

Savremene tehnologije filtracije i separacije gasova: pregled ključnih principa rada, dostupnih uređaja i njihove aktuelne industrijske primene

ANDRIJA M. AVRAMOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
ORCID: 0009-0005-5359-9082

Pregledni rad
UDC: 662.767.074.9
DOI: 10.5937/tehnika2506597A

DUŠAN Š. DANILOVIĆ, Univerzitet u Beogradu
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-2696-040X

Filtracija i separacija gasova predstavljaju osnovne operacije u industriji prerade i transporta prirodnog gasa, kao i u hemijskom, energetskom i petrohemijskom sektoru. Njihova primena obezbeđuje produženje radnog veka procesne opreme, smanjenje emisija zagađujućih materija, zaštitu okoline i unapređenje energetske efikasnosti postrojenja. Ovaj pregledni rad prikazuje savremene pristupe u oblasti filtracije i separacije gasnih tokova, sa fokusom na mehaničke, elektrostatičke, hemijske i membranske tehnologije. Obrađeni su principi rada, parametri efikasnosti i ključna ograničenja ciklonskih separatora, Venturi skruberi, mokrih elektrofiltera (WESP), suvih i koalescentnih filtera, kao i TEG i membranskih sistema za dehidraciju. Uporedna analiza pokazuje da ciljano kombinovanje višestepenih sistema, koji se primenjuju u savremenoj industrijskoj praksi, omogućavaju postizanje efikasnosti separacije gasova do čak 98-99%, uz minimalan pad pritiska i značajno smanjenje energetskih gubitaka i emisije zagađujućih materija i gasova sa efektom staklene bašte, čime garantuju održivost u svom radu..

Ključne reči: filtracija, separacija, dehidracija, membrane, efikasnost, održivost

1. UVOD

Uklanjanje čvrstih i tečnih primesa iz različitih gasnih struja predstavlja jedan od najvažnijih koraka u pripremi i preradi gasova u industrijskim procesima. Prisutnost čestica prašine, korozivnih aerosola i vlage može prouzrokovati brojne probleme: od erozije zidova cevovoda i smanjenja protoka, do oštećenja turbina, kompresora, pumpi i katalizatora u hemijskim reaktorima [1]. Vлага u gasnim tokovima, osim mehaničkih problema, dovodi i do stvaranja hidrata, korozije i gubitaka pritiska, čime se ugrožava stabilnost celokupnog sistema.

Savremena industrijska praksa podrazumeva primenu složenih, višestepenih sistema filtracije i separacije, koji kombinuju više fizičkih i hemijskih mehanizama, naročito inercijalnih, difuzionih, gravitacionih

i elektrostatičkih, u cilju postizanja maksimalne čistote gasnog toka koji se prerađuje [2–4]. Značaj ovih sistema ogleda se i u postizanju usklađenosti sa aktuelnim ekološkim standardima (npr. Direktiva 2010/75/EU o industrijskim emisijama), koji zahtevaju strogu kontrolu čvrstih i gasovitih zagađivača pre ispuštanja prerađenih gasova u atmosferu ili dalji transport prirodnog gasa cevovodima odnosno distribuciju krajnjim potrošačima.

Razvoj novih materijala, kompaktnijih uređaja i integrisanih sistema omogućio je da se filtracija i separacija gasova sprovede uz znatno niže troškove energije i održavanja nego ranije [5]. Pored tradicionalnih rešenja, danas se primenjuju napredni sistemi kao što su mokri elektrofilteri (WESP), koalescentni i membranski moduli, kao i visokoeфикасни tehnološki sistemi TEG dehidracije (trietilen glikol) koje omogućavaju kontinuiran rad u zahtevnim radnim uslovima pritiska i temperature.

Cilj ovog rada je da se, na osnovu dostupnih izvora i aktuelne industrijske prakse, prikaže pregled principa, uređaja i tehnologija koje se primenjuju u savre-

Adresa autora: Andrija Avramović, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Dušina 7

e-mail: R709-23@dok.rgf.bg.ac.rs

Rad primljen: 24.11.2025.

Rad prihvaćen: 10.12.2025.

menim postrojenjima za tretman različitih gasova, uz analizu njihovih performansi i mogućnosti za optimizaciju.

2. METODOLOGIJA PREGLEDA I ANALIZE TEHNOLOGIJA

Ovaj pregledni rad je zasnovan na analizi relevantne literature i industrijskih izvora u periodu 2014–2025. godina, koje u svoj fokus stavljaju savremene tehnologije filtracije i separacije gasova, primenjene u širokoj industrijskoj praksi. Pretraga je sprovedena u sledećim bazama podataka: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, OnePetro, a uključila je i analizu važećih industrijskih standarda i tehničkih uputstava (ISO, SPE).

Kriterijumi selekcije izvora koji su korišćeni u izradi ovog rada su:

- Radovi objavljeni u recenziranim časopisima ili na relevantnim tematskim konferencijama sa prihvatljivim faktorom uticaja u analiziranoj oblasti.
- Studije i analize koje obrađuju razmatrane tehnologije filtracije, separacije i dehidracije gasova.
- Isključeni su pronalasci, patenti, neregistrirani izvori i radovi koji ne sadrže kvantitativne podatke o performansama tehnologija ili obrađuju podatke koje nisu široko primenjene u savremenoj industrijskoj praksi.

Ukupno je analizirano 12 izvora iz naučnih i stručnih radova, studija, industrijskih priručnika i relevantnih standarda kvaliteta, na osnovu kojih su definisani osnovni principi na kojima se zasnivaju primenjivane tehnologije filtracije i separacije gasova u praksi, obrađeni ključni uređaji i oprema i analizirana njihova efikasnost i pouzdanost u radu.

