

# Poboljšanje rada rotirajućih sušionika za sušenje mokro granuliranih uljno-pećnih čađa

KUI – 10/2010  
Prispjelo 17. rujna 2009.  
Prihvaćeno 11. veljače 2010.

N. Zečević\*

Petrokemija d. d., Profitni centar Proizvodnja čađe, Kutina, Hrvatska

Radi potreba povećanja proizvodnog kapaciteta te uštede prirodnog plina u operaciji sušenja mokro granuliranih uljno-pećnih čađa provedeno je poboljšanje rada rotirajućih sušionika. Instalirani rotirajući sušionici u svojoj originalnoj izvedbi bili su predviđeni za sušenje polumokro granuliranih uljno-pećnih čađa. Zbog tog razloga nisu u potpunosti bili zadovoljeni optimalni uvjeti sušenja mokro granuliranih uljno-pećnih čađa. Energija potrebna za sušenje mokro granuliranih uljno-pećnih čađa osigurana je sagorijevanjem prirodnog plina na sustavu otvorenog ložišta uz nekontrolirani pristup zraka za sagorijevanje. Poboljšanje rada rotirajućih sušionika sastojalo se u podešavanju suviška kisika u sagorjelim izlaznim otpadnim plinovima putem "leptir" zaklopke na dimnjaku sušionika. Reguliranjem takve zaklopke na dimnjaku sušionika te primjenom predviđene tehnologije sušenja mokro granulirane uljno-pećne čađe, suvišak kisika u sagorjelim izlaznim otpadnim plinovima tijekom operacije sušenja podešavan je u području od  $\varphi = 3,0\%$  do  $5,0\%$  ovisno o tipu uljno-pećne čađe. Isto tako predložena je ugradnja automatske "leptir" zaklopke koja bi radila u povratno-uzročnoj sprezi s automatskim određivanjem obujamskog udjela kisika u sagorjelim izlaznim otpadnim plinovima, odnosno regulacijom obujamskog protoka prirodnog plina za sagorijevanje. Osim toga, predložen je postupak predgrijavanja procesne vode na temperaturu od  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  upotrebom otpadne topline iz procesa proizvodnje uljno-pećne čađe u postupku mokre granulacije. Navedenim postupcima optimalizacije dobivena je ušteda na prosječnom energetske normativu prirodnog plina u operaciji sušenja od  $25\%$  do  $35\%$  ovisno o tipu uljno-pećne čađe te posljedično tome smanjenje emisije ugljikova(IV) oksida do  $40\%$ .

Ključne riječi: *Rotirajući sušionik, suvišak kisika, mokro granulirana uljno-pećna čađa, predgrijavanje procesne vode, energetska učinkovitost*

## Uvod

Kako bi se dodatno poboljšala učinkovitost operacije sušenja mokrih materijala, poželjno je provesti, ukoliko je to moguće, operacije predušenja. Najčešće operacije predušenja su dekantiranje, filtriranje, isparavanje te granulacija uz primjenu zagrijanog sredstva za granulaciju.<sup>1,2,3,5</sup> Za industrijske primjene sušenja u najvećem broju slučajeva upotrebljavaju se rotirajući sušionici. Kod rotirajućih sušionika mokri materijal prolazi kroz rotirajući cilindar, odnosno bubanj sušionika. Bubanj sušionika obično je čelična cilindrična posuda, lagano nagnuta prema naprijed. U određenim slučajevima rade s negativnim unutarnjim tlakom kako bi se spriječilo izlaženje prašine suhog materijala. Mokri materijal ulazi u gornji dio te se pomiče prema donjem dijelu, gdje dolazi do pražnjenja. Ovisno o rasporedu kontakta između vrućih plinova za sušenje i mokrog materijala, rotirajući sušionici mogu se podijeliti na direktne ili indirektne, odnosno istostrujne ili protustrujne.<sup>2,5</sup> Rotirajući bubanj sušionika obično je smješten na čelične valjke, pri čemu se rotacija postiže direktnim ili lančastim prijenosom putem odgovarajućeg reduktora i elektromotora. Zbog rotacije bubnja sušionika mokri materijal podiže se podizači-

ma na određenu visinu unutar rotirajućeg bubnja. Na taj način osigurava se tuširanje mokrog materijala u obliku padajuće zavjese u struji vrućih plinova te djelomično transport mokrog materijala kroz rotirajući bubanj sušionika.

Kod uljno-pećnog postupka proizvodnje čađe ista se dobiva u obliku praha vrlo male nasipne gustoće od oko  $60\text{ kg m}^{-3}$  do  $80\text{ kg m}^{-3}$ .<sup>7</sup> Zbog male nasipne gustoće i velike voluminoznosti uljno-pećnu čađu potrebno je radi učinkovitijeg transporta do krajnjih korisnika prevesti u granulirani oblik. Granulacija uljno-pećnih čađa obično se provodi mokrim postupkom.<sup>7</sup> Mokri postupak granulacije uljno-pećnih čađa u prahu provodi se u rotirajućim granulatorima uz dodatak vode i aditiva za granulaciju. Mokro granulirana uljno-pećna čađa na izlazu iz granulatora sadrži maksimalni udjel vode, koju je potrebno ispariti do udjela vlage u konačnom suhom materijalu do maksimalno  $w = 1,0\%$ . U proizvodnom procesu uljno-pećne čađe Petrokemije d. d. u Kutini za navedeni proces upotrebljavaju se na dvije proizvodne linije tri identična rotirajuća indirektno grijana prirodnim plinom istostrujna sušionika. U izvornom izdanju, navedeni sušionici bili su predviđeni za sušenje polumokro granulirane uljno-pećne čađe, gdje se udjel vlage u mokrom materijalu kretao oko  $w = 50\%$  s kapacitetom sušenja od  $840\text{ kg h}^{-1}$  suhe uljno-pećne čađe. Budući da instalirani rotirajući sušionici čine usko grlo, što se tiče trenu-

\* nenad.zecevic@petrokemija.hr

tačnog proizvodnog kapaciteta od 2000 kg h<sup>-1</sup> suhe uljno-pećne čađe po sušioniku te potreba sve uvjerljive uštede toplinske energije, provedene su mjere koje su povećale energetska učinkovitost postojećih rotirajućih sušionika. Mjere za poboljšanje energetske učinkovitosti provedene su poboljšanjem pojedinih postojećih izvedbenih mogućnosti rotirajućih sušionika uz prijedlog dodatnih mjera koje bi u potpunosti automatizirale operaciju sušenja mokrgranuliranih uljno-pećnih čađa. Uz postizanje energetske uštede također je ostvareno i smanjenje emisije ugljikova(IV) oksida.

