

Filtriranje čestica prašine uljno-pećnih čađa iz otpadnih procesnih plinova pomoću filter-vreća s PTFE-membranom

KUI – 1/2010
Prispjelo 20. travnja 2009.
Prihvaćeno 17. rujna 2009.

N. Zečević,^{a*} D. Barta,^a Z. Bosak,^a D. Čuzela,^b I. Puh^b

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

^b Tegas d. o. o., Zagreb, Hrvatska

Prilikom industrijskog procesa proizvodnje uljno-pećnih čađa u zrak se emitiraju otpadni procesni plinovi koji uz plinovite onečišćujuće tvari sadrže i čestice prašine uljno-pećnih čađa. Na postrojenju za proizvodnju uljno-pećne čađe Petrokemije d. d. postoji šest ispusta otpadnih procesnih plinova u zrak. Prije svakog ispusta postavljena je procesna oprema za filtriranje otpadnih procesnih plinova. Učinkovitost filtriranja ponajprije ovisi o konstrukcijskoj izvedbi opreme te odabranoj tehnologiji filtriranja. Blizina naselja, kakvoća zraka kutinskog područja s obzirom na lebdeće čestice PM10 i obveza tvrtke za stalnim unapređenjem stanja okoliša nameću potrebu pronalaznja sve boljih mjera smanjenja emisija čestica prašine uljno-pećnih čađa u zrak. Zbog toga je dizajniran poseban ciklofilter za filtriranje čestica prašine uljno-pećnih čađa od otpadnih procesnih plinova uz primjenu filter-vreća s PTFE-membranom (politetrafluoretilen). Posebna konstrukcija ciklofiltera ostvarena je kombinacijom centrifugalnog taložnika i vrećastog filtera "pulse-jet". Kombinacijom dviju tehnika filtriranja čestica prašine uljno-pećnih čađa od otpadnih procesnih plinova osigurava se maksimalna učinkovitost filtriranja od $\eta = 99,9\%$. U konstrukcijskom dijelu vrećastog filtera upotrebljavaju se filter-vreće najnovije generacije s ugrađenim PTFE-membranama, koje se naknadno čiste pomoću stlačenog zraka. Tehnologija filtriranja pomoću PTFE-membrana osigurava učinkovitost filtriranja od maksimalno $\gamma = 5 \text{ mg m}^{-3}$ čestica prašine uljno-pećnih čađa u pročišćenim izlaznim otpadnim procesnim plinovima. Učinkovitost filtriranja prati se kontinuiranim mjerenjem emisije čestica prašine uljno-pećnih čađa u pročišćenim izlaznim otpadnim procesnim plinovima putem automatskog neekstraktivnog uređaja. Ostvarena tehnologija filtriranja poslužit će kao osnova za ugradnju filter-vreća s PTFE-membranom u glavne operacijske filtre, čime će se osigurati poboljšana zaštita zraka grada Kutine s obzirom na lebdeće čestice PM10.

Ključne riječi: *Uljno-pećna čađa, ciklofilter, PTFE-membrana, lebdeće čestice PM10, zrak*

Uvod

Industrijskim uljno-pećnim postupkom proizvodnje čađe nastaju nepotpunim sagorijevanjem plinovitih ili tekućih ugljikovodika. Potrebna energija za nepotpuno sagorijevanje ugljikovodične sirovine postiže se oksidacijom prirodnog plina i jednim dijelom ugljikovodične sirovine predgrijanim zrakom. Nastale čestice uljno-pećne čađe nalaze se u smjesi s otpadnim procesnim plinovima. Da bi se uljno-pećna čađa iskoristila kao krajnji proizvod, potrebno je odvojiti ju od otpadnih procesnih plinova, povećati napsipnu gustoću te adekvatnim postupkom prevesti u granulirani oblik.

Filtriranje uljno-pećne čađe od otpadnih procesnih plinova provodi se u prvom stupnju putem centrifugalnih taložnika, a nakon toga vrećastim filterima. Centrifugalni taložnici, odnosno cikloni upotrebljavaju se kao pred-odvajači ili aglomeracijski cikloni u kojima dolazi do filtriranja najvećeg dijela čestica prašine uljno-pećnih čađa od otpadnih procesnih plinova. Svrha filtriranja ciklonom jest prethodno fil-

triranje čestica prašine, čime se smanjuje udjel čestica prašine u plinu na izlazu iz ciklona, te time postiže učinkovitije filtriranje u vrećastim filterima.

Potpuno filtriranje čestica prašine uljno-pećnih čađa od otpadnih procesnih plinova provodi se pomoću vrećastih filtera. S obzirom na princip čišćenja sustav vrećastog filtera dijeli se na sustav s protutlakom i sustav "pulse-jet". U sustavu s protutlakom u fazi čišćenja filter-vreća upotrebljavaju se pročišćeni otpadni procesni plinovi, dok se u sustavu "pulse-jet" upotrebljava stlačeni zrak. Prednost filter-traskih vreća "pulse-jet" je specifična površina za filtriranje, tako da u odnosu na filter s protutlakom mogu biti konstruirani manji uređaji za isti kapacitet filtriranja. Nedostatak istih je veće mehaničko naprezanje na filter-vrećama, odnosno kraći životni vijek.¹

Filter-vreće obično su izrađene od staklenih vlakana ili poliesterskog materijala. S obzirom na princip filtriranja filter-vreće dijele se na nemembransku dubinsku filtraciju i membransku površinsku filtraciju. Kod nemembranske dubinske filtracije upotrebljavaju se filter-sredstva izrađena od staklenih vlakana ili poliestera površinski obrađena grafitom i silicijem, dok se kod membranske površinske filtracije

*nenad.zecevic@petrokemija.hr

primjenjuje najnovija tehnika obrade staklenih i poliesterskih vlakana PTFE-membranom. Životni vijek takvih filter-vreća je od dvije do pet godina, ovisno o procesnim uvjetima rada i masenom udjelu sumpora u ugljikovodičnoj sirovini. Zaostali sadržaj čestica prašine uljno-pećnih čađa u pročišćenim otpadnim procesnim plinovima varira ovisno o tipu uljno-pećne čađe i upotrijebljenim filter-vrećama. Kod nemembranske dubinske filtracije postižu se vrijednosti emisija čestica prašine uljno-pećnih čađa u području od 30 do 50 mg m⁻³, dok se kod membranske površinske filtracije uz primjenu PTFE-membrana postižu maksimalne vrijednosti od 5 mg m⁻³.^{2,3}

Kako bi se postigla maksimalna učinkovitost filtriranja čestica prašine uljno-pećnih čađa od otpadnih procesnih plinova, izvedena je specijalna konstrukcija ciklofiltra. Specijalna konstrukcija ciklofiltra odnosi se na kombinaciju centrifugalnog taložnika i filtra "pulse-jet". Kod filtra "pulse-jet" primijenjena je najnovija tehnologija filtriranja pomoću filter-vreća izrađenih od poliestera uz primjenu PTFE-membrana.