3. OSNOVNI PRINCIPI FILTRACIJE I SEPARACIJE GASOVA

Procesi filtracije i separacije zasnivaju se na delovanju više mehanizama prenosa mase i impulsa između gasne i čvrste faze. Na slici 1 prikazana je grafička struktura osnovnih principa i parametara procesa filtracije i separacije gasova, koja omogućava preglednu sistematizaciju mehanizama, termodinamičkih i operativnih faktora, kao i stepena filtracije.

Glavni fizički principi koji određuju efikasnost filtracije i separacije gasova su:

Inercijalna separacija – čestice većih dimenzija (obično $>5 \mu\text{m}$) zadržavaju pravolinijsko kretanje usled sopstvene mase i zbog inercije ne prate promenu pravca gasnog toka, čime dolazi do njihovog sudara sa površinama separatora ili izdvajanja u ciklonima [2].

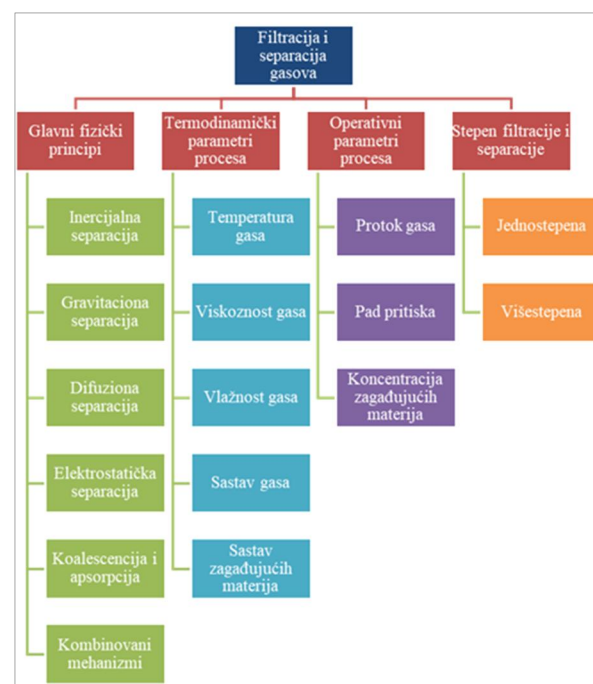
Gravitaciona separacija – koristi razliku u gustini između čestica i gasa, naročito u separatorima sa

usporenim protokom, gde se čestice talože pod uticajem gravitacije.

Difuziona separacija – javlja se kod vrlo finih čestica ($<0,1 \mu\text{m}$), čija je kinematika uslovljena Braunovim kretanjem; primenjuje se u visokopreciznim filterima i elektrofilterima [3].

Elektrostatička separacija – koristi indukovano električno polje za jonizaciju gasova i privlačenje naelektrisanih čestica na elektrode, radi njihovog uklanjanja iz gasne struje, uz minimalan hidraulički otpor.

Koalescencija i apsorpcija – tečne kapljice se međusobno spajaju i formiraju veću zasebnu fazu koja se odvaja gravitaciono ili centrifugalno; hemijski skruberi i TEG sistemi zasnivaju se upravo na ovom principu [4, 8] (slika 2).



Slika 1 - Grafički prikaz osnovnih principa, svojstava gasa i operativnih parametara koji formiraju tehnologiju za filtraciju i separaciju gasova

Kombinovanjem više mehanizama filtracije i separacije u višestepene sisteme uređaja postiže se sinergijski efekat: jedan uređaj odstranjuje grube čestice, dok sledeći uklanja fine aerosole i vlagu. Time se postiže visok stepen efikasnosti (često preko 99%) uz optimizaciju potrošnje energije i produženje veka trajanja samih separatora i filtera [5–7]. Pored mehaničkih aspekata, ključni su i termodinamički parametri: temperatura, pritisak, vlažnost i viskoznost gasa i sastav zagađivača. Oni direktno utiču na stabilnost disperzne faze i samu brzinu separacije.

U sistemima visokog pritiska, kao što su gasovodi i kompresorske stanice, neophodna je dvofazna separacija (primarna i sekundarna) kako bi se postigla

suvoća gasa pre ulaska u merno-regulacione ili energetske module [8, 9]. Slična situacija je i u postrojenjima za preradu prirodnog gasa, a naročito u postrojenjima za tretman dimnih (otpadnih) gasova, u kojima su, pored kvaliteta prečišćene gasne struje sa tehničko-tehnološkog aspekta zaštite procesne opreme i uređaja, još važniji parametri koncentracije zagađujućih materija odnosno njihove emisije u atmosferu,

Savremeni sistemi uključuju monitoring operativnih parametara (pad pritiska, saturacija filtera, koncentracija čestica) u realnom vremenu, što omogućava pravovremeno automatsko čišćenje i regeneraciju uređaja, a time i duži period njihovog rada bez prekida. Uređaji kao što su multicikloni i WESP sistemi danas predstavljaju standard u gasnim postrojenjima upravo zbog pouzdanosti i mogućnosti integracije sa različitim industrijskim digitalnim kontrolnim sistemima (SCADA, DCS).

4. TEHNOLOGIJE FILTRACIJE I SEPARACIJE GASOVA

4.1. Ciklonski separatori

Ciklonski separatori predstavljaju najstariji i najrasprostranjeniji oblik mehaničkih uređaja za odvajanje čvrstih čestica iz gasova (slika 2). Njihov rad se zasniva na centrifugalnoj sili, koja deluje na čestice kada gas tangencijalno ulazi u cilindrično telo separatora. Čestice se usled inercije izbacuju ka zidovima, gde gube kinetičku energiju i spuštaju se gravitaciono u donji deo konusa [3].

Efikasnost zavisi od brzine gasa, prečnika separatora i gustine čestica. Optimalna brzina iznosi 12–18 m/s, dok se pad pritiska kreće od 0,03 do 0,06 bar. Više brzine povećavaju efikasnost, ali i gubitke pritiska. Za fine čestice ($< 5 \mu\text{m}$) koristi se multiciklonska kon-

figuracija, gde je više manjih ciklona povezano paralelno, čime se povećava ukupna površina kontakta i omogućava njihova efikasnost iznad 70-95% [3, 5].