## Eksperimentalni dio

Indirektno-istostrujni princip sušenja sastojao se od prijenosa topline putem plašta rotirajućeg bubnja sušionika i samo djelomične primjene topline vrućih sagorjivih plinova. Navedeni princip sušenja provodio se radi toga što se klapna dimnjaka sušionika držala u potpuno otvorenom položaju kako bi se osiguralo sigurno izgaranje prirodnog plina u ložištu sušionika. Poboljšanje rada rotirajućih sušionika provedeno je tako da se pomoću postojećih izvedbenih mogućnosti operacije sušenja preinačio iz indirektno istostrujnog u indirektno-direktni istostrujni tok sušenja uz primjenu zagrijane vode za potrebe mokre granulacije. Osnovne dimenzije rotirajućeg sušionika i shematski prikaz operacije sušenja prikazani su na slici 1. Voda za granulaciju predgrijavala se na temperaturu od 70 °C do 80 °C te se kao takva koristila u operaciji mokrog granuliranja uljno-pećne čađe. Voda se predgrijavala parnim grijanjem u čeličnoj posudi te dozirala pumpom u granulator zajedno s vodenom otopinom aditiva. Na navedeni način podigla se temperatura ulaza mokrgranulirane uljno-pećne čađe u rotirajući bubanj sušionika sa 60 °C na 80 °C. Preinaka iz indirektno istostrujnog postupka sušenja u indirektno-direktni istostrujni postupak sušenja provela se podešavanjem klapne na dimnjaku sušionika te klapne na ventilatoru za odsisavanje prašine uljno-pećne čađe, isparene vode i sagorjivih plinova. Princip preinake sastoji se u tome da su se vrući sagorjevni plinovi pritvaranjem klapne na dimnjaku sušionika te podešavanjem klapne na ventilatoru za odsisavanje prašine uljno-pećne čađe, isparene vode i sagorjivih plinova usmjerili kroz tri otvora na ulaznom dijelu rotirajućeg bubnja sušionika. Na navedeni način osigurala se optimalna brzina strujanja sagorjivih plinova kroz rotirajući bubanj sušionika te idealni prijenos topline. Osim toga, podešavanjem klapne na dimnjaku sušionika obujamski udjel kisika u otpadnim sagorjivim plinovima održavan je u području od  $\varphi = 3,0\%$  do  $5,0\%$ , čime je osigurano idealno sagorijevanje prirodnog plina za sušenje. Naime, svakim pritvaranjem klapne na dimnjaku sušionika došlo je do promjene kvantitativnog sastava sagorjivih plinova na način da se smanjivala količina prirodnog plina za sušenje. Povratno-uzročnom spregom između obujamskog udjela kisika u sagorjivim plinovima, prirodnog plina za loženje i zraka za sagorijevanje položaj klapne na dimnjaku sušionika doveden je u položaj zatvorenosti od 90 do 100 % ovisno o kapacitetu sušenja, čime su se potpuno vrući sagorjevni plinovi usmjerili u rotirajući bubanj sušionika kroz tri otvora na njegovom ulaznom dijelu.

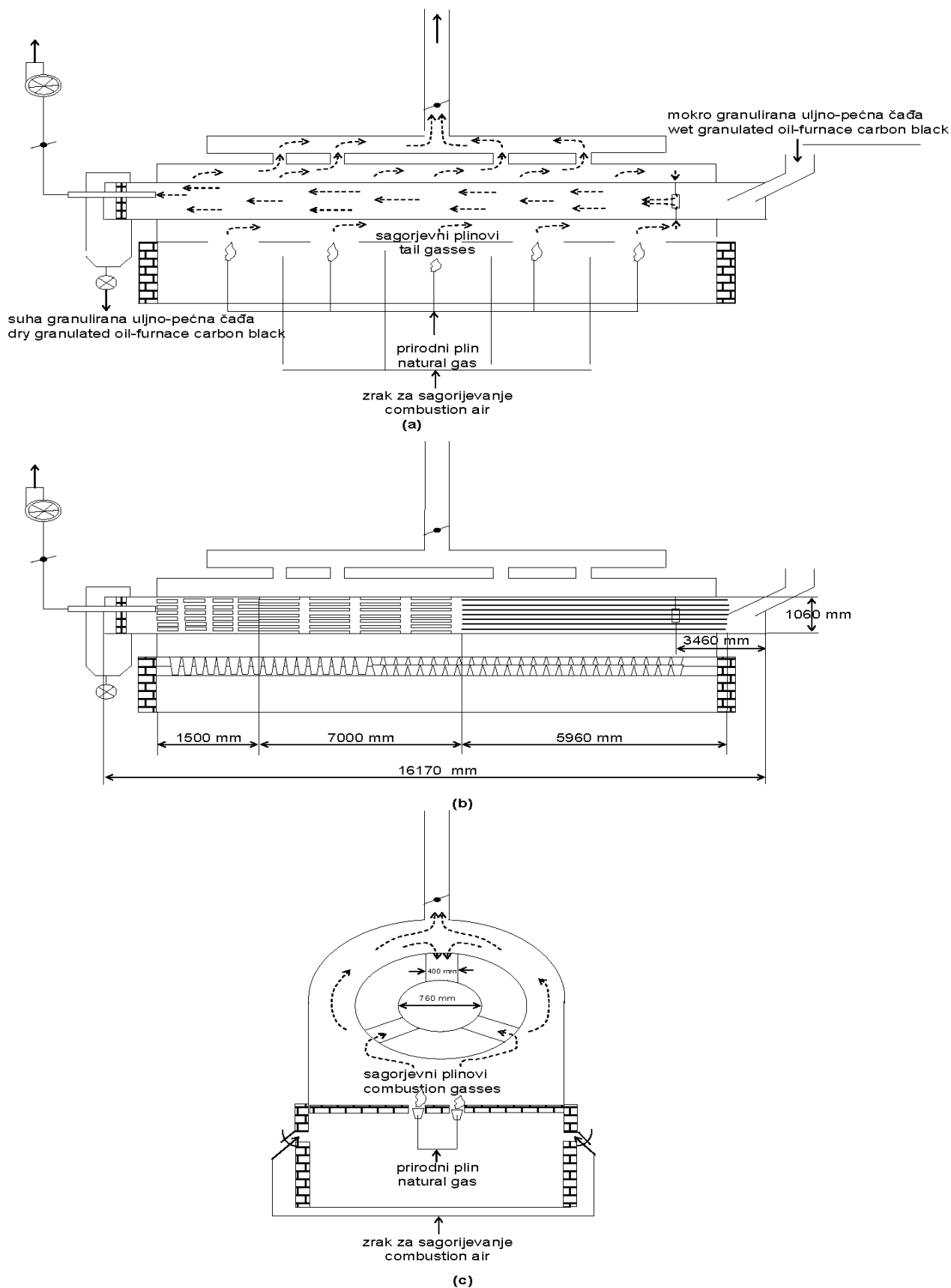
Na taj način omogućena je maksimalna izmjena topline između vrućih sagorjivih plinova i mokro granulirane uljno-

-pećne čađe u bubnju sušionika. Budući da je klapna na dimnjaku sušionika bila u gotovo zatvorenom položaju, sagorjevni plinovi izlazili su s isparenom vodom i česticama prašine uljno-pećne čađe putem ventilatora za odsisavanje i vrećastog filtra u atmosferu. Obujamski udjel kisika u otpadnim sagorjivim plinovima mjeren je putem prijenosnog plinskog analizatora MADUR GA-20 s elektrokemijskom ćelijom za kisik.

