

# Iskorištenje topline otpadnih procesnih plinova u reaktoru za proizvodnju uljno-pećnih čađa

KUI – 3/2011  
Prispjelo 12. ožujka 2010.  
Prihvaćeno 5. srpnja 2010.

N. Zečević,\* D. Barta i Z. Bosak

Petrokemija d. d., Profitni centar Proizvodnja čađa,  
Sisačka bb, 44 320 Kutina, Hrvatska

Otpadni procesni plinovi niske donje toplinske vrijednosti koji nastaju kao sporedni proizvod industrijske proizvodnje uljno-pećnih čađa mogu se energetske učinkovito iskoristiti prije konačnog ispuštanja u atmosferu. Osim što se upotrebljavaju za sušenje mokro granulirane uljno-pećne čađe, proizvodnju pare i električne energije te se spaljuju na baklji, učinkovito se mogu iskoristiti i kao zamjena goriva u reaktorima za proizvodnju uljno-pećnih čađa uz povećanje iskorištenja ugljikovodične sirovine.

U radu je prikazano tehnološko-tehničko rješenje iskorištenja topline otpadnih procesnih plinova niske donje toplinske vrijednosti u reaktoru za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa uz povećanje iskorištenja ugljikovodične sirovine.

Uvođenje predgrianih procesnih otpadnih plinova niske donje toplinske vrijednosti u reaktor za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa ostvareno je serijskim spajanjem četiriju ventilatora. Sustav je izveden pomoću ventilatora predviđenih za pneumatski transport smjese uljno-pećne čađe u prahu i otpadnih procesnih plinova. Navedenom izvedbom osiguran je stabilan tehnološki proces uvođenja otpadnih procesnih plinova niske donje toplinske vrijednosti u reakcijsku zonu sagorijevanja prirodnog plina u predgrijanom zraku.

Prilikom proizvodnje uljno-pećne čađe N220 pokazano je da se upotrebom otpadnih procesnih plinova niske donje toplinske vrijednosti u količini  $Q$  od 1000 do 2000  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  po reaktoru ostvaruje ušteda prirodnog plina od 10 do 20 %, uz istodobno povećanje iskorištenja ugljikovodične sirovine od 7 do 9 %.

*Cljučne riječi:* Otpadni procesni plinovi, reaktor, uljno-pećna čađa, energetska učinkovitost

## Uvod

Tijekom industrijskog procesa proizvodnje uljno-pećnih čađa kao sporedni proizvod nastaju različiti procesni otpadni plinovi. S obzirom na njihov kvalitativno-kuantitativan sastav međusobno se razlikuju četiri vrste procesnih otpadnih plinova:

1. sagorjevni procesni otpadni plin, koji nastaje sagorijevanjem prirodnog plina u predgrijanom zraku,
2. reakcijski procesni otpadni plin, koji nastaje reakcijom ugljikovodične sirovine sa sagorjevnim procesnim otpadnim plinom,
3. filtrirani procesni otpadni plin, koji nastaje filtriranjem čestica uljno-pećne čađe od reakcijskog procesnog otpadnog plina,
4. procesni otpadni plin koji nastaje sagorijevanjem filtriranog procesnog otpadnog plina radi energetske učinkovitog iskorištenja topline

Tehnološki najpristupačniji i energetske najučinkovitiji za iskorištenje topline je filtrirani procesni otpadni plin. Donja toplinska vrijednost filtriranog procesnog otpadnog plina nalazi se u području od 1750 do 2250  $\text{kJ m}^{-3}$ , ovisno o vrsti uljno-pećne čađe. Prosječan kvalitativno-kuantitativan sastav suhog filtriranog procesnog otpadnog plina prikazan je u tablici 1. Osim navedenih vrijednosti u tablici 1, filtrirani procesni otpadni plin sadrži vodenu paru u obujamskom udjelu  $\varphi$  između 35 i 45 %. Sagorijevanjem filtriranih otpadnih procesnih plinova ostvaruje se energetske učinkovito iskorištenje topline koja se upotrebljava za sušenje mokro granulirane uljno-pećne čađe, proizvodnju pare i električne energije, pri čemu nastaje ekološki prihvatljiv procesni otpadni plin prije konačnog ispuštanja u atmosferu.<sup>1</sup> Međutim, ukoliko se ne može provesti energetske učinkovito spaljivanje filtriranog otpadnog procesnog plina, isti se, radi ostvarivanja zakonski definiranih graničnih vrijednosti onečišćujućih tvari u atmosferu, mora spaljivati na sustavu baklji.<sup>2,3,4</sup>

Osim navedenih postupaka obrade filtriranih procesnih otpadnih plinova isti se mogu energetske učinkovito iskoristiti i kao djelomična zamjena prirodnog plina u reaktorima za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa.<sup>5,6</sup> Da bi se provela djelomična zamjena prirodnog plina kao goriva u

\* Autor za korespondenciju: Nenad Zečević  
e-pošta: [nenad.zecevic@petrokemija.hr](mailto:nenad.zecevic@petrokemija.hr)

reaktorima za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa filtriranim procesnim otpadnim plinovima, potrebno je osigurati siguran transport istih u sagorjevnu zonu. Djelomičnom zamjenom prirodnog plina filtriranim procesnim otpadnim plinovima moguće je ostvariti uštedu prirodnog plina uz istodobno povećanje iskorištenja ugljikovodične sirovine.