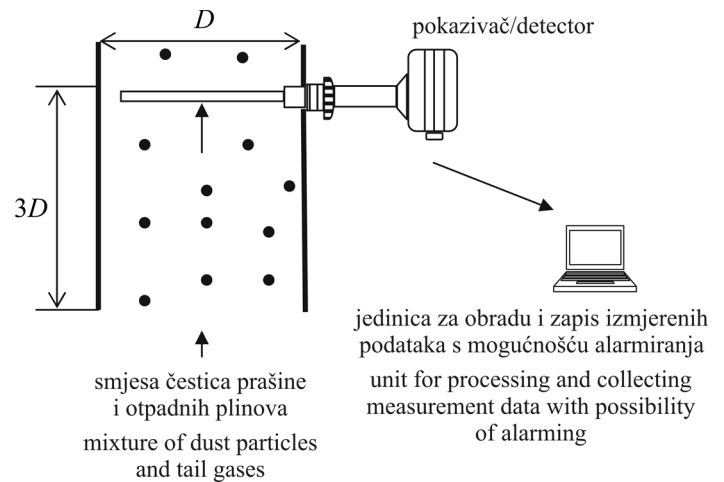
Eksperimentalni dio

Učinkovitost specijalne konstrukcije ciklofiltra te ugrađenih filter-vreća s PTFE-membranom automatski se provjerava putem neekstraktivnog uređaja za kontinuirano mjerenje masene koncentracije čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim otpadnim procesnim plinovima.^{4,6,7,8}

Osim toga, kao dodatna provjera učinkovitosti obavljeno je prvo mjerenje masene koncentracije čestica prašine uljno-pećnih čađa ručnom ekstraktivnom izokinetičkom gravimetrijskom metodom.^{5,6,7,8}

Za automatsko neekstraktivno kontinuirano mjerenje masene koncentracije čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim otpadnim procesnim plinovima upotrebljava se elektrodinamički uređaj DT270 – PCME Ltd.⁹ Uređaj je opremljen sondom i mikroprocesorom za obradu i zapis izmjerenih podataka te generiranje alarma u slučaju prekoračenja graničnih vrijednosti emisija u zrak. Uređaj radi na principu kontinuiranog međusobnog kontakta čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim otpadnim procesnim plinovima i mjerne sonde. Ostvareni kontakt uzrokuje stvaranje prijenosa električnog naboja, odnosno strujnog signala koji se računalno obrađuje. Baždarenjem uređaja ostvaruje se direktno proporcionalni odnos između generiranog strujnog signala i masene koncentracije čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim otpadnim procesnim plinovima.⁵ Uređaj je ugrađen u izlazni kanal otpadnih procesnih plinova na udaljenosti od tri promjera od početka izlaznog kanala. Na slici 1 prikazan je princip mjerenja masene koncentracije čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim otpadnim procesnim plinovima putem elektrodinamičkog uređaja DT270.

Za mjerenje masene koncentracije čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim otpadnim procesnim plinovima primijenjena je ekstraktivna ručna izokinetička gravimetrijska metoda. U navedenoj metodi primijenjen je sustav uzorkovanje čestica prašine Zambeli 6000 Isoplus. Određivanje masene koncentracije čestica prašine provedeno je laboratorijskom gravimetrijskom metodom.⁴



Slika 1 – Princip automatskog kontinuiranog neekstraktivnog mjerenja masene koncentracije čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim otpadnim procesnim plinovima putem elektrodinamičkog uređaja DT270

Fig. 1 – Principle of automatic continuous in situ measurement mass concentration of oil-furnace carbon black dust particles in outlet tail gases by electrodynamic device DT270

Rezultati i rasprava

Zbog specifičnih karakteristika čestica prašine uljno-pećnih čađa prilikom filtriranja od otpadnih procesnih plinova, kao što je lijepljenje na stijenke uređaja za filtriranje te vrlo malog stupnja učinkovitog filtriranja, konstrukcija ciklofiltra prilagođena je tako da se postigne $\eta = 99,9$ %-tno filtriranje, odnosno maksimalna izlazna masena koncentracija čestica prašine uljno-pećnih čađa od $\gamma = 5$ mg m⁻³. Da bi se navedeno postiglo, izveden je ciklofilter koji predstavlja kombinaciju centrifugalnog taložnika i vrećastog filtra koji se za čišćenje filter-vreća koristi impulsima stlačenog zraka, tzv. filtrom "pulse-jet".

Kod centrifugalnih taložnika čestice prašine odvajaju se od smjese otpadnih procesnih plinova putem jake centrifugalne sile. Sastoje se od vertikalnog cilindra s konusnim dnom, tangencijalnog ulaza u gornjoj zoni te izlaznog dijela za odvojenje čestice prašine u dnu konusa. Ulazna smjesa otpadnih procesnih plinova i čestica prašine prolazi kroz spiralnu putanju oko donjeg cilindričnog dijela i prema njemu. Razvijena centrifugalna sila u nastalom vrtlogu nastoji pomaknuti čestice radialno prema stijenci konusa centrifugalnog taložnika. Nakon toga čestice koje dođu do stijenke konusa talože se prema donjem dijelu konusa odakle se prazne zvjezdastim dozatorom. Dakle, centrifugalni taložnik, odnosno ciklon u osnovi je uređaj za filtriranje čestica prašine u kojem se umjesto relativno slabe gravitacijske sile, koja djeluje vertikalno primjenjuju jake centrifugalne sile, koje djeluju radialno. Centrifugalna sila F_c kod polumjera ciklona r jednaka je $m v_{\tan}^2 / r g_c$.

