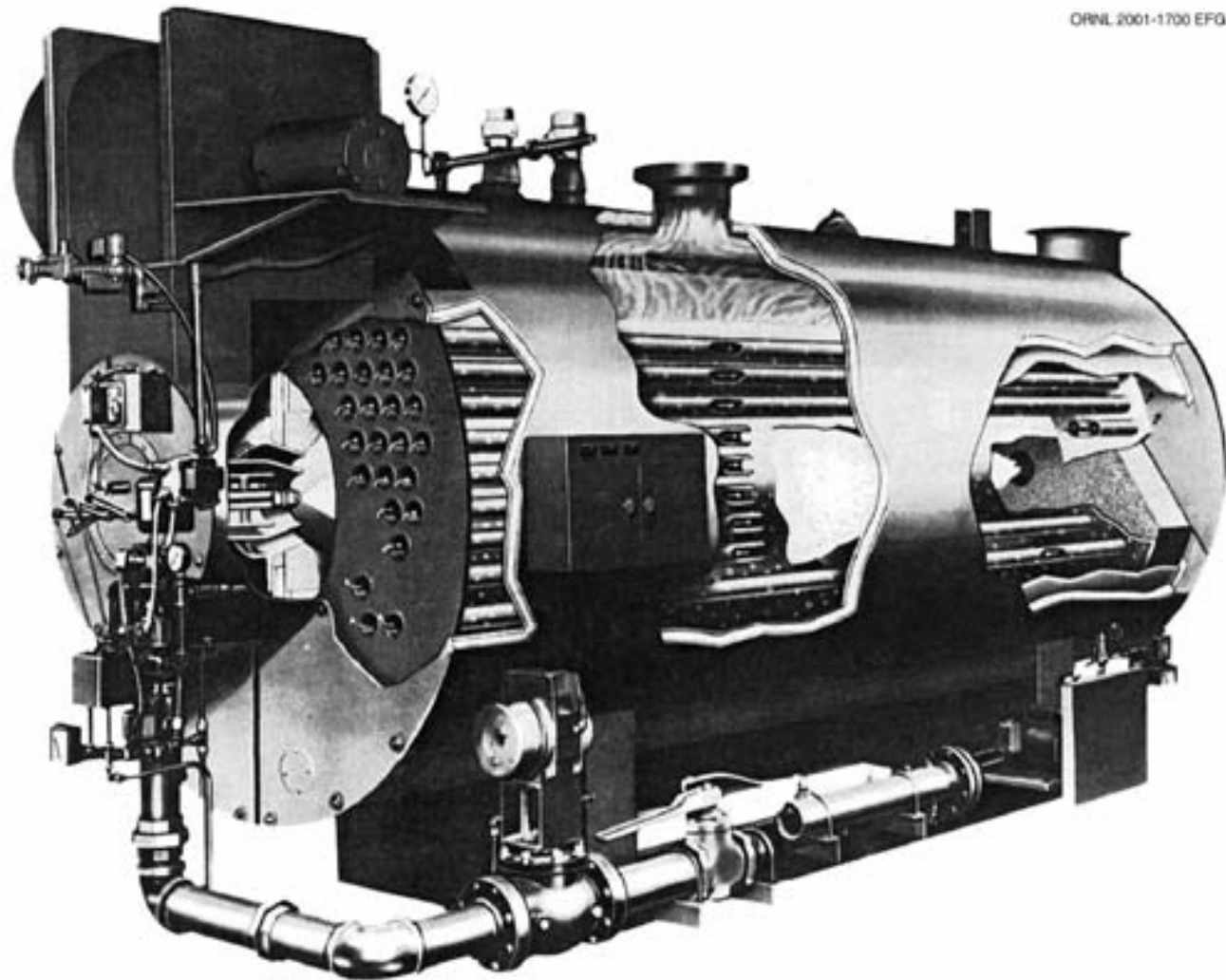
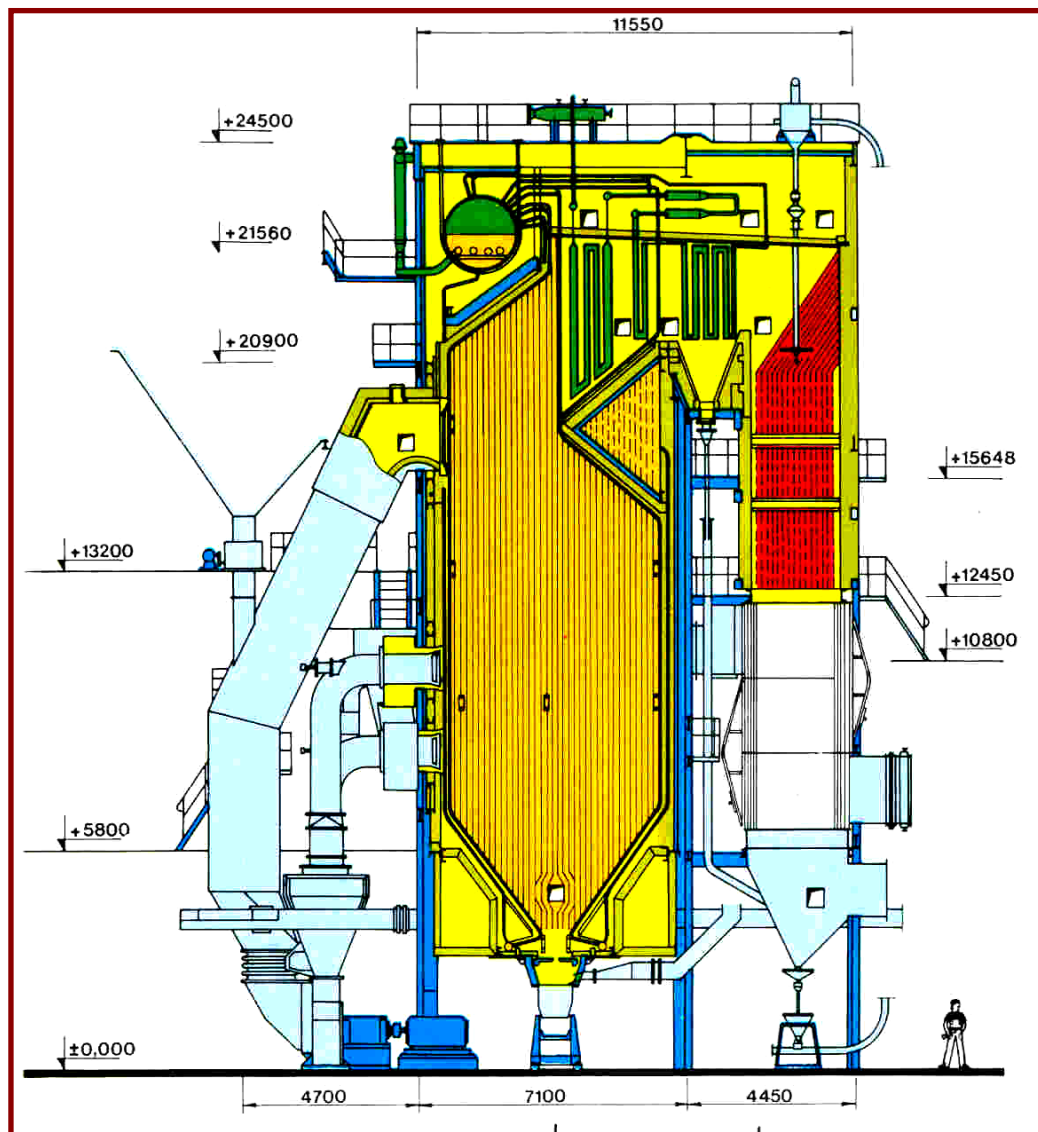