T a b l i c a 1 – *Prosječan sastav suhog filtriranog procesnog otpadnog plina<sup>1</sup>*

T a b l e 1 – *Average composition of dried process tail gas<sup>1</sup>*

Sastav filtriranog procesnog otpadnog plina Process tail gas components	$\varphi$ / % $\varphi$ / %
dušik, N <sub>2</sub> nitrogen, N <sub>2</sub>	61 do 67 61 to 67
ugljikov dioksid, CO <sub>2</sub> carbon dioxide, CO <sub>2</sub>	3 do 5 3 to 5
ugljikov monoksid, CO carbon monoxide, CO	11 do 15 11 to 15
vodik, H <sub>2</sub> hydrogen, H <sub>2</sub>	12 do 24 12 to 24
metan, CH <sub>4</sub> methane, CH <sub>4</sub>	0,02 do 0,5 0.02 to 0.5
acetilen, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> acetylene, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,02 do 0,5 0.02 to 0.5

## Eksperimentalni dio

Sustav transporta filtriranog procesnog otpadnog plina u reaktor za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa ostvaren je pomoću toplinski izoliranog čeličnog cjevovoda i četiriju serijski spojenih centrifugalnih ventilatora visokog učinka. Centrifugalni ventilator visokog učinka za pneumatski transport uz brzinu rotacije od  $n = 2950 \text{ min}^{-1}$ , postiže radni tlak od  $p = 0,100 \text{ bar}$  iznad atmosferskog tlaka uz ostvarivanje transporta procesnog otpadnog plina u količini od  $Q = 10\,000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , temperature od  $200 \text{ do } 230 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sastoji se od kućišta i rotora promjera  $d = 1,0 \text{ m}$ , na kojem se nalazi 12 pravilno raspoređenih radialnih lopatica. Rotira se pomoću elektromotora snage  $75 \text{ kW}$  prijenosom koji se ostvaruje gumenim remenjem. Izvedba čeličnog cjevovoda omogućuje transport filtriranih procesnih otpadnih plinova iz dimnjaka vrećastih filtra obiju proizvodnih linija. Vođenje sustava za doziranje filtriranog procesnog otpadnog plina u reaktor za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa ostvareno je pomoću frekventnog pretvarača kojim se podešava brzina vrtnje prvog u nizu centrifugalnih ventilatora, dok su preostala tri imala nepromijenjenu brzinu vrtnje. Frekventni pretvarač je elektronički uređaj koji omogućava upravljanje brzinom vrtnje trofaznih motora pretvarajući fiksne vrijednosti mrežnog napona i frekvencije u promjenljive veličine. Mjerenje obujamskog protoka filtriranog procesnog otpadnog plina u reaktor za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa ostvareno je putem regulacijskih zaklopki i mjernih prigušnica. Mjerenje temperature plamena u reakcijskoj zoni reaktora za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa ostvareno je termoparovima sastava Pt-Ir-Pt. Kvalitativan sastav filtriranih

procesnih otpadnih plinova određen je u laboratoriju plinskim kromatografom ATIUNICAM 610, s molekulskim sistemom, detektorom toplinske vodljivosti i uz helij kao plin nosilac. Obujamski protok filtriranog procesnog otpadnog plina kroz plinski kromatograf iznosio je  $Q = 37,8 \pm 0,2 \text{ mL min}^{-1}$ . Temperaturni radni uvjeti plinskog kromatografa bili su: kolona  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , injektor  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  i detektor  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ . Na uzorcima filtriranih procesnih otpadnih plinova ispitivani su obujamski udjeli: ugljikova dioksida, ugljikova monoksida, vodika, metana, dušika i kisika.

Na izvedenom sustavu za transport filtriranih procesnih otpadnih plinova provjeravana je sigurnost i učinkovitost tehnološkog vođenja procesa tako da je mijenjana brzina vrtnje prvog u nizu centrifugalnog ventilatora putem frekventnog pretvarača. Nakon postizanja idealnih uvjeta za zamjenu jednog dijela obujamskog protoka prirodnog plina odgovarajućom količinom filtriranog procesnog otpadnog plina, ostvareni su najučinkovitiji uvjeti uštede prirodnog plina i ugljikovodične sirovine uz kontrolu temperature plamena u zoni reakcije.

## Rezultati i rasprava

Toplina potrebna za reakciju ugljikovodične sirovine sa sagorjevnim procesnim otpadnim plinovima u reaktoru za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa osigurava se sagorijevanjem prirodnog plina u suvišku predgrijanog zraka. U kontinuiranom procesu proizvodnje uljno-pećnih čađa Petrokemije d. d. za ostvarivanje željenih fizikalno-kemijskih svojstava iste, održavaju se omjeri sagorijevanja između predgrijanog zraka i prirodnog plina od 15 do 16. Na taj način osigurava se obujamski suvišak kisika u sagorjevnim procesnim otpadnim plinovima u području od 7,2 do 8,0 %. Obujamskim suviškom kisika u zoni reakcije osigurava se temperatura plamena od  $1500 \text{ do } 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ , što osigurava zaštitu vatrostalne opeke od njezinog taljenja. Predgrijani zrak za sagorijevanje transportira se u reaktor za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa pomoću puhalo kojim se ostvaruje tlak od  $0,420 \text{ bara}$  iznad atmosferskog tlaka u količini od  $5000 \text{ do } 7000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  po reaktoru. Navedenim tehnološkim parametrima osigurani su osnovni preduvjeti postizanja fizikalno-kemijskih karakteristika različitih "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa.