## Rezultati i rasprava

Zbog ostvarivanja ušteda i poboljšanja učinkovitosti kapaciteta sušenja na postojećim rotirajućim sušionicima provedeni su maksimalni mogući zahvati koji su pospješili učinak prijenosa topline. Prvi provedeni zahvat bila je primjena tople vode u operaciji granulacije, čime se povećala ulazna temperatura mokro granulirane uljno-pećne čađe u rotirajući bubanj sušionika. Iz tablice 1 vidljivo je da upotreba tople vode temperature 80 °C povećava ulaznu temperaturu uljno-pećne čađe sa 60 °C na 80 °C te smanjuje normativni potrošak prirodnog plina u prosjeku od 5 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> do 7 m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> u odnosu na vodu okolne temperature. Za provedbu dokazivanja smanjenja normativa utroška prirodnog plina pomoću zagrijane vode upotrijebljena je adekvatna čelična posuda kao privremeno rješenje, u kojoj se voda grijala predgrijanom vodenom parom temperature 180 °C. Navedeni postupak nema energetske opravdanja, budući da se ušteda prirodnog plina poništava potrošnjom vodene pare koja je potrebna za zagrijavanje vode do temperature 80 °C. Međutim, u procesu proizvodnje uljno-pećne čađe na par lokacija u postrojenju moguće je ugraditi predgrijač vode koji bi koristio otpadnu procesnu toplinu, pri čemu bi se voda mogla kontinuirano zagrijavati do željene temperature i upotrebljavati u operaciji mokre granulacije bez utroška energije za njezino zagrijavanje. Zbog toga je napravljen proračun predgrijača vode koji bi bio adekvatan za kontinuirano zagrijavanje 2,5 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> vode s početne temperature 5 °C do temperature 80 °C.<sup>6</sup> Uzimajući u obzir sve procesne uvjete proizvodnje uljno-pećne čađe, proračun je pokazao da bi bilo potrebno ugraditi s vanjske strane na dimnovodni kanal predgrijač u obliku zmijače ukupne duljine 240 m, promjera 40 mm uz iskorištenje topline od 40 %.

Druga mjera koja je provedena radi poboljšanja prijenosa topline odnosi se na optimalizaciju dovodenja topline mokro granuliranoj uljno-pećnoj čađi u kombinaciji s idealnim prijenosom tvari. Tri identična rotirajuća sušionika instalirana u proizvodnji uljno-pećne čađe, Petrokemije d. d. u konstrukcijskom dijelu sastoje se od rotirajućeg bubnja sušionika, izolirane haube sušionika, ložišta obzidanog vatrostalnom opeknom te popratnom mjerno-regulacijskom tehnikom. Bubanj sušionika izrađen je od nehrđajućeg lima kvalitete 316 L, debljine 5 mm. Unutar bubnja sušionika nalazi se cik-cak razmješteno 147 podizača različitih dimenzija, koji omogućavaju tuširanje granulirane uljno-pećne čađe te bolje sušenje zbog učinkovitijeg prijenosa topline. Učinkovitiji prijenos topline omogućen je postizanjem veće dodirne površine između granula uljno-pećne čađe raspoređenih u padajuću "zavjesu" i vrućih sagorjivih plinova. Hauba sušionika izrađena je od lima kvalitete Incoloy 800, debljine 3 mm te je izolirana s unutrašnje strane kombinacijom keramičke i mineralne vune. U tablici 2 prikazani su rezultati toplinskog proračuna haube sušionika



Slika 1 – (a) princip sušenja uz primjenu sagorijevanja prirodnog plina i zraka za sagorijevanje sa smjerom sagorjelih plinova; (b) osnovne dimenzije rotirajućeg sušionika s rasporedom plamenika i podizača; (c) dimenzije otvora na rotirajućem bubnju za ulazak vrućih sagorjelih plinova.

Fig. 1 – (a) drying principle by combustion of natural gas and combustion air with the direction of tail gasses; (b) elementary dimensions of rotary drum with arrangement of burners and lifters; (c) dimensions of openings on rotary drums for inlet of hot combustion gasses.

T a b l i c a 1 – Učinci zagrijavanja vode u operaciji mokrog granuliranja uljno-pećnih čađa N 220, N 550 i N 660 s temperature okoline na temperaturu od 80 °C

T a b l e 1 – Effects of heating water in the process of wet granulation of oil-furnace carbon blacks N 220, N 550 and N 660 from atmospheric temperature to 80 °C

<b>N 220</b>							
$\theta$ (voda za granulaciju)/°C $\theta$ (water for granulation)/°C				20/80			
$\frac{Q_m(N220)}{kg\ h^{-1}}$	$\frac{Q_v(H_2O)}{L\ h^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{prirodni plin})}{m^3\ h^{-1}}$	$\frac{\eta(\text{iskorištenje topline})}{\%}$	$\frac{v_c(\text{potrošak prirodnog plina})}{m^3\ t^{-1}}$	$\frac{\theta(N220)}{°C}$	$\frac{\theta(\text{dimnjaka})}{°C}$	$\frac{\theta(\text{izlazne smjese plinova})}{°C}$
		$\frac{Q_v(\text{natural gas})}{m^3\ h^{-1}}$	$\frac{\eta(\text{efficiency of heat})}{\%}$	$\frac{v_c(\text{natural gas consumption})}{m^3\ t^{-1}}$		$\frac{\theta(\text{stack})}{°C}$	$\frac{\theta(\text{outlet gas mixture})}{°C}$
1450	1750	293	13,30	202	195	495	225
1450	1750	283	14,70	195	201	497	222
<b>N 550</b>							
$\theta$ (voda za granulaciju)/°C $\theta$ (water for granulation)/°C				20/80			
$\frac{Q_m(N550)}{kg\ h^{-1}}$	$\frac{Q_v(H_2O)}{L\ h^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{prirodni plin})}{m^3\ h^{-1}}$	$\frac{\eta(\text{iskorištenje topline})}{\%}$	$\frac{v_c(\text{potrošak prirodnog plina})}{m^3\ t^{-1}}$	$\frac{\theta(N550)}{°C}$	$\frac{\theta(\text{dimnjaka})}{°C}$	$\frac{\theta(\text{izlazne smjese plinova})}{°C}$
		$\frac{Q_v(\text{natural gas})}{m^3\ h^{-1}}$	$\frac{\eta(\text{efficiency of heat})}{\%}$	$\frac{v_c(\text{natural gas consumption})}{m^3\ t^{-1}}$		$\frac{\theta(\text{stack})}{°C}$	$\frac{\theta(\text{outlet gas mixture})}{°C}$
1600	1920	290	14,90	181	185	395	215
1600	1920	280	15,60	175	187	397	212
<b>N 660</b>							
$\theta$ (voda za granulaciju)/°C $\theta$ (water for granulation)/°C				20/80			
$\frac{Q_m(N660)}{kg\ h^{-1}}$	$\frac{Q_v(H_2O)}{L\ h^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{prirodni plin})}{m^3\ h^{-1}}$	$\frac{\eta(\text{iskorištenje topline})}{\%}$	$\frac{v_c(\text{potrošak prirodnog plina})}{m^3\ t^{-1}}$	$\frac{\theta(N660)}{°C}$	$\frac{\theta(\text{dimnjaka})}{°C}$	$\frac{\theta(\text{izlazne smjese plinova})}{°C}$
		$\frac{Q_v(\text{natural gas})}{m^3\ h^{-1}}$	$\frac{\eta(\text{efficiency of heat})}{\%}$	$\frac{v_c(\text{natural gas consumption})}{m^3\ t^{-1}}$		$\frac{\theta(\text{stack})}{°C}$	$\frac{\theta(\text{outlet gas mixture})}{°C}$
1750	1560	225	15,10	129	193	345	165
1750	1560	213	16,30	122	197	343	162



s osnovnim toplinskim karakteristikama ugrađenih izolacijskih materijala, gdje je vidljivo izvrsno slaganje između teorijski izračunatih podataka s izmjerenim podacima temperature vanjskog izolacijskog lima. Navedeni podaci ukazuju da sušionik ima skoro idealnu izolaciju s obzirom na primijenjenu tehnologiju sušenja.