Prednost ciklonskih separatora je robustnost i jednostavno održavanje: nemaju pokretne delove, rade u širokom rasponu temperatura (do 350°C) i otporni su na korozivne gasove. Nedostatak je niža efikasnost kod vrlo finih aerosola i kondenzata, pa se često kombinuju sa filterima ili skruberima kao sekundarnim stepenom separacije [4].

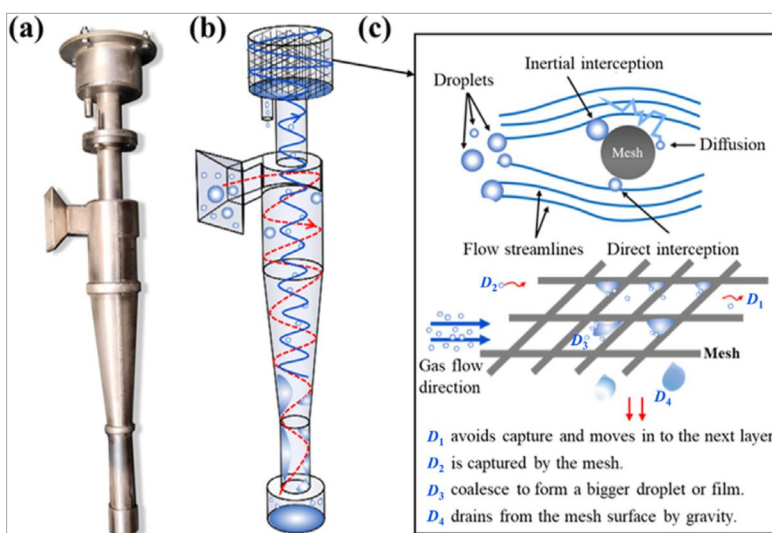
4.2 Venturi skruberi

Venturi skruberi kombinuju inercijalni i koalescentni mehanizam separacije u suženom delu cevi, tzv. grlu Venturija (slika 3). U toj zoni gas dostiže velike brzine (60–120 m/s), što dovodi do disperzije tečnosti u mikrokapljice ($1\text{--}10 \mu\text{m}$). Čestice i aerosoli se sudaraju sa kapljicama tečnosti i formiraju veće aglomerate koji se gravitaciono odvajaju u samom separatoru [2, 8].

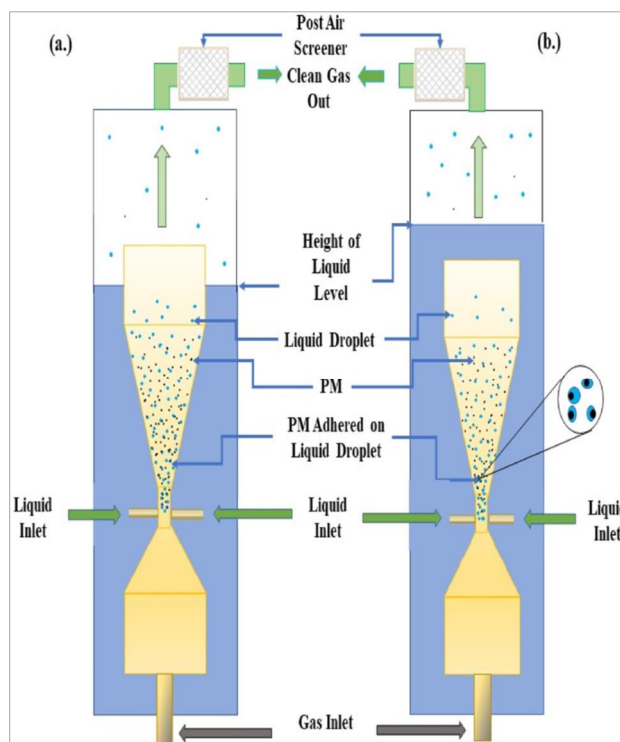
Efikasnost Venturi skrubera zavisi od veličine kapljica, brzine gasa i odnosa gas–tečnost (L/G). Uobičajeni odnos je $0,5\text{--}1,0 \text{ L/m}^3$, pri čemu efikasnost uklanjanja čestica $0,5\text{--}2 \mu\text{m}$ dostiže 95–99%, uz pad pritiska od 0,02–0,05 bar [8].

Prednost ovih uređaja je mogućnost istovremene apsorpcije štetnih gasovitih komponenti (SO_2 , HCl) i hlađenja gasa, što ih čini pogodnim istovremeno i za tretman dimnih gasova i za postrojenja za preradu prirodnog gasa.

Venturi sistemi zahtevaju kontinuirano napajanje tečnošću i odvođenje kontaminirane faze, pa su pogodniji za postrojenja gde je dostupna procesna voda ili kondenzat, kao što su velika hemijska i procesna postrojenja ili rafinerije.



Slika 2 - Savremeni ciklonsko-koalescentni separator gasa (preuzeto iz [11]): a) konstrukcija uređaja, b) shema strujanja i linija toka, c) razdvajanje čestica koalescentnim mehanizmom



Slika 3 - Standardne i unapređene konfiguracije Venturi skrubera (preuzeto iz [3])

4.3 Mokri elektrofilteri (WESP)

WESP (eng. *Wet Electrostatic Precipitator*) sistemi predstavljaju tehnološki naprednu verziju klasičnih elektrofiltera, kod kojih se uklanjanje čestica kombinuje sa ispiranjem elektrodnih površina filmom tečnosti (slika 4). Na taj način sprečava se reemisija i taloženje čestica, što je problem kod suvih elektrofiltera [1, 8].

