

Proračun i optimizacija skrubera za prečišćavanja otpadnih gasova koji sadrže amonijak

Zorana Lj. Arsenijević¹, Ivona R. Radović², Mirjana Lj. Kijevčanin² i Tatjana S. Kaluđerović Radoičić²

¹Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju tehnologiju i metalurgiju – institut od nacionalnog značaja, Beograd, Srbija

²Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija

Izvod

U ovom radu izvršen je proračun i dimenzionisanje dvostepenog skrubera sa pakovanim slojem za prečišćavanje otpadnog gasa iz hemijske industrije koji sadrži amonijak u koncentraciji od 1400 mg m⁻³. Za proračun su korišćene osnovne jednačine materijalnog bilansa, ravnotežni podaci, kao i generalizovana korelacija za pad pritiska. Prilikom proračuna i analize različitih konfiguracija korišćen je Katmar softver koji koristi generalizovanu korelaciju za pad pritiska za određivanje prečnika skrubera na osnovu dozvoljenog pada pritiska i udaljenosti od uslova plavljenja. Utvrđeno je da se optimalni rezultati postižu u dvostepenom uređaju, korišćenjem sumporne kiseline (70 %) za hemisorpciju amonijaka. Kao punjenje u koloni odabrani su Palovi prstenovi dimenzije 50 mm izrađeni od polipropilena. U radu su analizirane kolone prečnika $D_c = 2; 2,1$ i $2,2$ m. Sa aspekta protoka tečne faze prečnik kolone $D_c = 2$ m zadovoljava, a prema specifikaciji punjenja pad pritiska kroz ukupnu visinu sloja punjenja je oko 900 Pa. Utvrđeno je da se gradijent pritiska, a samim tim i ukupni pad pritiska u koloni smanjuje povećanjem prečnika kolone. Međutim, sa povećanjem prečnika kolone raste minimalni protok tečne faze potreban za kvašenje punjenja, te se potreban protok tečne faze povećava. Uzimajući u obzir sve procesne parametre, kao i zahtevanu efikasnost prečišćavanja otpadnog gasa, predložena je optimalna konfiguracija uređaja.

Ključne reči: Apsorpcija; dvostepeni skruber; pakovani sloj; uklanjanje amonijaka.

Available on-line at the Journal web address: <http://www.ache.org.rs/HI/>

STRUČNI RAD

UDC: 66.074.48:7.023.43:005.591.1

Hem. Ind. 78(2) 303-314 (2024)

1. INTRODUCTION

Apsorpcija u tečnosti je jedna od široko korišćenih metoda za tretman otpadnih gasova u cilju smanjenja emisije zagađujućih materija. Apsorpcija može biti čisto fizički fenomen, pri kome se komponenta gasne smeše koja se uklanja samo rastvara u tečnosti. Sa druge strane, hemisorpcija je proces u kome je apsorpcija praćena hemijskom reakcijom u tečnoj fazi između rastvorenog gasa i reaktanta iz tečnosti. Apsorpcija u tečnosti se može izvršiti u različitim kontaktnim uređajima u kojima je najznačajnije ostvariti što bolji prenos mase, odnosno veliku kontaktnu površinu između gasovite i tečne faze [1-3].

Jedan od najčešće korišćenih uređaja za prečišćavanje gasova apsorpcijom je skruber [4-7]. Skruberi se ubrajaju u grupu mokrih separatora. U odnosu na suve separatore, skruberi imaju brojne prednosti – manjih su dimenzija, omogućavaju istovremeno prečišćavanje i hlađenje gasova, kao i vraćanje rastvorljivih supstanci u proces nakon izdvajanja. Rad mokrih skrubera je bezbedniji za ljude i okolinu jer ne postoji mogućnost eksplozije ukoliko je izabrana odgovarajuća tečnost, a korozivne i otrovne materije se lako izdvajaju i neutrališu iz gasnog toka. Mokri skruberi nemaju pokretnih delova, relativno su jednostavne konstrukcije i jeftiniji su za održavanje u odnosu na separatore koji koriste suve postupke separacije. Problemi koji se mogu javiti kod skrubera sa mokrim postupkom separacije su pojava korozije i zamrzavanje tečnosti tokom zime. Ukoliko se koristi voda za prečišćavanje, izlazni gas može biti zasićen parom, a voda sa dna skrubera se u nekim slučajevima mora dodatno prečistiti.

Postoji veliki broj različitih konstrukcija skrubera poput kolona sa raspršivanjem, Venturi skrubera, centrifugalnih skrubera, skubera sa punjenjem (pakovani i fluidizovani sloj) ili sa podovima [6,8]. Princip rada je indentičan za sve tipove skrubera. U skruberu dolazi do kontakta tečne i gasovite faze i do prelaska komponenata iz gasovite u tečnu fazu nekim

Corresponding authors: Tatjana S. Kaluđerović Radoičić, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd, Srbija
Paper received: 11 September 2023; Paper accepted: 16 September 2024; Paper published: 24 September 2024.

E-mail: tanjak@tmf.bg.ac.rs

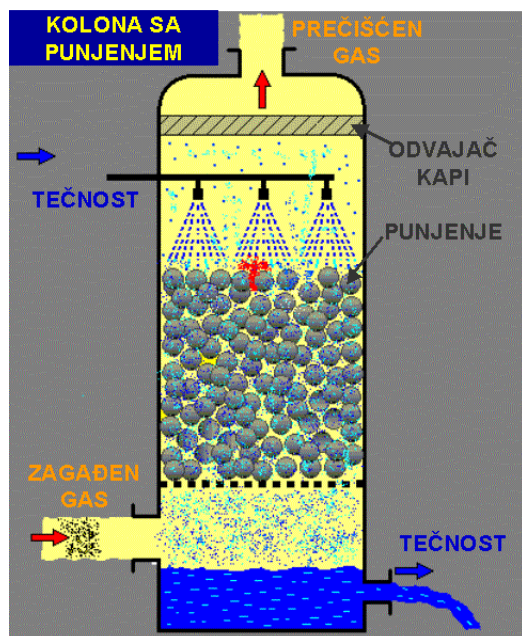
<https://doi.org/10.2298/HEMIND230911019A>



od mehanizama izdvajanja. Efikasnost skrubera zavisi od tipa uređaja, veličine kapi tečne faze i osobina odnosno rastvorljivosti komponenata koje se uklanjaju. Centrifugalni skruberi imaju najmanju efikasnost uklanjanja dok Venturi skruberi i skruberi sa pakovanim slojem mogu dostići efikasnost i od 99 % [5,9].

