

# Tehnike pročišćavanja zraka

---

**Merkaš, Adriana**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:644970>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom](#).

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Adriana Merkaš

ZAVRŠNI RAD

Sisak, lipanj 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Adriana Merkaš

## **TEHNIKE PROČIŠĆAVANJA ZRAKA**

### **ZAVRŠNI RAD**

Voditelj: doc. dr. sc. Vesna Očelić Bulatović

Suvoditelj: prof. dr. sc. Anita Štrkalj

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

- prof. dr. sc. Ivan Brnardić, predsjednik
- doc. dr. sc. Vesna Očelić Bulatović, član
- prof. dr. sc. Anita Štrkalj, član
- prof. dr. sc. Zoran Glavaš, član
- izv. prof. dr. sc. Ljerka Slokar Benić, član
- doc. dr. sc. Ivana Ivanić, zamjenski član

Sisak, lipanj 2021.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

IME: ADRIANA

PREZIME: MERKAŠ

MATIČNI BROJ: BE-3647/17

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

## IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj **završni** / diplomski / doktorski rad pod naslovom:

### TEHNIKE PROČIŠĆAVANJA ZRAKA

---

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, 16.05.2021.

---

\_\_\_\_\_  
(vlastoručni potpis)

\_\_\_\_\_  
*Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.*

*Od srca se zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr.sc. Vesni Očelić Bulatović na svim danim savjetima, pomoći i usmjeravanju tijekom izrade ovog rada. Također, zahvaljujem se svim profesorima Metalurškog fakulteta u Sisku na prenesenim znanjima, savjetima i vještinama koje ću koristiti u daljnjem životu. Zahvaljujem se i svojim kolegama sa Fakulteta na podršci i pomoći tijekom studiranja.*

*Posebnu zahvalu dajem svom mužu Matiji koji mi je pružio najveću podršku tijekom cijelog studiranja.*

## **SAŽETAK**

Danas kada smo suočeni s ubrzanim razvojem modernih tehnologija i industrijalizacijom općenito, istodobno se suočavamo s gorućim problemom onečišćenja okoliša, odnosno rastućim problemima narušavanja kvalitete zraka. Onečišćenje okoliša upravo nastaje kada okoliš ne može više akumulirati, obraditi i neutralizirati štetne učinke ljudskog djelovanja, te postaje globalni problem s vidljivim negativnim posljedicama za ljudsko zdravlje i cjelokupni ekosustav te je usko povezan s klimatskim promjenama. Zrak je posebno onečišćen ako sadrži tvari u koncentracijama koje izazivaju štetne posljedice za zdravlje čovjeka, životinja i biljaka te nanosi štetu okolišu i gospodarskim djelatnostima.

U ovome radu dan je osvrt osnovnih izvora onečišćenja zraka te je obuhvaćen pregled najnovijih tehnika pročišćavanja zraka za učinkovito smanjenje koncentracije onečišćujućih tvari u zraku.

Ključne riječi: onečišćenje okoliša, onečišćenje zraka, tehnike pročišćavanja zraka

## **AIR PURIFICATION TECHNIQUES**

### **ABSTRACT**

Today, when we are faced with accelerated development of modern technologies and industrialization in general, at the same time we are facing the burning problem of environmental pollution as a growing problem of deteriorating air quality. Environmental pollution occurs when the environment can no longer accumulate, process and neutralize the harmful effects of human activities and it becomes a global problem with visible negative consequences of human health and the entire ecosystem and is closely linked to climate change. Air is particularly polluted if it contains substances in concentrations that cause harmful effects on human, animal and plants or harm the environment and economic activities.

This paper reviews the basic sources of air pollution and includes an overview of the latest air purification techniques for effective reduction of pollutant concentration in the air.

Keywords: environmental pollution, air pollution, air purification techniques

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ONEČIŠĆENJE ZRAKA.....</b>	<b>2</b>
2.1.  Lebdeće čestice.....	6
2.2.  Dušikovi oksidi.....	6
2.3.  Sumporovi oksidi.....	7
2.4.  Ugljikovi oksidi .....	7
2.5.  Staklenički plinovi.....	8
2.6.  Ugljikovodici .....	8
<b>3. UTJECAJ ONEČIŠĆENJA ZRAKA .....</b>	<b>9</b>
3.1.  Utjecaj na čovjeka.....	9
3.2.  Utjecaj na floru i faunu .....	11
3.3.  Utjecaj u zatvorenom prostoru.....	12
<b>4. TEHNIKE PROČIŠĆAVANJAZRAKA .....</b>	<b>13</b>
4.1.  Najbolje raspoložive tehnike.....	13
4.2.  Mehanički zračni filtri.....	13
4.3.  Prozirni PAN filter .....	16
4.4.  Fotokatalitički materijali .....	17
4.5.  Kompozitne membrane pomoću sojinih proteina .....	18
4.6.  Ultratanke filtracijske membrane .....	19
4.7.  Vrećasti filtri .....	20
4.8.  Centrifugalni taložnici – cikloni.....	21
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>23</b>
<b>6. LITERATURA.....</b>	<b>23</b>
Životopis.....	26

# 1. UVOD

Na temelju izvješća Svjetske zdravstvene organizacije (engl. *World Health Organization*, WHO), onečišćenje zraka smatra se danas rastućim ekološkim problemom. U posljednjih nekoliko godina kvaliteta zraka pojavila se kao glavni društveni problem zbog visoke razine onečišćenja, odnosno visoke koncentracije lebdećih čestica (engl. *particulate matter*, PM) i to najviše u velikim urbanim gradovima. Povećanje koncentracije lebdećih čestica dovelo je do povećanja broja prerane smrti, dosegnuvši 1,2 milijuna smrti u svijetu upravo zbog onečišćenja zraka. Koncentracije onečišćujućih tvari u zraku variraju tijekom dana, tjedna i godine, ovisno o meteorološkim uvjetima kao i intenzitetu ljudske djelatnosti. Općenito, Svjetska zdravstvena organizacija ukazuje da 92% svjetske populacije živi u mjestima gdje je razina onečišćenja zraka narušena, te upozoravaju na hitna rješenja za smanjenje emisije onečišćenih tvari u zraku te poboljšanje kvalitete zraka.

Statistički podaci Svjetske zdravstvene organizacije pokazuju da 9 od 10 ljudi udiše zrak koji sadrži visoku razinu onečišćujućih tvari, dok su siromašne zemlje najviše izložene. Onečišćenje zraka ne predstavlja prijetnju samo zdravlju ljudi, već i životinjama te je usko povezana s klimatskim promjenama, posebice s globalnim zagrijavanjem. Kombinirani učinci onečišćenja zraka iz okoline (na otvorenom) i u kućanstvu glavni su uzročnici rastuće smrtnosti ljudi i to najviše od moždanog udara, bolesti srca, kroničnih opstruktivnih plućnih bolesti, raka pluća i akutnih respiratornih infekcija.

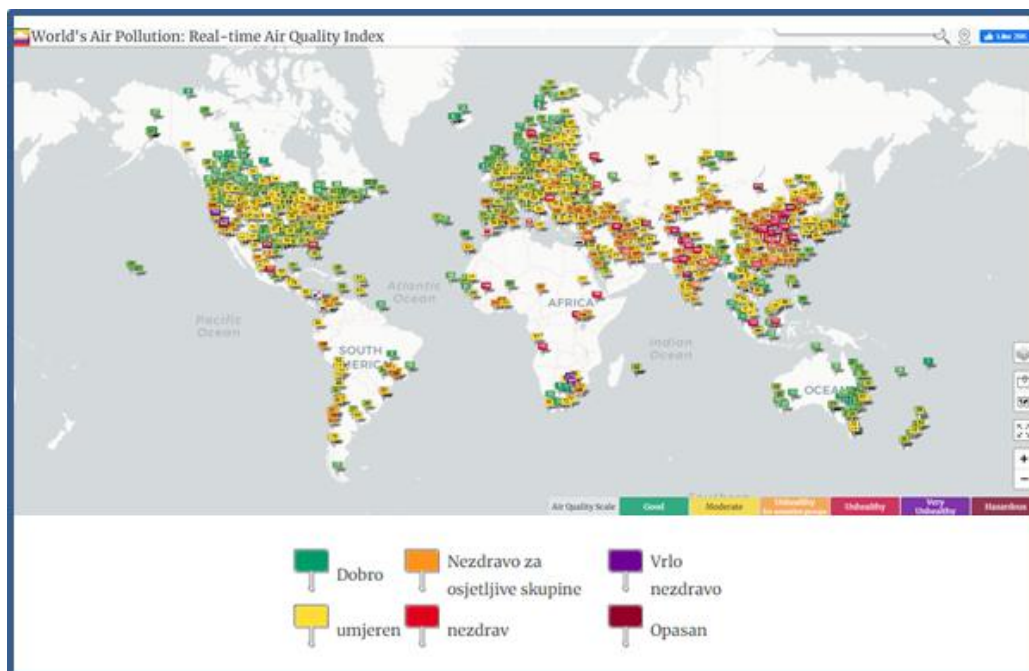
Industrija u vidu tehnika pročišćavanja zraka u posljednje vrijeme bilježi rast u pogledu potražnje i prodaje pročišćivača zraka. Također, mnoga današnja znanstvena istraživanja usmjerena su na kreiranje različitih tehnika za pročišćavanja zraka.

U ovom završnom radu prikazane su najnovije tehnike pročišćavanja zraka koje su ekonomski isplative, a istodobno i učinkovite. Predstavljena je povezanost najčešćih i najznačajnijih tehnika pročišćavanja zraka poput onih koje koriste mehaničke zračne filtre ((engl. *high-efficiency particulate air*, HEPA), elektrostatski filtri, aktivni ugljen, (engl. *ultraviolet*, UV), (Poliakrilonitrilni, PAN filtre), fotokatalitičke materijale, kompozitne membrane (na osnovu sojinih proteina)), ultratanke filtracijske membrane, vrećaste filtre i centrifugalne taložnike odnosno ciklone.



