

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta *za strojništvo*



**Marko Hočevar, Matevž Dular**

# **Diagnostika v okoljskem strojništvu**

**Ljubljana, 2016**

<i>Naslov publikacije:</i>	Diagnostika v okoljskem strojništvu
<i>Avtorja:</i>	Marko Hočevar in Matevž Dular
<i>Strokovna recenzenta:</i>	prof. dr. Andrej Senegačnik in prof. dr. Niko Samec
<i>Lektoriranje besedila:</i>	Andreja Cigale
<i>Izdelava slik in diagramov:</i>	Aleš Malneršič
<i>Prelom in priprava za tisk:</i>	Marko Hočevar
<i>Založba:</i>	Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani
<i>Cena:</i>	brezplačna publikacija
<i>Izdaja:</i>	1. elektronska izdaja
<i>Leto izida:</i>	2016
<i>Naslovnica knjige:</i>	TE Schwarze Pumpe, Nemčija, avtor Marko Hočevar

Avtorske pravice so pridržane. Gradiva iz publikacije ni dovoljeno kopirati, objavljati ali prevajati v druge jezike brez pisnega dovoljenja založbe.

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

621:502(075.8)(0.034.2)

HOČEVAR, Marko, 1972-

Diagnostika v okoljskem strojništvu [Elektronski vir] / Marko Hočevar, Matevž Dular ; [izdelava slik in diagramov Aleš Malneršič]. - 1. elektronska izd. - El. knjiga. - Ljubljana : Fakulteta za strojništvo, 2016

Način dostopa (URL): [http://lab.fs.uni-lj.si/kes/diagnostika\\_v\\_okoljskem\\_strojnistvu/diagnostika\\_v\\_okoljskem\\_strojnistvu.pdf](http://lab.fs.uni-lj.si/kes/diagnostika_v_okoljskem_strojnistvu/diagnostika_v_okoljskem_strojnistvu.pdf)

ISBN 978-961-6980-24-1 (pdf)

1. Dular, Matevž

286737920

ISBN 978-961-6980-24-1



9 789616 980241

# Kazalo

<b>Kazalo</b> .....	<b>3</b>
<b>Uvodna beseda avtorjev</b> .....	<b>7</b>
<b>Seznam uporabljenih simbolov</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Uvod</b> .....	<b>13</b>
<b>2 Plin</b> .....	<b>15</b>
2.1 Onesnažila v zraku.....	16
2.1.1 Delci.....	17
2.1.2 Plini.....	18
2.1.3. Pomembne okoljske nesreče.....	19
2.2 Mreža meritev onesnaženosti zunanjega zraka v Sloveniji .....	21
2.3 Meteorologija onesnažil .....	22
2.3.1 Vodoravno razširjanje onesnažil.....	26
2.3.2 Navpično razširjanje onesnažil .....	27
2.3.3 Voda v atmosferi .....	33
2.3.4 Modeliranje onesnažil v atmosferi .....	33
2.3.5 Čiščenje atmosfere .....	38
2.4 Meteorološke opazovalne postaje.....	39
2.4.1 Merilna oprema na meteoroloških opazovalnih postajah .....	40
2.5 Merjenje onesnažil v zraku .....	43
2.6 Merilni postopki za merjenje delcev v plinu .....	46
2.6.1 Gravimetrična metoda.....	47

2.6.2 Sejalna analiza.....	49
2.6.3 Kaskadni impaktor.....	50
2.6.4 Etalometer.....	51
2.6.5 Nefelometer.....	52
2.6.6. Analizator slik.....	54
2.6.7 Analizatorji, ki delujejo po postopku prostorskega filtriranja.....	54
2.6.8 Laserski difraktometer.....	55
2.6.9 Druge merilne metode za merjenje delcev.....	56
2.7 Merilni postopki za merjenje koncentracije plinov.....	57
2.7.1 Merjenje koncentracije plinov z metodo ultravijolične fluorescence (UVF).....	58
2.7.2 Merjenje koncentracije plinov s kemiluminiscenčno metodo (CLD).....	60
2.7.3 Merjenje koncentracije plinov z infrardečo spektroskopijo (NDIR).....	62
2.7.4 Merjenje koncentracije plinov z ultravijolično spektroskopijo (NDUV).....	65
2.7.5 Merjenje koncentracije plinov s plamensko ionizacijskim analizatorjem FID.....	66
2.7.6 Analizatorji, ki delujejo na osnovi elektrokemičnih merilnih zaznaval.....	67
2.2.7 Polprevodniška zaznavala.....	69
2.7.8 Zaznavalo preostalega kisika - lambda zaznavalo.....	70
2.7.9 Merjenje koncentracije kisika s paramagnetnim zaznavalom.....	72
2.7.10 Difuzivni vzorčevalniki.....	73
2.8 Merjenje sestave dimnih plinov industrijskih peči in termoelektrarn na premog.....	74
2.9 Merjenje sestave izpušnih plinov motornih vozil.....	82
2.10. Odstranjevanje onesnažil iz plinov.....	92
2.10.1. Odstranjevanje delcev.....	92
2.10.1.1. Usedalne komore.....	93
2.10.1.2. Usedalne komore s pregradami in vztrajnostni zbiralniki.....	96
2.10.1.3. Cikloni.....	97
2.10.1.4. Filtrne vreče.....	101

2.10.1.5 Filtri delcev dizelskih motorjev (DPF).....	104
2.10.1.6 Elektrostatični filtri.....	105
2.10.1.7. Pralniki delcev .....	109
2.10.1.8 Čistilna naprava - mokri pralnik delcev in plinov z elektrostatičnim filtrom pri izdelavi steklene volne .....	111
2.10.2 Odstranjevanje plinastih onesnažil .....	115
2.10.2.1 Pralniki in mokri kalcitni postopek.....	116
2.10.2.2 Naprave za čiščenje dimnih plinov v termoelektrarnah na premog po mokrem kalcitnem postopku.....	117
2.10.2.3 Kondenzatorji.....	123
2.10.2.4 Zgorevanje .....	123
2.10.2.5 Avtomobilski katalizatorji.....	124
2.10.2.6 Adsorber dušikovih oksidov .....	126
2.10.2.7 Selektivna katalitična redukcija SCR .....	127
<b>3 Voda.....</b>	<b>129</b>
3.1 Hidravlične meritve .....	129
3.1.1 Merjenje prostorninskega toka vodotokov brez merskih objektov .....	130
3.1.2 Merjenje prostorninskega toka vode z merskimi objekti .....	132
3.1.2.1 Široki prag.....	133
3.1.2.2 Ostrorobi preliv.....	134
3.1.2.3 Zožitev.....	135
3.2. Vzorčenje vode za potrebe kemijskih in bioloških meritev.....	136
3.3. Kemijske meritve .....	137
3.3.1. Merjenje količine neraztopljenih snovi .....	137
3.3.2. Merjenje pH.....	138
3.3.3. Merjenje koncentracije raztopljenega kisika .....	138
3.3.3.1. Merjenje koncentracije raztopljenega kisika z optično metodo .....	139
3.3.3.2. Merjenje koncentracije kisika z elektrokemično metodo .....	140
3.3.3.3. Merjenje koncentracije kisika s titracijsko metodo .....	141
3.3.4. Merjenje biokemijske potrebe po kisiku.....	141

3.3.5. Merjenje kemijske potrebe po kisiku KPK .....	144
3.3.6. Merjenje koncentracije celotnega organskega ogljika (TOC) in raztopljenega organskega ogljika (DOC).....	145
3.3.7. Merjenje koncentracije dušika v vodi.....	145
3.4. Biološke meritve.....	146
<b>4. Literatura .....</b>	<b>147</b>

## Uvodna beseda avtorjev

Na področju diagnostike v okoljskem strojništvu na Fakulteti za strojništvo, Univerze v Ljubljani in tudi širše v Sloveniji v preteklosti ni bilo na voljo primerne učbenika. Vsebina učbenika Diagnostika v okoljskem strojništvu je prilagojena programu študentov 2. letnika Magistrskega študijskega programa II. stopnje strojništvo - Razvojno raziskovalni program na Fakulteti za strojništvo, Univerze v Ljubljani. Upava, da bo učbenik dobro služil študentom na smeri programa Energetsko in procesno strojništvo in na interdisciplinarni smeri Okoljsko strojništvo.

Številne svetovne založbe so izdale učbenike in znanstvene monografije s področja okoljskega inženirstva, npr. Vesilind in sod. (1982) ali Weiner in sod. (2003). Omenjeni učbeniki obravnavajo celotno področje okoljskega inženirstva. Običajno to vključuje poglavja o plinih, vodi, trdnih snoveh, nevarnih odpadkih, hrupu, radioaktivnosti, reaktorjih, poglavje o kinetiki kemijskih reakcij, snovnih in energijskih bilancah, ekosistemih, inženirskem računanju itd. Dodatno npr. v poglavjih o vodi in hrupu avtorji ločeno obravnavajo merjenje in odstranjevanje onesnažil v vodi ali plinu. Taka obravnava močno presega obseg snovi, ki jo je mogoče predavati v okviru posameznega predmeta na Fakulteti za strojništvo, Univerza v Ljubljani.

V učbeniku sva se osredotočila na teme s področja energetskega in delno procesnega strojništva. Za študenta strojništva sta najpomembnejši temi merjenje in odstranjevanje onesnažil iz dimnih plinov termoelektrarn in izpušnih plinov motorjev z notranjim zgorevanjem. Poglavje o merjenju onesnažil in odstranjevanju iz vode je krajše. V učbeniku ne obravnavava hrupa, ker je v celoti obravnavano pri dveh drugih predmetih, ki se predavata na Fakulteti za strojništvo, Univerza v Ljubljani. Prav tako ne obravnavava radioaktivnosti.

Zahvaljujemo se vsem, ki so pripomogli k nastanku tega učbenika. Za strokovno pomoč, slikovno gradivo, komentarje, popravke in predloge za dopolnitve učbenika se zahvaljujemo kolegom dr. Samuelu Rodmanu Oprešniku iz Laboratorija za motorje z notranjim zgorevanjem in elektromobilnost, dr. Igorju Kuštrinu iz Laboratorija za termoenergetiko s Fakultete za strojništvo, Univerze v Ljubljani, mag. Gašperju Raku iz Katedre za mehaniko tekočin z laboratorijem s Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani ter Borisu Kraševcu iz podjetja Ursa Slovenija. Za pomoč pri strokovnem izrazoslovju se zahvaljujemo prof. Ferdinandu Trencu.

Zahvaljujeva se tudi izr. prof. dr. Andreju Senegačniku iz Fakultete za strojništvo, Univerze v Ljubljani in prof. dr. Niku Samcu iz Fakultete za strojništvo, Univerze v Mariboru, ki sta pred izidom učbenik v celoti temeljito pregledala, ga ustrezno popravila ali predlagala razširitve posameznih delov snovi.

Zahvaljujeva se tudi kolegu Alešu Malneršiču, ki je sodeloval pri zasnovi in skrbno pripravil slikovno gradivo, in Andreji Cigale za lektoriranje učbenika. Zahvaljujeva se tudi podjetju Ursa Slovenija, ki je dovolilo objavo slik ter dr. Igorju Kuštrinu, izr. prof. dr. Andreju Senegačniku, dr. Samuelu Rodmanu Oprešniku iz Fakultete za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Gašperju Raku, dr. Sabini Kolbl in Mateju Sečniku iz Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani, ki so prispevali slikovno gradivo za učbenik.

Vsem uporabnikom učbenika želiva, da bi v njem našli želene podatke ter da bi ga koristno uporabljali v času študija in kasneje ob delu.

Avtorja:

Marko Hočevar in Matevž Dular

Ljubljana, 2016



## Seznam uporabljenih simbolov

<b>simbol</b>	<b>pomen</b>	<b>enota</b>
$A$	koncentracija onesnažila	$\text{kg/m}^3$
$b$	širina praga	m
$c$	hitrost vetra, hitrost toka v vzorčevalni cevi	m/s
$c_0$	hitrost vetra na referenčni višini	m/s
$c_r$	hitrost v radialni smeri	m/s
$c_d$	hitrost usedanja delcev, hitrost delcev v toku tekočine	m/s
$c_h$	hitrost v vodoravni smeri	m/s
$c_i$	vstopna hitrost plinov oziroma onesnaženega plina	m/s
$c_t$	tangencialna komponenta hitrosti	m/s
$c_r$	radialna komponenta hitrosti	m/s
$C$	koncentracija onesnažila	$\text{kg/m}^3$
$d$	premer delca,	m
$d_{50}$	premer s 50 % verjetnostjo izločenih delcev	m
$f$	parameter bočnega razširjanja onesnažila	-
$f$	frekvenca	Hz
$F_c$	centrifugalna komponenta sile	N
$F_u$	sila upora	N
$F_{vzg}$	sila vzgona	N
$g$	gravitacijski pospešek, 9,81	$\text{m/s}^2$
$g$	razdalja med fotozaznavali na matriki	m
$g_1$	parameter navpičnega razširjenja brez odboja od sosednjih površin	-
$g_2$	parameter navpičnega razširjanja za odboj od tal	-
$g_3$	parameter navpičnega razširjanja za odboj od inverzije na višini	-
$h$	višina, višina praga preлива	m
$h$	Planckova konstanta, $6,626 \times 10^{-34}$	$\text{J} \cdot \text{s}$
$h_0$	referenčna višina	m
$H$	višina oblaka izpusta, višina usedalne komore, globina nad pragom preлива, mera ciklona	m
$H_d$	višina dimnika	m

$H_e$	efektivna višina dimnika	m
$L$	oddaljenost do inverzije na višini, dolžina usedalne komore	m
$L_b$	mere ciklona	m
$L_c$	mere ciklona	m
$n$	parameter stabilnosti, število plošč	-
$m$	masa	kg
$m$	indeks	-
$p$	tlak	Pa
$Q$	masni tok sproščanja onesnažila	kg/s
$r$	polmer	m
$R$	polmer okroglih delcev	m
$s$	premer fotozaznavala	m
$t$	čas	s
$T$	temperatura	°C, K
$t_d$	čas preleta delca	s
$\dot{V}$	volumski tok	m <sup>3</sup> /s
$w$	hitrost toka pred vstopom v vzorčevalno cev	m/s
$W$	širina vstopne odprtine ciklona	m
$x$	koordinata	m
$y$	koordinata	m
$z$	koordinata	m
$\alpha$	kot preliva	°
$\rho$	gostota	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_d$	gostota delcev	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{pl}$	gostota plina	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	stehiometrično razmerje	-
$\mu$	dinamična viskoznost	Ns/m <sup>2</sup>
$\mu$	pretočni koeficient	-
$\nu$	frekvenca svetlobe	Hz
$\sigma_y$	standardna deviacija porazdelitve onesnažila v bočni smeri	-
$\sigma_z$	standardna deviacija porazdelitve onesnažila v navpični smeri	-

#### indeksi

aq	raztopina
g	plin
N	normni

#### okrajšave

A/D	analogno digitalni
AOC	amonijev oksidativni katalizator (angl. <i>ammonia</i> )

	<i>oxidation catalyst</i> )
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
BPK <sub>5</sub>	biokemijska potreba po kisiku v petih dneh
BTX	benzen, toluen in ksilen
CLD	kemiluminescenčni analizator plinov (angl. <i>chemiluminescence detector</i> )
DCS	difuzijsko nabojno zaznavalo (angl. <i>diffusion charge sensor</i> )
DOC	dizelski oksidacijski katalizator (angl. <i>diesel oxidation catalyst</i> )
	raztopljeni organski ogljik
DPF	filtri delcev dizelskih motorjev (angl. <i>diesel particulate filter</i> )
EGR	ponovno kroženje izpušnih plinov (angl. <i>exhaust gas recirculation</i> )
EURO	okoljski emisijski standard za motorna vozila
FID	plamensko ionizacijski analizator plinov (angl. <i>flame ionization detector</i> )
FTU	formazinske turbidimetrične enote (angl. <i>formazine turbidity units</i> )
GAVO	izmenjevalnik toplote dimnih plinov čistilne naprave (nem. <i>Gasvorwärmer</i> )
GPS	globalni pozicionirni sistem (angl. <i>global positioning system</i> )
GSM	globalni sistem za mobilne telekomunikacije (angl. <i>global system for mobile communications</i> )
HC	ogljikovodiki (angl. <i>hydrocarbon</i> )
HEPA	zračni filter z visoko učinkovitostjo (angl. <i>high-efficiency particulate arrestance</i> )
IR	infrardeče
KPK	kemijska potreba po kisiku
LDO	optično zaznavalo koncentracije raztopljenega kisika (angl. <i>luminescent dissolved oxygen</i> )
LUVO	izmenjevalnik toplote dimnih plinov kotla (nem. <i>Luftvorwärmer</i> )
MPN	najverjetnejše število (angl. <i>most probable number</i> )
NDIR	infrardeča spektroskopija (angl. <i>nondispersive infrared</i> )
NDUV	ultravijolična spektroskopija (angl. <i>nondispersive ultraviolet</i> )
NRCM	stroji z motorji z notranjim zgorevanjem za uporabo izven cest (angl. <i>non-road combustion</i> )

	<i>machinery</i> )
NTU	nefelometrične turbidimetrične enote (angl. <i>ephelometric turbidity units</i> )
PAH	policiklični aromatski ogljikovodiki (angl. <i>polycyclic aromatic hydrocarbon</i> )
PEMS	prenosna oprema za merjenje onesnaženja (angl. <i>portable emissions measurement system</i> )
PIV	anemometrija na delce na sliki (angl. <i>particle image velocimetry</i> )
PM	delci (angl. <i>particulate matter</i> )
PM <sub>10</sub>	delci z aerodinamičnim premerom do 10 µm (angl. <i>particulate matter</i> )
PM <sub>2,5</sub>	delci z aerodinamičnim premerom do 2,5 µm (angl. <i>particulate matter</i> )
PM <sub>1</sub>	delci z aerodinamičnim premerom do 1 µm (angl. <i>particulate matter</i> )
PTFE	politetrafluoretilen oz. teflon
SCR	selektivna katalitična redukcija (angl. <i>selective catalytic reduction</i> )
SFV	postopek prostorskega filtriranja (angl. <i>spatial filtering velocimetry</i> )
SFT	postopek prostorskega filtriranja (angl. <i>spatial filtering technique</i> )
TEŠ	Termoelektrarna Šoštanj
TOC	skupni organski ogljik (angl. <i>total organic carbon</i> )
UFP	zelo fini delci (angl. <i>ultrafine particles</i> )
UV	ultravijolično
UVF	ultravijolična fluorescenca
VOC	lahkohlapni ogljikovodiki (angl. <i>volatile organic compounds</i> )
WESP	mokri elektrostatični filter (angl. <i>wet electrostatic precipitators</i> )

# 1 Uvod

Onesnaženje, onesnaževanje ali s tujko kontaminacija je prisotnost nezaželene snovi v okolju v prekomernem obsegu. Poznamo več vrst onesnaženja: biološko, kemijsko, radioaktivno, energijsko (svetloba, hrup, toplota). Proces, s katerim nastaja onesnaženje, imenujemo onesnaževanje ali s tujko kontaminiranje. Onesnažila so lahko tujki v okolju, lahko pa so stalno prisotni. To so zdravju oz. življenju škodljive snovi, ki so lahko naravnega ali umetnega izvora. O onesnaženju pa govorimo, ko njihova količina naraste nad določeno mejo.

Onesnaženje v okolju je pomembno, ko količina onesnažil naraste prek določene meje. Na splošno velja, da so vse snovi v okolju škodljive ali smrtne, če so prisotne v dovolj veliki koncentraciji.

Na sliki 1 je prikazano mesto Norilsk v Rusiji, ki je eno izmed najbolj onesnaženih mest na svetu. V okolici mesta poteka pridobivanje nikljeve rude, taljenje rude pa je neposredno odgovorno za onesnaževanje, predvsem s kislim dežjem in smogom.



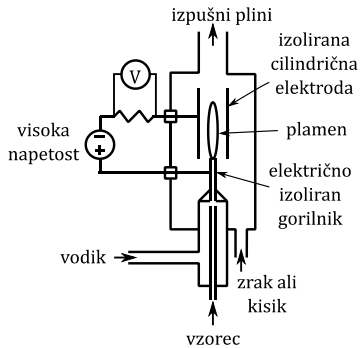
Slika 1: *Onesnaževanje, Norilsk, Rusija [www.themoscowtimes.com]*

Na sliki 2 je prikazana uporaba merilne opreme za merjenje koncentracije onesnažil v izpustih motorjev z notranjim zgorevanjem. Meritev je vsebovala merjenje s plamensko ionizacijskim analizatorjem plinov (FID).

Koristne povezave za spremljanje onesnaževanja so:

- [www.arso.gov.si](http://www.arso.gov.si) (Agencija Republike Slovenije za okolje)
- [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu) (Evropska agencija za okolje)
- [www.epa.gov](http://www.epa.gov) (Ameriška okoljevarstvena agencija)

V učbeniku ne bomo obravnavali onesnaževanja okolja na splošno, temveč se bomo usmerili v merilne metode, ki so pomembne za področje strojništva.



Slika 2: *Merjenje koncentracije onesnažil v izpušnih plinih motornih vozil. Levo: shema delovanja plamensko ionizacijskega analizatorja plinov (FID) in desno: sistem za merjenje koncentracije plinov in masnega toka delcev v izpušnih plinih vozil. Med shemo delovanja posameznega analizatorja in praktično izvedbo meritev npr. za premične vire onesnaževanja ali velike kanale dimnih plinov v termoelektrarnah je velika razlika.*

## 2 Plin

Ozračje ali Zemljina atmosfera je plinska plast, ki obkroža planet Zemljo. Plast ohranja Zemljina gravitacija. Tej zmesi plinov rečemo zrak, katerega sestava se z naraščanjem nadmorske višine spreminja. Suho ozračje sestavljajo naslednji plini (sestava je podana kot normalizirane vrednosti prostorninskih odstotkov) [Mackenzie in Mackenzie, 1995]:

- dušik (78,1 %),
- kisik (20,9 %),
- argon (0,93 %),
- ogljikov dioksid (spremenljivo, vendar približno 0,035 %),
- neon (0,0018 %),
- helij (0,00052 %),
- metan (0,00017 %),
- kripton (0,00011 %),
- vodik (0,000053 %),
- dušikov oksid (0,000031 %),
- ksenon (0,0000087 %),
- ozon (od sledi do 0,0008 %),
- ogljikov monoksid (od sledi do 0,000025 %),
- žveplov dioksid (od sledi do 0,00001 %),
- dušikov dioksid (od sledi do 0,000002 %),
- amonijak (od sledi do 0,0000003 %).

Vodna para se v ozračju pojavlja v možno spremenljivih deležih, odvisno od trenutne količine vlage v zraku.

Zemlja ima približno 150 km debelo atmosfero, vendar je 80 % mase zraka in 99 % vode v najnižji plasti. Ta pas imenujemo troposfera, ki je debela povprečno 17 km v srednjih zemljepisnih širinah, v tropskem pasu 20 km in na polih v zimskem času samo 7 km. Nad troposfero je stratosfera, meja pa je temperaturna inverzija. V troposferi je zrak, ki ga dihamo, in tudi velika večina onesnažil.

Onesnaženje nastane, ko v atmosfero vnesemo snovi, ki naravno v atmosferi niso prisotne, ali pa so prisotne v manjši meri. Te snovi, ki jih imenujemo onesnažila, so delci, biološke molekule in plini. Onesnaženje zraka lahko nastane zaradi človeških dejavnikov ali zaradi naravnih pojavov.

Onesnaževanje zraka škoduje zdravju ljudi in okolju (Rabl, 2002). V zadnjih desetletjih so se izpusti mnogih onesnažil zraka v Sloveniji močno zmanjšali, zaradi česar se je kakovost zraka v regiji izboljšala. Kljub temu so

koncentracije nekaterih onesnažil še vedno zelo visoke, težava kakovosti zraka pa ostaja. Pomemben delež evropskega prebivalstva živi na območjih, zlasti v mestih, kjer je kakovost zraka zmanjšana in ozon, dušikovi oksidi, predvsem pa trdni delci (PM) resno ogrožajo zdravje. Številne države EU so v letu 2010 presegle eno ali več zgornjih mej izpustov pri pomembnih onesnažilih zraka. Zmanjševanje onesnaževanja zraka zato ostaja pomembno. Kakovost zraka v Evropi se ni vedno izboljševala skladno s splošnim zmanjševanjem antropogenih izpustov onesnažil zraka (izpustov zaradi človeškega vpliva). Razlogi za to so zapleteni:

- med zmanjšanjem izpustov in koncentracijami onesnažil zraka, zaznanih v zraku, ni vedno jasne linearne povezave,
- prenos onesnažil zraka prek velikih razdalj v Evropo iz drugih držav ima vse večji vpliv, za dodatno varovanje zdravja ljudi in okolja v Evropi so še vedno potrebna ciljno naravnana prizadevanja za zmanjšanje izpustov.

Zrak se onesnažuje iz različnih virov, antropogenih in naravnega izvora. Izvori onesnaženja so lahko različni, v učbeniku se bomo ukvarjali predvsem s prvima dvema alinejama:

- zgorevanje fosilnih goriv in biomase pri proizvodnji elektrike, v prometu, industriji in gospodinjstvih,
- industrijski procesi in uporaba kemijskih spojin, npr. topil v kemični in nekovinski industriji,
- kmetijstvo,
- ravnanje z odpadki,
- primeri naravnih virov izpustov, kot so izbruhi vulkanov, prah, ki ga prinese veter, razpršena morska sol in izpusti hlapnih organskih spojin rastlin.

V učbeniku bomo uporabljali izraza zrak in plin. Z izrazom zrak bomo imenovali zrak in onesnaževanje v naravnem in življenjskem okolju, meteorologijo onesnažil v atmosferi itd. Izraz plin bomo uporabljali za dimne pline iz termoelektrarn na premog in izpušne pline iz motorjev z notranjim izgorevanjem, opis merilnih postopkov za merjenje koncentracije plinov, naprave za odstranjevanje plinov in delcev iz dimnih in izpušnih plinov itd.

## 2.1 Onesnažila v zraku

Onesnažila v zraku so delci in plini. V tem učbeniku bomo z izrazom delci poimenovali vse trdne in kapljičaste delce v zraku. To izbiro zagovarjamo zaradi načina merjenja, ki se uporablja na področju energetskega strojništva, pa tudi sicer. Koncentracijo delcev v zraku merimo gravimetrično prek mase filtra, na katerega se onesnažila ujamejo. Ker se na filter ujamejo trdni in kapljičasti delci, le-ti so večinoma delci pepela, različni trdi delci in kapljice ogljikovodikov, jih obravnavamo skupaj.

V nadaljevanju podpoglavja bomo na kratko predstavili najpomembnejša (Samec, 2006) onesnažila v zraku:



- delci,
- ogljikov dioksid,
- ogljikov monoksid,
- dušikovi oksidi,
- žveplov dioksid,
- lahkohlapni ogljikovodiki,
- metan,
- ozon,
- težke kovine itd.

Pogosto nas za posamezno onesnažilo zanima, kakšno škodo povzročajo v družbi (Rabl, 2002). Med tistimi, ki povzročajo največ škode, so delci in benzo(a)piren, najmanj škode pa povzročata onesnažili ogljikov monoksid CO in ogljikov dioksid CO<sub>2</sub> (Rabl, 2002). Rezultati takih in podobnih analiz so močno odvisni od metodologije vrednotenja.

### 2.1.1 Delci

Delci (PM, angl. *particulate matter*, običajno velikosti do 10 μm) so razpršene snovi v trdnem ali kapljevitem stanju. V ozračju so prisotni kot trdni delci ali aerosoli, ki vplivajo na zdravje ljudi, vidljivost v ozračju, so kondenzacijska jedra, povzročajo mehansko obrabo (abrazijo) in vizualno onesnažujejo naravno in urbano okolje. Glavni vir človeškega onesnaževanja so industrija, promet in gradbeništvo, proizvodnja električne energije in ogrevanje na biomaso, kmetijstvo.

Določitev velikosti aerosola je eden pomembnejših gradnikov kar se tiče meritev in modeliranja dinamike aerosola. Premer delcev največkrat opišemo z izrazom aerodinamični premer. Aerodinamični premer je definiran kot premer okroglega delca z gostoto 1000 kg/m<sup>3</sup>. To pomeni, da se v zraku obnaša kot vodna kapljica definiranega premera. Delci enake oblike in velikosti, toda različne gostote, imajo različen aerodinamični premer. Na podlagi aerodinamičnega premera ločimo delce:

- PM<sub>10</sub> - delci z aerodinamičnim premerom pod 10 μm,
- PM<sub>2,5</sub> - delci z aerodinamičnim premerom pod 2,5 μm,
- PM<sub>1,0</sub> - delci z aerodinamičnim premerom pod 1 μm,
- UFP – zelo fini delci (angl. *ultra fine particles*) z aerodinamičnim premerom pod 0,1 μm, ki jih imenujemo tudi nanodelci.

Delci so naravnega ali antropogenega izvora in pomembno vplivajo na zdravje ljudi, klimo, vidnost itd. Onesnaženost zraka z delci je v Evropi pereč problem. Sestava delcev je različna: sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), amonij (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), različne kovine ter ogljik v organski in anorganski obliki.

Aerosol je disperzni sistem, ki vsebuje trdne ali kapljevite delce, suspendirane v zraku. Del delcev se emitira v atmosfero iz virov na površini (primarni delci), medtem ko so drugi posledica različnih pretvorb v onesnaženi atmosferi (sekundarni delci). Delci so naravnega izvora (cvetni prah, vegetacija, morska

sol, dim gozdnih požarov, meteorski prah, vulkanski pepel) ali antropogenega izvora – vpliv človekove aktivnosti (energetski objekti, industrija, promet, poljedelstvo, individualna kurišča).

Delci, ki nastanejo s procesi zgorevanja in so trdni in kapljeviti, so v glavnem velikosti pod 1  $\mu\text{m}$  in se imenujejo fini delci (angl. *fine particles*). Na zemeljski površini pa nastanejo delci, v glavnem večji od 1  $\mu\text{m}$ , imenujemo jih grobi delci (angl. *coarse particles*). Sem štejemo tudi bioaerosole, npr. pelod, trose, katerih izvor je vegetacija. Delci, ki nastanejo pri gorenju, se lahko nahajajo v obeh velikostnih razredih. Delci različnega izvora so različne kemijske sestave in prav tako različne oblike in različnih fizikalnih stanj.

Manjši kot so delci, globlje prodrejo v dihalne poti. Delci, večji od 10  $\mu\text{m}$ , se ustavijo v zgornjih dihalnih poteh (nos, obnosne votline), manjši od 10  $\mu\text{m}$  pa potujejo v spodnje dihalne poti. Delci, manjši od 2,5  $\mu\text{m}$ , prodrejo globoko v dihalne poti. Vnetna reakcija na mestu vstopa in v pljučih lahko dodatno poslabša obstoječo bolezen dihal.

Atmosferski delci so kompleksna zmes organskih in anorganskih komponent in so vpleteni v številne procese, sodelujejo pri različnih kemijskih in fizikalnih pretvorbah v onesnaženi atmosferi in pri nastanku kislega dežja vplivajo na vidnost in električne lastnosti atmosfere. Koncentracija in sestava sta odvisni predvsem od izpustov (naravnih in antropogenih) ter od meteoroloških pojavov. Iz analize filtra z depozitom delcev PM<sub>10</sub> ali PM<sub>2,5</sub> dobimo podatek o vsebnosti težkih kovin, policikličnih aromatskih ogljikovodikov (PAH), ionov, elementarnega in organskega ogljika (EC/OC) ter levoglukozana v delcih, saj se le-ti v zrak sproščajo v obliki delcev in pare.

### 2.1.2 Plini

Med plinskimi onesnažili bomo omenili ogljikov dioksid, ogljikov monoksid, dušikove okside, žveplov dioksid, lahkohlapne ogljikovodike, metan in ozon.

**Ogljikov dioksid** je plin, brez katerega ni življenja na Zemlji. Ogljikov dioksid nastaja v skoraj vseh živih bitjih. Če ga obravnavamo kot onesnažilo, ogljikov dioksid antropogenega izvora nastaja predvsem pri zgorevanju fosilnih goriv. V ozračju so koncentracije okoli 0,04 %, v onesnaženih mestih do 0,08 %, v slabo prezračevanih prostorih do 0,15 %. Glavni vir so zgorevanje fosilnih goriv in naravni procesi v okolju. V okolju velja za toplogredni plin.

**Ogljikov monoksid** nastaja pri nepopolnem zgorevanju ogljika v gorivih, pri vdihovanju nastaja v krvi karboksihemoglobin (COHb), ki zmanjšuje količino kisika v krvi. Glavni vir je zgorevanje fosilnih goriv. Vpliva na počutje in zdravje ljudi. Ogljikov monoksid nastaja pri industrijski proizvodnji in prometu, vendar poznamo še druge zelo pomembne in nevarne vire ogljikovega monoksida. Pri kajenju nastali ogljikov monoksid se veže na hemoglobin, zato imajo kadilci do približno 10 % hemoglobina blokirane z ogljikovim monoksidom.

**Dušikovi oksidi** (krajše  $\text{NO}_x$ ), med dušikovimi oksidi sta še posebej nevarna  $\text{NO}$  in  $\text{NO}_2$ . Dušikovi oksidi nastajajo pri zgorevanju goriv kot termični  $\text{NO}_x$  iz zraka, ki ga porabljamo pri gorenju in kot  $\text{NO}_x$  iz goriva pri oksidaciji dušikovih spojin iz goriva. Glavni vir je zgorevanje fosilnih goriv. Dušikovi oksidi vplivajo na zdravje ljudi, rastline, so sekundarni onesnaževalec, saj sodelujejo pri škodljivih procesih v okolju. Didušikov oksid  $\text{N}_2\text{O}$  je smejalni plin in se uporablja v medicini. V manjših dozah ima omamen učinek, v večjih pa deluje kot narkotik.

**Žveplov dioksid**, več kot 80 % žveplovega dioksida je posledica oksidacije žvepla iz fosilnih goriv pri gorenju, v okolju reagira s kapljicami vode in povzroča zakisanje padavin.

**Lahkohlapni ogljikovodiki** (VOC, angl. *volatile organic compounds*), kot so benzen, formaldehid, vinilklorid, tetraklorid dražijo sluznico, vplivajo na živčni sistem, škodujejo rastlinam. Lahkohlapni ogljikovodiki so lahko tudi kancerogeni. Glavni antropološki izvor je promet (70–80 %), naravni vir pa so rastline.

**Metan** nastaja pri naravni razgradnji organskih snovi, tudi na odlagališčih komunalnih odpadkov. Ker je močan toplogredni plin, ga na odlagališčih zbiramo in sežigamo, ponekod pretvarjamo v toploto in električno energijo.

**Ozon** ( $\text{O}_3$ ) je plin, katerega molekula je sestavljena iz treh atomov kisika. Ozon je močan oksidant. Ozon je nestabilen in razpada v običajno dvoatomno obliko in v prosti kisikov atom, ki se rad veže s snovmi v okolici. Zaradi svoje reaktivnosti se ga uporablja za dezinfekcijo in za čiščenje. V stiku z živim tkivom v dihalnih organih zato povzroča škodo in nastajanje bolezni.

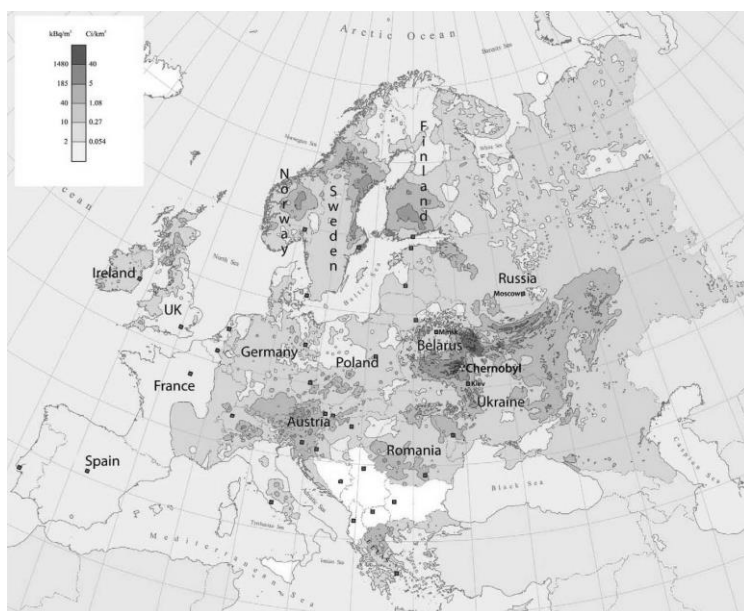
### 2.1.3. Pomembne okoljske nesreče

V tem podpoglavju bomo navedli tri pomembne okoljske nesreče, ki so zaznamovale dožemanje družbe o onesnaženju okolja in onesnažilih. Nesreče so pomagale dvigniti človeško zavest o pomenu čistega okolja in povzročile spremembe okoljske zakonodaje.