U WESP-u se gas jonizuje korona pražnjenjem (10–20 kV/cm), pri čemu naelektrisane čestice migriraju ka kolektorskim elektrodama. Film tečnosti (obično voda ili blago alkalni rastvor) kontinuirano ispire elektrode u filteru, uklanjajući time talog, kao i prenos kontaminiranih čestica u tečnu fazu koja se dalje odvodi.

Tipični odnos tečnost/gas u WESP iznosi 0,88–1,15 L/m³, a efikasnost uklanjanja čestica 10–450 nm često prelazi 99% [8]. Prednosti ovakvih WESP sistema uključuju:

- ekstremno visoku efikasnost, čak i kod submikronskih čestica,
- minimalan pad pritiska (<0,01 bar),
- sposobnost rada u vlažnim i korozivnim uslovima, kakvi se često zahtevaju u realnim procesnim postrojenjima,
- apsorpciju više gasovitih zagađivača (npr. SO₃, H₂SO₄, NH₃).

Zbog svega navedenog se WESP uređaji često koriste u rafinerijama, koksarama, sve češće u postro-

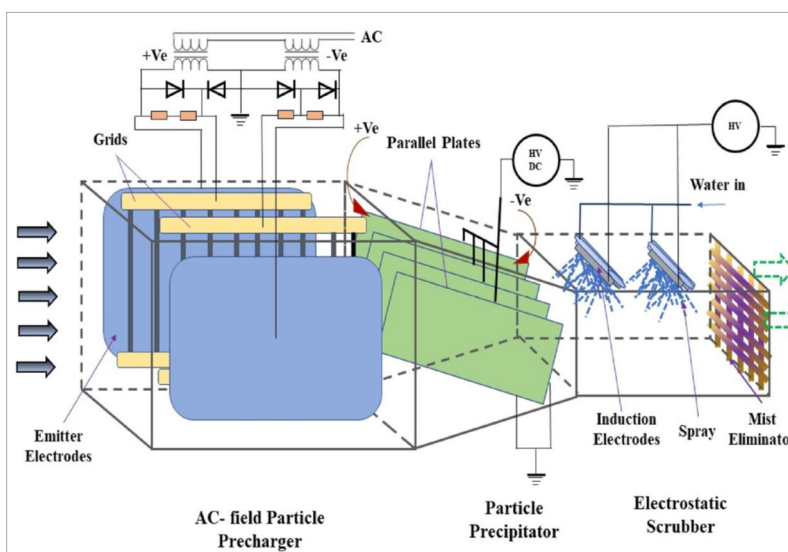
jenjima za sagorevanje biomase i prečišćavanje otpadnih dimnih gasova iz hemijskih reaktora ili termoeenergetskih postrojenja. Njihova primena je naročito važna u tretmanima dimnih gasova iz savremenih spalionica čvrstog, tečnog i gasovitog otpada, radi omogućavanja dostizanja zahtevanih granica emisija prašastih čestica u atmosferu.

5. PERFORMANSE TEHNOLOGIJA FILTRACIJE I SEPARACIJE GASOVA

Analiza različitih tehnologija pokazuje da ne postoji univerzalno rešenje za sve tipove gasnih struja. Efikasnost svake metode zavisi od tipa i sastava gasa, veličine i gustine čestica, prisustva vlage i specifičnih procesnih uslova (temperatura, pritisak, brzina). U industrijskoj praksi najčešće se koriste kombinovani sistemi koji omogućavaju višestepeno prečišćavanje gasa, pri čemu se u svakoj fazi uklanja određeni tip nečistoće [2–4].

Na primer, ciklonski separator može efikasno ukloniti krupne čestice (>5 μm), ali nije pogodan za fine aerosole. Zato se iza njega često postavlja Venturi skruber ili koalescentni filter, koji odstranjuju čestice veličine 0,1–2 μm. Kada se zahteva dodatno uklanjanje finih kapljica i kiselih gasova, sistem se dopunjuje WESP jedinicom ili hemijskim skruberom.

U završnoj fazi tretmana gasa (posebno u preradi prirodnog gasa), koristi se TEG ili membranska dehidracija za uklanjanje vlage do granice suvoće propisane standardom ISO 13686 [12].



Slika 4 - Savremena konfiguracija vlažnog elektrostatičkog filtera - WESP (preuzeto iz [3])

U tabeli 1 dat je prikaz osnovnih parametara, efikasnosti i karakteristika najčešće korišćenih tehnologija za filtraciju i separaciju gasova. Uporedni prikaz jasno pokazuje da je izbor tehnologije uvek kompromis između efikasnosti, energetske potrošnje, troškova održavanja i operativne složenosti uređaja i opreme. Na primer, cikloni su najpouzdaniji i najjeftiniji, ali ne mogu postići nivo čistoće potreban za gasne turbine ili LNG postrojenja. S druge strane, WESP i membranski sistemi nude izuzetno visoku efikasnost, ali uz znatno višu početnu investiciju i potrebu za specijalizovanim održavanjem [3, 8] i upravljanjem.