Kako bi se ostvarila energetska učinkovita zamjena prirodnog plina filtriranim procesnim otpadnim plinom, potrebno je za svaki  $\text{m}^3$  prirodnog plina uvesti u zonu sagorijevanja od  $17,5 \text{ do } 20 \text{ m}^3$  filtriranog procesnog otpadnog plina. Navedeni odnos vrijedi ukoliko se uzme u obzir da je prosječna donja toplinska vrijednost prirodnog plina  $34500 \text{ kJ m}^{-3}$ , odnosno filtriranog procesnog otpadnog plina od  $1750 \text{ do } 2000 \text{ kJ m}^{-3}$ . Iz navedenog odnosa proizlazi da je za uštedu prirodnog plina od 10 do 20 % potrebno uvesti od  $1000 \text{ do } 2000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  filtriranog procesnog otpadnog plina u reaktor za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa.

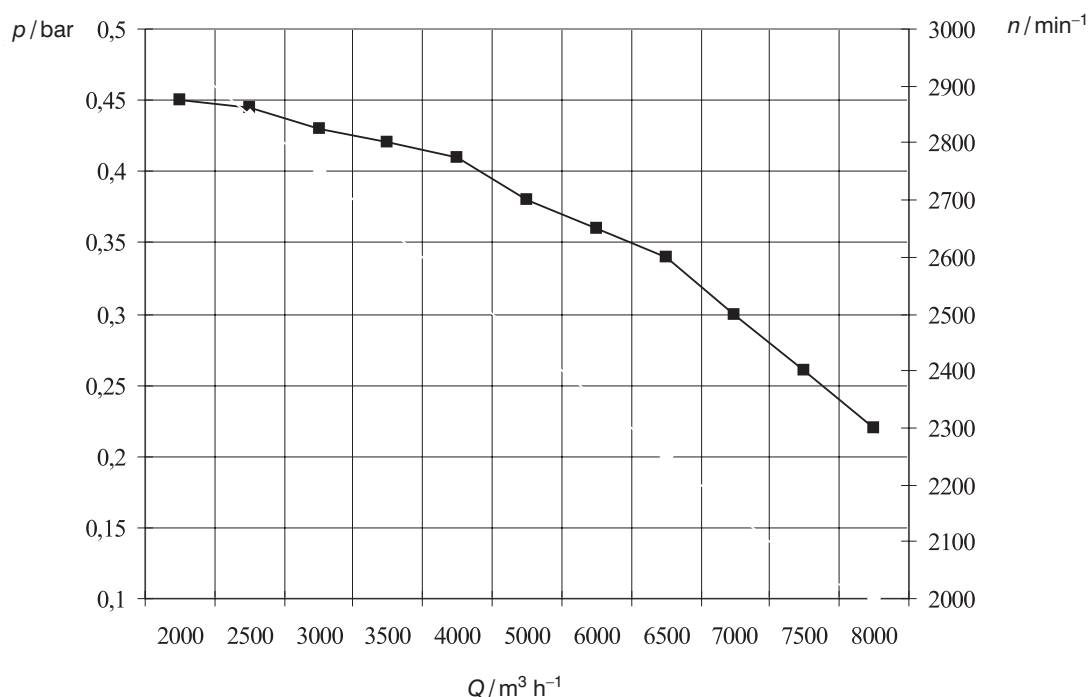
Budući da su u normalnom radu u funkciji dva reaktora za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa, izveden je sustav za dobavu filtriranog procesnog otpadnog plina u količini do  $4000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , temperature od  $200 \text{ do } 230 \text{ }^\circ\text{C}$  i tlaka od  $0,400 \text{ bara}$  iznad atmosferskog tlaka. Navedeni procesni uvjeti zahtijevali su upotrebu puhalo, budući da centrifugal-

ni ventilatori visokog učinka mogu postići maksimalni radni tlak od 0,100 bara iznad atmosferskog tlaka. Međutim proračunom se pokazalo da ukoliko se spoje četiri centrifugalna ventilatora u seriju, moguće je ostvariti zadovoljavanje spomenutih procesnih uvjeta.<sup>7,8</sup> Za tu namjenu upotrijebljeni su centrifugalni ventilatori visokog učinka koji se upotrebljavaju u pneumatskom transportu čestica prašine uljno-pećnih čađa u struji procesnih otpadnih plinova. S obzirom da je navedena izvedba zahtijevala minimalna investicijska ulaganja, izveden je sustav s četiri serijski spojena centrifugalna ventilatora za pneumatski transport. Regulacija tlaka ostvarila se pomoću frekventnog pretvarača koji je bio ugrađen na prvi u nizu elektromotora, dok su se preostala tri centrifugalna ventilatora rotirala konstantnom brzinom vrtnje od  $n = 2950 \text{ min}^{-1}$ . Frekventnim pretvaračem omogućeno je podešavanje brzine vrtnje prvog centrifugalnog ventilatora u području od  $n = 2000$  do  $2950 \text{ min}^{-1}$ .

Na slici 1 prikazana je ovisnost brzine rotacije prvog u nizu centrifugalnih ventilatora uz konstantnu brzinu rotacije preostala tri centrifugalna ventilatora o ostvarenom tlaku, odnosno obujamskom protoku filtriranog procesnog otpadnog plina. Iz navedenog prikaza vidljivo je da se podešavanjem brzine vrtnje prvog u nizu centrifugalnih ventilatora u području od  $n = 2700$  do  $2950 \text{ min}^{-1}$  postiže obujamski protok filtriranog procesnog otpadnog plina u području od  $2000$  do  $4000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , uz postizanje radnog tlaka od 0,400 do 0,450 bara iznad atmosferskog tlaka. Isto tako pomoću ugrađenih regulacijskih zaklopki i mjernih prigušnica ostvaren je siguran i stabilan rad sustava za transport filtriranog procesnog otpadnog plina iz dimnjaka velikih vrećastih fil-

tra obiju proizvodnih linija u reaktore za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa. Mjerenja su provedena radi dokazivanja proračunatih vrijednosti, budući da se nisu mogli naći odgovarajući literaturni podatci koji bi upućivali na identičan sustav za uvođenje filtriranih procesnih otpadnih plinova.