1. 1. Princip rada skrubera

Princip rada skrubera sa pakovanim slojem (punjenjem) prikazan je na Slici 1.



Slika 1. Šematski prikaz skrubera sa pakovanim slojem

Skruberi sa pakovanim slojem imaju sledeće karakteristike: (i) omogućavaju primenu velikih protoka tečnosti, (ii) vreme kontakta između gasa i tečnosti je dugo, (iii) maksimalni protoci gasa i tečnosti ograničeni su, za definisani presek kolone, plavljenjem i odnošenjem kapi, (iv) plavljenje nastaje kada brzina gasa, pri konstantnom protoku tečnosti, postane toliko visoka da sprečava protok tečnosti naniže kroz kolonu; u tački plavljenja postaje nemoguć suprotnostrujni tok gasa i tečnosti. Najčešći tipovi punjenja koja se koriste su lomljeni materijali, Rašigovi, Palovi, Lesingovi i spiralni prstenovi, Berlova i Intaloks (*Intalox*) sedla, metalne i plastične ljske i strukture, gredice, lopte, mrežasto punjenje i drugi. Važne karakteristike punjenja koje se razmatraju prilikom projektovanja skrubera su cena, specifična površina po jedinici zapremine punjenja, otpor strujanju fluida, mehanička i hemijska otpornost i vek trajanja. Pad pritiska većine komercijalnih punjenja je od 200-800 Pa/m visine sloja i opada sa porastom poroznosti punjenja.

1. 2. Proračun skrubera sa pakovanim slojem

Prilikom proračuna skrubera, poznate veličine su protok i karakteristike ulaznog gasa koji se prečišćava, njegova temperatura, pritisak i pH vrednost. Sastav, odnosno koncentracija komponenata u izlaznom gasu, je definisan važećom zakonskom regulativom, a poznate veličine su još i sastav i temperatura tečnosti koja se koristi za apsorpciju. Prilikom proračuna skrubera određuje se potreban protok tečnosti, prečnik kolone koji je neophodan da se izvrši proces apsorpcije, kao i visina pakovanog sloja. Takođe, potrebno je uspostaviti odgovarajući odnos protoka tečnosti i gasa za stabilan rad uređaja.

Određivanje potrebnog protoka tečnosti. Protoci i sastavi ulaznih i izlaznih struja su određeni materijalnim bilansom, odnosno operativnom linijom, jednačina (1):

$$Y_1 - Y_2 = \frac{L_m}{G_m} (X_2 - X_1) \quad (1)$$

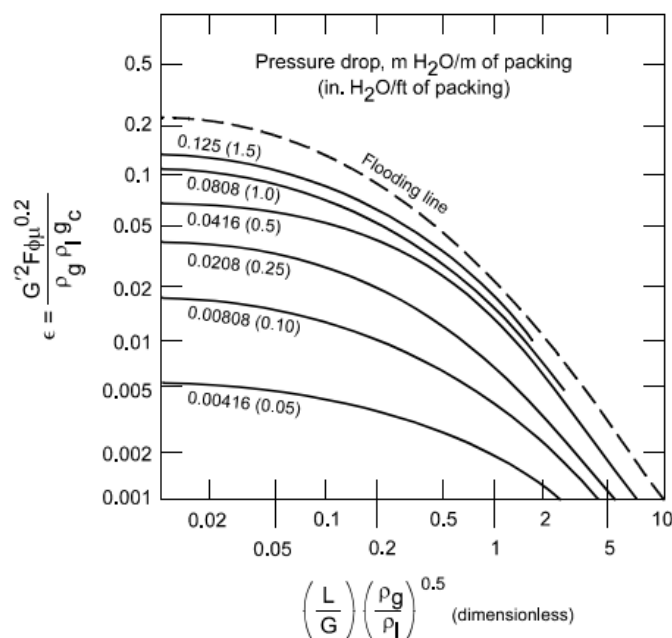
gde su:

- G_m / mol h⁻¹ - molski protok inertne gasne faze,
 L_m / mol h⁻¹ - molski protok inertne tečne faze,
 X - molski odnos rastvorene supstance u čistoj tečnosti
 Y - molski odnos rastvorene supstance u čistom gasu
 1, 2 - ulazna i izlazna struja, redom.

Za zadate procesne parametre na osnovu ravnotežne i operativne može se odrediti minimalni odnos protoka tečne i gasne faze $(L_m/G_m)_{min}$ odakle i minimalni protok tečne faze. Realna vrednost protoka tečne faze je 25-100 % veća od minimalnog protoka. Najčešće se prilikom projektovanja skrubera koristi vrednost protoka 50 % veća od minimalnog [9].

Određivanje prečnika kolone. Glavni parametar koji utiče na veličinu kolone sa pakovanim slojem je brzina gasa pri kojoj gas počinje da odnosi kapljice tečnosti ka vrhu kolone. Ako bi se protoci faza održavali konstantnim, a prečnik kolone smanjivao, u jednom trenutku tečnost bi počela da se zadržava u šupljinama pakovanja, mešanje između faza bi se smanjivalo, a pad pritiska rastao – odnos protoka u tom trenutku se naziva tačka opterećenja. Daljim smanjivanjem prečnika kolone, tečnost ispunjava sve šupljine i formira sloj iznad pakovanja. U tom trenutku pad pritiska značajno poraste, a kontakt faza je minimalan: ovo stanje se naziva plavljenje [9]. Utrđeno je da su optimalno projektovane kolone kada je brzina gasa 50-75 % od brzine plavljenja.

Procedura za određivanje optimalnog prečnika kolone bazira na generalizovanoj korelaciji za pad pritiska (*engl.* Generalized Pressure Drop Correlation, GPDC) prikazanoj na Slici 2 [4].



Slika 2. Generalizovana korelacija za pad pritiska i plavljenje [4]

Sa Slike 2 se vidi da je x-osa funkcija svojstva gasa i tečnosti dok y-osa pored gasa i tečnosti u razmatranje uzima i karakteristike pakovanja poput sferičnosti i poroznosti. Isprekidana linija predstavlja liniju plavljenja i daje minimalni prečnik kolone pri kome neće doći do plavljenja.