Venturi skruberi imaju prednost u tretmanu gasova sa visokim sadržajem vlage i promenljivom koncentracijom aerosola, ali zahtevaju znatnu potrošnju energije zbog visokih brzina i potrebne recirkulacije teč-

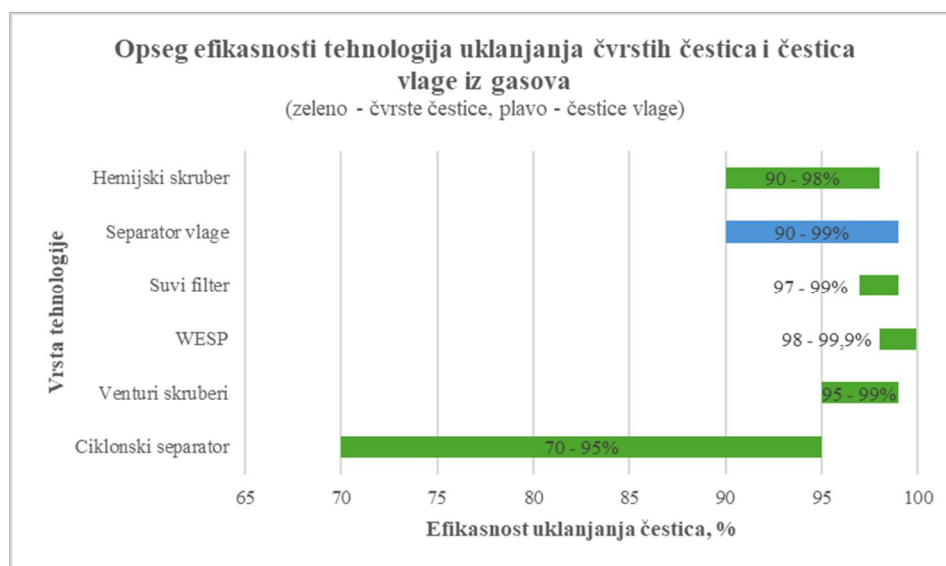
nosti, što ih svrstava u energetske najintenzivnije uređaje za filtraciju i separaciju gasova.

TEG sistemi za dehidraciju su pokazali najbolju kombinaciju pouzdanosti i energetske efikasnosti u uklanjanju vlage, ali zahtevaju preciznu kontrolu regeneracije TEG i sprečavanje kontaminacije glikola teškim ugljovodonicima [9]. Takođe nose određene procesne i ekološke rizike, usled složenosti prateće tehnološke šeme za njihov nesmetani rad.

Membranski sistemi, sa druge strane, su sve popularniji zbog njihove modularnosti, niskih troškova održavanja i mogućnosti rada na dehidraciji gasa bez regeneracije rastvarača. Oni omogućavaju sušenje gasa do nivoa ispod 100 mg/m³ vode, što ih čini konkurentnim zamenskim rešenjem za TEG, naročito u udaljenim postrojenjima i offshore uslovima [7].

Tabela 1. Pregled tehničkih parametara i performansi tehnologija filtracije i separacije gasova

Tehnologija	Tip procesa	Efikasnost uklanjanja	Pad pritiska (bar)	Tipične čestice/komponente	Napomena
Ciklonski separator	Mehanički, inercijalni	70–95% (>5 µm)	0,03–0,06	Praškaste čestice, kondenzat	Robustan, jednostavan, niža efikasnost za fine čestice
Venturi skruberi	Gas-tečnost, inercijalni	95–98% (0,5–10 µm)	0,02–0,05	Aerosoli, kiselinski gasovi	Istovremena apsorpcija gasova, viši energetske zahtev
WESP	Elektrostatički	98–99,9% (0,01–1 µm)	0,005–0,01	Fini aerosoli, SO ₂ /SO ₃ , NH ₃	Visoka efikasnost, pogodnost za korozivne gasove
Suvi filter	Mehanički, koalescentni	97–98% (>0,1 µm)	0,01–0,02	Ulje, prašina, para	Potrebna periodična regeneracija filter medijuma
Separator vlage	Mehanički, gravitacioni	90–99% (>5–10 µm)	0,003–0,005	Kondenzat, kapljice vode	Predtretman gasa, niska cena
Hemijski skruber	Apsorpcioni	90–99% (gasne primese, čestice >5–10 µm)	0,02–0,04	SO ₂ , HCl, H ₂ S	Neutralizacija kiselih gasova, krupnije čestice, troši rastvor
TEG dehidracija	Apsorpciona	70–120 mg/m ³ H ₂ O	0,01–0,03	Vodena para	Industrijski standard za dehidraciju gasa
Membranska dehidracija	Membranski	60–160 mg/m ³ H ₂ O	0,01–0,03	Vodena para	Energetski efikasna, bez regeneracije rastvarača



Slika 5 - Opseg efikasnosti razmatranih tehnologija uklanjanja čvrstih čestica i vlage iz gasova (zelena boja – čvrste čestice, plava – kapljice vlage)

Na slici 5 prikazan je opseg efikasnosti analiziranih tehnologija u uklanjanju čvrstih čestica i vlage iz gasova. Uočava se da ciklonski separator ima najširi raspon efikasnosti (70–95%), dok napredne tehnologije poput WESP i suvih koalescentnih filtera postižu efikasnost iznad 97%. Separatori vlage i hemijski skruberi pokazuju visoku efikasnost u uklanjanju kapljica i gasnih primesa, ali uz ograničenja u domenu submikronskih čestica.

Domen primene tehnologija zavisi od veličine čestica koje se uklanjaju. Ciklonski separatori su najefikasniji za krupne čestice ($>5\ \mu\text{m}$), dok Venturi skruberi pokrivaju fine čestice u opsegu $0,5\text{--}10\ \mu\text{m}$, uz mogućnost uklanjanja i do $\sim 0,2\ \mu\text{m}$ pri visokim padovima pritiska.

WESP sistemi obezbeđuju uklanjanje submikronskih frakcija ($0,01\text{--}1\ \mu\text{m}$) uz minimalan hidraulički otpor, dok suvi koalescentni filteri postižu visoku efikasnost za aerosole $>0,1\ \mu\text{m}$. Separatori vlage su namenjeni uklanjanju kapljica $>5\text{--}10\ \mu\text{m}$, a hemijski skruberi primarno uklanjaju gasne prime (SO₂, HCl, H₂S), uz ograničenu efikasnost za čvrste čestice.

Ovakva sistematizacija olakšava izbor i kombinovanje komplementarnih tehnologija u višestepenim konfiguracijama (npr. ciklon/Venturi, hemijski skruber, WESP), uz racionalan balans efikasnosti, hidrauličkog otpora, stabilnog rada i energetske potrebe postrojenja u promenljivim uslovima.