Nakon uspostavljanja stabilnog i sigurnog sustava za transport filtriranih procesnih otpadnih plinova iz dimnjaka vrećastih filtra obiju proizvodnih linija u reaktore za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa, pristupilo se postupnoj zamjeni jednog dijela obujamskog protoka prirodnog plina odgovarajućom količinom filtriranog procesnog otpadnog plina. Kako bi se ustanovila energetski učinkovita zamjena prirodnog plina filtriranim procesnim otpadnim plinom, nakon svakog uvođenja određenog obujma filtriranog procesnog otpadnog plina u reaktor za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa, mjerio se obujamski udjel suviška kisika u sagorjelim procesnim otpadnim plinovima te temperatura plamena u zoni reakcije. Uvođenje filtriranog procesnog otpadnog plina provodilo se tako da je uvijek zadržavana identična brzina strujanja sagorjelih procesnih otpadnih plinova duž reaktora kao i u slučaju konvencionalne proizvodnje "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa. Isto tako, provjeravao se utjecaj uvođenja filtriranog procesnog otpadnog plina iz vrećastog filtra linije 1, odnosno linije 2. U tablici 2 prikazani su rezultati uvođenja filtriranog procesnog otpadnog plina iz dimnjaka vrećastog filtra linije 1 uz zadržavanje optimalnih procesnih parametara proizvodnje potrebnih za postizanje fizikalno-kemijskih karakteristika "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa. U



Slika 1 – Karakteristika rada sustava četiri serijski spojena centrifugalna ventilatora. Tri centrifugalna ventilatora rotiraju konstantnom brzinom vrtnje od  $n = 2950 \text{ min}^{-1}$ , dok se na prvom u nizu brzina vrtnje mijenja pomoću frekventnog pretvarača u području od  $n = 2000$  do  $2950 \text{ min}^{-1}$ . Karakteristike filtriranog otpadnog procesnog plina:  $\vartheta = 200$  do  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\text{DTV} = 1750$  do  $2000 \text{ kJ m}^{-3}$ ;  $\rho = 0,689$  do  $0,704 \text{ kg m}^{-3}$ .

Fig. 1 – Performance curve of four centrifugal fans connected in series. Three centrifugal fans have constant rotation speed of  $n = 2950 \text{ rpm}$ , while the speed of the first centrifugal fan was varied using the frequency regulator in the range from  $n = 2000$  to  $2950 \text{ rpm}$ . Process tail gas properties were:  $\vartheta = 200$  to  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\text{LCV} = 1750$  to  $2000 \text{ kJ m}^{-3}$ ;  $\rho = 0.689$  to  $0.704 \text{ kg m}^{-3}$ .





slučaju ubacivanja filtriranih procesnih otpadnih plinova proizvodne linije 1.

Nakon uvođenja filtriranih procesnih otpadnih plinova, radi nepromijenjene donje toplinske vrijednosti reakcijske smjese, nije se očekivalo smanjenje temperature plamena u zoni reakcije. U slučaju sagorijevanja prirodnog plina s predgrijanim zrakom dolazi do smanjenja obujamskog udjela suviška kisika u sagorjivim procesnim otpadnim plinovima kako se smanjuje omjer sagorijevanja predgrijani zrak/prirodni plin. Posljedica smanjenja omjera sagorijevanja povećanje je temperature plamena u zoni reakcije. Međutim, navedeni odnos nije se pojavio u slučaju ubacivanja filtriranog procesnog otpadnog plina umjesto prirodnog plina. Naime, da bi se ostvarila termodinamička ravnoteža u zoni reakcije s obzirom na ukupnu donju toplinsku vrijednost, potrebno je bilo uvesti oko dvadeset puta veći obujam filtriranog procesnog otpadnog plina u odnosu na prirodni plin. Iako je temperatura filtriranog procesnog otpadnog plina prije ubacivanja u reaktore za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa iznosila 230 °C, veliki obujam istog u odnosu na prirodni plin uzrokovao je preuzimanje jednog dijela topline reakcije sagorijevanja. Navedeno preuzimanje topline reakcije uzrokovalo je smanjenje temperature plamena u zoni reakcije. Veće smanjenje temperature plamena u zoni reakcije izraženije je u slučaju ubacivanja filtriranih procesnih otpadnih plinova linije 1. Manja temperatura plamena u slučaju ubacivanja filtriranih procesnih otpadnih plinova u zonu reakcije iz dimnjaka vrećastog filtra linije 1 povezano je s manjom donjom toplinskom vrijednošću. Isto tako, pojavila se i razlika u suvišku obujamskog udjela kisika u sagorjivim procesnim otpadnim plinovima u slučaju uzimanja filtriranih procesnih otpadnih plinova iz dimnjaka vrećastog filtra linije 1, odnosno linije 2. Navedena činjenica također se objašnjava razlikom donjih toplinskih vrijednosti filtriranih procesnih otpadnih plinova.