Ložište sušionika otvorenog je tipa, odnosno pristup zraka za sagorijevanje omogućen je putem pet otvora sa svake strane na donjem dijelu ložišta sušionika. Kod takve vrste ložišta pristup zraka ne kontrolira se opremom za vođenje, nego se regulira zatvorenost otvora pomoću "leptir" zaklopki. Prirodni plin za osiguravanje topline mjeri se putem mjernih blendi te se regulira regulacijskim ventilima. Unutar ložišta sušionika ugrađeno je na ulaznom dijelu 62 plamenika raspoređena u dva reda, dok se na izlaznom dijelu sušionika nalazi 38 plamenika raspoređenih u jednom redu. Za osiguravanje sigurnosti ložišta te stabilnosti ispravnog sagorijevanja prirodnog plina ugrađena su dva automatska optička čuvara plamena. S obzirom na režim rada i osjetljivost uljno-pećne čađe na temperaturu u prisustvu zraka maksimalno projektirano opterećenje ložišta sušionika iznosi  $5000 \text{ MJ h}^{-1}$ , što daje maksimalni utrošak prirodnog plina od  $135 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Tablica 2 – Toplinski proračun termičke izolacije haube sušionika

Table 2 – Heat calculation of the thermal insulation of dryer hood

$\alpha_1$ (unutarnji koeficijent prolaza topline)/ $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ $\alpha_1$ (internal heat transfer coefficient)/ $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	56,0
$\alpha_2$ (vanjski koeficijent prolaza topline)/ $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ $\alpha_2$ (external heat transfer coefficient)/ $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	8,0
$\delta_1$ (debljina sloja keramičke vune)/mm $\delta_1$ (thickness of ceramic wool)/mm	50,0
$\lambda_1$ (koeficijent toplinske vodljivosti za keramičku vunu)/ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $\lambda_1$ (heat conductivity coefficient for ceramic wool)/ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	0,106
$\delta_2$ (debljina sloja mineralne vune)/mm $\delta_2$ (thickness of mineral wool)/mm	100,0
$\lambda_2$ (koeficijent toplinske vodljivosti za mineralnu vunu)/ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $\lambda_2$ (heat conductivity coefficient for mineral wool)/ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	0,068
$K$ (koeficijent prolaza topline)/ $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ $K$ (heat transfer coefficient)/ $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	0,48
$\theta_1$ (temperatura okoline)/°C $\theta_1$ (atmospheric temperature)/°C	20
$\theta_2$ (radna temperatura stijenke rotirajućeg bubnja sušionika)/°C $\theta_2$ (working temperature of rotary dryer drum wall)/°C	550 do 600 550 to 600
$\theta_{W1}$ (izračunata temperatura vanjske stijenke haube)/°C $\theta_{W1}$ (calculated temperature of external hood wall)/°C	51
$\theta_{W2}$ (izmjerena temperatura vanjske stijenke haube)/°C $\theta_{W2}$ (measured temperature of external hood wall)/°C	54 do 67 54 to 67

Za potpuno sagorijevanje  $1 \text{ m}^3$  prirodnog plina teorijski je potrebno  $10,5 \text{ m}^3$  zraka.<sup>3</sup> Budući da je iznimno teško održavati kontrolirano teorijsko sagorijevanje prirodnog plina, idealno je da se prirodni plin sagorijeva sa suviškom kisika od  $\varphi = 3,0 \%$  do  $5,0 \%$  što daje omjer za sagorijevanje između zraka i prirodnog plina od 11,30 do 12,80.<sup>3</sup> S navedenim omjerima sagorijevanja postiže se maksimalno iskorištenje topline prilikom sagorijevanja prirodnog plina. Mjerno-regulacijska tehnika rotirajućeg sušionika uključuje mjerenje protoka prirodnog plina za loženje na ulaznom i izlaznom dijelu ložišta sušionika, mjerenje temperature smjese vodene pare, sagorjivnih plinova i čestica prašine uljno-pećne čađe na izlaznom dijelu bubnja sušionika te mjerenje temperature suhe uljno-pećne čađe s maksimalnim udjelom vode od  $w = 1,0 \%$ . Iz svega opisanoga vidljivo je da se potrebna toplina za sušenje mokro granuliranih uljno-pećnih čađa dobiva sagorijevanjem prirodnog plina i zraka. Sagorjevni plinovi zagrijavaju prostor oko rotirajućeg bubnja sušionika te jednim dijelom ulaze u isti putem tri otvora na njegovom ulaznom dijelu, dok ovisno o otvorenosti klapne na dimnjaku sušionika najvećim dijelom izlaze u atmosferu. Dakle, potrebna toplina za sušenje prenosi se osim kondukcijom i zračenjem preko stijenke metalnog plašta rotirajućeg bubnja sušionika i jednim dijelom konvekcijom vrućih sagorjivnih plinova koji su u izravnom kontaktu s pokretnim slojem mokro granulirane uljno-pećne čađe. U samoj operaciji sušenja najbitniji korak je isparavanje vode koji ovisi o prijenosu tvari između mokrog materijala i vrućih sagorjivnih plinova koji vežu isparenu vodu na sebe te je odsisavanjem iznose kroz dimnjak u atmosferu.<sup>4</sup> Upravo ta pojava iskorištena je za optimizaciju rada sušionika, budući da su se maksimalno sagorjevni plinovi usmjerili u rotirajući bubanj sušionika. Naime, pritvaranjem klapne na dimnjaku sušionika održava se obujamski udjel kisika u području od  $\varphi = 3,0 \%$  do  $5,0 \%$ . Na taj način, ovisno o kapacitetu sušenja, podešava se zatvorenost klapne na dimnjaku sušionika od 90 do 100 %, čime se u potpunosti usmjeravaju vrući sagorjevni plinovi u rotirajući bubanj sušionika kroz tri otvora na njegovom ulaznom dijelu. Potpunim pritvaranjem klapne na dimnjaku sušionika vrući sagorjevni plinovi su pomoću ventilatora za odsisavanje vodene pare i čestica prašine uljno-pećne čađe usmjereni prema vrećastom filtru, odnosno u atmosferu. Dakle postizanjem idealnih uvjeta strujanja vrućih sagorjivnih plinova kroz rotirajući bubanj sušionika te održavanjem idealnog sagorijevanja uspjela se postići ušteda prirodnog plina ovisno o kapacitetu sušenja te tipu uljno-pećne čađe od  $50 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  do  $80 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ . U tablicama 3, 4 i 5 prikazani su rezultati uštede prirodnog plina prilikom sušenja uljno-pećnih čađa N 220, N 550 i N 660 uz primjenu zagrijane vode temperature  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  te smanjenjem obujamskog udjela kisika na  $\varphi = 3,0 \%$  do  $5,0 \%$  u sagorjivnim plinovima pritvaranjem klapne na dimnjaku sušionika. Vrijednosti u tablicama 3, 4 i 5 su prosječne vrijednosti trajanja jedne proizvodne partije u razdoblju od 168 radnih sati bez zastoja. Iz tablica 3, 4 i 5 vidljivo je da primjenom tople vode za granulaciju temperature  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  te smanjenjem obujamskog udjela kisika na  $\varphi = 3,0 \%$  do  $5,0 \%$  u sagorjivnim plinovima pritvaranjem klapne na dimnjaku sušionika dolazi do povećanja iskorištenja prijenosa topline, smanjenja normativa utroška prirodnog plina za sagorijevanje uz istodobno zadržavanje temperature granulirane uljno-pećne čađe na razini od  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $210 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Kod svih tipova uljno-pećnih čađa navedena temperatura sušenja uljno-pećne čađe osigurava maksimalni maseni udjel vode u istoj od  $w = 1,0\%$ . Isto tako vidljivo je smanjenje temperature na dimnjaku sušionika, što je potvrda učinkovitijeg usmjeravanja sagorjivnih plinova u rotirajući bubanj sušionika putem triju otvora na njegovom ulaznom dijelu, što je prikazano na slici 1c.