Omjer centrifugalne sile F_c prema sili gravitacije G naziva se faktor filtriranja, a definiran je izrazom:

$$\frac{F_c}{G} = \frac{m v_{\tan}^2 / r g_c}{m g / g_c} = \frac{v_{\tan}^2}{r g} \quad (1)$$

Čestice prašine koje ulaze u ciklon radijalno se ubrzavaju. Međutim, sila na česticu nije konstantna zbog promjene polumjera r te zbog toga što se tangencijalna brzina unutar vrtloga mijenja s vrijednošću r i s udaljenošću s obzirom na ulaz. Izračun putanja čestica izuzetno je težak, pa se zbog toga učinkovitost ciklona obično računa iz empirijskih odnosa. Učinkovitost obaranja čestica u ciklonu raste s gustoćom čestica, dok se smanjuje kako temperatura smjese otpadnih procesnih plinova raste zbog povećanja viskoznosti plina. Učinkovitost ovisi i o obujamnom protoku otpadnih procesnih plinova.¹⁰

U slučaju filtracije pomoću filtarskog sredstva dolazi do uklanjanja čestica iz smjese tekućine ili plina prolaskom iste kroz filtrirajuće sredstvo, pri čemu dolazi do taloženja čestica. Smjesa tekućine ili plina i čestica prašine prolazi kroz filtarsko sredstvo pomoću razlike tlaka koja se javlja duž sredstva. Tijekom operacije filtracije otpori obujamnom protoku smjese rastu s vremenom, pri čemu dolazi do začepjenja filtarskog sredstva. Glavni čimbenici tijekom filtracije su brzina strujanja kroz filtar te pad tlaka duž radne jedinice. Kako vrijeme prolazi, tijekom operacije filtracije dolazi do pojave smanjene brzine protoka ili do povećanja pada tlaka, odnosno do smanjene učinkovitosti filtriranja. Filtracija se s obzirom na princip filtriranja i čišćenja filtarskog sredstva može podijeliti na dubinsku nemembransku filtraciju i površinsku membransku filtraciju.

Kod dubinske nemembranske filtracije dolazi do stvaranja primarnog "kolača" čestica prašine (početni sloj čestica prašine) na površini filtarskog sredstva te akumulacije čestica prašine unutar istog. Početni sloj čestica prašine permanentno je uhvaćen unutar tkanine sredstva. Na taj način čestice prašine postaju sastavni dio filtarskog sredstva smanjujući obujamni protok te povećavajući pad tlaka duž filtarskog sredstva.

U slučaju površinske membranske filtracije dolazi do sakupljanja svih čestica prašine na površini filtarskog sredstva, pri čemu nema potrebe za formiranjem primarnog "kolača". Da bi se izbjeglo stvaranje primarnog "kolača", filtarsko sredstvo mora na sebi sadržavati PTFE-membranu. PTFE-membrana je glatka i mikroporozna pri čemu dopušta izvrsno obrušavanje "kolača" čestica prašine radi smanjivanja otpora prolaska otpadnih procesnih plinova. U usporedbi sa standardnim sredstvom PTFE-membrana posjeduje manju permeabilnost, što uzrokuje održavanje manjeg pada tlaka te veće obujamne protoke otpadnih procesnih plinova.

U operaciji filtracije čestice prašine najvećim dijelom zadržavaju se na primarnom "kolaču", odnosno PTFE-membrani te filtarskom sredstvu, dok vrlo mali dio izlazi u atmosferu s pročišćenim otpadnim procesnim plinovima. Ukupni pad tlaka je zbroj pada tlaka na filtarskom sredstvu te primarnom "kolaču", odnosno PTFE-membrani. Ukoliko je p_a ulazni tlak, p_b izlazni tlak i p' tlak na granici između "kolača", odnosno PTFE-membrane i filtarskog sredstva, tada je ukupni pad tlaka jednak:

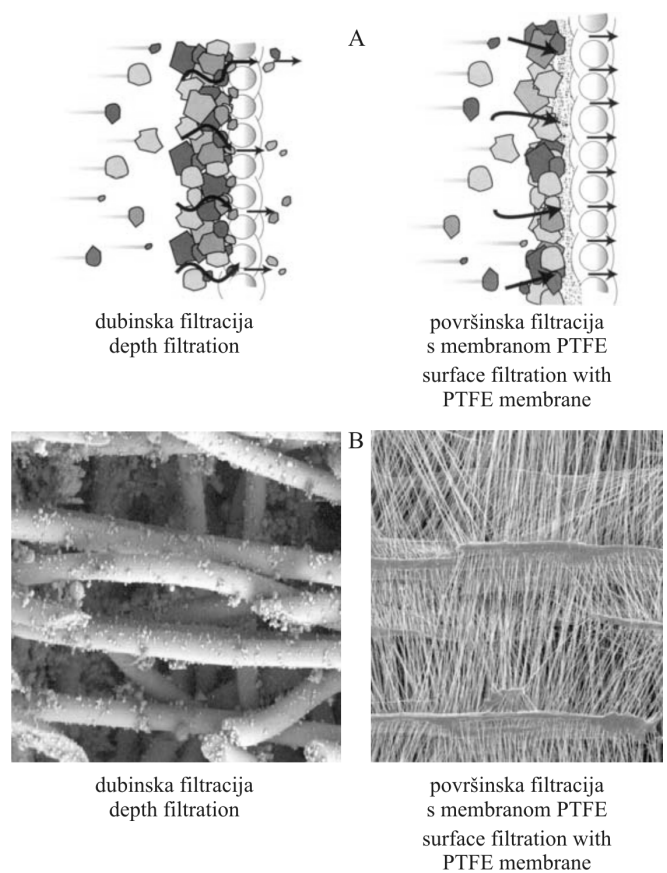
$$\Delta p = p_a - p_b = (p_a - p') + (p' - p_b) = \Delta p_c + \Delta p_m \quad (2)$$

Dakle, zbog karakterističnih svojstava PTFE-membrane vrijednost p' znatno je manja u usporedbi s primarnim "kolačem" čestica prašine, što uzrokuje manji ukupni pad tlaka tijekom operacije filtracije, odnosno učinkovitiju filtraci-

ju.¹⁰ Osim toga, zbog svojstva glatkoće i mikroporoznosti PTFE-membrana sposobna je za filtraciju podmikronskih čestica prašine, što osigurava maksimalnu izlaznu masenu koncentraciju čestica prašine od $\gamma = 5 \text{ mg m}^{-3}$. Na slici 2 prikazana je razlika između dubinske nemembranske filtracije sa stvaranjem primarnog "kolača" čestica prašine i površinske membranske filtracije pomoću ugrađene PTFE-membrane.² Kod površinske membranske filtracije s PTFE-membranom prikazane na slici 2B vidljiva je pravilna struktura PTFE-membrane, koja omogućava veću učinkovitost filtriranja, za razliku od dubinske ne-membranske filtracije, gdje otvorena struktura filtarskog sredstva dopušta česticama prašine i podmikronskim česticama slobodan prolaz.