Figure 2. Firetube Boiler<sup>4</sup>



# *Kotlovi sa malom vodenom zapreminom*





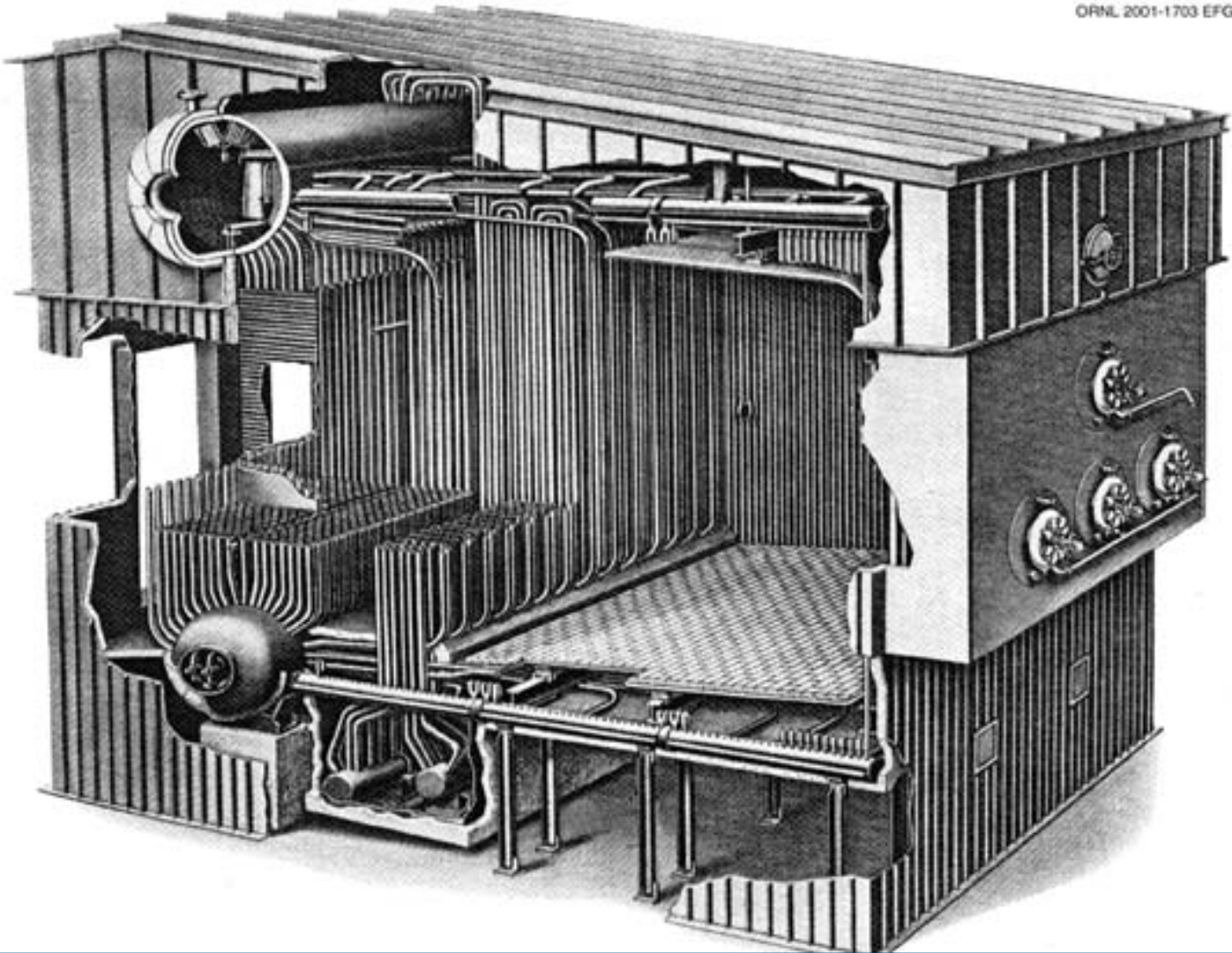
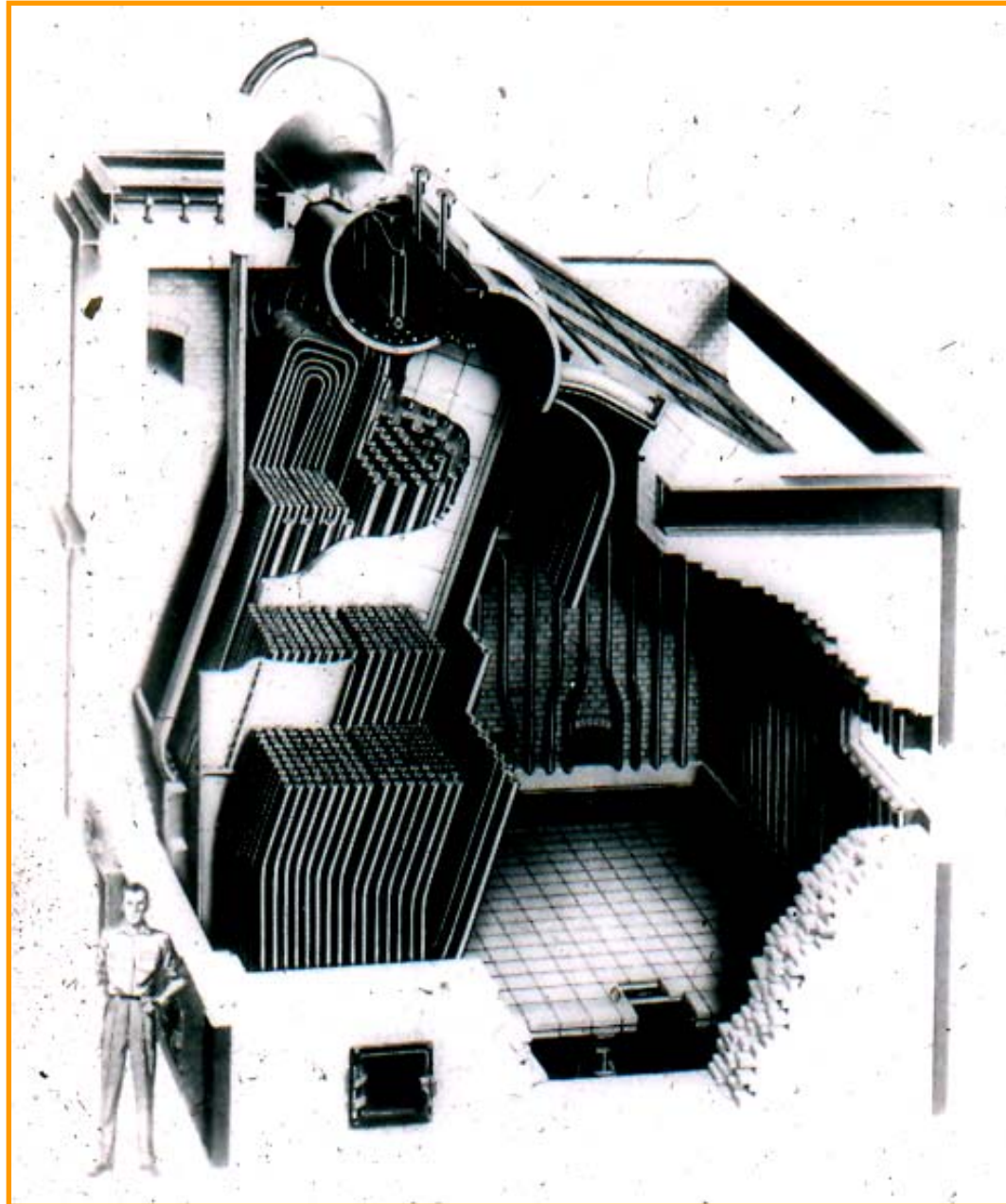
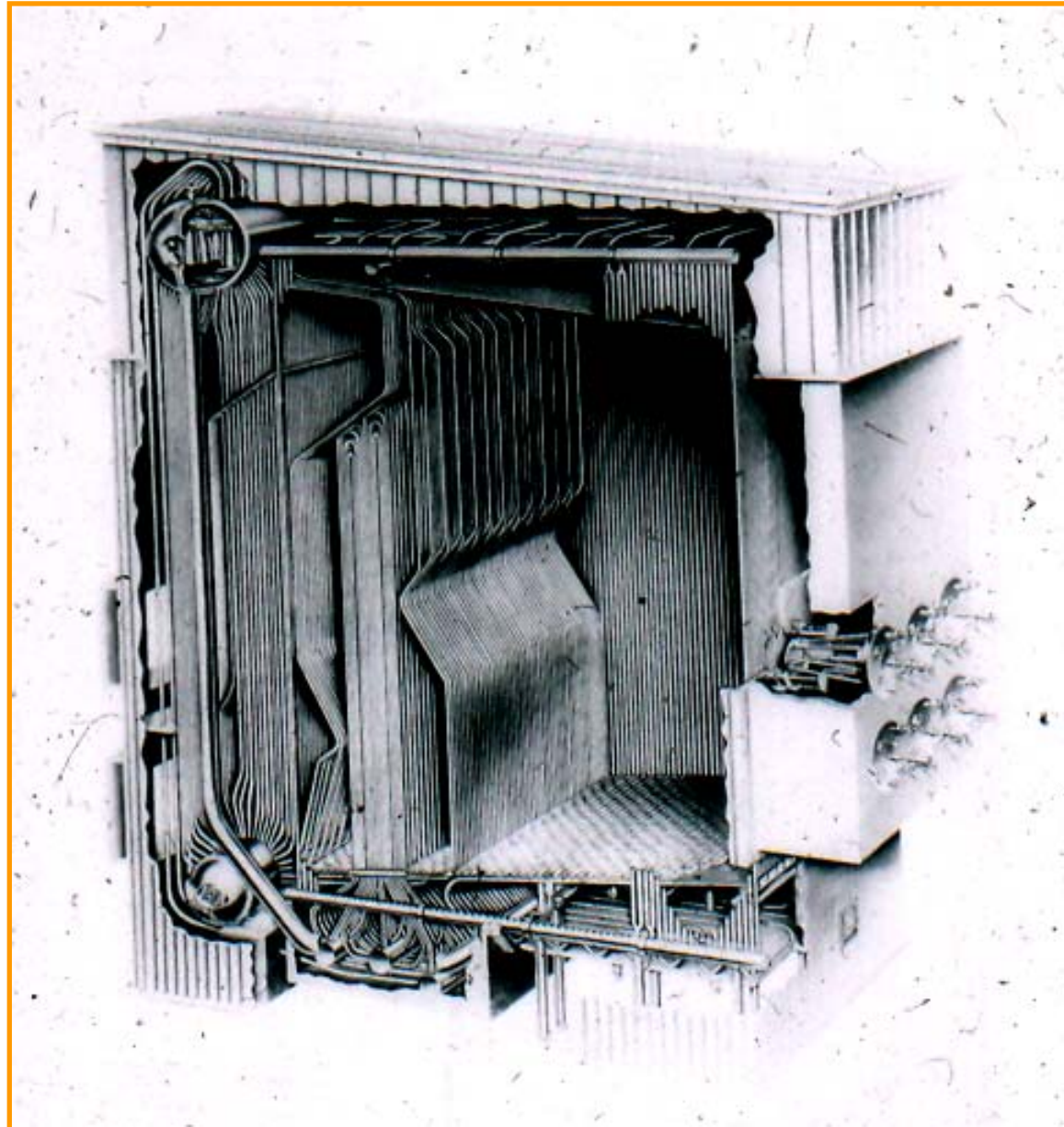


Figure 3. Watertube Boiler<sup>6</sup>

## *Fotografija kotla Integral*



## *Fotografija kotla Integral*



# TOPLOTNI BILANS PARNOG KOTLA

- U stacionarnim pogonskim uslovima mora postojati ravnoteža dovedene i odvedene energije (toplote) parnog kotla. U toplotni bilans ulaze samo tokovi koji presijecaju granice parnog kotla (sistema) i zato granice moraju da budu jasno definisane. Kako će biti definisane zavisi od toga šta se analizom želi obuhvatiti. Ono što se događa unutar granica parnog kotla nije od interesa za računanje toplotnog bilansa.

$$Q_{dovedena} = Q_{odvedena}$$

# TOPLOTNI BILANS PARNOG KOTLA

- Toplotni bilans predstavlja jednakost količine toplote unete u kotao i zbira iskorišćene i izgubljene toplote

$$Q_r^r = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, [kJ/kg]$$

- Količina toplote koja se dovede u parni kotao po jedinici mase čvrstog ili tečnog goriva naziva se raspoloživa toplota radnog goriva i iznosi

$$Q_r^r = H_d^r + Q_{vv} + Q_G + Q_p, [kJ/kg]$$

$H_d^r$  [kJ/kg] - donja toplotna moć radne mase goriva,

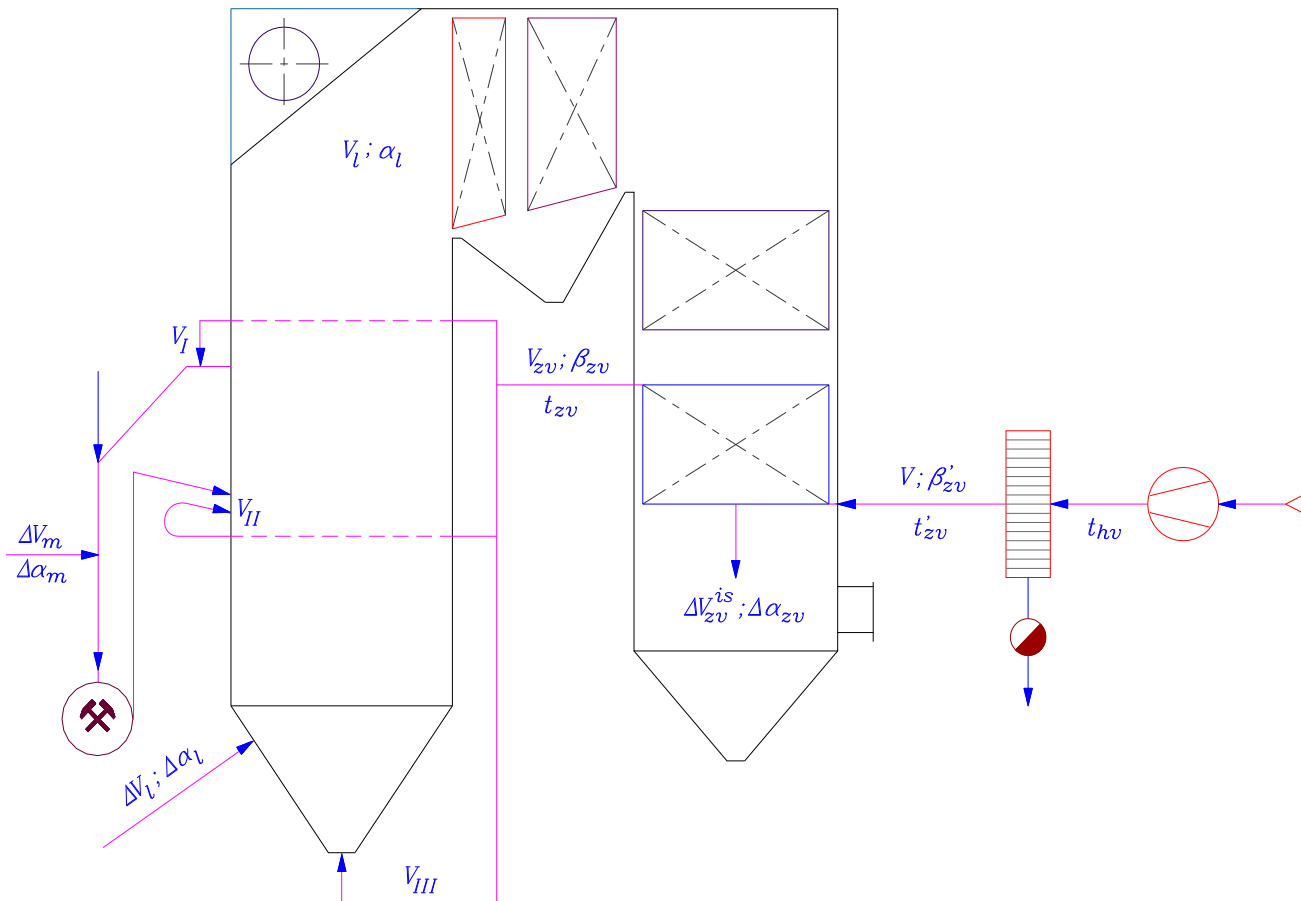
$Q_{vv}$  [kJ/kg] - količina toplote unijeta predgrijanim vazduhom,

$Q_G$  [kJ/kg] - fizička toplota radnog goriva,

$Q_p$  [kJ/kg] - količina toplote unijeta u kotao parom za raspršivanje tečnog goriva.



- Pri određivanju količine toplote koja se unosi u parni kotao potrebno je poznavati materijalni bilans vazduha u parnom kotlu. Materijalni bilans vazduha u parnom kotlu prikazan je za parni kotao sa sagorijevanjem u letu, kod koga se mljevenje i sušenje vrši u mlinovima, koji ima rešetku za dogorijevanje i gdje se vazduh predgrijava parom niskog pritiska.