U zavisnosti od specifičnosti industrije, vrši se formiranje namenske konfiguracije tehnologija radi omogućavanja adekvatnog tretmana ulaznih gasnih struja. Ovakve hibridne konfiguracije su postale industrijski standard u savremenim sistemima prerade prirodnog gasa i tretmana dimnih gasova [6, 10].

6. UPOREDNA ANALIZA PERFORMANSI TEHNOLOGIJA FILTRACIJE I SEPARACIJE GASOVA

6.1. Trendovi u razvoju tehnologija separacije gasova

Poslednjih godina uočava se jasan trend prelaska sa pojedinačnih uređaja ka integrisanim višestepenim i modularnim sistemima, koji kombinuju više separacionih mehanizama u jednoj kompaktnoj jedinici. Takvi sistemi omogućavaju:

- povećanje efikasnosti prečišćavanja gasova uz smanjenje gubitaka pritiska,
- smanjenje potrošnje energije i hemikalija, uz mogućnost njihovog ponovnog korišćenja,
- lakše upravljanje, bolju kontrolu i jednostavniju automatizaciju rada,
- manji fizički prostor u samim uređajima.

Jedan od ključnih pravaca daljeg razvoja tehnologija za tretman različitih gasova je digitalizacija i automatizacija samog procesa filtracije. Savremeni sistemi koriste senzore za praćenje pritiska, vlažnosti i koncentracije čestica u realnom vremenu, povezane sa DCS i SCADA sistemima. Na osnovu prikupljenih podataka, algoritmi mogu automatski prilagođavati režim rada (npr. protok tečnosti u skruberu, napon u elektrofilteru ili ciklus regeneracije TEG-a u apsorpcionoj koloni) [4, 8].

Takođe, automatizacija rada i upravljanja pojedinačnom opremom za tretman gasova i hibridnim konfiguracijama, sa jedne strane garantuje odgovarajuće nivo procesne bezbednosti, dok sa druge strane omogućava postizanje zahtevanog kvaliteta izlaznog gasa.

Velika pažnja se posvećuje i korišćenju materijala nove generacije u projektovanju i izradi pojedinačne opreme za tretman gasova: specijalnim rezistentnim čelicima, kompozitnim i nanostrukturisanim membranama, specijalnim hidrofobnim premazima, keramičkim filterima i elektrodama sa katalitičkim slojem. Ovi materijali povećavaju otpornost uređaja na koroziju i toplotu, produžavaju vek trajanja samog uređaja i smanjuju potrebu za učestalim čišćenjem [5, 7].

6.2. Energetska efikasnost i održivost

Energetska potrošnja u procesima filtracije i separacije gasova može činiti 10–25% ukupnih troškova rada postrojenja. Ovo posebno treba imati u vidu prilikom projektovanja ovakvih postrojenja kada treba sagledavati ne samo početni investicioni trošak, već ukupan trošak tokom celog životnog ciklusa rada postrojenja (investicija, održavanje, zamena potrošnih komponenti, životni vek, dostupnost delova na tržištu, i dr). Zbog toga se sve više teži optimizaciji aerodinamičkih parametara u pojedinačnim uređajima (brzina gasa, konfiguracija kanala, hidraulički otpor) i rekuperaciji toplote iz regeneracionih faza (posebno kod TEG sistema). Na primer, upotrebom vakum-regeneracije umesto standardne termalne regeneracije TEG

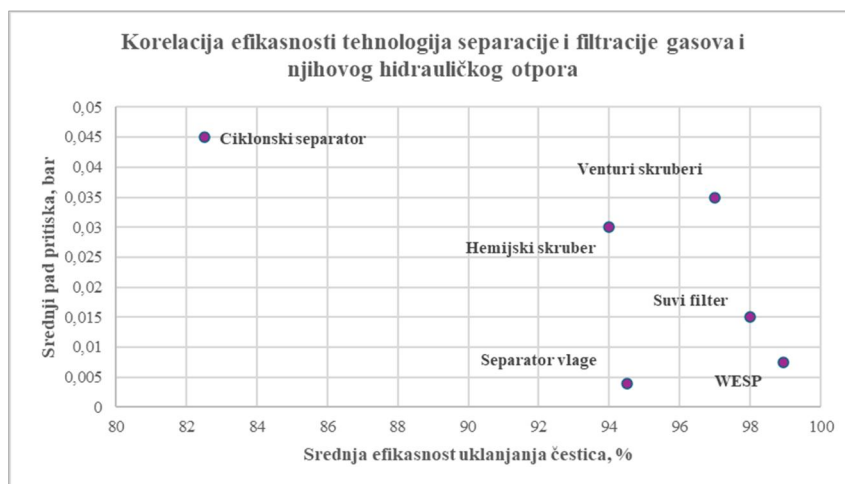
moguće je smanjiti temperaturu procesa sa 210°C na 180°C, što donosi energetska uštedu do 30% [9]. Pored energetske efikasnosti, važan aspekt je i ekološka održivost uređaja i opreme za tretman različitih gasova.

Kod hemijskih skrubera nastaju otpadne tečnosti koje zahtevaju poseban tretman (najčešće u postrojenjima za prečišćavanje industrijskih otpadnih voda), dok kod membranskih sistema i elektrofiltera ne dolazi do generisanja sekundarnog otpada koji zahteva tretman (već jednostavno odlaganje ili korišćenje u drugim granama industrije). Zbog toga se u novijim postrojenjima prednost daje tehnologijama koje ne koriste potrošne hemikalije i omogućavaju zatvoreni ciklus njihovog rada [6, 10].