Na slici 3 također je prikazana usporedba između primjene uobičajenog filtarskog sredstva u kojem se upotrebljava primarni "kolač" čestica prašine i filtarskog sredstva koji sadrži PTFE-membranu. Prikazana je usporedba između obujamnog protoka otpadnih procesnih plinova, emisije čestica prašine u zrak i ukupnog pada tlaka.³ Radi učinkovitije usporedbe uobičajenih filtara-vreća i filtara-vreća s PTFE-membranom vrijednosti obujamnog protoka i pada tlaka na slici 3 prikazane su u relativnim postocima jedne u odnosu na drugu.

Kombinacija opisana dva principa filtriranja čestica prašine iz smjese otpadnih procesnih plinova poslužila je kao osnova za projektiranje specijalno izvedenog ciklofiltra.



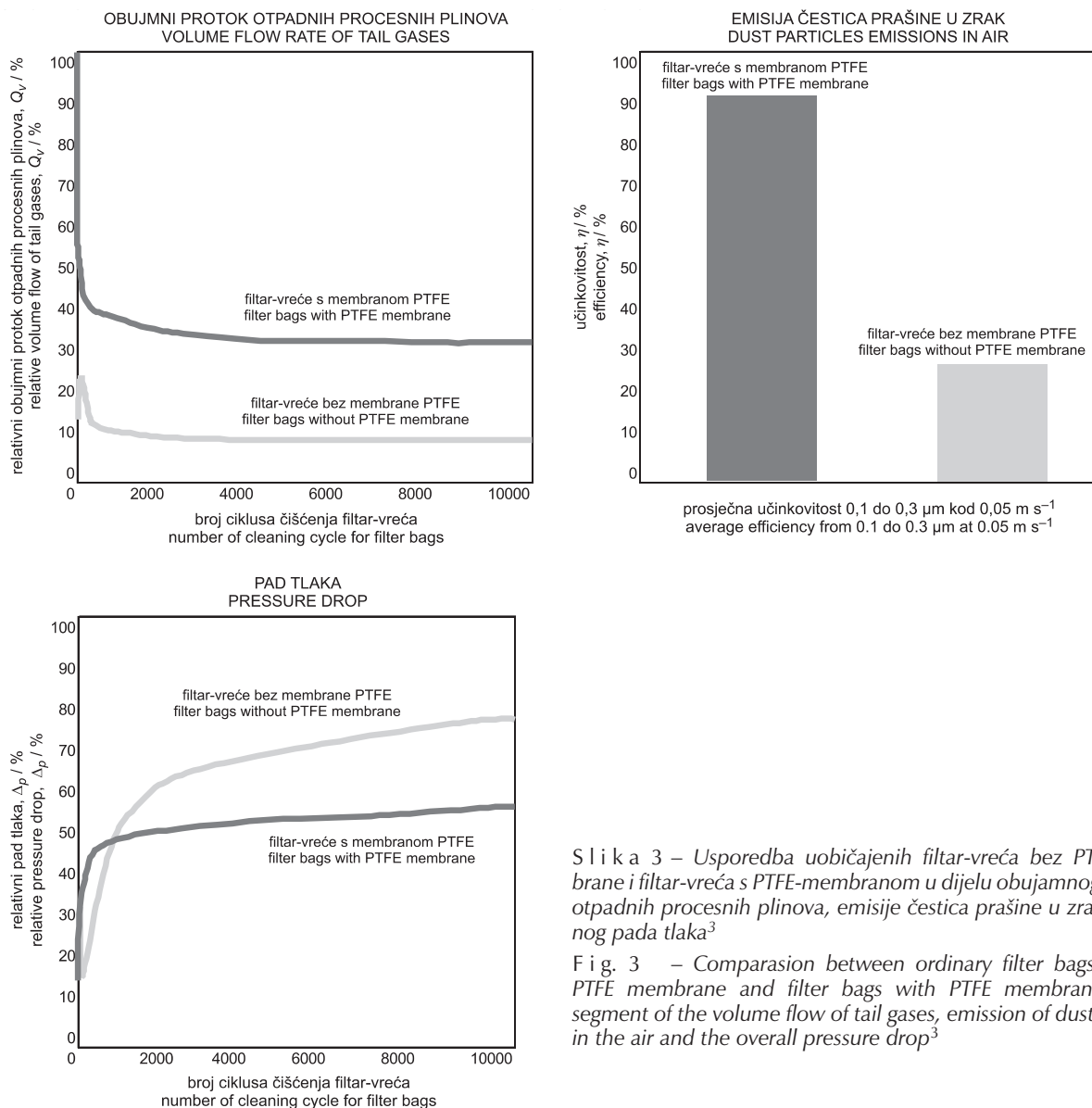
Slika 2 – Razlika između dubinske filtracije pomoću primarnog "kolača" čestica prašine i površinske filtracije pomoću PTFE-membrane (A – shematski prikaz, B – mikroskopski prikaz)²

Fig. 2 – Difference between depth filtration by primary "cake" of dust particles and surface filtration by PTFE membrane (A – schematic drawing, B – microscopic picture)²

Namjena specijalno izvedenog ciklofiltra otprašivanje je kritičnih mjesta u proizvodnom procesu proizvodnje uljno-pećne čađe kao što su: pužni transporter, pneumatski transport mokre granulacije, fluidizacijski hladnjak, elevator, sitasti separator te sustav pakiranja i otpreme uljno-pećne čađe u granuliranom obliku.