## 2. ONEČIŠĆENJE ZRAKA

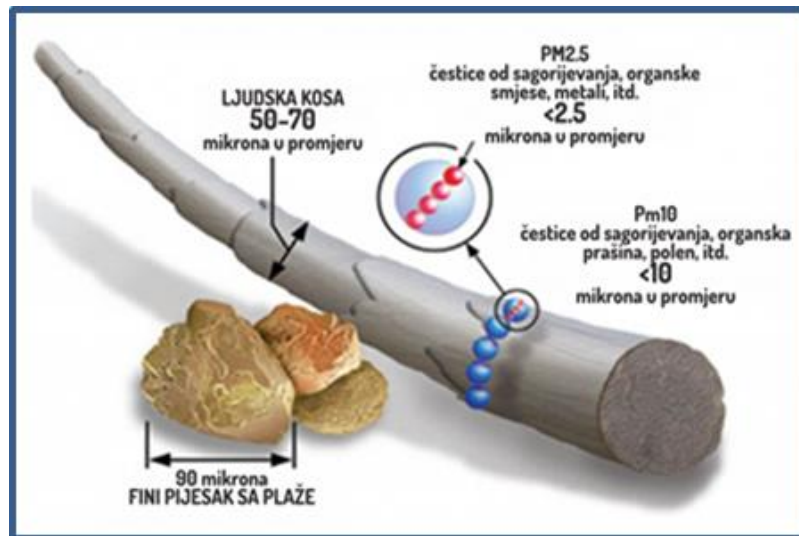
Onečišćenje zraka mješavina je čestica i plinova koji se mogu manifestirati kao štetne koncentracije bilo prisutne u otvorenom i/ili zatvorenom prostoru. Onečišćujuće tvari u zraku ispuštene u jednoj zemlji atmosferom mogu dospjeti u druga mjesta, zemlju, gdje mogu uzrokovati i/ili narušiti kvalitetu zraka [1]. Čađa, dim, plijesan, pelud, metan i ugljikov dioksid samo su nekoliko primjera uobičajenih onečišćujućih tvari. Onečišćenje zraka odnosi se na ispuštanje onečišćujućih tvari u zrak koje štete ljudskom zdravlju i planetu u cijelosti [2]. Na slici 1. prikazana je kvaliteta zraka u svijetu.



**Slika 1.** Kvaliteta zraka u svijetu [3]

Indeks kvalitete zraka temelji se na mjerenju čestica ( $PM_{2.5}$  i  $PM_{10}$ ), ozona ( $O_3$ ), dušikovog dioksida ( $NO_2$ ), sumpornog dioksida ( $SO_2$ ) i emisije ugljikovog monoksida ( $CO$ ). Većina postaja na karti prati podatke za  $PM_{2.5}$  i za  $PM_{10}$ , ali postoji nekoliko izuzetaka gdje su podaci dostupni samo za  $PM_{10}$ . Lebdeće čestice  $PM_{2.5}$  i  $PM_{10}$  složene su kombinacije različitih organskih i anorganskih tvari te sadrže nitrata, sulfata, amonijak, neke od kristala poput morske soli, metalnih oksida, vodikovih iona i vode. Mogu se pronaći u različitim oblicima, počevši od čađe, prašine i pepela do dima i peludi. S obzirom da ulaze u dišne putove, kroz alveole mogu dospjeti i u krvotok te time uzrokovati ozbiljne zdravstvene probleme. Grube čestice,  $PM_{10}$  su one koje imaju promjer manji od  $10 \mu m$ , npr. pelud ili prašina. Nastaju zbog loženja na kruta goriva te ispušnih plinova automobila i industrije, a

sadrže željezo, aluminij i silikate. Fine čestice,  $PM_{2,5}$  su puno opasnije jer mogu lakše i dublje dospjeti u ljudski organizam. Sastoje se od sulfata, nitrata, amonijaka, organskog i elementarnog ugljika, teških metala (olovo, bakar, kadmij, cink) te nastaju sagorijevanjem fosilnih goriva. S obzirom na činjenicu da su  $PM_{2,5}$  čestice vrlo male duže se zadržavaju u zraku od čestica  $PM_{10}$  (slika 2.). Najveći udio čestica u zraku dolazi iz prometa, nakon čega slijedi dim koji nastaje izgaranjem biomase, na trećem mjestu nalaze se sulfati koji nastaju u termoelektranama i rafinerijama nafte, dok je izgaranje teških ulja na posljednjem mjestu [4].

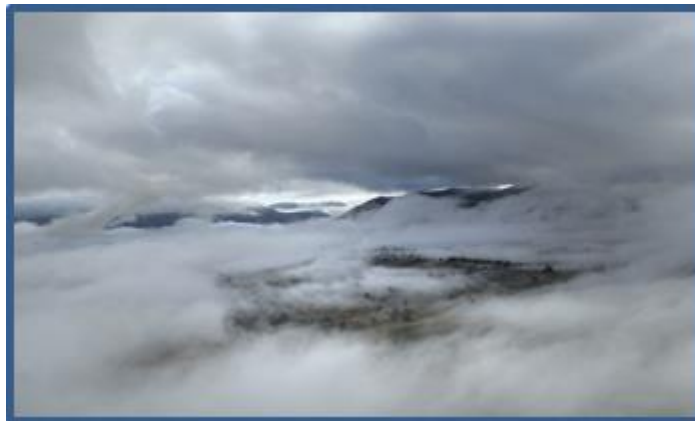


**Slika 2.** Relativna veličina čestica  $PM_{10}$  i  $PM_{2,5}$  [5]

Glavni izvori onečišćenja zraka mogu biti prirodnog i antropogenog podrijetla. Prirodni izvori koji onečišćuju zrak uključuju šumske požare, vulkanske erupcije, eroziju vjetrom, širenje peludi, isparavanje organskih spojeva i prirodnu radioaktivnost. Vulkani, od kojih na Zemlji ima približno 700 aktivnih tijekom erupcija izbacuju znatne količine različitih plinova i vulkanske prašine, spadaju u skupinu izvora prirodnog podrijetla. U izvore prirodnog podrijetla spadaju i požari velikih razmjera koji itekako predstavljaju veliku opasnost za kvalitetu zraka. Radioaktivni plin radon koji se nalazi u Zemljinoj kori je glavni prirodni izvor radijacije na Zemlji. Izvori onečišćenja zraka odnose se na različita mjesta, aktivnosti ili čimbenike koji su odgovorni za ispuštanje onečišćujućih tvari u atmosferu. Izvori koje je stvorio čovjek (antropogeni izvori onečišćenja) uglavnom se odnose na sagorijevanje različitih vrsta goriva (stacionarni izvori uključuju dimne pakete elektrana, proizvodnih pogona i spalionica otpada, kao i peći i druge vrste uređaja za grijanje na gorivo), kemijsku industriju, prerađivačku industriju, promet, proizvodnju energije, itd. Prirodni izvori mogu biti prašina iz prirodnih izvora, obično velikih površina s malo ili nimalo vegetacije.

Trovanje i smrtni slučajevi često su uzrokovani neispravnim ventilacijskim otvorima i dimnjacima ili izgaranjem ugljena u zatvorenom prostoru. Nedostatak cirkulacije zraka u zatvorenom prostoru omogućuje onečišćujućim tvarima da se sve više akumuliraju u zraku, puno više nego što je njihova pojavnost u prirodi [2].

Okolišni zrak u vanjskim i zatvorenim prostorima podložan je kontaminaciji krutim ili tekućim česticama mineralnog ili organskog podrijetla koje se nazivaju aerosoli (slika 3.). Prosječna koncentracija aerosola iznad europskog kontinenta mjeri se po 1 litri zraka, te se dijele na prašinu (male čvrste čestice), dim (sitne čvrste kapljice), maglu (sitne kapljice), sumaglicu (vrlo sitne kapljice) i paru (plinovita supstanca). Uzroci zbog kojih nastaju navedene čestice proizlaze iz prirodnih procesa koji se odvijaju na površini Zemlje, raslinstvu na Zemlji, organizmima koji nastanjuju Zemlju (zajedno s ljudskim bićima) te tehnološkim procesima koji su stvoreni od strane čovjeka. U prirodne izvore onečišćenja zraka, također spadaju prašina nošena vjetrom, aeroalergeni, čestice morske soli, dim, leteći pepeo, plinovi šumskih požara, plinovi iz močvara, mikroorganizmi (bakterije i virusi), magla, vulkanski pepeo i plinovi, prirodna radioaktivnost, meteorska prašina te prirodna isparavanja. S druge strane, postoje i umjetni izvori onečišćenja zraka u koje spadaju onečišćenja uzrokovana radom termoelektrana i toplana, onečišćenja uzrokovana radom industrijskih postrojenja i poljoprivredom, onečišćenja uzrokovana transportnim sredstvima, onečišćenja uzrokovana spaljivanjem različitih vrsta otpada te onečišćenja uzrokovana ostalim djelatnostima koje nisu obuhvaćene u navedenim skupinama, poput procesa kemijskog čišćenja te tiskanja i bojanja [6].

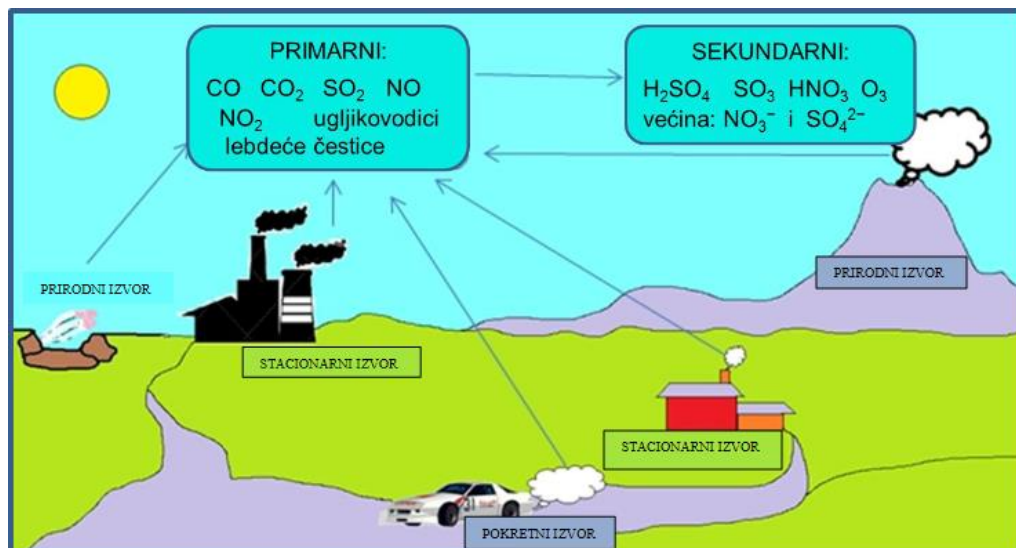


**Slika 3.** Aerosoli [7]

Izvori onečišćenja zraka s obzirom na pokretljivost mogu se podijeliti na nepokretne i pokretne izvore. Pokretni izvori su prijevozna sredstva koja ispuštaju onečišćujuće tvari u zrak poput motornih vozila, šumskih i poljoprivrednih strojeva, lokomotiva, plovnih objekata

i zrakoplova. Nepokretni izvori mogu biti točkasti te difuzni izvori. U točkaste izvore spadaju izvori kod kojih se onečišćujuće tvari ispuštaju u zrak, u što spadaju termoelektrane, rafinerije, tehnološki procesi, industrijski pogoni i uređaji. Difuzni izvori su oni izvori kod kojih se onečišćujuće tvari u zrak unose bez određenog ispusta [6].