Onesnaženje zraka kvarno vpliva na človeško zdravje in v preteklosti je že velikokrat prišlo zaradi onesnaževanja do človeških žrtev. Nekatere izmed nesreč so bile povezane tudi z meteorologijo in razširjanjem onesnažil. Npr. veliki londonski smog (smog je beseda angleškega izvora, ki je združena iz besed **smoke** in **fog**), to je bilo štiri dni trajajoče obdobje visoke koncentracije smoga, ki je med 5. in 9. decembrom 1952 zajela spodnji del doline Temze z Londonom. Vzrok je bil temperaturni obrat, ki je ujel izpuste žveplovega dioksida in dima, mrzlo vreme, prisotnost anticiklona in popolno brezvetrje. Koncentracija je nekajkrat preseгла običajne vrednosti in takšno vreme in tudi industrijsko onesnaževanje sta trajala več dni. Vsaj 4000 ljudi je umrlo za posledicami smoga, predvsem tisti z dihalnimi težavami, zbolelo je približno 100.000 ljudi. Veliki londonski smog je pomemben z vidika njegovega vpliva na področju okoljskih raziskav, uredb vlade in ozaveščenosti javnosti o

odnosu do kakovosti zraka in zdravja. Vse to je privedlo do številnih sprememb pri dojemanju in ozaveščanju ljudi in tudi do sprejema predpisov na tem področju.

Poleg že prej omenjenega velikega smoga v Londonu je primer meteorologije onesnažil razširjanje radioaktivnega oblaka izpusta iz Černobila (slika 3) po nesreči v jedrski elektrarni leta 1986 ali pa razširjanje radioaktivnega oblaka izpusta po nesreči v jedrski elektrarni Fukušima - Daiči leta 2011. Porušen reaktor številka 4 v jedrski elektrarni Černobil je povzročil največjo jedrsko nesrečo v zgodovini človeštva. Zaradi eksplozije je nastal radioaktiven oblak izpusta, ki je potoval prek Ukrajine, Belorusije in Rusije, pa tudi prek drugih evropskih držav. Prvi dokazi o velikem izpustu radioaktivnih snovi so prišli iz Švedske in ne iz Sovjetske zveze. Pri delavcih jedrske elektrarne na Švedskem, ki je več kot 1000 km oddaljena od Černobila, so našli radioaktivne delce na oblačilih zaposlenih.



Slika 3: Razširjanje radioaktivnega onesnaževanja po Evropi po jedrski nesreči v Černobilu leta 1986 [www.tuurdemeester.com].

Jedrski katastrofa v elektrarni Fukušima - Daiči na Japonskem je nastala kot posledica močnega potresa in cunamija marca leta 2011. Jedrska nesreča je obsegala odpovedi opreme, taljenje jedrske sredice in izpust radioaktivnih snovi v okolje. Nesreča v Fukushimi je bila v primerjavi s černobilsko bolj zapletena, saj se je okvarilo več reaktorjev, vendar pa je bilo jedrsko onesnaževanje manjše v Fukushimi kot v Černobilu. Jedrska nesreča je imela

velike posledice na način pridobivanja električne energije na Japonskem in tudi drugod po svetu.

## 2.2 Mreža meritev onesnaženosti zunanjega zraka v Sloveniji

Mrežo meritev onesnaženosti zraka v Sloveniji sestavljajo avtomatska merilna mreža stalnih ekološko-meteoroloških postaj državne mreže za spremljanje kakovosti zraka (DMKZ), ki jo vodi Agencija RS za okolje (ARSO), ter dopolnilne avtomatske merilne mreže, v katerih izvajajo meritve drugi izvajalci (TE Šoštanj, mestne občine Ljubljana, Maribor, Celje, Krško, v preteklosti tudi TE Trbovlje). Mreža merilnih mest v Sloveniji je gostejša na območjih v bližini večjih virov onesnaženosti zraka. V krajih, ki niso zajeti v okviru stalnih mrež, potekajo občasne meritve onesnaženosti zraka z avtomatsko mobilno ekološko-meteorološko postajo in z difuzivnimi vzorčevalniki. Na območjih, ki so oddaljena od velikih virov izpustov, delujeta postaji Iskrba pri Kočevski Reki in Krvavec, na katerih se izvajajo meritve ozadja onesnaženosti zraka.

ARSO meri kakovost zunanjega zraka na 36 stalnih merilnih mestih po Sloveniji. Lokacije vseh merilnih mest so določene v skladu s priporočili *Pravilnika o monitoringu kakovosti zunanjega zraka*, ki določa umestitev vzorčevalnih mest na makro in mikro ravni.

Merilna mesta mestnega ozadja (Ljubljana Bežigrad, Ljubljana BF, Maribor Vrbanski plato, Celje, Nova Gorica, Koper, Kranj, Novo mesto) so reprezentativna za gostejše naseljene predele teh mest, v katerih živi večina prebivalstva. Merilno mesto Novo Mesto je prikazano na sliki 4.

Meritve na prometnih mestnih merilnih mestih Ljubljana center, Maribor center in Zagorje kažejo, kakšna je kakovost zraka v ozkem pasu ob prometnih cestah, kjer se ljudje večinoma zadržujejo kratek čas. Ocenjeno je, da je onesnaženost zraka na takih lokacijah od 60 do 70 % višja kot na lokacijah mestnega ozadja, kjer živi večina prebivalstva.

Merilna mesta predmestnega ozadja (Trbovlje, Hrastnik, Topolšica, Pesje, Škale) podajajo razmere glede kakovosti zraka na obrobju mest ali večjih naselij, kjer je prometa manj kot v samih mestih in so zato koncentracije onesnažil, ki izvirajo iz prometa, na takih lokacijah nekoliko nižje.

Merilno mesto Rakičan pri Murski Soboti uvrščamo v vrsto podeželskega/obmestnega ozadja. Na merilno mesto nekoliko vplivajo izpusti z bližnje ceste in naselja (v zimskem času individualna kurišča), pa tudi obdelave kmetijskih površin. Izkaže se, da so koncentracije izven naselij in dlje od prometnih cest nižje.

Podatki meritev z merilnih mest Krvavec, Iskrba pri Kočevski Reki in Otlica nad Ajdovščino so namenjeni za pridobivanje informacij o stanju onesnaženosti zraka na širšem področju za zaščito okolja (narava, rastline, živali) in ljudi ter za potrebe študija daljinskega transporta.



Slika 4: Merilno mesto onesnaženja zraka Novo mesto [Kakovost zraka v Sloveniji v letu 2011, Arso, 2012]

### 2.3 Meteorologija onesnažil

Z onesnažili v atmosferi glede na meteorološke parametre se ukvarja meteorologija onesnažil. Na razširjanje vplivajo temperatura, vlaga, veter in različni vremenski pogoji.

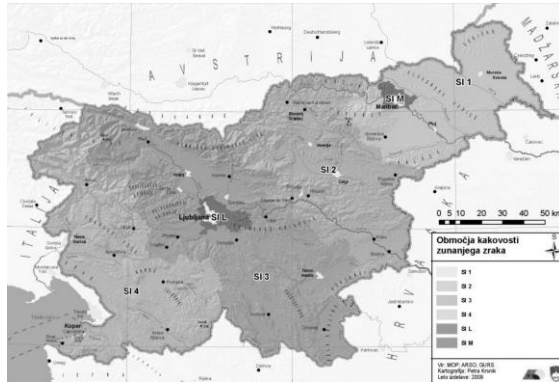
Onesnaževanje zraka je lokalno, vseevropsko in svetovno vprašanje. Izpusti onesnažil zraka v eni državi lahko preidejo v atmosfero, kar povzroči ali še poveča slabo kakovost zraka drugje. Zaradi tega se je v Evropi uveljavilo, da se spremlja onesnaženje zraka po regijah. Na sliki 5 so prikazana območja kakovosti zunanjega zraka v Sloveniji v letu 2011 glede na razdelitev na Agenciji Republike Slovenije za okolje. Slovenija je razdeljena na štiri območja in dve poseljeni območji.

Območja so:

- SI1 Pomurska in Podravska brez območja mesta Maribor,
- SI2 Koroška, Savinjska, Zasavska in Spodnjėsavska,
- SI3 Gorenjska, Osrednjeslovenska in Jugovzhodna Slovenija brez območja mesta Ljubljane in
- SI4 Goriška, Notranjsko-Kraška in Obalno-Kraška.

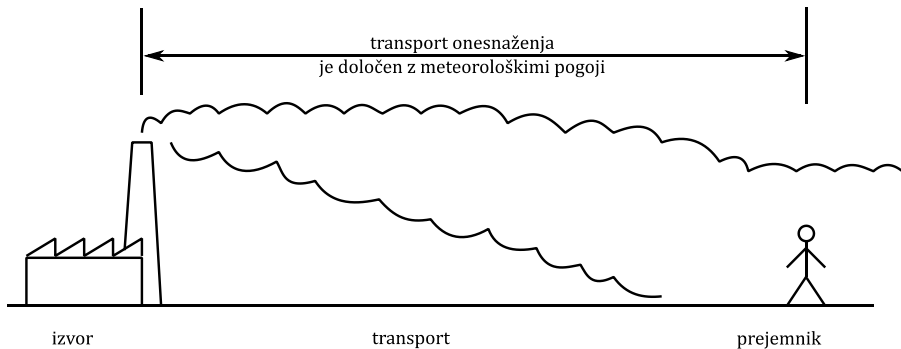
Poseljeni območji pa sta:

- SIL Območje mesta Ljubljana in
- SIM Območje mesta Maribor.



Slika 5: Območja kakovosti zunanjega zraka v Sloveniji v 2011. Slovenija je razdeljena na več območij in poseljenih območij [Kakovost zraka v Sloveniji v letu 2011, Arso, 2012].

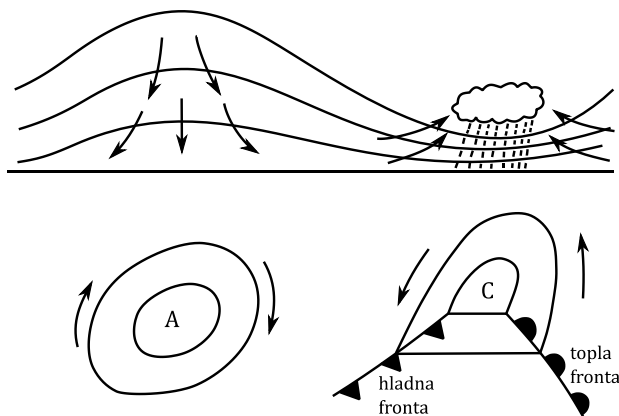
Vreme določa, kako se razširjajo nečistoče v zraku in kako se transportirajo po troposferi. Na ta način vreme vpliva na koncentracijo posameznega onesnažila, ki ga dihamo ali pa količino onesnažila, ki se odloži na vegetaciji. Problem onesnaževanja zraka tvorijo trije deli: izvor onesnaževanja, transport ali disperzijo onesnažila in sprejemnika onesnaževanja (slika 6).



Slika 6: Problem onesnaževanja zraka tvorijo trije deli: izvor onesnaževanja, transport ali disperzijo onesnažila in sprejemnika onesnaževanja.

V tem podpoglavju bomo obravnavali lastnosti transporta onesnažil, kako se onesnažila premikajo po atmosferi. Okoljski inženir mora poznati nekatere osnove meteorologije in približno napovedati disperzijo onesnažil v zraku. Onesnažila potujejo na dolge razdalje na enak način, kot potuje zrak v troposferi. Planetarno kroženje zraka povzročita sevanje sonca in

neenakomerna porazdelitev kopnega na Zemlji, zaradi česar se pojavi neenakomerna absorpcija sončnega sevanja in tvorjenje toplote prek površine Zemlje in atmosfere. To neenakomerno gretje in absorpcija povzročita v atmosferi dinamičen odziv. Dinamičen termični sistem zemljine atmosfere povzroča tudi spremembe v barometriškem tlaku. Sisteme z nizkim barometriškim tlakom povezujemo s toplim zrakom in zrakom, ki se dviga. Z dviganjem zraka se pojavi kondenzacija vodne pare, nastanek oblakov, padavin ter drugega slabega vremena, kot so tropske nevihte itd. Sistemi z visokim tlakom prinesejo sončno in mirno vreme, to je stabilne atmosferske pogoje. Sistemi z nizkim tlakom so imenovani cikloni, sistemi z visokim tlakom pa anticikloni. Slika 7 prikazuje ciklone in anticiklone.



Slika 7: Ciklon in anticiklon. Anticikloni se zaradi Coriolisove sile vrtijo na severni polobli v desno, v južni pa v levo. Obratno velja za ciklone.

Zemljina atmosfera je prozorna za svetlobo z visoko frekvenco in majhno valovno dolžino. Zemlja zato sprejema energijo sonca pri visokih frekvencah svetlobe in jo pretvarja v toploto pri nizkih frekvencah izsevanega valovanja svetlobe. Svetlobo pri nizkih frekvencah (dolgovalovna svetloba) v določeni meri absorbirajo in ponovno izsevajo toplogredni plini, kar omogoča življenje na Zemlji, pri povečani koncentraciji toplogrednih plinov pa globalno segrevanje Zemlje.

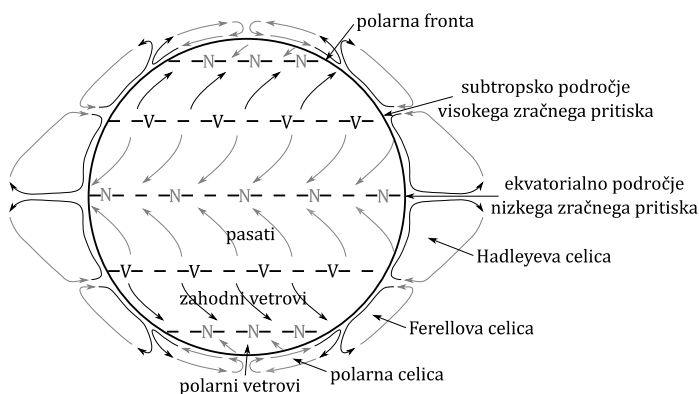
Svetloba pri nizkih frekvencah se prenese z Zemlje s sevanjem, prevodnostjo in konvekcijo. Sevanje je neposreden prenos energije, prevodnost prenos energije s fizičnim kontaktom in konvekcija prenos s premikanjem toplega zraka. Atmosfera je relativno slab prevodnik.

Sončno sevanje greje Zemljo najmočneje relativno v bližini ekvatorja, saj pada tam svetloba na Zemljo pravokotno na površino. Toplejši zrak se ob ekvatorju dviga in zaradi adiabatnega razširjanja hladi, v višinah postaja gostejši in se na svojem potovanju proti zemeljskima poloma spušča. Če se Zemlja ne bi vrtela



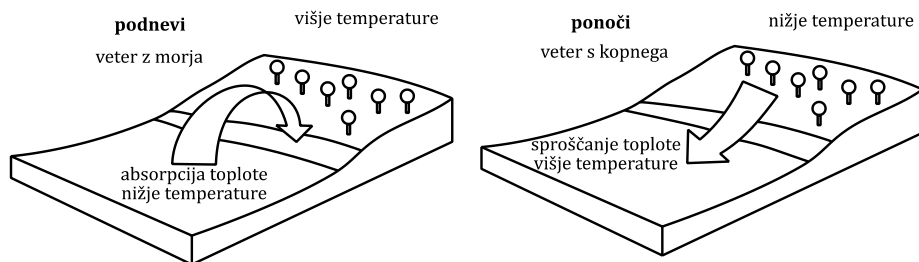
in če ne bi imela oceanov, morij, celin, hribov in gora, potem bi bila povprečna smer vetra na vseh mestih na Zemlji od polov proti ekvatorju. Vendar vrtenje Zemlje neprestano soncu nastavlja nove površine za gretje, zato obstaja vodoravni temperaturni gradient, prav tako pa tudi navpični temperaturni gradient. Skupno nastalo gibanje zraka naredi vzorce okrog površine Zemlje, kot to prikazuje slika planetarnega kroženja zraka (slika 8).

Ekvatorialno območje je območje stalnega nizkega zračnega tlaka, ker se tam zrak neprestano segreva, dviga in zato tudi ohlaja. V višinah zrak priteka proti poveratnikoma, kjer se spušča, segreva in zato zračna vlaga izhlapi. Nastajajo severovzhodni in jugovzhodni pasatni vetrovi, ki so značilni za subtropsko območje, kjer prevladuje visok zračni tlak. Ti vetrovi se vedno premikajo v smeri proti ekvatorju. V zmerno toplem pasu so značilni zahodni vetrovi, ki se srečujejo s polarnimi vzhodnimi vetrovi, kar povzroči nastanek baričnih depresij ali potujočih ciklonov.



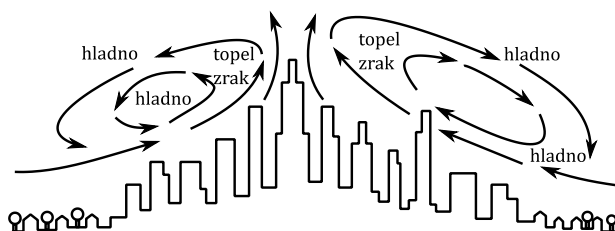
Slika 8: Planetarno kroženje zraka je najobsežnejše gibanje zračnih mas, ki zajema cel planet.

Sezonske in lokalne temperature, tlaki in oblaki, lokalna topografija itd. močno zapletejo sliko planetarnega kroženja zraka na lokalni ravni. Celina se ogreva in hladi hitreje kot vode, zato vetrovi s celine pihajo na morje ponoči in vetrovi z morja na celino čez dan (slika 9). Vetrovi v dolinah nastanejo, ko se zrak hladi na pobočjih gora.



Slika 9: Dnevno kroženje zraka ob obali, levo: maestral, desno: burin

Do podobnega pojava prihaja v mestih. V mestih se betonske in druge zidane zgradbe čez dan segrejejo in ponoči večinoma s sevanjem oddajajo toploto, zaradi česar nastane nad mestom toplotni otok (slika 10), ki vzpostavi od oddaljenega okolja neodvisno kroženje zraka. Pod takšnim toplotnim otokom se nabira prah, dim in drugi trdni delci, ki zmanjšujejo vidljivost, zaradi zelo slabe izmenjave zraka z okolico pa se poveča onesnaženje zraka.



Slika 10: Toplotni otok nad mestom

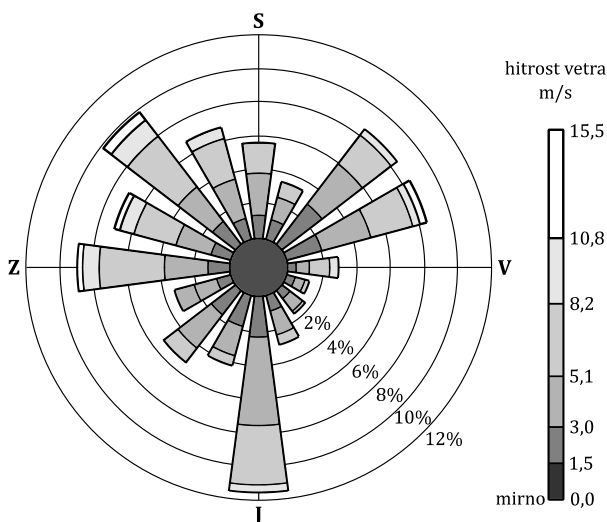
### 2.3.1 Vodoravno razširjanje onesnažil

Vodoravno gibanje zraka se meri kot hitrost vetra. Hitrost vetra se predstavi kot roža vetrov (angl. *wind rose*), to je grafična slika hitrosti vetra in smeri, iz katere je pihal veter (slika 11). Roža vetrov torej kaže smer, iz katere piha veter in ne kam piha. Roža vetrov je grafični pripomoček, s katerim meteorologi prikazujejo stalne vetrove za določeno območje. Roža vetrov na sliki 11 kaže, da je prevladujoča smer vetra iz juga. Roža vetrov ima naslednje značilnosti:

- orientacija segmenta pove, iz katerega območja veter piha,
- dolžina segmenta je sorazmerna % časa, ko piha veter iz izbrane smeri,
- barva pomeni hitrost vetra.

Pri obravnavi problemov onesnaževanja se včasih uporablja roža onesnaževanja (angl. *pollution rose*), ki je oblika rože vetrov in v kateri so prikazani vetrovi samo na dan, ko je onesnaženje prek izbrane meje. Ker roža vetrov in roža onesnaževanja prikazujeta smer, od koder veter piha, je z njo mogoče določiti bližnje vire onesnaževanja. Veter je najpomembnejši meteorološki dejavnik v gibanju onesnažil, na kratko lahko rečemo, da onesnažila potujejo z vetrom.

Okoljske agencije ob sumu na onesnaževanje iz izbrane tovarne postavijo merilno opremo za merjenje onesnaženja na mestih, proti katerim večinoma piha veter od tovarne proti mestu meritve. Take meritve so dolgotrajne in potekajo običajno več mesecev.



Slika 11: Primer rože vetrov

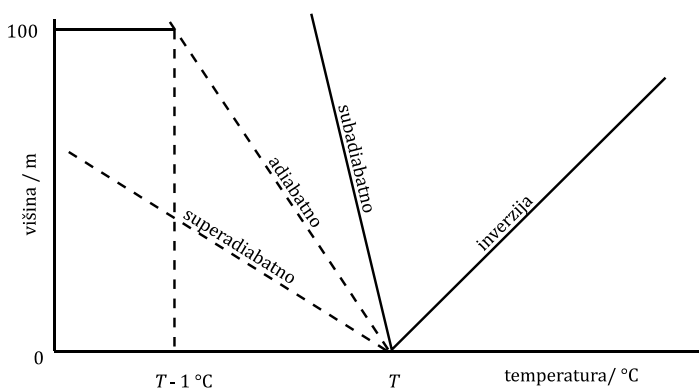
### 2.3.2 Navpično razširjanje onesnažil

Ko se zrak v zemljini atmosferi dviga, se tlak v okolici dvigajočega zraka zmanjšuje in se zato zrak razširi. Ob tej ekspanziji se zniža temperatura, to pomeni, da se zrak ohlaja, ko se dviga. Gradient, s katerim se suh zrak ohlaja, ko se dviga, imenujemo suhi adiabatni gradient temperature (angl. *dry adiabatic lapse rate*) in je neodvisen od temperature okoliškega zraka. Ker ga imenujemo adiabatni, to pomeni, da ni nobene izmenjave toplote med opazovanim zrakom in okoliško atmosfero, atmosfera je dober izolator. Teoretični suhi in vlažni adiabatni gradient temperature je možno izračunati. Teoretični suhi adiabatni gradient temperature znaša  $dT / dz = -9,8 \text{ }^\circ\text{C/km}$ . Teoretični vlažni adiabatni gradient temperature znaša  $dT / dz = -5 \text{ }^\circ\text{C/km}$ .

Dejanski povprečni gradient temperature v atmosferi znaša  $dT/dz = -6,49 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ .

V nadaljevanju za nekaj časa predpostavimo, da je zrak suh. Dejanski gradient temperature je tisti gradient, ki ga v izbranem trenutku izmerimo. Povezava med dejanskim gradientom temperature in suhim adiabatnim gradientom temperature določa stabilnost zraka in hitrost, s katero se razširjajo onesnažila, kar je prikazano na sliki 11.

Ko je dejanski gradient temperature natančno enak suhemu adiabatnemu gradientu temperature, ima atmosfera nevtralno stabilnost. Superadiabatski pogoji prevladujejo, ko se zraku temperatura zniža za več kot  $9,8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ . Subadiabatski pogoji prevladujejo, ko se zraku temperatura zniža manj kot  $9,8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ . Poseben primer subadiabatskih pogojev je temperaturna inverzija, ko se temperatura zraka viša z nadmorsko višino.



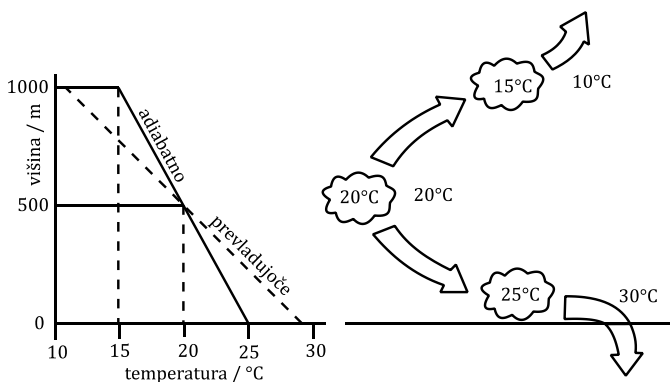
Slika 12: Gradienti temperature v atmosferi

Superadiabatski atmosferski pogoji so nestabilni in dajejo prednost disperziji, medtem ko so subadiabatski pogoji stabilni in se izrazijo v šibki disperziji. Inverzije so ekstremno stabilne, zmanjšujejo disperzijo in ujamejo onesnažila. Sila vzgona povzroča navpične premike v atmosferi, saj so večinoma oblaki izpustov topli, zaradi česar se dvigajo in razširjajo.

Z izrazom oblak izpusta (angl. *plume*) bomo v nadaljevanju poimenovali onesnažen oblak, to je oblak onesnaženega zraka ali dimnega plina, ki se odvaja iz neke naprave v okolico, kot je to npr. prikazano na sliki 13.

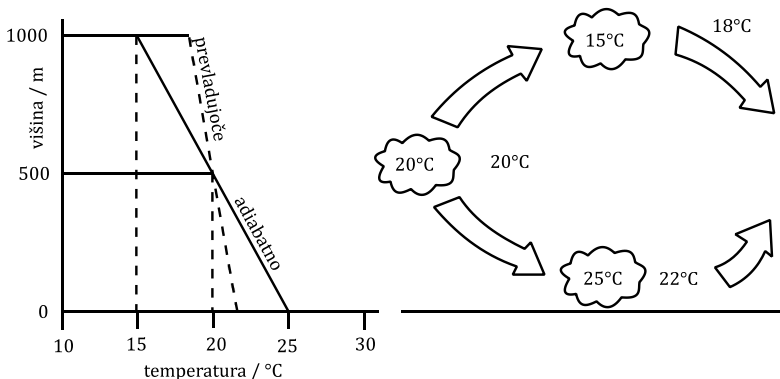
Pri nestabilnih superadiabatskih pogojih je v primeru na sliki 13 na višini 500 m temperatura  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Atmosfera je superadiabatska, na višini 0 m je temperatura  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  in na višini 1 km je temperatura  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dejanski superadiabatski gradient temperature znaša  $-20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ . Če se oblak izpusta iz 500 m adiabatno dvigne na 1 km, kakšna bo njegova temperatura? Glede na suhi adiabatni temperaturni gradient  $-9,8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$  se bo oblak izpusta ohladil za

4,9 °C na približno 15 °C. Toda na višini 1 km je temperatura 10 °C in ne 15 °C, naš oblak izpusta je 5 °C toplejši od okoliškega zraka in se bo zaradi tega še naprej dvigal. Podobno, če bi se oblak izpusta spustil na npr. 250 m, bi se njegova temperatura povišala iz 20 °C na 22,5 °C. Temperatura okolice na 250 m je 25 °C, zato je oblak izpusta hladnejši in se zato še naprej spušča. Pri tem se ozračje ne more stabilizirati, pogoji omogočajo nestabilnost.



Slika 13: Superadiabatski pogoji, nestabilna atmosfera. Okoliškemu zraku se temperatura spreminja v skladu s superadiabatskim gradientom temperature (črtkana črta). Temperature okoliškega zraka na posamezni višini so na desni sliki navedene izven oblaka izpusta. Temperature oblaka izpusta na posamezni višini so navedene v oblaku izpusta.

Zdaj predpostavimo, da je temperatura na nivoju morja oziroma tal 22 °C in da je temperatura na višini 1 km 18 °C. Subadiabatski dejanski temperaturni gradient znaša v tem primeru -4 °C/km. Če se oblak izpusta zaradi vzgona dvigne adiabatno na 1 km, se bo njegova temperatura znižala za 4,9 °C na približno 15 °C, enako kot je temperatura zraka na 1 km. Zato se bo oblak izpusta nehal dvigati, ker bo imel enako gostoto kot okoliški zrak. Če bi se oblak izpusta spustil na 250 m, bi bila njegova temperatura 22,5 °C, okoljska temperatura na tej višini pa bi znašala malo več kot 20 °C. Oblak izpusta je malo toplejši od okoliškega zraka in se bo zaradi sile vzgona začel dvigati proti višini, s katere je prišel. Z drugimi besedami, v tem primeru je gibanje zraka v navpični smeri dušeno in postaja stabilno, subadiabatski pogoji favorizirajo stabilnost in omejujejo mešanje v navpični smeri. To je prikazano na sliki 14. V preteklosti se je za preprečevanje posledic industrijskega onesnaževanja zaradi subadiabatskih pogojev v atmosferi gradilo zelo visoke dimnike, danes pa zakonodaja predpisuje gradnjo čistilnih naprav. V Sloveniji je primer takega visokega dimnika v Termoelektrarni Trbovlje (slika 15), ki je najvišji dimnik v Evropi in sedmi najvišji na svetu.



Slika 14: Subadiabatski pogoji, stabilna atmosfera. Okoliškemu zraku se temperatura spreminja v skladu s subadiabatskim gradientom temperature (črtkana črta). Temperature okoliškega zraka na posamezni višini so na desni sliki navedene izven oblaka izpusta. Temperature oblaka izpusta na posamezni višini so navedene v oblaku izpusta.

Stabilnost v atmosferi lahko pogosto prepoznamo po obliki oblaka izpusta iz dimnikov, kot je to npr. vidno na sliki 16. Nevtralno stabilnost lahko prepoznamo po stožčasti obliki oblaka izpusta (angl. *coning plumes*), medtem ko se nestabilni superadiabatski pogoji kažejo v pentljasti (angl. *looping*) obliki oblaka izpusta, ki se mnogo bolje razširja. Med stabilnimi (subadiabatskimi) pogoji lahko navedemo še ploščati (angl. *fanning*) oblak izpusta, ki se razširja kot tanka ploščata plast. Ena izmed potencialno nevarnih oblik razširjanja je fumigacija (angl. *fumigation*), kjer se onesnažila ujamejo pod inverzijo in se zmešajo zaradi močnega temperaturnega gradienta. Tudi pentljasti oblak izpusta lahko ob tleh doseže visoke koncentracije, ko se curek prvič dotakne tal.

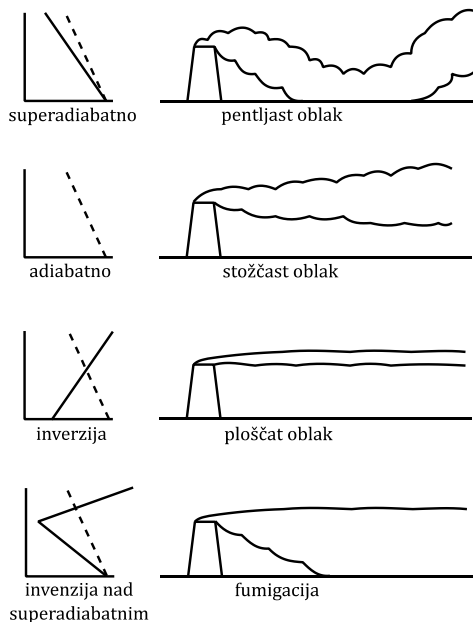
Če predpostavimo adiabatne pogoje v oblaku izpusta, lahko ocenimo, kako visoko se bo oblak izpusta razširil ali spustil ter kakšno obliko bo imel oblak izpusta pri danih atmosferskih pogojih, kot je to prikazano na spodnjem primeru.



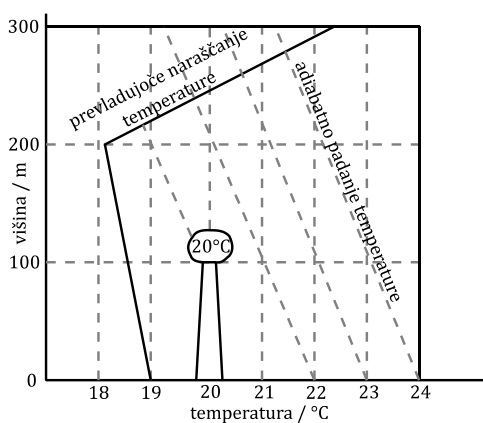
Slika 15: Dimnik Termoelektrarne Trbovlje. Trboveljski dimnik je 360 m visok dimnik, je najvišja zgradba v Sloveniji in najvišji dimnik v Evropi. Zgrajen je bil 1976 in je nadomestil prejšnji 80 m visok dimnik. Onesnaženost zraka z žveplovim dioksidom se je razporedila bolj enakomerno po Sloveniji; v Zasavju se je zmanjšala, povečala pa se je npr. v višje ležeči vasi Dobovec in v Savinjski dolini [[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)].

**Primer:** 100 m visok dimnik odvaja dimne pline s temperaturo  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Temperatura pri tleh je  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dejanski gradient temperature je  $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  do višine 200 m. Nad to višino je gradient temperature  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Če predpostaviš idealne adiabatske pogoje, kako visoko se bo oblak izpusta razširil in kakšno obliko bo imel. Nariši diagram (slika 17).

**Rešitev:** Za oblak izpusta predpostavimo, da se bo hladil s suhim adiabatnim temperaturnim gradientom  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . Temperaturni gradient pod 200 m je subadiabaten in okoliški zrak je hladnejši od oblaka izpusta. Zaradi tega se oblak izpusta dviga in ko se dviga, se hladi. Pri 225 m se oblak izpusta ohladi na  $18,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , na tej višina pa ima okoliški zrak enako temperaturo, zato se oblak izpusta neha dvigati. Pod 115 m bo oblak izpusta rahlo stožčast in ne bo presegel 225 m.



Slika 16: Oblike razširjanja oblaka izpustov iz dimnika in temu pripadajoče atmosferske stabilnosti. Na levih diagramih je s črtkano črto označen suhi adiabatski gradient temperature, s polno črto pa dejanski gradient temperature. Na desni strani so prikazane pričakovane oblike curka dima iz dimnika.



Slika 17: Diagram k primeru 1



### 2.3.3 Voda v atmosferi

Do sedaj smo vedno predpostavljali, da je zrak suh. Suh adiabatni gradient temperature je posledica suhega zraka. Voda v zraku kondenzira ali hlapi in pri tem oddaja ali absorbira toploto. To spremeni izračun gradientov temperature in stabilnost v atmosferi. Na splošno velja, ko se oblak zraka ali izpusta dviga, se bo vlaga kondenzirala in toplota sproščala. Zato se bo zrak počasneje hladil, ko se bo dvigal, vlažni adiabatni gradient temperature bo manj negativen kot suhi adiabatni gradient temperature. Pri nižanju temperature dosežemo stanje nasičenja, presežek vlage se kondenzira, latentna toplota se prenese nazaj v zrak. Vlažni adiabatni gradient temperature je med  $-6,5\text{ °C/km}$  in  $-3,5\text{ °C/km}$ , odvisno od relativne vlažnosti zraka. Voda v atmosferi prav tako vpliva na kakovost zraka na druge načine. Ko se vlažen zrak hladi in vlaga kondenzira, se tvorijo megle in aerosoli. Aerosoli služijo kot jedra za kondenzacijo, zato se megla pogosteje pojavlja v urbanih področjih. Resne nesreče, povezane z onesnaževanjem, skoraj vedno spremlja tudi megla (kot smo že navedli, smog izvira iz korenov angleških besed *smoke* in *fog*). Vodne kapljice v megli sodelujejo v pretvorbi žveplovih onesnažil v  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Megla se tudi usede nad dolino in stabilizira inverzijo, saj preprečuje sončnim žarkom, da bi ogrevali dno doline ali kotline, zaradi česar se čas trajanja onesnaževanja podaljša.

### 2.3.4 Modeliranje onesnažil v atmosferi

Razširjanje onesnažil je proces, s katerim se onesnažila premikajo v zraku in s katerim se oblak izpusta razširi prek velikih površin, s čimer se zmanjša koncentracija onesnažil. Če je oblak izpusta plinast, poteka gibanje molekul v njem v skladu s fizikalnimi zakoni konvekcije in difuzije plinov. Na splošno za ta primer veljajo Navier-Stokesove enačbe za gibanje tekočine oziroma, če so prisotni v oblaku izpusta delci, stanje popisuje adveksijsko-difuzijska enačba. Obstaja več vrst virov onesnažil, delimo jih lahko po obliki (točkovni, linijski, površinski, prostorninski), po gibanju (premični, nepremični), po višini (na površini, dvignjen), po trajanju (časovno nespremenljiv, časovno spremenljiv) itd.

Poznamo tri glavne vrste oblakov izpustov, z manjšo gostoto od okoliškega zraka, z večjo gostoto od okoliškega zraka in nevtralni. Oblaki izpusta so lažji od zraka, kadar imajo visoko temperaturo in majhno gostoto, lahko pa so tudi enake temperature kot okoliški zrak, vendar imajo manjšo molekulsko maso. Npr. izpusti iz dimnikov elektrarn in industrijskih peči so lažji od zraka, ker so mnogo toplejši od okoliškega zraka.