- $t_{hv}$  – okolni vazduh
- $t'_{zv}$  – predgrijan vazduh  
 $t'_{zv} \approx 50 \div 120^\circ$
- $t_{zv}$  – zagrijan vazduh
- $V_I$  – primarni vazduh
- $V_{II}$  – sekundarni vazduh
- $V_{III}$  – tercijarni vazduh
- $\Delta V_I$  – priraštaj vazduha u ložištu
- $\Delta V_m$  – priraštaj vazduha u mlinu
- $\Delta V_{zv}^{is}$  – isticanje vazduha iz zagrijača

**Potrebno je obezbjediti i vazduh za rad sa potpurnim i potpornim tečnim gorivom, kao i za hlađenje gorionika.**

- Pri radu kotla potrebno je na izlazu iz ložišta pri određenom režimu održavati određenu vrijednost koeficijenta viška vazduha kojoj odgovara količina vazduha  $V_I$ . Da bi se taj koeficijent viška vazduha ostvario, treba ventilatorom dovoditi

$$V = V_I - \Delta V_I - \Delta V_m + \Delta V_{zv}^{is}, \quad [m^3/kg]$$

Ako se jednačina podijeli sa teorijskom zapreminom vazduha  $V^o$  slijedi

$$\frac{V}{V^o} = \frac{V_I}{V^o} - \frac{\Delta V_I}{V^o} - \frac{\Delta V_m}{V^o} + \frac{\Delta V_{zv}^{is}}{V^o} \quad \text{odnosno} \quad \beta'_{zv} = \alpha_I - \Delta\alpha_I - \Delta\alpha_m + \Delta\alpha_{zv}^{is}$$

$$\beta'_{zv} = \frac{V}{V^o} \quad - \text{odnos zapremine vazduha na ulazu u zagrijač i teorijske zapremine vaduha,}$$

$$\alpha_I = \frac{V_I}{V^o} \quad - \text{koeficijent viška vazduha na kraju ložišta,}$$

$$\Delta\alpha_I = \frac{\Delta V_I}{V^o} \quad - \text{koeficijent prisisa vazduha u ložište,}$$

$$\Delta\alpha_m = \frac{\Delta V_m}{V^o} \quad - \text{koeficijent prisisa vazduha u postrojenje za pripremu ugljenog praha i}$$

$$\Delta\alpha_{zv}^{is} = \frac{\Delta V_{zv}^{is}}{V^o} \quad - \text{koeficijent isticanja vazduha iz zagrijača u gasni trakt kotla.}$$



- Odnos zapremine vazduha na izlazu iz zagrijača i teorijske zapremine

$$\beta_{zv} = \alpha_l - \Delta\alpha_l - \Delta\alpha_m$$

- Količina toplote koja se u parni kotao unosi vazduhom predgrijanim stranim izvorom toplote iznosi

$$Q_{vv} = I'_{zv} - I_{hv} = c'_{pzv} t'_{zv} V - c_{phv} t_{hv} V = \frac{V}{V^o} (c'_{pzv} t'_{zv} V^o - c_{phv} t_{hv} V^o), [kJ/kg]$$

$$Q_{vv} = \beta'_{zv} [(I'_{zv})^o - I_{hv}^o], [kJ/kg]$$

- Fizička toplota radnog goriva predstavlja toplotu koja se u ložište parnog kotla unosi tako što je gorivo na temperaturi višoj od 0 °C i određuje se po obrascu

$$Q_G = c_G t_G, [kJ / kg]$$

Pri sagorijevanju čvrstih goriva ova količina toplote je mala. Usvaja se da je temperatura goriva jednaka temperaturi okoline ( $t_G = t_{hv} = 20$  °C). Teško tečno gorivo (mazut) mora se prije dovođenja u kotao zagrijevati da bi mu se smanjila viskoznost i to, u zavisnosti od vrste, do temperature  $t_G = 90 - 130$  °C.

- Količina toplote koja se u kotao unosi parom za raspršivanje je

$$Q_p = G_p(i_p - r), [kJ/kg]$$

$G_p$	[kg/kg]	-	potrošnja pare po kilogramu goriva,
$i_p$	[kJ/kg]	-	entalpija pare za raspršivanje i
$r$	[kJ/kg]	-	toplota isparavanja vode pri normalnim uslovima.

Ovaj član jednačine toplotnog bilansa postoji samo kod kotlova za tečno gorivo koji imaju gorionike sa raspršivanjem pomoću vodene pare.

- Na desnoj strani jednačine toplotnog bilansa su

$$Q_r^r = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, [kJ/kg]$$

$Q_1$  [kJ/kg] - toplota iskorišćena u parnom kotlu,

$Q_2$  [kJ/kg] - gubitak toplote sa izlaznim dimnim gasovima,

$Q_3$  [kJ/kg] - gubitak toplote usled hemijske nepotpunosti sagorijevanja,

$Q_4$  [kJ/kg] - gubitak toplote usled mehaničke nepotpunosti sagorijevanja,

$Q_5$  [kJ/kg] - gubitak toplote usled spoljašnjeg rashlađivanja i

$Q_6$  [kJ/kg] - gubitak toplote sa šljakom koja se odvodi iz ložišta parnog kotla.

- Ako se jednačina toplotnog bilansa podijeli sa  $Q_r^r$  i pomnoži sa 100

$$\frac{Q_1}{Q_r^r} 100 + \frac{Q_2}{Q_r^r} 100 + \frac{Q_3}{Q_r^r} 100 + \frac{Q_4}{Q_r^r} 100 + \frac{Q_5}{Q_r^r} 100 + \frac{Q_6}{Q_r^r} 100 = 100, [%]$$

$$\eta_k + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100, [%]$$

Prvi član je odnos iskorišćene i unijete toplote, što predstavlja bruto stepen korisnosti kotla, dok su ostali članovi udjeli pojedinih gubitaka u unijetoj toploti.

- Bruto stepen korisnosti određen indirektnom metodom, odnosno određivanjem gubitaka parnog kotla je

$$\eta_k = 100 - \sum_{i=2}^6 q_i, [\%]$$

- Za ostvarivanje procesa u parnom kotlu troši se energija za pogon pomoćnih uređaja koji služe za pripremu goriva, transport vazduha i dimnih gasova i ova potrošnja predstavlja sopstvenu potrošnju parnog kotla. Ako se unijetoj toploti doda sopstvena potrošnja dobija se neto stepen korisnosti parnog kotla koji može da bude znatno manji od bruto stepena korisnosti.

$$\eta_{kn} = \frac{Q_1}{Q_r^r + Q_{sp}} 100, [\%]$$

Pri proračunu parnog kotla koristi se bruto stepen korisnosti.

- U najopštijem slučaju iskorišćena količina toplote po kilogramu goriva je

$$Q_1 = \frac{D(i_s - i_{nv}) + D_r(i_{rs} - i_r) + mD(i' - i_{nv})}{B_G} 100, [kJ/kg]$$

- Stepena korisnosti parnog kotla određen direktnom metodom je.

$$\eta_k = \frac{Q_1}{Q_r^r} 100 = \frac{D(i_s - i_{nv}) + D_r(i_{rs} - i_r) + mD(i' - i_{nv})}{B_G Q_r^r} 100 \quad [\%]$$

- Ukoliko se stepen korisnosti odredi indirektnom metodom, potrošnja goriva parnog kotla iznosi

$$B_G = \frac{D(i_s - i_{nv}) + D_r(i_{rs} - i_r) + mD(i' - i_{nv})}{\eta_k Q_r^r} \quad [\text{kg/s}]$$

Određivanje potrošnje goriva predstavlja cilj postavljanja toplotnog bilansa parnog kotla pri termičkom proračunu.

- Gubitak usled mehaničke nepotpunosti sagorijevanja ( $q_4$ ) nastaje zbog toga što dio goriva unijetog u ložište parnog kotla ne učestvuje potpuno u procesu sagorijevanja. Nesagorjelo gorivo može da napusti ložište
  - propadanjem kroz rešetku,
  - sa šljakom i pepelom koji se udaljavaju iz kotla i
  - sa letećim pepelom.

- Pepeo nastao sagorijevanjem goriva dovedenog u ložište odvodi se iz kotla u vidu propada, šljake i letećeg pepela

$$A_{pr}^r + A_{\check{s}}^r + A_{lp}^r = A^r$$

$$\frac{A_{pr}^r}{A^r} + \frac{A_{\check{s}}^r}{A^r} + \frac{A_{lp}^r}{A^r} = a_{pr} + a_{\check{s}} + a_{lp} = 1$$

gdje su  $a_{pr}$ ,  $a_{\check{s}}$  i  $a_{lp}$  udjeli pepela u propadu, šljaci i letećem pepelu

Pri određivanju gubitka, smatra se da su volatili iz nesagorjelog goriva isparili u ložištu i da sagorljivo u propadu, šljaci i letećem pepelu predstavlja koks, pa gubitak usled mehaničke nepotpunosti sagorijevanja iznosi

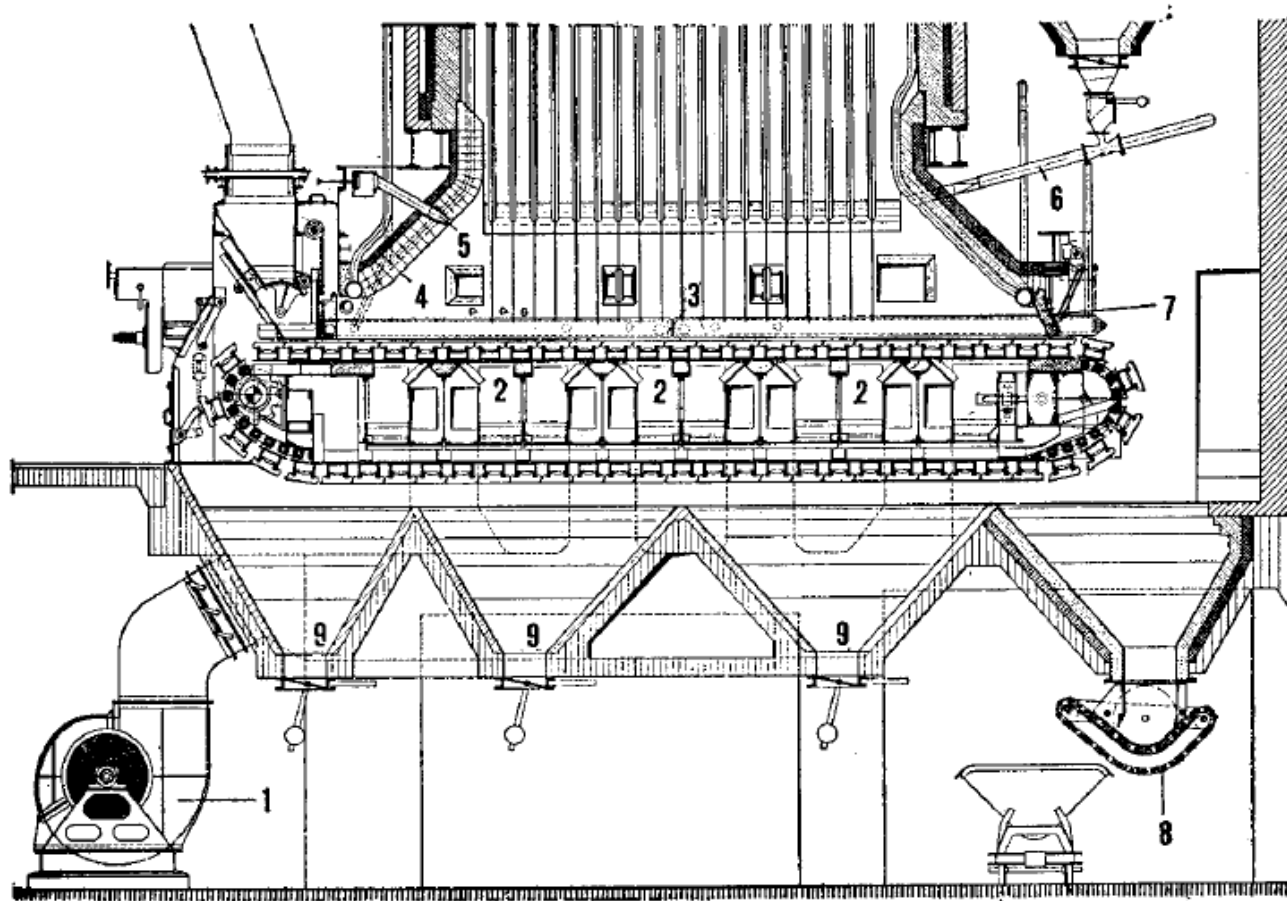
$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_r^r} 100 = \frac{32650 A^r}{Q_r^r} \left( \frac{S_{pr}}{100 - S_{pr}} a_{pr} + \frac{S_{\check{s}}}{100 - S_{\check{s}}} a_{\check{s}} + \frac{S_{lp}}{100 - S_{lp}} a_{lp} \right), [\%]$$

$H_{dk}$  [kJ/kg] - toplotna moć koksa ( $H_{dk} = 32650$  kJ/kg),

$S_{pr}$  [%] - sadržaj sagorljivog u propadu,

$S_{\check{s}}$  [%] - sadržaj sagorljivog u šljaci i

$S_{lp}$  [%] - sadržaj sagorljivog u letećem pepelu.