Onečišćenje zraka je posljedica djelovanja primarnih i sekundarnih onečišćenja (slika 4.). Primarna onečišćenja zraka mogu se svrstati u pet kategorija: ugljikov monoksid (CO) i ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>), ugljikovodici (HC) ili hlapljivi organski ugljikovodici, dušikov monoksid (NO) i dušikov dioksid (NO<sub>2</sub>), sumporov dioksid (SO<sub>2</sub>) i sumporov trioksid (SO<sub>3</sub>) te krute čestice ili kapljice koje su dovoljno sitne da bi ostale u zraku (čađa, dim, prašina). Sekundarna onečišćenja poput vodene pare, formiraju se tijekom kemijskih reakcija između primarnih onečišćenja i drugih atmosferskih tvari. Većina onečišćenja može dospjeti na vrlo velike udaljenosti prije nego što se pretvore u neki drugi oblik zbog brzine strujanja zračnih masa.



**Slika 4.** Primarne i sekundarne onečišćujuće tvari [8]

Problemi onečišćenja zraka potječu još iz 1306. g. kada je kralj Edward III zabranio uporabu ugljena u Londonu kako bi se spriječilo onečišćenje zraka, a smrtna kazna je bila za nepridržavanje zabrane. Još u srednjem vijeku, dimnjaci na kućama nisu bili napravljeni da smanjuju onečišćenje zraka, već samo da odvede plinove i osiguraju dovod zraka za proces izgaranja. Iako je u 18. st. dim bio sredstvo borbe protiv zaraznih bolesti, već od 13. st. poznato je da dim od izgaranja ugljena oštećuje građevine i onečišćuje vodu. S obzirom na sve značajnije posljedice promjene kvalitete zraka na globalnoj razini, međunarodna zajednica pokrenula je niz mjera kojima se kroz organizaciju UN, međudržavnim sporazumima, Konvencijama i Protokolima nastoji zaustaviti trend onečišćenja zraka te staviti pod nadzor

ispuštanje u zrak štetnih tvari i onečišćivača, a pritom, naravno, zadržati razumnu razinu održivog razvoja [9].

## **2.1. Lebdeće čestice**

Lebdeće čestice kao oblik onečišćenja atmosfere su čestice bilo koje tvari, osim čiste vode, koje čine približno 5% mase svih onečišćenja. Postoje u tekućem ili čvrstom stanju pod normalnim uvjetima, te su mikroskopske ili sub-mikroskopske veličine. Čestice tvore prašinu nakon procesa miniranja, mljevenja, bušenja ili brušenja te dim koji nastaje kao posljedica nepotpunog izgaranja. Prirodnim izvorom emisija čestica smatra se prašina nošena vjetrom, čestice nastale fotooksidacijskim reakcijama između ozona i ugljikovodika te šumski požari i morske maglice [6]. Lebdeće čestice  $PM_{10}$  i  $PM_{2.5}$  udisanjem mogu duboko doprijeti u respiratorni trakt čovjeka, stoga se smatraju vrlo opasnim česticama na zdravlje ljudi. Na sebe mogu vezati vrlo štetne tvari poput policikličkih aromatskih ugljikovodika s većim brojem prstena koji imaju jako izraženo mutageno ili kancerogeno djelovanje. U atmosferi se stvaraju transformacijom iz emisijskih plinova. Lokacija, godišnje doba i vremenski uvjeti su smjernice o kojima ovisi njihov kemijski i fizikalni sastav. Najvažniji izvori lebdećih čestica su industrija, promet i grijanje stambenih objekata. Najmanje frakcije lebdećih čestica predstavljaju najveću opasnost za ljudsko zdravlje. Značajnu ulogu u emitiranju najviše lebdećih čestica imaju stacionarni industrijski objekti te pokretni izvori onečišćenja. U dišnom sustavu mogu se nataložiti sve lebdeće čestice, ali čestice  $PM_{2.5}$  i  $PM_{10}$  su najveća opasnost za zdravlje ljudi [10].

## **2.2. Dušikovi oksidi**

U grupu dušikovitih oksida spadaju  $NO_x$ ,  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $N_2O_3$ ,  $N_2O_4$  i  $N_2O_5$ . Dušikov monoksid ( $NO$ ) i dušikov dioksid ( $NO_2$ ) koji nastaju izgaranjem fosilnih goriva pri visokim temperaturama smatraju se značajnijim onečišćivačima.  $NO$  pod djelovanjem sunca prelazi u  $NO_2$ , vrlo lako se spaja s kisikom. To je blago u vodi slabo topiv plin. Njegova štetnosti za ljudski organizam proizlazi u tome što se kao i  $CO$  veže za hemoglobin, te se pri većim koncentracijama osjeti njegov prodoran miris.  $NO_2$  je plin tamnocrvene boje koji je najotrovniji od svih dušikovitih oksida te s obzirom da izaziva nepovoljne posljedice za vegetaciju spada u fitotoksične tvari. Djelovanje na živa bića očituje se opažanjem mirisa, ometanjem normalnog disanja, nadraživanjem čula mirisa, osjećajima jakog bola respiratornog trakta te smrću. Osim što štetno djeluje na ljudsko zdravlje, uzrokuje nastajanje

kiselih kiša, djeluje na količinu ozona u stratosferi te uzrokuje stvaranje ozona u prizemnome dijelu atmosfere, odnosno u troposferi [6].

### **2.3. Sumporovi oksidi**

U grupu sumporovih oksida spadaju SO, S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, S<sub>2</sub>O<sub>7</sub> i SO<sub>4</sub> od kojih je najštetniji za okoliš sumporni dioksid (SO<sub>2</sub>). Sumporni dioksid je nezapaljiv, neeksplozivan, bezbojan plin koji ima karakterističan, oštar miris, vrlo je topiv u vodi te nastaje potpunim izgaranjem sumpora uz oslobađanje topline. Sumporna kiselina je jedan od glavnih uzročnika kiselih kiša, a do nje dolazi reakcijom sumpora s ozonom, peroksidima, vodenom parom te nekim drugim spojevima u zraku. Izvori sumporovih oksida u atmosferi su vulkanske aktivnosti i procesi biološkog raspadanja, te morska voda iz koje pod djelovanjem vjetrova nastaje „morska maglica“. Izgaranje fosilnih goriva, industrija prerade nafte te metalurgija obojenih metala su umjetni izvori nastajanja sumporovih oksida. Plin SO<sub>2</sub> u velikoj je mjeri štetan za ljudsko zdravlje jer udisanjem u pluća s vlagom stvara sumpornu i sumporastu kiselinu, te nadražuje ograde čula i vida, kao i sluzokožu [6]. Problem emisija SO<sub>2</sub> mogao bi se riješiti potpunim uklanjanjem sumpora iz goriva, čiji najveći antropogeni izvor je izgaranje fosilnih goriva [9].

### **2.4. Ugljikovi oksidi**

U grupu ugljikovih oksida spadaju ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>) te ugljikov monoksid (CO). Ugljikov monoksid (CO) nastaje nepotpunim izgaranjem tvari koji sadrže ugljik te je plin bez boje i mirisa. Izgara plamenom plave boje, ali ne podržava gorenje. U atmosferu dolazi kao posljedica nepotpunog izgaranja fosilnih goriva, najčešće iz motora automobila te industrija. Ipak najveći udio CO dolazi iz prirodnih izvora gdje se CO javlja zajedno s metanom u močvarnim i drugim plinovima prilikom raspadanja tvari. U prirodi je koncentracija CO višestruko manja nego što je to slučaj u gradovima, gdje u gustom prometu koncentracija CO iznosi od 80 do 150 mg/m<sup>3</sup>, za razliku od normalne koncentracije atmosferskog CO koji u prirodi iznosi oko 0,1 mg/m<sup>3</sup>. Ugljik monoksid vrlo je otrovan plin, jer reagira s hemoglobinom u krvi potiskujući kisik vezan za hemoglobin. Trovanje ugljik monoksidom može doći kada se CO poveže s 30% hemoglobina u krvi, dok smrt nastupa kada se CO poveže s 60-80% hemoglobina. Ugljikov dioksid (CO<sub>2</sub>) je plin slabog oštrog mirisa koji je 1,5 puta teži od zraka te je nezapaljivi, bezbojan plin. CO<sub>2</sub> nastaje potpunim izgaranjem, te izgaranjem ugljikovog monoksida, ne podržava gorenje te ima bitnu ulogu u kruženju ugljika u prirodi. Pridonosi efektu staklenika, a otopljen u vodi ima značajke slabe kiseline [6].

## 2.5. Staklenički plinovi

Staklenički plinovi su plinovi koji uzrokuju efekt staklenika u atmosferi, a odnose se na vodenu paru, ugljikov dioksid, metan te dušikov oksid. To su plinoviti spojevi koji u atmosferi mogu apsorbirati infracrveno zračenje te na taj način zadržati toplinu u atmosferi. Povećavanjem topline u atmosferi, staklenički plinovi dovode do efekta staklenika, poznato kao globalno zatopljenje. Promjena koncentracija stakleničkih plinova uzrokuje sposobnost Zemljine atmosfere da jače apsorbira i zadržava toplinu. Oceani, zemlja i atmosfera oslobađaju toplinu u obliku toplinskog zračenja koje iz atmosfere dolazi u svemir. Očekuje se da će klimatske promjene u mnogim područjima diljem svijeta utjecati na vrijeme, kao i učestalost toplinskih udara. Više sunčeve svjetlosti i više temperature zraka mogle bi dovesti do više koncentracije ozona u zraku. Ozon u manjim količinama iritira očnu sluznicu, grlo, nos i dišne putove, dok u većim količinama može biti smrtonosan [2]. CO<sub>2</sub> se iz atmosfere uklanja putem kiše, apsorpcijom u oceane, upijanjem u tlo te fotosintezom biljaka. Emisija CO<sub>2</sub> i drugih stakleničkih plinova određuje se primjenom Međuvladinog tijela za klimatske promjene (engl. *Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) koje je razvijeno u okviru UNFCCC konvencije. Agencija za zaštitu okoliša zadužena je za prikupljanje podataka koji su potrebni za proračun nacionalnih emisija u zrak [6].

## 2.6. Ugljikovodici

Ugljikovodici su skupina organskih spojeva čije molekule se sastoje od atoma ugljika i vodika. Policiklički aromatski ugljikovodici (PAU) istaknuti su zbog svoje kancerogenosti. U kemijskim reakcijama sa sumpornim, dušičnim oksidima i radikalima te reakcijama vezanim uz stvaranje ozona tvore različite sekundarne onečišćujuće spojeve. Nastaju pri nepotpunom izgaranju fosilnih goriva i organskih tvari, a prirodni izvori emisija PAU su vulkanske erupcije i šumski požari. U antropogene izvore emisija spadaju i industrijski procesi poput proizvodnje koksa i aluminijske prerada nafte, spaljivanje komunalnog i industrijskog otpada te ispušni plinovi automobila [6]. Metan (CH<sub>4</sub>), koji se nalazi u gornjim dijelovima Zemljine kore u plinskim poljima, prvi je u nizu zasićenih ugljikovodika. U prošlosti se nazivao i močvarni plin jer nastaje na odlagalištima otpada i u barama gdje trunu tvari organskog porijekla. Nastaje i u rudnicima ugljena, a s obzirom da su smjese metana i zraka eksplozivne, smatra se uzročnikom većine rudarskih nesreća [11].