Procedura proračuna je da se za izračunatu vrednost apscise očitava koeficijent ϵ , za liniju plavljenja. Preuređivanjem jednačine na ordinati, izračunava se G' - maseni protok gasa po jedinici površine poprečnog preseka pri plavljenju, odnosno maseni fluks gasa pri plavljenju, jednačina (2):

$$G' = \left[\frac{\epsilon \rho_g \rho_l g}{a \phi \mu_l^{0.2}} \right]^{0.5} \quad (2)$$

gde su:

- ρ_g i ρ_l / kg m⁻³ - gustina gasne i tečne faze, redom,
 a / m² m⁻³ -specifična površina pakovanja,
 ϕ - odnos specifične težine tečnosti i specifične težine vode

μ / Pa s - viskoznost tečne faze
 g / m s⁻² - gravitaciona konstanta,

Realna vrednost fluksa gasne faze se usvaja kao 50-75 % ove vrednosti. Iz poznate vrednost operativnog protoka gasne faze i vrednosti fluksa, izračunava se površina poprečnog preseka cilindrične kolone A , jednačina (3):

$$A = \frac{G'}{G_{\text{radni}}} \quad (3)$$

Određivanje visine pakovanog sloja. Visina pakovanog sloja utiče na brzinu i efikasnost apsorpcije i izračunava se prema jednačini (4):

$$Z = \frac{G'}{K_{OG} a P} \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{(Y - Y^*)} \quad (4)$$

gde su:

Z / m - visina pakovanog sloja
 K_{OG} / mol m⁻² s⁻¹ Pa⁻¹ - koeficijent prolaza mase izražen u jedinicama gasne faze
 a / m² m⁻³ - specifična površina punjenja
 P / Pa - ukupan pritisak u sistemu
 Y_1 - ulazni molski odnos zagađujućeg gasa
 Y_2 - izlazni molski odnos zagađujućeg gasa
 Y^* - molski odnos zagađujućeg gasa u stanju ravnoteže

U Jednačini (4) množilac integrala ima dimenzije dužine (m) i definisan je kao visina prenosne jedinice, dok je izraz pod integralom bezdimenzionalan i predstavlja broj prenosnih jedinica potrebnih za formiranje ukupne visine, tako da je visina pakovanja, jednačina (5):

$$Z = \text{HTU} \times \text{NTU} \quad (5)$$

gde su:

HTU, m - visina prenosne jedinice, m
 NTU, m - broj prenosnih jedinica.

Ukoliko dolazi do odigravanja hemijske reakcije ili je zagađujuća materija izuzetno rastvorljiva, kao što je slučaj u ovom radu, broj prenosnih jedinica zavisi samo od molskog udela gasa na ulazu i izlazu iz kolone, jednačina (6) [9]:

$$\text{NTU} = \ln \frac{Y_1}{Y_2} \quad (6)$$

Za određivanje visine prenosne jedinice mogu se koristiti brojne korelacije koje se mogu naći u literaturi [4-6,8], a zasnivaju se na poznavanju vrste pakovanja, protocima i karakteristikama tečne i gasne faze i koncentraciji zagađujućeg gasa.

U ovom radu predstavljen je proračun skrubera sa pakovanim slojem za uklanjanje amonijaka iz otpadnih gasova hemijske industrije [10-14]. Amonijak se iz vazduha može ukloniti apsorpcijom zahvaljujući njegovoj dobroj rastvorljivosti u vodi. Sama apsorpcija se najčešće pospešuje hemijskom reakcijom sa sumpornom kiselinom kako bi se povećala efikasnost procesa. Punjenje koje se nalazi u skruberu povećava dodirnu površinu između gasa i tečnosti koja se raspršuje na vrhu skrubera i teče naniže prekrivajući pakovani sloj i zidove kolone. U procesu apsorpcije dolazi do prenosa zagađujuće materije iz gasa u tečnost i na vrhu kolone se dobija prečišćen gas.

2. METODA PRORAČUNA SKRUBERA – KATMAR SOFTVER

Program "Packed Column Calculator" – Katmar softver (Katmar Software Inc, Kanada) omogućava proračun potrebnog prečnika skrubera sa pakovanim slojem, na osnovu dozvoljenog pada pritiska, udaljenosti od uslova plavljenja ili udaljenosti od maksimalnog radnog kapaciteta (*engl.* Maximum Operating Capacity, MOC). Za kolone poznatog prečnika se može proceniti uticaj promene radnih uslova ili uticaj korišćenja različitih pakovanja [15].

Program uključuje dve metode projektovanja koje se najčešće koriste. Prva od njih je generalizovana korelacija pada pritiska (*engl.* Generalized Pressure-Drop Correlation, GPDC), koju je prvobitno razvio Leva [16] i ovde se koristi u obliku koji je dao Ekert (Eckert) [17]. Drugi metod je onaj koji je razvio Robins (Robbins) [18]. Obe korišćene korelacije su empirijske.

Ove dve metode se međusobno dopunjuju u tome što je GPDC zasnovan na originalnom radu koji koreliše podatke o plavljenju koji su zatim prošireni na režim manjih protoka tečnosti, dok se Robinsova metoda zasniva na protoku gasa kroz suve slojeve pakovanja.

Drugi razlog za korišćenje dve metode je da se ukaže da metode projektovanja pakovanih kolona nisu apsolutne i da različite korelacije daju različite odgovore. Ovo ima veze sa prirodom procesa koliko i sa razlikama između korelacija.