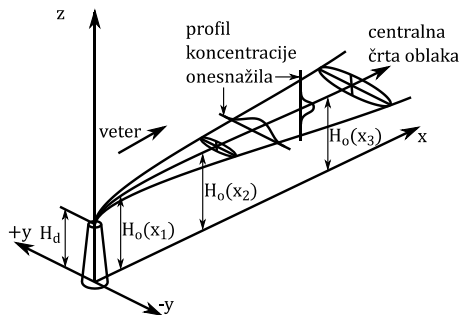
Med enostavnimi inženirskimi enačbami za modeliranje razširjanja onesnažil je Gaussov model, ki je bil prvič uporabljen okoli leta 1930. Obstaja še več drugih modelov. V Gaussovem modelu predpostavimo, da imamo opravka z

idealnim plinom. Izpeljave tega modela ne bomo zapisali, lahko pa navedemo osnovne predpostavke modela:

- najpomembnejši prispevek k razširjanju onesnažila ima veter, onesnažila se premikajo z vetrom,
- najvišja koncentracija onesnažil je ob osi razširjanja onesnažil,
- molekule onesnažil prehajajo iz mest z večjo koncentracijo na mesta z nižjo koncentracijo,
- onesnažilo se sprošča neprestano, pri čemer sta sproščanje in razširjanje stacionarna procesa.

Slika 18 kaže osnovne lastnosti Gaussovega modela z geometrijsko postavitvijo izvora, vetra in oblaka izpusta. Ob tem smo izbrali koordinatni sistem, ki ima izhodišče v viru onesnaženja in  $x$  os orientirano v smeri vetra. Bočno in navpično razširjanje sta v smeri osi  $y$  in  $z$ . Ko se oblak izpusta premika v smeri osi  $x$ , se razširja bočno in v navpični smeri stran od centralne osi. Preseka koncentracij onesnažila po  $y$  in  $z$  osi imata obliko Gaussovih krivulj, kot je to prikazano na sliki 18.

Ker se dimni plini običajno sproščajo iz dimnika toplejši, kot je temperatura okoliškega zraka, se zaradi vzgona oblak izpusta nad dimnikom dvigne še preden začne potovati v smeri osi  $x$ .  $H_e$  imenujemo efektivna višina dimnika in je vsota dejanske višine dimnika  $H_d$  in višine, za katero se dvigne oblak izpusta.



Slika 18: Gaussov model razširjanja oblaka izpusta

Koncentracijo onesnažila  $C$  na vsakem posameznem mestu  $x, y, z$  lahko zapišemo z enačbo (1). Enačba (1) vključuje odboj oblaka izpusta od tal in odboj oblaka izpusta od inverzije na določeni višini v atmosferi [Beychok, 2005 in Turner, 1994]

$$C = \frac{Q}{c} \cdot \frac{f}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{g_1 + g_2 + g_3}{\sigma_z \sqrt{2\pi}}, \quad (1)$$

kjer je  $Q$  masni tok sproščanja onesnažila,  $c$  hitrost vetra v smeri osi  $x$ ,  $\sigma_y$  standardna deviacija porazdelitve onesnažila v bočni smeri,  $\sigma_z$  standardna deviacija porazdelitve onesnažila v navpični smeri in  $f$  parameter bočnega razširjanja, ki je v skladu z enačbo 2 enak [Beychok, 2005 in Turner, 1994]

$$f = e^{\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]} \quad (2)$$

$g_1$ ,  $g_2$  in  $g_3$  so parametri navpičnega razširjanja. Posamezne parametre navpičnega razširjanja lahko zapišemo na način, ki ga prikazujejo enačbe (3, 4 in 5). V navedenih enačbah je  $g_1$  parameter navpičnega razširjanja brez odboja od sosednjih površin,  $g_2$  parameter navpičnega razširjanja za odboj od tal in  $g_3$  parameter navpičnega razširjanja za odboj od inverzije na višini [Beychok, 2005 in Turner, 1994]

$$g_1 = e^{\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \quad (3)$$

$$g_2 = e^{\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \quad (4)$$

in

$$g_3 = \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ e^{\left[-\frac{(z-H-2mL)^2}{2\sigma_z^2}\right]} + e^{\left[-\frac{(z+H+2mL)^2}{2\sigma_z^2}\right]} + e^{\left[-\frac{(z+H-2mL)^2}{2\sigma_z^2}\right]} + e^{\left[-\frac{(z-H+2mL)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \right\} \quad (5)$$

V zgornjih enačbah za  $g_1$ ,  $g_2$  in  $g_3$  je  $L$  oddaljenost do inverzije na višini. Vsota vseh treh eksponentnih členov v enačbi (5) konvergira zelo hitro h končni vrednosti. V večini primerov je dovolj, da seštejemo člene z  $m = 1$ ,  $m = 2$  in  $m = 3$ , da dobimo ustrezno rešitev.

Parametra  $\sigma_y$  in  $\sigma_z$  sta funkciji razreda turbulence, to je intenzivnosti turbulence v atmosferi ter oddaljenosti od sprejemnika. Najpomembnejši spremenljivki, ki vplivata na stopnjo razširjanja onesnažila, sta višina vira onesnaževanja in stopnja turbulence v atmosferi. Večja kot je stopnja turbulence v atmosferi, večje je razširjanje onesnažila. Starejši modeli uporabljajo razrede stabilnosti za določanje  $\sigma_y$  in  $\sigma_z$ , medtem ko novejši modeli temeljijo na teoriji podobnosti za določitev teh parametrov. Modele razširjanja onesnažil se običajno uporablja skupaj z modeli za določitev višine, na katero se dvigne oblak izpusta iz dimnika.

Pogosto nas zanima največja vrednost na površini, to je na  $y = 0$  in pri  $z = 0$ . V tem primeru se enačba za razširjanje onesnažila poenostavi. Dodatno poenostavitev lahko uvedemo, če je vir razširjanja na višini  $z = 0$ .

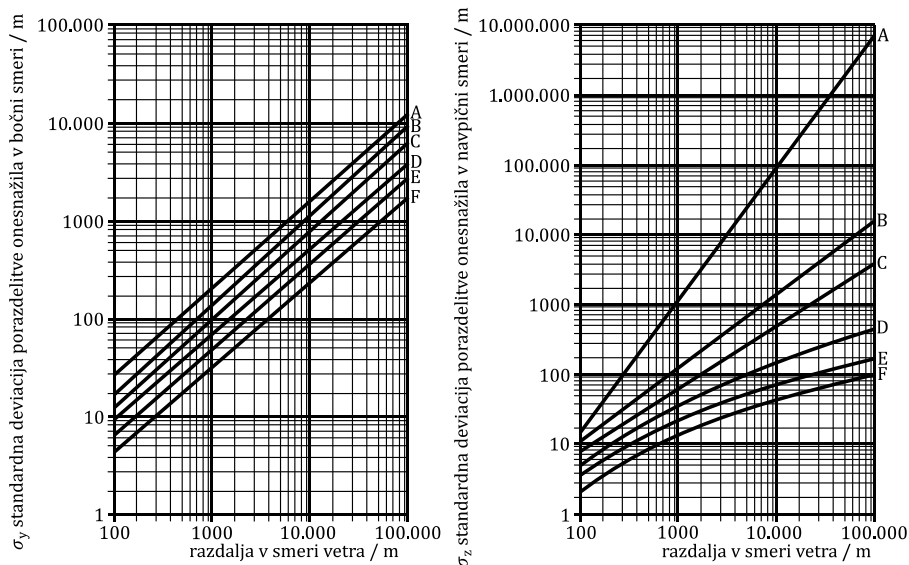
Turbulenca v ozračju pomembno vpliva na razširjanje onesnažil. Turbulenca v ozračju poveča mešanje in razširjanje onesnažil v oblaku izpusta in tako zmanjša koncentracijo onesnažil v oblaku izpusta. Zato je pomembno, da pri ocenjevanju razširjanja onesnažil stopnjo turbulence v ozračju ustrezno upoštevamo. Najstarejši in najpogosteje uporabljeni način za vpliv turbulence na razširjanje onesnažil je prek razredov stabilnosti atmosfere [Pasquill, 1961].

Razredi stabilnosti so od A do F, pri čemer je razred A najmanj stabilen oziroma najbolj turbulenten in razred F najbolj stabilen. Preglednica 1 kaže odvisnost stabilnosti od hitrosti vetra in sončnega sevanja. Dodatno se razrede stabilnosti lahko uporablja glede na vrsto atmosfere in območja. Razredi A, B in C ustrezajo superadiabatnim pogojem, razred D ustreza nevtralnim pogojem in razreda E in F subadiabatnim pogojem. V urbanih naseljih redko dosežemo stabilnost, večjo kot je razred D. Razreda stabilnosti E in F sta pogosta za podeželska območja.

Preglednica 1: Razredi stabilnosti v atmosferi [Pasquill, 1961]

	podnevi			ponoči	
	sončno sevanje			tanka oblačnost	
hitrost vetra na višini 10 m / (m/s)	močno	srednje	šibko	nizka oblačnost	šibka oblačnost
< 2	A	A - B	B	-	-
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	E
> 6	C	D	D	D	D

Vrednosti za  $\sigma_y$  in  $\sigma_z$  so podane za vsak posamezen razred stabilnosti atmosfere na sliki 19 [Turner, 1994].



Slika 19: Levo: parameter  $\sigma_y$  (standardna deviacija porazdelitve onesnažila v bočni smeri), desno: parameter  $\sigma_z$  (standardna deviacija porazdelitve onesnažila v navpični smeri). Oba sta prikazana kot funkcija razreda turbulence [povzeto po Turner, 1994].

Do sedaj smo predpostavili, da je hitrost vetra enakomerna in da veter piha samo v eno smer. To pomeni, da je hitrost možno določiti vedno in v vsaki točki z eno meritvijo. Te predpostavke niso realne, smer vetra se spreminja in hitrost vetra se spreminja z višino in v odvisnosti od časa. Spreminjanje hitrosti vetra v odvisnosti od višine lahko približno zapišemo s paraboličnim profilom hitrosti vetra. To pomeni, da hitrost vetra  $c$  na višini  $h$  lahko izračunamo iz izmerjene hitrosti  $c_0$  na referenčni višini  $h_0$  z uporabo enačbe (6) [Weiner in Matthews, 2003]

$$c = c_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^n . \quad (6)$$

Eksponent  $n$ , ki ga imenujemo parameter stabilnosti, je empirično določen v odvisnosti od stabilnosti atmosfere in je za razrede stabilnosti A, B in C (velik gradient temperature) enak 0,2, za razred stabilnosti D (nizek ali ničelni gradient temperature) je enak 0,25, za razred stabilnosti E (inverzija) je enak 0,33 in za razreda stabilnosti F in G (močna inverzija) znaša 0,5 [Weiner in Matthews, 2003]. Hitrost in smer vetra se običajno merita na višini 10 m.

Natančnost v tem podpoglavju navedenih modelov za razširjanje onesnažil in efektivno višino dimnika v praksi ni dobra. Nekalibrirani modeli napovejo koncentracije onesnažil v okviru velikostnega razreda, ne bolje. Za doseganje večje natančnosti je treba model kalibrirati, to pa se naredi na osnovi mreže meritev koncentracij na tleh. Dodatna slabost navedenih modelov je, da so primerni samo za točkaste vire, ne pa za vire z velikim številom majhnih izpustov. Tak primer je npr. onesnaževanje iz parkirne hiše, avtoceste itd. V teh primerih se uporablja računalniške modele na osnovi Navie-Stokesovih enačb ali pa izvedenke Gaussovega modela z velikim številom diskretnih virov onesnaževanja.

### 2.3.5 Čiščenje atmosfere

Čiščenje atmosfere je proces, s katerim se onesnažila iz atmosfere samodejno odstranjujejo. Čiščenje vsebuje čiščenje z:

- gravitacijo oziroma usedanjem,
- čiščenje ob dotiku s površino zemlje in
- s padavinami.

Z gravitacijo oziroma usedanjem se delci vedno odstranijo iz atmosfere, če so večji kot približno milimeter v premeru. Lep primer so sajasti delci na izstopu iz izpušne cevi dizelskega tovornjaka starejše proizvodnje. Vendar je večina delcev onesnažila v atmosferi dovolj majhnih, da je njihovo usedanje odvisno od atmosferske turbulence, viskoznosti in trenja, kakor tudi gravitacijskega pospeška. Zaradi tega je lahko usedanje majhnih trdnih delcev zelo počasno. Delci, ki so manjši od 20  $\mu\text{m}$  v premeru, se redko usedejo zgolj zaradi gravitacije. Plini se odstranijo iz atmosfere le v primeru, če se adsorbirajo na delce, absorbirajo ali kondenzirajo. Žveplov trioksid  $\text{SO}_3$  je npr. tako higroskopičen, da se že v dimnem kanalu spremeni v žveplovo (VI) kislino in nato le-ta nadalje kondenzira, če je njena koncentracija dovolj visoka.

Delci, ki so dovolj majhni, da ostanejo v atmosferi dolgo časa, se v zraku razširjajo, vendar se to zgodi nekoliko drugače, kot se razširjajo plinasta onesnažila. V enačbah za razširjanje onesnažil moramo dodati člen, ki vsebuje hitrost usedanja delcev. Za delce med 1  $\mu\text{m}$  in 100  $\mu\text{m}$  v premeru, hitrost usedanja delcev  $c_d$  zapišemo (enačba 7) s Stokesovo enačbo

$$c_d = g d^2 \frac{\rho_d}{18 \mu} \quad , \quad (7)$$

v kateri je  $c_d$  hitrost usedanja delcev oziroma terminalna hitrost,  $d$  premer delcev,  $\rho_d$  gostota delcev in  $\mu$  dinamična viskoznost zraka. Hitrost usedanja spremeni Gaussovo enačbo za razširjanje onesnažil, tako da dobimo naslednjo enačbo za koncentracijo delcev na višini  $z = 0$  [Weiner in Matthews, 2003]

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{c} \cdot \frac{e^{\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]}}{\sigma_y\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{e^{\left[-\frac{\left(H-\left(\frac{c_d x}{c}\right)\right)^2}{2\sigma_z^2}\right]}}{\sigma_z\sqrt{2\pi}} \quad (8)$$

V enačbi (8) ni več upoštevan odboj oblaka izpusta od inverzije na višini niti odboj od tal, saj se delci od tal ne odbijejo. Zato je enačba (8) enostavnejša od enačbe (5) za razširjanje plinskih onesnažil.

Pri čiščenju ob dotiku s površino zemlje se številni plini iz atmosfere absorbirajo na kameninah, zemlji, rastlinstvu, vodah in drugje. Topni plini, kot je npr. SO<sub>2</sub>, se topijo v površinskih vodah in tako raztapljanje lahko izmerimo kot zakisanje.

Pri čiščenju atmosfere s padavinami se onesnažila odstranjujejo na dva načina, in sicer s pranjem (angl. *rainout*) in z izpiranjem (angl. *washout*). Pranje je proces, pri katerem zelo majhni delci onesnažila postanejo zarodna jedra za nastanek dežnih kapljic, ki rastejo in končno padejo na zemljo kot padavine. Izpiranje je proces, pri katerem kapljice dežja, ko padajo proti tlom, zajamejo delce ali molekule onesnažila ali pa se onesnažilo raztopi v padajočih kapljicah dežja.

Količino onesnažila, ki se odstrani z zgoraj omenjenimi metodami, je težko določiti. Avtorji znanstvenih člankov navajajo, da se od 50 do 90 % atmosferskega žvepla odstrani z mokrimi procesi [Hales, 1978].

## 2.4 Meteorološke opazovalne postaje

Meteorološke opazovalne postaje so treh različnih vrst:

- sinoptične,
- klimatološke in
- padavinske.

Na sinoptični postaji opazujemo sedanje in preteklo vreme, oblačnost, to je količino in vrsto oblakov, višino baze oblakov, vidnost, posebne pojave, splošne fenološke pojave, stanje posevkov, stanje tal. Merimo smer in hitrost vetra, temperaturo zraka, ekstremno (najvišjo in najnižjo) temperaturo zraka, temperaturo tal v globinah 2, 5, 10, 20, 30, 50 in 100 cm, minimalno temperaturo 5 cm nad tlemi, zračni tlak, tendenco zračnega tlaka, značilnosti naraščanja ali padanja tlaka, vlažnost zraka, vlažnost zemljišča, padavine (vrsta, količina in jakost), snežno odejo (stopnjo pokritosti zemljišča – površina snežne odeje, višini nove in skupne snežne odeje, gostoto snega), globino zamrzovanja in taljenja zemljišča, sončno sevanje in izhlapevanje.

Klimatološka postaja ali podnebna postaja je meteorološka postaja, ki opravlja meritve in opazovanja trikrat dnevno, ob 7., 14. in 21. uri. Meritve vsebujejo

smer in hitrost vetra, temperaturo zraka, ekstremno temperaturo zraka, temperaturo zemlje, vlažnost zraka, količino padavin in višino snežne odeje. Padavinska postaja je meteorološka postaja, kjer merimo enkrat dnevno, ob 7. uri po krajevnem času. Na padavinski meteorološki postaji se opazuje pomembnejše atmosferske pojave (megla, slana, rosa, vrsta padavin - dež, toča, sneg, viharni veter, nevihta itn.), čas začetka in konca vseh vrst padavin in važnejših atmosferskih pojavov ter po potrebi fenološka opazovanja. Na padavinski postaji se meri količina padavin, debelina snežne odeje in novozapadlega snega.

Meteorološke postaje so pogosto nameščene tudi v sklopu elektrarn.

#### 2.4.1 Merilna oprema na meteoroloških opazovalnih postajah

V nadaljevanju bomo opisali del merilne opreme, ki se uporablja na meteoroloških opazovalnih postajah.

**Dežemer** (angl. *rain gauge*) ali **pluviometer** je merilnik, ki zapisuje množino, čas trajanja in jakost padavin (slika 20). Dežemer je lahko preprosta naprava, ki z lijakom (pri standardiziranih dežemerih ima lijak premer 200 mm) zbira padavine v merilni valj (ta ima manjši premer od lijaka, ta znaša npr. 20 mm). Višina dežemera je običajno 500 mm. Ker se del padavin nabere na steni, dežemer malenkost podceni količino padavin. Na rezultate meritev lahko vplivajo nizke temperature, zmrzal in sneg, čemur se izognemo z ogrevanjem dežemera. V veliki večini primerov se padavin ne shranjuje. Dežemer mora biti postavljen na prostem stran od sten stavb ali dreves.

Dežemeri delujejo na več načinov. Padavine lahko zbirajo v merilni valj, padavine se lahko tehta, prostornino padavin se določi optično ali pa se prostornino padavin izmeri z zvrtnim sistemom. Zvrtni sistem deluje na osnovi prelivanja padavin čez dvojno, na sredini vpeto premično posodico. Ob prehodu iz prve lege v drugo se sproži stikalo. Optični dežemer deluje tako, da optično štejemo kapljice, ki odtečejo iz zbirne posode. Število odtečenih kapljic merimo s kombinacijo laserske diode z usmerjenim žarkom in fotodiode. Laserska dioda z usmerjenim žarkom cilja v pot kapljic, ko kapljica pade iz dežemera, se od nje odbije svetloba laserske diode, fotodioda zazna bliske, ki so posledica odbite svetlobe. Podatki se lahko zapisujejo na trak ali z računalnikom.

Totalizator je dežemer z veliko posodo in ga uporabljamo za zbiranje padavin v daljšem časovnem obdobju, npr. v enem letu ali v pol leta. Postavljamo ga na nenaseljenih področjih in kjer ni možno meriti padavin z navadnim dežemerom.

**Anemometer** je merilna naprava za merjenje hitrosti vetra (slika 21). Vloga anemometra je merjenje izbrane ali vseh komponent vektorja vetra. Idealni anemometer bi moral reagirati na najmanjši vetrič in viharne vetrove, imeti linearno značilnost in trenutno reagirati na najmanjša in najhitrejša turbulentna nihanja hitrosti. V praksi uporabljamo več različnih



anemetrov, da zadostimo navedenim zahtevam. V strojništvu sicer uporabljamo še druge vrste anemetrov, vendar ne v okoljskem strojništvu. To so laserski Dopplerjev anemometer, anemometer na vročo žičko, metoda PIV za merjenje hitrosti in Pitotova cev.



Slika 20: Levo: dežemer je lahko preprosta naprava (levo), ki z lijakom zbira padavine v merilni valj, ali pa je merjenje avtomatsko (desno). Pri dežemeru na desni je zbirni del iz črnega aluminijastega obroča z ostrimi robovi in lijaka, ki usmerja vodo do zvratnega mehanizma [[www.theolivecentre.com](http://www.theolivecentre.com) in [www.onsetcomp.com](http://www.onsetcomp.com)].

Vrteči se del klasičnega **anemometra s skodelicami** (angl. *cup anemometer*) je sestavljen iz treh ali štirih skodelic, pritrjenih na os. Hitrost vrtenja osi je sorazmerna s silo, s katero deluje veter na skodelice. Večja kot je hitrost vetra, hitreje se vrtijo skodelice anemometra. Vrtlino frekvenco skodelic anemometer navadno meri z elektromagnetnim ali optičnim števcem. Anemometer s skodelicami deluje neodvisno od tega, iz katere smeri piha veter, zato za določanje smeri vetra uporabljamo še navpično krilce.

**Anemometer na vetrnico** (angl. *vane anemometer*) se uporablja vedno skupaj z navpičnim krilcem. Načelo delovanja je podobno kot pri anemometru na skodelice, le da je os vrtenja vetrnice anemometra vodoravna.

**Ultrazvočni anemometer** (angl. *ultrasonic anemometer*) uporabi ultrazvočno valovanje za merjenje hitrosti in smeri vetra. Hitrost vetra se določa tako, da se meri čas preleta, ki je potreben ultrazvočnemu impulzu, da prepotuje pot od nepremičnega izvora do nepremičnega sprejemnika. Hitrost vetra relativno poveča ali zmanjša hitrost zvoka glede na to, v katero smer veter piha. Ultrazvočni anemometri so prikladni za merjenje turbulence v atmosferi, ker je njihov odziv hiter, približno do 20 Hz. Zgornja meja frekvenc za vrednotenje dinamičnih pojavov in turbulentnosti ozračja je sicer značilno nižja, kot je to npr. primer v energetskih strojih. Ker nimajo premičnih delov, so ultrazvočni anemometri primerni za dolgoročno uporabo v oddaljenih avtomatiziranih

vremenskih postajah in tam, kjer na točnost in zanesljivost tradicionalnih anemometrov z lopaticami vplivata slan zrak ali velike količine prahu. Hitrost zvoka se spreminja s temperaturo, ni pa odvisna od tlaka. Uporabljata se izvedbi z dvema akustičnima potema (ta zaznavala imajo 4 roglje) in tremi akustičnimi potmi (ta zaznavala imajo tri roglje).

**Anemometer na žogico za namizni tenis** je preprost anemometer. Če veter piha v vodoravni smeri, pritisne na žogico in jo premakne v smeri vetra. Ker so žogice za namizni tenis zelo lahke, se odklonijo že pri najmanjši hitrosti vetra. Iz merjenja kotov, pod katerim je odklonjena žogica, lahko določimo smer in hitrost vetra.



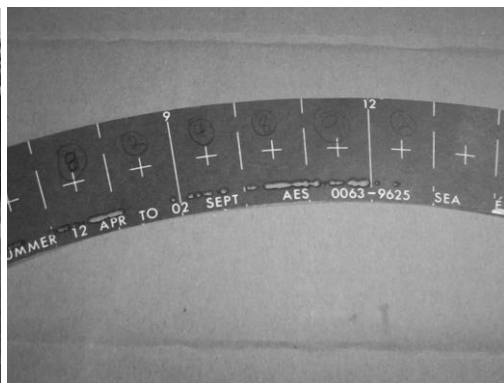
Slika 21: Anemometri, ki se uporabljajo pri meteoroloških meritvah: ultrazvočni anemometer (skrajno levo), anemometer s skodelicami (v sredini), anemometer na vetrnico (desno) [[www.thiesclima.com](http://www.thiesclima.com), [www.fuehlersysteme.de](http://www.fuehlersysteme.de) in [www.inspectapedia.com](http://www.inspectapedia.com)].

Z anemometri merimo hitrost vetra pred postavitvijo vetrnih elektrarn. Primer takih meritev so bile meritve hitrosti vetra, ki jih je izvajalo podjetje Soške Elektrarne ob zgornjem akumulacijskem jezeru črpalne hidroelektrarne Avče na Kanalskem vrhu od novembra 2009 do aprila 2011 (slika 22). Merilni stolp na Kanalskem vrhu je bil postavljen na nadmorski višini 634 m. Vgrajeni merilniki so bili klasični anemometri na vetrnico z navpičnim krilcem za določanje smeri, ki so zajemali hitrost in smer vetra na štirih različnih višinah; 20 m, 40 m, 60 m in 80 m. Izmerjene vrednosti so se zbirale kot desetminutna povprečja, njihov prenos do glavnega računalnika pa je bil izveden prek povezave GSM.



Slika 22: Merjenje hitrosti vetra na lokaciji Kanalski Vrh zraven zgornje akumulacije ČHE Avče [Levpušček, 2012]

**Heliograf** je instrument (slika 23) za merjenje oz. nepretrgano zapisovanje trajanja sončnega obsevanja. Iz njegovega zapisa določamo trajanje sončnega obsevanja v urah. Pogost je heliograf s stekleno kroglo, ki ga imenujemo Campbell-Stokesov heliograf. Osnovni del Campbell-Stokesovega heliografa je steklena krogla, ki zbira v gorišče sončne žarke in ti izžigajo sled na papirnat trak. Papirnat trak je nameščen v žleb školjke, ki obdaja stekleno kroglo. Na papirnatem traku ostane prežgana sled.



Slika 23: Heliograf, levo merilnik, desno trak v njem [[www.podlipa-smrecje.si](http://www.podlipa-smrecje.si) in [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)]

## 2.5 Merjenje onesnažil v zraku

Najzanesljivejši kazalnik stanja kakovosti zraka so meritve koncentracij onesnažil. Meritve kakovosti zraka se izvajajo z namenom določitve nivoja vseh vrst onesnažil v atmosferi brez namena ločevanja med naravnimi

onesnažili in tistimi, ki so posledica človeške aktivnosti. Meritve kakovosti zraka oz. plina ločimo v dva razreda:

- meritve kakovosti zunanjega zraka in
- meritve izpustov plinov.

Pri meritvah kakovosti zunanjega zraka (angl. *measurement of ambient air quality*) merimo z različnimi merilniki, največkrat sta to visokoprostorninski vzorčevalnik ali kaskadni impaktor. Skoraj vsi podatki v povezavi z zdravstvenimi težavami prebivalstva z onesnaževanjem zraka so povezani z rezultati meritev kakovosti zunanjega zraka.

Pri meritvah izpustov merimo izpuste na viru npr. na dimniku ali na izstopu iz izpušne cevi iz motorja z notranjim zgorevanjem v avtomobilu. Vzorec za analizo izsesamo skozi odprtino ali cevko npr. v dimniku za analizo na kraju samem. Premične vire, npr. avtomobile, preizkušamo najbolje tako, da merimo izpuste, ko vozilo uporabljamo v prometnem toku.

Merjenje koncentracije delcev in plinov večinoma poteka z **optičnimi metodami**. Pogosto take metode imenujemo neposredne metode, saj z njimi neposredno izmerimo npr. koncentracijo plina. Če merimo koncentracijo istega plina kemično, je to posredno prek kemijske reakcije in tako metodo imenujemo posredna metoda.

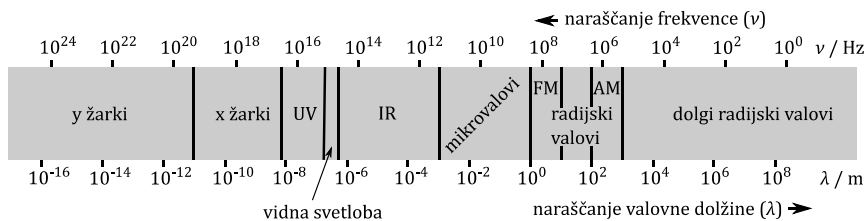
Optične metode imajo pred ostalimi metodami vrsto prednosti: so hitrejše, ne potrebujejo uporabe kemijskega laboratorija, v nekaterih primerih ne potrebujejo kalibracije itd. Kalibracija je npr. nujna pri meritvah koncentracije izpustov motorjev z notranjim zgorevanjem pri vozilih. Na sliki 24 je prikazan širši spekter elektromagnetnega valovanja, čeprav merilniki za delovanje uporabljajo večinoma zgolj ultravijolično, vidno in infrardečo svetlobo.

Optične metode merjenja delcev v plinih in koncentracije plinov delujejo na načelih absorpcije, sipanja in uklona. Ker lahko z vsemi naštetimi načeli merimo pri različnih valovnih dolžinah, nam porazdelitve merjenih spremenljivk po valovnih dolžinah ali razmerja merjenih spremenljivk po valovnih dolžinah pomagajo ločevati med različnimi plini.

Kljub vsemu ostaja merjenje števila delcev in koncentracij plinov zahtevno. Npr. sipanje svetlobe na delcih je odvisno od oblike delcev, zlepljanja ali urejanja delcev v skupine itd. Številni plini absorbirajo svetlobo pri različnih valovnih dolžinah, zato je težko ločevati med koncentracijami plinov, kadar merimo koncentracijo posameznega plina v zmesi plinov. Dodaten problem pri natančnem merjenju koncentracij plinov predstavlja tudi prisotnost vodne pare, ki ima zelo kompleksen spekter absorpcije. Poleg vodne pare imajo kompleksne spektre absorpcije svetlobe tudi številne druge molekule, ki so pogosto prisotne v merjenih plinih, kot to prikazuje slika 25.

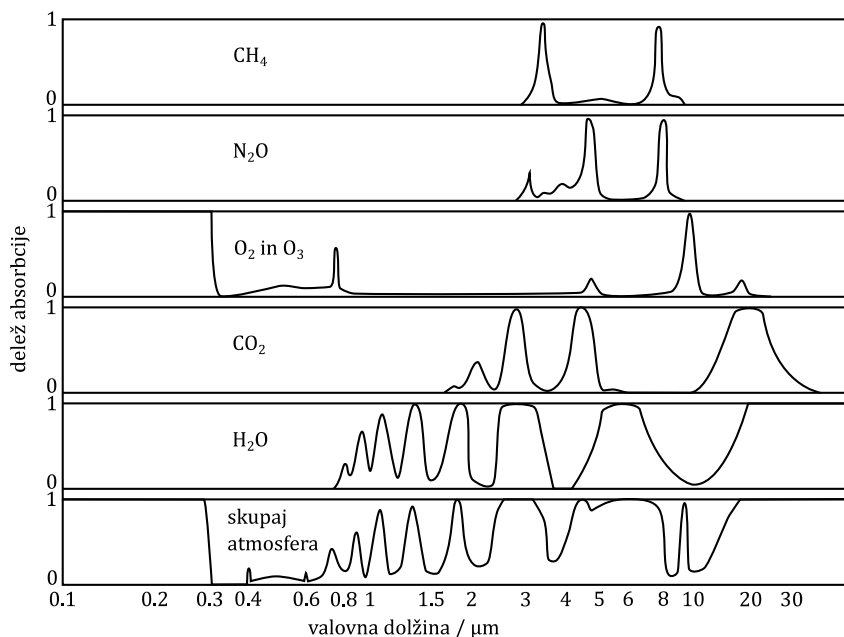
Spekter absorpcije svetlobe posameznega plina je odvisen od zgradbe molekule. Absorpcija poteče, ker se v molekuli plina spremeni dipolni moment, dipolni moment pa se lahko spremeni zaradi rotacijsko-vibracijsko-

elektronskih prehodov v vzbujena stanja molekul plina. Pri tem imajo rotacijska stanja manjšo, elektronska pa večjo energijo.



Slika 24: Spekter elektromagnetnega valovanja [povzeto po [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)]

Slika 25 prikazuje absorpcijo elektromagnetnega valovanja z različnimi molekulami plinov. Vidna svetloba je v področju, kjer je absorpcija majhna.



Slika 25: Absorpcija elektromagnetnega valovanja z različnimi molekulami plinov in skupaj v atmosferi (Howard, 1959 ter Goody in Robinson, 1951)

V nadaljevanju bomo obravnavali merilne postopke in opremo za merjenje delcev in plinov.

## 2.6 Merilni postopki za merjenje delcev v plinu

Merilni postopki in merilna oprema za merjenje količine delcev v plinu in masnega toka delcev v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem ter dimnih plinov termoelektrarn ali peči so naslednji:

- gravimetrična metoda,
- sejalna analiza,
- kaskadni impaktor,
- etalometer,
- nefelometer,
- analizator slik,
- analizator, ki deluje po postopku prostorskega filtriranja,
- laserski difraktometer in
- druge metode.

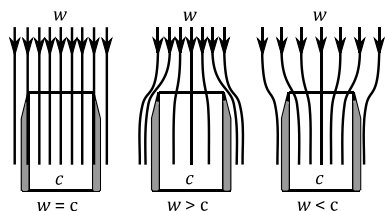
Pri merjenju delcev v plinu moramo biti zelo pozorni na način vzorčenja dimnih ali odpadnih plinov. Pri tem smo pogosto primorani uporabljati izokinetično metodo vzorčenja.

**Izokinetična metoda** vzorčenja je metoda, s katero zajemamo vzorce iz toka plina, dima, pare ali katerega koli drugega toka medija, če ta medij vsebuje delce (Hinds, 1999). Če je tok homogen, je vzorčenje enostavno, saj je tok povsod enak. To pa ni tako, če so v toku prisotni delci. Če so v toku prisotni delci, se koncentracija delcev pri vzorčevanju v bližini odjema ali znotraj vzorčevalne odprtine spremeni. Če je hitrost na mestu vzorčevanja (to je tik ob vzorčevalni odprtini) manjša, kot je hitrost tekočine (npr. izpušnih plinov v dimniku), potem nekateri delci, še posebej manjši delci, ne bodo vstopili v vzorčevalno odprtino. Podoben mejni primer je kaskadni impaktor, pri katerem je hitrost v odprtini za vzorčevanje enaka nič. Če je hitrost na mestu vzorčevanja večja, bo več delcev vstopilo v vzorčevalno odprtino, tudi v tem primeru večinoma majhni delci. V obeh primerih izmerimo napačne rezultate. Idealen primer je, če je v vzorčevalni odprtini enaka hitrost kot v okolici, npr. v dimniku. To se imenuje izokinetično vzorčenje (angl. *isokinetic sampling*).

Izokinetično vzorčenje se uporablja pri meritvi delcev in aerosolov v termoelektrarnah, pečeh, pralnikih, izpušnih ceveh avtomobilov itd. Uporaba izokinetične metode ni potrebna, če merimo zgolj koncentracijo plinov ali če merimo velikost delcev v toku, ne da bi merjeni plin izčrpavali iz pretočnega kanala (npr. pri analizatorjih, ki delujejo po postopku prostorskega filtriranja SFV). Pri meritvah števila delcev v atmosferi uporaba izokinetične metode ni smiselna in se večinoma ne uporablja.

Kako izvedemo izokinetično vzorčenje? Sistem za popolno izokinetično vzorčenje sestoji iz zaznavala, ki se ga vstavi v jašek in s katerim lahko travverziram (merimo v mreži točk) pravokotno na smer toka. Izokinetično zaznavalo ima vgrajeno zaznavalo za merjenje hitrosti (Pitotova cev ali podobno), zaznavalo za vzorčenje in zaznavalo za merjenje temperature.

Izokinetično zaznavalo vsebuje črpalko za krmiljenje prostorninskega toka skozi zaznavalo za vzorčenje. V prvem koraku izmerimo hitrost toka, pri čemer gostoto določimo na podlagi meritve temperature in poznavanja približne sestave medija. V drugem koraku s črpalko nastavimo ustrezen pretok skozi vzorčevalno odprtino izokinetičnega zaznavala. Vrh izokinetičnega zaznavala je prikazan na sliki 26.



Slika 26: Izokinetično vzorčenje v toku, ki vsebuje delce, levo načelo delovanja izokinetičnega vzorčenja in v sredini slika izokinetičnega zaznavala. Na levi sliki je izokinetična metoda prikazana na primeru  $w = c$ , to je povsem levo. Na sliki v sredini je vzorčevalni del izokinetičnega zaznavala steklen, del za merjenje hitrosti in del za merjenje temperature sta iz nerjavnega jekla. Zaznavalo je 'in stack', to pomeni, da je filter, skozi katerega teče plin, v dimniku. Desno: 'in stack' filter izokinetičnega zaznavala vsebuje mesto, kamor se namesti filter za analizo delcev.

Dodaten problem pri vzorčenju v dimnikih in pretočnih kanalih termoelektrarn je, da se koncentracija delcev in hitrost toka po preseku dimnika ali kanala spreminjata, zato ni dovolj, če merimo v zgolj eni točki po preseku ali morda zgolj na obodu dimnika. Pretočni kanali termoelektrarn so razmeroma kratki in veliki, zato se po prostoru koncentracija v kratkem času potovanja dimnega plina od npr. kotla do zaznavala ne more izenačiti. V ta namen je treba meriti v mreži točk in rezultate povprečiti.

### 2.6.1 Gravimetrična metoda

Z gravimetrično metodo merimo maso delcev v okoliškem zraku ali pa masni tok delcev v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem ter v dimnih plinih termoelektrarn.

Za meritve okoliškega zraka se uporablja gravimetrična metoda z mnogoprostorninskimi vzorčevalniki zraka (angl. *high volume sampler*). Mnogoprostorninski vzorčevalnik zraka je naprava, ki zajame veliko količino zunanjega zraka. Deluje tako, da skozi filter prečrpava velike količine zraka, pri čemer se delci ujamejo na filter. Mnogoprostorninski vzorčevalnik zraka je prikazan na sliki 27. Mnogoprostorninski vzorčevalnik omogoča določanje mase delcev na filtru s tehtanjem in njihovo kemično analizo.