Konstruktivski dio ciklofiltra u kojem se nalaze filter-vreće s PTFE-membranom je pravokutnog oblika, dok je dio centrifugalnog taložnika stožastog oblika s dovoljno velikim kutom nagiba kako bi se maksimalno izbjeglo taloženje čestica prašine uljno-pećnih čađa. Navedena dva dijela međusobno su spojena prirubničkim spojem s posebnom brtvom radi sprječavanja propuštanja u atmosferu. Ulaz smjese otpadnih procesnih plinova i čestica prašine uljno-pećnih čađa tangencijalno je usmjeren u centrifugalni taložnik. Tangencijalni ulaz konstruiran je tako da se postigne maksimalni ulazni protok smjese otpadnih procesnih plinova i čestica prašine uljno-pećnih čađa, kako bi se postigla maksimalna učinkovitost filtriranja čestica prašine te rasterećenje dijela vrećastog filtra. Uz navedeni ulaz na središnjem dijelu gdje se nalaze smještene filter-vreće s PTFE-membranom nalazi se otvor sa slijepom prirubnicom kao eventualni

drugi ulaz smjese otpadnih procesnih plinova i čestica prašine uljno-pećnih čađa, ukoliko se u radu pokaže potreba rasterećenja donjeg tangencijalnog ulaza. Osim navedenog, donji konusni dio centrifugalnog taložnika dodatno je opremljen s četiri radialno razmještene mlaznice kroz koje postoji mogućnost upuhivanja stlačenog zraka u točno definiranim vremenskim razmacima, kako bi se dodatno omogućilo čišćenje stijenki konusa od nataložene uljno-pećne čađe u prahu. Lebdeće čestice prašine uljno-pećnih čađa završavaju u filter-vrećama s PTFE-membranom, gdje se ostvaruje 99,9 %-tno učinkovito filtriranje otpadnih procesnih plinova od čestica uljno-pećnih čađa. Pročišćeni otpadni procesni plinovi s maksimalnom masenom koncentracijom čestica prašine uljno-pećnih čađa od $\gamma = 5 \text{ mg m}^{-3}$ izlaze kroz dimovod u atmosferu. Sve površine ciklofiltra koje dolaze u kontakt s otpadnim procesnim plinovima i česticama prašine uljno-pećnih čađa izrađene su od nehrđajućeg čelika AISI 304. Filter-vreće s PTFE-membranom instalirane su na žičane košare također izrađene od nehrđajućeg materijala. Čišćenje filter-vreća s PTFE-membranom provodi se impulsom stlačenog zraka iz kolektora putem elektromagnetskih ventila. Upravljanje ciklofiltriranjem (radom elektromagnetskih ventila) provodi se putem elektronskog



Slika 3 – Usporedba uobičajenih filter-vreća bez PTFE-membrane i filter-vreća s PTFE-membranom u dijelu obujmnog protoka otpadnih procesnih plinova, emisije čestica prašine u zrak i ukupnog pada tlaka³

Fig. 3 – Comparison between ordinary filter bags without PTFE membrane and filter bags with PTFE membrane in the segment of the volume flow of tail gases, emission of dust particles in the air and the overall pressure drop³

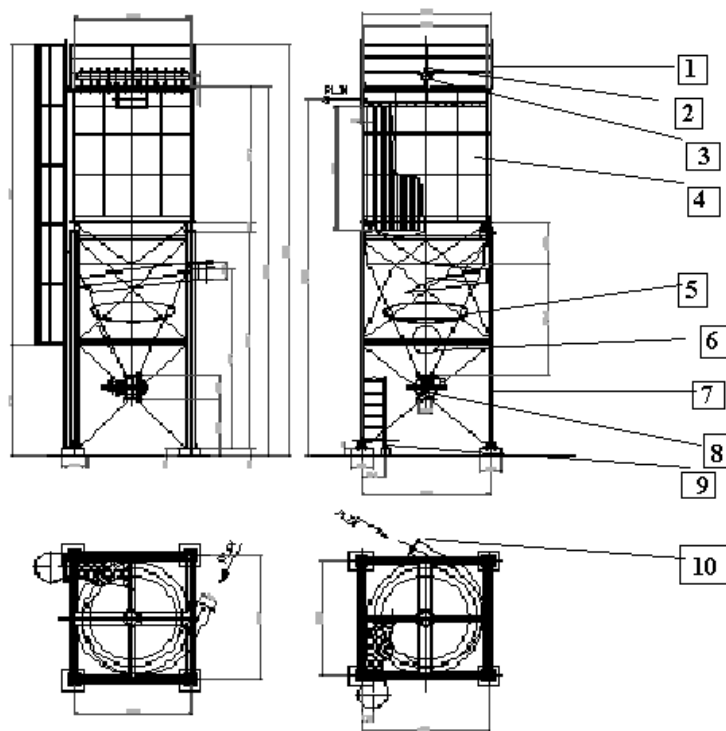
mikroprocesorskog programatora. Održavanje radnog tlaka u ciklofiltru, odnosno čišćenje filter-vreća s PTFE-membranom elektronski mikroprocesorski programator može provoditi na dva načina. Prvi način je upuhivanje stlačenog zraka u točno određenim vremenskim intervalima, dok je drugi način vezan za održavanje zadane vrijednosti ukupne razlike tlaka unutar ciklofiltra.

Zamjena filter-vreća s PTFE-membranom provodi se s čiste strane ciklofiltra u izlaznoj komori kroz poklopce na krovu ciklofiltra.

Transport smjese otpadnih procesnih plinova i čestica prašine uljno-pećnih čađa s mjesta koje je potrebno otprašivati provodi se putem ventilatora specijalno dizajniranog za navedenu namjenu.

Shematski prikaz konstruiranog ciklofiltra, gdje je vidljiva kombinacija centrifugalnog taložnika s tangencijalnim ulazom i dijela filtra "pulse-jet" s ugrađenim filter-vrećama prikazana je na slici 4.

Tehnički podaci konstruiranog ciklofiltra prikazani su u tablici 1, gdje su vidljivi svi bitni operativni i konstrukcijski podaci dizajniranog ciklofiltra za postizanje učinkovitog filtriranja.