Najveći gubitak toplote usled mehaničke nepotpunosti sagorijevanja pojavljuje se kod ložišta s mehaničkom rešetkom – čvrsto gorivo (ugalj, biomasa) -



- **Gubitak u izlaznim gasovima** predstavlja toplotu koja se izgubi zato što produkti sagorijevanja na izlazu iz kotla imaju temperaturu višu od temperature okoline

$$Q_2 = \frac{B_r (I_{iz} - \alpha_{iz} I_{hv}^o)}{B_G}, [kJ/kg]$$

$I_{iz}$  [kJ/kg] - entalpija dimnih gasova na izlazu iz kotla pri temperaturi  $t_{iz}$  i koeficijentu viška vazduha  $\alpha_{iz}$

$\alpha_{iz}$  [-] - koeficijent viška vazduha na izlazu iz kotla

**Gubitak u izlaznim gasovima u procentima unijete toplote** iznosi

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r^r} 100 = \frac{I_{iz} - \alpha_{iz} I_{hv}^o}{Q_r^r} (100 - q_4), [%]$$

Na gubitak u izlaznim gasovim, koji predstavlja najveći kotlovski gubitak može se uticati smanjenjem koeficijenta viška vazduha i sniženjem temperature dimnih gasova na izlazu iz parnog kotla (prisis vazduha, prljanje grejnih površina i tako dalje).

- Kao posledica hemijske nepotpunosti sagorijevanja, u produktima sagorijevanja mogu se naći sagorljivi gasovi (CO, H<sub>2</sub> i drugi). *Toplota* koja bi se dobila njihovim sagorijevanjem iznosi

$$Q_3 = \frac{B_r (\text{CO} \cdot H_{\text{CO}} + \text{H}_2 \cdot H_{\text{dH}_2}) V_{\text{gs}}}{B_G}, \text{ [kJ/kg]}$$

CO [%] - sadržaj ugljen-monoksida u suvim izlaznim gasovima,

H<sub>2</sub> [%] - sadržaj vodonika u suvim izlaznim gasovima,

H<sub>CO</sub> [kJ/kg] - toplotna moć ugljen-monoksida,

H<sub>dH<sub>2</sub></sub> [kJ/kg] - donja toplotna moć vodonika i

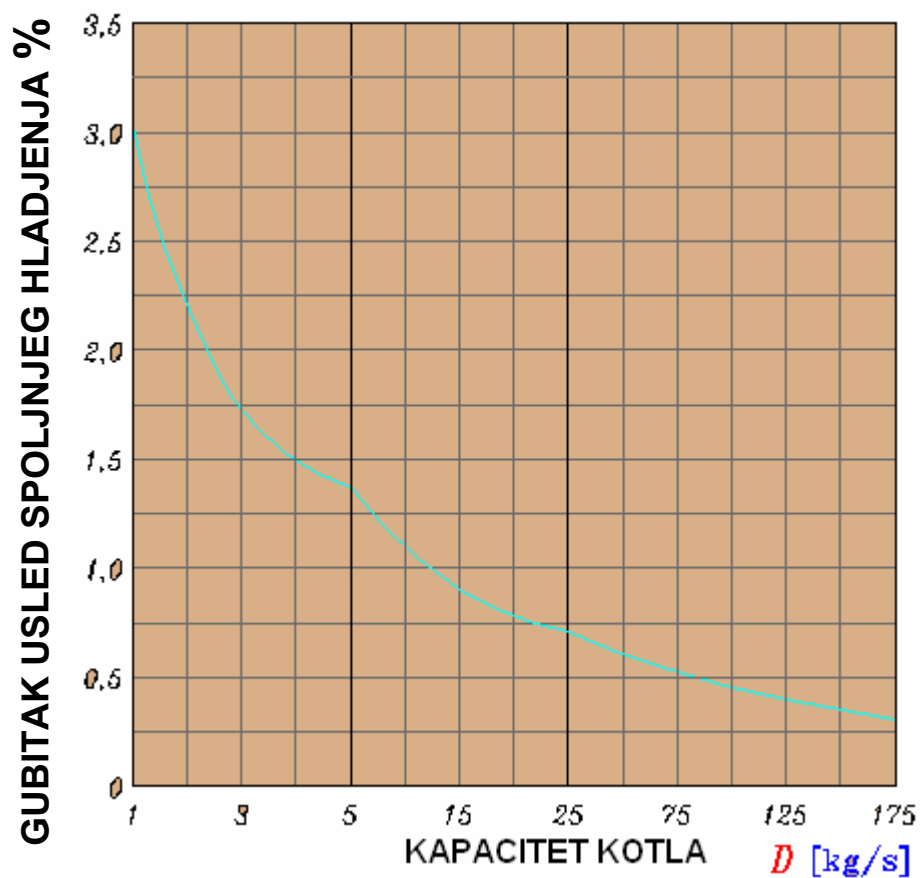
V<sub>gs</sub> [m<sup>3</sup>/kg] - stvarna zapremina suvih produkata sagorijevanja.

**Gubitak usled hemijske nepotpunosti sagorijevanja je**

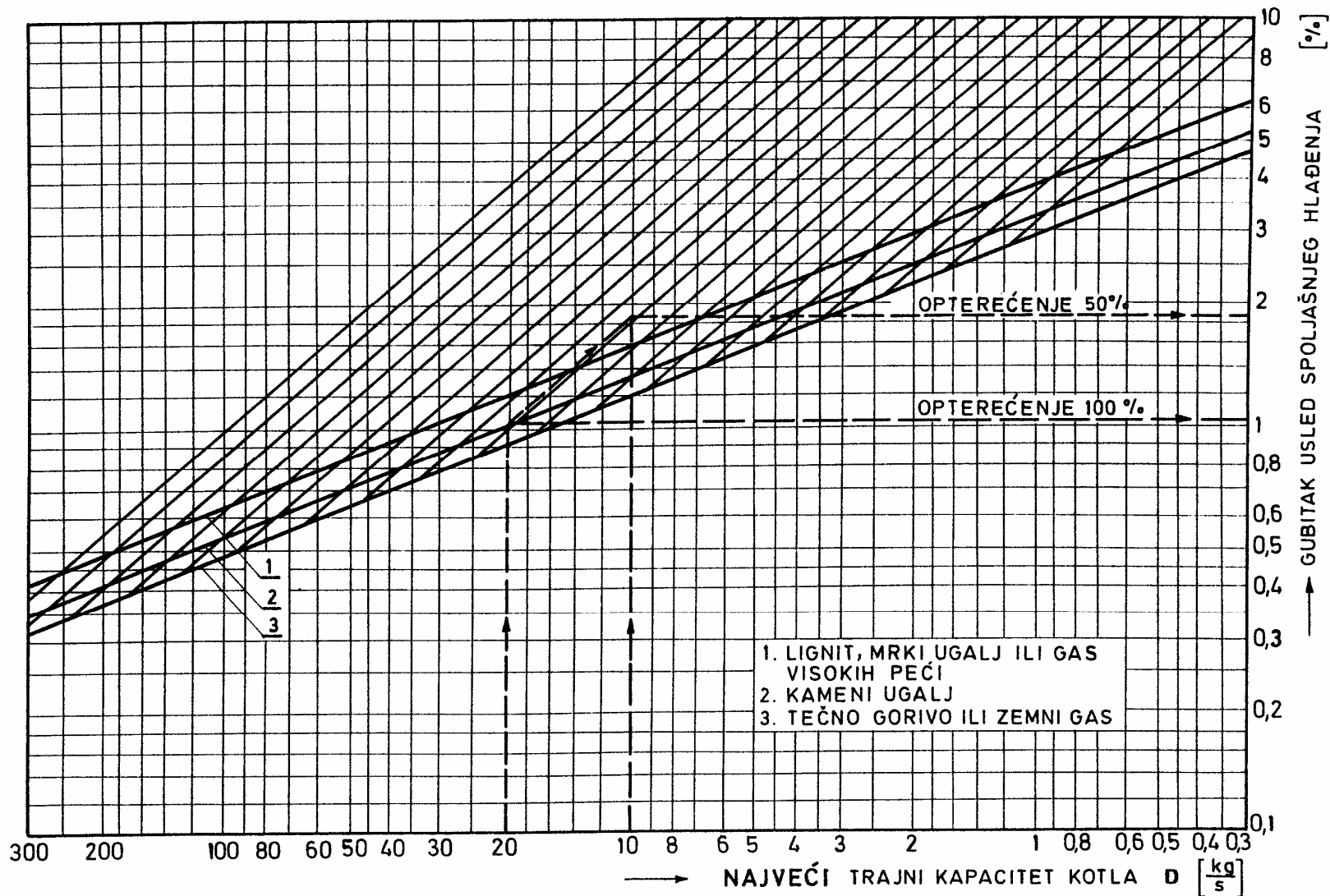
$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_r^r} 100 = \frac{(\text{CO} \cdot H_{\text{CO}} + \text{H}_2 \cdot H_{\text{dH}_2}) (100 - q_4) V_{\text{gs}}}{Q_r^r} \text{ [%]}$$

Osnovni razlozi hemijske nepotpunosti sagorijevanja su nedovoljna količina vazduha koja se dovodi u proces sagorijevanja i njegovo loše mješanje sa gorivom.

- **Gubitak usled spoljašnjeg hlađenja ( $q_5$ )** nastaje zbog toga što je oplata kotla na temperaturi višoj od temperature okolnih površina i temperature okolnog vazduha. Zbog toga se toplota predaje zračenjem od oplate na okolne površine i prirodnom konvekcijom okolnom vazduhu. Zavisnost ovog gubitka predstavljena je grafički ili tabelarno u zavisnosti od nominalnog kapaciteta parnog kotla.



# JUS M.E2.203 – Kotlovska postrojenja – Termotehnička ispitivanja



- Gubitak usled fizičke toplote šljake ( $q_6$ ) značajan je kod kotlova sa odvođenjem šljake u tečnom stanju.

Pri sagorijevanju čvrstog goriva, u ložištu ostaje šljaka na visokoj temperaturi. Pošto se ona udaljava iz ložišta, sa njom se odvodi određena količina toplote koja predstavlja gubitak