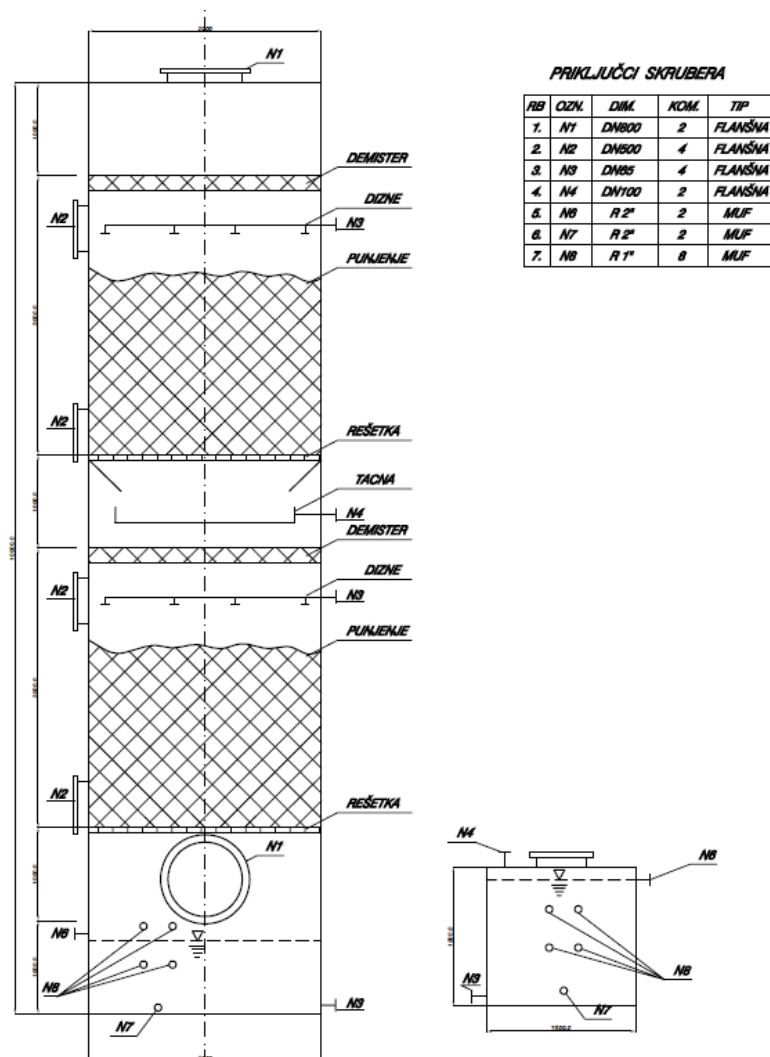
Kada se metode primene za kolone projektovane za tipične režime rada, različite korelacije će težiti da daju slične rezultate i dodatno će potvrditi pouzdanost proračuna. Međutim, kada se koriste na granicama mogućih operativnih režima, rezultati će se najčešće razlikovati, što ukazuje da se radi u rizičnijoj oblasti i da je naknadna provera potrebna i opravdana [14].

3. REZULTATI I DISKUSIJA

U skruber, sa donje strane, ulazi vazduh temperature 65 °C, na pritisku 101 kPa, zapreminskog protoka 20.000 m³ h⁻¹, koji sadrži 1400 mg m⁻³ (2000 ppm) amonijaka, NH₃. Kao tečna faza se u skruberu koristi sumporna kiselina koncentracije 70 %, masenog protoka 27.964 kg h⁻¹ (zapreminski protok 17,6 m³ h⁻¹). Prilikom kontakta gasne i tečne faze dolazi do hemisorpcije amonijaka sumpornom kiselinom i do stvaranja amonijum sulfata, (NH₄)₂SO₄, Jednačina (7):



Skruber je projektovan tako da se proces uklanjanja amonijaka odvija u dva stepena, kao što je prikazano na Slici 3.



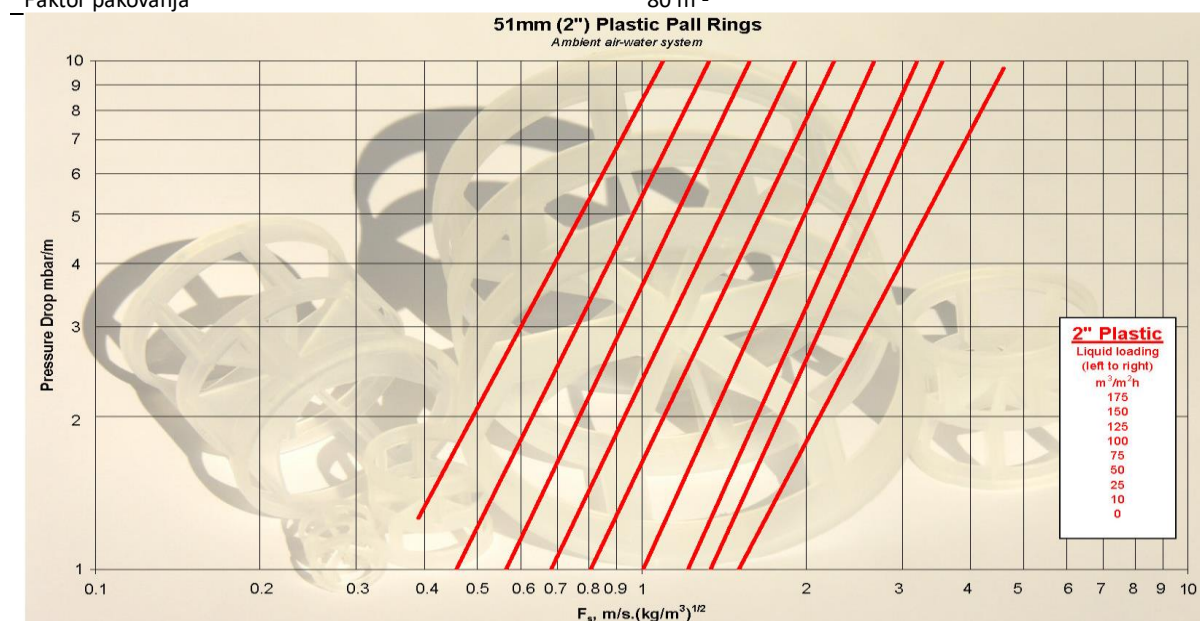
Slika 3. Prikaz predloženog skrubera sa potrebnim dimenzijama ($D_{skrub} = 2,0 \text{ m}$; $H_{ukupno} = 10,0 \text{ m}$)

U prvom stepenu vrši se izdvajanje najveće količine prisutnog amonijaka, dok se u drugom stepenu vrši poliranje dobijenog gasa, kako bi se garantovalo postizanje maksimalno dozvoljenih koncentracija amonijaka u gasu koji se ispušta u okolinu. Projektovana izlazna koncentracija NH_3 u izlaznom gasu iz skrubera iznosi $3,5 \text{ mg m}^{-3}$, pri ulaznoj koncentraciji od 1400 mg m^{-3} . Efikasnost svakog od stepena skrubera iznosi 95 %, tako da je ukupna efikasnost oba stepena 99,8 %.