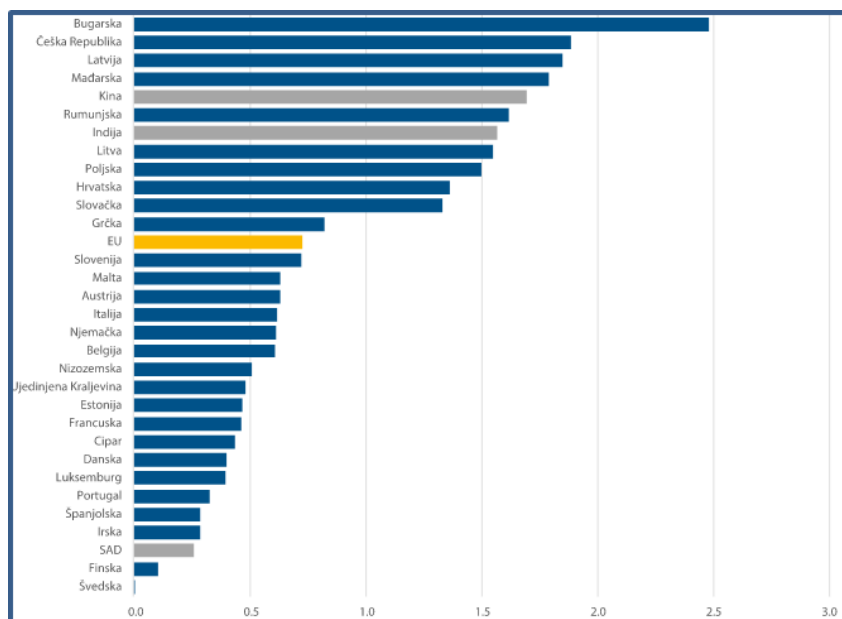
### 3. UTJECAJ ONEČIŠĆENJA ZRAKA

Onečišćenje zraka nepovoljno utječe na zdravlje ljudi, okoliš te biljni i životinjski svijet. Smanjenjem emisije brojnih onečišćivača zraka tijekom proteklih desetljeća dolazi do poboljšane kvalitete zraka. Zahvaljujući europskim i nacionalnim politikama te lokalnim mjerama smanjila se koncentracija onečišćenih tvari iz prometa, industrije te energetskog sektora. Smanjenje broja smrtnih slučajeva te bolesti od onečišćenja zraka jedan je od ciljeva održivog razvoja. Ipak, problem kvalitete zraka još uvijek nije u potpunosti riješen jer su koncentracije onečišćujućih tvari u zraku još uvijek previsoke. Onečišćenje ozonom, dušikovim oksidima i lebdećim česticama smatraju se glavnim onečišćujućim tvarima koje predstavljaju ozbiljne prijetnje ljudskom zdravlju te se s njihovom povećanom koncentracijom prekoračuju standardi kvalitete zraka, te kvalitete života. Procjenjuje se da sitne lebdeće čestice (PM<sub>2,5</sub>) u zraku utječu na skraćivanja očekivanog trajanja života u Europskoj uniji za više od osam mjeseci. Poljoprivredni usjevi izloženi su visokim koncentracijama ozona tijekom ljetnih mjeseci što dovodi do smanjenja njihove kvalitete [12].

#### 3.1. Utjecaj na čovjeka

Različite ljudske aktivnosti uzrok su emisije onečišćenja u prirodi. Nakon što dospiju u okoliš, onečišćenja se dalje prenose zrakom, vodom, tlom, živim organizmima ili različitim proizvodima, te hranom. Onečišćenje zraka faktor je rizika za mnoge vodeće uzroke smrti, uključujući bolesti srca, moždani udar, infekcije donjih dišnih putova, rak pluća, dijabetes i kroničnu opstruktivnu plućnu bolest (KOPB). Institut za metriku i procjenu zdravlja (engl. *The Institute for Health Metrics and Evaluation, IHME*) u svojoj studiji Globalnog tereta bolesti daje procjenu broja smrtnih slučajeva pripisanih nizu čimbenika rizika za bolest. U vizualizaciji vidimo broj smrtnih slučajeva godišnje pripisan svakom faktoru rizika. Onečišćenje zraka jedan je od glavnih čimbenika rizika smrti. U zemljama s niskim prihodima onečišćenje zraka nalazi se na vrhu liste čimbenika koji uzrokuju smrt. U 2017. onečišćenje zraka bilo je odgovorno za oko 5 milijuna smrtnih slučajeva na globalnoj razini. To znači da je doprinijelo 9%, gotovo 1 u 1010 smrtnih slučajeva [13]. Na slici 5. su grafički prikazane godine zdravog života izgubljene zbog onečišćenja zraka na 100 stanovnika.

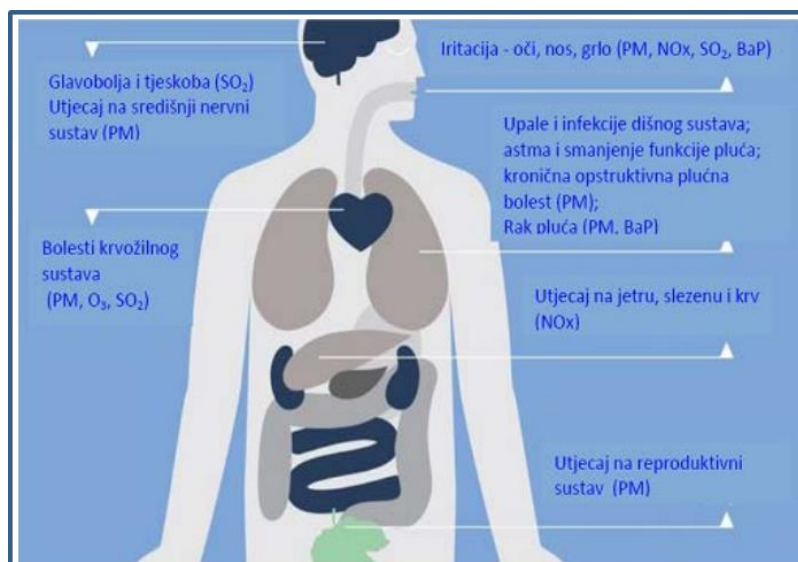




**Slika 5.** Godine zdravog života izgubljene zbog onečišćenja zraka na 100 stanovnika [14]

Značaj kvalitete zraka i održavanja odgovarajuće kvalitete zraka proizlazi iz činjenice da čovjek dnevno izmjenjuje 16 kg zraka. Najčešći oblik unošenja štetnih tvari u organizam je inhalacija putem respiratornog sustava. Štetan utjecaj onečišćenja zraka manifestira se kroz: smanjenu funkciju pluća, iritaciju očiju, nosa, usta i grla, napadaje astme, respiratorne simptome poput kašlja i hroptanja, povećane respiratorne bolesti poput bronhitisa, povećanu uporabu lijekova, smanjenu aktivnost i smanjeni nivo energije [13]. Na slici 6. prikazan je utjecaj onečišćenja zraka na zdravlje ljudi.

Onečišćenje zraka uzrokuje zdravstvene tegobe, respiratorne bolesti poput astme, bronhitisa i karcinoma pluća. Manje koncentracije onečišćujućih tvari u zraku mladim, zdravim osobama ne bi trebale pridavati ozbiljne zdravstvene probleme, no dugotrajno izlaganje višim koncentracijama onečišćenog zraka dovodi do većih, ozbiljnijih zdravstvenih problema. Obzirom na globalni problem smanjene kvalitete zraka, sve veći broj populacije ima zdravstvene tegobe uzrokovane onečišćenjem zraka, kod kojih dolazi i do razvoja mnogih bolesti. Osim razvoja bolesti, posljedice mogu biti i trenutne poput vrtoglavice, glavobolje, crvenila očiju, kašlja i teškog disanja. Onečišćenje zraka također ostavlja i posljedice na živčani, krvni i dišni sustav te na djelovanje štitne žlijezde. Sumporov monoksid u zraku u velikoj mjeri utječe na normalnu funkciju dišnog sustava te izaziva anemiju, hormonske poremećaje i poremećaje kostiju. Čovjek može unesti oko 85% sumporovog monoksida u dišni sustava respiratornim putem.



**Slika 6.** Utjecaj onečišćenja zraka na zdravlje ljudi [15]

Dušikov oksid uzrokuje pad imunoloških sposobnosti organizma, izaziva promjene u tkivima srca, jetara i bubrega te oštećuje pluća. Veće koncentracije ozona u zraku javljaju se tijekom ljetnih mjeseci što se očituje kroz sniženje krvnog tlaka i smanjenja vida kod ljudi. Dušikov dioksid ostavlja štetne posljedice po zdravlje ljudi jer se u atmosferi konvertira u nitratne čestice i postaje dio ukupne mase lebdećih čestica [16].

### 3.2. Utjecaj na floru i faunu

Osim što ostavlja negativan utjecaj na zdravlje ljudi, onečišćenje zraka uzrokuje smetnje biljnim i životinjskim vrstama. Dvije su grupe nepovoljnih utjecaja na biljne vrste, a odnose se na vidljive nepovoljne promjene te utjecaj na rast. Sagorijevanjem benzina u motorima, sagorijevanjem prirodnog plina te kemijskim proizvodnim procesima dolazi do nastajanja etilena koji ometa normalno djelovanje biljnih hormona i narušava normalan rast, uzrokujući opadanje lišća. Fluorovodik iz kemijskih postrojenja, keramičke industrije i industrije staklenih proizvoda uzrokuje sušenje dijelova lišća te dovodi do prestanka njegovog funkcioniranja. Uporabom herbicida u poljoprivredi dolazi do deformacije lišća, dok dušikov oksid uzrokuje hidrolizu lišća. Ozon koji nastaje fotokemijskom reakcijom s produktima sagorijevanja petroleja dovodi do preranog opadanja lišća. Sumporov monoksid izaziva klorozu i oštećenja koja se odnose na kemijsko razaranje pojedinih dijelova lišća. Upotreba biljnih vrsta kao indikatora onečišćenja sve je veća zbog prednosti koje se odnose na značajno veću osjetljivost na nečistoće u zraku, vrijeme promjene na biljkama relativno je kratko te se s jednostavnom usporedbom lako zaključuje o djelovanju onečišćenja. S druge strane, prisutni

su i nedostaci poput teškoća u određivanju vrsta nečistoća te nepravilnog načina održavanja. Negativan utjecaj onečišćenja zraka dovodi do izumiranja pojedinih životinjskih vrsta [6].