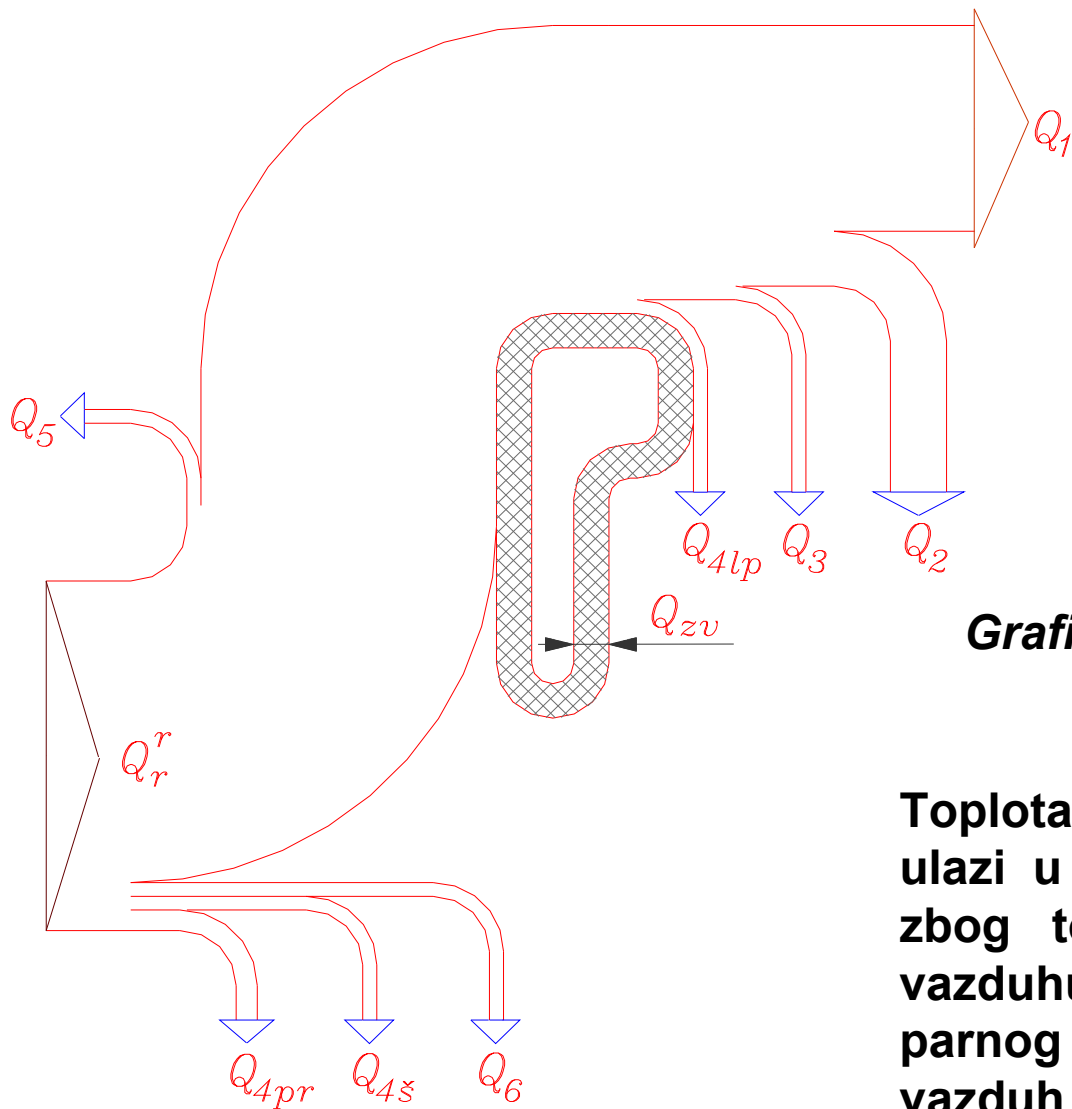
$$Q_6 = \frac{A_{pr}^r + A_{\dot{s}}^r}{100} (ct)_A = (a_{pr} + a_{\dot{s}}) (ct)_A \frac{A^r}{100} \text{ [kJ/kg]}$$

$$q_6 = \frac{Q_6}{Q_r^r} 100 = (a_{pr} + a_{\dot{s}}) (ct)_A \frac{A^r}{100} \text{ [%]}$$

gdje je  $(ct)_A$  [kJ/kg] - entalpija šljake na temperaturi sa kojom se udaljava iz ložišta.

- Kod različitih vrsta goriva i sistema sagorijevanja *ne postoje svi gubici*. U tabeli je pregledno pokazano koji gubici postoje kod čvrstih goriva pri sagorijevanju u sloju i letu, kao i kod tečnih i gasovitih goriva

Gubitak		Čvrsto gorivo		Tečno gorivo	Gasovito gorivo
		Sloj	Let		
$q_2$		+	+	+	+
$q_3$		±	±	±	±
$q_4$	$q_{4pr}$	+	-	-	-
	$q_{4š}$	+	+	-	-
	$q_{4lp}$	+	+	±	-
$q_5$		+	+	+	+
$q_6$		+	-	-	-



**Grafički prikaz toplotnog bilansa parnog kotla.**

Toplota zagrijanog vazduha  $Q_{zv}$  ne ulazi u bilans parnog kotla u cjelini zbog toga što se toplota predata vazduhu u zagrijaču, vraća u ložište parnog kotla u koje se zagrijani vazduh uvodi.



## JUS M.E2.203 – Kotlovska postrojenja – Termotehnička ispitivanja

Ispitivanje kotlovskih postrojenja vrši se u stacionarnom stanju. Smatra se da je nastupilo stacionarno stanje ako je kotlovsko postrojenje radilo najmanje tri sata s ustaljenim parametrima.

Prije početka ispitivanja mora se izvršiti sljedeće:

- očistiti sve grejne površine
- u svim cjevovodima i ventilima za zatvaranje osigurati dobro zaptivanje kako bi se otklonile greške pri mjerenju količina
- sve cjevovode koji se ne koriste osigurati slijepim prirubnicama
- izvršiti regulaciju gorionika i mlinova
- dijelovi kotlovske postrojenja koji su izloženi habanju (udarna tijela mlina, ventilatori i dr.) moraju se nalaziti u stanju koje ne smanjuje kapacitet i stepen korisnosti kotlovske postrojenja
- osigurati dovoljne količine ispravnog goriva

# SAGORIJEVANJE

- **Sagorijevanje je hemijski proces oksidacije goriva sa kiseonikom uz intenzivno oslobađanje toplote. Ovaj proces može da otpočne samo u slučaju ako su molekuli kiseonika u tijesnom kontaktu sa molekulima goriva i pod uslovom da se ovoj smješi dovede određena količina energije koja će poslužiti za kidanje atomskih veza i koja se naziva energijom aktivacije.**
- **Pri završenom procesu sjedinjavanja goriva i kiseonika dobijaju se produkti sagorijevanja koji se mogu odrediti pomoću jednostavnih hemijskih jednačina.**

# STEHIOMETRIJSKE JEDNAČINE POTPUNOG SAGORIJEVANJA SAGORLJIVIH KOMPONENTI

- Pri izradi materijalnog bilansa procesa sagorijevanja goriva u ložištu parnog kotla, pretpostavlja se da u konačnim produktima sagorijevanja nema sagorljivih gasova, to jest, da je sagorijevanje potpuno.
- Osnov za utvrđivanje materijalnog bilansa procesa sagorijevanja goriva predstavljaju Avogadrov i Daltonov zakon.
  - Prema Avogadrovom zakonu, u prostoru određene zapremine, pri nepromjenjenom pritisku i temperaturi, nalazi se uvijek isti broj molekula idealnog gasa.
  - Prema Daltonovom zakonu, u izolovanim, kao i u zbirnim paralelnim i uzastopnim reakcijama, početne materije se jedine i stvaraju nove produkte u određenim, takozvanim stehiometrijskim odnosima.

- Sagorljive komponente goriva stupaju u hemijske reakcije sa kiseonikom u određenim odnosima, pa se potrošnja kiseonika i količina stvorenih produkata sagorijevanja određuju iz stehiometrijskih jednačina sagorijevanja napisanih za 1 kmol svake komponente.

### Napomena

Pored kilograma (kg), jedinica za količinu je i *1 kmol (kilomol)*. Po definiciji, to je tačno odredjen (cijeli) broj molekula  $N_0 = 6.025 \cdot 10^{26}$ , tkzv. *Avogadrov broj*.

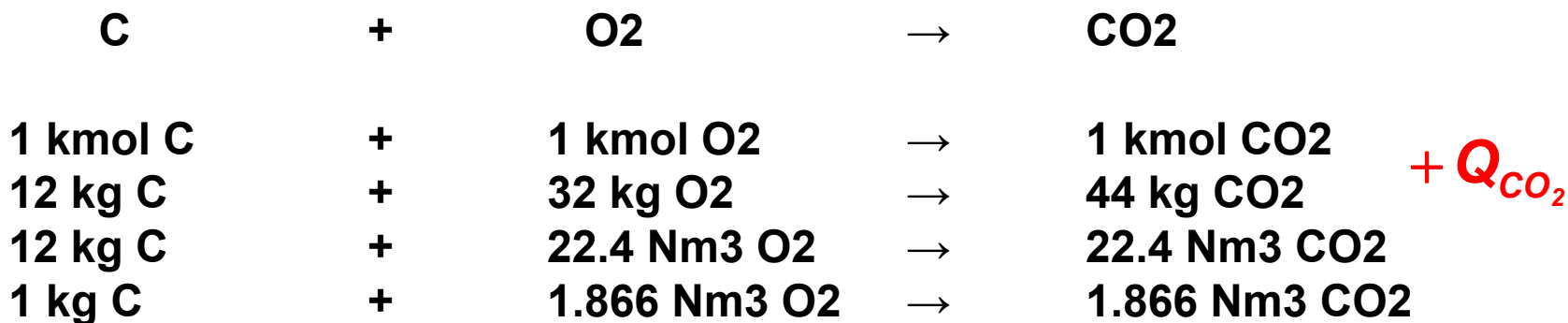
Masa jednog kilomola je jednaka molekulskoj masi supstance.

Npr. *1 kmol* vode (H<sub>2</sub>O) ima masu  $m = M_{H_2O} = 18 \text{ kg}$ ; *1 kmol* CO<sub>2</sub> ima masu  $m = M_{CO_2} = 44 \text{ kg}$  itd.

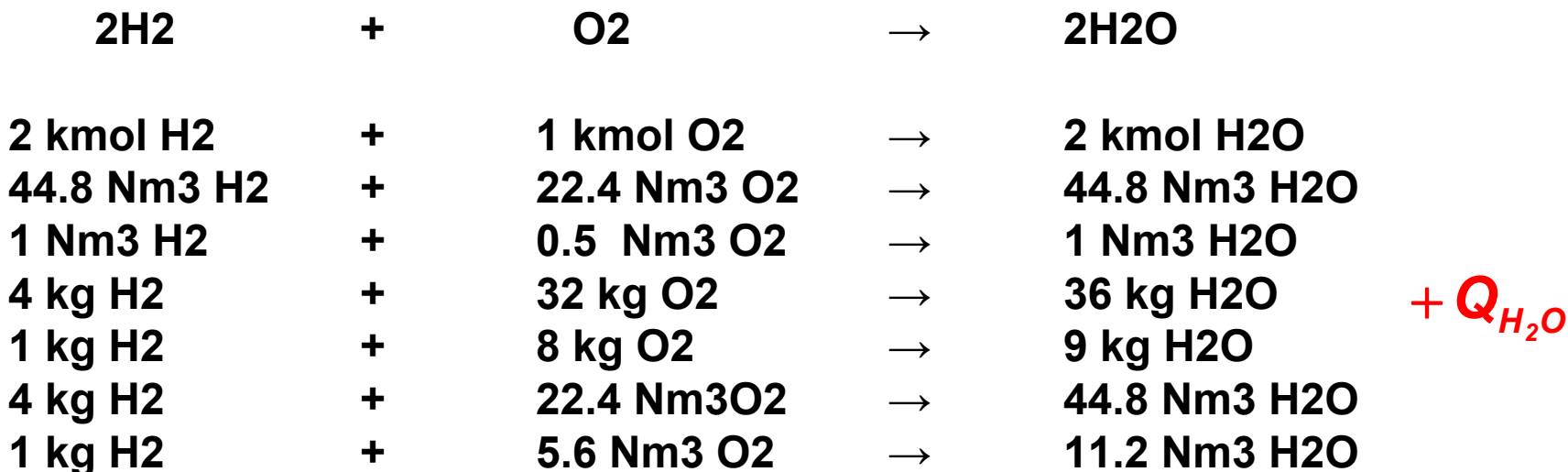
*1 kmol* ima zapreminu od  $V_{1kmol} = 22.4 \text{ Nm}^3$  ( $\text{Nm}^3$ - “Veliki Normalni metar kubni”) na normalnim uslovima ( $t=0 \text{ C}$ ,  $p=1 \text{ bar}$ ). Drugim riječima *1 Nm<sup>3</sup>* je količina od *1/22.4 kmola*.

U daljem tekstu će **V** označavati zapreminu na normalnim uslovima, odnosno količinu materije u  $\text{Nm}^3$ , tj u kmol\_ovima jer je  $1 \text{ Nm}^3 = 1/22.4 \text{ kmol}$ .

### Ugljenik (potpuno sagorijevanje)



### Vodonik



– Sumpor

**S**

+

**O<sub>2</sub>**

→

**SO<sub>2</sub>**

**1 kmol S**

+

**1 kmol O<sub>2</sub>**

→

**1 kmol SO<sub>2</sub>**

**32 kg S**

+

**32 kg O<sub>2</sub>**

→

**64 kg SO<sub>2</sub>**

+  $Q_{SO_2}$

**32 kg S**

+

**22.4 Nm<sup>3</sup> O<sub>2</sub>**

→

**22.4 Nm<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>**

**1 kg S**

+

**0.7 Nm<sup>3</sup> O<sub>2</sub>**

→

**0.7 Nm<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>**

- U prikazanim odnosima uzete su zaokružene vrijednosti molekulskih masa, a gasovi su posmatrani kao idealni, što za sobom povlači grešku koja se kod praktičnih proračuna može zanemariti.