Radi dodatne analize, uveden je indeks performansi definisan kao odnos srednje efikasnosti uklanjanja čestica i srednjeg pada pritiska (tabela 2). Ova ilustrativna metrika omogućava poređenje tehnologija u pogledu efikasnosti i hidrauličkog otpora. Najviši indeks (tabela 2) ostvaruje separator vlage zbog minimalnog pada pritiska, dok WESP postiže izuzetno visok indeks zahvaljujući kombinaciji vrhunske efikasnosti i niskog hidrauličkog otpora.

Tabela 2. Indeks performansi tehnologija filtracije i separacije gasova (odnos srednje efikasnosti i pada pritiska)

Tehnologija	Srednja efikasnost uklanjanja čestica (%)	Srednji pad pritiska (bar)	Indeks performansi
Separator vlage	94,5%	0,004 bar	23.625
WESP	98,95%	0,0075 bar	13.193
Suvi filter	98,0%	0,015 bar	6.533
Hemijski skruber	94,0%	0,03 bar	3.133
Venturi skruber	97,0%	0,035 bar	2.771
Ciklonski separator	82,5%	0,045 bar	1.833



Slika 6 - Korelacija srednje efikasnosti tehnologija separacije i filtracije gasova i njihovog hidrauličkog otpora (odnos srednjih efikasnosti i pada pritiska iz tabele 2)

Slika 6 prikazuje korelaciju srednje efikasnosti i srednjeg pada pritiska po tehnologijama. Jasno se vidi da WESP postiže najvišu efikasnost uz minimalan hidraulički otpor ($<0,01$ bar), dok Venturi skruberi i ciklonski separatori imaju veći pad pritiska uz nižu efikasnost. Suvi filteri i separatori vlage predstavljaju dobar kompromis između efikasnosti i energetskih zahteva. Ovakav prikaz omogućava brzu procenu pogodnosti tehnologije u zavisnosti od zahteva procesa.

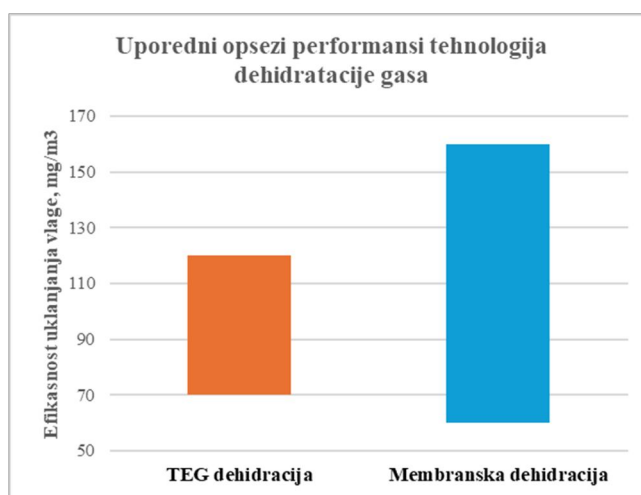
Jasno se vidi da WESP postiže najvišu efikasnost uz dovoljno mali hidraulički otpor ($<0,01$ bar), dok Venturi skruberi i ciklonski separatori imaju veći pad pritiska uz nižu efikasnost. Suvi filteri i separatori vlage predstavljaju dobar kompromis između efikasnosti i energetskih zahteva.

Suvi filteri i hemijski skruberi zauzimaju srednju poziciju, dok, sa druge strane, Venturi skruberi i ciklonski separatori imaju niže indekse usled većeg ener-

getskog zahteva. Važno je napomenuti da indeks ne uzima u obzir specifične zahteve procesa (npr. veličinu čestica, hemijsku apsorpciju), pa se koristi isključivo kao pomoćna komparativna metrika u sagledavanju efikasnosti i održivosti tehnologija filtracije i separacije gasova.

Na slici 7 prikazani su opsezi suvoće za dve dominantne tehnologije dehidracije gasa. TEG sistemi postižu suvoću od $70\text{--}120\text{ mg/m}^3$ uz pad pritiska $0,01\text{--}0,03$ bar, dok membranski moduli ostvaruju sličan hidraulički otpor uz širi opseg suvoće ($60\text{--}160\text{ mg/m}^3$).

Oba pristupa zadovoljavaju zahteve za npr. plaman prirodnog gasa na tržište, ali se razlikuju po operativnim aspektima: TEG zahteva regeneraciju rastvarača i dodatnu energiju, dok membranski sistemi nude modularnost i rad bez hemikalija. Izbor tehnologije zavisi od lokacije, dostupnosti energije i zahteva za održavanje.



Slika 7 - Uporedni opsezi performansi tehnologija dehidracije gasa

6.3. Perspektive primene u savremenoj industriji

Savremeni sistemi filtracije i separacije gasova sve češće se primenjuju i van tradicionalnih energetskih i gasnih sektora: u preradi biomase, različitim fermentacionim procesima, rafinerijama nafte, derivata i baznih ulja, cementarama i već pomenutim postrojenjima za preradu ili sagorevanje različitih vrsta otpada.

Posebno zanimljiva oblast su mikro-modularne jedinice za tretman gasova na samim mestima eksploatacije (npr. proizvodnja biogasa na poljoprivrednim farmama, prečišćavanje gasa u proizvodnji iz nekonvencionalnih resursa nafte i dr), gde su kompaktni TEG i membranski sistemi omogućili preradu i sušenje gasova direktno na lokaciji [7, 11].

U industriji prirodnog gasa i petrohemiji, hibridni sistemi sa kombinovanim separatorima, elektrofilterima i TEG/membranskim modulima predstavljaju standardnu praksu, omogućavajući visok stepen

suvoće i kvaliteta prirodnog gasa, garantujući stabilan i nesmetan rad i smanjenu emisiju zagađujućih materija. Očekuje se da će u narednim godinama razvoj tehnologija za tretman različitih vrsta gasova ići u pravcu automatizovanih, integrisanih i digitalno upravljanih sistema koji će kombinovati monitoring, analitiku i prediktivno upravljanje po njihovim performansama u realnom vremenu.