Kod navedene optimizacije rada sušionika, gdje se u potpunosti vrući sagorjevni plinovi usmjeravaju kroz otvore na

ulaznom dijelu rotirajućeg bubnja sušionika u isti, potrebno je pouzdano voditi računa o održavanju idealne brzine strujanja granulirane uljno-pećne čađe i smjese plinova. Navedena brzina strujanja održava se pomoću odsisnog ventilatora i automatske zaklopke na njemu. U slučaju postizanja većih brzina strujanja od  $0,65 \text{ m s}^{-1}$  moglo bi se pojaviti znatnije odsisavanje suhih granula uljno-pećne čađe, što bi dodatno opteretilo vrećasti filter. Upravo radi tog razloga ugrađena je automatska klapna s ugrađenim mjerilom tlaka na usisnoj strani odsisnog ventilatora, pri

T a b l i c a 3 – Učinci poboljšanja rada rotirajućeg sušionika prilikom sušenja mokro granulirane uljno-pećne čađe N 220 na proizvodnoj liniji 48 100 uz primjenu tople vode temperature  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  i održavanja obujamskog udjela kisika u sagorjivnim plinovima od  $\varphi = 3,0\%$  do  $5,0\%$

T a b l e 3 – Effects of the improved rotary dryer in the process of drying wet granulated oil-furnace carbon black N 220 on the production line 48 100 with the application of hot water at  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  and maintaining the tail-gas oxygen volume fraction between  $\varphi = 3.0\%$  to  $5.0\%$

$\theta$ (voda za granulaciju)/ $^{\circ}\text{C}$ $\theta$ (water for granulation)/ $^{\circ}\text{C}$				20			
$\varphi$ ( $\text{O}_2$ u sagorjivnim plinovima)/% $\varphi$ ( $\text{O}_2$ in tail gas)/%				13,0 do 15,0 13.0 to 15.0			
PV(otvorenost klapne na dimnjaku sušionika)/% PV(valve openings on dryer exhaust)/%				60			
$\frac{Q_m(\text{N220})}{\text{kg h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{H}_2\text{O})}{\text{L h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{prirodni plin})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$ $\frac{Q_v(\text{natural gas})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$	$\frac{\eta(\text{iskorištenje topline})}{\%}$ $\frac{\eta(\text{efficiency of heat})}{\%}$	$\frac{v_c(\text{potrošak prirodnog plina})}{\text{m}^3 \text{ t}^{-1}}$ $\frac{v_c(\text{natural gas consumption})}{\text{m}^3 \text{ t}^{-1}}$	$\frac{\theta(\text{N220})}{^{\circ}\text{C}}$	$\frac{\theta(\text{dimnjaka})}{^{\circ}\text{C}}$ $\frac{\theta(\text{stack})}{^{\circ}\text{C}}$	$\frac{\theta(\text{izlazne smjese plinova})}{^{\circ}\text{C}}$ $\frac{\theta(\text{outlet gas mixture})}{^{\circ}\text{C}}$
1450	1750	293	13,30	204	195	495	225
$\theta$ (voda za granulaciju)/ $^{\circ}\text{C}$ $\theta$ (water for granulation)/ $^{\circ}\text{C}$				80			
$\varphi$ ( $\text{O}_2$ u sagorjivnim plinovima)/% $\varphi$ ( $\text{O}_2$ in tail gas)/%				3,0 do 5,0 3.0 to 5.0			
PV(otvorenost klapne na dimnjaku sušionika)/% PV(valve openings on dryer exhaust)/%				0 do 10 0 to 10			
$\frac{Q_m(\text{N220})}{\text{kg h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{H}_2\text{O})}{\text{L h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{prirodni plin})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$ $\frac{Q_v(\text{natural gas})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$	$\frac{\eta(\text{iskorištenje topline})}{\%}$ $\frac{\eta(\text{efficiency of heat})}{\%}$	$\frac{v_c(\text{potrošak prirodnog plina})}{\text{m}^3 \text{ t}^{-1}}$ $\frac{v_c(\text{natural gas consumption})}{\text{m}^3 \text{ t}^{-1}}$	$\frac{\theta(\text{N220})}{^{\circ}\text{C}}$	$\frac{\theta(\text{dimnjaka})}{^{\circ}\text{C}}$ $\frac{\theta(\text{stack})}{^{\circ}\text{C}}$	$\frac{\theta(\text{izlazne smjese plinova})}{^{\circ}\text{C}}$ $\frac{\theta(\text{outlet gas mixture})}{^{\circ}\text{C}}$
1450	1750	174	21,60	120	210	345	167

čemu se iskustvenim putem došlo do podatka da je potrebno održavati tlak na mjerilu u području od -0,200 do -0,100 mbara kako bi se osiguralo idealno strujanje uz ispravan rad vrećastog filtra.

Osim toga za potpunu automatizaciju operacije sušenja te postizanja adekvatnog nivoa sigurnosti potrebno je na dimnjaku sušionika ugraditi kontinuirano *in situ* mjerenje obujamskog udjela kisika u sagorjelim plinovima uz ugradnju

regulacijske klapne. Na navedeni način pomoću kontinuiranog mjerenja obujamskog udjela kisika u sagorjelim plinovima automatski bi se podešavala otvorenost klapne na dimnjaku sušionika, čime se utječe na otvorenost regulacijskih ventila prirodnog plina. Navedeno je moguće ostvariti, budući da bi se dotok zraka podesio ručnim otvorima na ložištu sušionika, dok bi se stabilnost i ispravnost sagorijevanja osigurala automatskim optičkim čuvarima plamena.