# KOLIČINA VAZDUHA POTREBNA ZA POTPUNO SAGORIJEVANJE

- Sabiranjem zapremina kiseonika potrebnih za potpuno sagorijevanje ugljenika, vodonika i sumpora, imajući u vidu da se tom prilikom troši i kiseonik sadržan u gorivu, dobija se da je za potpuno sagorijevanje 1 kg čvrstog ili tečnog goriva potrebno kiseonika

$$V_{O_2}^o = 1.866 \frac{C^r}{100} + 0.7 \frac{S_g^r}{100} + \frac{5.6}{100} \left( H^r - \frac{O^r}{8} \right) [Nm^3/kg]$$

- Ako se pretpostavi da se vazduh sastoji od 21% kiseonika i 79 % azota (po zapremini), najmanja (teorijska) količina vazduha potrebna za potpuno sagorijevanje 1 kg čvrstog ili tečnog goriva biće

$$V^o = \frac{1}{0.21} V_{O_2}^o = \frac{1}{21} \left[ 1.866 C^r + 5.6 \left( H^r - \frac{O^r}{8} \right) + 0.7 S_g^r \right] [Nm^3/kg]$$

- Imajući u vidu da se proces sagorijevanja usporava tokom reakcije zbog smanjenja koncentracije goriva i kiseonika u smješi i da su u ložištima parnih kotlova uslovi za sagorijevanje pogoršani zbog nesavršenog mješanja velikih količina goriva i vazduha, vazduh se u proces sagorijevanja dovodi u količini većoj od teorijske.
- Odnos stvarne i teorijske količine vazduha predstavlja koeficijent viška vazduha

$$\alpha = \frac{L[\text{kg}]}{L^\circ[\text{kg}]} = \frac{n_L M_L}{n_L^\circ M_L} = \frac{n_L}{n_L^\circ} = \frac{n_L \cdot 22.4}{n_L^\circ \cdot 22.4} = \frac{V}{V^\circ}$$

pri čemu su zapremine definisane za normalne uslove.

- Stvarna količina vazduha za sagorijevanje u ložištu parnog kotla  
 $V = \alpha V^\circ \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$
- U ložište parnog kotla se dovodi količina vazduha koja je od teorijske veća za višak vazduha  
 $\Delta V = V - V^\circ = (\alpha - 1)V^\circ \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$



# ZAPREMINA PRODUKATA SAGORIJEVANJA

- **Produkti potpunog sagorijevanja 1 kg čvrstog ili tečnog goriva sadrže:**
  - **ugljen-dioksid** (CO<sub>2</sub>) kao produkt potpunog sagorijevanja ugljenika,
  - **sumpor-dioksid** (SO<sub>2</sub>) kao produkt potpunog sagorijevanja sumpora,
  - **azot** (N<sub>2</sub>) iz teorijske količine vazduha, iz viška vazduha i iz goriva,
  - **vodenu paru** (H<sub>2</sub>O) nastalu isparavanjem vlage iz goriva i sagorijevanjem vodonika, kao i od vlage iz teorijske količine i viška vazduha i
  - **kiseonik** (O<sub>2</sub>) iz viška vazduha.
- **Azot i kiseonik iz viška vazduha se u bilansu produkata sagorijevanja ne predstavljaju posebno, nego kao višak vazduha.**
- **Zapremina ugljen-dioksida na osnovu stehiometrijske jednačine iznosi**

$$V_{CO_2} = 1.866 \frac{C^r}{100} [Nm^3/kg]$$

- **Zapremina sumpor - dioksida iznosi**

$$V_{SO_2} = 0.7 \frac{S_g^r}{100}, [Nm^3/kg]$$

- **Kako sumpor-dioksida ima malo i pošto su mu osobine slične kao i ugljen-dioksida, zapremine ugljen-dioksida i sumpor-dioksida se obično sabiraju, pa se dobija *zapremina suvih troatomskih gasova***

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 1.866 \frac{C^r}{100} + 0.7 \frac{S_g^r}{100}, [Nm^3/kg]$$

- **Teorijska zapremina azota sastoji se od azota iz teorijske količine vazduha i azota iz goriva**

$$V_{N_2}^o = 0.79 \cdot V^o + 0.08 \cdot N^r, [Nm^3/kg]$$

- **Teorijska zapremina vodene pare** nastale sagorijevanjem vodonika, vodene pare nastale isparavanjem vlage iz goriva i vodene pare iz teorijske količine vazduha je za tehnički vazduh

$$V_{H_2O}^o = \frac{1}{100} (11.2H^r + 1.244W^r + 1.61 \cdot V^o) [Nm^3/kg]$$

- Ako bi se sagorijevanje vršilo sa *teorijskom zapreminom vazduha*, zapremine produkata sagorijevanja bi bile

– teorijska zapremina suvih produkata sagorijevanja na normalnim uslovima

$$V_{gs}^o = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} \quad [Nm^3/kg]$$

– teorijska zapremina vlažnih produkata sagorijevanja

$$V_g^o = V_{gs}^o + V_{H_2O}^o \quad [Nm^3/kg]$$

- U realno procesu sagorijevanja, dovodi se *količina vazduha veća od teorijske*, pa su

– stvarna zapremina suvih produkata sagorijevanja

$$V_{gs} = V_{gs}^o + (\alpha - 1)V^o \quad [Nm^3/kg]$$

– stvarna zapremina vlažnih produkata sagorijevanja

$$V_g = V_{gs} + V_{H_2O} \quad [Nm^3/kg]$$

gdje je  $V_{H_2O}$   $[Nm^3/kg]$  - stvarna zapremina vodene pare koja je od teorijske veća za vlagu iz viška vazduha

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0.0161 \cdot (\alpha - 1)V^o \quad [Nm^3/kg]$$

# ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA VIŠKA VAZDUHA

- Osnovna kvalitativna karakteristika procesa sagorijevanja u ložištima parnih kotlova je njegova potpunost pri minimalnom višku vazduha, kome odgovara maksimalna temperatura procesa sagorijevanja.
- U eksploataciji treba sistematski kontrolisati sastav produkata sagorijevanja i određivati koeficijent viška vazduha i hemijsku nepotpunost sagorijevanja. Za to se koristi gasna analiza, koja se vrši pomoću analizatora gasova različitih sistema. Na osnovu rezultata gasne analize određuje se koeficijent viška vazduha.
- Pri potpunom sagorijevanju, koeficijent viška vazduha definisan je izrazom koji predstavlja obrazac za njegovo određivanje preko sadržaja tro-atomskih gasova

$$\alpha \approx \frac{RO_{2max}}{RO_2}$$

- Uobičajeni sadržaj sumpora u gorivu je znatno manji od sadržaja ugljenika, pa se izraz može napisati u obliku koji se češće sreće u praksi

$$\alpha = \frac{L}{L_{min}} = \frac{V\rho}{V^o\rho} = \frac{V}{V^o}; \text{CO}_{2max} \approx \frac{V_{CO_2}}{V^o}; \text{CO}_2 \approx \frac{V_{CO_2}}{V}; \Rightarrow \alpha \approx \frac{\text{CO}_{2max} [\%]}{\text{CO}_2 [\%]}$$

- Savršeniji obrazac za određivanje koeficijenta viška vazduha je obrazac preko sadržaja kiseonika u stvarnim suvim produktima sagorijevanja

$$\alpha = \frac{L}{L_{min}} = \frac{V}{V^o} = \frac{V}{V - \Delta V} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta V}{V}} \approx \frac{1}{1 - \frac{\Delta V_{O_2} / 0.21}{V}} \approx \frac{1}{1 - O_2 [\%] / 21} \approx \frac{21}{21 - O_2 [\%]}$$

- Ako ložišni uređaji parnog kotla nisu pravilno odabrani, ako je vođenje procesa nepravilno itd., stvaraju se produkti nepotpunog sagorijevanja, kao što su ugljen-monoksid (CO), vodonik (N<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>) i drugi. Najvjerovatniji produkt nepotpunog sagorijevanja je ugljen-monoksid.

- Koeficijent viška vazduha za slučaj nepotpunog sagorijevanja, kada je u produktima sagorijevanja prisutan samo ugljenmonoksid može se odrediti po obrascu

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{O_2 - 0.5 CO}{N_2}}$$

- Ako se zanemari sadržaj azota u gorivu, procentni sadržaj azota u suvim produktima sagorijevanja iznosi

$$N_2 = 100 - (RO_2 + O_2 + CO), [\%]$$

- Kontrola sagorijevanja poznatog goriva može da se izvrši pomoću takozvanog Ostvaldovog trougla ako je poznat sadržaj  $SO_2$ ,  $O_2$  i  $SO$  u suvim produktima sagorijevanja.

# ANALIZATORI DIMNIH GASOVA

- Koeficijent viška vazduha se ne određuje direktno, nego na osnovu sadržaja ugljen-dioksida i kiseonika u dimnim gasovima. Pri nepotpunom sagorijevanju potrebno je još poznavati i sadržaj sagorljivih gasova. *Sastav produkata sagorijevanja određuje se njihovom analizom koja se vrši analizatorima različitih sistema i konstrukcija.* Analizatori dimnih gasova mogu da budu hemijski, fizički i optički.
- Princip rada hemijskih analizatora zasniva se na selektivnom upijanju pojedinih komponenata dimnih gasova raznim hemijskim apsorbentima. Fizički analizatori rade na osnovu korišćenja određenog fizičkog efekta ili fizičke osobine materije, dok optički rade na principu selektivne apsorpcije infracrvenog svjetla od pojedinih komponenti.

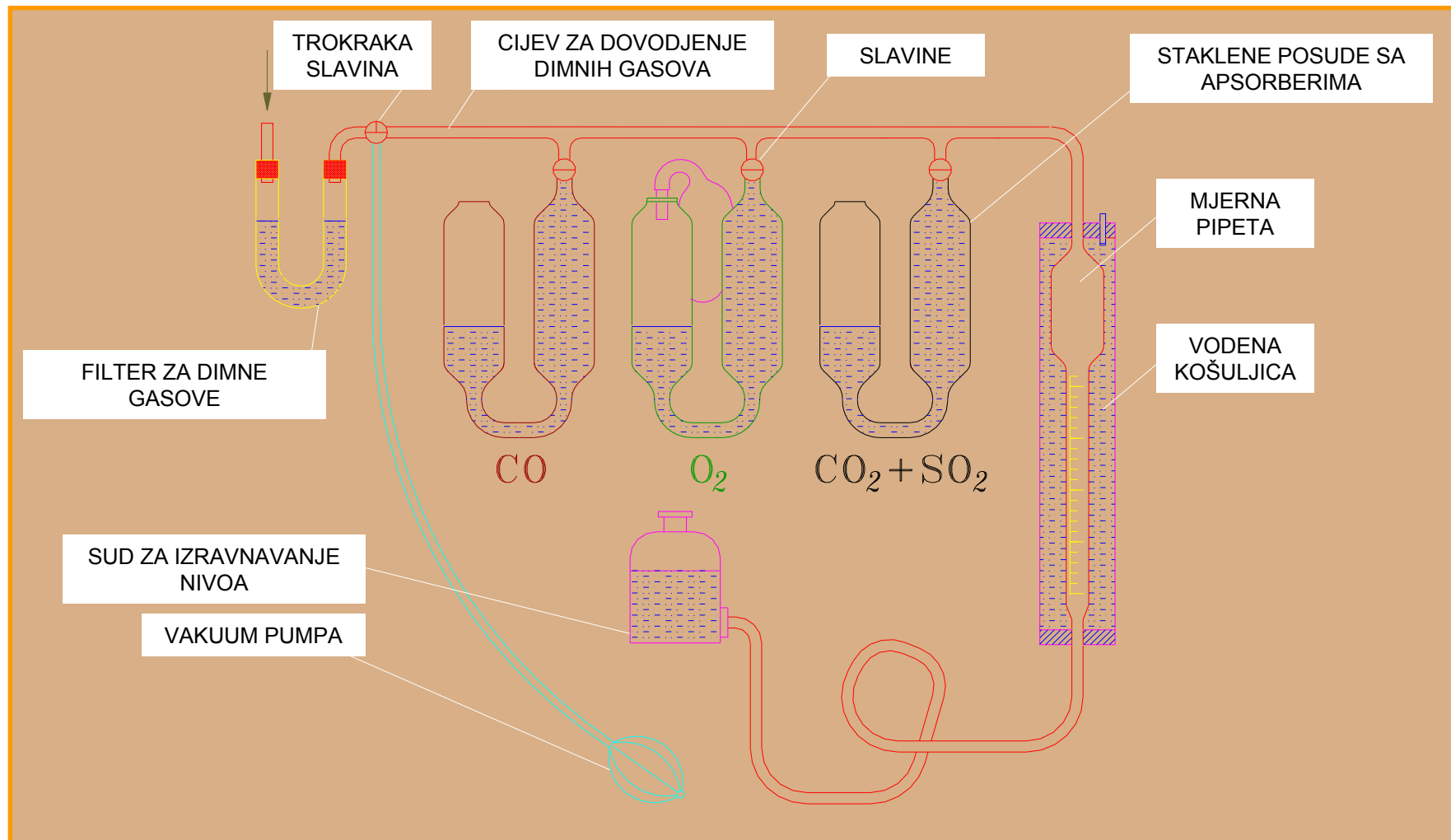


**Mjerne metode se s obzirom na način uzimanja uzorka mogu podijeliti na:**

- **neekstraktivne** (mjerne sonde i uređaji se nalaze unutar ili na dimnom kanalu i analiziraju sastav gasova direktno ili indirektno)
- **ekstraktivne** (uzorak dimnog gasa se uzima iz dimnog kanala i vodi u uređaj gdje se analizira)