7. ZAKLJUČAK

Tehnologije filtracije i separacije gasova predstavljaju ključne korake u pripremi, preradi i transportu gasnih tokova u različitim industrijskim granama. Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da:

- Mehanički sistemi (cikloni, Venturi skruberi, suvi filteri) i dalje čine osnovu tretmana gasa, zbog jednostavnosti i pouzdanosti i niske cene, ali značajne energetske potrošnje tokom operativnog rada.

- Napredne tehnologije za tretman gasova (WESP, TEG, membranski sistemi) omogućavaju uklanjanje i najfinijih čestica i vlage uz minimalne energetske gubitke, ali visoka inicijalna ulaganja.
- Kombinovani i višestepeni sistemi pružaju optimalan balans između efikasnosti, troškova i održivosti i predstavljaju najčešći izbor u savremenoj industrijskoj praksi u većini analiziranih oblasti.
- Integracija digitalnog i automatskog upravljanja ovakvim postrojenjima i upotreba novih materijala za njihovo projektovanje i izradu, obezbeđuje produžen vek trajanja opreme, bolju kontrolu procesa prečišćavanja gasova, kao i usklađenost sa sve strožim ekološkim zahtevima i regulativom.
- Razvoj modularnih i kompatibilnih integrisanih jedinica za tretman specifičnih vrsta gasova na samoj proizvodnoj ili udaljenoj lokaciji zauzima značajno mesto u praksi.

Razvoj novih materijala, poboljšanje energetskih performansi i digitalizacija operativnih procesa čine osnovne pravce budućeg unapređenja sistema i opreme za filtraciju i separaciju gasova. Takvi sistemi ne samo da doprinose boljoj efikasnosti i pouzdanosti industrijskih postrojenja, već predstavljaju i značajan korak ka ostvarivanju koncepta održive, nisko-ugljenične industrije budućnosti [6–10], što je naročito bitno u industriji prirodnog gasa, kao tranzicionoj grani ka obnovljivim izvorima energije.

LITERATURA

- [1] Kim H. J., Han B., Woo C. G., Kim Y. J., Ono R. & Oda T. Performance evaluation of dry and wet electrostatic precipitators used in an oxygen-pulverized coal combustion and a CO₂ capture and storage pilot plant. *Journal of Aerosol Science*, vol. 77, pp. 116–126, 2014.
- [2] El-Dessouky H. T., Alatiqi I. M., Ettouney H. M. & Al-Deffeeri N. S. Performance of wire mesh mist eliminator. *Chemical Engineering and Processing*, vol. 39, No. 2, pp. 129–139, 2000.
- [3] Mukherjee S., Siddiqi H., Maiti P., Parmar P. & Meikap B. C. A comprehensive analysis of removal of hazardous dust particulates from chemical and process industries off gases by advanced wet scrubbing techniques – A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 91, pp. 105406, 2024.
- [4] Liu Z., Chen D. R., Wang P. & Ji, Z. Effect of high pressure on the performance of coalescing filter cartridges for natural gas purification. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 148, pp. 1077–1089, 2021.
- [5] Gregorovičová E. & Pospíšil J. Ceramic filters for high-temperature flue gas filtration and their regeneration: A review of the current state of knowledge. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 190, pp. 688–703, 2024.
- [6] Chong D. J. S., Foo D. C. Y. & Putra Z. A. A reduced order model for triethylene glycol natural gas dehydration system. *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 44, pp. 51–67, 2023.
- [7] Chen S., Zeng L., Li Q., Dai Z., Zhang Z. & Yi S. Membrane-based natural gas dehydration: Techno-economic analysis of membrane process designs with different potential application scenarios. *Separation and Purification Technology*, vol. 378, pp. 134564, 2025.
- [8] Di Natale F., Carotenuto C., D’Addio L., Jaworek A., Krupa A., Szudyga M. & Lancia A. Capture of fine and ultrafine particles in a wet electrostatic scrubber. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 3, No. 1, pp. 349–356, 2015.
- [9] Chebbi R., Qasim M. & Abdel Jabbar N. Optimization of triethylene glycol dehydration of natural gas. *Energy Reports*, vol. 5, pp. 723–732, 2019.
- [10] Dehydration with glycol. Society of Petroleum Engineers (SPE), OnePetro Petrowiki, 2025.
- [11] Fan J., Zhang X., Jiang X., Yang Z., Xie L., Wang L., Ma L., Wang H. & Chang, Y. Cyclone-coalescence separation technology for enhanced droplet removal in natural gas purification process. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 75, pp. 191–203, 2024.
- [12] ISO 13686:2013:1998(en), Natural Gas – Quality Designation

SUMMARY

MODERN TECHNOLOGIES FOR GAS FILTRATION AND SEPARATION: OVERVIEW OF KEY OPERATING PRINCIPLES, AVAILABLE EQUIPMENT, AND THEIR CURRENT INDUSTRIAL APPLICATIONS

Abstract – Gas filtration and separation are fundamental operations in natural gas processing and transportation, as well as in chemical, energy, and petrochemical sectors. Their application extends equipment life, reduces pollutant emissions, protects the environment, and improves plant energy efficiency. This review presents modern approaches to gas stream filtration and separation, focusing on mechanical, electrostatic, chemical, and membrane technologies. It covers operating principles, efficiency parameters, and key limitations of cyclone separators, Venturi scrubbers, wet electrostatic precipitators (WESP), dry and coalescent filters, and TEG and membrane dehydration systems. Comparative analysis shows that targeted integration of multistage systems, widely applied in modern industrial practice, can achieve gas separation efficiencies of up to 98–99%, with minimal pressure drop and significant reductions in energy losses and emissions of pollutants and greenhouse gases, ensuring operational sustainability.

Key Words: *filtration, separation, dehydration, membranes, efficiency, sustainability*