### 3.3. Utjecaj u zatvorenom prostoru

Svjetska zdravstvena organizacija u svom istraživanju je potvrdila da onečišćenje zraka ima nepovoljniji utjecaj u zatvorenim prostorima, nego što je to slučaj u otvorenim prostorima jer 14 puta više smrti je potvrđeno uslijed boravka u zatvorenim prostorima upravo zbog onečišćenja zraka. Svake godine oko 2,8 milijuna ljudi umire zbog onečišćenja zraka u zatvorenim prostorima. Najčešći onečišćivači koji se vrlo često javljaju u zatvorenim prostorima su dim cigarete, isparljive organske tvari (boje, lakovi, kućne kemikalije), pesticidi, pelud, grinje, produkti gorenja, radioaktivni plin radon, organski produkti kućnih ljubimaca, prašina i mikroorganizmi. Iz uobičajenih predmeta koji nas okružuju poput papir, boje, plastike, namještaja i tepiha oslobađaju se aerosoli (prašina, dim i magla) koji imaju nepovoljan utjecaj na zdravlje ljudi. Osim aerosola, izvor onečišćenja može biti i kontaminiran zrak koji se putem ventilacije dovodi u zatvoreni prostor. Onečišćivače u zatvorenom prostoru dijelimo na onečišćivači koji se oslobađaju iz namještaja i građevinskog materijala (hlapivi organski spojevi, azbest, formaldehid, radon), onečišćivači koji su rezultat aktivnosti ljudi koji borave u zatvorenim prostorijama (duhanski dim, pesticidi, bakterije, plijesni, grinje), proizvodi izgaranja (ugljičkov monoksid, dušikovi oksidi i krute čestice) te onečišćivači koji ulaze u unutarnji prostor iz vanjskog okoliša. Bakterije i virusi nalaze se u kontaminiranim ventilacijskim sustavima te klima uređajima, a mogu uzrokovati zdravstvene tegobe kao što je prehlada, gripa te razna druga virusna oboljenja. Plijesni su najopasniji onečišćivači zraka u zatvorenim prostorima i javljaju se na mjestima na kojima je prisutna vlaga kao što su kupaonice i podrumi (slika 7.) [6].



Slika 7. Plijesan [17]

## **4. TEHNIKE PROČIŠĆAVANJAZRAKA**

### **4.1. Najbolje raspoložive tehnike**

Koncept najbolje raspoložive tehnike (engl. *Best Available Tehnology, BAT*) primjenjuje se u industriji koje zadovoljavaju najviše ekonomske, tehničke i ekološke standarde kao najmoderniji i najnapredniji oblik tehnologije. Održivi razvoj je definiran prema IPPC Direktivi 96/61/EC te su njegove mjere prihvaćene od strane RH koje se odnose na smanjenje emisije stakleničkih plinova, povećanje udjela obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji energije, smanjenje stvaranja otpada i uvođenje najboljih mogućih te održivih tehnologija u proizvodnji. Engl. *Best Available Techniques reference document*, BREF referentni dokument je dokument koji detaljno opisuje primjenu BAT koncepta u mnogim industrijskim i proizvodnim procesima. BAT ili „Best Available Technology“ odnosi se na tehnologije koje su najučinkovitije u postizanju visokog stupnja zaštite okoliša (riječ „Best“), zatim tehnologije koje je moguće primijeniti pod ekonomski i tehnički prihvatljivim uvjetima (riječ „Available“) te tehnologije koje su već u primjeni (riječ „Tehnology“). Glavni cilj BAT-a je maksimalno smanjenje ili uklanjanje štetnih emisija na okoliš. Za rad nekog postrojenja potrebna je dozvola Agencije za zaštitu okoliša koja potvrđuje da primijenjena tehnologija BAT zadovoljava propise vezane uz minimalne vrijednosti emisije štetnih tvari. Bitni čimbenici o kojima ovisi odabir najbolje raspoložive tehnologije su: tehničke karakteristike postrojenja, geografski položaj, lokalni propisi koji su vezani uz zaštitu okoliša te ekonomske i tehničke mogućnosti za unapređivanje postojećeg postrojenja. Osnovne smjernice za određivanje najboljih raspoloživih tehnologija su upotreba tehnologija koje stvaraju minimalnu količinu otpada, upotreba manje opasnih i štetnih komponenata, primjena naprednih tehnologija, određivanje vremena koje je potrebno za pronalaženje i implementaciju BAT-a, sprječavanje ili svođenje na minimalnu razinu ukupnog utjecaja štetnih emisija u okoliš te sprječavanje ili svođenje na minimalnu razinu nesreće i ekološke katastrofe [18].

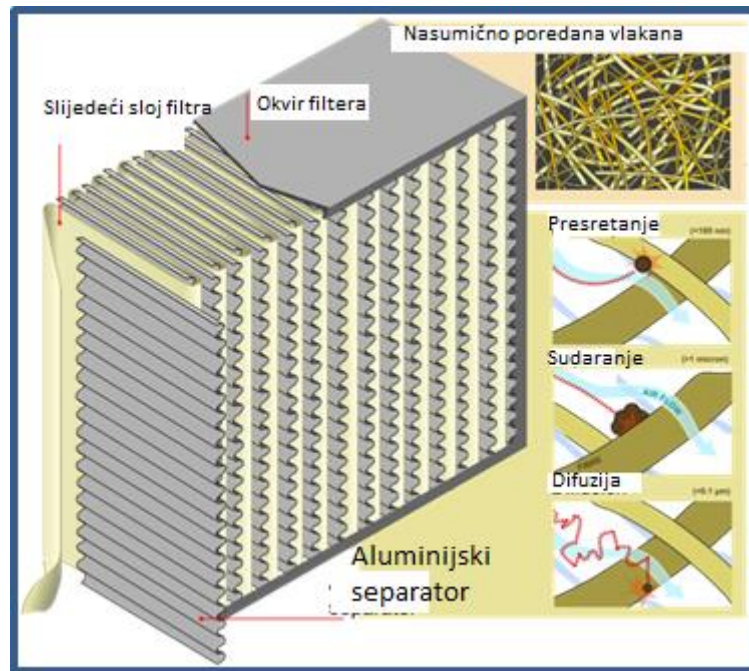
### **4.2. Mehanički zračni filtri**

Mehanički zračni filtri pridonose pročišćavanju zraka u zatvorenom prostoru te zadržavaju čestice poput prašine kad onečišćeni zrak prolazi kroz filtrirajući materijal. Veličina pora mreže je najvažniji čimbenik koji pridonosi učinkovitosti mehaničkih zračnih filtra. Onečišćujuće tvari čija je veličina čestica veća od veličine pora mreže ne mogu proći, te se na taj način odvajaju, što dovodi do pročišćavanja zraka. Takvi su zračni filtri odgovorni za

filtriranje PM onečišćivača iz zraka u zatvorenom prostoru. Visoko efikasni zrak u obliku čestica (npr. HEPA filtri) najčešće su korišteni filtracijski mediji u današnjim pročišćivačima zraka za filtriranje PM čestica. Učinkovito uklanjaju 99,97% čestica veličine manje od 0,3  $\mu\text{m}$  iz onečišćenog zraka čime osiguravaju protok pora između 150-400  $\text{ft}^3/\text{min}$ . HEPA filtri pojavljuju se u obliku naboranog papira koji je zapravo vrlo gusta mreža staklenih vlakana. HEPA filtri rade na principu Brownovog gibanja, a odnose se na tri različita mehanizma hvatanja čestica prašine, a to su udar, presretanje i difuzija [19]. Uobičajeno je koristiti predfilter s HEPA filtrima kako bi se povećao njihov vijek između sljedećih zamjena. Predfiltri su u osnovi vlaknaste mreže razmjerno većih pora. Neophodni su za hvatanje relativno većih čestica prisutnih u zraku kako ne bi nepotrebno začepili HEPA pore.

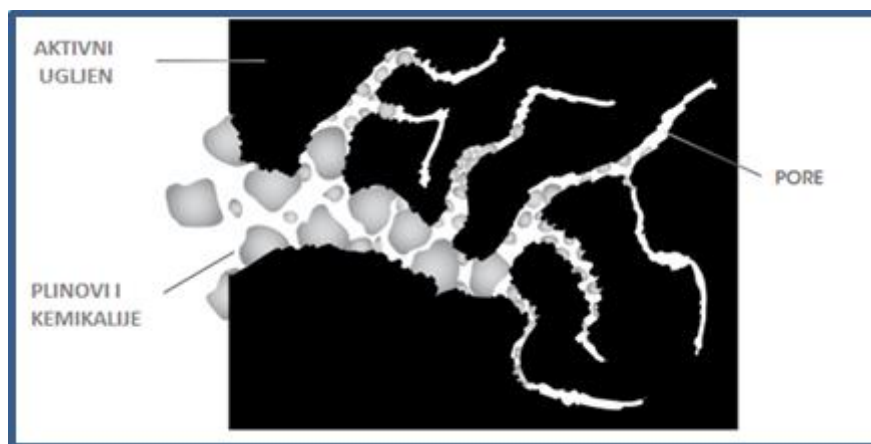
Elektrostatski filtri za dim (engl. *Electrostatic precipitator*, ESP) stvaraju električno polje za ioniziranje čestica koje prolaze kroz njega te rade na principu koronskog pražnjenja. Treba napomenuti da rad ESP-a zahtijeva opskrbu visokim ulaznim naponom. Postoje dva suprotno nabijena terminala koji mogu biti u obliku ploča, žica ili šipki. Onečišćeni zrak prolazi kroz negativno nabijeni terminal. Kao rezultat, onečišćene tvari prisutne u zraku time dobivaju negativan naboj. Protok zraka stvoren je na takav način da prolazi kroz pozitivno nabijeni terminal nakon što prođe pored negativno nabijenog kolektora. Sva negativno nabijena onečišćenja privlače se na pozitivno nabijene ploče. Na taj se način postiže pročišćavanje zraka. Važna prednost ESP-a je da se bilo koja veličina čestica može ukloniti iz onečišćenog zraka za razliku od mehaničkih (HEPA) filtara koji predstavljaju ograničenje veličine pora čestica koje se mogu filtrirati. Sve što je važno kod ESP-a je opskrbeni napon. Što je veći opskrbeni napon, veličina onečišćivača koja se mogu filtrirati je manja. ESP je tako sposoban filtrirati onečišćenja čestica  $\text{PM}_{2.5}$ . Na slici 8. prikazan je HEPA zračni filter te njegovi mehanizmi za hvatanje čestica.