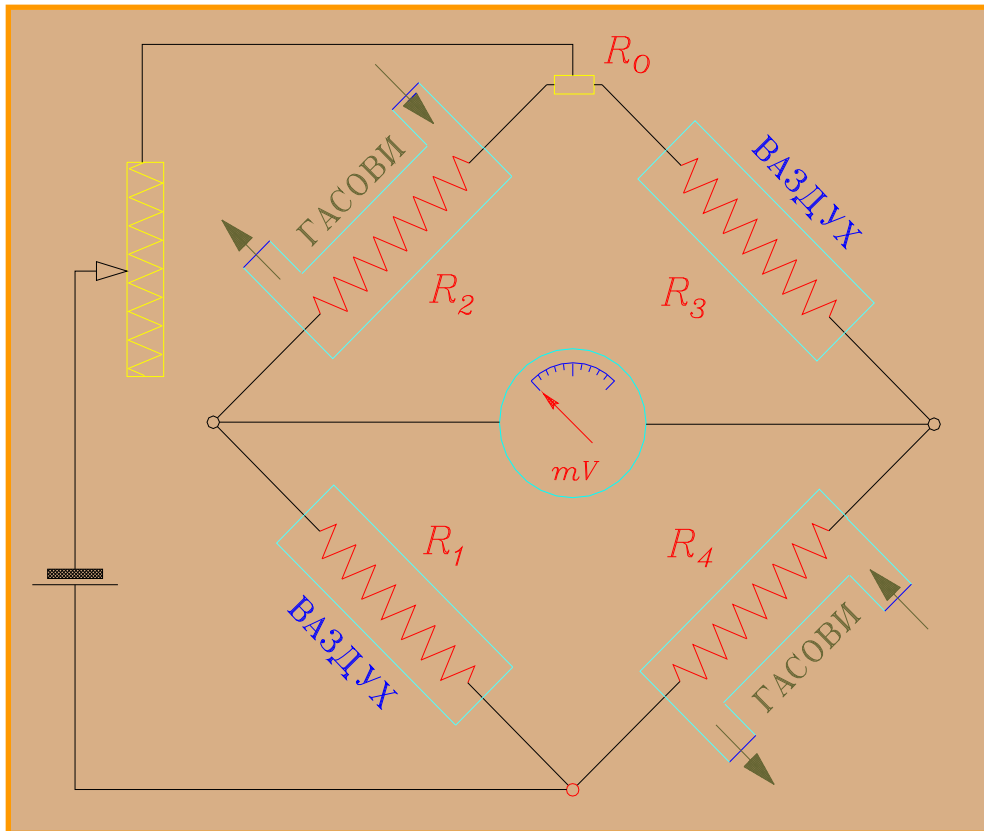
# HEMIJSKI ANALIZATORI

- Najpoznatiji i najčešće primjenjivani uređaj za ručnu analizu dimnih gasova hemijskom metodom je Orsat aparat.



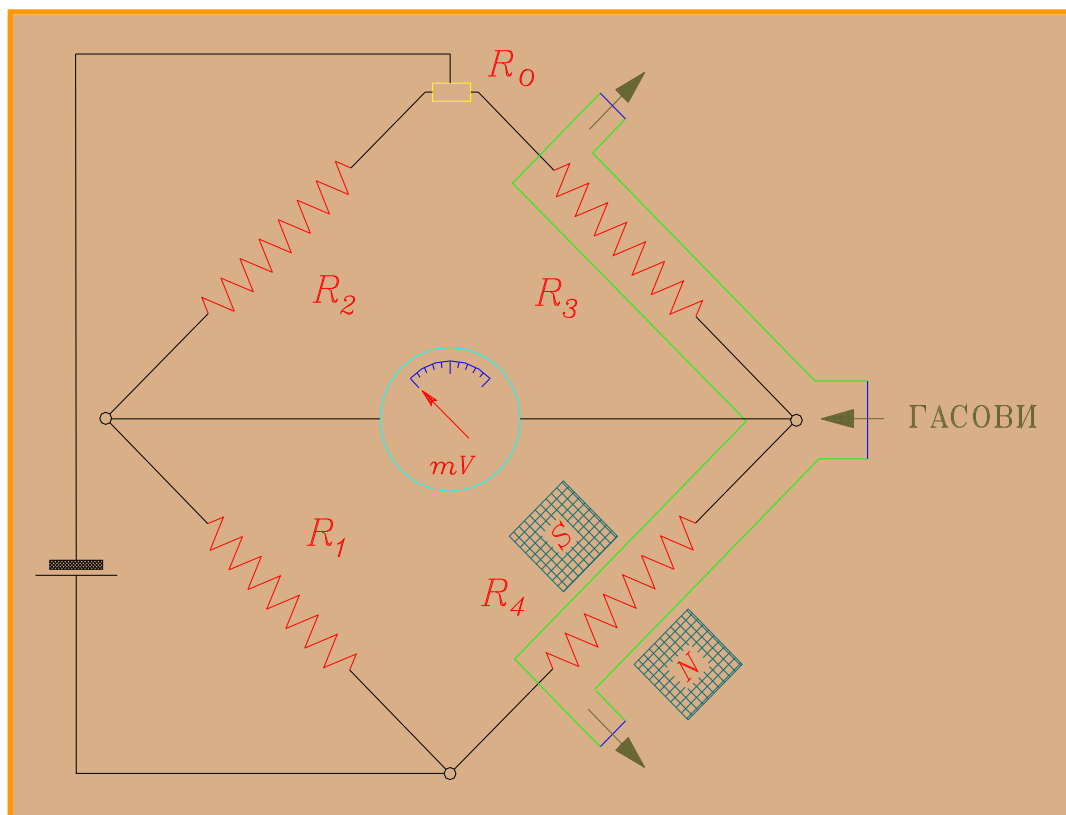
# FIZIČKI ANALIZATORI

- Sadržaj  $\text{SO}_2$  u suvim produktima sagorijevanja se može odrediti *fizičkim analizatorom* koji radi na principu poređenja toplotne provodljivosti dimnih gasova i vazduha, imajući u vidu da je toplotna provodljivost  $\text{SO}_2$  znatno manja nego kod vazduha, a da azot, kiseonik i ugljen-monoksid imaju sličnu toplotnu provodljivost kao vazduh.



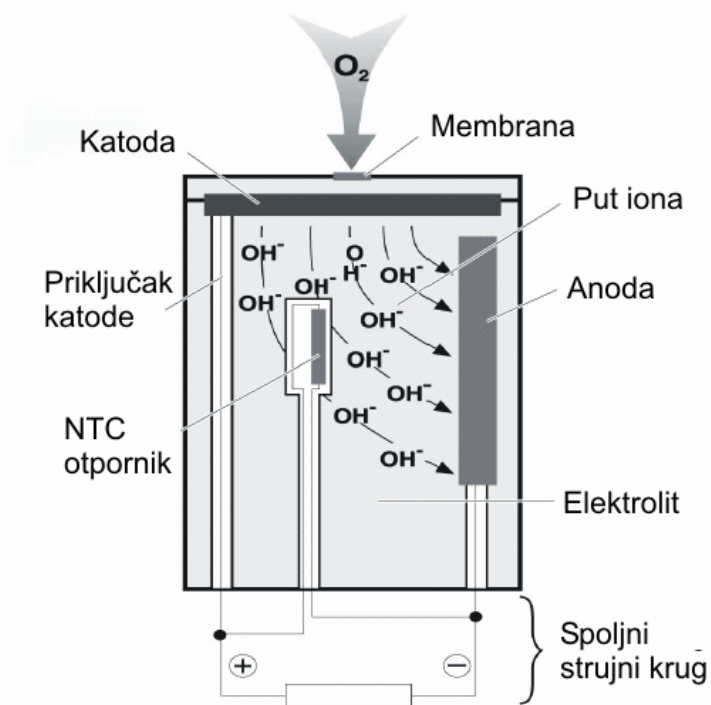
- Sadržaj  $\text{SO}_2$  se određuje pomoću Vitstonovog mosta sa otpornicima od platine koji imaju jednake električne otpore.
- Količina toplote koju otpornici  $R_2$  i  $R_4$  predaju zidovima komora je manja od količina toplote koja se predaje zidovima komora  $R_1$  i  $R_3$  zbog toga što prisustvo  $\text{SO}_2$  u dimnim gasovima smanjuje njihovu toplotnu provodljivost u odnosu na vazduh. Zbog toga se temperatura otpornika  $R_2$  i  $R_4$  povišava, što izaziva neravnotežu mosta.

- Princip rada magnetnog analizatora zasniva se na razlici magnetnih osobina kiseonika u odnosu na ostale komponente produkata sagorijevanja. Kiseonik je, naime, paramagnetičan, pa ga magnetno polje privlači, dok su ostali gasovi dijamagnetični, pa su neutralni u odnosu na njega. Produkti sagorijevanja čija se analiza vrši moraju da se ohlade. Kondenzovana vodena para, koja takođe ima paramagnetična svojstva, odstranjuje se iz dimnih gasova.



- Sadržaj  $O_2$  se određuje pomoću Vitstonovog mosta sa otpornicima koji imaju jednake električne otpore.
- Magnetno polje privlači kiseonik, tako da će se kroz komoru sa otpornikom  $R_4$  povećati protok. Zbog toga će se otpornik  $R_4$  hladiti više nego  $R_3$ , što izaziva nera-vnotežu mosta.
- Neravnoteža mosta izaziva skretanje kazaljke milivoltamp-era čija skala može da bude baždarena u procentima  $O_2$ .

# Elektrolitski senzori



Elektrolitski senzor

- Koriste se za određivanje sadržaja  $O_2$  u dimnim gasovima, kao i štetnih gasova  $CO$ ,  $SO_2$  ili  $NO_x$ .
- Dimni gasovi prolaze preko katode i hemijskom reakcijom nastaju  $OH^-$  ioni koji putuju prema anodi.
- Protok struje je proporcionalan koncentraciji kiseonika u dimnim gasovima. Ova vrsta senzora se najčešće koristi u prenosnim uređajima za mjerenje emisija, jer su vrlo kompaktni, robusni i ne zahtijevaju posebne (laboratorijske) uslove rada.

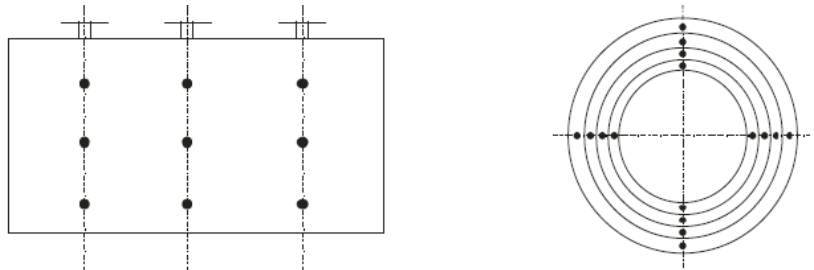
# LABORATORIJSKA VJEŽBA IZ MJERENJA EMISIJA

- **Mjerno mjesto**
- Mjernim mjestom se naziva mjesto na dimnom kanalu na kojem obavljamo mjerenja.
- Mora se nalaziti na takvoj poziciji na trasi dimnog kanala da je na tom mjestu struja dimnih gasova neometana od raznih mogućih prepreka strujanju (lukovi, klapne, ventilatori...).