Smanjenje obujamskog udjela kisika u sagorjivim procesnim otpadnim plinovima u odnosu na sagorijevanje samo prirodnog plina u suvišku predgrijanog zraka otvorilo je mogućnost proizvodnje "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa uz veće iskorištenje ugljikovodične sirovine. Naime, suvišak obujamskog udjela kisika u sagorjivim procesnim otpadnim plinovima nužan je kako ne bi došlo do oštećivanja vatrostralne opeke kojom je obzidan reaktor za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa. Vatrostralna opeka kvalitativno-kvantitativnog sastava od oko 92 %  $Al_2O_3$  i oko 8 %  $SiO_2$  ima temperaturno područje primjene do 1800 °C.

U isto vrijeme suvišak obujamskog udjela kisika u sagorjivim procesnim otpadnim plinovima uzrokuje smanjenje iskorištenja ugljikovodične sirovine, budući da je osnovni preduvjet za nastanak čestica uljno-pećnih čađa manjak obujamskog udjela kisika. Kada cjelokupni obujamski udjel kisika iz sagorjivih procesnih otpadnih plinova reagira s ugljikom iz ugljikovodične sirovine, tada su ostvareni uvjeti nastanka čestica uljno-pećnih čađa. Zbog toga je kod konvencionalnog procesa proizvodnje uljno-pećnih čađa potrebno ostvariti procesne uvjete gdje će se postići potpuna zaštita vatrostralne opeke reaktora uz postizanje maksimalno mogućeg iskorištenja ugljikovodične sirovine. Isto tako,

navedeni odnos također je povezan i s masenim udjelom ugljika u ugljikovodičnoj sirovini. U slučaju većeg masenog udjela ugljika u ugljikovodičnoj sirovini postiže se veće iskorištenje reakcije. Reakcijom ugljika iz ugljikovodične sirovine sa suviškom obujamskog udjela kisika iz predgrijanog zraka nastaje ugljikov dioksid, dok se ne ostvare uvjeti manjka obujamskog udjela kisika, nakon čega slijedi početak nastanka čestica uljno-pećne čađe. Znači, ukupna količina uvedene ugljikovodične sirovine u zonu reakcije može se podijeliti na ugljikovodičnu sirovinu koja se pretvara u reakcijski procesni otpadni plin i ugljikovodičnu sirovinu koja se pretvara u čestice uljno-pećne čađe.

Upravo navedeni odnos iskorišten je u daljnjem postupku iskorištenja topline filtriranih procesnih otpadnih plinova, tako da se proizvodnja provodi kod smanjenog udjela kisika u sagorjivim procesnim otpadnim plinovima, pri čemu se zadržava temperatura plamena u području od 1260 do 1500 °C. Veliki obujam filtriranog otpadnog procesnog plina umjesto prirodnog plina omogućuje zaštitu vatrostralne opeke uz istodobno smanjenje udjela kisika u sagorjivim procesnim otpadnim plinovima. U slučaju uvođenja filtriranih procesnih otpadnih plinova linije 1, kao što se vidi iz tablice 2, suvišak obujamskog udjela kisika iznosi oko 5,60 %. Sagorijevanjem prirodnog plina s predgrijanim zrakom temperature 260 °C uz suvišak obujamskog udjela kisika od 5,60 % ostvaruje se temperatura plamena u zoni reakcije od oko 1750 °C, koja može izazvati taljenje vatrostralne opeke. Za razliku od toga, kao što je vidljivo iz tablice 2, kod navedenog obujamskog udjela kisika u sagorjivim procesnim otpadnim plinovima ostvaruje se temperatura plamena u području od 1260 do 1480 °C. U slučaju uvođenja filtriranih procesnih otpadnih plinova linije 2 prosječni obujamski udjel kisika u sagorjivim procesnim otpadnim plinovima iznosi oko 4,20 %. Sagorijevanje prirodnog plina s predgrijanim zrakom temperature 260 °C uz suvišak obujamskog udjela kisika od 4,20 % uzrokovalo bi temperaturu plamena oko 1930 °C. Navedena temperatura, sigurno bi uzrokovala taljenje vatrostralne opeke. Međutim, kao što se vidi iz tablice 3, temperatura plamena u zoni reakcije koja se ostvaruje kod navedenog suviška obujamskog udjela kisika u sagorjivim procesnim otpadnim plinovima osigurava temperaturu plamena u području od 1490 do 1540 °C.

U tablicama 4 i 5 prikazani su procesni uvjeti proizvodnje "tvrdog" tipa uljno-pećne čađe N220 u slučaju uvođenja filtriranih procesnih otpadnih plinova linije 1, odnosno linije 2. Iz tablice 4 vidljivo je da se najveća ušteda prirodnog plina i iskorištenja ugljikovodične sirovine uz zadovoljavanje svih fizikalno-kemijskih karakteristika uljno-pećne čađe N220 postiže u području obujamskog protoka filtriranog procesnog otpadnog plina od 1000 do 1500  $m^3 h^{-1}$  po reaktoru. U slučaju povećanja obujamskog protoka filtriranog procesnog otpadnog plina iznad 1500  $m^3 h^{-1}$  dolazi do pada temperature plamena u zoni reakcije, pri čemu dolazi do narušavanja fizikalno-kemijskih karakteristika uljno-pećne čađe N220. Iz tablice 5 vidljivo je da se u cjelokupnom području obujamskog protoka filtriranog procesnog otpadnog plina s linije 2, ostvaruje podjednako iskorištenje ugljikovodične sirovine, uz udovoljavanje svih fizikalno-kemijskih karakteristika uljno-pećne čađe N220.