Tablica 4 – Učinci poboljšanja rada rotirajućeg sušionika prilikom sušenja mokro granulirane uljno-pećne čađe N 550 na proizvodnoj liniji 48 200 uz primjenu tople vode temperature 80 °C i održavanja obujamskog udjela kisika u sagorjelim plinovima od  $\varphi = 3,0\%$  do  $5,0\%$

Table 4 – Effects of improved rotary dryer in the process of drying wet granulated oil-furnace carbon black N 550 on the production line 48 200 with the application of hot water at 80 °C and maintaining the tail-gas oxygen volume fraction between  $\varphi = 3.0\%$  to  $5.0\%$

$\theta$ (voda za granulaciju)/°C $\theta$ (water for granulation)/°C				20			
$\varphi$ (O <sub>2</sub> u sagorjelim plinovima)/% $\varphi$ (O <sub>2</sub> in tail gas)/%				13,0 do 15,0 13.0 to 15.0			
PV(otvorenost klapne na dimnjaku sušionika)/% PV(valve openings on dryer exhaust)/%				60			
$\frac{Q_m(N550)}{\text{kg h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(H_2O)}{\text{L h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{prirodni plin})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$ $\frac{Q_v(\text{natural gas})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$	$\frac{\eta(\text{iskorištenje topline})}{\%}$ $\frac{\eta(\text{efficiency of heat})}{\%}$	$\frac{v_c(\text{potrošak prirodnog plina})}{\text{m}^3 \text{ t}^{-1}}$ $\frac{v_c(\text{natural gas consumption})}{\text{m}^3 \text{ t}^{-1}}$	$\frac{\theta(N550)}{\text{°C}}$	$\frac{\theta(\text{dimnjaka})}{\text{°C}}$ $\frac{\theta(\text{stack})}{\text{°C}}$	$\frac{\theta(\text{izlazne smjese plinova})}{\text{°C}}$ $\frac{\theta(\text{outlet gas mixture})}{\text{°C}}$
1600	1920	290	14,90	183	185	395	215
$\theta$ (voda za granulaciju)/°C $\theta$ (water for granulation)/°C				80			
$\varphi$ (O <sub>2</sub> u sagorjelim plinovima)/% $\varphi$ (O <sub>2</sub> in tail gas)/%				3,0 do 5,0 3.0 to 5.0			
PV(otvorenost klapne na dimnjaku sušionika)/% PV(valve openings on dryer exhaust)/%				0 do 10 0 to 10			
$\frac{Q_m(N550)}{\text{kg h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(H_2O)}{\text{L h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{prirodni plin})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$ $\frac{Q_v(\text{natural gas})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$	$\frac{\eta(\text{iskorištenje topline})}{\%}$ $\frac{\eta(\text{efficiency of heat})}{\%}$	$\frac{v_c(\text{potrošak prirodnog plina})}{\text{m}^3 \text{ t}^{-1}}$ $\frac{v_c(\text{natural gas consumption})}{\text{m}^3 \text{ t}^{-1}}$	$\frac{\theta(N550)}{\text{°C}}$	$\frac{\theta(\text{dimnjaka})}{\text{°C}}$ $\frac{\theta(\text{stack})}{\text{°C}}$	$\frac{\theta(\text{izlazne smjese plinova})}{\text{°C}}$ $\frac{\theta(\text{outlet gas mixture})}{\text{°C}}$
1600	1920	182	22,50	114	187	178	185

Isto tako kako bi se preciznije mogla pratiti tri razdoblja na krivulji sušenja, potrebno je unutar bubnja sušionika ugraditi još tri dodatna mjerila temperature koja bi se nalazila ravnomjerno raspoređena duž rotirajućeg bubnja sušionika od njegovog ulaza do krajnjeg mjerenja temperature na njegovom izlaznom dijelu. Shematski prikaz dodatnih mjerila koje bi u potpunosti automatizirale predloženu poboljšanu operaciju sušenja prikazane su na slici 2.

Budući da se vrući sagorjevni plinovi s obujamskim udjelom kisika od  $\varphi = 3,0\%$  do  $5,0\%$  usmjeravaju u rotirajući bu-

banj sušionika, postoji mogućnost narušavanja fizikalno-kemijskih karakteristika uljno-pećnih čađa. Naime, budući da uljno-pećne čađe posjeduju relativno veliku adsorpcijsku površinu koja se kreće u području od  $s = 30 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ , pa sve do  $s = 250 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  te je sklona površinskoj oksidaciji kisikom na povišenoj temperaturi, posebna pozornost posvetila se praćenju kvalitete granulirane uljno-pećne čađe.<sup>7</sup> Na svim tipovima uljno-pećnih čađa na kojima se provela mogućnost poboljšanja rada rotirajućih sušionika nije došlo do nikakvih promjena fizikalno-kemijskih karakteristika.

T a b l i c a 5 – Učinci poboljšanja rada rotirajućeg sušionika prilikom sušenja mokro granulirane uljno-pećne čađe N 660 na proizvodnoj liniji 48 200 uz primjenu tople vode temperature  $80^\circ\text{C}$  i održavanja obujamskog udjela kisika u sagorjavnim plinovima od  $\varphi = 3,0\%$  do  $5,0\%$

T a b l e 5 – Effects of the improved rotary dryer in the process of drying wet granulated oil-furnace carbon black N 660 on production line 48100 with the application of hot water at  $80^\circ\text{C}$  and maintaining the tail-gas oxygen volume fraction between  $\varphi = 3.0\%$  to  $5.0\%$

$\theta$ (voda za granulaciju)/ $^\circ\text{C}$ $\theta$ (water for granulation)/ $^\circ\text{C}$				20			
$\varphi$ ( $\text{O}_2$ u sagorjavnim plinovima)/% $\varphi$ ( $\text{O}_2$ in tail gas)/%				13,0 do 15,0 13.0 to 15.0			
PV(otvorenost klapne na dimnjaku sušionika)/% PV(valve openings on dryer exhaust)/%				60			
$\frac{Q_m(\text{N660})}{\text{kg h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{H}_2\text{O})}{\text{L h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{prirodni plin})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$ $\frac{Q_v(\text{natural gas})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$	$\eta$ (iskorištenje topline) % $\eta$ (efficiency of heat) %	$v_c$ (potrošak prirodnog plina) $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ $v_c$ (natural gas consumption) $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$	$\theta$ (N660) $^\circ\text{C}$	$\theta$ (dimnjaka) $^\circ\text{C}$ $\theta$ (stack) $^\circ\text{C}$	$\theta$ (izlazne smjese plinova) $^\circ\text{C}$ $\theta$ (outlet gas mixture) $^\circ\text{C}$
1750	1560	225	15,10	129	193	345	165
$\theta$ (voda za granulaciju)/ $^\circ\text{C}$ $\theta$ (water for granulation)/ $^\circ\text{C}$				80			
$\varphi$ ( $\text{O}_2$ u sagorjavnim plinovima)/% $\varphi$ ( $\text{O}_2$ in tail gas)/%				3,0 do 5,0 3.0 to 5.0			
PV(otvorenost klapne na dimnjaku sušionika)/% PV(valve openings on dryer exhaust)/%				0 do 10 0 to 10			
$\frac{Q_m(\text{N660})}{\text{kg h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{H}_2\text{O})}{\text{L h}^{-1}}$	$\frac{Q_v(\text{prirodni plin})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$ $\frac{Q_v(\text{natural gas})}{\text{m}^3 \text{ h}^{-1}}$	$\eta$ (iskorištenje topline) % $\eta$ (efficiency of heat) %	$v_c$ (potrošak prirodnog plina) $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ $v_c$ (natural gas consumption) $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$	$\theta$ (N660) $^\circ\text{C}$	$\theta$ (dimnjaka) $^\circ\text{C}$ $\theta$ (stack) $^\circ\text{C}$	$\theta$ (izlazne smjese plinova) $^\circ\text{C}$ $\theta$ (outlet gas mixture) $^\circ\text{C}$
1750	1560	138	24,0	79	187	212	169



Smanjenjem potrošnje prirodnog plina za loženje dolazi do smanjenja emisije ugljikova (IV) oksida u atmosferu. Ukoliko se kao baza za izračun uzme u obzir godišnja proizvodnja N 220 na proizvodnoj liniji 48 100 od 12 000 tona te na proizvodnoj liniji 48 200 N 550 od 8000 tona i N 660 od 4000 tona iz tablice 6, vidljivo je smanjenje