Z zajemom velike količine zraka se poveča masa ujetih delcev in lahko zaznamo manjše koncentracije onesnažil v vzorcu. V enem dnevu mnogoprostorninski vzorčevalniki prečrpajo približno 2000 m<sup>3</sup> zraka. Poleg tega se delci lovijo na filter s premerom (npr. 150 mm), zaradi česar je masa vzorca velika in kasneje v laboratoriju lahko uporabimo vzorec za več analiz število različnih kemijskih analiz delcev. Z mnogoprostorninskimi vzorčevalniki vzorčimo delce PM<sub>10</sub> v zunanjem zraku na enem merilnem mestu vsak dan vse dni v letu. Meritev traja en dan, to pa pomeni, da je časovna ločljivost meritve en dan. Filtre analiziramo gravimetrično, stehamo jih pred začetkom in po koncu meritve. Masa delcev je razlika mase filtra pred meritvijo in po njej. Tok zraka skozi filter se meri s prostorninskim merilnikom toka. Ker se med delovanjem na filtru naberejo delci, se filter zamaže, njegov koeficient upornosti se poveča, zaradi česar se zmanjša prostorninski tok skozi filter. Prostorninski tok se običajno izmeri na začetku in na koncu vzorčevanja in se vrednosti prostorninskega toka povpreči.

Na omenjeni način merimo različne vrste delcev, saj se mnogoprostorninske vzorčevalnike lahko opremi z različnimi filtri. Z različnimi kemijskimi analizami lahko po meritvi npr. delce PM<sub>10</sub>, ki se ujamejo na filter, v laboratoriju analiziramo na različne parametre, med njimi so: težke kovine, policiklični aromatski ogljikovodiki (angl. *polycyclic aromatic hydrocarbon PAH*), ioni, elementarni in organski ogljik, levoglukozan itd.

Z gravimetrično metodo merimo tudi masni tok delcev v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem. Meritve se prav tako opravljajo s tehtanjem, vendar je tu način zajemanja vzorca drugačen. Takoj na odjemu vzorec redčimo s filtriranim zrakom HEPA, nato ga po greti liniji vodimo do ciklona v analizatorju. Masni tok redčenega vzorca je zato nadzorovan. Za merjenje masnega toka delcev v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem se kot prva stopnja uporablja ciklonski izločevalnik. Le-ta odstrani večino delcev, ki so večji od 10 μm. To je potrebno, da se zmanjša obremenitev papirnatega filtra. Nato potujejo izpušni plini skozi papirnati filter, kjer se delci vzorčijo. Iz razlike mase filtra pred vzorčenjem in po njem določimo maso delcev v izpušnih plinih. Ker je delcev lahko zelo veliko, se izpušni plini redčijo na mestu zajema, to je v izpušni cevi motorja.

Pomembna je izbira filtrnega papirja. Navadni papirji vpijajo NO<sub>2</sub>, kar tudi poveča maso. Zato damo v filtrni prostor dva papirja, zaporedno enega za drugim. Prvi zadrži delce in vpije NO<sub>2</sub>, drugi pa vpije samo NO<sub>2</sub>. Od mase



delcev prvega papirja odštejemo maso drugega filtra z vpitim  $\text{NO}_2$ . Lahko pa uporabimo teflonske precej dražje filtre, ki ne vpijajo  $\text{NO}_2$ .

Redčenje je običajno proporcionalno prostorninskemu toku izpušnih plinov. Redčimo jih z zrakom, filtriranim s filtrom HEPA. Redčenje je intenzivnejše pri manjšem masnem toku plinov in manj intenzivno pri večjem masnem toku plinov. S tem v motornih vozilih damo večjo težo večjim masnim tokovom izpušnih plinov, ki ustrezajo močnejše obremenjenemu motorju. Pri močnejše obremenjenem motorju je izpustov več kot pri manj obremenjenem motorju.



Slika 27: Naprave za merjenje delcev v zraku v okolju in v plinih, levo: mnogoprostorninski vzorčevalnik zraka, v sredini levo: kaskadni impaktor, v sredini desno: sejalnik, desno: merilnik masnega toka saj v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem AVL MSSplus [[www.hi-q.net](http://www.hi-q.net), [www.arelabs.com](http://www.arelabs.com), [www.retsch.com](http://www.retsch.com) in [www.avl.com](http://www.avl.com)].

## 2.6.2 Sejalna analiza

Nekoliko drugačna oblika gravimetrične metode je sejalna analiza. Sejalna analiza je postopek, s katerim se s sejalnikom določi porazdelitev velikosti delcev v vzorcu. Sejalnik sestavlja več sit z različno gradacijo oziroma velikostjo luknjic. Sita so pritrjena na stresalnik, ki je nameščen pod siti. V energetskega strojništvu se postopek uporablja npr. za analizo porazdelitve velikosti delcev premogovega prahu in pepela. Metoda je pogosto uporabljena predvsem v gradbeništvu. Ker je metoda preprosta, je ena izmed najpogosteje uporabljenih metod za določevanje porazdelitve velikosti delcev. Sejalnik je prikazan na sliki 27.

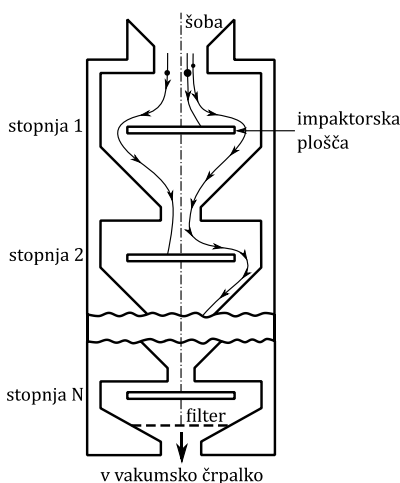
Postopek sejalne analize poteka na naslednji način. Sita in dno naprave za sejnalno analizo pred uporabo stehtamo. Na stresalnik namestimo dno, nanj pa nato zaporedoma nameščamo sita. To naredimo tako, da je najredkejša sito na vrhu, nato pa mu sledijo vse gostejša sita, na dnu pa je najbolj fino sito. Na vrhnje sito stresemo izbrano stehtano količino npr. premogovega prahu. Nato napravo pokrijemo s pokrovom, pričvrstimo sita z zatičem ali navojno palico in sejalnik vključimo, da deluje pri izbrani amplitudi. Po končanem sejanju

vsako sito s pepelom določene frakcije ponovno stehtamo. Iz izmerjenih rezultatov lahko izračunamo srednji premer delcev v vzorcu glede na težo posamezne frakcije.

Sejalna analiza se izvaja v laboratoriju, zanjo je potreben velik vzorec. Zato metoda ni primerna za vgradnjo in neprekinjeno spremljanje procesov.

### 2.6.3 Kaskadni impaktor

Kaskadni impaktor je naprava, ki delce v plinu loči po velikosti v posameznih stopnjah kaskadnega impaktorja. Kaskadni impaktor je prikazan na sliki 27. Vsako stopnjo sestavljata šoba in filtrna plošča. Pri tem kaskadni impaktor uporablja načelo ločevanja z inercijo po velikosti. Kasneje se masa posamezne frakcije določi s tehtanjem, to je gravimetrično. Shema delovanja kaskadnega impaktorja je prikazana na sliki 28.



Slika 28: Shema delovanja kaskadnega impaktorja. Filtrne plošče so nameščene tako, da ležijo plinu na poti in se jim mora plin izogniti. Če so delci zadosti majhni, sledijo vzorcu plina, če pa so veliki, plinu ne morejo slediti in se zaletijo v filtrno ploščo. Zaporedne filtrne plošče so nameščene tako, da se oddaljenosti do šob postopoma zmanjšujejo.

Ko vzorec plina vstopi v kaskadni impaktor, nosi s seboj delce. Filtrne plošče so nameščene tako, da ležijo pod plinskimi šobami plinu na poti in plin se mora filtrnim ploščam izogniti. Če so delci zadosti majhni in imajo majhno vztrajnost, sledijo plinu, če pa so veliki, plinu ne morejo slediti in se zaletijo v filtrno ploščo. Zaporedne filtrne plošče so nameščene tako, da se oddaljenosti filtrnih plošč od šob zmanjšujejo. Zaradi tega se na prvi filtrni plošči naberejo najtežji delci, na zadnji filtrni plošči pa najlažji delci.

## 2.6.4 Etalometer

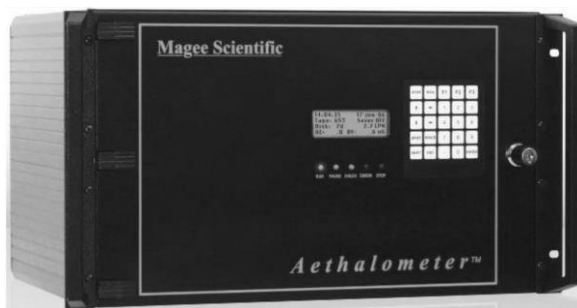
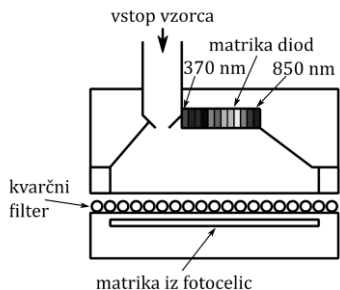
Etalometer je naprava za merjenje aerosoliziranega črnega ogljika, ki se v okolju kaže kot dim ali meglica. Primer vgradnega etalometra za potrebe neprekinjenega spremljanja procesov je prikazan na sliki 29.

Aerosoliziran črni ogljik je primarno onesnažilo zraka, neposredno povezano s človeškimi viri onesnaževanja, ter ga lahko merimo z natančno časovno ločljivostjo. To je koristno, saj imajo lahko različni viri onesnaževanja različne časovne poteke in lahko potek koncentracij črnega ogljika uporabimo za vrednotenje teh virov, npr. za spremljanje učinkov omejevanja prometa ali za ločevanje med različnimi viri. Še več podatkov lahko o virih onesnaževanja ugotovimo, če izmerimo, kako se absorpcija aerosolov spreminja z valovno dolžino svetlobe in sčasoma. Meritve absorpcije aerosolov pri različnih valovnih dolžinah z etalometri nam tako omogočajo ločevanje med različnimi viri onesnaženja zraka.

V Sloveniji se proizvajajo etalometri Magee Scientific. Shema delovanja etalometra je prikazana na sliki 29. Vir svetlobe v teh etalometrih so svetleče diode z značilnimi valovnimi dolžinami 370 nm, 470 nm, 520 nm, 590 nm, 660 nm, 880 nm and 950 nm. Meritve v tako širokem spektru omogočajo vrednotenje virov onesnaženja z meritvami od ultravijolične svetlobe do infrardeče. Plin se vzorči skozi neselektiven vzorčevalni vhod ali pa iz vzorčevalnega sistema za meritve plinov na merilnih postajah državne mreže. Plin se pretaka skozi kvarčni filterski trak, na katerem se nabirajo aerosoli. Nad filtrom je vir svetlobe, pod njim pa zaznavala, s katerimi merimo padec intenzitete svetlobe zaradi absorpcije v nabranih aerosolih. Koncentracijo črnega ogljika izračuna etalometer iz hitrosti spreminjanja slabljenja infrardeče svetlobe. Slabljenje se določi kot naravni logaritem razmerja jakosti svetlobe na zaznavalu pod referenčnim delom traku in pod tistim delom, kjer vzorčimo aerosole. Slabljenje se določi glede na referenčni čist del traku, skozi katerega plin ne teče in se zato na njem aerosoli ne nabirajo.

Na filtru se nabirajo ogljični aerosoli, ki absorbirajo svetlobo, kar povzroči padanje prepustnosti filtra za svetlobo in rast slabljenja. Prostorninski tok plina skozi filter se meri z merilnikom prostorninskega toka plina, s čimer se krmili črpalka za plin. Etalometer meri koncentracije vsakih nekaj minut. Iz meritev sprememb prepustnosti filtra se izračuna sprememba atenuacije in iz te, z uporabo znanega absorpcijskega preseka, koncentracijo črnega ogljika v merjenem plinu. Ko se na filtru nabere dovolj aerosolov, da slabljenje naraste do nastavljene vrednosti, se filterski trak premakne in meritve se začnejo na svežem delu filtra.

Nekateri znanstveniki dvomijo v zmožnosti etalometrov, da so sposobni natančno razlikovati ali sploh razlikovati različne vire onesnaženja.



Slika 29: Etalometer, levo: shema delovanja etalometra, desno: etalometer Magee Scientific

## 2.6.5 Nefelometer

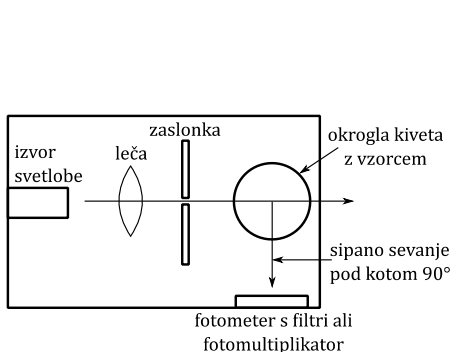
Nefelometer je merilna naprava za merjenje neprosojnosti, prosojnosti oziroma motnosti tekočin. Nefelometri se uporabljajo za kapljevine in pline. Neprosojnost oziroma motnost je lastnost tekočin, ki opisuje prisotnost trdnih delcev, suspendiranih v plinu ali raztopini. Nefelometer se imenuje tudi turbidimeter, če se uporablja za merjenje suspendiranih trdnih delcev v vodi.

Nefelometrija je metoda, s katero se določa koncentracija trdnih delcev, vrednoti pa se jih za znane delce. To pomeni, da se nefelometre kalibrira za znane vrste delcev. Metoda temelji na elastičnem sipanju elektromagnetnega sevanja na suspendiranih trdnih delcih v plinu in po enakem postopku tudi v vodi. Nefelometer meri zmanjšanje jakosti prepuščenega sevanja ali jakost na stran sipanja sevanja kot posledica potovanja svetlobe skozi trdne delce.

Shema delovanja nefelometra je prikazana na sliki 30. Sipanje elektromagnetnega sevanja na suspendiranih trdnih delcih se imenuje tudi Tyndallov pojav. Sipanje je lahko Rayleighovo, Debyejevo ali Miejevo sevanje, odvisno od velikosti delcev. Če je velikost delcev reda velikosti valovne dolžine vpadnega sevanja ali manjša, se bo sevanje razpršilo, če pa je večja, se bo sevanje odbilo. Pri Miejevem sipanju se npr. svetloba sipa pretežno naprej, sicer pa tudi vstran in nazaj. Večji kot so delci v primerjavi z valovno dolžino svetlobe, več svetlobe se bo sipalo naprej. Ta lastnost, da se sevanje za različne delce sipa na različne načine, onemogoča splošno uporabo nefelometrov in je zato potrebna kalibracija za znane vrste delcev.

Nefelometri so zelo podobni spektrometrom, lahko pa se za meritve neprosojnosti uporabljajo tudi spektrofotometri ali celo kolorimetri. Preprosti ročni merilniki črnosti izpušnih plinov (kar imenujemo tudi sajenje) dizelskih motorjev ali prahu večinoma delujejo na spektrofotometričnem ali kolorimetričnem načelu, merijo intenziteto prepuščene svetlobe skozi merjeni plin.

Enoti, v katerih se prikazuje motnost, sta NTU (nefelometrične turbidimetrične enote, angl. *Nephelometric Turbidity Units*) ali FTU (formazinske turbidimetrične enote, angl. *Formazine Turbidity Units*). Ker je odziv nefelometrov odvisen od velikosti in celo barve merjenih delcev, je bil za kalibracijo nefelometrov izbran stabilen umetni material hidrazin sulfat, ki se ga pri kalibraciji uporablja kot standard. Hidrazin sulfat je močna rakotvorna in toksična snov in je zato pri rokovanju z njim potrebna velika previdnost. V primeru zaužitve, vdihavanja ali absorpcije skozi kožo je hidrazin sulfat lahko smrten.



Slika 30: Nefelometer, levo: shema delovanja, s številkami so označeni sestavni deli nefelometra: 1. izvor svetlobe, 2. leča, 3. zaslonka, 4. okrogla kiveta z vzorcem, 5. fotometer s filtri ali fotomultiplikator, 6. sipano sevanje pod kotom 90°. Desno: izvedba, prenosni merilnik, model Sensidyne Aerosol Monitor [www.sensidyne.com].

Nefelometri so lahko izvedeni kot laboratorijska, vgradna oprema za monitoring ali prenosna oprema za meritve na terenu.

Merjenje **prosojnosti** ali **neprosojnosti** (ang. *opacity*) izpušnih plinov motorjev z notranjim zgorevanjem se izvaja na podoben način kot nefelometrija. Take merilnike imenujemo tudi merilnike črnosti izpušnih plinov (angl. *soot measurement*). Sage so iz črnega ogljika. Stari merilniki so bili prirejene ročne črpalke, s katerimi se je skozi filtrni papir ročno načrpal izpušni plin. Kasneje se je sivinski odtенок filtrnega papirja subjektivno primerjal s priloženo na papirju natisnjeno skalo. Na določen način je tak postopek v resnici bolj podoben etalometru kot merilniku neprosojnosti, je pa res, da uporablja le en vir svetlobe. Danes se večinoma uporabljajo električni merilniki, saj so sposobni meriti kvantitativno. Cenejši elektronski merilniki merijo delež prepuščene svetlobe v ravni cevi (taki se uporabljajo pri tehničnih pregledih motornih vozil), dražji in novejši pa imajo kot pravi nefelometri sprejemnik, postavljen pod kotom glede na svetlobni žarek izvora

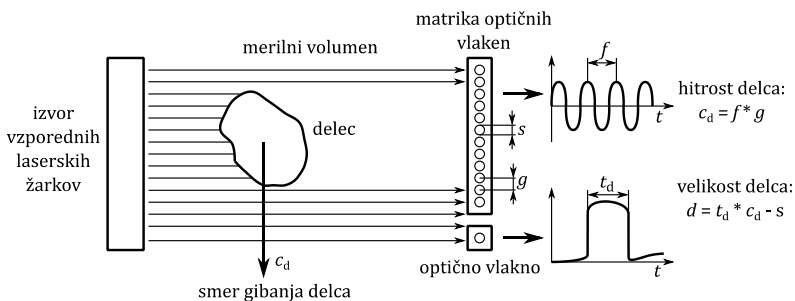
in merijo sipano svetlobo. Dražji merilniki črnosti izpušnih plinov pa lahko delujejo na popolnoma drugačnem načelu, npr. merilnik podjetja AVL (model MSS Plus) deluje na fotoakustičnem načelu. Taki merilniki merijo koncentracijo saj in ne neprosojnosti, med neprosojnostjo in koncentracijo saj ni nujno dobre korelacije, predvsem za različna goriva.

### **2.6.6. Analizator slik**

Analizator slik je naprava, ki omogoča posnemanje slik delcev in njihovo analizo: merjenje premerov in oblike posameznih delcev in določitev histograma velikosti delcev. Metoda temelji na uporabi mikroskopov. Z mikroskopom, ki ima vgrajen fotoaparatus ali kamero, posnamemo sliko vzorca. Sliko nato upragovimo (ovrednotimo svetlost ali barvo glede na vrednost praga), segmentiramo in izmerimo premer objektov na sliki. Pri mikroskopiranju je globinska ostrina slik majhna, zato mora biti sposoben merilni sistem izločiti delce na sliki, ki niso v fokusu in na sliki niso ostri. To je velika omejitev pri delovanju merilnega sistema. Če so v toku prisotni zelo veliki delci, jih je treba iz vzorcev odstraniti, preden izvedemo vzorčevanje. Merilna metoda je omejena z ločljivostjo optičnih mikroskopov, ki znaša v najboljšem primeru  $0,2 \mu\text{m}$ . Analiza slik je lahko statična ali dinamična. V primeru dinamičnega analizatorja slik lahko izmerimo tudi hitrosti posameznih delcev. Analizator slik je mogoče uporabiti ob ustrezni opreми in pripravi na mestu nastanka plinov, lahko pa tudi kasneje v laboratoriju. Analizatorji slik se uporabljajo za merjenje delcev v plinih in kapljevinah.

### **2.6.7 Analizatorji, ki delujejo po postopku prostorskega filtriranja**

Posebna izvedba analizatorjev slike so analizatorji, ki delujejo po postopku prostorskega filtriranja (angl. *SFV Spatial Filtering Velocimetry* ali angl. *SFT Spatial Filtering Technique*). Shema delovanja je prikazana na sliki 31. Dejansko tak sistem ne uporablja video kamere, temveč prostorsko mrežo fotodiod. Za določitev velikosti posameznega delca presvetlimo merjeno prostornino s kratkimi pulzi svetlobe. Delci zastrejo svetlobo, kot je to prikazano na sliki 31. Večji delci s svojo senco zastirajo svetlobo na matriki optičnih vlaken dalj časa, manjši delci pa zastirajo svetlobo krajši čas in na manjšem delu matrike optičnih vlaken (slika 31). Metoda omogoča tudi določitev hitrosti. V tem primeru presvetlimo merjeno prostornino z vlakom pulzov, pri čemer deluje naprava podobno kot laserski Dopplerjev anemometer. Metoda analize slik SFV/SFT deluje v plinih in kapljevinah in se jo lahko uporablja laboratorijsko ali kot vgradni merilnik za spremljanje procesa. Območje meritve velikosti delcev je od 50 do  $6000 \mu\text{m}$ .



Slika 31: Shema merilnika, ki deluje po postopku laserskega prostorskega filtriranja.

## 2.6.8 Laserski difraktometer

Meritev premera delcev v plinu z laserskim difraktometrom temelji na Fraunhoferjevi teoriji uklona. V skladu s Fraunhoferjevo teorijo uklona sta kot uklona laserskega žarka in velikost delca obratno sorazmerna. To pomeni, da se kot sipanega laserskega žarka povečuje, ko se velikost delca manjša. Načelo delovanja laserskega difraktometra je prikazano na sliki 32. Izvor svetlobe, večinoma He-Ne laser, prek leč z usmerjenim curkom osvetljuje merjeno prostornino, v katerega vstavimo kiveto z vzorcem. Prepuščeno in sipano valovanje zbere leča, ki projicira sipano svetlobo na zaznavalo CCD. Zaznavalo je postavljeno tako, da nanj prepuščeni žarek ne sveti. Kot, za katerega se je uklonila sipana svetloba, je merilo za velikost delcev.

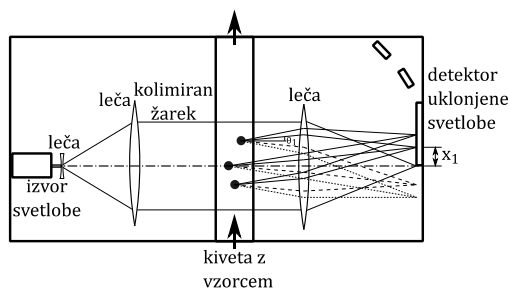
Območje delovanja laserskih difraktometrov je po premeru merjenih delcev od 0,01 do 3500  $\mu\text{m}$ .

Ustreznost merjenja premera delcev z lasersko difrakcijo je vprašljiva v naslednjih dveh primerih, če imajo merjeni delci ostre robove in če se v turbulentnem toku urejeno premikajo. V primeru merjenja premera delcev, ki imajo ostre robove in niso sferični, je rezultat merjenja različen v primerjavi z metodo analizatorja slik. To je zato, ker Fraunhoferjeva teorija in Miejeva teorija veljata samo za sferične delce, ostali delci pa imajo bolj difuzen vzorec sipanja.

Težave pri merjenju premerov nesferičnih delcev ima poleg laserske difraktometrije še ena optična metoda merjenja premera delcev, ki temelji na dinamičnem sipanju svetlobe (angl. *dynamic light scattering*), ki jo na tem mestu zgolj omenjamo, je pa optična metoda merjenja premera delcev, ki temelji na dinamičnem sipanju svetlobe, namenjena za merjenje premerov delcev od manj kot 1 nm do približno 10  $\mu\text{m}$ .

Laserski difraktometri so zaradi zapletenosti vedno izvedeni kot laboratorijski merilniki. To pomeni, da je treba vzorce plina pred merjenjem odvzeti in prnesti v laboratorij.

Laserski difraktometri se uporabljajo tudi za merjenje delcev v kapljevinah.



Slika 32: Laserski difraktometer, levo: shema delovanja, desno: izvedba, vrste Malvern Mastersizer 3000E [www.malvern.com].

## 2.6.9 Druge merilne metode za merjenje delcev

Poleg zgoraj navedenih metod poznamo še nekaj drugih, ki se uporabljajo predvsem za analiziranje delovanja motorjev z notranjim zgorevanjem. Te metode merjenja delcev so difuzijsko elektrostatično nabijanje delcev (angl. *diffusion charging system DCS*), fotoakustična metoda, ionizacija itd.

Merilniki, ki delujejo na podlagi metode difuzijskega elektrostatičnega nabijanja delcev DCS, so namenjeni merjenju delcev v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem. Merilniki vsebujejo komoro, kjer se delci elektrostatično nabijejo. To se izvede s postopkom ionizacije vzorca. V tem primeru del izpušnih plinov ali čist zrak iz okolice ioniziramo pri visoki napetosti več kilovoltov. Ionizirani plin nato zmešamo z vzorcem in delci v vzorcu se elektrostatično nabijejo. Vzorec z nabitimi delci nato potuje proti pozitivno in negativno nabitim ploščam merilnika in nabiti delci na ploščah oddajo naboj. Merilnik toka izmeri električni tok prek nabitih plošč merilnika. Take merilnike prodajata npr. podjetji Horiba in Semtech, merilnike pa izdeluje npr. podjetje TSI.

Merilniki, ki delujejo s fotoakustično metodo z laserskim žarkom, vzbujajo saje, da začnejo vibrirati, nato pa z akustičnim zaznavalom izmerijo akustični odziv, ki je posledica tresenja vzbujenih saj. Vzbujanje je modulirano, tako da se delci saj periodično grejejo in hladijo. Take merilnike izdeluje npr. podjetje AVL. Taki merilniki omogočajo dinamično analizo črnosti izpušnih plinov motorja in manjšo interferenco z drugimi komponentami.



V tem in prejšnjih podpoglavjih smo opisali več metod, ki se uporabljajo za merjenje masnega toka in velikosti delcev. Pri uporabi navedenih metod je za merjenje izpuštov motorjev z notranjim zgorevanjem tehten premislek. Tu je treba poudariti, da čeprav metode merjenja pravilno izmerijo masni tok delcev, izmerjen masni tok delcev morda ne da prave ocene za škodljivost in nevarnost delcev. Merjenje masnega toka delcev v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem zato morda ni najprimernejša metoda merjenja. Razlog je v tem, da zelo majhni delci premera nekaj 10 nm prodrejo globlje v dihalni trakt in so za zdravje ljudi verjetno bolj škodljivi kot večji delci premera od 0,5 do 10  $\mu\text{m}$  PM<sub>10</sub>. Zato se bodo zagotovo v prihodnosti za merjenje delcev v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem uporabljale metode, ki bodo omogočale merjenje števila delcev. Za zdaj evropska zakonodaja o izpušnih plinih motornih vozil tega še ne predpisuje.

## 2.7 Merilni postopki za merjenje koncentracije plinov

Koncentracije plinov v okolju in na izvoru onesnaževanja (dimni plini termoelektrarn ali peči in izpušni plini motorjev z notranjim zgorevanjem) merimo z različnimi vrstami analizatorjev plinov. V grobem jih ločimo glede na vrsto meritve ali pa glede na čas uporabe (neprekinjeni ali občasni). Glede na vrsto meritve ločimo naslednje metode:

- ultravijolična fluorescenca (UVF),
- kemiluminiscenca (CLD),
- infrardeča spektroskopija (NDIR),
- ultravijolična spektroskopija (NDUV),
- plamensko ionizacijska metoda (FID),
- elektrokemične metode,
- polprevodniško zaznavalo,
- paramagnetna metoda,
- merjenje količine preostalega kisika z lambda zaznavalom in
- difuzivni vzorčevalniki.

V poglavju o merjenju delcev smo poudarili pomen sistema za zajemanje vzorca delcev in omenili izokinetično metodo vzorčenja. Tudi pri vzorčenju plinov je treba poudariti zahteve za pravilno odvzemanje plinov in transport do analizatorja plinov. Dimni plini so večinoma zelo vroči, medtem ko lahko vstopijo v analizator plinov v večini primerov pri približno sobni temperaturi. Zaradi tega jih je treba pred merjenjem ohladiti, pri čemer pa je treba upoštevati različne težave in omejitve. Zato izpušne pline vodimo po greti liniji na več kot 190 °C. Hlajenje npr. povzroči, da merjeni plini ali drugi plini v zmesi merjenega vzorca kondenzirajo. Zato se po potrebi merjene pline redči do meje, ko nobena komponenta ob ohlajanju ne kondenzira. Kot alternativo lahko določene problematične pline odstranimo iz merjenega plina, npr. vodo s sušenjem. Pomembno je tudi, da med transportom do analizatorja plinov in pri znižanju temperature v njih ne poteče nobena kemična reakcija. Zato se po

potrebi uporabljajo teflonske cevi in nerjavno jeklo. Po drugi strani pa pri meritvi plinov pogosto ni pomembno, če se pojavi v cevi kondenzacija ali odlaganje delcev, čemur se moramo izogniti pri vzorčenju za potrebe merjenja masnega toka ali velikosti delcev. Kondenzirano vodo odstranimo z lovilnimi posodicami. Nekateri analizatorji koncentracije plinov zahtevajo, da se iz merjenega plina pred meritvijo odstranijo vsi delci in voda (npr. nekateri analizatorji plinov, ki delujejo po postopku infrardeče spektroskopije NDIR), samo voda, ker reagira z merjenim plinom (npr. analizatorji plinov  $\text{NO}_x$  in  $\text{SO}_x$  uporabljajo zelo hitre Peltierjeve člene), nekateri analizatorji pa lahko merijo tudi koncentracijo plinov pri zelo visoki temperaturi (npr. plamensko ionizacijski analizatorji plinov FID, cirkonijeva sonda). Navedene trditve ne veljajo univerzalno, saj so odvisne od koncentracij, npr. reagiranje vode z merjenimi plini ni problem pri koncentracijah, ki se pojavljajo v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem.

Pri meritvah je potrebna tudi temperaturna stabilizacija merilne opreme. Za temperaturno stabilizacijo merilno opremo pred uporabo ogrevamo uro ali več.

Glede na čas uporabe ločimo kontinuirane in občasne meritve. V nadaljevanju bomo predstavili glavne merilne postopke za merjenje koncentracije plinov.

### **2.7.1 Merjenje koncentracije plinov z metodo ultravijolične fluorescence (UVF)**

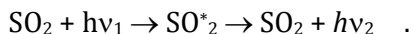
Merjenje koncentracije plinov z metodo ultravijolične fluorescence (angl. *ultraviolet fluorescence*) je neprekinjena metoda merjenja. Uporablja se večinoma za merjenje koncentracije žveplovega dioksida  $\text{SO}_2$  v okoliškem zraku ali v dimnih plinih, lahko pa se z metodo merijo tudi koncentracije naslednjih plinov: dušikovega oksida  $\text{NO}$ , dušikovega dioksida  $\text{NO}_2$ , in vodikovega sulfida  $\text{H}_2\text{S}$ . Kadar analizator meri dva ali več plinov, ima vgrajenih več merilnih cevi (imenovanih tudi kivete) ali pa filtre ustreznih valovnih dolžin.

Analizatorji, ki merijo fluorescenco, se imenujejo fluorometri. Fluorometri se uporabljajo za različne namene, ne samo za merjenje koncentracije plinov. Fluorometre se npr. uporablja za merjenje količine klorofila v rastlinah.

Metoda temelji na fluorescenci žveplovega dioksida in vseh ostalih prej naštetih UV-aktivnih plinih v merjenem plinu, ki ga v merilni celici osvetlimo z ultravijolično svetlobo. Shema merjenja koncentracije plinov z metodo ultravijolične fluorescence je prikazana na sliki 33. Izsevana fluorescirana svetloba je tudi v ultravijoličnem področju, vendar pri daljših valovnih dolžinah kot svetloba, ki fluorescenco vzbuja. Najprimernejši interval valovne dolžine vzbujevalne svetlobe je od 190 do 230 nm, meritev fluorescence pa poteka v širokem pasu okrog približno 320 nm. V intervalu valovnih dolžin od 190 do 230 nm žveplov dioksid absorbira svetlobo, ne da bi prišlo do dušenja s plinom ali drugimi molekulami v onesnaženem plinu. Za merjenje se

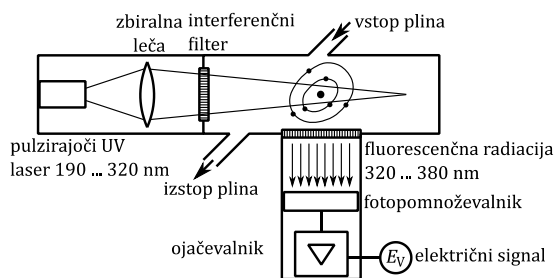
uporablja optični filter in UV-fotocelica, ki je običajno nameščena pravokotno na vzbujevalni snop svetlobe. Svetlobo za vzbujanje lahko zagotovimo npr. s cinkovo sijalko.

Postopek lahko simbolno zapišemo na naslednji način



S  $\text{SO}_2^*$  označujemo molekule  $\text{SO}_2$  v vzbujenem stanju. S  $h\nu$  označujemo, da se je izseval foton s frekvenco  $\nu$  in energijo  $h\nu$ .

Naveden interval vzbujevalnih valovnih dolžin od 190 do 230 nm ne omejuje uporabe pri nekoliko drugačnih valovnih dolžinah. Ostale spojine lahko prav tako fluorescirajo pri podobnih valovnih dolžinah, ali pa dušijo svetlobo pri valovni dolžini, s katero merjena spojina fluorescira. Na splošno velja, da merilna metoda zahteva, da iz merjenega vzorca plina odstranimo različne ostale spojine oz. pline, ker motijo meritve na dva načina. Najbolj znan vir motenj je prisotnost spojin, kot so aromatski ogljikovodiki, vodna para, kisik, delci in dušikov oksid NO. Pri meritvah okoliškega zraka, kjer so koncentracije vodne pare nizke, vodna para ne predstavlja problemov pri meritvi. Pri meritvah plinov iz kurilnih naprav pa je lahko koncentracija vodne pare zelo visoka, zato je pred meritvijo treba iz vzorca odstraniti vso vodno paro. Delce iz vzorca odstranimo s filtrom. Policiklične aromatske ogljikovodike odstranimo s pralnikom. Pralniki lahko delujejo pri sobni ali povišani temperaturi.



Slika 33: Merjenje koncentracije plinov z metodo ultravijolične fluorescence

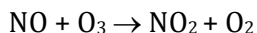
Vpliv prisotnega kisika in vodne pare večina sodobnih analizatorjev plinov zmanjša na najmanjšo možno mero tako, da meri pri različnih valovnih dolžinah. Z razmerjem izmerjenih vrednosti pri različnih valovnih dolžinah analizator plinov oceni vsebnost snovi, ki fluorescirajo pri ustreznih valovnih dolžinah in pa tistih, ki fluorescenco dušijo. Te vrednosti nato analizatorji plinov upoštevajo pri določitvi koncentracije merjenega plina.

Analizator plinov moramo pred vsako meritvijo kalibrirati s certificiranim testnim plinom. Za dovajanje testnega plina so analizatorji opremljeni s priključki za kalibracijo. Pri nekaterih analizatorjih je to izvedeno izmenično z meritvijo, nekateri pa imajo dve kivetki in dve zaznavali, v tem primeru poteka kalibracija hkrati z meritvijo.

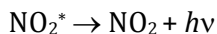
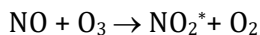
### 2.7.2 Merjenje koncentracije plinov s kemiluminiscenčno metodo (CLD)

Prav tako kot prej navedena metoda ultravijolične fluorescence za merjenje SO<sub>2</sub> je tudi merjenje koncentracije NO, NO<sub>x</sub> in NH<sub>3</sub> s kemiluminiscenčno metodo neprekinjena metoda. Koncentracije NO in NO<sub>x</sub> se običajno merijo s kemiluminiscenčno metodo (*CLD, ang. chemiluminescence detector*). Kemiluminiscenčna metoda za merjenje koncentracije NO in NO<sub>x</sub> se uporablja predvsem zato, ker je zelo občutljiva in ker ne prihaja do večjih motenj zaradi prisotnosti drugih plinov. Postopek kemiluminiscenčne metode merjenja koncentracij plinov je prikazan na sliki 34.

Načelo kemiluminiscence je naslednje. Molekula dušikovega oksida NO je sorazmerno nestabilna molekula. Ko vzorec plina, ki ga merimo, zmešamo z ozonom O<sub>3</sub>, se dušikov oksid NO oksidira in pretvori v dušikov dioksid NO<sub>2</sub>. Analizatorji imajo zato vgrajen generator ozona.

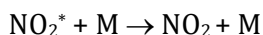


Del dušikovega dioksida NO<sub>2</sub>, ki nastane, je v vzbujenem stanju, kar pomeni, da je njegova energija večja kot normalno. Vzbujene molekule NO<sub>2</sub> sproščajo energijo kot svetlobo, ko se vračajo v osnovno stanje.