T a b l i c a 4 – *Procesni uvjeti proizvodnje uljno-pećne čađe N220 u slučaju uvođenja filtriranih procesnih otpadnih plinova iz dimnjaka vrećastog filtra linije 1*T a b l e 4 – *Process conditions for the production of oil-furnace carbon black N220 in the case of the introducing the process tail gases from the bag filter stack, Line 1*

Procesni parametar Process condition	1. proba Run 1	2. proba Run 2	3. proba Run 3	4. proba Run 4	5. proba Run 5	6. proba Run 6
$Q(\text{predgrijani zrak}) / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$ $Q(\text{preheated air}) / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$	7000	6000	5750	5500	5250	5000
$\vartheta(\text{predgrijani zrak}) / ^\circ\text{C}$ $\vartheta(\text{preheated air}) / ^\circ\text{C}$	260	260	260	260	260	260
$Q(\text{prirodni plin}) / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$ $Q(\text{natural gas}) / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$	450	400	387	375	362	350
$Q(\text{filtrirani procesni otpadni plina}) / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$ $Q(\text{process tail gas}) / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$	0	1000	1250	1500	1750	2000
$\vartheta(\text{filtrirani procesni otpadni plin}) / ^\circ\text{C}$ $\vartheta(\text{process tail gas}) / ^\circ\text{C}$	230	230	230	230	230	230
$DKV(\text{filtrirani procesni otpadni plin}) / \text{kJ m}^{-3}$ $LCV(\text{process tail gas}) / \text{kJ m}^{-3}$	1750	1750	1750	1750	1750	1750
$\varphi(\text{suvršak } \text{O}_2) / \%$ $\varphi(\text{excess } \text{O}_2) / \%$	7,60	5,80	5,60	5,70	5,50	5,70
$\vartheta(\text{plamen u zoni reakcije}) / ^\circ\text{C}$ $\vartheta(\text{flame in the reaction zone}) / ^\circ\text{C}$	1535	1470	1435	1365	1325	1255
$w(\text{C, ugljikovodična sirovina}) / \%$ $w(\text{C, hydrocarbon raw feedstock}) / \%$	90,73	90,73	90,73	90,73	90,73	90,73
$Q_m(\text{uljno-pećna čađa N220}) / \text{kg h}^{-1}$ $Q_m(\text{oil-furnace carbon black N220}) / \text{kg h}^{-1}$	0,70	0,69	0,68	0,68	0,67	0,68
$\eta(\text{prirodni plin}) / \text{m}^3 \text{t}^{-1}$ $\eta(\text{natural gas}) / \text{m}^3 \text{t}^{-1}$	642,8	579,8	565,5	548,4	536,2	515,0
$\eta(\text{ugljikovodična sirovina}) / \text{t t}^{-1}$ $\eta(\text{hydrocarbon raw feedstock}) / \text{t t}^{-1}$	1,90	1,77	1,77	1,77	1,78	1,78

T a b l i c a 5 – *Procesni uvjeti proizvodnje uljno-pećne čađe N220 u slučaju uvođenja filtriranih procesnih otpadnih plinova iz dimnjaka vrećastog filtra linije 2*T a b l e 5 – *Process conditions for the production of oil-furnace carbon black N220 in the case of introducing the process tail gases from the bag filter stack, Line 2*

Procesni parametar Process condition	1. proba Run 1	2. proba Run 2	3. proba Run 3	4. proba Run 4	5. proba Run 5	6. proba Run 6
$Q(\text{predgrijani zrak}) / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$ $Q(\text{preheated air}) / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$	7000	6000	5750	5500	5250	5000
$\vartheta(\text{predgrijani zrak}) / ^\circ\text{C}$ $\vartheta(\text{preheated air}) / ^\circ\text{C}$	260	260	260	260	260	260
$Q(\text{prirodni plin}) / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$ $Q(\text{natural gas}) / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$	450	400	387	375	362	350
$Q(\text{filtrirani procesni otpadni plina}) / \text{m}^3 \text{h}^{-1}$ $Q(\text{process tail gas}) / (\text{m}^3 \text{h}^{-1})$	0	1000	1250	1500	1750	2000
$\vartheta(\text{filtrirani procesni otpadni plin}) / ^\circ\text{C}$ $\vartheta(\text{process tail gas}) / ^\circ\text{C}$	230	230	230	230	230	230
$DKV(\text{filtrirani procesni otpadni plin}) / \text{kJ m}^{-3}$ $LCV(\text{process tail gas}) / \text{kJ m}^{-3}$	2000	2000	2000	2000	2000	2000
$\varphi(\text{suvršak } \text{O}_2) / \%$ $\varphi(\text{excess } \text{O}_2) / \%$	7,60	4,20	4,15	4,30	4,25	4,20
$\vartheta(\text{plamen u zoni reakcije}) / ^\circ\text{C}$ $\vartheta(\text{flame in the reaction zone}) / ^\circ\text{C}$	1550	1525	1515	1505	1500	1485
$w(\text{C, ugljikovodična sirovina}) / \%$ $w(\text{C, hydrocarbon raw feedstock}) / \%$	90,73	90,73	90,73	90,73	90,73	90,73
$Q_m(\text{uljno-pećna čađa N220}) / \text{kg h}^{-1}$ $Q_m(\text{oil-furnace carbon black N220}) / \text{kg h}^{-1}$	0,70	0,69	0,68	0,68	0,67	0,68
$\eta(\text{prirodni plin}) / \text{m}^3 \text{t}^{-1}$ $\eta(\text{natural gas}) / \text{m}^3 \text{t}^{-1}$	642,8	579,8	565,5	548,4	536,2	515,0
$\eta(\text{ugljikovodična sirovina}) / \text{t t}^{-1}$ $\eta(\text{hydrocarbon raw feedstock}) / \text{t t}^{-1}$	1,90	1,73	1,73	1,73	1,74	1,74

Kako bi se ostvario što stabilniji rad sustava ventilatora za uvođenje filtriranih procesnih otpadnih plinova uz maksimalnu uštedu prirodnog plina i iskorištenja ugljikovodične sirovine, idealni obujamski protok filtriranog procesnog otpadnog plina potrebno je održavati u području od 1500 do 2000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> po reaktoru.