Kao punjenje u prikazanoj koloni, odabrani su Palovi prstenovi dimenzije 50 mm izrađeni od polipropilena (Slika 4).



| PLASTIC PALL RINGS P-Series | | The PALL RING COMPANY |
|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Veličina | 50 mm (2") | |
| Specifična površina | $100 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ | |
| Slobodna površina | 95 % | |
| Nasipna gustina | 45 kg m^{-3} | |
| Br. komada po jedinici zapremine | 5960 m^{-3} | |
| Faktor pakovanja | 80 m^{-1} | |



Slika 4. Odabrano punjenje – Palovi prstenovi od polipropilena dimenzije 50 mm, proizvođač: The Pall Ring Company Ltd., UK (<https://www.pallrings.co.uk/products/pall-rings-plastic/>) [19] ($F_s = U_{gas} \rho_{gas}^{0.5}$, $(\text{m s}^{-1})(\text{kg m}^{-3})^{0.5}$, F-faktor za gas)

U cilju postizanja visoke efikasnosti procesa uklanjanja NH_3 iz gasne faze (veće od 90 % u svakom od stepena) potrebno je održavati pH vrednost rastvora koji recirkuliše na vrednosti manjoj od 2. Iz tog razloga potrebno je dodavati 110 kg h^{-1} ($68 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$) 70 % sumporne kiseline na dno stepena 1, kao i $5,5 \text{ kg h}^{-1}$ ($3,5 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$) 70 % sumporne kiseline na dno stepena 2, kao što je prikazano u Tabeli 1.

Kao što se iz Tabele 1 može videti, postizanje pH vrednosti rastvora < 2 moguće je ostvariti i korišćenjem sumporne kiseline nižih koncentracija.

Tabela 1. Potrebno dovođenje rastvora H_2SO_4 i odvođenje otpadnog rastvora iz skrubera za različite koncentracije kiseline

| | | Koncentracija H_2SO_4 , % | | | | | |
|--------|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| | | 30 | | 40 | | 70 | |
| stepen | Maseni protok, $kg\ h^{-1}$ | dovođenje kiseline | odvođenje otpadnog rastvora | dovođenje kiseline | odvođenje otpadnog rastvora | dovođenje kiseline | odvođenje otpadnog rastvora |
| 1 | Zapreminski protok, $dm^3\ h^{-1}$ | 256 | 282 | 192 | 218 | 110 | 136 |
| 2 | Maseni protok, $kg\ h^{-1}$ | 210 | 221 | 150 | 171 | 68 | 107 |
| 1 | Zapreminski protok, $dm^3\ h^{-1}$ | 13 | 14 | 10 | 11 | 5,5 | 7 |
| 2 | Zapreminski protok, $dm^3\ h^{-1}$ | 10 | 11 | 7,5 | 8,5 | 3,5 | 5 |

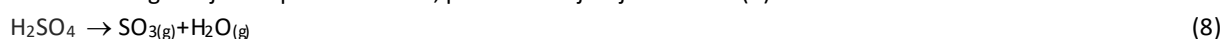
U Tabeli 1 su prikazane vrednosti potrebnih protoka dodavanja kiseline na dno skrubera za koncentracije 30, 40 i 70%, kao i vrednosti protoka otpadnog rastvora za iste koncentracije korišćene kiseline. Treba naglasiti da svako snižavanje koncentracije sumporne kiseline koja se koristi u recirkulaciji dovodi do potrebe za odvođenjem veće količine otpadnog rastvora iz skrubera, koji je u tom slučaju nižeg nivoa zasićenja. Tako, na primer, ukoliko se koristi sumporna kiselina koncentracije 70 %, iz prvog stepena skrubera je potrebno odvoditi $107\ dm^3\ h^{-1}$ rastvora amonijum sulfata (koji predstavlja otpadnu vodu), dok ukoliko se koristi sumporna kiselina koncentracije 30 %, ta vrednost iznosi $221\ dm^3\ h^{-1}$.

Imajući u vidu količinu otpadnog rastvora koji nastaje u skruberu i koji je potrebno odvoditi na dalji tretman, usvojeno je korišćenje sumporne kiseline koncentracije 70 %. Protok kiseline koja se dodaje se automatski reguliše podešavanjem pH vrednosti rastvora na vrednost < 2 , te zavisi od koncentracije NH_3 u ulaznom gasu, kao i od koncentracije kiseline koja se koristi.

Ukoliko se koristi 70% H_2SO_4 , iz skrubera se odvodi otpadni rastvor nastalog amonijum sulfata, i to iz prve faze $136\ kg\ h^{-1}$ (oko $107\ dm^3\ h^{-1}$, u zavisnosti od koncentracije nastalog amonijum sulfata) i iz druge faze $7\ kg\ h^{-1}$ (oko $5,5\ dm^3\ h^{-1}$). Izlazni protoci otpadnog rastvora amonijum sulfata regulišu se kontrolisanjem nivoa tečnosti u rezervoarima na dnu obe faze u skruberu.

Treba imati u vidu da je sumporna kiselina veoma slabo isparljivo jedinjenje. Zbog izuzetno niskih vrednosti napona pare H_2SO_4 , a naročito SO_3 [18] smatra se da su gubici kiseline usled isparavanja praktično jednaki nuli na atmosfersom pritisku i na temperaturama na kojima će se odvijati proces apsorpcije amonijaka u skruberu. Takođe, prisustvo amonijaka u rastvoru dodatno stabilizuje molekule sumporne kiseline, reagujući sa njima uz nastajanje amonijum-sulfata, što dodatno smanjuje isparljivost.

Termička razgradnja sumporne kiseline, prema hemijskoj Jednačini (8):



započinje na temperaturi između 300 i $330^\circ C$, i završava se na oko $700^\circ C$. S obzirom da se proces hemisorpcije amonijaka u skruberu odvija na temperaturama od 62 do $70^\circ C$, nije moguća termička razgradnja sumporne kiseline, te tako ni pojava sumpornih oksida na izlazu iz skrubera.

Procesni parametri i proračunate dimenzije skrubera, za tri varijante prečnika prikazani su u Tabeli 2.

Tabela 2. Procesni parametri i dimenzije tri varijante prečnika skrubera

| Procesni parametri | | | |
|---|---------------------|---------|---------|
| Prečnik skrubera, m | 2,0 | 2,1 | 2,2 |
| Pritisak, kPa | 101 | | |
| Temperatura gasa ($T_{g,ul}$), $^\circ C$ | 62 do maksimalno 70 | | |
| Protok vazduha na $T_{g,ul}$, $m^3\ h^{-1}$ | 20000 | | |
| Protok rastvora kiseline (20 % iznad minimalnog), $m^3\ h^{-1}$ | 17,64 | 19,45 | 21,35 |
| Zapreminski fluks gasa, $m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$ | 6366,20 | 5774,33 | 5261,32 |
| Zapreminski fluks rastvora kiseline (20 % iznad minimalnog), $m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$ | 5,62 | | |
| Minimalni zapreminski fluks rastvora kiseline za adekvatno kvašenje punjenja, $m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$ | 4,68 | | |
| Odnos zapreminskih protoka tečnost/gas, $dm^3\ m^{-3}$ | 0,88 | 0,97 | 1,07 |
| *Gradijent pritiska u sloju punjenja skrubera (dijagram pritiska za odabrano punjenje), $Pa\ m^{-1}$ | 180 | 140 | 120 |
| *Pad pritiska u sloju punjenja skrubera u jednom stepenu (dijagram pritiska za odabrano punjenje), Pa | 450 | 350 | 300 |
| Gradijent pritiska u skruberu pri plavljenju, $Pa\ m^{-1}$ | 2019,3 | | |
| Koncentracija rastvora kiseline, zap.% | 70 | | |
| Koncentracija NH_3 ulaz, $mg\ m^{-3}$ | 1400 | | |