Korištenje aktivnog ugljena za pročišćenje zraka je također jedna vrsta mehaničkih zračnih filtra. Aktivni ugljen koristi se za filtriranje plinovitih onečišćivača prisutnih u zraku. Mogu postojati dva oblika aktivnog ugljena, zrnasta i vezana. Aktivni ugljen pokazuje visok stupanj poroznosti i ima veliku specifičnu površinu za interakciju sa onečišćivačima. To mu omogućuje postizanje vrlo dobrih adsorpcijskih karakteristika. Načelo upravljanja djelovanjem aktivnog ugljena temelji se na konceptu adsorpcije.



**Slika 8.** HEPA zračni filtri i njegovi mehanizmi za hvatanje čestica [19]

Postoje dvije glavne vrste adsorpcije, i to fizikalna adsorpcija i kemisorpcija. Tvari koje se uklanjaju vežu se na adsorbens Van der Waalsovima silama [20]. Na slici 9. Prikazana je adsorpcija onečišćujućih tvari na aktivnom ugljenu.



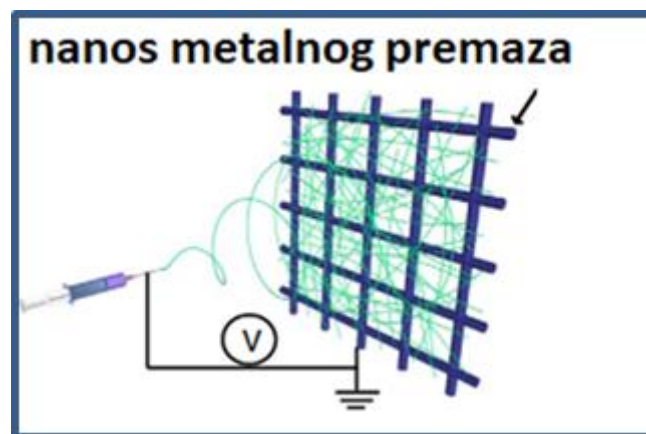
**Slika 9.** Adsorpcija onečišćujućih tvari aktivnim ugljenom [21]

Prilikom kemisorpcije onečišćujuće tvari se kemijskim vezama vežu na površinu aktivnog ugljena. Proces pročišćavanja zraka korištenjem ultravioletne (UV) svjetlosti kao filtracijskog medija vrlo je pojednostavljene prirode. Izvor UV zračenja odabran je na odgovarajući način koji emitira UV zračenja u okolnom mediju. Onečišćeni zrak prolazi kroz medij, uslijed čega se bakterije i patogeni mikroorganizmi prisutni u zraku filtriraju. UV filtri

odgovorni su za uklanjanje samo mikroba i patogena iz zraka i ne doprinose filtraciji PM čestica. Za analizu je korišten sustav koji kombinira HEPA filtar i UV filtar svjetlosti te je on postavljen na strop u zatvorenom prostoru. Svrha studije bila je analizirati učinkovitost UV zračnih filtara kada se koriste zajedno s HEPA filtrima. Rezultati su pokazali da zajedničkim korištenjem UV zračnih i HEPA filtra smanjene su ukupne bakterije u cijelom prostoru za 12%, odnosno 76% tijekom dvije godine [22].

#### 4.3. Prozirni PAN filter

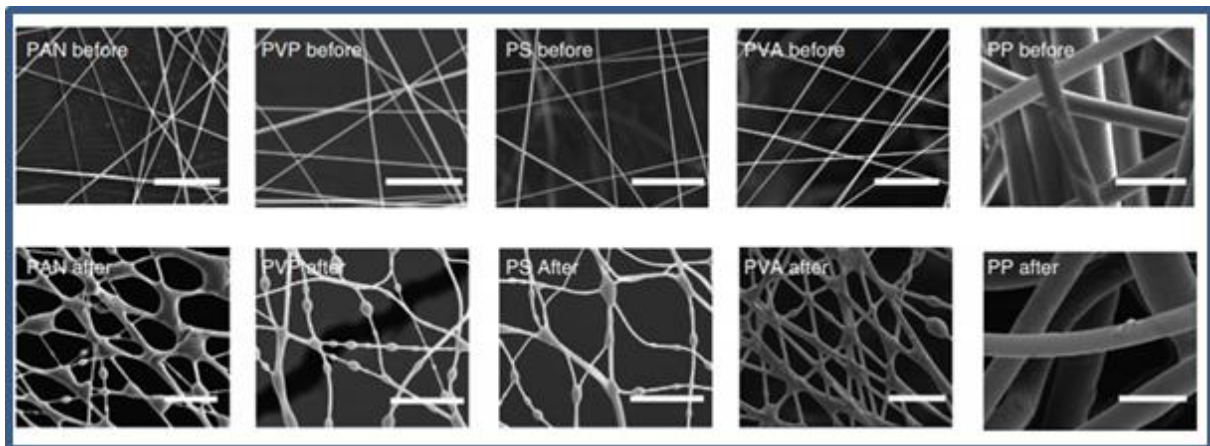
Gotovo svi pročišćivači zraka za svoj rad trebaju neku vrstu napajanja. PAN filtar je prozirnog oblika te je sastavljen od (nano)polimernih materijala za filtriranje onečišćenja sitnih lebdećih čestica  $PM_{2,5}$  koji predstavljaju rizik za ljudsko zdravlje i okoliš. Poliakrilonitrilni (PAN) filtri u osnovi su nanovlakna koja rade na principu prijanjanja čestica za suzbijanje onečišćenja  $PM_{2,5}$  čestica. PAN filtri imaju sloj prozirnog filtarskog materijala s učinkom da se čestice prilijepe na površinu filtracijskog materijala, istovremeno omogućavajući nesmetan prolazak prirodnog svjetla uz dobru optičku prozirnost, mali otpor zračnog protoka, malu težinu te visoku učinkovitost filtriranja. Eksperimentalni rezultati pokazali su učinkovitost veću od 95% za filtriranje najsitnijih čestica  $PM_{2,5}$  [22]. Prilikom proizvodnje PAN filtra koristi se postupak elektroispredanja, pri čemu se otopina polimera akumulira u štrcaljki kao što je prikazano na slici 10.



**Slika 10.** Postupak elektroispredanja za izradu PAN filtra [23]

Na vrh šprice dovodi se određeni napon zbog kojeg se stvara električna sila. Sila povlači otopinu polimera u obliku nanovlakana koja se taloži na uzemljeni kolektor [23]. Potrebna mreža sloja zračnog filtra nastaje uslijed taloženja vlakana na mrežu kao rezultat raspodjele električne sile. U istraživanju Liu i suradnika odabrani polimerni materijali za istraživanje bili

su poliakrilonitril (PAN), polivinilpirolidon (PVP), polistiren (PS), polivinil alkohol (PVA) i polipropilen (PP). Upotreba poliakrilontrila pokazala je najbolje rezultate za najčešće korištene metode filtracije čestica PM<sub>2.5</sub> s naglaskom na potencijal značajnog smanjenja proizvodnih i radnih troškova za razliku od HEPA tehnologija [23]. Na slici 11. prikazane su SEM mikrofotografije karakterizacije različitih vlaknastih filtra prije i poslije filtracije iz istraživanja Liu i suradnika [23].



**Slika 11.** SEM mikrofotografije karakterizacije različitih vlaknastih filtara prije i poslije filtracija [23]

#### 4.4. Fotokatalitički materijali

Glavne vrste fotokatalizatora koji se koriste u sustavu za pročišćavanje zraka su složeni metalni oksidi, binarni metalni oksidi, metalni sulfidi i materijali bez metala. Fotokatalitički materijali i tehnike za pročišćavanje zraka temelje se na principu da zračenje prikladne valne duljine može apsorbirati mnogo poluvodiča koji mogu olakšati reakciju reaktivnih vrsta kisika koji mogu razgraditi onečišćujuće tvari u zraka. Struktura elektroničkog pojasa fotokatalitičkog materijala sastoji se od valnog pojasa i vodljivog pojasa koji su odvojeni zazorom energetske pojasa [24].

Kada svjetlost padne na poluvodič, on apsorbira energiju fotona dovoljne energije, elektron u valentnom pojasu može skočiti do vodljivog pojasa, ostavljajući tako rupe u valentnom pojasu. Oba naboja mogu reagirati na površini fotokatalizatora. Prisutnost površinski aktivnih mjesta olakšava adsorpciju vrsta iz okoline, a može doći do redoks reakcija jer elektron može reagirati s akceptorima elektrona, a šupljine s donorima elektrona. Kad se ti radikali odvoje od površine i postanu pokretni, mogu stvoriti reaktivne vrste kisika, koje su reaktivne zbog svoje nezasićene veze. Reaktivne vrste kisika mogu migrirati dalje od



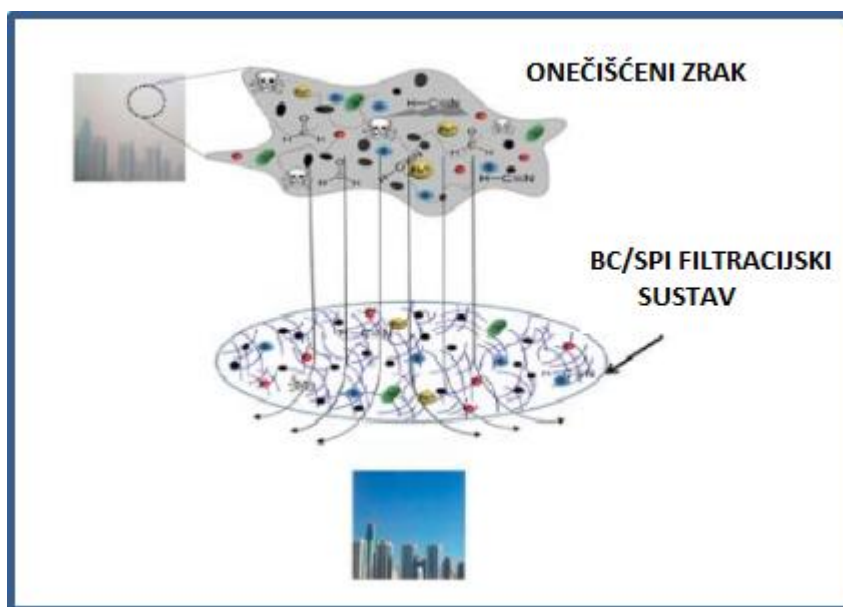
fotokatalitičke površine. Reaktivne vrste kisika mogu razgraditi organske i anorganske onečišćujuće tvari u ugljikov dioksid, vodu i dušik. Svi fotokatalitički materijali mogu se pobuditi UV zračenjem, dok oni koji se pobuđuju vidljivom svjetlošću pokazuju apsorpciju u ograničenom rasponu valne duljine vidljive svjetlosti. Gotovo svi komercijalni sustavi za pročišćavanje zraka koriste UV izvore svjetlosti valnih duljina u rasponu od 351 nm do 400 nm. U jednom istraživanju upotrijebljen je laboratorijski fotoreaktor sa lampom koja daje 365 nm valnih duljina i mrežicom od stakloplastike presvučenom  $\text{TiO}_2$  te je postignuta brzina uklanjanja od 5-10  $\mu\text{mol/h}$  CO, N-oktana i piridina [25]. Primijećeno je i smanjenje koncentracije benzena, toluena i ksilena. Dodavanje ozona u kisik povećava postotak mineralizacije N-oktana što je idealno za primjenu i korištenje fotokatalitičkog pročišćavanja zraka u industriji [25].