Kod navedenih uvjeta proizvodnje uljno-pećne čađe N220 ostvaruje se ušteda prirodnog plina od 15 do 20 % uz povećanje iskorištenja ugljikovodične sirovine od 7 do 9 %.

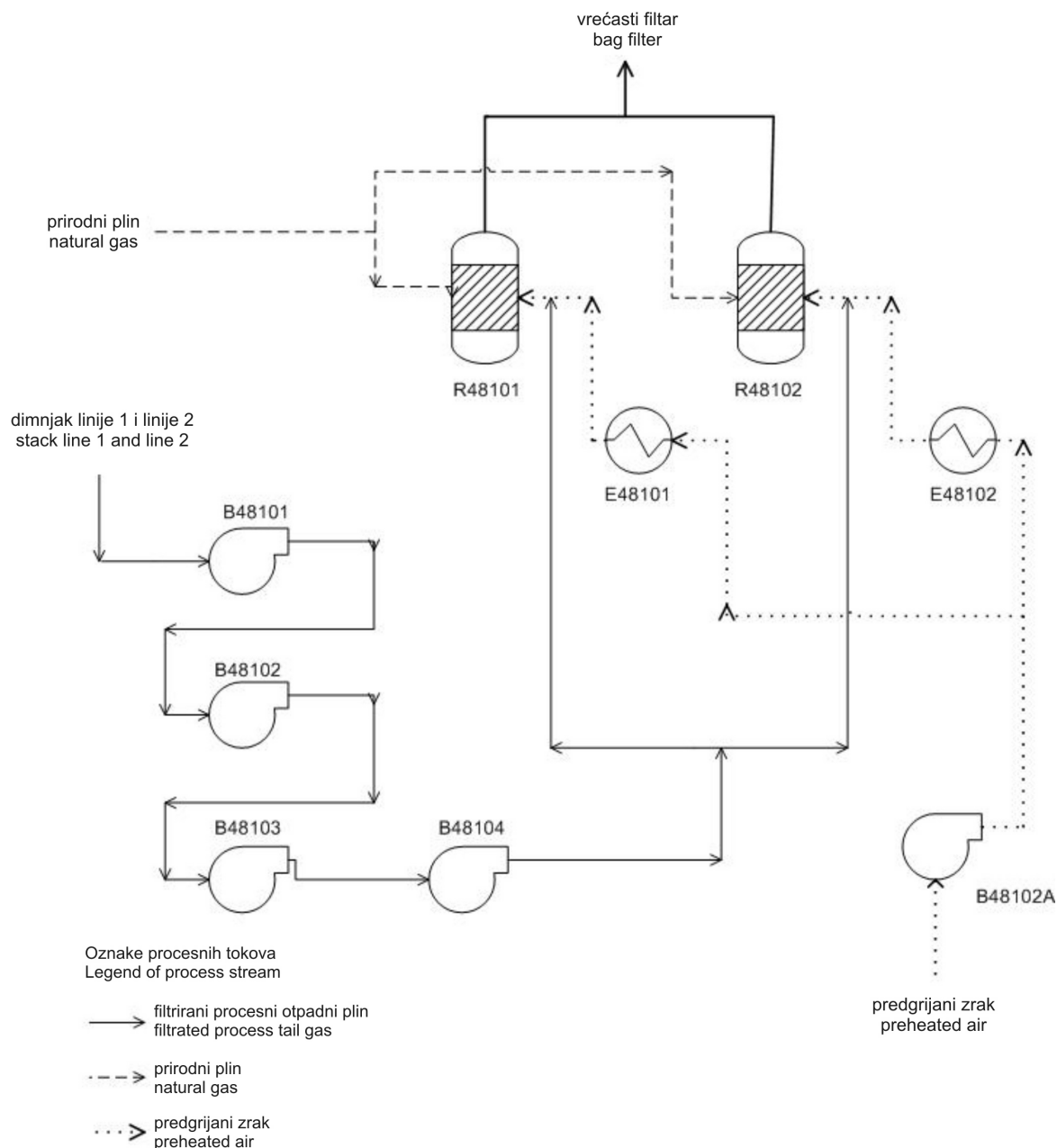
Na slici 2 prikazana je blok-shema sustava uvođenja filtriranih procesnih otpadnih plinova u reaktore za proizvodnju

“tvrdih” tipova uljno-pećnih čađa iz dimnjaka vrećastih filtra linije 1, odnosno linije 2.

### Zaključak

Radi postizanja energetske uštede na postrojenju za proizvodnju “tvrdih” tipova uljno-pećnih čađa primijenjen je tehnološki postupak iskorištenja topline otpadnih procesnih plinova.