| Procesni parametri | | | |
|---|-----|------|-----|
| Prečnik skrubera, m | 2,0 | 2,1 | 2,2 |
| Koncentracija NH ₃ izlaz, mg m ⁻³ | | 14 | |
| Efikasnost skrubera, % | | 99 | |
| Dimenzije skrubera | | | |
| Prečnik, m | 2,0 | 2,1 | 2,2 |
| Visina punjenja stepen 1, m | | 2,5 | |
| Visina punjenja stepen 2, m | | 2,5 | |
| Ukupna visina skrubera, m | 10 | 10,5 | 11 |

Punjenje: Palovi prstenovi – podaci dati na Slici 4

*Korišćen je dijagram za pad pritiska dat u specifikacijama odabranog punjenja (Slika 4)

Proračun procesnih parametara skrubera je rađen primenom Katmar softvera. Na Slici 5 prikazan je primer proračuna za prečnik skrubera od 2 m za ulazne podatke navedene u Tabeli 2.

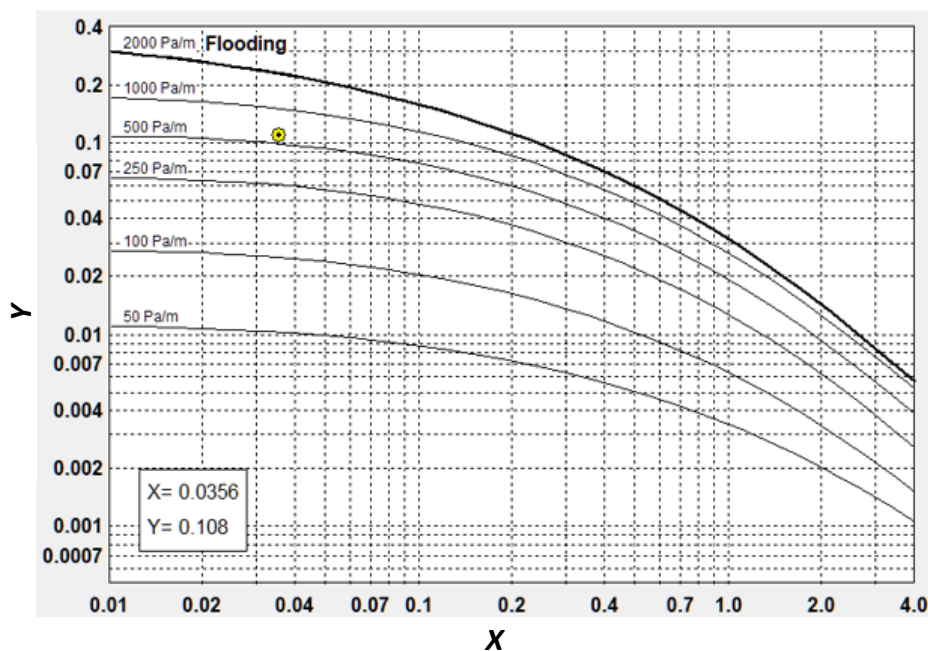
Slika 5. Rezultati proračuna primenom Katmar softvera za skruber sa rastvorom sumporne kiseline (crveno-ulazni podaci, sivo-rezultat proračuna)

Program omogućava izračunavanje potrebnog prečnika za nove kolone (opcija Design u programu), koristeći dozvoljeni pad pritiska, ili približavanje plavljenju ili približavanje maksimalnom radnom kapacitetu kao ulazni (zadati) parametar. Postojeće kolone poznatog prečnika se takođe mogu analizirati za predložene promene u radnim uslovima (opcija Rating u programu, videti Sliku 5).

U softveru je omogućena i vizualizacija dobijenih rezultata na dijagramima. Program uključuje mogućnost prikazivanja krivih i radne tačke u Generalizovanoj korelaciji za pad pritiska u formatu koji je predložio Ekert [16], (Slika 6). Na ovom dijagramu je data kriva plavljenja i standardne linije za pad pritiska. Na operativnom dijagramu se odmah može videti osetljivost na promene brzina protoka gasa i tečnosti (Slika 7).

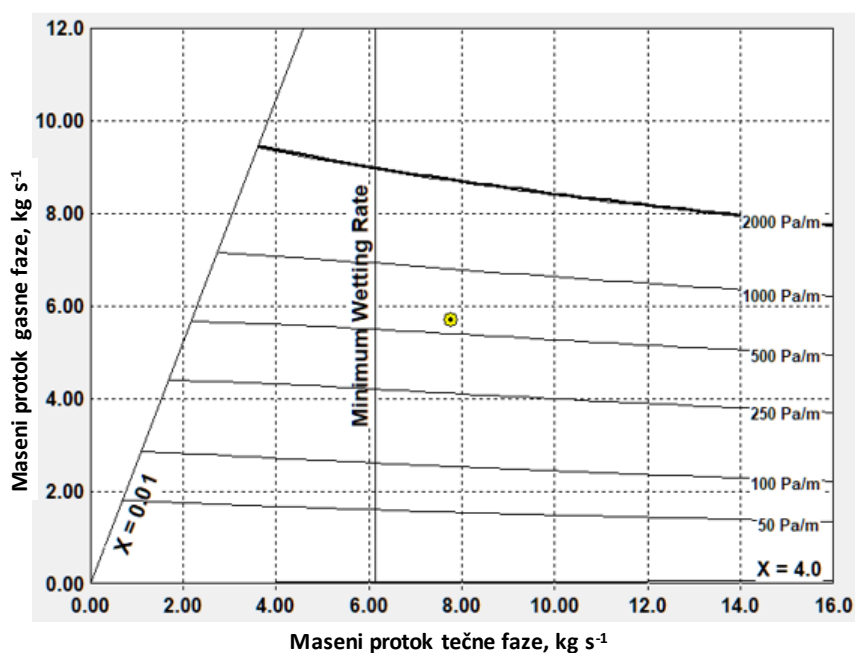
Kao što se može videti iz Tabele 2, gradijent pritiska (Pa m⁻¹), a samim tim i ukupni pad pritiska (Pa) u koloni se smanjuje povećanjem prečnika kolone. Smanjenje ukupne visine sloja punjenja ne utiče značajno na smanjenje ukupnog pada pritiska (gradijent pritiska ostaje nepromenjen za isti prečnik kolone). Prema dijagramu iz specifikacije odabranog punjenja - Palovi prstenovi 50 mm, gradijent pritiska je oko 180 Pa m⁻¹ za $D_c = 2$ m, a ukupni pad pritiska je oko 900 Pa u sloju punjenja u oba stepena (2×2,5 m). Prema istom dijagramu, za $D_c = 2,2$ m gradijent pritiska je oko 120 Pa m⁻¹, a ukupni pad pritiska kroz sloj punjenja u oba stepena je oko 600 Pa.