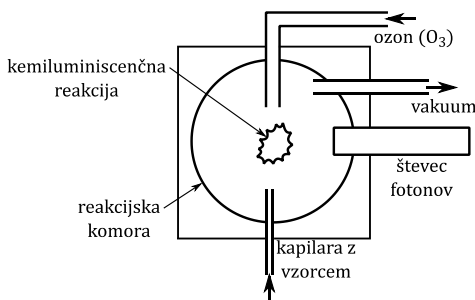


Z NO<sub>2</sub><sup>\*</sup> označujemo molekule dušikovega dioksida NO<sub>2</sub> v vzbujenem stanju. Pojav, da vzbujene molekule NO<sub>2</sub><sup>\*</sup> prehajajo v osnovno stanje z izsevanjem fotona, se imenuje kemiluminiscenca. Če je količina ozona O<sub>3</sub> dovolj velika, da se vzbudijo vse molekule NO<sub>2</sub><sup>\*</sup>, je jakost izsevane svetlobe sorazmerna količini molekul dušikovega oksida NO pred reakcijo. Zato je možno koncentracijo dušikovega oksida NO določiti z merjenjem izsevane svetlobe.

Pri zgornji enačbi prihaja do motenj zaradi prisotnosti drugih plinov, kot sta npr. ogljikov dioksid CO<sub>2</sub> in voda. Nekaj izmed vzbujenih molekul dušikovega dioksida NO<sub>2</sub> izgubi energijo s trkom z drugimi molekulami, še preden preidejo v osnovno stanje z izsevanjem fotona. V tem primeru se dušikov dioksid NO<sub>2</sub> vrne v osnovno stanje, toda se ne pojavi kemiluminiscenca.

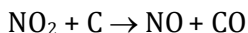


Z M označujemo druge molekule. Verjetnost za izgubo energije na zgornji način je odvisna od vrste molekule, v katero trči vzbujena molekula  $\text{NO}_2^*$ . Včasih je občutljivost kemiluminiscenčne metode na dušikov oksid NO odvisna od vrste in koncentracije plina, ki je prisoten poleg. Poznano je, da je pri izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem verjetnost za izgubo energije z ogljikovim dioksidom  $\text{CO}_2$  in vodo večja kot verjetnost za izgubo zaradi dušika  $\text{N}_2$  in kisika  $\text{O}_2$  in da sprememba koncentracij ogljikovega dioksida  $\text{CO}_2$  in vode vpliva na spremembo občutljivosti na dušikov oksid NO.

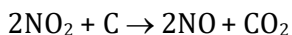


Slika 34: Načelo delovanja kemiluminiscenčne metode CLD. Reakcija je hitra, zato mora biti zaznavalo svetlobe tudi zelo hitro.

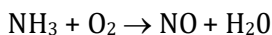
Dušikov dioksid  $\text{NO}_2$ , ki je v vzorcu že od začetka, nima kemiluminiscenčnih lastnosti in ga s kemiluminiscenčno metodo ne moremo izmeriti. Zato ga pred meritvijo pretvorimo v dušikov oksid NO z  $\text{NO}_x$  pretvornikom.



ali



Ogljik, ki je glavna komponenta  $\text{NO}_x$  pretvornika, se porablja pri zgornji redukciji. To se izvede v analizatorju, tik preden plin vstopi v merilno celico. Na podoben način lahko v dušikov oksid NO pretvorimo tudi amonijak  $\text{NH}_3$ .



ali



Dušikov oksid NO, ki nastane po zgornji enačbi, kemiluminiscira pod enakimi pogoji kot dušikov oksid NO, ki je v vzorcu prisoten že od začetka.

Merjenje koncentracije dušikovega oksida NO je možno tudi z ultravijolično in infrardečo spektroskopijo (NDUV in NDIR).

### 2.7.3 Merjenje koncentracije plinov z infrardečo spektroskopijo (NDIR)

Analizatorji plinov, ki delujejo na načelu infrardeče spektroskopije, so zelo uporabni za merjenje koncentracije dimnih plinov iz termoelektrarn in izpušnih plinov motornih vozil. Primer takih analizatorjev sta Siemens Ultramat 23 ali pa Horiba OBS 2200, prikazana na sliki 35.

Metoda se označuje s kratico NDIR (angl. *non dispersive infrared spectroscopy*). Metoda je nedisperzna na način, da infrardeča svetloba prehaja skozi merilno celico, ne da bi se svetloba dispergirala oz. da sta pri prehodu skozi merjeni plin skupinska in fazna hitrost valovanja enaki. Disperzijski analizatorji za ločevanje svetlobe po frekvencah uporabljajo mrežico ali prizmo, nedisperzijski pa ozkopasovne filtre.

Z infrardečo spektroskopijo lahko merimo koncentracije naslednjih plinov: ogljikovega monoksida CO, ogljikovega dioksida CO<sub>2</sub>, dušikovega oksida NO, didušikovega oksida N<sub>2</sub>O, žveplovega dioksida SO<sub>2</sub>, metana CH<sub>4</sub>, etena C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, heksana C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>, žveplovega heksafluorida SF<sub>6</sub>, klorodifluorometana R22 itd.



Slika 35: Levo: analizator dimnih plinov Siemens Ultramat 23. Analizator deluje po metodi infrardeče spektroskopije, za merjenje koncentracije kisika pa ima vgrajen (desno spodaj, kjer je ploščica, ki se privijači na sprednjo ploščo analizatorja) elektrokemično celico za merjenje koncentracije kisika. Desno: analizator izpušnih plinov Horiba OBS 2200 za uporabo v motornih vozilih v realnem prometnem toku deluje na načelu infrardeče spektroskopije, plamenske ionizacijske detekcije in kemiluminiscenčne metode [www.siemens.com in www.horiba.com].

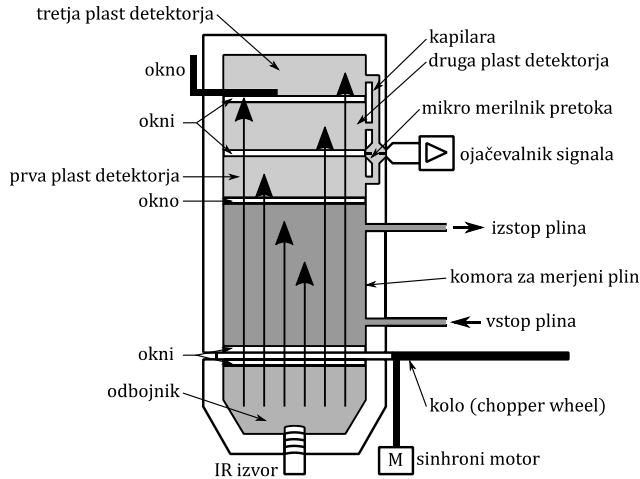
Merilno načelo temelji na absorpciji IR-svetlobe z molekulami posameznega plina, če plin presvetlimo z infrardečo svetlobo. Od tu dalje se tehnične izvedbe različnih izdelovalcev razlikujejo, npr. imamo izvedbe z enim ali dvema žarkoma.

V Evropi zelo razširjen analizator je Siemens Ultramat 23, ki ima en žarek. Shema analizatorja je prikazana na sliki 36. Vir sevanja deluje pri 600 °C in seva IR-sevanje, ki ga seka vrteče kolo (angl. *chopper*), frekvenca katerega pri npr. Siemens Ultramatu 23 znaša 8.3333 Hz. Vrteče kolo poganja sinhroni motor. Okrog vira sevanja je reflektor, ki usmeri večino žarkov v celico.

Infrardeče valovanje nato prehaja skozi merilno celico, ki je sestavljena iz več delov. V prvem delu je v plinski komori merjeni plin. Merjeni plin zadrži del sevanja iz IR-vira. To se zgodi glede na sestavo plina in absorpcijo vsake posamezne komponente plina. Iz plinske komore z merjenim plinom svetloba skozi steklo prehaja v sprejemne komore. Tudi v teh sprejemnih komorah je plin, katerega koncentracijo merimo, in sicer v znanih koncentracijah in neprodušno zaprt. Sprejemne komore so izvedene iz dveh ali treh delov in so povezane med seboj prek tanke cevke z vgrajenim mikro merilnikom prostorninskega toka. Prva merilna komora absorbira energijo iz pretežno srednjih delov IR-absorpcijskih pasov plina. Druga in tretja komora absorbirata energijo iz stranskih delov v IR -absorpcijskih pasov plina. Energija IR-svetlobe iz sredine pasov ne prodre v drugo ali tretjo merilno komoro, ker se močno absorbira v prvi merilni komori. Negativna povratna zveza iz zgornjih dveh sprejemnih komor povzroči navidezno zoženje spektra absorpcije merjenega plina. V merilnih komorah, kjer se absorbira IR -sevanje, se temperatura plina v celici poveča in s tem se poveča tudi tlak. Nekateri starejši analizatorji so merili tlak v komori, novejši pa merijo prostorninski tok iz prve v drugo merilno celico in obratno. Mikro zaznavalo za prostorninski tok je vgrajeno v cevko, ki povezuje merilne komore. Prostornino druge in tretje komore lahko spreminjamo z loputo, pri čemer se spreminja občutljivost analizatorja plinov. Vrteč zaslon ustvarja pulzirajoč tok energije iz IR-luči in temu sledi mikro merilnik prostorninskega toka, ki pretok pretvarja v električni signal. Kadar vrteči zaslon zastre luč, merilnik meri stanje ozadja. Mikro merilnik prostorninskega toka je izveden iz mreže vročih žičk, ki so ogrete na približno 120 °C, ki skupaj s tremi drugimi upori tvorijo Wheatstonov mostiček. Merilnik je torej podoben v delovanju merilniku hitrosti na vročo žičko. Prostorninski tok plina čez mikro merilnik je sorazmeren koncentraciji merjenega plina.

Komora za merjeni plin in s tem merilna celica se ne sme nikoli umazati. Zato je treba plin, preden vstopi v komoro, očistiti trdnih delcev in preprečiti vstop vodi in kondenzatu. Zaradi tega je treba plin pred merjenjem ustrezno pripraviti.

Zgoraj navedena izvedba merilne metode NDIR ni edina možnost. Npr. za merjenje izpušnih plinov vozil izdelovalec Horiba uporablja v sistemu OBS-2200 analizator, ki nima dveh ali treh merilnih komor. Analizator je prikazan na sliki 35, shema delovanja pa na sliki 37.

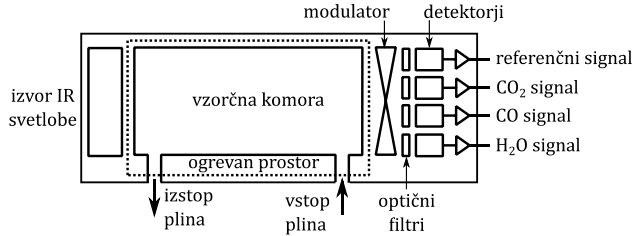


Slika 36: Delovanje analizatorja, ki deluje na načelu infrardeče spektroskopije podjetja Siemens.

Infrardeča svetloba se modulira z vrtečim zaslonom, preden prehaja skozi merilno celico z merjenim plinom. Merilna celica je ogreta na 60 °C. Merilna celica je za vsakega izmed merjenih plinov tudi opremljena s filtri z ustreznimi valovnimi dolžinami in zaznavali svetlobe. Optični filtri so izbrani tako, da so primerni za vsako posamezno merjeno komponento plina (ogljikov dioksid CO<sub>2</sub>, ogljikov monoksid CO ali voda). V celici z merjenim plinom se zaradi absorpcije z merjenim plinom vpadna svetloba na zaznavala oslabi. Slabljenje je v neposredni povezavi s koncentracijo merjenega plina. Koncentraciji CO in CO<sub>2</sub> se določita na ta način neposredno iz odziva posameznega zaznavala. V celici s plinom se meri koncentracija vode in le-ta se uporablja za popravke slabljenja ostalih merjenih plinov. Zaradi tega je možno merjenje koncentracije plinov brez odstranjevanja vode iz izpušnih plinov. Kljub temu da analizator plinov pri izračunu upošteva koncentracijo vode v merilni celici, se zaradi prisotnosti vode v praksi lahko pojavijo težave pri merjenju. To se zgodi v primeru, ko uporabljamo goriva z veliko vsebnostjo vodika, npr.: metan, ki stehiometrično zgorevajo (vsebnost pribl. 20 prostorninskih % vode v izpušnih plinih).

V nasprotju z analizatorji plinov izdelovalca Horiba, ki v analizatorju NDIR ne uporablja sistema za odstranjevanje vode iz vzorca, uporablja izdelovalec Sensors Inc. v svojih analizatorjih SEMTECH-DS za meritve NDIR koncentracij izpušnih plinov motorjev z notranjim zgorevanjem hladilnik, ki odstrani vodo iz merjenega vzorca.



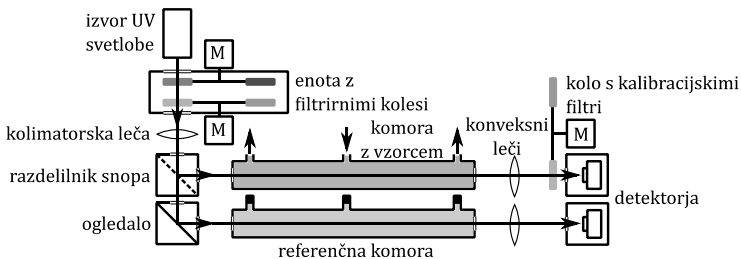


Slika 37: Shema delovanja NDIR analizatorja NDIR Horiba OBS 2200 za uporabo v vozilih. Pred merjenjem iz izpušnih plinov ni potrebno odstraniti vode.

### 2.7.4 Merjenje koncentracije plinov z ultravijolično spektroskopijo (NDUV)

Delovanje analizatorjev plinov, ki delujejo po postopku ultravijolične spektroskopije, je podobno kot pri infrardeči spektroskopiji. Za merjenje koncentracij dušikovega monoksida NO in dušikovega dioksida NO<sub>2</sub> v izpušnih plinih iz motorjev z notranjim zgorevanjem je metoda NDUV ustrežnejša od NDIR, ker na meritev absorpcije dušikovega monoksida NO in dušikovega dioksida NO<sub>2</sub> v UV-področju manj vplivata koncentraciji ogljikovega dioksida CO<sub>2</sub> in vodne pare.

Primer analizatorja koncentracije plinov z ultravijolično spektroskopijo NDUV (slika 38) je analizator Siemens Siprocess UV 600.



Slika 38: Shema delovanja analizatorja koncentracije plinov z metodo ultravijolične spektroskopije

Merjenje koncentracije plinov z ultravijolično spektroskopijo poteka na načelu merjenja absorpcije ultravijolične svetlobe v vzorcu. Absorpcija je sorazmerna koncentraciji v vzorcu. UV-sijalka oddaja UV-svetlobo v širokem frekvenčnem intervalu. Filtrsko kolo z več ozkopasovnimi filtri za UV-svetlobo prepusti samo izbran ozek frekvenčni pas, ki je primeren za merjenje. Ko svetloba

zapusti filter, potuje skozi zbiralno lečo, delilnik žarka in ogledalo v dve merilni komori (kiveti). Prvo merilno komoro imenujemo referenčna, drugo pa merilna komora. Skozi merilno komoro teče merjeni plin, referenčna komora pa je napolnjena z referenčnim plinom. Sprejemnik svetlobe zazna jakost zaporedoma merilnega in referenčnega žarka svetlobe. Na podlagi obeh izmerjenih jakosti analizator določi koncentracijo merjenega plina. Analizator mora biti temperaturno stabiliziran. Preden vstopi merjeni plin v merilno celico, je treba iz njega odstraniti vse delce in vodno paro.

### **2.7.5 Merjenje koncentracije plinov s plamensko ionizacijskim analizatorjem FID**

S plamensko ionizacijskim analizatorjem merimo koncentracijo organskih ogljikovodikov v izpušnih plinih. Kratica FID je okrajšava za tuj izraz (angl. *flame ionisation detector*).

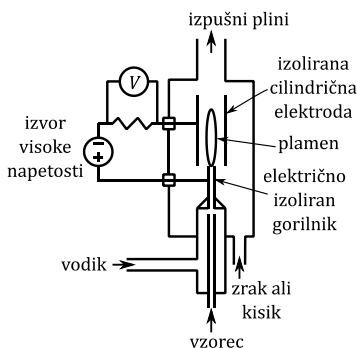
Postopek merjenja s plamensko ionizacijskim analizatorjem FID je prikazan na sliki 39. Glavni del plamensko ionizacijskega analizatorja je vodikov gorilnik, v katerega priteka tok nosilnega plina, sintetičnega zraka in merjenega plina. Vsi navedeni plini se v gorilniku zmešajo. Kot nosilni plin se uporablja zmes vodika in helija, ker ne vsebuje ogljika. Gorilnik je obdan s kolektorsko elektrodo, med njima pa je napetostni potencial nekaj sto voltov. Pri zgorevanju organskih snovi nastajajo nabiti delci (ioni in elektroni), zaradi katerih na kolektorsko elektrodo steče električni tok (približno od 10 do 12  $\mu\text{A}$ ), ki je sorazmeren količini organskih ogljikovodikov v plamenu merjenega izpušnega plina. Analizator ne zaznava negorljivih plinov (npr. vode,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  in  $\text{NO}_x$ ). Pri gorljivih organskih snoveh pa je občutljivost odvisna od funkcionalnih skupin; heteroatomarne skupine npr. zmanjšajo elektronski tok. Analizator prav tako ne zaznava anorganskega ogljika.

Ker merjenje koncentracije plinov s plamensko ionizacijskim analizatorjem plinov FID s plamenom oksidira vse spojine, se vsi ogljikovodiki oksidirajo do ogljikovega dioksida in vode. Zato je merjenje koncentracije plinov s plamensko ionizacijskim analizatorjem FID vedno zadnje v vrsti meritev koncentracije ali pa poteka vzporedno.

Kot sintetični zrak uporabljamo zmes kisika in dušika. Sintetični zrak ne vsebuje primesi, še posebej ne organskih ogljikovodikov. Sintetični zrak uporabljamo za potrebe dovajanja oksidanta za gorenje v celici FID. Sintetični zrak shranjujemo v prvi jeklenki. Druga možnost, ki jo npr. uporablja podjetje Sensors Inc. v svojih analizatorjih Semtech-DS, pa je, da ustrezno filtriramo okoliški zrak. Kot nosilni plin uporabljamo zmes helija in vodika, na Katedri za energetsko strojništvo uporabljamo zmes v razmerju 60 : 40. Helij in vodik ne vsebujeta ogljika. Nosilni plin shranjujemo v drugi jeklenki. Za kalibracijo uporabljamo kalibracijski plin, ki je na Katedri za energetsko strojništvo običajno zmes  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HC}$  (običajno v obliki propana) in  $\text{NO}_x$  (v obliki  $\text{NO}$ ). Kalibracijski plin imamo shranjen v tretji jeklenki, ni pa nujno, da uporabimo

natančno prej navedeno koncentracijo propana. Tako zmes uporabljamo zato, da je uporabna tudi za kalibracije drugih analizatorjev.

Cev za vzorčenje izpušnih plinov za meritve koncentracije plinov s plamensko ionizacijskim analizatorjem plinov FID mora biti ogrevana za potrebe merjenja koncentracije izpušnih plinov vozil na več kot 190 °C. Velika večina ogljikovodikov ostane v plinskem stanju pri navedeni temperaturi. Cev zato ogrevamo in je toplotno izolirana.



Slika 39: Postopek merjenja s plamensko ionizacijsko metodo FID

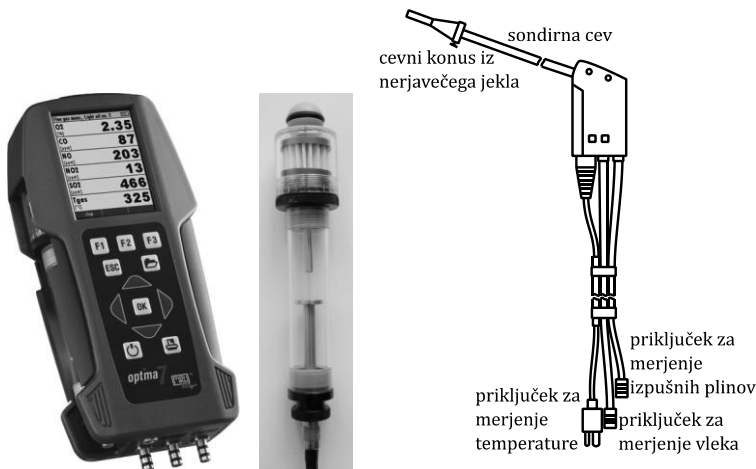
### 2.7.6 Analizatorji, ki delujejo na osnovi elektrokemičnih merilnih zaznaval

Analizatorje koncentracij plinov, ki imajo vgrajena elektrokemična merilna zaznavala, se uporablja predvsem za merjenje delovanja kurilnih naprav v individualnih hišah in stanovanjih in za analizo manjših industrijskih naprav. Taki analizatorji so prikazani na sliki 40. Analizatorji, ki delujejo na osnovi elektrokemičnih merilnih zaznaval, običajno niso namenjeni opravljanju trajnih meritev brez prekinitev. Življenjska doba merilnih zaznaval je odvisna tudi od uporabe, vzdrževanja in nege analizatorja. Pri kisikovem zaznavalu leta znaša običajno 2 leti, pri CO merilnem zaznavalu od 2 do 4 leta in pri NO zaznavalu 3 leta. V kombinaciji z analizatorji koncentracij plinov izdelovalci dobavljajo vzorčevalna zaznavala v različnih izvedbah. Življenjska doba elektrokemičnega zaznavala je tem daljša, čim več se uporablja.

Elektrokemična zaznavala za merjenje koncentracije plinov in njihovo delovanje sta prikazana na sliki 40.

Za merjenje koncentracije kisika  $O_2$  v dimnih plinih so vgrajena elektrokemična merilna zaznavala z dvema elektrodama. Merjenje strupenih plinov, kot so npr. ogljikov monoksid CO, dušikov oksid NO, dušikov dioksid  $NO_2$  in žveplov dioksid  $SO_2$  pa se izvaja z elektrokemičnimi merilnimi zaznavali s tremi elektrodami. Elektrokemična zaznavala delujejo na načelu

difuzije plina. Prednost tega načela je neposredna sorazmernost in linearnost signala koncentraciji (% ali ppm) merjenega plina. Vse tri elektrode se imenujejo S (merilna elektroda, angl. *sensing electrode*), C (nasprotna elektroda, angl. *counter electrode*) in R (referenčna elektroda, angl. *reference electrode*).



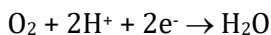
Slika 40: Prenosni dimnikarski analizator koncentracije dimnih plinov (levo), izločevalnik kondenzata – kondenzacijski lonček s filtrom (sredina) in zaznavalo (desno) [www.mru.com]

Kisikovo elektrokemično zaznavalo se je v preteklosti uporabljalo za merjenje dimnih plinov npr. v elektrarnah, ker je bilo njeno delovanje stabilno in robustno, bolj kot npr. naprava za paramagnetično merjenje koncentracije kisika. Danes so kisikova elektrokemična zaznavala zamenjale cirkonijeva  $\lambda$  zaznavala.

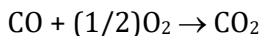
Elektrokemično zaznavalo deluje po načelu gorivne celice. Plin v zaznavalo vstopi prek membrane z difuzijo. Nato plini potujejo ob elektrodi S in na njeni površini reagirajo oksidativno (npr. CO, SO<sub>2</sub>, NO) ali redukcijsko (npr. NO<sub>2</sub> in Cl<sub>2</sub>). Primer merjenja za CO elektrokemično merilno zaznavalo je sledeč. Na elektrodi S reagira CO na naslednji način:



Na drugi strani, na elektrodi C, pa poteče redukcija kisika iz plina v vodo:

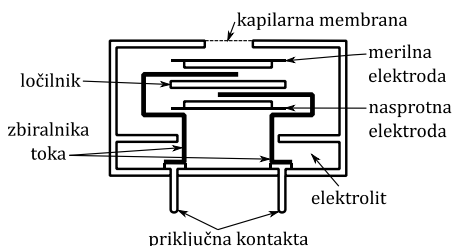


Skupna reakcija je:



Med elektrodama steče električni tok. Proizveden električen tok je nizek in znaša nekaj mikroamperov. V kisikovem zaznavalu je prisoten tudi merilnik temperature, saj je temperatura pomembna spremenljivka pri pretvorbi koncentracije v električni tok. V analizatorju plinov je vgrajen analogno-digitalni pretvornik, ki tok izmeri in ga prek mikroprocesorja in umeritvene krivulje pretvori v ustrezno vrednost koncentracije merjenega plina.

Referenčna elektroda je v nekatera elektrokemična zaznavala vgrajena zato, da izboljša delovanje elektrokemičnega zaznavala. Merilna elektroda mora zagotavljati stabilno napetost glede na nasprotno elektrodo. Referenčna elektroda je postavljena v bližini merilne elektrode in ima enak potencial kot merilna elektroda. Med merilno in referenčno elektrodo zato ne teče električni tok. V praksi na merilni elektrodi poteka elektrokemična reakcija, zato uporaba referenčne elektrode izboljša merilno negotovost.



Slika 41: Elektrokemično zaznavalo za merjenje koncentracije plinov, levo: izbor, desno: zgradba elektrokemičnih zaznaval [www.mru.eu]

### 2.2.7 Polprevodniška zaznavala

Lastnost polprevodniških spojev je, da so odvisni od koncentracije plinov. Zato so polprevodniška vezja vedno zaščitena pred plini v atmosferi. Pojav lahko izkoristimo za merjenje koncentracije plinov. Polprevodniško zaznavalo spreminja električno prevodnost v odvisnosti od koncentracije plina v atmosferi. Upornost se spremeni, ker se na zaznavalu merjeni plin adsorbira. Ko plin ni več prisoten, se površina zaznavala vrne v začetno stanje. Površina polprevodniškega zaznavala je iz kovinskih oksidov, npr. kositrovega oksida, aluminijevega oksida itd. Zaznavala so ogrevana na želeno temperaturo, saj temperatura vpliva na proces adsorpcije. V prisotnosti merjenega plina

kositrov ali drug kovinski oksid povzroči, da plin disociira v nabite ione in povzroči električni tok elektronov. V kovinski oksid sta vgrajeni dve elektrodi, ki izmerita spremembo upornosti. Tak signal je sorazmerno močan. Zaznavala so sposobna meriti zelo nizke koncentracije strupenih plinov, ki znašajo samo nekaj ppm, hkrati pa tudi visoke koncentracije, pri katerih plinske zmesi eksplodirajo.

Polprevodniška zaznavala so občutljiva na več kot 150 različnih plinov. Primer uporabe so zaznavala CO ali eksplozivnih plinov, ki se uporabljajo kot ročni analizatorji plinov za varnost na delovnem mestu ali pa so montirani v bližini peči v stanovanjskih stavbah. Analizatorji, ki uporabljajo polprevodniška zaznavala, so zelo neselektivno občutljivi. To pomeni, da niso sposobni ločevati med različnimi plini. Če želimo, da je polprevodniško zaznavalo selektivno, moramo pred zaznavalo namestiti filtre. Večinoma to ni potrebno, saj za primere uporabe, za katere se polprevodniška zaznavala uporabljajo, selektivnost ni potrebna. Npr. pri zaznavanju prisotnosti plina propan butan zaradi netesnosti jeklenke in napeljave v kuhinji povprečnega gospodinjstva je nepomembno, če je mernik občutljiv tudi na metan.

Prednost polprevodniških zaznaval je, da je njihova življenjska doba zelo dolga, da so občutljivi na zelo nizke koncentracije plinov od samo nekaj ppm do visokih koncentracij nekaj %. Če se ne umažejo (kar imenujemo tudi zastrupijo), znaša njihova življenjska doba več kot 10 let. Slabost je že omenjena, slaba selektivnost.

### 2.7.8 Zaznavalo preostalega kisika - lambda zaznavalo

Zaznavalo preostalega kisika, običajno ga imenujemo lambda zaznavalo, meri delež preostalega kisika v merjenem plinu po zgorevanju. Uporablja se za nadzor zgorevanja v motorjih z notranjim zgorevanjem in hišnih pečeh za določanje razmerja zrak-gorivo in tudi v vseh termoelektrarnah.

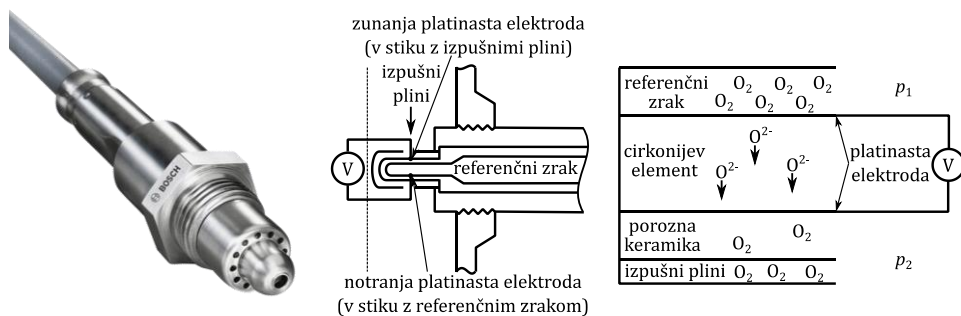
Zaznavalo preostalega kisika - lambda zaznavalo je izvedeno kot trdna gorivna celica. Najbolj pogosto uporabljamo lambda zaznavala s keramičnim gradnikom iz cirkonijevega oksida (slika 42). Zunanja in notranja stran keramičnega gradnika sta prekriti s tankima prepustnima plastema platine, ki služita kot elektrodi. Pri temperaturi približno 300 °C postane keramika iz cirkonijevega oksida prepustna za kisikove ione in tako dobi lastnosti elektrolita. Zunanja stran lambda zaznavala je obdana z izpušnimi plini, notranja pa z okoliškim zrakom. Ker je koncentracija kisika v okoliškem zraku višja kot v izpušnih plinih, začne zaradi difuzijskega gradienta kisik prehajati od zunanosti proti notranosti keramičnega gradnika, zaradi česar se na obeh elektrodah pojavi napetost. Napetost je podana z Nernstovo enačbo (9)

$$U = KT \cdot \log \frac{p_1}{p_2} + C \quad (9)$$

V Nernstovi enačbi (9) je  $K$  konstanta,  $T$  temperatura  $\lambda$  zaznavala,  $p_1$  je parcialni tlak kisika  $O_2$  v referenčnem plinu oz. zraku,  $p_2$  je parcialni tlak kisika  $O_2$  v merjenem plinu oz. izpušnih plinih in  $C$  premik ničle.

V izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem se v primeru revne zmesi na elektrodah pojavi napetost približno 0,2 V, pri bogati zmesi pa približno 0,8 V. Lambda zaznavalo je najbolj občutljivo ravno v bližini stehiometrične točke zgorevanja. Napetost, ki jo proizvaja lambda zaznavalo, je nelinearna s koncentracijo kisika, kot to prikazuje slika 43.

Lambda zaznavalo je razvilo konec šestdesetih let dvajsetega stoletja podjetje Bosch. Prva zaznavala so bila oblikovana v obliki naprstnika, kasneje pa so se pojavila ravna zaznavala, ki so manjša, lažja, cenejša in imajo hitrejši odziv. Lambda zaznavala so večinoma ogrevana, da prej dosežejo delovno temperaturo. S tem se podaljša tudi njihova življenjska doba. Običajno imajo štiri priključke, po dva za izhodni signal in gretje.

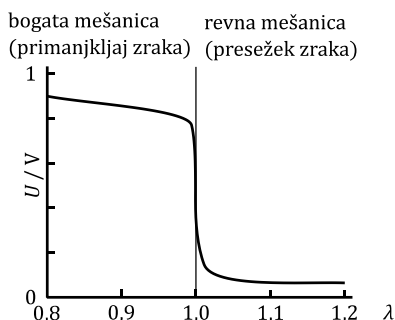


Slika 42: Lambda zaznavalo, levo: primer vgradnje, v sredini in desno: shema delovanja [www.boschautoparts.com]

Običajno je lambda zaznavalo zaradi svoje značilnosti uporabno zgolj kot stikalo, ki nam pove, ali imamo v izpušni cevi revno ali bogato zmes. Odziv lambda zaznavala prikazuje slika 43. Ne glede na to, da je izhodna spremenljivka iz lambda zaznavala zvezna, je lambda zaznavalo najbolj občutljivo ravno okrog stehiometričnega razmerja, zato je z analogno digitalnimi pretvorniki v avtu težko ugotoviti, koliko revno ali bogato zmes motor z notranjim zgorevanjem uporablja, če deluje stran od idealnega stehiometričnega razmerja  $\lambda = 1$ .

Širokopasovno lambda zaznavalo je zaznavalo, ki nam da informacijo tudi o tem, koliko lambda dejansko je v razširjenem območju delovanja, ne zgolj tik ob stehiometričnem razmerju  $\lambda = 1$ . Širokopasovno lambda zaznavalo ima v nasprotju s klasičnim lambda zaznavalom dve plasti, črpalno in referenčno. Take meritve so potrebne za najsodobnejše bencinske motorje za doseganje nizkih izpustov oziroma pri dizelskih motorjih za boljši nadzor delovanja.

Širokopasovno lambda zaznavalo je dopolnjeno z elektroniko. V vozilih se še ne uporablja zelo množično, verjetno zaradi višje cene.



Slika 43: Odziv lambda zaznavala

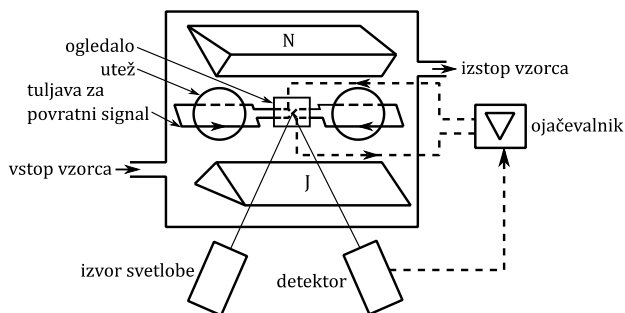
### 2.7.9 Merjenje koncentracije kisika s paramagnetnim zaznavalom

Za merjenje koncentracije kisika se pogosto uporablja paramagnetna metoda. Paramagnetizem je oblika magnetizma, pri katerem na paramagnetne snovi zunanje magnetno polje deluje tako, da nastane v njih inducirano magnetno polje v smeri zunanjega magnetnega polja. Paramagnetne pline, npr. kisik, zato magnetna sila povleče v magnetno polje, spremeni se hitrost plina na tem mestu, zato se poveča tudi tlak. Med plini, ki jih običajno srečamo, sta poleg kisika paramagnetna še NO in  $\text{NO}_2$ . V nasprotju s feromagnetnimi, paramagnetne snovi v odsotnosti zunanjega magnetnega polja ne kažejo magnetnih lastnosti. Ker je magnetni moment paramagnetne snovi zelo majhen, je za merjenje tega momenta potrebna zelo natančna tehnika.

Večina analizatorjev deluje na naslednji način. Postopek merjenja je prikazan na sliki 44. Z dvema magnetoma ustvarimo v merjeni prostornini magnetno polje. V magnetno polje postavimo tehtnico z dvema steklenima kroglicama, napolnjenima z dušikom. Kroglici povezuje palica, v sredini katere je pritrjeno ogledalo. Stekleni kroglici z dušikom se skupaj z ogledalom lahko vrtita okrog skupne osi. Na ogledalo usmerimo žarek svetlobe tako, da se vsaj enkrat za vsak vrtljaj žarek svetlobe z ogledala odbije na sprejemnik svetlobe. Kisik, ki ga paramagnetna sila privlači v merilno prostornino, bo izpodrinil stekleni krogli in povzročil, da se bosta začeli vrteti. Včasih to imenujemo tudi magnetni veter. Začetek vrtenja zazna merilna elektronika v zaznavalu. Možno je, da elektronika izmeri vrtilno frekvenco, ki je sorazmerna koncentraciji kisika. Druga možnost je, da se vključi delovanje povratne zveze. Povratna zveza povzroči nastanek navora na os vrtenja, ki ustavi vrtenje. Tok, ki je potreben, da se vrtenje ustavi, je v tem primeru merilo za koncentracijo kisika v vzorcu.



Nekatere novejšje izvedbe nimajo optičnega zaznavanja, temveč merijo hitrost toka z anemometri na vročo žičko. Plin v tem primeru potuje po dveh poteh, del skozi magnetno polje, del pa mimo magnetnega polja.



Slika 44: Paramagnetično kisikovo zaznavalo

### 2.7.10 Difuzivni vzorčevalniki

Difuzivni vzorčevalniki merijo prisotnost določenih snovi v zunanjem zraku z metodo pasivnega vzorčenja, kar pomeni, da vanje zraka ne dovajamo s pomočjo črpalke, pač pa so le izpostavljeni zunanjim razmeram. Primer uporabe difuzivnih vzorčevalnikov je na sliki 45. Difuzivni vzorčevalniki so cevke, v katerih se vzpostavi linearen difuzijski gradient med koncentracijo v zraku na eni strani in ničelno koncentracijo na drugi strani cevke, kjer je nameščen adsorbent. Molekule plina potujejo do adsorbenta po načelu difuzije. Prednosti merjenja z difuzivnimi vzorčevalniki so, da le-ti ne potrebujejo električne energije za pogon naprave, so tihi, ne potrebujejo kalibracije na terenu, imajo širok koncentracijski razpon in so stroškovno učinkoviti. Vzorčenje izvajamo na terenu, analize pa kasneje v laboratoriju. Seveda pa imajo tovrstne meritve tudi slabosti, saj je potrebno veliko ročnega dela v laboratoriju, dobimo pa lahko le povprečne koncentracije v času, ko je bil vzorčevalnik postavljen na merilno mesto.