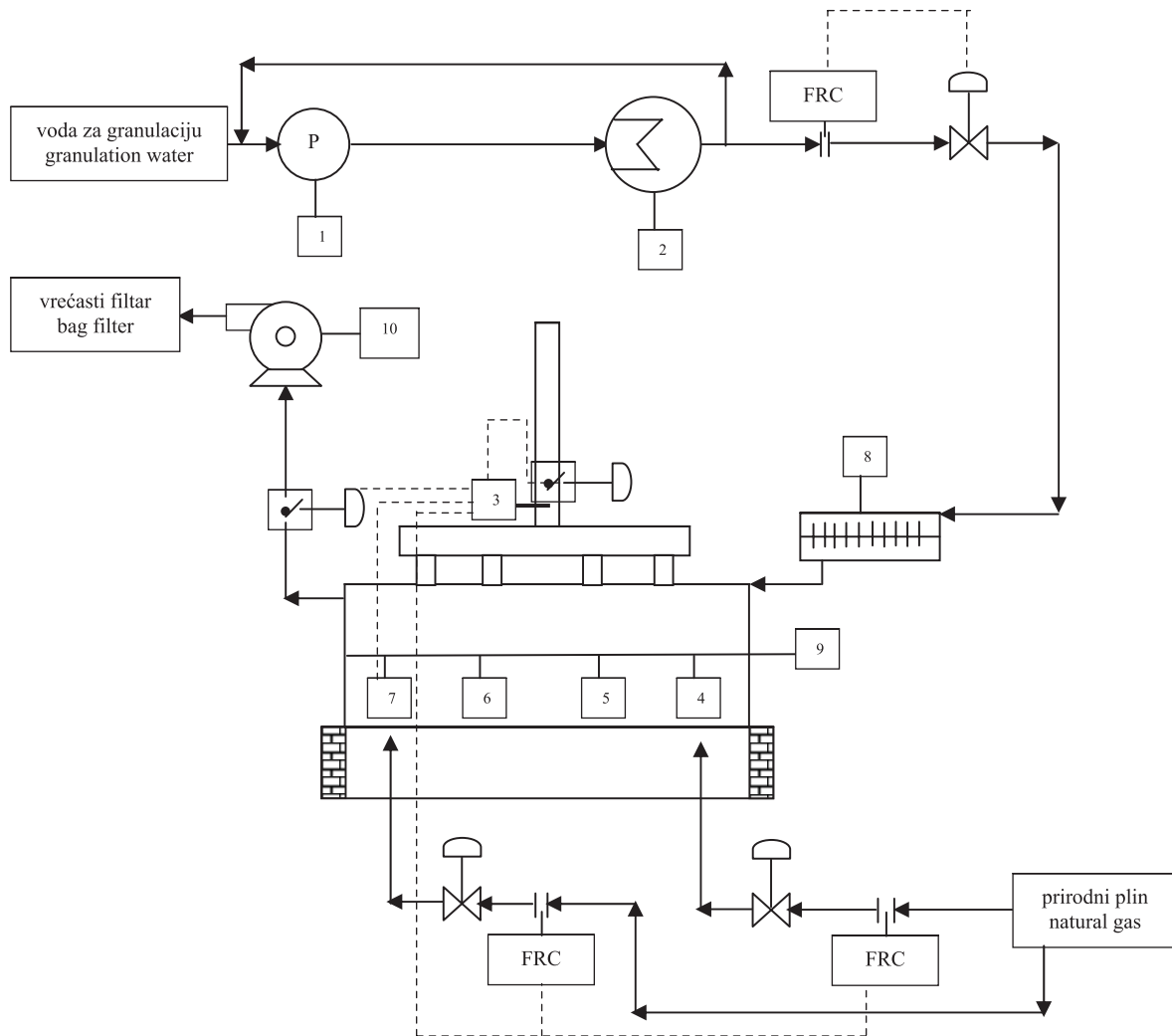
količine ispuštenog ugljikova (IV) oksida od 37,70 % do 41,17 %.

U proračun je uzeta aproksimacija da je prirodni plin 100 % metan te njegovo potpuno sagorijevanje budući da je u suvišku uvijek bilo od  $\varphi = 3,0$  % do 15,0 % kisika u sagorjevnim vrućim plinovima.

Tablica 6 – Smanjenje emisije ispuštenog ugljikova(IV) oksida u atmosferu kao posljedica poboljšanja rada rotirajućih sušionika

Table 6 – Reduction of carbon dioxide emissions as a result of rotary dryer improvement

N 220						
$\frac{\varphi(\text{O}_2 \text{ u sagorjevnim plinovima})}{\%}$	$\frac{Q_m(\text{N220})}{t a^{-1}}$	$\frac{v_c(\text{potrošak prirodnog plina})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{v(\text{specifični obujam prirodnog plina})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{\tau(\text{smanjenje CO}_2)}{\%}$
$\frac{\varphi(\text{O}_2 \text{ in tail gasses})}{\%}$	$\frac{Q_m(\text{N220})}{t a^{-1}}$	$\frac{v_c(\text{natural gas consumption})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{v(\text{specific volume of natural gas})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{\tau(\text{reduction of CO}_2)}{\%}$
3,0 do 15,0 3.0 to 15.0	12000	204	2448000	4809,66	1980,45	41,17
		120	1440000	2829,21		
N 550						
$\frac{\varphi(\text{O}_2 \text{ u sagorjevnim plinovima})}{\%}$	$\frac{Q_m(\text{N550})}{t a^{-1}}$	$\frac{v_c(\text{potrošak prirodnog plina})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{v(\text{specifični obujam prirodnog plina})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{\tau(\text{smanjenje CO}_2)}{\%}$
$\frac{\varphi(\text{O}_2 \text{ in tail gasses})}{\%}$	$\frac{Q_m(\text{N550})}{t a^{-1}}$	$\frac{v_c(\text{natural gas consumption})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{v(\text{specific volume of natural gas})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{\tau(\text{reduction of CO}_2)}{\%}$
3,0 do 15,0 3.0 to 15.0	8000	183	1 464 000	2876,37	1084,53	37,70
		114	912 000	1791,84		
N 660						
$\frac{\varphi(\text{O}_2 \text{ u sagorjevnim plinovima})}{\%}$	$\frac{Q_m(\text{N660})}{t a^{-1}}$	$\frac{v_c(\text{potrošak prirodnog plina})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{v(\text{specifični obujam prirodnog plina})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{\tau(\text{smanjenje CO}_2)}{\%}$
$\frac{\varphi(\text{O}_2 \text{ in tail gasses})}{\%}$	$\frac{Q_m(\text{N660})}{t a^{-1}}$	$\frac{v_c(\text{natural gas consumption})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{v(\text{specific volume of natural gas})}{m^3 t^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{Q_m(\text{CO}_2)}{t a^{-1}}$	$\frac{\tau(\text{reduction of CO}_2)}{\%}$
3,0 do 15,0 3.0 to 15.0	4000	129	516 000	1013,80	392,94	38,76
		79	316 000	620,86		



1. pumpa za procesnu vodu, 2. predgrijač vode, 3. kontinuirano *in situ* mjerilo obujamskog udjela kisika, 4. 5. 6. i 7. mjerila temperature granulirane uljno-pećne čađe, 8. granulator, 9. rotirajući sušionik, 10. ventilator za odsisavanje smjese plinova i čestica prašine uljno-pećne čađe