Slika 4 – Shematski prikaz konstruiranog ciklofiltra (1 – zaštitna ograda, 2 – elektromagnetski ventil, 3 – kolektor stlačenog zraka za čišćenje filter-vreća s PTFE-membranom, 4 – kućište ciklofiltra, 5 – kolektor stlačenog zraka za čišćenje konusa centrifugalnog taložnika, 6 – kontrolni otvor, 7 – nosiva čelična konstrukcija, 8 – zvjezdasti dozator, 9 – penjalice, 10 – tangencijalni ulaz smjese otpadnih plinova i čestica prašine uljno-pećne čađe u ciklofiltru)

Fig. 4 – Schematic of the constructed cyclofilter (1 – protection hedge, 2 – electromagnetic valve, 3 – collector of pressurized air for cleaning the filter bags with PTFE membrane, 4 – casing of cyclofilter, 5 – collector of pressurized air for cleaning the centrifugal separator, 6 – control orifice, 7 – load steel construction, 8 – rotary valve, 9 – ladder, 10 – tangential inlet in cyclofilter for mixture of tail gases and dust particles of oil-furnace carbon black)

Tablica 1 – Operativno-tehnički podaci ciklofiltra za filtriranje čestica prašine uljno-pećnih čađa od otpadnih procesnih plinova
Table 1 – Operation-technical data of cyclofilter for filtration of dust particles oil-furnace carbon black from process tail gases

Smjesa za filtriranje Mixture for filtration	Čestice prašine uljno-pećne čađe + otpadni procesni plinovi Dust particles of oil-furnace carbon black + process tail gases
Q_V (otpadnog procesnog plina)/ ($m^3 h^{-1}$ kod $100\text{ }^\circ C$) Q_V (process tail gases)/ $m^3 h^{-1}$ at $100\text{ }^\circ C$	max. 12500
p (otpadnog procesnog plina na ulazu u ciklofiltru)/mbar p (process tail gases at enter in cyclofilter)/mbar	1013
ϑ (otpadnog procesnog plina na ulazu u ciklofiltru)/ $^\circ C$ ϑ (process tail gases at enter in cyclofilter)/ $^\circ C$	100 do 150 100 to 150
γ (čestice prašine uljno-pećne čađe na ulazu u ciklofiltru)/ $g m^{-3}$ γ (dust particles of oil-furnace carbon black at enter in cyclofilter)/ $g m^{-3}$	32 do 56 32 to 56
γ (čestice prašine uljno-pećne čađe na izlazu iz ciklofiltra)/ $mg m^{-3}$ γ (dust particles of oil-furnace carbon black at outlet from cyclofilter)/ $mg m^{-3}$	0 do 10 0 to 10
A (filtarska površina)/ m^2 A (filter area)/ m^2	219
Specifično filtarsko opterećenje/ $m\text{ min}^{-1}$ Specific filter load/ $m\text{ min}^{-1}$	0,95
Dimenzija filter-vreća/mm Dimension of filter bags/mm	$d\ 160 \cdot 3000$
n (filter-vreća)/kom n (filter bags)/pcs	144
Materijal filter-vreća Material of filter bags	Poliester laminiran PTFE-membranom Polyester laminated by PTFE membrane
p (radni tlak ciklofiltra)/mbar p (working pressure inside the cyclofilter)/mbar	15 do 20 15 to 20
Medij za čišćenje filter-vreća Medium for cleaning filter bags	stlačeni zrak compressed air
p (stlačeni zrak)/bar p (compressed air)/bar	6
Q_V (potrošnja stlačenog zraka)/ $m^3\text{ min}^{-1}$ Q_V (consumption of compressed air)/ $m^3\text{ min}^{-1}$	0,35

Nakon puštanja u rad učinkovitost filtriranja čestica prašine uljno-pećnih čađa od otpadnih procesnih plinova putem konstruiranog ciklofiltra provjeravana je ekstraktivnim izokinetičkim gravimetrijskim određivanjem masene koncentracije čestica prašine uljno-pećne čađe N 220 u izlaznim pročišćenim otpadnim procesnim plinovima te putem automatskog neekstraktivnog kontinuiranog mjerenja. U tablici 2 prikazane su vrijednosti mjerenja dobivene ekstraktivnim izokinetičkim gravimetrijskim mjerenjem. Iz tablice 2 vidljivo je da je ostvarena prosječna masena koncentracija čestica prašine uljno-pećne čađe N 220 u izlaznim pro-

čišćenim otpadnim procesnim plinovima od $\gamma = 1,7 \text{ mg m}^{-3}$, što udovoljava graničnu vrijednost emisije od $\gamma = 50 \text{ mg m}^{-3}$ te ujedno ispunjava uvjet specifikacije filter-vreća s PTFE-membranom od 5 mg m^{-3} .⁷ Isto tako vidljivo je da je prosječni omjer između emitiranog masenog protoka i graničnog masenog protoka 0,00854, što ukazuje na to da se kontrolno mjerenje mora provoditi povremeno, najmanje jedanput u pet godina.⁷

Međutim radi stalne sigurnosti u ispravan rad ciklofiltra te osiguranja zaštite zraka u izlaznom dimovodnom kanalu

Tablica 2 – Procesno-tehničke karakteristike ciklofiltra i masena koncentracija čestica prašine uljno-pećne čađe u pročišćenim otpadnim procesnim plinovima dobivena ekstraktivnim izokinetičkim gravimetrijskim mjerenjem

Table 2 – Process-technical characteristics of cyclofilter and mass concentration of oil-furnace carbon black dust particles in refined tail gases obtained by extractive isokinetic gravimetric measurement

	1. mjerenje 1. analysis	2. mjerenje 2. analysis	3. mjerenje 3. analysis	Prosjek Average
Promjer dimovodnog kanala/mm Diameter of outlet uptake channel/mm				380 · 30
φ (vodene pare u izlaznom pročišćenom otpadnom plinu)/% φ (water vapour in outlet refined tail gases)/%	0,04	0,04	0,04	0,04
ϑ (otpadnih procesnih plinova)/°C ϑ (tail gases)/°C	77,9	78,0	79,1	78,0
A(dimovodnog kanala)/m ² A(uptake channel)/m ²	0,752	0,752	0,752	0,752
Q_V (otpadnog procesnog plina u dimovodnom kanalu)/m s ⁻¹ Q_V (tail gases in uptake channel)/m s ⁻¹	2,30	2,58	2,54	2,47
Q_V (otpadnog plina u dimovodnom kanalu – radni uvjeti)/m ³ h ⁻¹ V (tail gases in uptake channel – working conditions)/m ³ h ⁻¹	6224	6982	6874	6693
Q_V (otpadnog plina u dimovodnom kanalu)/m ³ h ⁻¹ V (tail gases in uptake channel)/m ³ h ⁻¹	4667	5234	5137	5012
φ (O ₂ u pročišćenom otpadnom plinu)/% φ (O ₂ in outlet refined tail gases)/%	20,9	20,9	20,9	20,9
φ (CO ₂ u pročišćenom otpadnom plinu)/% φ (CO ₂ in outlet refined tail gases)/%	0,1	0,1	0,1	0,1
V (uzorkovanog pročišćenog otpadnog plina – radni uvjeti)/m ³ V (sample refined tail gases – working conditions)/m ³	0,150	0,150	0,130	0,143
V (uzorkovanog pročišćenog otpadnog plina – radni uvjeti)/m ³ V (sample refined tail gases – working conditions)/m ³	0,144	0,144	0,125	0,138
ϑ (mjerila otpadnog plina)/°C ϑ (tail gases meter)/°C	11	11	12	11,3
m (čestica prašine uljno-pećne čađe)/mg m (oil-furnace carbon black dust particles)/mg	0,200	0,300	0,200	0,233
γ (čestica prašine uljno-pećne čađe)/mg m ⁻³ γ (oil-furnace carbon black dust particles)/mg m ⁻³	1,4	2,1	1,6	1,7 $g_{CVE}/\text{mg m}^{-3}$ $g_{LVE}/\text{mg m}^{-3}$ 50
Q (čestica prašine uljno-pećne čađe)/g h ⁻¹ Q (oil-furnace carbon black dust particles)/g h ⁻¹	6,47	10,89	8,25	8,54 $Q_{CVE}/\text{g h}^{-1}$ $Q_{LVE}/\text{g h}^{-1}$ 1000
Q_E (emitiranih čestica prašine uljno-pećne čađe)/g h ⁻¹ Q_C (graničnih čestica prašine uljno-pećne čađe)/g h ⁻¹				
Q_E (emitted oil-furnace carbon black dust particles)/g h ⁻¹ Q_L (limited oil-furnace carbon black dust particles)/g h ⁻¹	0,00647	0,01089	0,00825	0,00854