Primer merjenja koncentracije plina z difuzivnimi vzorčevalniki je merjenje koncentracije benzena, toluena, etilbenzena in m, p, o-ksilena (BTX).

Če nas pri meritvah z difuzivnimi vzorčevalniki zanima splošno stanje kakovosti zunanjega zraka na določenem področju, moramo izbrati za difuzivni vzorčevalnik primerno mesto in paziti, da vzorčevanje in kasnejša analiza v laboratoriju ustrezata minimalnim zahtevam za zagotavljanje kakovostnih podatkov. V Sloveniji je to Pravilnik o monitoringu kakovosti zunanjega zraka, Ur. l. RS, št.127/2003. Pri izpostavitvi vzorčevalnikov moramo med drugim paziti, da so izpostavljeni minimalno 14 % časa v letu in da jih izpostavimo ob različnih letnih časih, da se izognemo nenamenskim

nesimetričnim rezultatom. Odločiti se moramo, ali nas zanima izpostavljenost prebivalstva ali pa stopnja onesnaževanja določenega vira. Zaradi tega se je razvila klasifikacija merilnih mest, ki jo delimo na vrsto območja, značilnost območja, vrsto merilnega mesta in na geografsko značilnost.



Slika 45: Ohišje z večdifuzivnimi vzorčevalniki, ohišje je nameščeno na drog javne razsvetljave [Kakovost zraka v Sloveniji v letu 2011, 2012].

## **2.8 Merjenje sestave dimnih plinov industrijskih peči in termoelektrarn na premog**

V okoljskem strojništvu se pogosto srečujemo z nalogo merjenja dimnih plinov v pretočnih kanalih termoelektrarn na premog. Poleg poznavanja delovanja merilne opreme je treba za uspešno merjenje dimne pline ustrezno vzorčiti in jih transportirati do analizatorjev plinov. Take meritve na Katedri za energetsko strojništvo Fakultete za strojništvo izvaja Laboratorij za termoenergetiko.

Največjo merilno negotovost pri meritvah predstavlja neenakomerna porazdelitev koncentracije plinov in masnega toka delcev v običajno zelo velikem preseku kanala. Zaradi tega vzorčimo dimne pline v kanalu, če je to le mogoče, na več mestih hkrati z nepremično postavljenimi odjemnimi mesti ali vzorčevalnimi ustji (slika 46) ali pa traverziramo kanal s premičnim zaznavalom. Če vzorčimo na več mestih hkrati, moramo zagotoviti, da je prostorninski tok dimnih plinov v vseh vejah enak. To naredimo tako, da prostorninski tok skozi analizator (ta znaša npr. 3 L/min) razdelimo na npr. 6 cevk, tako da je prostorninski tok po vsaki 0,5 L/min. Prostorninski tok izmerimo v vsaki cevki posebej npr. z rotametrom s kroglico, vrednost prostorninskega toka pa nastavimo z igelnim ventilom (slika 47). Tak postopek nam omogoča določiti povprečno sestavo vzorčenih dimnih vplivov, pri katerih pa ni upoštevan vpliv hitrosti plina v kanalu pri odjemnem mestu,

ki lahko pomembno vpliva na izračun povprečne sestave. Tej pomanjkljivosti se lahko izognemo s traverziranjem kanala s kombiniranim zaznavalom, ki omogoča sočasno vzorčevanje dimnih plinov in merjenje hitrosti, ki jo nato v izračunu povprečne sestave uporabimo kot utež.

V dimnem kanalu je lahko na določenih mestih koncentracija prašnih delcev zelo velika. V posameznih primerih se vstopno ustje odjemnega zaznavala zamaši in ga je potrebno preprihovati, včasih pa celo mehansko očistiti s kovinsko palico manjšega zunanega premera od notranjega premera odjema. Da zmanjšamo možnost zamašitve, uporabimo zaslone ali pa nastavke v obliki labirintov ali temperaturno obstojne filtre, ki jih namestimo na ustje vzorčevalne cevke v dimnem kanalu.

Preden vzorčeni dimni plin vstopi v analizator, je treba iz plina odstraniti trdne delce. Vsi analizatorji imajo vgrajen filter ali več filtrov, vendar so le-ti majhni in se pri neprekinjenih meritvah lahko zamašijo. Zato pri merjenju dimnih plinov v termoelektrarnah filtriramo dimne pline že pred analizatorjem. To storimo v več stopnjah. Na začetku odstranimo najbolj grobe delce z vato. Za to se običajno uporabljajo steklene cevke, napolnjene z vato, kot je to prikazano na slikah 47, 48 in 49. Potem vstopijo dimni plini, očiščeni grobih delcev, v analizator. Na analizatorju sta običajno še dva filtra. Prvi filter je običajno grobi filter za trdne delce. Kasneje vstopajo dimni plini v še bolj fin filter. Filtri so sintrani, PTFE ali papirnati in imajo zelo različne velikosti in število por.

Praviloma morajo biti cevke in filtri, ki povezujejo dimni kanal s sistemom za pripravo vzorca dimnih plinov za analizo, električno ogrevane na temperaturo, ki je višja od temperature kondenzacije plinov, ki jih vsebujejo dimni plini. Običajno znaša ta temperatura vsaj 190 °C, kar presega temperaturo kondenzacije žveplene kisline, ki je vedno prisotna pri zgorevanju goriv fosilnega izvora. Čim se pojavi kondenzacija znotraj vzorčevalnega sistema, se sestava vzorčenih dimnih plinov (npr. vsebnost žveplovega dioksida SO<sub>2</sub>) spremeni in ni več taka kot v kanalu – lahko se pojavi absorpcija in kemične reakcije z nastalim kondenzatom..... To je zato, ker se del žveplovega dioksida v stiku z vodo pretvori v žveplasto kislino.

Kadar nas zanimajo komponente dimnih plinov, ki se ne kondenzirajo ali se slabo topijo v vodi, lahko uporabljamo neogrevane povezovalne cevke, ki so večinoma silikonske. Za daljše sekcije (npr. 50 m) se uporabljajo plastične cevke. Prednost silikonskih cevk pred plastičnimi je, da je z njimi možno doseči boljšo tesnost sistema na spojih. Plastične cevke na koncih nakuhavamo, to pomeni, da jih pomočimo v vrelo vodo, da se zmečajo in raztegnejo in jih tesno natakemo na priključek. Spoj plastične cevke in konektorja lahko preneha tesniti na mrazu, ko povsem otrdi. Najmanjši premik cevke zato lahko povzroči puščanje. Temperaturo pod 0° C pa se tako ali tako izogibamo, ker nimamo ogrevanih povezav in kondenzat v cevkah zmrzne in prekine pretok vzorca dimnega plina. Pri silikonskih cevkah

pazimo, da se na dvižnih vodih zaradi lastne teže ne raztegnejo preveč, saj v tem primeru postanejo porozne. Silikonske cevke uporabljamo za kratke povezave in za združevanje vzorcev iz mrežno postavljenih vzorčevalnih kovinskih cevk, ki so vstavljene v kanale.

Pred meritvijo moramo vedno zelo natančno preveriti, da sistem za odjem, to je napeljava od merilnega mesta do analizatorja, ne pušča. Če merimo vol. koncentracije npr. kisika v dimnem kanalu, ki znaša med 2 % in 10 %, ne smemo dopustiti, da v napeljavo vdira okoliški zrak z vol. koncentracijo kisika 21 %. Zato je izjemno pomembno, da celotno napeljavo izvedemo plinotesno. Če so napeljave zelo razvejane, je spojev veliko, kar povečuje verjetnost puščanja.

Dodaten problem je dejstvo, da so vsi sistemi povezani s kurilnimi napravami, ki transportirajo dimne pline, vedno v podtlaku. To je s stališča varnosti potrebno zato, da se prepreči uhajanje dimnih plinov v okolico kurilne naprave. Zato je za izsesavanje potreben višji podtlak in s tem je možnost puščanja še večja. Velike vdore okoliškega zraka v merilni sistem je možno enostavno ugotoviti, če se npr. koncentracija kisika poveča iz pričakovane vrednosti na vrednost blizu 21 %. To je v primeru, da se cevka sname s priključka ali če se cevka strga. Manjše vdore je po drugi strani mnogo težje zaznati.



Slika 46: Vzorčevanje dimnih plinov, levo: odjemi dimnih plinov na steni, kovinski priključki, ki se nadaljujejo v silikonske cevke služijo odjemu dimnih plinov. Električni kabli so za merjenje temperature. Desno: odjemno mesto na dimniku za vzorčevanje delcev ali plinov z izokinetično metodo.

Pri vgradnji vzorčevalnih mest in pri natikanju cevk moramo paziti, da so vse površine priključkov vzorčevalnih mest čiste. Plinotesnost pri neogrevanih ceveh preverjamo na naslednji način. Cevko takoj za odjemom iz kanala tesno zatesnimo s stiščkom, da preprečimo pretok skozi. Nato pri analizatorju vgradimo v sistem črpalko, ki ustvari v celotni napeljavi želeni podtlak.

Napeljava je priključena na vstop v črpalko, nato pa cevko na izstopu iz črpalke pomočimo v vodo. V vodo začnejo izhajati mehurčki, ki pa jih je sčasoma čedalje manj, ko se dimni plin iz napeljave počasi izčrpava. Tesnjenje je dovolj dobro, če črpalka načrpa oziroma če se v vodi pojavi največ en mehurček približno vsakih 20 sekund, kar ustreza prostorninskemu pretoku približno 10  $\mu\text{L}/\text{min}$ .

Vsi evropski standardi s področja merjenja koncentracij dimnih plinov v industrijskih pečeh in termoelektrarnah predpisujejo analizo suhih dimnih plinov, zato je treba pred analizo sestave dimnih plinov iz dimnih plinov izločiti vodo. Vodo iz dimnih plinov izločimo na mestu odvzema ali pred analizatorjem na možna dva načina. Prvi način je z ohlajanjem in izločevanjem kondenzata, to naredimo z uporabo hladilnika. Drugi način je higroskopična absorpcija vodne pare v  $\text{SiO}_2$  oz. silikagelom. Dovolj je, da pri posameznih meritvah uporabimo samo en postopek izločevanja vode iz dimnih plinov.



Slika 47: Priprava za zagotavljanje enakega prostorninskega toka skozi dve odjemni mesti. Spodaj sta dva rotametrična merilnika prostorninskega toka s kroglico in igelnim ventilom za izenačevanje prostorninskih tokov v obeh odjemnih vejah. Zgoraj je filter za trdne delce in vata v stekleni cevki.

Hladilnik ohladi dimne pline na približno od 3 do 4  $^{\circ}\text{C}$ , pri čemer v dimnih plinih večina vodne pare kondenzira v kapljevito fazo, ki jo mehansko izločimo. V analizatorju tako ne more priti do nezaželene kondenzacije, ker obratuje pri višji temperaturi. Komercialni hladilniki dimnih plinov imajo lahko več (npr. štiri) hladilnih celic, kar omogoča hlajenje štirih različnih vzorcev plina. Hladilniki običajno delujejo na osnovi Peltierovega načela. Vsaka hladilna celica ima zgoraj dva priključka, spodaj pa lonček za kondenzat. Na spodnji strani je treba neprekinjeno in plinotesno odstranjevati kondenzat, za kar služijo peristaltične črpalke (slika 48). Te so nameščene na dnu hladilne celice.

Vodo je iz vzorčenega plina poleg s hlajenjem možno odstraniti tudi kemično. Silikagel je sredstvo, ki nase veže vlago (slika 48). Silikagel je sintetični kremen z dodatkom barvila. Uporablja se npr. silikagel modre barve, ki postane rdeč, ko postane nasičen z vlago. Takrat ga je potrebno zamenjati ali regenerirati s sušenjem na vsaj 220 °C.



Slika 48: Levo: sušenje dimnih plinov s silikagelom. Silikagel je v vsaki izmed posod s spodnje in zgornje strani omejen z vato, ki drži silikagel na mestu in skrbi za odstranjevanje trdnih delcev. Zadaj je hladilni lonček, ki služi odstranjevanju kondenzata. Hitrost toka v steklenem lončku je majhna, zato se dimni plini v njem zadržujejo dalj časa, dovolj, da se ohladijo in oddajo vlago. Desno: hladilnik hladi dimne pline na 2,9 °C. Na sprednji strani sta vidni dve peristaltični črpalki, peristaltične črpalke se uporabljajo za odvod kondenzata, ne da bi v sistem vdrla okoljski zrak.

Pretok skozi analizator dimnih plinov zagotavlja membranska črpalka, ki je običajno nameščena v analizatorju. Pretok, ki ga črpalka zagotavlja, znaša približno 3 L/min, pri novejših izvedbah analizatorjev pa nekaj manj. Če želimo povečati odzivnost sistema, uporabimo dodatno črpalko (slika 51). Uporabljamo jo za povečanje prostorninskega toka dimnih plinov od mesta vzorčenja do analizatorja, pri čemer ostane tok skozi analizator vedno enak, saj tako zahteva merilna metoda za merjenje, ustrezen prostorninski tok skozenj pa zagotavlja tudi sam analizator. Odvečen plin spustimo iz napeljave pred analizatorjem.

Analizatorje dimnih plinov je treba pred vsako uporabo kalibrirati. Za to uporabljamo testne plinske zmesi znane sestave, ki jih shranjujemo v jeklenkah pod visokim tlakom (slika 50). Vsebnost ali območje koncentracij npr. dušikovega monoksida NO v dimnih plinih termoelektrarn poteka večinoma v koncentracijah od 0 do 1000 ppm.



Slika 49: Levo: merjenje koncentracije dimnih plinov z IR-analizatorjem dimnih plinov Siemens Ultramat 22, pod analizatorjem pa je hladilnik vzorčenih dimnih plinov. Na sliki sta dve stekleni posodi z vato za odstranjevanje trdnih delcev iz dimnih plinov. Dimni plini prehajajo skozi obe posodi zaporedno. Na analizatorju je na desni strani pred elektrokemičnim zaznavalom za merjenje koncentracije kisika dodatni filter za kondenzat in v njem grobi filter za trdne delce. Na sredini analizatorja je še en bolj fin papirnati filter pod steklenim pokrovčkom. Desno od prikazovalnika je rotametrični merilnik prostorninskega toka s kroglico, ki lebdi v toku dimnih plinov. Desno: v analizatorju plinov ABB je pod filtrom črpalne enote nameščeno zaznavalo vlage. Če se na filtru nabere kapljevita voda, se zmanjša upornost med obema kontaktoma in delovanje črpalke ter analizatorja se prekine.

Meritve dušikovega monoksida NO običajno izvajamo z infrardečo spektroskopijo NDIR. V tem primeru za kalibracijo uporabimo dva kalibracijska plina. Dušik  $N_2$  uporabimo za določanje ničle, kot drugo kalibracijsko točko pa uporabimo dušikov monoksid NO npr. s koncentracijo 600 ppm v dušiku  $N_2$ . Včasih uporabljamo tudi kalibracijo z zmesjo plinov v dušiku  $N_2$ , npr. ogljikov monoksid CO, ogljikov dioksid  $CO_2$  in dušikov monoksid NO v dušiku  $N_2$  skupaj v eni jeklenki (npr. 1000 ppm CO, 11 %  $CO_2$  in 1000 ppm NO). Ponudnik tehničnih plinov (npr. Messer Ruše) lahko dobavi ustrezno plinsko zmes, kot jo za umerjanje potrebujemo. Če uporabljamo kakovostne analizatorje, kot je npr. Siemens Ultramat 23, uporaba zmesi ne moti kalibracije in merilnih rezultatov. Nekateri analizatorji plinov imajo vgrajene ampule z zmesmi plinov, ki jih avtomatsko odprejo in se po potrebi kalibrirajo avtomatsko. Analizatorji za trajne meritve imajo namenske priključke za dovod kalibracijskih plinov. Kalibriranje se lahko izvaja avtomatsko na določene časovne periode z uporabo elektromagnetnih

ventilov, ki izmenično spuščajo skozi analizator kalibracijske in vzorčne pline. Kalibracijo vedno izvedemo na začetku meritev in na vsako uro meritev.



Slika 50: Jeklenke s kalibracijskimi plini in reducirnimi ventili. V levi jeklenki je kalibracijski plin zmešan z dušikom, v srednji jeklenki je kisik in v desni jeklenki dušik.

Kalibracijo analizatorjev kisika lahko v praksi pogosto izvedemo kar z okoliškim zrakom. Večinoma je v velikih presekih dimnikov termoelektrarn merilna negotovost zaradi vzorčenja večja, kot je merilna negotovost zaradi kalibracije kisika z okoliškim zrakom in ne z znano koncentracijo kisika iz jeklenke.

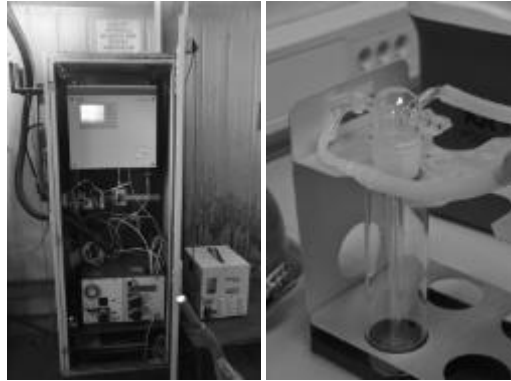




Slika 51: Analizatorji za merjenje koncentracij dimnih plinov, levo: na levi strani so od zgoraj navzdol data logger, 2 x IR-analizatorja Siemens Ultramat 22 in Siemens Ultramat 23, povsem spodaj analizator koncentracije kisika. Desno od analizatorja koncentracije kisika je dodatna membranska črpalka. Na desni strani slike je napajalnik in priključna plošča za data logger. Desno: od zgoraj navzdol data logger in IR-analizator Siemens Ultramat 23, spredaj merilnik tlaka s poševno cevko U. Spodaj levo je priprava za izločanje kondenzata (temni lonček z zamaškom na spodnji strani) in filtriranje ter razvlaževanje (lonček z vato/silikagelom/vato in zamaškom na zgornji strani). Spodaj pod mizico je dodatna membranska črpalka za hitrejšo odzivnost sistema.

Kalibracijski plini se ne pokvarijo, toda po 12 mesecih je treba ponovno preveriti sestavo, ker lahko v zmesi potekajo počasne kemične reakcije. Okoliški zrak v jeklenko ne more vdreti, ker je kalibracijski plin v njej pod zelo visokim tlakom. Kljub vsemu lahko v jeklenko pod tlakom prodre difuzijsko onesnaženje kot npr. pri vodiku in heliju.

Plinoizpiralke se uporabljajo po vzorčenju za pripravo vzorčenega plina pred analizo. Plinoizpiralke se namestijo v hlajeno posodo zraven vzorčevalnega mesta. Plinoizpiralke so namenjene čiščenju in sušenju plinov z različnimi mediji. To je lahko voda, raztopina natrijevega hidroksida, žveplena kislina za sušenje plinov, saj nase veže vodo itd. V plinoizpiralki dimni plin prisilimo v pretok skozi sifon. Vsebina plinoizpiralke se kasneje analizira s kemijskimi preizkusi v analiznem laboratoriju. Plinoizpiralka je prikazana na sliki 52.



Slika 52: Primer industrijske uporabe analizatorja dimnih plinov za potrebe nadzora velike industrijske peči, levo: zgoraj je analizator plinov ABB, spodaj pa sta na levi črpalka in na desni hladilnik. Debela črna cev izven električne omare je na 190 °C ogrevana cev za dimne pline. Izven omare je vzorčevalnik plinov, ki se uporablja za ročne občasne analize delovanja peči. Desna slika: plinoizpiralka.

## 2.9 Merjenje sestave izpušnih plinov motornih vozil

Za potrebe okoljskega strojništva izvajamo vzorčenje in meritve koncentracije plinov in masnega toka delcev v izpušnih plinih vozil ali stacionarnih motorjev z notranjim zgorevanjem. V tem poglavju bomo obravnavali vgradnjo merilnega sistema v vozila in merjenje sestave izpušnih plinov. Merjenje sestave bomo razdelili na merjenje koncentracije plinov in masnega toka delcev. Na Fakulteti za strojništvo v okviru Katedre za energetska strojništvo izvaja meritve Laboratorij za motorje z notranjim zgorevanjem in elektromobilnost.

Merilni sistem za merjenje izpustov vozil z motorji z notranjim zgorevanjem, ki je namenjen uporabi v prometu, mora biti prenosen (angl. *PEMS portable emissions measurement system*).

Na sliki 53 je prikazana vgradnja v vozilo merilnega sistema za merjenje koncentracije izpušnih plinov. Na sliki 53 se meritve izvajajo z analizatorjem izpušnih plinov Horiba OBS 2200. Meritve koncentracij izpušnih plinov obsegajo običajno tri različne principe glede na vrsto plina, z infrardečo spektroskopijo NDIR za merjenje koncentracije CO in CO<sub>2</sub>, s kemiluminescenčno metodo CLD za merjenje koncentracije NO<sub>x</sub> in plamensko ionizacijskim analizatorjem plinov FID za določanje koncentracije ogljikovodikov HC. V tem primeru (slika 53) se meritve masnega toka delcev niso izvajale.



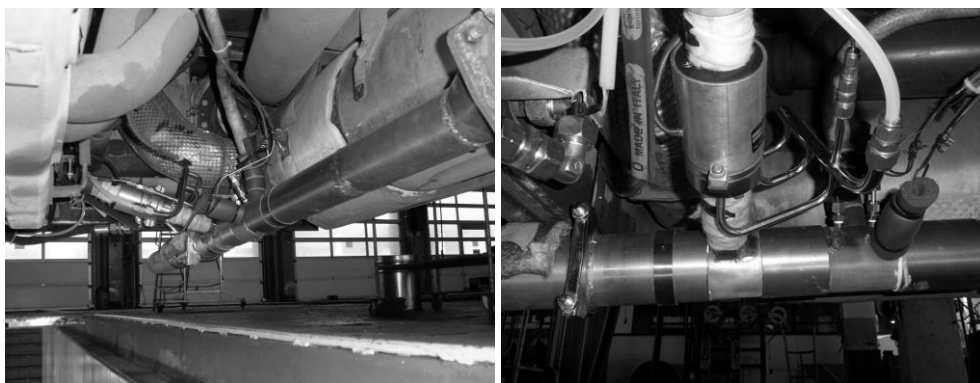
Slika 53: Merilni sistem za merjenje sestave izpušnih plinov vozil med vožnjo. Spodaj pod odbijačem je na izpušno cev nameščen sistem za odjem izpušnih plinov, izdelan s strani izdelovalca merilne opreme. Iz sistema za odjem vodi tanka svetla cev s tlačnimi odjemi za meritve pretoka in s termočlenom za merjenje temperature in debela ogrevana in toplotno izolirana cev za odjem izpušnih plinov za analizator. V prtljažnem prostoru so plinske jeklenke s kalibracijskimi plini (zmes CO, CO<sub>2</sub>, propan in NO), sintetičnim zrakom (kisik in dušik) in gorivom za celico FID (zmes vodika in helija). Spredaj levo so akumulatorji za napajanje celotnega sistema. Desno je analizator izpušnih plinov Horiba OBS 2200. Pokrovček črne barve pokriva mesto, kjer je nameščen filter za delce.

Za meritve potrebujemo več vnaprej pripravljenih plinov, ki jih shranjujemo v jeklenkah (sliki 53 in 54). Kot sintetični zrak uporabljamo zmes kisika in dušika in ga shranjujemo v prvi jeklenki. Kot nosilni plin oz. gorivo za plamensko ionizacijski analizator plinov FID uporabljamo zmes helija in vodika, nosilni plin shranjujemo v drugi jeklenki. Za kalibracijo uporabljamo kalibracijski plin, ki je zmes ogljikovega monoksida CO, ogljikovega dioksida CO<sub>2</sub>, ogljikovodikov HC (v obliki propana) in dušikovih oksidov NO<sub>x</sub> (v obliki NO). Preostali plin je dušik N<sub>2</sub>. Kalibracijski plin imamo shranjen v tretji jeklenki. Na vsaki izmed jeklenk je nameščen dvostopenjski krmilnik tlaka, na priključku v analizator plinov moramo zagotoviti 1 bar nadtlaka (analizatorji Horiba), npr. analizatorji podjetja Sensors Semtech pa so robustnejši in dovoljujejo večji interval tlakov na vstopu. Analizator plinov ima vgrajen še lasten krmilnik tlaka. Za prevoz jeklenk v preizkusnem vozilu je potrebno posebno dovoljenje.

Zahteve različnih izdelovalcev analizatorjev glede na potrebo po kalibracijskih plinih se razlikujejo. Analizatorji podjetja Horiba potrebujejo vse prej navedene kalibracijske pline. Analizatorji podjetja Sensors Semtech - DS ne

zahtevajo uporabe kalibracijskih plinov med vožnjo, razen goriva za plamensko ionizacijski analizator plinov FID. Vsi analizatorji imajo vgrajene elektromagnetne ventile, ki za čas kalibracije prekinejo tok merjenega plina in na merilne celice spustijo kalibracijski plin.

Sistem za odjem izpušnih plinov ponuja vsak izdelovalec merilnega sistema in je del merilne opreme za merjenje koncentracij plinov in masnega toka delcev. Sistem za odjem se namesti na izpušno cev vozila, kar je prikazano na slikah 54 in 55. Na cevi za odjem so priključki za izpušne pline, tlačni odjem za merjenje prostorninskega toka in merjenje temperature. Cevke za odjem tlaka za meritve prostorninskega toka morajo biti izvedene brez žepov, da pojav kondenzata v cevki ne moti meritve prostorninskega toka.

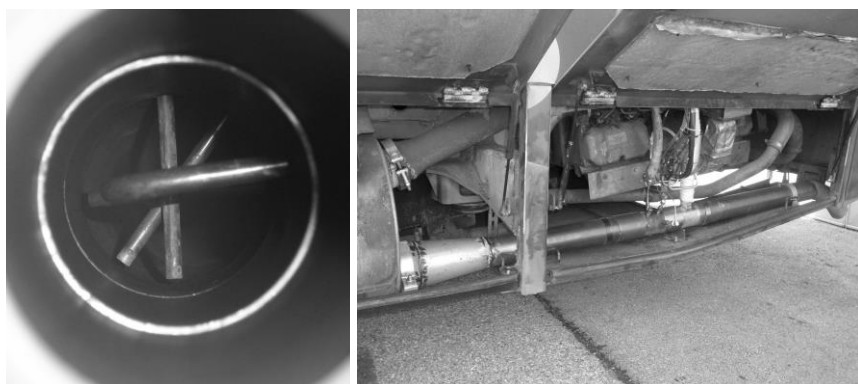


Slika 54: Sistem za odjem izpušnih plinov, vgrajen v avtobus. Sistem je uporaben za merjenje koncentracije plinov in masnega toka delcev. Levo: pogled vzdolž sistema za odjem, vidna je skoraj navpična ogrevana cev za merjenje koncentracije izpušnih plinov. Desno: pogled s strani, na sredini je odjem za merjenje delcev. Takoj na mestu odjema se pline razredči, to naredimo z dovajanjem prečiščenega zraka (dovod po beli plastični cevki), pri čemer se ga vpiha na več mestih hkrati.

Cev za vzorčenje izpušnih plinov za meritve koncentracije plinov mora biti ogrevana za potrebe merjenja koncentracije izpušnih plinov vozil na več kot 190 °C. Pri navedeni temperaturi ostane v plinskem stanju velika večina ogljikovodikov, ki se navadno nahajajo v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem. Cev zato ogrevamo. Za meritve koncentracij v izpušnih plinih po metodah infrardeče spektroskopije NDIR, s plamensko ionizacijskem analizatorjem plinov FID in s kemiluminiscenčno metodo CLD uporabljamo isto cev za izpušne pline. Temperatura v celici za infrardečo spektroskopijo NDIR je znotraj analizatorja plinov krmiljena na samo 60 °C. V najneugodnejšem primeru, če deluje motor na metan, je na izstopu iz izpušne cevi 19 % vode in 9,5 % CO<sub>2</sub>, kar da pri 60 °C malo manj kot 100 % vlažnost.

Ker ločljivost NDIR celice s povečevanjem temperature pada, je izbira temperature 60 °C v merilni celici najprimernejša.

Prostorninski tok izpušnih plinov se meri z zaznavalom, ki deluje na načelu merjenja razlike tlaka, metoda je podobna Pitotovi cevi. En priključek meri totalni tlak, drugi pa je prvemu enak, vendar obrnjen v nasprotno smer potovanja izpušnih plinov. Izvedba zaznavala za merjenje prostorninskega toka izpušnih plinov ni enaka Pitotovim cevam, ki imajo poleg odjema za totalni tlak še odjem za statični tlak. Nazaj obrnjen priključek poveča razliko tlaka glede na klasične Pitotove cevi, kar je pomembno pri merjenju majhnih hitrosti izpušnih plinov. Cevke za odjem tlaka za meritve prostorninskega toka morajo biti izvedene brez žepov, da morebitni pojav kondenzata v cevki ne moti meritve. Merilni pretvornik za tlak je vgrajen v analizator dimnih plinov.



Slika 55: Sistem za odjem izpušnih plinov za meritve koncentracije plinov in masnega toka delcev. Levo: pogled v sistem za odjem izpušnih plinov iz izstopne odprtine. Na sliki so vidne štiri cevi za odjem tlaka (dve tanjši cevki), meritev temperature s termočlenom (zaznavalo ni vidno), cev za odjem plinov (oddaljena debela cev) in cev za odjem delcev (bližnja debela cev). Cev za odjem delcev ima nameščeno koleno, obrnjeno proti toku izpušnih plinov. Desno: namestitev v motorno vozilo.

Poraba energije za ogrevanje cevi za odjem izpušnih plinov in za delovanje analizatorjev plinov je velika, zato pri merjenju v realnem prometu uporabljamo akumulatorje (slika 56). Velika poraba zahteva pogosto polnjenje akumulatorjev, saj avtomobilski alternator ne zmore zagotoviti dovolj energije, poleg tega bi s tem odvzemali večjo moč motorju kot v realnih voznih razmerah.

V nadaljevanju se bomo osredotočili na merjenje masnega toka delcev. Delci so aerosoli, pepeli, saje, kapljice kondenziranih ogljikovodikov itd. Zakonodaja ne določa vrst delcev, katerih masni tok je treba meriti. Zakonodaja omejuje izpuste vseh delcev, ki se ujamejo na filter premera 47 mm. V okoljskih

standardih Euro 5 in 6 je npr. predpisan tok masni tok delcev (0,005 g/km za osebna vozila), ki ga izdelovalci vozil lahko dosežejo samo z uporabo filtrov delcev DPF (angl. *diesel particulate filter*).

Pri dizelskih motorjih so delci ogljikovodiki, pepeli in anorganske snovi iz olja. V bencinskih motorjih tvorijo delce predvsem kapljice olja in ne saje. Ker so delci zelo majhnih premerov pod 100 nm, se ne morejo meriti gravimetrično, temveč se jih bo zagotovo v prihodnosti štelo. Pri bencinskih motorjih so za katalizatorjem masni tokovi ogljikovodikov zelo majhni, če katalizatorji v vozilu pravilno delujejo, to je, če krmilna elektronika vzdržuje vrednost lambda rahlo nad 1.



Slika 56: Merilni sistem za merjenje koncentracij v izpušnih plinih, levo: namestitvev akumulatorjev in jeklenk z dvostopenjsko nastavitvijo tlaka in desno: polnjenje akumulatorjev.

Za merjenje masnega toka delcev se uporablja sistem, kakršen je viden na sliki 57 v notranjosti avtobusa. Le-ta se sestoji poleg sistema za merjenje koncentracije plinov, kot smo ga opisali zgoraj, še iz več podsklopov za merjenje masnega toka delcev. Tega tvori merilna oprema Horiba OBS-2000 TRPM. V nadaljevanju bomo opisali ta merilni sistem.

Odjem za izpušne pline za merjenje masnega toka delcev je izveden tako, da je cevka s kolenom obrnjena proti viru (slika 55), to je proti toku izpušnih plinov iz motorja. Takoj za mestom odjema se izpušni plini razredčijo s prečiščenim zrakom (slika 54). Prečiščen zrak dovajamo po cevki do odjema, kjer ga vpihavamo na več mestih. Prečiščen zrak se očisti s HEPA filtrom. Za dovajanje zraka za redčenje plinov do HEPA filtra pri meritvi masnega toka delcev je v sistem vgrajen tudi dodaten kompresor, za poganjanje kompresorja pa je potreben dodaten generator ali pa je potrebna uporaba kompresorja, ki ga poganja motor z notranjim zgorevanjem.

Redčenje in preverjanje zelenega masnega toka izpušnih plinov je treba zelo natančno obvladati, saj sicer narobe določimo koncentracijo delcev. Za sistem DCS (angl. *diffusion charge sensor*) na sliki 57, ki meri časovno odvisnost

masnega toka delcev, je pomembno, da ga sinhroniziramo z delovanjem motorja za celotno trajanje cikla vožnje. Za to skrbi sistem deloma sam ob nekaterih potrebnih prednastavitvah uporabnika. Sinhronizacija delovanja motorja in sistema DCS omogoča časovno odvisno povezavo izpustov z režimom delovanja motorja z notranjim zgorevanjem tudi med npr. pospeševanjem.



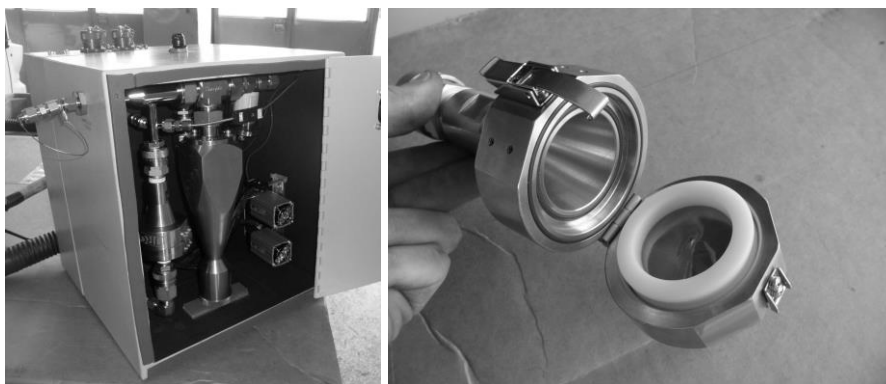
Slika 57: Merilni sistem za merjenje koncentracij plinov in masnega toka delcev avtobusa. Levo je sistem za merjenje koncentracij plinskih onesnažil v izpušnih plinih. Desno je nameščen sistem za merjenje masnega toka delcev. Sestavljen je iz ciklonskega ločevalnika in filtra (bela škatla v sredini na tleh) in sistema DCS (v sredini poleg jeklenk s plinom). Na desni strani je računalnik za nadzor sistema za merjenje delcev, napajalnik in priključna plošča za pretvornik A/D, povsem na desni pa HEPA filter sistema za redčenje.

Temperatura izpušnih plinov se zaradi redčenja zniža. Pri osebnih vozilih se v skladu z evropskim emisijskim standardom [Uredba (ES) št. 715/2007 evropskega parlamenta in sveta, 2007 in Pravilnik št. 83 Ekonomske komisije Združenih narodov za Evropo, 2015] vedno uporablja proporcionalno redčenje. Pri največjem masnem toku izpušnih plinov je redčenje najmanjše in skoraj neskončno pri minimalnem masnem toku izpušnih plinov. Redčenje je potrebno, ker skozi filter trdnih delcev teče vedno enak prostorninski tok izpušnih plinov. Prostorninski tok izpušnih plinov je pri prostem teku mnogo manjši kot pri polni obremenitvi motorja. Zaradi tega s proporcionalnim redčenjem dosežemo, da so obratovalne točke pri polni obremenitvi upoštewane bolj kot tiste pri delni obremenitvi.

Razredčeni izpušni plini po ogrevani cevi s temperaturo 52 °C nadaljujejo pot v ciklonski filter, kjer se odstranijo delci, večji od 10  $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>). Približno 90 % prostorninskega toka izpušnih plinov iz ciklonskega ločevalnika potuje skozi filter (približno 30 L/min), približno 10 % (približno 2,5 L/min) pa v sistem

DCS za časovno (dinamično) odvisnost masnega toka delcev. Merjenje s filtrom prikaže časovno povprečno vrednost, merjenje izvajamo gravimetrično. Na filtru se naberejo delci, njihovo količino pa izmerimo gravimetrično. Filter je papirnat ali teflonski. Teflonski filter ne vpija  $\text{NO}_2$ , je pa precej dražji. Kadar meritev ne poteka in je filter vstavljen, tok izpušnih plinov z elektromagnetnim ventilom preusmerimo v sekundarni filter, to je na sliki 57 na desni strani. Razlog temu preklopu je, da omogočimo zvezno delovanje merilnika.