Treba imati u vidu da što je veći prečnik kolone potreban je i veći minimalni protok tečnosti za adekvatno kvašenje punjenja, za kolonu $D_c = 2$ m treba 7,77 kg s⁻¹ tečnosti, a za $D_c = 2,2$ m treba 9,40 kg s⁻¹, što je za 20 % veći protok u odnosu na $D_c = 2$ m (Tabela 2). Da bi se u kolonu unelo dovoljno tečnosti za efikasno formiranje vlažnog filma tečnosti preko cele površine pakovanja, kao smernica za rad i dizajn kolone koristi se minimalna brzina vlaženja (*engl.* minimum wetting rate, MWR). Minimalna brzina vlaženja je funkcija površine materijala za pakovanje i fizičkih svojstava tečnosti, posebno viskoznosti i površinskog napona. Pakovanje treba testirati na kvašenje u radu pre nego što se završi projektovanje kolone i izbor pakovanja. Pojedini proizvođači pakovanja daju u specifikacijama i vrednost MWR.



$$X = \left(\frac{L}{G} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.5}, \quad Y = \left(\frac{G^2}{g} \right) a \mu_l^{0.2} \left(\frac{\rho_w / \rho_l}{\rho_g \rho_l} \right)^2$$

Slika 6. Maseni protok gasne faze u funkciji masenog protoka tečne faze dobijene primenom Katmar softvera (Generalizovana korelacija za pad pritiska [16])



Slika 7. Operativni dijagram: maseni protok gasne faze u funkciji masenog protoka tečne faze dobijen primenom Katmar softvera

Sa aspekta protoka tečne faze prečnik kolone $D_c = 2$ m zadovoljava, a prema specifikaciji punjenja datoj na Slici 4 pad pritiska kroz ukupnu visinu sloja punjenja bi bio oko 900 Pa. S obzirom da na ukupni pad pritiska utiču, pored punjenja (koje predstavlja najznačajniji otpor) i interni delovi kolone, kolena, odvajači kapi i sl, potrebno je u saradnji sa proizvođačem opreme odabrati optimalan prečnik kolone, koji će zadovoljiti eventualno ograničenje po pitanju maksimalno dozvoljenog pada pritiska, a sa druge strane omogućiti optimalan rad skrubera sa stanovišta neophodnog protoka tečne faze.

4. ZAKLJUČAK

Optimalni procesni parametri i dimenzije uređaja za proces uklanjanja amonijaka korišćenjem skrubera sa pakovanim slojem određeni su razmatranjem materijalnog i energetskog bilansa procesa, na osnovu izračunavanja koeficijentata prenosa mase između gasne i tečne faze, kao i na osnovu proračuna potrebnog protoka tečne faze u skruberu koja obezbeđuje adekvatno kvašenje punjenja i pad pritiska u koloni. Zaključeno je da se gradijent pritiska u koloni, a samim tim i ukupni pad pritiska smanjuje povećanjem prečnika kolone. Smanjenje ukupne visine sloja punjenja ne utiče značajno na smanjenje ukupnog pada pritiska (gradijent pritiska ostaje nepromenjen za isti prečnik kolone). Treba imati u vidu da što je veći prečnik kolone potreban je i veći minimalni protok tečnosti za adekvatno kvašenje punjenja. U radu su analizirane kolone prečnika $D_c = 2$ m; 2,1 i 2,2 m. Na osnovu analize potrebnog protoka tečne faze odabran je prečnik kolone $D_c = 2$ m. U ovom slučaju pad pritiska u sloju iznosi oko 900 Pa. Međutim, na ukupni pad pritiska utiču, pored punjenja (koje predstavlja najznačajniji otpor) i interni delovi kolone, kolena, odvajajući kapi i sl, te se optimalan prečnik kolone koji će zadovoljiti i eventualno ograničenje po pitanju maksimalno dozvoljenog pada pritiska, mora odabrati u saradnji sa proizvođačem opreme.

Prikazana metoda ima veliki značaj u projektovanju opreme za uklanjanje zagađujućih gasova, a dobijeni rezultati pokazuju da se ona uspešno može koristiti u projektovanju skrubera za prečišćavanje gasova sa visokim sadržajem amonijaka.

5. NOMENKLATURA

Latinična slova

| | |
|---|--|
| $a / \text{m}^2 \text{m}^{-3}$ | - specifična površina punjenja |
| A / m^2 | - površina poprečnog preseka kolone |
| D / m | - prečnik kolone |
| $g / \text{m s}^{-2}$ | - gravitaciona konstanta |
| $G / \text{kg h}^{-1}$ | - maseni protok gasne faze |
| $G_m / \text{mol h}^{-1}$ | - molski protok inertne gasne faze |
| $G' / \text{kg m}^2 \text{h}^{-1}$ | - maseni fluks gasne faze pri plavljenju |
| HTU, m | - visina prenosne jedinice |
| $K_{OG} / \text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ | - koeficijent prolaza mase izražen u jedinicama gasne faze |
| $L_m / \text{mol h}^{-1}$ | - molski protok inertne tečne faze |
| $L / \text{kg h}^{-1}$ | - maseni protok tečne faze |
| NTU, m | - broj prenosnih jedinica |
| P / Pa | - pritisak |
| $F_s / (\text{m s}^{-1})(\text{kg m}^{-3})^{0.5}$ | - faktor za gas |
| X | - molski odnos rastvorene supstance u čistoj tečnosti |
| Y | - molski odnos rastvorene supstance u čistom gasu |
| Z / m | - visina sloja |