provodi se automatsko kontinuirano neekstraktivno mjerenje masenih koncentracija čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim pročišćenim otpadnim procesnim plinovima. U tablici 3 prikazane su prosječne mjesečne vrijednosti masenih koncentracija čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim pročišćenim otpadnim procesnim plinovima u razdoblju od lipnja 2008. do ožujka 2009. Izmjerene prosječne mjesečne vrijednosti masenih koncentracija čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim pročišćenim otpadnim procesnim plinovima dobivene su iz izmjerenih prosječnih dnevnih vrijednosti koje su dobivene iz izmjerenih važećih polusatnih vrijednosti. Tijekom navedenog razdoblja mjerenja proizvodna linija 48 100 bila je ukupno 4 024 sata u proizvodnji pri čemu je izmjereno ukupno 8 048 vrijedećih polusatnih masenih koncentracija čestica prašine različitih vrsta uljno-pećnih čađa (N 220, N 330, N 375) u izlaznim pročišćenim otpadnim procesnim plinovima. Iz prikazanih rezultata vidljivo je da niti jedna izmjerena vrijedeća prosječna polusatna vrijednost masenih koncentracija čestica prašine uljno-pećnih čađa ne prelazi graničnu vrijednost emisije od 50 mg m^{-3} . Isto tako vidljivo je da niti jedna izmjerena vrijedeća polusatna vrijednost masenih koncentracija čestica prašine uljno-pećnih čađa ne prelazi graničnu vrijednost emisije od ukupno 5 mg m^{-3} zadanu specifikacijom instaliranih filter-vreća s PTFE-membranom. U navedenom razdoblju mjerenja izmjerena je maksimalna

vrijednost masene koncentracije čestica prašine uljno-pećne čađe od $\gamma = 4,7 \text{ mg m}^{-3}$, minimalna vrijednost iznosila je $\gamma = 0,9 \text{ mg m}^{-3}$, dok je ukupna prosječna vrijednost iznosila $\gamma = 3,4 \text{ mg m}^{-3}$.

Isto tako iz priloženih rezultata vidljivo je izvršno slaganje između automatskog kontinuiranog neekstraktivnog mjerenja i ekstraktivnog ručnog izokinetičkog gravimetrijskog mjerenja.

Zaključak

Posebnom konstrukcijom ciklofiltra koja čini kombinaciju centrifugalnog taložnika i filtra "pulse-jet", u kojem se upotrebljavaju filter-vreće s PTFE-membranom ostvarena je učinkovitost filtriranja s obzirom na masenu koncentraciju čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim pročišćenim otpadnim procesnim plinovima od $\gamma = 5 \text{ mg m}^{-3}$.

Budući da na postrojenju za proizvodnju uljno-pećne čađe u Kutini osim navedenog ciklofiltra postoji još pet ispusta na kojima se ostvaruje emisija u zrak čestica prašine uljno-pećnih čađa, primijenjena tehnologija filtriranja pomoću filter-vreća s PTFE-membranom poslužila je kao pilot projekt za dokazivanje učinkovitosti filtriranja. Ostvareni rezultati dali su izvršnu osnovu za buduću zamjenu konven-

T a b l i c a 3 – Prosječne mjesečne vrijednosti masenih koncentracija čestica prašine uljno-pećnih čađa u izlaznim pročišćenim otpadnim procesnim plinovima u razdoblju od lipnja 2008. do ožujka 2009. dobivene automatskim kontinuiranim neekstraktivnim mjerenjem

T a b l e 3 – Monthly average values of mass concentration of oil-furnace carbon black dust particles in refined outlet tail gases in period from June 2008 to March 2009 measured by automatic continuous in situ device

Mjesec/godina Month/year	Radni sati/h Working hour/h	Broj uzoraka Number of samples	Vrsta uljno- pećne čađe Type of oil-furnace carbon black	$\gamma_{\min}/\text{mg m}^{-3}$	$\gamma_{\max}/\text{mg m}^{-3}$	$\gamma_{\text{prosjeak}}/\text{mg m}^{-3}$ $\gamma_{\text{average}}/\text{mg m}^{-3}$
lipanj 2008. June 2008.	663,17	1326	N 220	1,2	4,7	4,0
srpanj 2008. July 2008.	737,99	1476	N 220; N 330; N 375	1,7	3,4	2,8
kolovoz 2008. August 2008.	348,05	696	N 330	1,4	4,4	3,8
rujan 2008. September 2008.	370,66	742	N 220	0,9	4,2	3,7
listopad 2008. October 2008.	637,00	1274	N 220	1,0	4,0	3,0
studeni 2008. November 2008.	399,16	798	N 220	1,1	3,9	3,1
prosinac 2008. December 2008.	462,59	925	N 220	1,2	3,7	3,5
siječanj 2008. January 2008.	0,00	0	-	-	-	-
veljača 2008. February 2008.	0,00	0	-	-	-	-
ožujak 2008. March 2008.	405,38	811	N 220; N 330	1,3	4,1	3,4
Ukupno Sum	4024,00	8048	prosjeak average	1,2	4,0	3,4

cionalnih filter-vreća bez PTFE-membrane s filter-vrećama s PTFE-membranom.