Heterogena fotokataliza jedna je od glavnih metoda pročišćavanja zraka. Najčešće korišteni heterogeni fotokatalizator je titanov dioksid ( $\text{TiO}_2$ ) i može se miješati s građevinskim materijalima poput cementa kako bi se povećala njegova sposobnost pročišćavanja. Pomaže u uklanjanju emisija dušikovih oksida. Nadalje, sagorijevanjem goriva dolazi do emisije štetnih tvari iz vozila što dovodi do narušavanja kvalitete zraka. Nekoliko fotokatalizatora poput  $\text{TiO}_2$  korišteno je u asfaltnom kolniku za pročišćavanje okolnog zraka od prekomjerne emisije štetnih tvari koje ispuštaju motorna vozila. Umjetna neuronska mreža (ANN) i neuro-gazirani kolektori (NF) izgrađeni su za predviđanje koncentracije  $\text{NO}_x$  u zraku. Viša koncentracija  $\text{NO}_x$  posljedica je ispuštanja štetnih tvari od motornih vozila. Razina prometa, relativna vlaga i sunčevo zračenje utječe na učinkovitost uklanjanja štetnih onečišćujućih tvari [26].

#### **4.5. Kompozitne membrane pomoću sojinih proteina**

Uobičajeni zračni filtri nisu učinkoviti za rješavanje rastućeg problema onečišćenja lebdećim česticama  $\text{PM}_{10}$  i  $\text{PM}_{2.5}$  pogotovo u zemljama u razvoju. Nakupljanjem i povećanjem njihove koncentracije mogu prouzročiti sekundarno onečišćenje. Kompozitne membrane pomoću sojinih proteina (SPI) pružaju noviju tehniku uklanjanja onečišćenja zraka i to do najsitnijih lebdećih čestica. Proteini dobiveni iz soje dostupni su u tri oblika, i to izolat proteina soje, koncentrat sojinih proteina i odmašćeno sojino brašno. Sojin proteinski izolat (SPI) najbolji je u skupini zbog visokog udjela proteina (90%) i niske cijene. SPI može privući PM čestice zbog elektrostatičke sile privlačenja i dipolnih privlačenja. SPI se kombinira s bakterijskom celulozom (BC) koja se sintetizira tijekom fermentacije te ima 3D (nano)mrežu koja pomaže u fizičkom filtriranju čestica PM. Zbog velikih međumolekularnih

interakcija u SPI, oni se agregiraju i tvore čestice od 20-50  $\mu\text{m}$ . Postupak denaturacije (proces u kojem je bjelančevinama poremećena proteinska struktura) provodi se u prisutnosti akrilne kiseline, kako bi se uništile intermolekularne interakcije između molekula SPI i smanjila veličina čestica SPI. To omogućuje SPI interakciju s novim PM česticama u zraku. Korištenjem SPI i BC u odgovarajućem omjeru mogu se postići učinkovitosti u rasponu od 99,4% i 99,9% za  $\text{PM}_{2,5}$  odnosno  $\text{PM}_{10}$ , uz održavanje vrlo visoke stope prodiranja zraka i to do 92,6% [26]. Na slici 12. prikazano je nakupljanje različitih vrsta onečišćujućih tvari na materijalima biološke osnove, putem aktivnih površinskih vlakana.

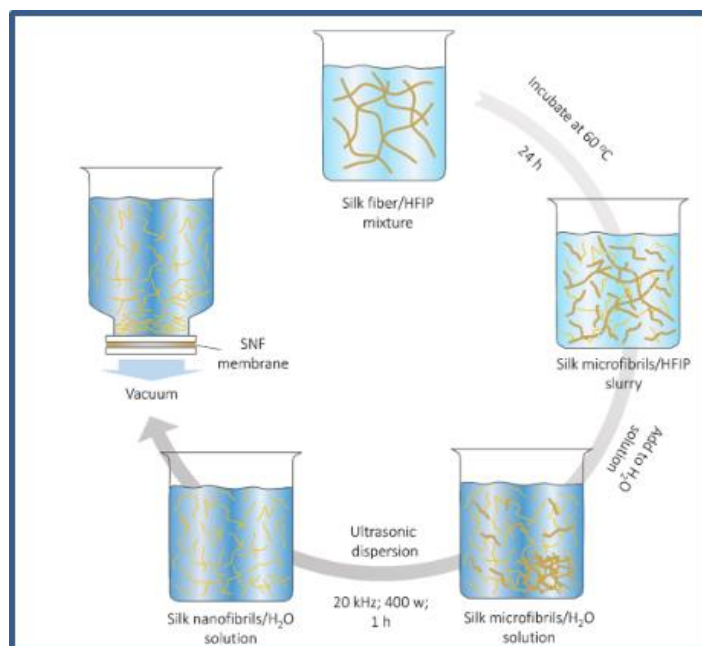


**Slika 12.** Nakupljanje različitih vrsta onečišćujućih tvari na materijalima biološke osnove putem aktivnih površina vlakana [26]

#### 4.6. Ultratanke filtracijske membrane

Glavni problem povezan s neporoznim membranama je njihov nisko propusni protok. Kako bi se taj problem riješio, potrebna je isplativa ultratanka filtracijska membrana s dobrim propusnim protokom. Moguće rješenje za to su svilena nanovlakna (engl. *silk nanofibers*, SNF), koje se ljušte od izvornih svilenih vlakana kako bi pritom zadržale strukturu i fizička svojstva [27]. Postupak dobivanja svilenih nanovlakana (SNF) polazi prvo od degumiranja nanovlakana koja su uronjena u otopinu heksafluoro-izopropanola (HFIP), inkubiraju na 60  $^{\circ}\text{C}$  i nakon 24 sata, rezultirajuća smjesa od nanovlakana (SNF) je osušena. Nakon toga se ne rastvorena svila uklanja neprekidnim mućkanjem, te zatim se SNF ultrazvukom obrađuje na amplitudi od 120  $\mu\text{m}$  i frekvenciji od 20 kHz u intervalima od 10 s. Nakon postupka SNF-ovi su sastavljeni od ultratanke filtracijske membrane, koristeći postupak vakuumske filtracije.

Veličina pora membrane može se mijenjati odabirom odgovarajućeg volumena filtracije i koncentracije disperzije SNF. Na slici 13. prikazan je postupak koji se koristi za projektiranje ultratankih filtracijskih membrani pripremljenih svilenim nanovlaknima [27].



**Slika 13.** Postupak projektiranja ultratankih filtracijskih membrani (svilena nanovlakna) [27]

#### 4.7. Vrećasti filtri

Ekspanzivni rast broja motornih vozila u svijetu te velike količine ispušnih plinova dovele su do problema onečišćenja okoliša. Svaka vožnja automobila doprinosi onečišćenju zraka i okoline. U zatvorenim prostorima nalaze se velike količine dima od kemikalija za kućanstvo, raznih parfema, dima od cigareta te ugljikovog monoksida. Kako bi osoba mogla udisati čisti zrak bez nepotrebnih nečistoća zrak treba dobro filtrirati. Jedna od opcija za filtriranje zraka u kućanstvu je filtriranje vrećastim filtrima (slika 14.) [28, 29]. S obzirom da filtri sa vlaknastim vrećama od tkanine imaju veliki učinak otprašivanja, spadaju u prvoklasne uređaje za uklanjanje prašine. Fluid, koji sa sobom nosi čvrste dijelove prašine, ulazi u filter kroz ulazni otvor te se u ulaznom kanalu raspodjeli po cjelokupnoj dužini komore filtra [28]. Ulazna brzina u unutrašnjosti se smanji toliko da se gruba frakcija prašine iz onečišćenog fluida izlučuje putem zbirnog konusa. Djelomično onečišćen tok fluida tada se nastavlja gibati uz radnu površinu te prelazi u unutarnji čisti dio vreće. Pri tome se na vanjskoj strani vreće nakuplja sloj prašine, profiltrirani zrak ulaz kroz nju, kreće se kroz otvor u gornje kućište filtra te zatim kroz izlazni kanal odlazi u cjevovod i pomoću centrifugalnog ventilatora u dimovod filtra. Dijelovi koji se nalaze na vanjskom dijelu vreće odstranjuju se mlazom

injektorsko ubrizganog zraka. Pri ubrizgavanju zraka iz tlačne posude, koja kroz injektorske otvore usisava dio sekundarnog zraka iz glave filtra u vreći nastupa trenutni nadtlak. Prašinu iz zbirnog konusa kontinuirano uzima uz pomoć pužnog transportera i zvjezdastog dozatora natrag u proces ili u posude za sakupljanje. Tkanina je izrađena u obliku vreća te je mogućnost prolaza plina malom brzinom kroz tkaninu jedna od prednosti korištenja vrećastih filtra. Prašina koja prodire kroz tkaninu djelomično se zadržava u njoj čime se smanjuje protočna količina, dok se s druge strane povećava otpor. Povećanje otpora je ovisno o svojstvima čestica prašine i količine prašine koja se zadržava na površini tkanine. Prednosti vrećastih filtra su velika učinkovitosti čak i pri uklanjanju vrlo sitnih čestica, niski investicijski troškovi, niski troškovi održavanja te povratak suhih uklonjenih čestica u proizvodni proces [28].