Filter (slika 58) pred uporabo in po koncu uporabe s hitrimi spojkami odpremo. Papirnati filter vstavimo v filter z mrežico.



Slika 58: Levo: Sistem za merjenje povprečnega masnega toka delcev v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem. Levo tok izpušnih plinov vstopa v ciklon z zadnje strani omarice. V sredini je ciklon za odstranjevanje trdnih delcev  $\text{PM}_{10}$ . Iz ciklona potujejo izpušni plini, očiščeni delcev, večjih od  $10 \mu\text{m}$ . Ko poteka meritev, potujejo izpušni plini levo v filter. Kadar meritev ne poteka, ga z elektromagnetnim ventilom preusmerimo v desno, to je v sekundarni filter. Razlog temu preklopu je, da omogočimo zvezno delovanje merilnika toka. Desno: ohišje filtra z mrežico, v katero se vstavi papirnat vložek filtra, papirnatega vložka ni na sliki.

Povprečno količino trdnih delcev v filtru merimo gravimetrično, to je s tehtanjem. Filter pred tehtanjem pustimo vsaj 10 ur v merilnici, v kateri sta temperatura in vlažnost nadzorovana. Filter stehtamo z mikrogramsko tehtnico pred meritvijo in po njej. Ker so motorji z notranjim zgorevanjem čedalje boljši in je količina trdnih delcev na izstopu iz izpušne cevi čedalje manjša, je razliko včasih celo z mikrogramsko tehtnico težko izmeriti. Zato je pri novih dizelskih motorjih redčenje majhno, npr. 2-krat. Iz filtra gredo izpušni plini v okolico. Komora sistema merjenja povprečnega masnega toka delcev v izpušnih plinih motorjev z notranjim zgorevanjem izdelovalca Horiba



je izolirana in ogrevana v skladu s standardom za meritve masnega toka delcev na 52 °C.



Slika 59: Levo: notranjost avtobusa, pripravljenega na meritve. V sodih je balastna voda, ki simulira maso potnikov. V avtobusu je razporejenih še več akumulatorjev, ki prav tako služijo kot balast. Desno spodaj je agregat za proizvodnjo električne energije za delovanje merilnih naprav. Desno: meritve se v določenih primerih opravljajo tudi med vožnjo v realnem ciklu.

Del izpušnih plinov iz ciklonskega ločevalnika potuje namesto v papirnati filter v sistem DCS. Izhod merilnika DCS je plavajoč, to pomeni, da ničla ni dobro določena in zato sistem za pravilno delovanje potrebuje rezultat vsakokratne meritve tehtanja filtra.

Pri meritvah koncentracije plinov in masnega toka delcev moramo simulirati realne vozne razmere ali pa vozne razmere v skladu z enim izmed voznih ciklov.

Meritve sestave izpušnih plinov motorjev z notranjim zgorevanjem niso omejene samo na cestna vozila, temveč se jih lahko izvaja tudi na gradbenih strojih, terenskih vozilih ali kmetijskih strojih (angl. *NRCM non-road combustion machinery*), kar prikazuje slika 61. Meritve se izvajajo tudi za različna pogonska goriva.

Za potrebe določanja natančne lege avtomobila med vožnjo in za dinamično vrednotenje izpustov izpušnih plinov glede na delovno točko motorja se izvajajo tudi meritve lege vozila in atmosferske meritve (slika 62). Za merjenje lege vozila uporabljamo sprejemnik GPS in triosni merilnik pospeška. Merilna oprema za določanje natančne lege vozila ni del opreme PEMS, za raziskovalno delo pa je potrebna. Med okoljskimi parametri merimo temperaturo, vlažnost in barometriški tlak. Merjenje barometriškega tlaka je lahko izvedeno v analizatorju dimnih plinov, meritev temperature in vlažnosti

v okolju pa izvedemo običajno na strehi vozila, pri čemer moramo onemogočiti vpliv sončnega sevanja.



Slika 60: Namestitev opreme v avtobusih v nekaterih drugih meritvah koncentracije plinov in delcev v izpušnih plinih. Vsaka meritev zahteva dolgotrajno namestitev opreme po meri in preizkušanje posameznih podsklopov.



Slika 61: Namestitev opreme na traktorjih in terenskih vozilih. Vozila so med meritvami delovala na različna goriva: dizel, biodizel in hladno stiskano rastlinsko olje.

Analizatorji plinov, ki so bili uporabljeni pri meritvah in so prikazani na slikah od 53 do 61, se uporabljajo za raziskave delovanja motorjev z notranjim zgorevanjem in za potrebe homologacije vozil, meritve pa lahko izvajamo tudi za potrebe tehničnih pregledov vozil.

Meritve sestave plinov za potrebe tehničnih pregledov vozil imajo večjo merilno negotovost. Nekateri analizatorji so narejeni tako, da jih lahko uporabljamo samo zelo kratek čas, sicer npr. temperatura v merilni celici za neprosojnost prekomerno naraste. Analizatorji, ki se uporabljajo na tehničnih

pregledih, merijo koncentracijo izpušnih plinov z infrardečo spektroskopijo NDIR ali elektrokemično. Na tehničnih pregledih se merijo samo suhi plini, to pomeni, da iz izpušnih plinov pred vstopom v analizator odstranimo vodo.



Slika 62: Meritve lege vozila in atmosfere meritve, levo: sprejemnik signala GPS v avtomobilu z vgrajenim merilnikom pospeška ter analognimi in frekvenčnimi vhodi za spremljanje parametrov vozila, desno: dve anteni GPS na strehi avtobusa in namestitvev merilne opreme za merjenje okoljskih parametrov.

Pri štiritaktnih Ottovih motorjih se na tehničnih pregledih meri koncentracija izpustov ogljikovega monoksida CO, ogljikovega dioksida CO<sub>2</sub> in ogljikovodikov HC. Iz tega se izračuna vrednost  $\lambda$  po Brettschneiderjevi enačbi. Meritve se izvajajo pri prostem teku in povišani vrtilni frekvenci motorja pri neobremenjenem motorju. Za vrednosti ogljikovega dioksida CO<sub>2</sub> in ogljikovodikov HC meja izpustov ni predpisana, se pa obe vrednosti uporablja za izračun vrednosti  $\lambda$ .

Pri dizelskih motorjih se na tehničnih pregledih meri neprosojnost izpušnih plinov pri treh zaporednih pospeševanjih, pri čemer avtomobila ne zaviramo z valji.

Meritev neprosojnosti se uporablja za hitro oceno izpustov trdnih delcev, čeprav primerjava med neprosojnostjo in masnim tokom trdnih delcev ni vedno dobra. Merjenje koncentracije dušikovih oksidov NO<sub>x</sub> ima smisel samo pri obremenjenem motorju. Koncentraciji ogljikovega monoksida CO in ogljikovodikov HC sta pri dizelskih motorjih zanemarljiva v primerjavi z Ottovimi motorji [Gajendra Babu in Subramanian, 2013].

Uporaba valjev za zaviranje motorjev med obremenitvijo motorja pri tehničnih pregledih je zaradi cene nerealna. Prav tako je zaradi cene in zapletenosti pri tehničnih pregledih nerealna zahteva po uporabi sistemov za štetje delcev. Zaradi tega je pri dizelskih motorjih na tehničnih pregledih edino možno preverjanje še vedno meritev neprosojnosti. Meritev neprosojnosti izloči samo motorje, ki zelo močno onesnažujejo okolje z delci. Na Katedri za

energetsko strojništvo za merjenje neprosojnosti uporabljamo analizator AVL Ditest Dismoke 4000. Drugi izdelovalci opreme za uporabo pri tehničnih pregledih so Maha, SPX, Bosch itd.

V zadnjih letih se je masni tok delcev v povprečnem dizelskem motorju močno zmanjšal, ker pa se število delcev ni zmanjšalo, je v evropskem standardu o izpuštih Euro 6 poleg masnega toka predpisana tudi meritev števila delcev. Kdaj se bo meritev začela izvajati, je še v fazi usklajevanja in sprejemanja. Meritev se bo izvajala pri postopku homologacije vozila, ne pa tudi na tehničnih pregledih. Število delcev bo omejeno na  $6 \cdot 10^{11}$  delcev/km. Razlog za to spremembo je, da se je pri novih dizelskih motorjih zmanjšal masni tok delcev, ne pa tudi število. Povprečna velikost delcev se je zmanjšala, manjši delci npr. PM<sub>2.5</sub> pa so za zdravje bolj škodljivi kot veliki delci, ker prodrejo globlje v pljuča. Na ta način bodo omejeni tudi bencinski motorji z neposrednim vbrizgom goriva, ki so po načinu delovanja sorodni dizelskim motorjem. Z manjšanjem povprečne velikosti delcev je merilna metoda neprosojnosti čedalje bolj neprimerna.

## **2.10. Odstranjevanje onesnažil iz plinov**

Zaradi nenehnega naraščanja globalne imisije atmosferskih onesnaževal, razprševanje s pomočjo dimnikov in podobnih sistemov, ki temeljijo izključno na samočistilni sposobnosti atmosfere, ne omogoča doseganja sodobnih kriterijev čistosti ozračja. Zato skušamo onesnaževanje omejiti na izvorišnih onesnaženja in s pomočjo primernih postopkov in naprav iz odpadnih plinov oziroma onesnaženega plina izločiti na mestu izvora nastajanja onesnažil. Pri tem morajo izdelovalci in uporabniki zadovoljiti predpise največjih dovoljenih koncentracij posameznih onesnažil. Zelo znani so na primer predpisi o dovoljenih izpuštih vozil na motorni pogon, katerih izvajanje pa ni odvisno od lokalnega stanja ozračja. Izvajanje je omejeno prostorsko na določena mestna območja, kot je to primer v mestnih območjih v Nemčiji, pri nas pa v strogem centru Maribora.

V tem poglavju bomo kratko predstavili postopke za odstranjevanje onesnažil iz izpušnih in dimnih plinov za delce in pline. Z napravami za čiščenje plina je možno izločanje onesnažil s fizikalnimi, kemijskimi in fizikalno-kemijskimi postopki.

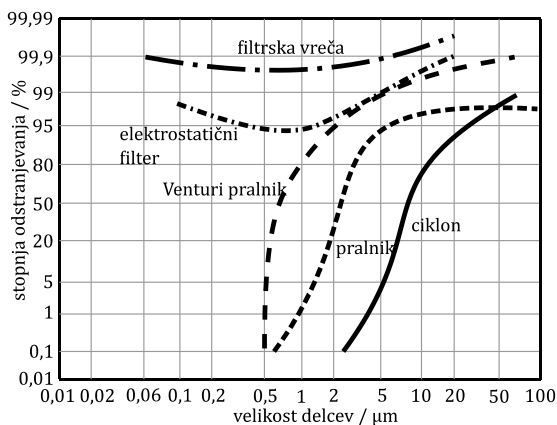
### **2.10.1. Odstranjevanje delcev**

Vrste naprav za izločanje onesnažil v obliki delcev ločimo glede na načelo, na osnovi katerega poteka izločanje delcev:

- usedalne komore (gravitacijske sile),
- ciklonski ločevalniki delcev (centrifugalne sile),
- vrečasti filtri (vztrajnostne sile, zadrževanje in difuzija),
- pralniki (dotik s kapljicami vode),

- elektrostatični filtri (elektrostatične sile).

Najboljše izločevanje dosežemo s filtrnimi vrečami, najslabše pa s cikloni. Primerjava stopnje izločevanja med različnimi metodami je podana na sliki 63 [Bank, 2006].

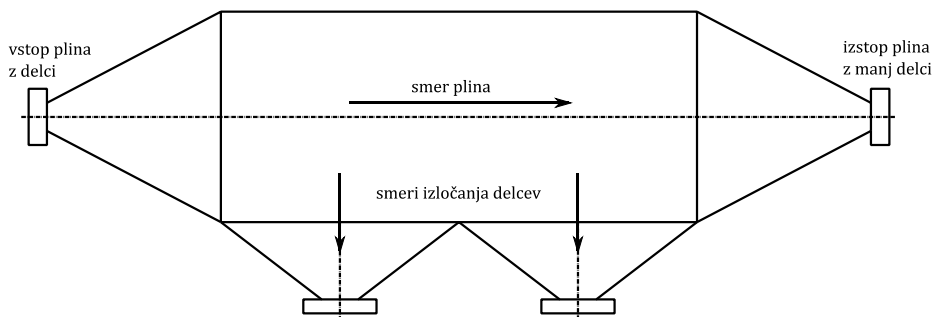


Slika 63: Učinkovitost različnih metod odstranjevanja delcev v odvisnosti od velikosti delcev. Dolžina črt prikazuje področje, kjer je posamezna metoda uporabna [Bank, 2006].

V nadaljevanju bomo predstavili različne vrste naprav za odstranjevanje delcev iz plinov.

### 2.10.1.1. Usedalne komore

Usedalna komora je velika jeklena posoda, vstavljena v odvodno pot plinov pred izpustom v okolico. Povečanje preseka v usedalni komori zmanjša hitrost onesaženega plina, zato se težji delci usedejo.



Slika 64: Enostavna usedalna komora

Majhne hitrosti v usedalni komori narekujejo velike dimenzije izločevalnih komor pri velikih prostorninskih tokovih plina, zato je gravitacijska metoda

čiščenja onesnaženega plina primerna za izločanje delcev večjih premerov. S tega stališča je smiselno določiti minimalni premer delca, ki ga je pri danih pogojih in velikosti gravitacijske komore še moč izločiti iz plina. Pri tem predpostavimo 100 % izkoristek izločanja, kar pomeni, da se na poti od vstopa v komoro in do izstopa izločijo vsi delci. Tako je čas potovanja v vodoravni smeri komore (10) enak času posedanja delcev v navpični smeri in ga je mogoče oceniti na naslednji način

$$t = \frac{H}{c_d} = \frac{L}{c_h} \quad . \quad (10)$$

$c_d$  je hitrost posedanja delcev in  $c_h$  je hitrost v vodoravni smeri.  $H$  in  $L$  sta višina in dolžina usedalne komore. Če upoštevamo Stokesovo enačbo (10) za silo upora na idealno okroglih delcev z radijem  $R$  v toku tekočine

$$F_u = 6\pi\mu Rc \quad , \quad (11)$$

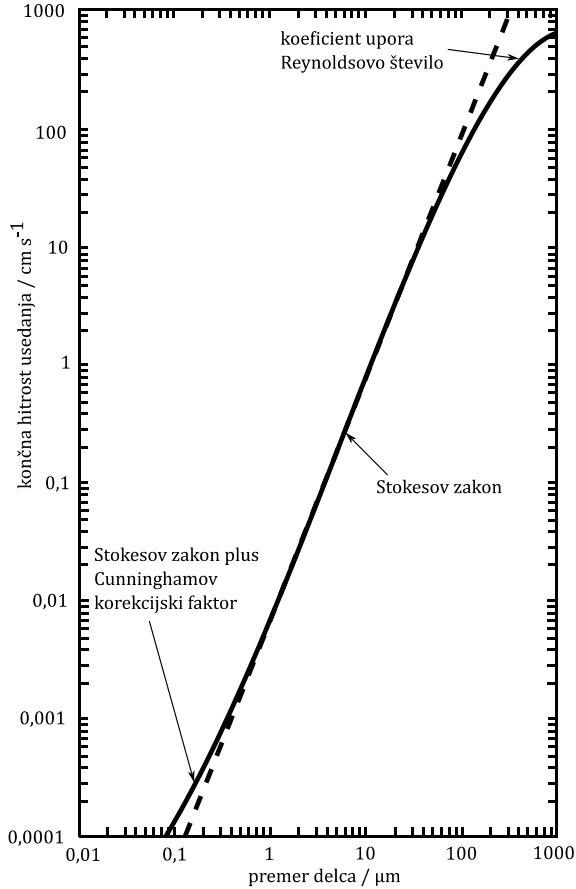
kjer je  $\mu$  dinamična viskoznost tekočine, dobimo rešitev (11) za hitrost  $c_d$  usedanja delca s premerom  $R$ , upoštevati moramo ravnovesje sil vzgona, teže in upora (Samec, 2006)

$$c_d = \frac{2g(\rho_d - \rho_{pl})R^2}{9\mu} \quad . \quad (12)$$

$\rho_d$  je gostota delca in  $\rho_{pl}$  je gostota plina. V praksi je npr. usedalna hitrost kovinskega delca  $c_d$  s premerom 1 mm približno 6 m/s, delca s premerom 1  $\mu\text{m}$  pa približno  $6 \cdot 10^{-5}$  m/s. Dodatno, pri majhnih in velikih premerih zgornja enačba ne drži, eksperimentalni podatki in z njim povezani eksperimentalni modeli so podani na sliki 65.

Pri majhnih premerih pod npr. 5  $\mu\text{m}$  se velikost delca približa prosti poti molekul plina in delci zdrknejo mimo molekul. Zaradi tega je sila upora manjša od predvidene po Stokesovi enačbi in hitrost usedanja večja, kot jo napove Stokesov zakon.

Pri velikih premerih se pojavijo neujemanja zaradi nastanka lokalne turbulentne plasti okoli delca in je delec navidezno večji, s Stokesovim zakonom zato precenimo hitrost usedanja delca.



Slika 65: Usedalna hitrost delcev v odvisnosti od premera. Za srednje velike premere Stokesov približek dobro velja, za velike in za majhne premere pa so potrebni popravki.

Usedalne komore se v praksi redko uporabljajo, ker za dobro delovanje potrebujejo zelo veliko prostornino, imajo pa tudi slabšo učinkovitost. Redko se zato uporabljajo zgolj kot prva stopnja v procesu čiščenja, to je pred bolj učinkovitimi sistemi za odstranjevanje delcev. Minimalni premer delcev, ki se bodo izločili v usedalni komori, je v skladu s Stokesovo enačbo (12) enak (Samec, 2006)

$$R = \sqrt{\frac{9\mu c_d H}{2gL(\rho_a - \rho_{pl})}} \quad (13)$$

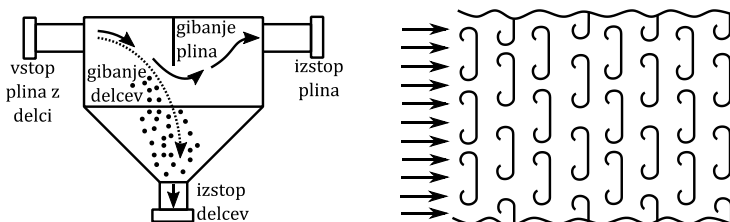
V primeru velike gostote delcev je gostota plina zanemarljiva in jo lahko v gornji enačbi izpustimo. V praksi obstaja veliko število konstrukcij gravitacijskih komor za izločanje delcev iz plinov različnih premerov. Howardova gravitacijska komora je sestavljena iz večjega števila vodoravno postavljenih plošč, na katere se usedajo delci. S tako konstrukcijo je možno na sorazmerno enostaven način zagotoviti zelo dobre pogoje (zmanjšanje vpliva turbulentnih vrtincev v toku) izločanja delcev tudi manjših premerov (približno  $> 10 \mu\text{m}$ ). Minimalni premer delcev, ki se bodo izločili (13), je odvisen od števila vodoravno postavljenih plošč  $n$ , saj se na ta način navidezno zmanjša višina  $H$  (Samec, 2006)

$$R = \sqrt{\frac{9\mu c_d H}{2gL(\rho_d - \rho_{pl})n}} \quad (14)$$

V usedalnih komorah se usedejo najprej težji delci, potem pa lažji in manjši delci, kar lahko izkoristimo za ločevanje delcev po aerodinamičnem premeru.

### 2.10.1.2. Usedalne komore s pregradami in vztrajnostni zbiralniki

Usedalne komore s pregradami (angl. *baffle chamber*) in vztrajnostni zbiralniki so naprave za izločanje delcev iz plina na osnovi vztrajnostnih sil. S postavljanjem pregrad in ovir različnih oblik vplivamo na hitro spremembo smeri toka plina. Usedalna komora s pregradami je prikazana na sliki 66. Delci zaradi svoje vztrajnosti ne morejo slediti tako hitrim spremembam smeri toka, zato udarijo ob pregrado in ob njej zdrsejo na dno. Oblika pregrad in ovir je odvisna predvsem od vrste delcev in premera (Samec, 2006). Pogosto so ovire v obliki dvojne črke U. Ovire se lahko postavljajo v več vrstah. Postavljanje ovir ima za posledico nezaželen padec tlaka, po drugi strani pa se poveča učinek izločanja delcev.



Slika 66: Levo: usedalna komora s pregrado, desno: ovire v vztrajnostnih zbiralnikih

V skupino usedalnih komor s pregradami spadajo tudi izvedbe, kjer namestimo v usedalno komoro žaluzije. Žaluzije so primerne za izločanje prašnih delcev različnih velikosti. Uporabljajo se izvedbe, kjer se preusmeri

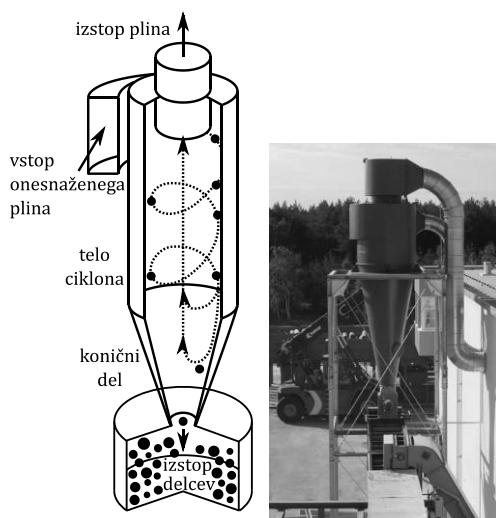


tok za več kot  $180^\circ$  in so že podobne ciklonskim izločevalnikom in delujejo na osnovi centrifugalnih sil.

Usedalne komore s pregradami različnih izvedb uporabljamo kot t. i. predstopnje za druge metode izločanja delcev.

### 2.10.1.3. Cikloni

Ciklonsko odpraševanje ali ciklonsko ločevanje je najbolj razširjen suhi postopek za odpraševanje (odstranjevanje) trdnih delcev iz suspenzije (slika 67). Za razliko od gravitacijskega odstranjevanja suspendiranih delcev, ciklonski ločevalniki ali cikloni uporabljajo centrifugalno silo, zato jih lahko imenujemo tudi centrifugalni odstranjevalci delcev. V ciklonskih ločevalnikih je mogoče doseči od 5-krat pa vse do 2000-krat večje sile kot pri gravitacijskih ločevalnikih. Ciklonski ločevalniki v glavnem ne morejo doseči visoke kakovosti čistoče plina, zato se uporabijo za predčiščenje, v naslednjih stopnjah pa se uporabljajo vrečasti filtri ali elektrostatični filtri.

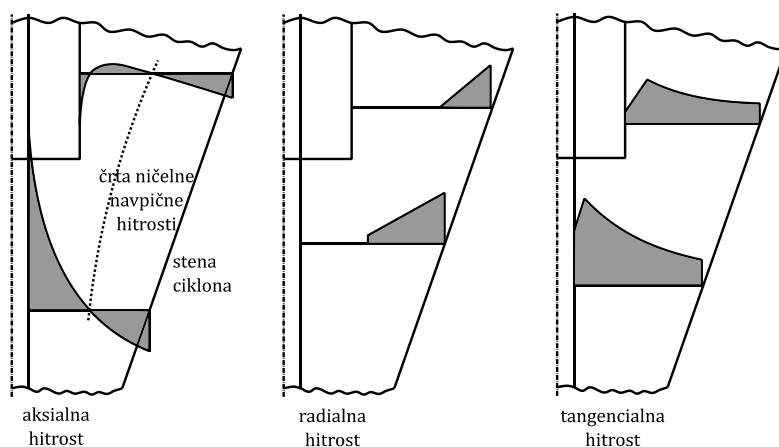


Slika 67: Levo: delovanje ciklona. Plin vstopa tangencialno in se v valju ciklona zavrtinči. Delci se naberejo ob steni in padejo na tla, plin pa se odvede skozi potopljeno cev v sredini. V sredini: ciklon v uporabi v industrijskem obratu [www.hoecker-polytechnik.com].

Ciklonski ločevalniki se uporabijo v procesni industriji, npr. za recikliranje in regeneracijo katalizatorjev v rafinerijah nafte, v postrojenjih prehranske industrije in drugo. Običajna učinkovitost je 90 % ali več za delce, večje od  $10\ \mu\text{m}$ , določene izvedbe pa dosežejo učinkovitost 99 % za delce, večje od  $5\ \mu\text{m}$  in velike gostote delcev. Plin v ciklonski ločevalnik vstopa tangencialno

(slika 67), nato preide v ciklonskem ločevalniku v krožno gibanje plina in delcev, kot posledica vrtenja pa nastanejo centrifugalne sile, ki delce silijo proti steni in nato v izstopni del ciklona, v katerem se zberejo. Ciklonski ločevalniki se izdelujejo v širokem razponu dimenzij (od nekaj centimetrov do več metrov premera) in v zelo različnih izvedbah. Običajna izhodna hitrost plina je od 15 do 30 m/s.

Prednosti ciklonskega ločevanja so enostavno delo, majhni začetni stroški in stroški vzdrževanja, ker ni premičnih delov, možnost dela pri povišanih temperaturah, nizka zahteva po posluževanju itd. Slabosti so velik padec tlaka in posledično visoki obratovalni stroški, majhna učinkovitost za zelo majhne delce, ni učinkovit za odstranjevanje delcev manjših od 5  $\mu\text{m}$ , problemi v delovanju pa nastanejo pri temperaturah višjih od 400  $^{\circ}\text{C}$ .



Slika 68: Porazdelitev hitrosti v ciklonskem ločevalniku

Sestavni deli ciklonskega ločevalnika so vstopna komora, konusni del, kjer poteka intenzivno vrtnčenje, zbirna komora za prah in izstopna cev za plin. Izstopna cev za plin je potopljena v notranjost ciklona.

Multiciklon je sestavljen iz velikega števila ciklonov manjših dimenzij, običajno premera od 15 do 60 cm, povezanih vzporedno ali zaporedno. Tangencialni tok plina v vsakem ciklonu se v multiciklonih doseže s posebno obliko v vstopnem delu. Multicikloni dosegajo učinkovitosti do 90 % za delce velikosti od 5 do 10  $\mu\text{m}$ .

Pri pripravi stisnjenega zraka se pojavlja vlaga v obliki drobnih kapljic. V ciklonskem ločevalniku pri pripravi stisnjenega zraka se kapljice mehansko odstranjujejo. Ciklonski ločevalnik je lahko nameščen na izstopu iz kompresorja takoj za hladilnikom stisnjenega zraka. S ciklonskim ločevalnikom tako razbremenimo gradnike filterskega in sušilnega sistema, ki sicer v večji meri vplivajo na kakovost stisnjenega zraka.

Če obravnavamo osamljen delec v toku plina v zgornjem cilindričnem delu ciklona (slika 68), lahko zapišemo, da delec kroži okrog osi ciklona na radiju  $r$ . Na delec delujejo centrifugalna sila, upor plina, vzgon in teža.

Če predpostavimo, da se delec premika po spirali, lahko njegovo hitrost razbijemo na tangencialno  $c_t$  in radialno komponento  $c_r$ . Predpostavimo, da velja Stokesov zakon. Stokesovo enačbo (10) zapišemo za primer ciklona in nadomestimo hitrost z radialno hitrostjo in radij z radijem delca. Ugotovimo, da je sila upora  $F_u$  kroglice z radijem  $R$  pri premikanju s hitrostjo  $c$  v ciklonu enaka (14)

$$F_u = 6\pi\mu R c_r \quad . \quad (15)$$

Če je gostota delca enaka  $\rho_d$ , lahko z enačbo (16) zapišemo centrifugalno komponento sile na radiju  $r$

$$F_c = m \frac{c_t^2}{r} = \frac{4}{3} \pi \rho_d R^3 \frac{c_t^2}{r} \quad . \quad (16)$$

Za ravnovesje sil na delec v toku plina lahko zapišemo, da je vsota centrifugalne sile, sile vzgona in sile upora enaka nič. Kot silo "vzgon" upoštevamo (16), da je gostota delca navidezno manjša, če plava v plinu in je sila na delec usmerjena v radialni smeri, prava sila vzgona pa deluje v aksialni smeri.

$$F_{vzg} = -V_d \rho_f \frac{c_t^2}{r} = -\rho_f \frac{4\pi R^3}{3} \frac{c_t^2}{r} \quad . \quad (17)$$

Ravnovesje sil zapišemo z enačbo (17)

$$F_u + F_c + F_{vzg} = 0 \quad . \quad (18)$$

Če vstavimo vse posamezne izraze za sile v enačbo za ravnovesje sil (17), lahko izpostavimo (18) radialno hitrost  $c_r$

$$c_r = -\rho_f \frac{2R^2}{9\mu} \frac{c_t^2}{r} (\rho_d - \rho_{pl}) \quad . \quad (19)$$

Podobno enačbo smo zapisali tudi za primer usedanja v usedalni komori (11). V primeru, da je gostota tekočine večja kot gostota delca, se delec premika proti osi, če pa je večja gostota delca, se premika stran od osi proti steni ciklonskega ločevalnika.

Določitev učinkovitosti izločevanja delcev glede na njihovo velikost pri ciklonih je še težja kot v primeru gravitacijskih komor. Za določanje potrebnih mer in učinkovitosti se uporabljajo izkustvene zveze. Zagotovo bodo izločeni le dovolj veliki delci, zato za referenčno velikost delcev izberemo tiste delce, ki

bodo 50 % izločeni na osnovi njihove mase. Velikost teh delcev določimo na osnovi empirične enačbe npr. po Lappleju [Wang in sod., 2006]

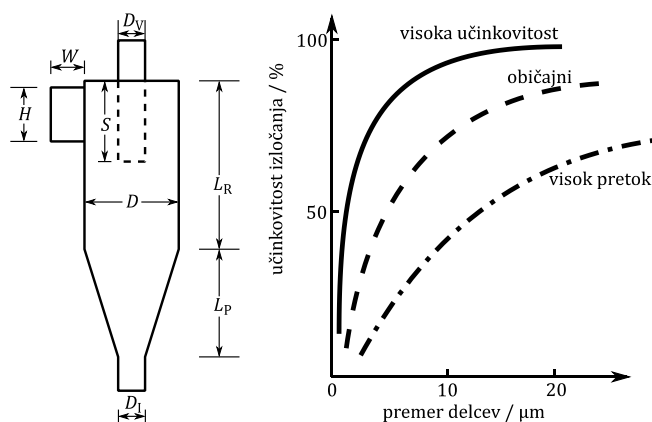
$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu W}{2\pi N_e c_i \rho_d}} \quad , \quad (20)$$

kjer je  $\mu$  dinamična viskoznost plina,  $W$  širina vstopne odprtine ciklona v skladu z oznakami na sliki 69,  $N_e$  število efektivnih vrtljajev delcev v ciklonu,  $c_i$  vstopna hitrost plinov oziroma onesnaženega zraka in  $\rho_d$  gostota delcev. Število efektivnih vrtljajev delcev v ciklonu  $N_e$  se določa s še eno izkustveno enačbo, npr. po Lappleju [Wang in sod., 2006]

$$N_e = \frac{L_b + \frac{L_c}{2}}{H} \quad . \quad (21)$$

$L_b$ ,  $L_c$  in  $H$  so mere ciklona, kot so podane na sliki 69.

Ciklone običajno izdelujemo na osnovi standardnih dimenzij v odvisnosti od premera ciklona in od tega, kakšno učinkovitost želimo, da bo ciklon imel. Visokoučinkovit ciklon bo bolje ločeval delce in imel večji upor, skozi ciklon za velik prostorninski tok pa bo tekla večji prostorninski tok, tak ciklon bo imel manjši upor in slabše ločevanje trdnih delcev.



Slika 69: Ciklonski izločevalnik delcev, levo: označitev geometrijske oblike ciklonskega izločevalnika, desno: odvisnost učinkovitosti izločanja [Schnelle in Brown, 2001].

Od izbire načina delovanja sistema odpraševanja sledi, kakšne mere mora imeti ciklonski ločevalnik. Učinkovitost izločanja delcev določimo v odvisnosti od premera, kot je to prikazano na sliki 69.

Preglednica 2. Odvisnost mer ciklonskih izločevalnikov od A do E od učinkovitosti in prostorninskega toka [Schnelle in Brown, 2001]. Ciklon vrste A je najučinkovitejši, ciklon vrste E pa ima največji prostorninski tok.

	vrsta ciklona					
	visoka učinkovitost		klasični		velik prostorninski tok	
	A	B	C	Č	D	E
višina vstopa $H/D$	0,5	0,44	0,5	0,5	0,75	0,8
širina vstopa $W/D$	0,2	0,21	0,25	0,25	0,375	0,35
premer cevi izstopa $D_v/D$	0,5	0,4	0,5	0,5	0,75	0,75
višina generatorja vrtinca $S/D$	0,5	0,5	0,625	0,6	0,875	0,85
višina telesa ciklona $L_r/D$	1,5	1,4	2	1,75	1,5	1,7
višina konusa $L_p/D$	2,5	2,5	2	2	2,5	2
premer izstopa prahu $D_i/D$	0,375	0,4	0,25	0,4	0,375	0,4

#### 2.10.1.4. Filtrne vreče

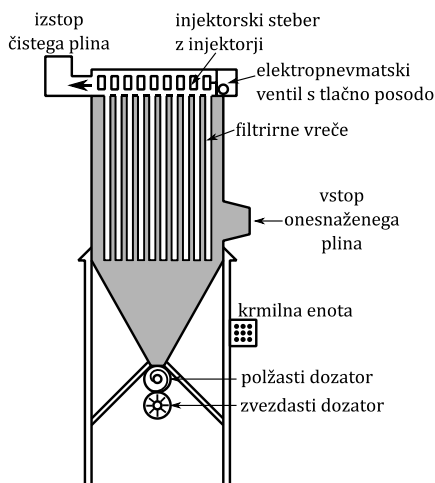
Filtrne vreče (angl. *bag filter*, *naghouse ali fabric filter*) iz tkanine se v industriji zelo pogosto in uspešno uporabljajo. Uporabljamo jih za izločanje delcev iz plinov v industrijskih postrojenjih. Do izločanja delcev prihaja zaradi toka plina skozi tkanino, ki zaradi gostega tkanja onemogoča prehod delcev. Pri tem je izrednega pomena parameter propustnosti filtra, ki določa velikost delcev, ki lahko prehajajo skozi filtersko tkanino. Prepustnost delcev skozi filter, torej delcev, ki jih z določeno gostoto tkanja tkanine ni mogoče zadržati, je največja za najmanjše delce in z naraščanjem velikosti delcev vedno manjša. Pri toku plinov z delci skozi tkanino prihaja do izločanja delcev na tkanini. Tkanina je običajno zvita v obliki vreč v več slojih, plisirana itd. Po obliki so filtri kasetni, žepasti, vrečasti, rokavni itd. Filtri iz tkanine so predvsem namenjeni za izločanje delcev v trdem agregatnem stanju. Običajni materiali filterske tkanine so bombaž, volna, steklo in razna sintetična vlakna. Največ se uporabljajo sintetična vlakna, vse pogosteje pa se uporabljajo tudi steklena vlakna, ki so primerna za izločanje delcev iz plinov višjih temperatur. Ker je vsak filtrni sistem projektiran za vsakega končnega uporabnika posebej, je zelo pomembno vnaprej definirati sledeče procesne parametre, na podlagi katerih izberemo najprimernejši material:

- temperaturo v sistemu,
- količino prahu v umazanem plinu,
- velikost delcev,
- prostorninski tok plina,
- abrazivnost delcev,
- mehanske faktorje (sistem čiščenja, sistem instalacije filter vreče),

- kemijske lastnosti prahu in plinov.

Čiščenje izločenih delcev se vrši na različne načine: z otresanjem, z izpihovanjem s povratnim zrakom in z izpihovanjem s pomočjo impulznega vpihovanja komprimiranega zraka.

V Sloveniji je več podjetij, ki izdelujejo materiale za filtre in filtrske sisteme. Primer industrijske uporabe filtrnih vreč je prikazan na sliki 70.



Slika 70: Shema delovanja vrečastega filtra. Temen del prikazuje umazan plin in svetel del čist plin.