1. pump for process water, 2. process water preheater, 3. continuous *in situ* device for measurement of oxygen volume fraction, 4. 5. 6. i 7. thermoelements for granulated oil-furnace carbon black, 8. granulator, 9. rotary dryer, 10. blower for gas mixture and oil-furnace carbon black dust particles

Slika 2 – Shematski prikaz poboljšanja rada rotirajućeg sušionika

Fig. 2 – Schematic of rotary dryer improvement

## Zaključak

Radi potreba povećanja kapaciteta proizvodnje te uštede prirodnog plina provedeno je uspješno poboljšanje rada rotirajućih sušionika za sušenje mokro granuliranih uljno-pećnih čađa. Poboljšanje rada rotirajućih sušionika sastojalo se od mjera koje su se maksimalno mogle provesti s postojećom tehnološkom opremom bez većih financijskih ulaganja. Provedenim postupcima pokazalo se da se primjenom tople vode u operaciji mokre granulacije temperature od  $\theta = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  te promjenom načina sušenja uz održavanje obujamskog udjela kisika od  $\varphi = 3,0\%$  do  $5,0\%$  može uštedjeti od  $v = 50\text{ m}^3\text{ t}^{-1}$  do  $80\text{ m}^3\text{ t}^{-1}$  prirodnog plina ovisno o tipu uljno-pećne čađe. Navedenim postupcima omogućeno je povećanje kapaciteta proizvodnje u dijelu sušenja mokro granulirane čađe bez dodatnog toplinskog opterećenja ložišta i rotirajućeg bubnja sušionika. Kako bi

se u potpunosti postigao učinak uštede prirodnog plina te automatizirao proces, potrebno je provesti sljedeće mjere koje uključuju:

- ugradnju predgrijača vode s korištenjem otpadne procesne topline
- ugradnju kontinuiranog *in situ* mjerenja obujamskog udjela kisika u vrućim sagorjevnim plinovima
- ugradnju automatske zaklopke na dimnjaku sušionika
- uspostavljanje automatske regulacije između izmjerene udjela kisika u vrućim sagorjevnim plinovima, položaja automatskih klapni na dimnjaku i usisnom dijelu ventilatora za odsisavanje smjese plinova i čestica prašine uljno-pećne čađe te regulacije prirodnog plina za loženje.

Uz energetska uštedu optimizacijom rada sušionika uspjelo se postići smanjenje emisije ugljikova(IV) oksida u atmosferu za  $40\%$  u odnosu na početno stanje.

### Popis simbola List of symbols

$\alpha_1$	– unutarnji koeficijent prolaza topline, $W m^{-2} K^{-1}$ – internal heat transfer coefficient, $W m^{-2} K^{-1}$
$\alpha_2$	– vanjski koeficijent prolaza topline, $W m^{-2} K^{-1}$ – external heat transfer coefficient, $W m^{-2} K^{-1}$
$\delta$	– debljina sloja, mm – thickness, mm
$\Delta m$	– razlika mase, t – mass difference, t
$Q_m$	– maseni protok, $kg h^{-1}$ , $t a^{-1}$ – mass flow rate, $kg h^{-1}$ , $t a^{-1}$
$\varphi$	– obujamski udjel, % – volume fraction, %
$\lambda$	– koeficijent toplinske vodljivosti, $W m^{-1} K^{-1}$ – heat conductivity coefficient, $W m^{-1} K^{-1}$
$\eta$	– iskorištenje topline, % – efficiency of heat, %
$\tau$	– razlika postotka, % – percentage difference, %
$\theta$	– temperatura, °C – temperature, °C
$K$	– koeficijent prolaza topline, $W m^{-2} K^{-1}$ – heat transfer coefficient, $W m^{-2} K^{-1}$
$m$	– masa, t – mass, t
$s$	– specifična površina, $m^2 g^{-1}$ – specific surface area, $m^2 g^{-1}$

$v_c$	– potrošak prirodnog plina, $m^3 t^{-1}$ – natural gas consumption, $m^3 t^{-1}$
$Q_v$	– obujamski protok, $L h^{-1}$ – volume flow rate, $L h^{-1}$
$v$	– specifični obujam prirodnog plina, $m^3 t^{-1}$ – specific volume of natural gas, $m^3 t^{-1}$
$w$	– maseni udjel, % – mass fraction, %

### Literatura:

### References:

1. A. Williams-Gardener, *Industrial Drying, Chemical and Process Engineering Series*, Leonard Hill Book Company, London, 1971.
2. P. A. Schweitzer, *Handbook of Separation Techniques for Chemical Engineers*, McGraw-Hill, Inc., London, 1979.
3. R. H. Perry, D. Green, *Perry's Chemical Engineers Handbook*, 6<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill, Inc., New York, 1986.
4. F. P. Incropera, D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Jhon Wiley and Sons, New York, 1996.
5. W. L. McCabe, J. C. Smith, P. Harriott, *Unit Operations of Chemical Engineering, Fourth Edition*, McGraw-Hill International Editions, Chemical Engineering Series, Singapore, 1985.
6. E. Beer, *Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije*, SKTH, Kemija u industriji, Zagreb, 1985.
7. J. B. Donnet, R. C. Bansal, M. J. Wang, *Carbon Black, Second Edition Revised and Expanded*, Science and Technology, New York, 1993.

**SUMMARY****Improvement of the Rotary Dryers of Wet Pelletized Oil-Furnace Carbon Blacks***N. Zečević*

Due to the demand for higher production capacity and natural-gas energy savings, improvements were made to the rotary dryers in the drying process of wet pelletized oil-furnace carbon blacks. Since the rotary dryers were originally designed for drying semi-wet pelletized oil-furnace carbon blacks, they did not entirely satisfy optimal conditions for drying wet pelletized oil-furnace carbon blacks. Figure 1 shows the drying principle with key dimensions. The energy for drying the wet pelletized oil-furnace carbon blacks was provided by natural gas combustion in an open-furnace system with an uncontrolled feed of combustion air. Improvements on the rotary dryers were carried out by adjusting the excess oxygen in the gases passing through the butterfly valve on the dryer exhaust stack. By regulating the butterfly valve on the dryer exhaust stack, and applying the prescribed operations for drying wet pelletized oil furnace carbon blacks, the excess oxygen in the tail gases was adjusted in the range of  $\varphi = 3.0\%$  and  $5.0\%$ , depending on the type of oil-furnace carbon blacks. Suggested also is installation of a direct-reverse automatic butterfly valve on the dryer exhaust stack to automatically determine the volume fraction of oxygen in the tail gas, and the volume flow rate of natural gas for combustion. The results the improvements carried out are shown in Tables 3 to 5. Table 2 shows the thermal calculations for the hood of the rotary dryer. Preheating of the process water in the temperature range of  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  is also recommended using the net heat from the oil-furnace process for wet pelletization. The results of preheating the process water are shown in Table 1. Depending on the type of oil-furnace carbon black, the aforementioned improvements resulted in natural gas energy savings ranging from  $25\%$  to  $35\%$  in relation to the average natural gas requirement in the drying process, and thus a reduction in carbon emissions of up to  $40\%$ , which is shown in Table 6. A schematic of the next proposed situation for complete automatization of the process for drying wet pelletized oil-furnace carbon blacks is shown in Figure 2.

*Petrokemija d. d., Carbon black production,  
Kutina, Croatia*

*Received September 17, 2009  
Accepted February 11, 2010*