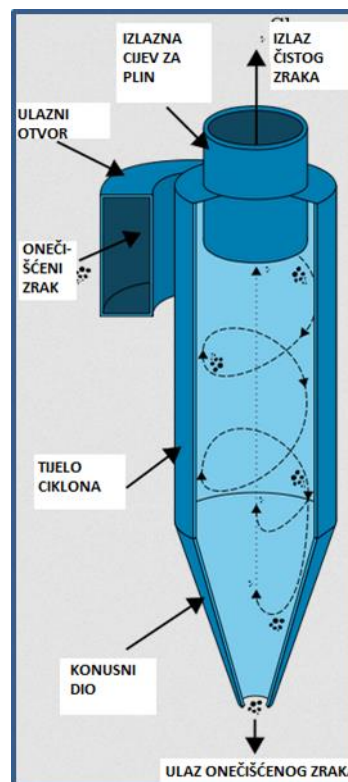


**Slika 14.** Vrećasti filtar [29]

#### **4.8. Centrifugalni taložnici – cikloni**

Upotreba ciklona za izdvajanje čestica većih dimenzija (prašina, piljevina, lebdeći pepeo) u krutom agregatnom stanju ima niz prednosti, poput jednostavne konstrukcije, visoke efikasnosti izdvajanja čestica te niske cijene. Ciklon je koji za izdvajanje čestica iz struje zraka koristi centrifugalno polje sile [6] (slika 15.). Uslijed djelovanja centrifugalne sile, tzv. vanjski vrtlog čestice prašine odbacuje na stijenke i odvodi pod djelovanjem gravitacije u skupljač prašine. Tada dolazi do smanjenja presjeka strujanja i porasta koncentracija čestica, što uzrokuje stvaranje tzv. centralnog vrtloga koji odvodi najveći dio zraka s dijelom

najsitnijih čestica u smjeru vrtloga. Na dijelu spajanja cilindričnog i konusnog ciklusa dolazi do razdvajanja čestica koje odlaze u skupljač prašine te onih koji izlaze kroz vrtlog. Čestica koje imaju veći promjer i gustoću lakše se izdvajaju. Učinkovitost ciklona ovisi i o geometriji ciklona, a smanjenjem promjera i proporcionalno ostalih dimenzija učinkovitost raste. Pad tlaka u ciklonima kreće se od 700 do 3000 Pa tako da troše više energije od gravitacijskih i inercijskih taložnika. Pri izboru ciklona u obzir treba uzeti protok zapašenog zraka, grano-sastav i koncentraciju čestica na ulazu, traženu učinkovitost u vrtlogu, fizičko-kemijska svojstva čestica, dozvoljeni pad tlaka te temperaturu zraka. Prednost ciklona je što se mogu koristiti kao predčistači za uklanjanje krupnijih čestica čime smanjuju kapacitet učinkovitijih pročistača te se mogu upotrijebiti samo za izdvajanje određene veličine čestice. S druge strane, nedostaci ciklona su mala učinkovitost za izdvajanje sitnih čestica i čestica koje su sklone nakupljanju [6].



**Slika 15.** Ciklonsko odvajanje [30]

## 5. ZAKLJUČAK

Zemlje širom svijeta bore se protiv različitih oblika onečišćenja zraka. Onečišćenje zraka ima nepovoljan utjecaj na čovjeka, floru i faunu te se putem bakterija i virusa manifestira u zatvorenom prostoru. Onečišćivači zraka mogu se podijeliti u nekoliko kategorija, ali kao najštetniji izdvajaju se čestice veličine manje od 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) i emisije dušikovih oksida. Najveći problem za ljudsko zdravlje predstavljaju upravo sitne lebdeće čestice  $\text{PM}_{2.5}$  i  $\text{PM}_{10}$  koje uzrokuju niz zdravstvenih problema.

U nastojanju da se pronađe adekvatno rješenje za onečišćeni zrak, da bi se podigla razina kvalitete zraka, znanstvena istraživanja kao i prateća industrija usmjerena su na stalnom poboljšanju i dizajniranju različitih tehnika pročišćavanja zraka.

HEPA filtri kao višeslojna struktura staklenih vlakana učinkoviti su za smanjenje koncentracije najsitnijih lebdećih čestica  $\text{PM}_{2.5}$ . Prednost HEPA filtra je njegova vrlo visoka učinkovitost i to do visokih 99,97%. Vrlo atraktivna tehnika otklanjanja industrijskog onečišćenja zraka je upotreba elektrostatičkih filtra dima čija se prednost ističe u filtriranju svih mogućih onečišćujućih tvari u zraku, počevši od najsitnijih čestica pa sve do mirisa. UV svjetlo pokazalo se prikladnom metodom za borbu protiv bakterijskih onečišćivača pod uvjetom da valna duljina svjetlosti koja se koristi nije štetna za ljudsko zdravlje. Aktivni ugljen jedna je od uobičajenih metoda pročišćavanja zraka gotovo bez istaknutih nedostataka. Fotokatalitički materijali ističu se u otklanjanju štetnih emisija dušikovih oksida. Ultratanke filtracijske membrane sa sojinim proteinima i (nano)vlaknima pružaju noviju tehniku pročišćavanja zraka korištenjem prirodnih resursa. S druge strane, vrećasti filtri ističu se velikom učinkovitosti čak i pri uklanjanju vrlo sitnih čestica, niskih investicijskih troškova, niskih troškova održavanja te povratak suhih uklonjenih čestica u proizvodni proces. Upotreba ciklona za izdvajanje čestica većih dimenzija u krutom agregatnom stanju ima niz prednosti, poput jednostavne konstrukcije, visoke efikasnosti izdvajanja čestica te niske cijene.

Obzirom na gorući problem današnjice u pogledu onečišćenja zraka svakako daljnja istraživanja treba usmjeriti na razvijanje novih tehnika za pročišćavanje zraka, kako bi što učinkovitije i efikasnije poboljšali kvalitetu zraka. Nadalje, svakako se treba okrenuti obnovljivim izvorima energije kako bi smanjili izvore onečišćenja zraka kao što je u prvom redu u potpunosti zamijeniti fosilna goriva te emisije ugljikov dioksida svesti na nulu.

## 6. LITERATURA

- [1] <https://dnevnik.hr/vijesti/svijet/who-upozorava-92-posto-svjetske-populacije-451630.html> (preuzeto 10.08.2020.).
- [2] <https://www.who.int/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwidebreathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action> (preuzeto 10.08.2020.).
- [3] <https://waqi.info/> (preuzeto 10.08.2020.).
- [4] <https://www.irceline.be/en/documentation/faq/what-is-pm10-and-pm2.5> (preuzeto 10.08.2020.).
- [5] <https://vogmask.ba/zagadenje-zraka-cestice-i-sta-zapravo-udisemo/> (preuzeto 10.08.2020.).
- [6] M. Bošnjaković, Ekologija I, Veleučilište u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2013.
- [7] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Aerosol> (preuzeto 02.05.2021.).
- [8] A. Barišić-Jaman, Analiza koncentracija lebdećih čestica u zaštićenim područjima RH, Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2016.
- [9] A. Rastovčan-Mioč, Zaštita okoliša, Metalurški fakultet Sisak, Sisak, Sveučilište u Zagrebu, 2009.
- [10] G. Bedeković, B. Salopek, Zaštita zraka, Interna skripta, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, 2010.
- [11] <https://hr.izzi.digital/DOS/13585/13674.html> (preuzeto 01.05.2021.).
- [12] <https://www.eea.europa.eu/hr/themes/air/intro> (preuzeto 01.05.2021.).
- [13] <https://ourworldindata.org/air-pollution> (preuzeto 02.05.2021.).
- [14] <https://femisfera.com/2020/01/17/svjetska-zdravstvena-organizacija-je-oneciscenje-zraka-klasificirala-kao-najveci-ekoloski-rizik-za-zdravlje-u-europi/> (preuzeto 11.5.2021.).
- [15] <http://iszz.azo.hr/iskzl/datoteka?id=81453> (preuzeto 02.05.2021.).
- [16] <https://www.ekologija.com.hr/zasto-dolazi-do-oneciscenja-zraka/> (preuzeto 02.05.2021.).
- [17] <https://proluft.hr/savjeti-i-blog/savjeti/kucanstvo/kad-plijesan-opasna-hrani-4/> (preuzeto 02.05.2021.).
- [18] A. Jukić, I. Šoljić, BAT koncept i petrokemijska industrija, Interni materijal, Sveučilište Zagreb, 2008.
- [19] V. K. Vijayan, H. Paramesh, S. S. Salvi, A. A. K. Dalal (2014). Enhancing indoor air quality - The air filter advantage. Lung India. 32, 473-479.

- [20] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HEPA\\_Filter\\_diagram\\_en.svg#media/File:HEPA\\_Filter](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HEPA_Filter_diagram_en.svg#media/File:HEPA_Filter) (preuzeto 15.08.2020.).
- [21] A. Chambre (2014). Effects of carbon-filtration type on filter efficiency and efficacy: Granular loose fill vs. bonded filters. *Air Science*. 2-6.
- [22] E. Kujundzic, D. A. Zander, M. Hernandez, L. T. Angenent, D. E. Henderson, S. L. Miller (2005). Effects of ceiling-mounted HEPA-UV air filters on airborne bacteria concentrations in an indoor therapy pool building. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 55, 210-218.
- [23] C. Liu, P. C. Hsu, H. W. Lee, M. Ye, G. Zheng, N. Li, W. Cui (2015). Transparent air filter for high-efficiency PM<sub>2.5</sub> capture. *Nature Communications*. 6, 6205.
- [24] H. Ren, P. Koshy, W. Chen, S. Qi, C. C. Sorell (2017). Photocatalytic materials and technologies for air purification. *Journal of Hazardous Materials*. 325, 340-366.
- [25] P. Pichat, J. Disdier, C. Hoang-Van, D. Mas, G. Goutailler, C. Gaysee (2000.) Purification/deodorization of indoor air and gaseous effluents by TiO<sub>2</sub> photocatalysis. *Catalysis Today*. 63, 363-369.
- [26] S. Asadi, M. Hassan, A. Nadiri, H. Dyla (2014). Artificial intelligence modeling to evaluate field performance of photocatalytic asphalt pavement for ambient air purification. *Environmental Science and Pollution Research*. 21, 8847-8857.
- [27] S. Ling, K. Jin, D. L. Kaplan, M. J. Buehler (2016). Ultrathin free-standing Bombyx mori silk nanofibril membranes. *Nano Letters*. 16, 3795-3800.
- [28] <https://bizplima.hr/vrecasti-filteri/> (preuzeto 25.04.2021).
- [29] <https://tehno-filter.hr/fc-vrecasti-filter/> (preuzeto 25.04.2021.).
- [30] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ciklonsko\\_odvajanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ciklonsko_odvajanje) (preuzeto 07.05.2021.).



## **Životopis**

### **Osobni podaci**

Ime i prezime: Adriana Merkaš (Galina)

Datum i mjesto rođenja: 24. srpnja 1994., Sisak

Adresa: Komor začreški 59, 49223 Sveti Križ Začretje

Telefon: 095/396-6378

E-mail: [adriana.galina235@gmail.com](mailto:adriana.galina235@gmail.com)

### **Obrazovanje**

2001. – 2009. – Osnovna škola „Braća Ribar“ Sisak

2009. – 2014. – Ekonomska škola Sisak

2015. – 2016. – Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet Varaždin, smjer inženjerstvo okoliša

2017. – 2020. – Sveučilište u Zagrebu, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija, smjer industrijska ekologija

### **Vještine**

Rad na računalu (MS Office, MS Word)

Osnovno znanje ekonomije

Vozačka dozvola: B kategorije