Nakon ugradnje filter-vreća s PTFE-membranom u preostalih pet jedinica za pročišćavanje otpadnih procesnih plinova, osim što se očekuje znatan utjecaj na poboljšanje kvalitete lokalnog zraka grada Kutine s obzirom na lebdeće čestice PM10, očekuju se i vrijedni učinci uštede električne energije u dijelu čišćenja filter-vreća sustavom protutlaka.

Popis simbola

List of symbols

A	– površina, m^2 – surface area, m^2
D	– promjer, mm – diameter, mm
F_c	– centrifugalna sila, N – centrifugal force, N
G	– gravitacijska sila, N – gravitation force, N
g	– akceleracija sile teže, $m\ s^{-2}$ – gravitational acceleration, $m\ s^{-2}$
g_c	– gravitacijski faktor proporcionalnosti – gravitation factor of proportionality
γ_{LVE}	– granična vrijednost emisije $mg\ m^{-3}$ – limit value of emission, $mg\ m^{-3}$
m	– masa čestica, mg – mass of particles, mg
n	– broj komada – number of pieces
N	– normalni uvjeti (101325 Pa i 273,15 K) – normal conditions (101325 Pa and 273,15 K)
p	– tlak, mbar – pressure, mbar
p_a	– ulazni tlak, mbar – inlet pressure, mbar
p_b	– izlazni tlak, mbar – outlet pressure, mbar
p'	– tlak na granici između "kolača"/PTFE-membrane i filter-skog sredstva, mbar – pressure between "cake"/PTFE membrane and filter medium, mbar
PM10	– aerodinamički promjer čestica prašine do 10 mikrometara, μm – aerodynamic diameter of dust particles to 10 micrometer, μm
PTFE	– politetrafluoretilen – polytetrafluoroethylene
Q	– maseni protok, $g\ h^{-1}$ – mass flow rate, $g\ h^{-1}$
Q_E	– emitirani maseni protok, $g\ h^{-1}$ – emitted mass flow rate, $g\ h^{-1}$

Q_L	– granični maseni protok, $g\ h^{-1}$ – limit mass flow rate, $g\ h^{-1}$
Q_V	– obujamni protok, $m^3\ min^{-1}$ – volume flow rate, $m^3\ min^{-1}$
r	– polumjer, mm – radius, mm
t	– temperatura, $^{\circ}C$ – temperature, $^{\circ}C$
V	– obujam, m^3 – volume, m^3
v_{tan}	– tangencijalna brzina čestica prašine, $m\ s^{-1}$ – tangential speed of dust particles, $m\ s^{-1}$
d	– promjer čestice, mm – particle diameter, mm
φ	– obujamni udjel, % – volume fraction, %
Δp	– ukupni pad tlaka, mbar – overall pressure drop, mbar
Δp_c	– pad tlaka duž "kolača"/PTFE-membrane, mbar – pressure drop along the "cake"/PTFE membrane, mbar
Δp_m	– pad tlak duž filter-skog sredstva, mbar – pressure drop along filter medium, mbar
γ	– masena koncentracija, $mg\ m^{-3}$ – mass concentration, $mg\ m^{-3}$
η	– učinkovitost, % – efficiency, %

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.
2. BHA Parts and Services Catalog, Baghouses, Precipitators
3. GORE Filtration Products Catalog
4. HRN ISO10155:1997; HRN EN13284–2:2004. Određivanje masenih koncentracija čvrstih čestica – automatsko praćenje masenih koncentracija čestica.
5. HRN ISO 9096:1997; HRN EN13284–1:2001. Određivanje masene koncentracije čvrstih čestica – ručna gravimetrijska metoda
6. Narodne novine 01/2006. Pravilnik o praćenju emisija onečišćujućih tvari u zrak iz stacionarnih izvora.
7. Narodne novine 21/2007. Uredba o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz stacionarnih izvora.
8. Narodne novine 178/2004 Zakon o zaštiti zraka.
9. DT270 Particulate Emissions Monitoring Systems, User Manual, 2001.
10. W. L. McCabe, J. C. Smith, P. Harriott, Unit Operations of Chemical Engineering, Fourth Edition, McGraw-Hill International Editions, Chemical Engineering Series, Singapore, 1985.

SUMMARY

Filtration of Oil-furnace Carbon Black Dust Particles from the Tail Gases by Filter Bags With PTFE MembraneN. Zečević,^{a*} D. Barta,^a D. Čuzela,^b and I. Puh^b

During the industrial production of oil furnace carbon black, tail gases containing oil-furnace carbon black dust particles are emitted to the atmosphere. In the carbon black plant, Petrokemija d. d., there are six exhaust stacks for tail gases. Each of them has installed process equipment for cleaning tail gases. Efficiency of cleaning mainly depends on equipment construction and cleaning technology. The vicinity of the town, quality of the air in the region of Kutina, regarding floating particles PM10, and corporate responsibility for further environmental improvement, imposes development of new methods that will decrease the emission of oil-furnace carbon black dust particles in the air. Combining centrifugal precipitator and filter, special construction of cyclofilter for filtration of oil-furnace carbon black dust particles from tail gases by using PTFE (polytetrafluoroethylene) membrane filter bags, was designed. Developed filtration technique provides $\eta = 99.9\%$ efficiency of filtration. Construction part of the filter contains the newest generation of PTFE membrane filter bags with the ability of jet pulse cleaning. Using the PTFE membrane filter bags technology, filtration efficiency for oil-furnace carbon black dust particles in tail gases of maximum $\gamma = 5 \text{ mg m}^{-3}$ can be achieved. The filtration efficiency was monitored continuously measuring the concentration of the oil-furnace carbon black dust particles in the tail gases with the help of *in situ* electronic probe. The accomplished filtration technology is the base for the installation of the PTFE membrane filter bags in the main operation filters which will provide better protection of the air in the town of Kutina against floating particles PM10.

^a Petrokemija d. d., Carbon black production, Kutina, Croatia

^b Tegus d. o. o., Zagreb, Croatia

Received April 20, 2009
Accepted September 17, 2009