## Mjerne tačke (mrežno mjerenje)

U zavisnosti od veličine i oblika dimnog kanala potrebno je izmjeriti srednju koncentraciju dimnih gasova mjerenjem u više tačaka po presjeku dimnog kanala.

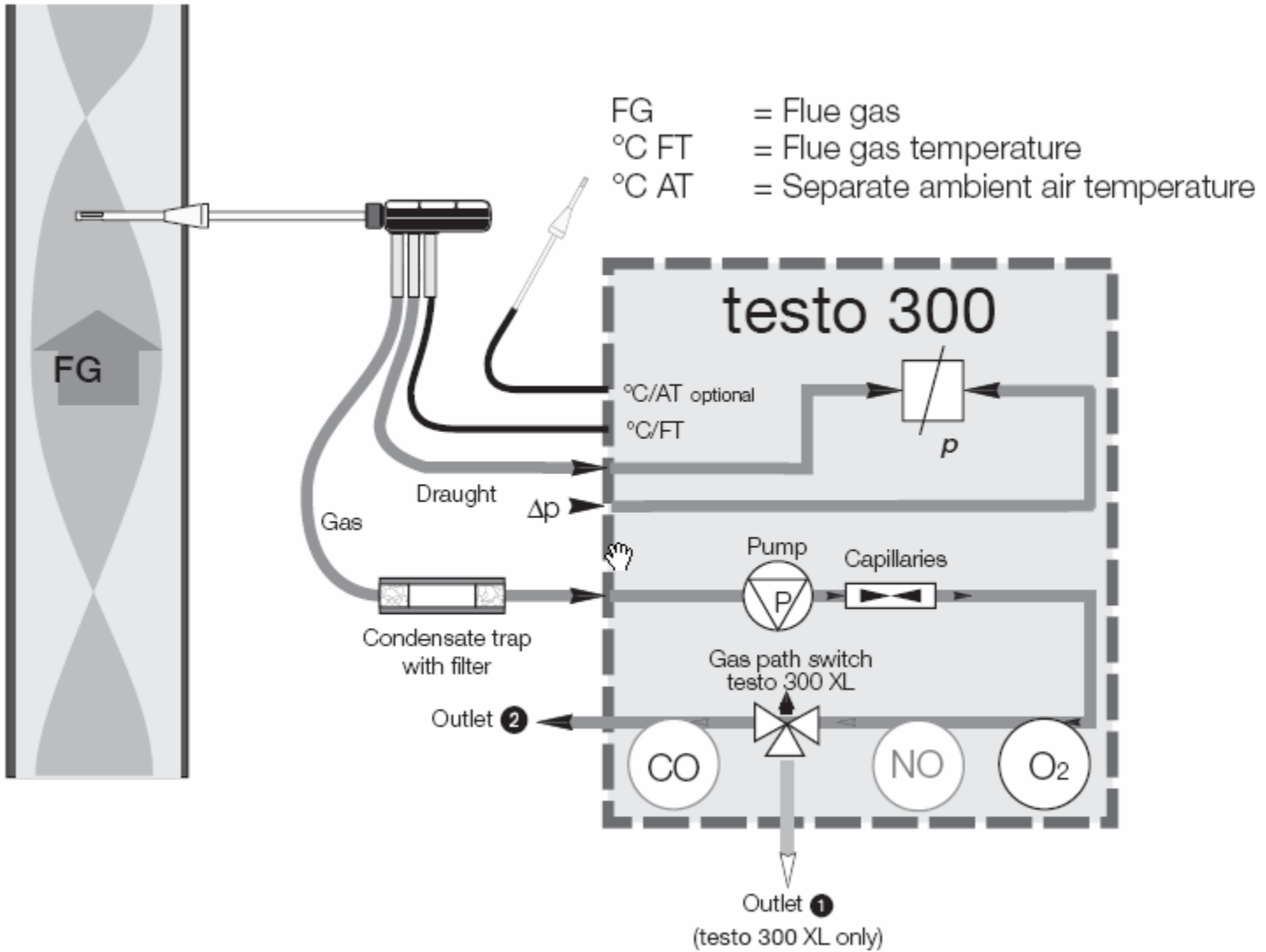
Za kružne kanale prečnika do 0.3 m (300 mm) dovoljno je jedno mjerenje u središtu dimnog kanala.





## TESTO 300M-I

Analizator dimnih gasova: meri O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, apsolutnu temperaturu, diferencijalni pritisak, brzinu, maseni protok, zapreminski protok, stepen korisnosti i višak vazduha.





## Fuel parameters

Fuel	A2 1)	B 1)	CO2max 2	O2 rv 2)
Light oil	0.680	0.007	15.4 Vol.%	3 Vol.%
Natural gas	0.660	0.009	11.8 Vol.%	3 Vol.%
Propane	0.630	0.008	13.7 Vol.%	3 Vol.%
Town gas	0.630	0.011	13.6 Vol.%	3 Vol.%
Coke oven	0.600	0.011	10.3 Vol.%	3 Vol.%
Wood	0.765	0.000	20.3 Vol.%	13 Vol.%
Pellets	0.765	0.000	20.3 Vol.%	13 Vol.%
Test gas	0.0000	0.000	0.00 Vol.%	0 Vol.%

1) Fuel-specific factor

2) Factory setting

The following equations are used to calculate the listed values:

CO<sub>2</sub> value: 
$$CO_2 = \frac{CO_{2max} \times (21\% - O_2\%)}{21\%}$$

CO<sub>2max</sub> : Fuel-specific maximum CO<sub>2</sub> value  
 21 % : Oxygen level of air in %  
 O<sub>2</sub> % : Measured oxygen level in %

Flue gas loss: 
$$qA = \left[ (FT - AT) \left[ \frac{A2}{(21 - O_2)} + B \right] \right] - K_K$$

FT : Flue gas temperature  
 AT : Ambient air temperature  
 A2/B : Fuel-specific factors  
 21 : Oxygen level in air  
 O<sub>2</sub> : Measured oxygen level  
 K<sub>K</sub> : is a factor which can turn into a negative value if qA falls below the temperature. Necessary for measurements on burners.

If the fuel-specific factors A2 and B are zero, the Siegertsche Formula is applied using factor f:

$$qA = f \times \frac{(FT - AT)}{CO_2}$$

FT : Flue gas temperature  
 AT : Ambient air temperature  
 CO<sub>2</sub> : calculated CO<sub>2</sub> value  
 f : fuel-specific factor

Burner efficiency : 
$$Eta = 100 - qA$$

If qA is negative, Eta will be greater than 100%.

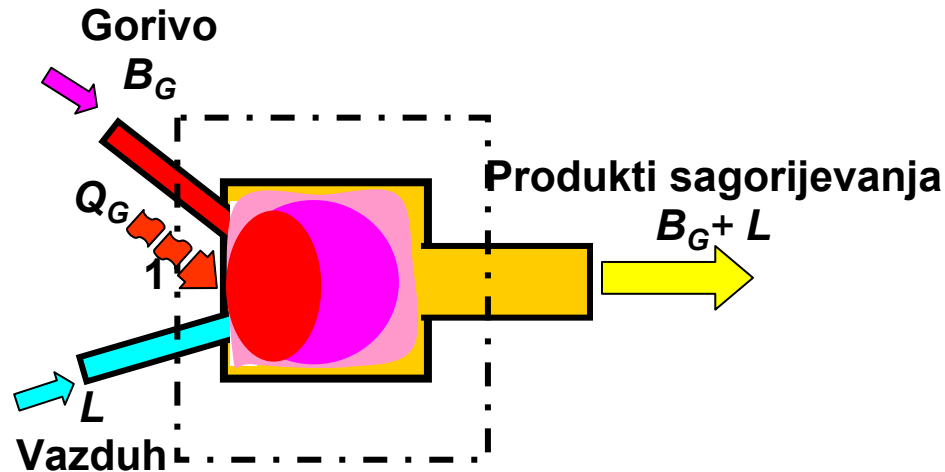
Excess air value λ: 
$$\lambda = \frac{CO_{2max}}{CO_2}$$

CO<sub>2max</sub> : Fuel-specific maximum CO<sub>2</sub> value  
 CO<sub>2</sub> : Calculated CO<sub>2</sub> value

# SAGORIJEVANJE

Primjer

Kako je dobijena forma izraza za gubitak usled izlaznih produkata sagorijevanja, koji se koristi uz uputstvo analizatora TESTO?



Ulaz=Izlaz

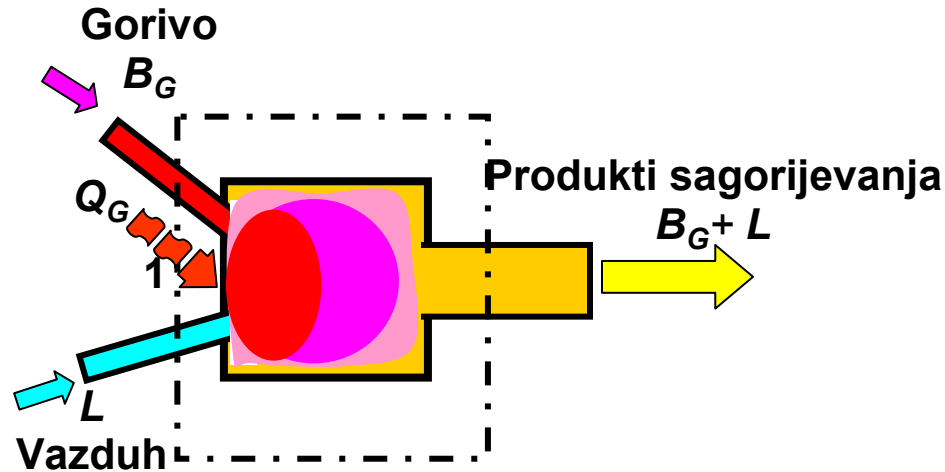
$$Q_G + B_G i_G + L i_L = (L + B_G) i_{PS}$$

$$i \text{ [J/kg]} = c_p t; \quad Q_G \text{ [J/kg]} = B_G H_d$$

$$B_G (c_{pG} t_G + H_d) + L c_{pL} t_L = (L + B_G) c_{pPS} t_{PS}$$

# SAGORIJEVANJE

## •Energetski bilans procesa sagorijevanja (I Zakon)



$$B_G(c_{pG}t_G + H_d) + Lc_{pL}t_L = (L + B_G)c_{pPS}t_{PS}$$

$$B_G(c_{pG}t_G + H_d) = (L + B_G)c_{pPS}t_{PS} - Lc_{pL}t_L$$

Ako uzmemo da ce  $c_{pPS} \approx c_{pL}$

$$B_G(c_{pG}t_G + H_d) \approx (L + B_G)c_{pPS}(t_{PS} - t_L) + B_Gc_{pPS}t_L$$

# SAGORIJEVANJE

## •Energetski bilans procesa sagorijevanja (I Zakon)

Gubici izlaznih gasova  $Q_2 \approx (L + B_G)c_{pPS}(t_{PS} - t_L) + B_Gc_{pPS}t_L$

$$qA \approx \frac{(L + B_G)c_{pPS}(t_{PS} - t_L) + B_Gc_{pPS}t_L}{B_G(i_G + H_d)} = (t_{PS} - t_L) \left[ \frac{(\alpha L^0 + B_G)c_{pPS}}{B_G(i_G + H_d)} \right] + \frac{B_Gc_{pPS}t_L}{B_G(i_G + H_d)}$$

$$qA \approx (t_{PS} - t_L) \left[ \left( \frac{21}{21 - O_2} \frac{L^0}{B_G} + 1 \right) \frac{c_{pPS}}{i_G + H_d} \right] + \frac{c_{pPS}t_L}{i_G + H_d}$$

$$qA [\%] \approx (t_{PS} - t_L) 100 \left[ \frac{\left( 21 \frac{L^0}{B_G} + 21 - O_2 \right) \frac{c_{pPS}}{i_G + H_d}}{21 - O_2} \right] + 100 \frac{c_{pPS}t_L}{i_G + H_d} \approx (t_{PS} - t_L) \left[ \frac{const}{21 - O_2} \right] + const$$

Ovo je zato što je u produktima  $O_2 \ll 21 \frac{L^0}{B_G} + 21$ , pa je brojitelj  $\approx const$ .

$$qA [\%] \approx (FT - FA) \left[ \frac{A_2}{21 - O_2} \right] + B,$$

$$FT = t_{PS}, \quad FA = t_L$$