Kako bi se ostvario siguran i stabilan tehnološki proces proizvodnje, izveden je sustav dobave filtriranih procesnih



Slika 2 – Blok-shema sustava za ubacivanje filtriranih procesnih otpadnih plinova u reaktore za proizvodnju “tvrdih” tipova uljno-pećnih čađa. (B48101/102/103/104 – centrifugalni ventilatori; R48101/102 – reaktori za proizvodnju “tvrdih” tipova uljno-pećnih čađa; E48101/102 – predgrijači procesnog zraka; B48102A – puhalo za dobavu predgrijanog zraka).

Fig. 2 – Schematics of the system for the introduction of process tail gases into reactors for the production of “hard” grade oil-furnace carbon blacks. (B48101/102/103/104 – centrifugal fans; R48101/102 – reactors for the production of “hard” grade oil-furnace carbon blacks; E48101/102 – heater for air combustion; B48102A – turbine for the preheated combustion air).

otpadnih plinova iz dimnjaka vrećastih filtra proizvodnih linija 1 i 2 u obliku četiri serijski spojena centrifugalna ventilatora visokog učinka.

S izvedenim sustavom za dobavu filtriranog procesnog otpadnog plina u reaktore za proizvodnju "tvrdih" tipova uljno-pećnih čađa ostvarena je ušteda prirodnog plina kao goriva od 10 do 20 %, uz istodobno povećanje iskorištenja ugljikovodične sirovine od 7 do 9 % prilikom proizvodnje uljno-pećne čađe N220.

### Popis simbola List of symbols

$d$	– promjer, m – diameter, m
$DTV$	– donja toplinska vrijednost, $\text{kJ m}^{-3}$
$LCV$	– low calorific value, $\text{kJ m}^{-3}$
$N$	– normalni uvjeti, 101325 Pa i 273,15 K – normal conditions, 101325 Pa i 273.15 K
$n$	– brzina vrtnje, $\text{min}^{-1}$ – rotation speed, $\text{min}^{-1}$
$p$	– tlak, bar – pressure, bar
$Q$	– obujamski protok, $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ – volume flow rate, $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$
$Q_m$	– maseni protok, $\text{kg h}^{-1}$ – mass flow rate, $\text{kg h}^{-1}$
$v$	– brzina strujanja, $\text{m s}^{-1}$ – stream velocity, $\text{m s}^{-1}$
$w$	– maseni udjel, % – mass fraction, %

$\eta$	– učinkovitost, $\text{t t}^{-1}, \text{m}^3 \text{t}^{-1}$ – efficiency, $\text{t t}^{-1}, \text{m}^3 \text{t}^{-1}$
$\vartheta$	– temperatura, °C – temperature, °C
$\rho$	– gustoća, $\text{kg m}^{-3}$ – density, $\text{kg m}^{-3}$
$\varphi$	– obujamski udjel, % – volume fraction, %

### Literatura References

1. J. B. Donnet, R. C. Bansal, M. J. Wang, *Carbon Black*, Second Edition Revised and Expanded, Science and Technology, New York, 1993, str. 24–46.
2. N. Zečević, D. Barta, Z. Bosak, G. Avirović, S. Šiklušić, Spaljivanje otpadnih procesnih plinova, *Kem. Ind.* **58** (2009) 11–23.
3. Narodne novine 133/2005. Uredba o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku.
4. Narodne novine 21/2007. Uredba o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz stacionarnih izvora.
5. K. L. Mills, P. J. Cheng, *Carbon Black Production*, *United States Patent*. 4368182, 11 Jan 1983; Int.Cl. **C01B** 31/02.
6. R. A. Davis, M. D. Nicholas, D. D. Smith, S. Wang, R. A. Wright, *Integrated reformer process for the production of carbon black*, *United States Patent*. 5011670, 30 April 1991; Int.Cl. **C01B** 3/38.
7. H. Goodfellow, E. Tahti, *Industrial Ventilation Design Guidebook*, San Diego, 2001., str. 742–773.
8. E. Beer, *Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije*, SKTH, Kemija u industriji, Zagreb, 1985., str. 103–108.



**SUMMARY****Utilization of the Net Heat Process Tail Gases in the Reactor for the Production of Oil-Furnace Carbon Black***N. Zečević, D. Barta, and Z. Bosak*

Tail gases of low calorific value, which are the by-product of oil-furnace carbon black industrial production, can be efficiently used as energy before their final release into the atmosphere. Apart from being used mainly for heating dryers, production of steam, electricity, or flared, they can also be used as a substitute for fuel in the reactor for the production of oil-furnace carbon blacks, thus increasing the efficiency of the hydrocarbon raw feedstock.

This technical paper represents the technical-technological solution for applying the waste heat of the low calorific tail gases in the reactor for the production of "hard" grade oil-furnace carbon blacks with savings of the hydrocarbon raw feedstock.

The introduction of the preheated low calorific tail gases in the reactor for the production of "hard" grade oil-furnace carbon blacks is achieved by serial cascading of four fans. The system consists of fans designed to pneumatically transport the mixture of process tail gases and oil-furnace carbon black dust particles. This ensures a stable technological process for the introduction of the low calorific process tail gases into the reaction zone where the natural gas and preheated air are combusted.

In the production of oil-furnace carbon black N220, it is shown that by using low calorific process tail gases in the amount from 1000 to 2000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> per reactor, savings from 10 to 20 % of natural gas and simultaneously 7 to 9 % of the hydrocarbon raw feedstocks were achieved.

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

*Received March 12, 2010*  
*Accepted July 5, 2010*