Grčki simboli

| | |
|-----------------------------|---|
| $\mu / \text{Pa s}$ | - viskoznost tečne faze |
| $\phi /$ | - odnos specifične težine tečnosti i specifične težine vode |
| $\rho_g / \text{kg m}^{-3}$ | - gustina gasne faze |
| $\rho / \text{kg m}^{-3}$ | - gustina tečne faze |

Indeksi

| | |
|----|--------------------|
| 1 | - ulaz |
| 2- | - izlaz |
| * | - stanje ravnoteže |
| G | - gas |
| L | - tečnost |

REFERENCES

- [1] Bhatia MV. *Packed Tower and Absorption Design*. In Cheremisinoff PN, Young RA, eds. *Air Pollution Control and Design Handbook*. New York, NY: Marcel Dekker; 1977. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7488-3>
- [2] Richards JR. *Control of Gaseous Emissions. APTI Course 415*. U.S. Environmental Protection Agency; 1995. <https://www.4cleanair.org/wp-content/uploads/APTI/415combined.pdf>
- [3] Srivastava RK, Jozewicz W, Singer C. SO₂ scrubbing technologies. *Environ Prog*. 2001; 20(4): 219-28. <https://doi.org/10.1002/ep.670200410>
- [4] *Wet Scrubber System Study*. NTIS Report PB-213016; U.S. EPA, Research Triangle Park, NC, 1972. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9101LF9J.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=Prior%20to%201976&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C70T HRU75%5CTXT%5C00000023%5C9101LF9J.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&slide#>
- [5] Joseph GTPE, Beachler DS. *Scrubber System Operation Review*, 2nd ed., North Carolina State University; 1998. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-veracruzana/operaciones-fisicas-unitarias/design-review-of-absorbers-used-for-gaseous-pollutants-removal/10718576>
- [6] Hesketh HD. *Wet scrubbers*. 2nd ed., New York, NY: Routledge; 2017. <https://doi.org/10.1201/9780203733899>
- [7] U.S. Environmental Protection Agency, 1998. Wet-Film (Packed Tower) Scrubbers. 2012; 1-15. www.yosemite.epa.gov/oaqps/eogtrain.nsf.gov
- [8] Schiffner KC, Hesketh HE. *Wet scrubbers*. United States: 1983. <https://www.osti.gov/biblio/6626241>
- [9] McCabe WL, Smith JC, Harriot P *Unit Operations of Chemical Engineering*, McGraw-Hill International Editions, New York, 1993. ISBN 0-07-044844-2. <https://evsujpiche.files.wordpress.com/2014/06/unit-operations-of-chemical-engineering-5th-ed-mccabe-and-smith.pdf>
- [10] Strigle RE Jr. *Packed Tower Design and Applications - Random and Structured Packings*. 2nd ed., Houston, London, Paris, Zurich, Tokyo: Gulf Publishing Company; 1994. ISBN 0-88415-179-4. <https://www.scribd.com/doc/81675448/Packed-Tower-Design-and-Applications-R-F-Strigle-1994>
- [11] Phillips J. Control and pollution prevention options for ammonia emissions: VIGYAN Inc. (Technical Report), United States; 1995. <https://www.osti.gov/biblio/104094>
- [12] Hadlocon LJ, Manuzon RB, Zhao L. Optimization of ammonia absorption using acid spray wet scrubbers. *Transactions of the ASABE*. 2014; 57(2): 647-659. <https://doi.org/10.13031/trans.57.10481>
- [13] Ashtari AK, Majd AM, Riskowski GL, Mukhtar S, Zhao L. Removing ammonia from air with a constant pH, slightly acidic water spray wet scrubber using recycled scrubbing solution. *Front Environ Sci Eng*. 2016; 10; 3. <https://doi.org/10.1007/s11783-016-0869-3>
- [14] Piche S, Larachi F, Grandjean BPA. Flooding Capacity in Packed Towers: Database, Correlations, and Analysis. *Ind. Eng Chem Res*. 2001; 40: 476-487. <https://doi.org/10.1021/ie000486s>
- [15] Packed Column Calculator, Version 2.1, March 2010, Katmar Software, <http://www.KatmarSoftware.com>
- [16] Leva M. *Tower Packings and Packed Tower Design*. United States Stoneware Company: Akron, OH, 1953. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015000476294&seq=11>
- [17] Eckert JS. How tower packings behave. *Chem Eng*. 1975; 2(8): 70-76. <https://www.coursehero.com/file/p5fbd1p/Eckert-J-S-1975-How-tower-packings-behave-Chemical-Engineering-v-82-pp-70-Ellis/>
- [18] Robbins L. Improve pressure drop prediction with a new correlation. *Chem Eng Prog*. 1991; 87(5): 87-90. ISSN 0360-7275. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113682503>
- [19] The Pall Ring Company Ltd., UK. <https://www.pallrings.co.uk/products/pall-rings-plastic/>

Design and optimization of a packed bed scrubber for purification of waste gas containing ammonium

Zorana Lj. Arsenijević¹, Ivona R. Radović², Mirjana Lj. Kijevčanin² i Tatjana S. Kaluđerović Radoičić²

¹University of Belgrade, Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, National Institute of the Republic of Serbia, Belgrade, Serbia

²University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia

(Technical paper)

Abstract

In this work, a two-stage packed bed scrubber was designed and optimized for purification of industrial waste gas containing ammonia at a concentration of 1400 mg m⁻³. Basic material balance equations, equilibrium data, and the generalized pressure drop correlation were used for the calculation. For the analysis of different configurations, Katmar software was utilized, which uses the generalized pressure drop correlation in order to calculate the scrubber diameter based on the allowable pressure drop and proximity to flooding conditions. It was found that optimal results are achieved in a two-stage device, using 70 vol.% sulfuric acid for chemisorption of ammonia. Pall rings, 50 mm in size and made of polypropylene, were selected as a column packing. Performances of scrubbers of three column diameters (i.e., Dc=2; 2.1 and 2.2 m) were analyzed. From the aspect of the liquid phase flow, the column diameter of 2 m provides satisfactory results. According to the packing specifications, the pressure drop through the packing layer would be about 900 Pa. It was found that the pressure gradient, and therefore the total pressure drop in the column decreases with increasing the column diameter. However, as the diameter of the column increases, the minimum flow rate of the liquid phase required to wet the packed bed increases, so the required liquid flow rate increases. Taking into account all of the analyzed process parameters, as well as the required purification degree of the waste gas, the optimal configuration of the device was proposed.

Keywords: absorption; two-stage scrubber; packed bed; ammonia removal