Onesnažen plin, ki nosi s seboj trdne delce prahu, vstopa v filter skozi vstopno odprtino in se v vstopnem kanalu porazdeli po celotni dolžini komore filtra. Vstopna hitrost se v notranjosti zmanjša toliko, da se groba frakcija prahu iz onesaženega plina izloči že v samem zbirnem konusu. Delno očiščen tok plina nadaljuje z gibanjem ob delovni površini (umazani del vreče) in prehaja v notranjost (čisti del vreče). Pri tem se na zunanji strani vreče nabira plast prahu. Očiščen plin se nato giblje proti ohišju filtra in gre nato skozi izstopni kanal v cevovod in prek centrifugalnega ventilatorja zapusti filter. Trdne delce, prisesane na zunanji del vreče, odstranimo s curkom injektorsko vbrizganega zraka, ki se v cikličnih presledkih vbrizga v vrečo v nasprotni smeri. Vreča je med delovanjem (čiščenjem onesaženega plina) zaradi podtlaka rahlo napeta v notranjost, vendar le toliko, kot dovoljujejo jeklene nosilne košare. Pri vbrizgavanju zraka iz tlačne posode, ki skozi injektorske šobe posega še del sekundarnega plina iz glave filtra, nastopi v vreči trenutni nadtlak. Vreča se napne, strese in del prečiščenega plina za trenutek preide iz notranje na zunanjo stran vreče. Prehod plina, razširitev in stresanje vreče povzročijo učinkovito odstranjevanje prisesanih trdnih delcev. Delci prahu, združeni v večje delce, zaradi gravitacije padajo v zbirni konus filtra. Prah iz zbirnega

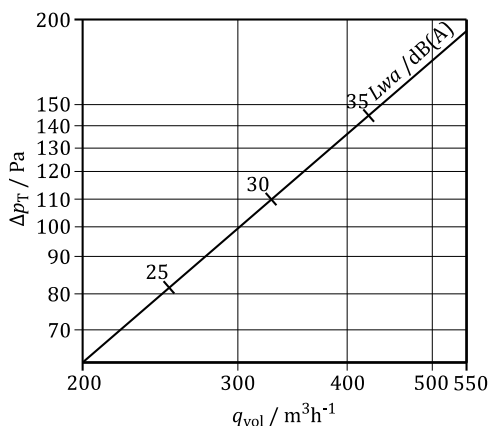
konusa kontinuirano odvajamo s pomočjo polžnega transporterja in zvezdastega dozatorja nazaj v proces ali v zbirne posode.

Zaradi intenzivnega in nastavljivega sistema čiščenja filtrskih vreč je uporabnost vrečastih filtrov zelo široka in primerna tudi za najtežje pogoje filtriranja (slika 71), kakršni so v topilnicah, livarnah, brusilnicah, kamnolomih, cementarnah, pa tudi npr. v čistih sobah (slika 72) itd.



Slika 71: Izvedba vrečastega filtra [www.wikipedia.org]

Pomembna značilnost filtrov je njegova uporabna karakteristika v odvisnosti od prostorninskega toka. V primeru, da je filter vgrajen v sistem za filtriranje notranjosti prostorov, je pomembna tudi njegova hrupnost (slika 72).



Slika 72: Primer uporabne karakteristike vrečastega filtra v filtrirni enoti za absolutno filtracijo zraka za stropne ali stenske filtrske enote.

### 2.10.1.5 Filtri delcev dizelskih motorjev (DPF)

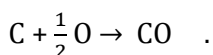
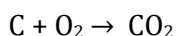
Filter delcev dizelskih motorjev (angl. *diesel particulate filter DPF*) so naprave, ki iz izpušnih plinov odstranijo delce. Z dobro delujočim filtrom delcev je lahko pri dizelskih motorjih masni tok izpusta delcev manjši kot 0,001 g/km, pri čemer evropska direktiva Euro 6 za dizelske motorje zahteva masni tok manjši kot 0,005 g/km in število delcev manjše od  $6 \cdot 10^{11}$ . Uporabe filtrov delcev sicer ne zahteva nobena evropska direktiva, vendar standardov o izpustih ni mogoče doseči brez njih. Shema delovanja filtra delcev dizelskih motorjev je prikazana na sliki 73. Najpogostejši material, iz katerega so narejeni filtri delcev, je keramika, kakršna se uporablja kot substrat tudi v tristeznih katalizatorjih.

V filtru se delci zadržijo dalj časa in ne tečejo zgolj skozi, kot na primer pri tristeznem katalizatorju. Različne izvedbe filtrov delcev dizelskih motorjev zadržijo glede na premer delcev od 30 % delcev pa do več kot 95 % delcev. Idealen filter delcev bi bil sposoben filtrirati najmanjše delce, imel nizek padec tlaka, bil bi majhen, poceni itd.

Filtri so lahko regenerativni ali pa za enkratno uporabo. V vozilih najdemo vedno regenerativne filtre, medtem ko se za nepremično uporabo uporabljajo filtri obeh vrst. Filter avtomobil regenerira, kadar je filter poln in ob primernem voznem režimu (npr. avtocestna vožnja). Če vozilo uporabljamo le v mestu, filtra ni mogoče regenerirati.

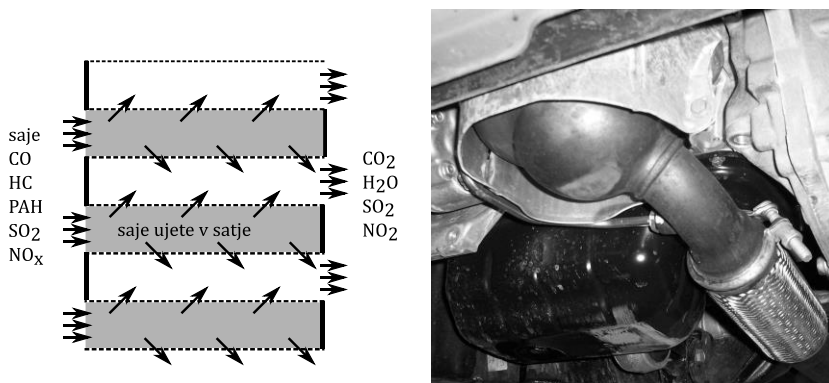
V motornih vozilih uporabljamo filtre delcev, ki so lahko aktivni, pasivni ali kombinacija obeh vrst. Večina regenerativnih filtrov uporablja termično regeneracijo, pri kateri se delci oksidirajo v pline. To se zgodi pri temperaturah nad 600 °C [Goldenberg, 1983]. Pri nizkih temperaturah pod 400 °C je oksidacija delcev zelo počasna in nepopolna. Temperatura izpušnih plinov dizelskih motorjev je prenizka, da bi omogočala samodejno regeneracijo. Regeneracija delcev je zato mogoča, če znižamo potrebno temperaturo za oksidacijo na nivo temperatur pri običajnem delovanju ali pa če zvišamo temperaturo v filtru na vrednost, ko se bo začela oksidacija (zgorevanje delcev). Prvi sistem imenujemo pasivni, drugi pa aktivni.

Pri **pasivnih sistemih regeneracije** delcev temperaturo oksidacije delcev znižamo z uporabo katalizatorja. Pri **aktivnih sistemih regeneracije** avtomobil poviša temperaturo v filtru z dodajanjem zunanega vira energije, kadar je filter poln. To je lahko z dizelskim gorivom ali pa z električno energijo. Pri dodajanju energije z dizelskim gorivom avtomobil pozno v ciklu zgorevanja vbrizga dodatno gorivo ali pa se gorivo vbrizga naravnost v izpušni sistem. Reakcija oksidacije delcev poteka na naslednja dva načina:





Tak način zgorevanja je običajen pri aktivnih filterih delcev dizelskih motorjev. Obstaja tudi oksidacija prek dušikovega dioksida, ki poteka pri nižjih temperaturah in pri katalitičnem načinu zgorevanja delcev. Zaželena je oksidacija v ogljikov dioksid  $\text{CO}_2$ , vendar ob pomanjkanju kisika  $\text{O}_2$  lahko nastane tudi ogljikov monoksid  $\text{CO}$ . Hitrost zgorevanja ogljika je močno odvisna od temperature, pri visoki temperaturi je mnogo hitrejša. Hitrost oksidacije delcev je mnogo počasnejša kot hitrost oksidacije plinov, zaradi tega se delci ne oksidirajo v običajnih tristesnih katalizatorjih. Delci se morajo v filtru zadržati dalj časa, kot je to v tristesnih katalizatorjih, ki so pretočni.



Slika 73: Filter delcev dizelskih motorjev, levo: shema delovanja, desno: vgradnja filtra v vozilo (okrogel zadebeljen del zgoraj levo) [www.wikipedia.com]

### 2.10.1.6 Elektrostatični filtri

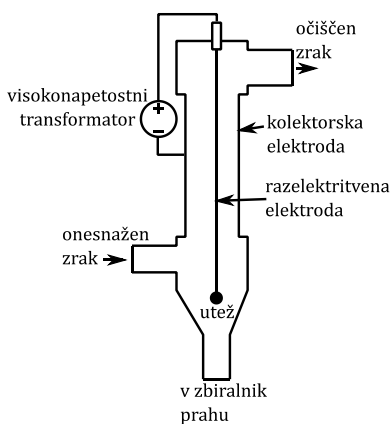
Za izločanje delcev onesnažila iz zraka ali plinov se zelo pogosto uporabljajo elektrostatični filtri, poenostavljeno jih imenujemo tudi elektro filtri. Načelo izločanja delcev temelji na toku plinov ali zraka z delci skozi elektrostatično polje (slika 73). Električno polje ustvarimo z dvema elektrodama, aktivno elektrodo in zbiralno elektrodo. Aktivna elektroda je žica majhnega preseka z mnogo manjšo površino, kot jo ima zbiralna elektroda, ki je lahko izdelana v obliki plošče ali cevi (slika 74). Razdalja med aktivno in zbiralno elektrodo je le nekaj centimetrov. Obe elektrodi sta priključeni na izvor enosmernega toka visoke napetosti. Aktivna elektroda je v večini primerov negativno naelektrena (katoda), zbiralna pa pozitivno (anoda) naelektrena, med njima ustvarimo napetost več desetstisoč voltov. Med obema elektrodama nastane električno polje z visoko električno poljsko jakostjo, kar imenujemo korona. V koroni se plin ionizira, pri čemer anioni v plinu potujejo k prosti pozitivno nabiti zbiralni elektrodi anodi. Anioni, ki potujejo proti zbiralni elektrodi, trčijo ob delce onesnažila v plinu in jih električno nabijejo. Ker so anioni iz plina veliko manjši od najmanjših delcev onesnažila in ker je anionov zelo

veliko, se električno nabijejo vsi delci onesnažila v plinu. Nabiti delci nato potujejo proti zbiralni elektrodi. Na zbiralni elektrodi se delci zaradi naboja zadržijo, ker jih na zbiralno elektrodo pritiska elektrostatična sila. Za uspešno delovanje morajo biti delci prevodni, tako da naboj z delcev počasi prehaja na zbiralno elektrodo. Zato se sčasoma, ko se na zbiralni elektrodi nabirajo novi in novi delci, debelina plasti povečuje, plast pa postaja čedalje večji upornik. Z debeljenjem plasti notranji delci počasi postanejo električno nevtralni oz. izgubijo naboj, tako da jih elektrostatična sila ne pritiska več na zbiralno elektrodo. Tako se lahko zgodi, da se celotna plast odlepi in pade v zbiralno komoro za elektrofiltrski prah. Poleg odlepljanja celotne plasti pa lahko nabiranje delcev na zbiralni elektrodi povzroči še eno posledico. Zaradi debeljenja plasti na zbiralni elektrodi se zniža efektivna napetost med obema elektrodama, zato se delovanje elektrostatičnega filtra poslabša.

Delci se s pasivne elektrode ne odlepijo vedno sami od sebe. Delce s pasivne elektrode prisilno odstranimo s tresenjem (elektromagnetno, pnevmatsko, mehansko) ali spiranjem, odvisno od njihovega agregatnega stanja. Pri tem nastaja ozon, nastanek katerega zmanjšamo z dvostopenjskim elektrostatičnim filtrom. Prvi del imenujemo ionizator, drugi pa zbiralnik ali kolektor.

Poleg termoelektrarn imajo vgrajene elektrostatične filtre tudi toplotne postaje na biomaso, sežigalnice odpadkov, motorni prostori v prekoceanskih ladjah, cementarne, pri izdelavi mineralne volne itd. Različni primeri uporabe so prikazani na sliki 75.

Postopek nadaljnje obdelave prahu je odvisen od vrste materiala in poteka, podobno kot v ostalih primerih izločanja delcev.



Slika 74: Shema delovanja enostopenjskega elektrostatičnega filtra

Elektrostatične filtre lahko delimo na nizkonapetostne dvostopenjske in enostopenjske visokonapetostne enote. Nizkonapetostni elektrostatični filtri

delujejo pri napetostih od 6000 do 12000 V in jih najpogosteje uporabljamo pri klimatizaciji, namenjeni pa so izločanju kapljic. Visokonapetostni elektrostatični filtri delujejo pri napetostih od 30 do 100 kV.



Slika 75: Cevna vrsta elektrostatičnih filtrov, levo: zbiralne elektrode, desno: zbiralne elektrode z vstavljenimi palicami - negativno nabitimi elektrodami [www.wikipedia.org].

Dve lastnosti delcev močno vplivata na delovanje elektrostatičnega filtra, upornost in porazdelitev po velikosti.

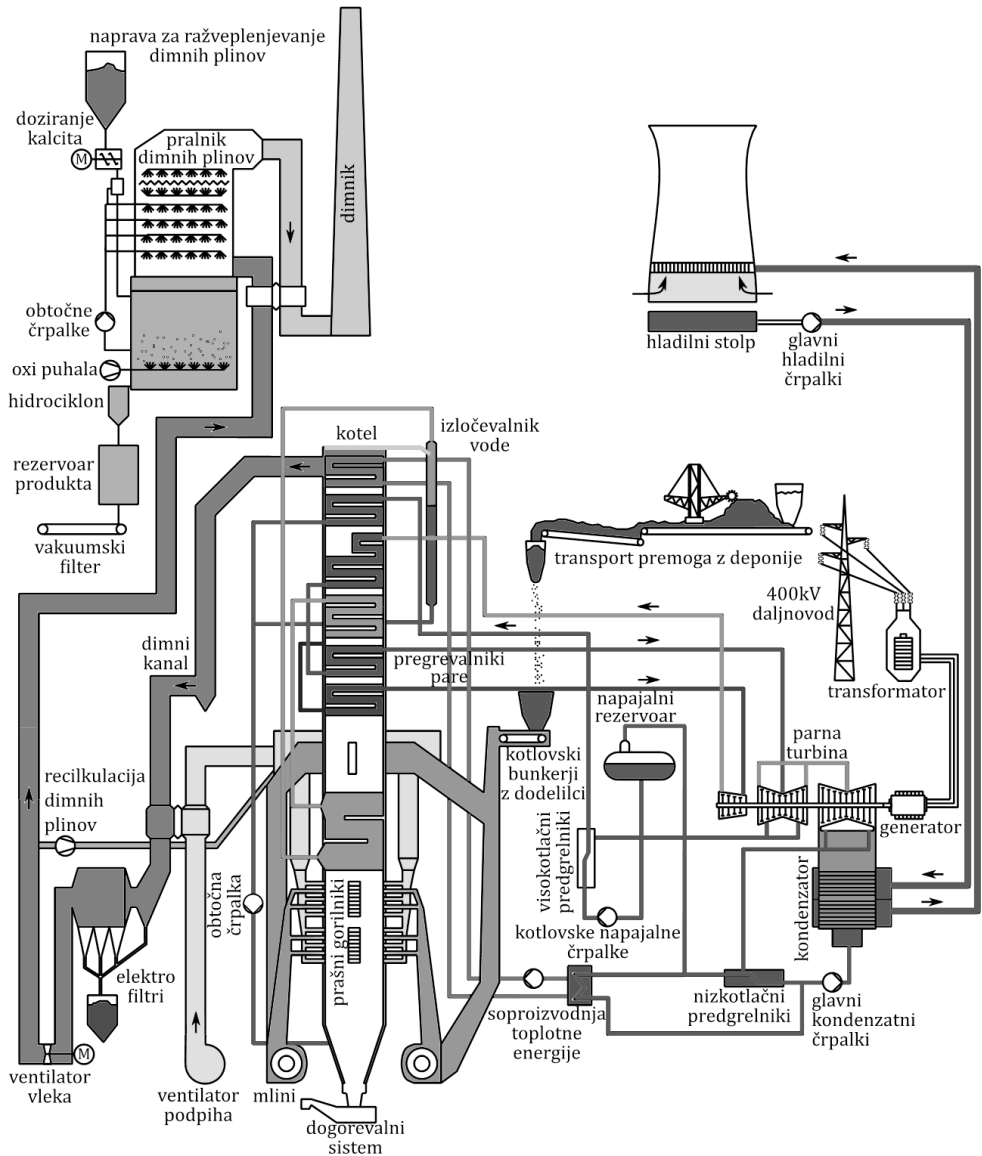
Upornost delcev v elektrostatičnem filtru močno vpliva na odstranjevanje delcev. Delci, ki imajo veliko upornost, in delci, ki imajo majhno upornost, so problematični za odstranjevanje. Delci, ki imajo zelo majhno upornost, se zelo hitro nabijejo, prav tako pa v zbiralniku zelo hitro oddajo naboj. Ko naboj na zbiralniku delci oddajo, niso več z nobeno silo vezani na površino zbiralne elektrode. Delci, ki imajo zelo veliko upornost, se v ionizatorju težko nabijejo, nenabiti se na zbiralni elektrodi ne odstranijo. Tisti delci z veliko upornostjo, ki pa se v ionizatorju nabijejo in se v zbiralniku nalepijo na plošče, pa jih je zelo težko odstraniti. V primeru delcev z veliko upornostjo je na plasti nalepljenih delcev zelo velik padec napetosti, to pa zelo zmanjša elektromagnetno polje med površinama obeh elektrod. Ko je padec napetosti na plasti prahu zelo velik, se pojavijo lokalni preboji in zaradi njih luknje v plasti prahu. Luknje v plasti negativno vplivajo na delovanje elektrostatičnega filtra, v plasti prahu nastanejo pozitivno nabiti ioni, ki jih odnese proti negativno nabiti elektrodi. Spotoma se srečajo z negativno nabitimi delci prahu in jih razelektrijo. Pri tem močno pade učinkovitost delovanja elektrostatičnega filtra. Če se to zgodi, je pogosto treba napravo izključiti. Še tretji problem, ki se pojavi pri delovanju elektrostatičnih filtrov z delci z veliko upornostjo, pa je iskrenje. Če je iskrenje premočno, je treba znižati napetost med elektrodama, zaradi česar pade učinkovitost filtra.

Upornost delcev se močno spreminja s temperaturo, zato lahko s spreminjanjem temperature vstopnega plina vplivamo na delovanje elektrostatičnega filtra.



Slika 76: Elektrostatični filtri so različnih oblik in velikosti, levo: primer elektrostatičnega filtra termoelektrarne. Desno: majhen industrijski elektrostatični filter [[www.jdevs.com](http://www.jdevs.com) in [www.bristolfilter.de](http://www.bristolfilter.de)].

V termoelektrarnah je elektrostatični filter nepogrešljiv del čiščenja dimnih plinov. Elektrostatični filter je prva stopnja čiščenja dimnih plinov in se ga vgrajuje takoj za kotlom in grelnikom zraka LUV0. Tehnološka shema bloka 5 Termoelektrarne Šoštanj je prikazana na sliki 77.



Slika 77: Tehnološka shema bloka 5 Termoelektrarne Šoštanj. Elektrostatični filtri so prva stopnja čiščenja dimnih plinov takoj za grelnikom zraka LUVO in za izstopom dimnih plinov iz kotla.

### 2.10.1.7. Pralniki delcev

V pralnikih (angl. *scrubber*) ali mokrih zbiralnikih (angl. *wet collector*) poteka prehod delcev v plinih v kapljuje kapljevite faze, kar je omogočeno z

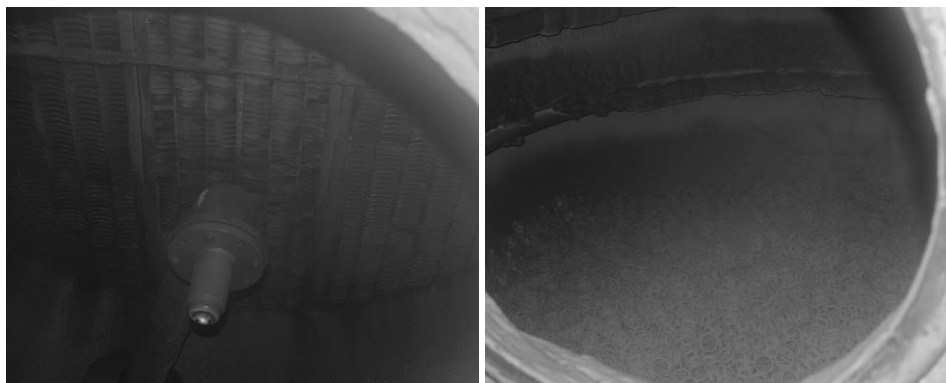
neposrednim stikom kapljic dodane kapljevine in delcev, ki jih nosi tok plinov z nečistočami. Tovrstni pralniki se uporabljajo tudi pri izločanju nekaterih plinastih sestavin iz raznih plinov kemijske industrije, pri čemer se uporabljajo posebne kapljevine, ki omogočajo absorpcijo plinastih sestavin, ki jih želimo izločiti iz toka plina.

Proces izločanja delcev s pralniki poteka na osnovi zadrževanja delcev, ki jih zadržijo razpršene kapljice, kar je možno le v primeru, ko so delci dosti manjši od velikosti kapljic. Kapljice, ki vsebujejo delce, potem izločimo s centrifugiranjem, saj je premer kapljic veliko večji od premera delcev. Najbolj pogosto uporabljeno adsorpcijsko sredstvo v pralnikih je voda.

Učinkovitost izločanja delcev iz dimnih plinov s pralniki je v veliki meri odvisna od velikosti tlačnega padca pri toku dimnih plinov skozi pralnik, ki je odvisen od gostote prhe, polnila in velikosti vodnih kapljic. Na splošno pa potreben padec tlaka narekuje povprečna velikost delcev, ki jih želimo s pralnikom izločiti. Nizki tlačni padci so primerni za izločanje nekoliko večjih delcev, skladno z manjšanjem premera delcev nečistoč, ki jih želimo odstraniti, mora tlačni padec v pralniku naraščati, kar pomeni, da moramo povečati gostoto prhe. To dosežemo s kapljicami manjšega premera, to je z boljšim razprševanjem ali atomizacijo vode ali druge ustrezne kapljevine adsorbenta tako, da zvišamo tlak vbrizgavanja.

Najbolj razširjene oblike konstrukcij pralnikov so:

- mokri stolpi,
- ciklonski pralniki in
- Venturijeve pralniki.



Slika 78: Notranjost pralnika, levo: zgoraj izločevalniki kapljic in šoba za pršenje adsorbenta, desno: polnilo pralnika.

Najcenejša možnost so mokri stolpi, ki jih je moč uporabiti za izločanje plinov in delcev iz plina. Takšna konstrukcija omogoča čiščenje velikih količin plinov pri sorazmerno nizkih padcih tlaka. V mokrem stolpu je nameščeno polnilo, ki ga obliva kapljeviti adsorbent. Polnilo poveča površino adsorbenta, na katero

se lahko ujamejo delci v plinu. Načelo izločanja delcev temelji na protitočnem gibanju plinov in prhe adsorbenta, pri čemer kapljice adsorbenta skupaj z delci padajo v zbiralnik na dno pralnika. Mokri stolpi so najbolj primerni za izločanje delcev do 10  $\mu\text{m}$ , obstajajo pa tudi različne konstrukcijske izboljšave, ki omogočajo izločevanje delcev manjših dimenzij. Na vrhu mokrih stolpov je nameščen izločevalnik kapljic, ki zmanjša izgubo adsorbenta.

Ciklonski pralniki so po konstrukciji zelo podobni suhim ciklonskim ločevalnikom s to razliko, da imajo v sredini nameščene tlačne razpršilne šobe. Adsorpcijsko sredstvo spira stene ciklona, v katere udarjajo delci, ki zaradi velikih centrifugalnih sil ne morejo slediti toku plinov oziroma zraka. Prednost pred suhimi cikloni je v tem, da je s ciklonskimi pralniki moč izločati delce dosti manjših premerov, kar omogoča zelo gosta prha adsorbenta.

Slike pralnikov delcev so prikazane tudi v poglavju o čiščenju plinov, saj se izvedbe za odstranjevanje delcev ne razlikujejo dosti od izvedb za odstranjevanje plinskih onesnažil.

#### **2.10.1.8 Čistilna naprava - mokri pralnik delcev in plinov z elektrostatičnim filtrom pri izdelavi steklene volne**

V tem podpoglavju predstavljamo primer čistilne naprave (slika 79), kakršna se uporablja za odstranjevanje delcev iz plina pri izdelavi steklene volne.



Slika 79: Levo: dimnik in za njim pralnik WESP in elektrostatični filter za odstranjevanje delcev iz plinov iz usedalne komore, trdilne komore in hladilne cone. Desno: dovod v čistilno napravo, cevovod za umazane pline in dve cevi za čisto vodo in za umazano vodo, ki služi kot absorpcijsko sredstvo.

Pri izdelavi steklene volne kot izolacijskega materiala je več glavnih virov onesnaževanja, to so:

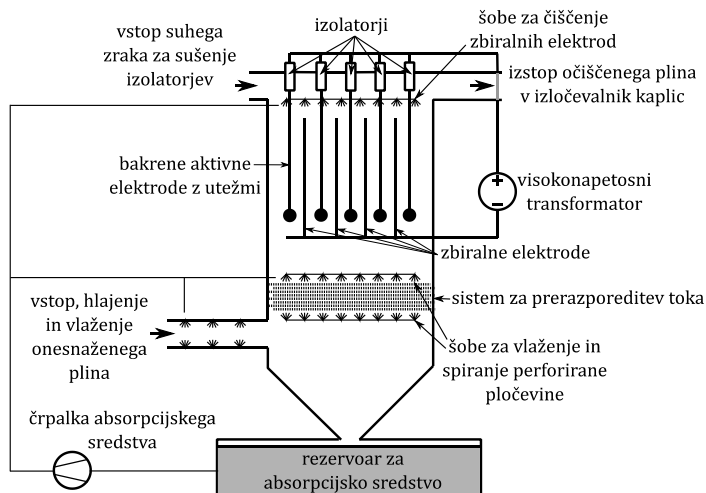
- steklarska peč,
- usedalna komora,
- trdilna komora in

- hladilna cone.

Vsi viri onesnaževanja morajo biti zaradi doseganja zakonskih standardov pri izpustih onesnažil v okolje opremljeni s čistilnimi napravami. V nadaljevanju navajamo primer tovarne, kjer se čistijo onesnažila v pralnikih in z mokrim elektrostatičnim filtrom (angl. *wet electrostatic precipitator, WESP*). Mokri elektrostatični filter je prikazan na sliki 80. V pralnik in mokri elektrostatični filter potujejo onesnaženi plini iz usedalne komore, trdilne komore in hladilne cone. Steklarska peč ima običajno ločen suhi elektrostatični filter.

V nadaljevanju bomo obravnavali gradnike mokrega elektrostatičnega filtra in pralnikov ter njihovo delovanje. Celotna čistilna naprava je izdelana iz nerjavnega jekla, razen bakrenih delov elektrostatičnega filtra.

Odvodi onesnaženega plina iz usedalne komore, trdilne komore in hladilne cone se čistijo v pralnikih na mestu nastanka. Kasneje se vsi izpusti združijo in odvajajo v skupno čistilno napravo. Čistilna naprava je sestavljena iz dveh glavnih delov, pralnika delcev in mokrega elektrostatičnega filtra. Shema delovanja čistilne naprave je prikazana na sliki 80. V čistilni napravi se čistijo pretežno delci, vendar tudi formaldehid, lahkohlapne organske ogljikove spojine VOC, fenoli, amonijak, izboljša pa se tudi prosojnost na izpustu (angl. *blue haze*).



Slika 80: Shema delovanja mokrega elektrostatičnega filtra

V mokri elektrostatični filter se dovaja odpadni plin po cevovodu (sliki 79 in 80). Onesnažen plin je pred vstopom v mokri elektrostatični filter dodatno hlajen in ovlažen z namenom absorpcije plinskih komponent, odstranjevanja delcev, zniževanja temperature, požarne varnosti in ustvarjanja čim večje količine aerosolov (slika 80). Vstop onesnaženega plina je na spodnjem delu. Tok onesnaženega plina na dnu filtra se prek sistema za porazdelitev toka, ki



deluje tudi kot pralnik (nanj se prši absorpcijsko sredstvo, ki je voda z raztopljenimi delci in plini onesnažila, s spodnje in z zgornje strani), razporedi po celotni površini mokrega elektrostatičnega filtra. Sistem za porazdelitev toka in pralnik sta tako združena. Pralnik je prostor, kjer prši voda, in je izveden iz zakrivljene in naluknjane pločevine v velikem številu slojev (slika 80). Zelo pomembno je, da je razprševanje vode v pralniku enakomerno, na ta način se poveča stopnja čiščenja čistilne naprave in zmanjša poraba vode. Obtočne črpalke za absorpcijsko sredstvo vodo poganjajo tok v šobe. Zamašenost šob se ugotavlja prek merjenja tlaka in prostorninskega toka.

Iz pralnika potuje onesnažen plin skozi elektrostatični filter (sliki 81 in 82), kjer se odstranijo ostanki trdnih snovi, aerosoli in kondenzirani ogljikovodiki. Sistem elektrostatičnega polja je sestavljen iz velikega števila žičnih elektrod in zbiralne elektrode. Zbiralna elektroda je površina v obliki satovja, kjer se nabirajo trdni delci, aerosoli in kondenzirani ogljikovodiki. Zbiralna elektroda je del ohišja filtra. Aktivne elektrode so iz bakrenih žic, ki jih napenjajo uteži (slika 82). Aktivne elektrode so obešene na bakreno ogrodje (slika 81), ki pa je prek izolatorjev obešeno na ogrodje mokrega elektrostatičnega filtra. Bakreno ogrodje aktivnih elektrod napaja tok iz visokonapetostnega transformatorja in usmernika (slika 82).



Slika 81: Mokri elektrostatični filter. Levo: dovodni cevovod, na vrhu dovodnega cevovoda so pralniki s šobami za pršenje vode za odstranjevanje delcev, zniževanje temperature in požarno varnost. Desno: šoba absorpcijskega sredstva, ki je nameščena nad pralnikom. Pod pralnikom je še ena vrsta šob, ki pršijo navzgor. V pralniku so polnila iz naluknjane in zakrivljene pločevine.

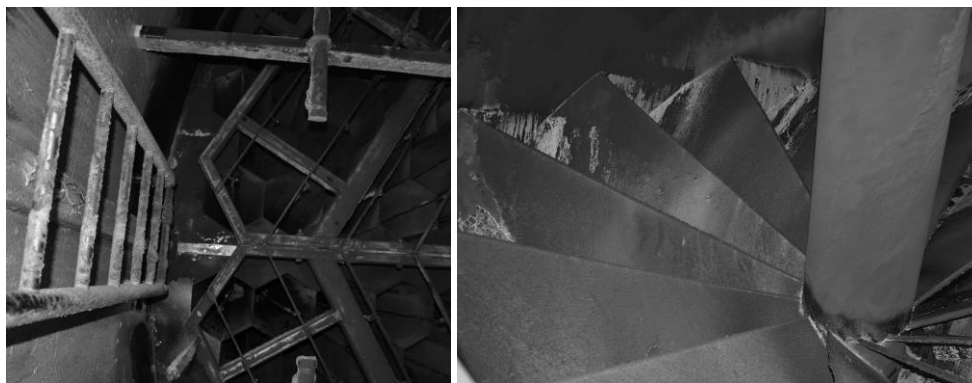
Nastale obloge na zbiralni elektrodi se čistijo prek šob z izpiranjem z absorpcijskim sredstvom. Adsorpcijsko sredstvo teče po oblogah po površini elektrostatičnih plošč zbiralne elektrode prek pralnika do dna filtra in nato v

rezervoar za absorpcijsko vodo, ki je nameščen pod filtrom. Absorpcijsko sredstvo je v osnovi voda s primesmi, ki so ostanki pranja.

Preden očiščen plin skozi dimnik zapusti mokri elektrostatični filter, potuje še skozi izločevalnik kapljic (slika 82). Izločevalnik kapljic zmanjša porabo adsorbenta, saj kapljice adsorbenta ne zapuščajo čistilne naprave, oziroma adsorbent zapušča čistilno napravo samo kot vodna para.

Pri zagonu elektrostatičnega filtra se najprej vklopita grelnik in ventilator sušilnega zraka izolatorjev. Če je temperatura ogrevalnega zraka dovolj visoka, to je višja ali enaka približno 18 °C, se začne polurna faza ogrevanja in sušenja izolatorjev. Če pa je temperatura ogrevalnega zraka prenizka, se najprej zrak segreje do potrebne temperature, nato pa se šele začne faza polurnega sušenja izolatorjev. Po končanem sušenju se vklopita glavni obtočni črpalki in absorpcijsko sredstvo začne teči do šob, kjer se razprši v pralniku.

Faza pranja in elektrofiltracije traja nekaj ur, nato pa sledi nekajminutno izpiranje. V fazi izpiranja se tok adsorbenta iz črpalk preusmeri na zgornje šobe, ki so nad elektrostatičnim filtrom, zato da se elektrostatični filter spere in s tem očisti. Fazi čiščenja sledi enominutno izcejanje, nato pa se nadaljuje faza čiščenja s pralnikom in z delovanjem elektrostatičnega filtra.



Slika 82: Mokri elektrostatični filter, levo: notranjost elektrostatičnega filtra, pogled od zgoraj na satovje. Levo spodaj je točka, kamor pred revizijo pritrdimo palico z razelektritvenim kablom. Negativne elektrode so obešene na bakreno konstrukcijo. Desno: izločevalnik kapljic nad elektrostatičnim filtrom, to je tik pred vstopom v dimnik.

Pod čistilnim delom je rezervoar za adsorbent, ki se ga šaržno prazni v bazen z odpadnim adsorpcijskim sredstvom ter mu po potrebi dodaja vodo iz reke ali drugega vira. V prostoru ob rezervoarju so obtočne črpalke, grelnik zraka za sušenje in hlajenje izolatorjev, merilno procesna oprema in električna oprema.



Slika 83: Mokri elektrostatični filter, levo: notranjost, pogled skozi odprtino nad pralnikom in pod elektrostatičnim filtrom. Uteži napenjajo negativne elektrode. Desno: visokonapetostni transformator in usmernik, pred njim je izolator s cevjo za ogrevanje in sušenje izolatorjev.

### 2.10.2 Odstranjevanje plinastih onesažil

Pogosti plinasti onesnaževalci so oksidi žvepla, dušika in ogljika, ki nastajajo pretežno pri procesih zgorevanja goriv. Poleg tega so v plinu prisotni še ogljikovodiki HC in še drugi organski in anorganski plini. Najpomembnejši procesi odstranjevanja plinastih onesažil iz plinov so (Samec, 2006):

- adsorpcija,
- absorpcija,
- kondenzacija in
- zgorevanje.

Adsorpcija je sposobnost določene trdne snovi, ki se imenuje adsorbent, da na svoji površini veže (adsorbira) molekule plina ali raztopljene snovi iz raztopine, pri čemer nastane molekularna ali atomska plast, ki jo imenujemo adsorbat.

Adsorpcija ni enak pojav kot absorpcija. Oba procesa lahko imenujemo sorpcija, medtem ko je nasproten proces desorpcija.

Adsorpcija se dogaja v večini naravnih, bioloških in kemičnih spojinah ter se zelo pogosto uporablja v industriji, kot npr. pri čiščenju odpadnih vod s filtriranjem z aktivnim ogljem. V analitični kemiji z metodami, kot sta kromatografija in ionska izmenjava, adsorpcija igra važno vlogo, tako da je od izbire adsorbenta odvisen končni rezultat meritve.

Osnova adsorpcije je v energiji površine materiala. Pri večini materialov so vsi atomi in molekule vezani s kemijskimi silami z drugimi atomi ali molekulami.

Izjema so atomi in molekule na površini, ki niso popolnoma obkroženi z drugimi atomi ali molekulami. Iz tega razloga imajo atomi ali molekule na površini manjšo ali večjo afiniteto za povezavo z drugimi atomi ali molekulami v bližini. Molekule in atomi adsorbenta in substrata lahko reagirajo na dva načina, fizikalno (fizikalna adsorpcija) ali kemijsko (kemijska adsorpcija).

Aktivno oglje je pogosto uporabljeno adsorpcijsko sredstvo.

Absorpcija ali vsrkavanje se uporablja v več pomenih. V kemiji absorpcija navadno pomeni vpijanje ali raztapljanje ene snovi v drugi, npr. absorpcija plina v kapljevini. Pri absorpciji se snov vsrka v vsej prostornini, ne samo na površini, kot je to primer pri adsorpciji. Tudi absorpcija se uporablja pri različnih industrijskih procesih.

V nadaljevanju bomo predstavili naprave, v katerih potekajo zgoraj navedeni postopki čiščenja.

### **2.10.2.1 Pralniki in mokri kalcitni postopek**

Pralniki plinov (angl. *scrubber*) so naprave, ki omogočajo odstranjevanje plinskih onesnažil s kapljevino, so torej naprave, ki delujejo na načelu absorpcije. Delovanje pralnikov plinov je prikazano na sliki 84. Pomembna uporaba pralnikov plinov v energetiki so čistilne naprave za dimne pline, ki delujejo po mokrem kalcitnem postopku.

Glavna uporaba postopka pranja plinov na področju energetike je pri čiščenju odpadnih dimnih plinov, najpogosteje se čistijo plinasti deli dimnih plinov:

- žveplov dioksid  $\text{SO}_2$ ,
- vodikovi halogenidi,
- amonijak  $\text{NH}_3$ ,
- vodikov sulfid  $\text{H}_2\text{S}$  in
- različne hlapne kemijske spojine.

Za pranje plinov se najpogosteje uporabi kot absorpcijsko sredstvo voda. Hkrati s pranjem plinov se lahko odstranjujejo tudi trdni delci majhnih dimenzij.

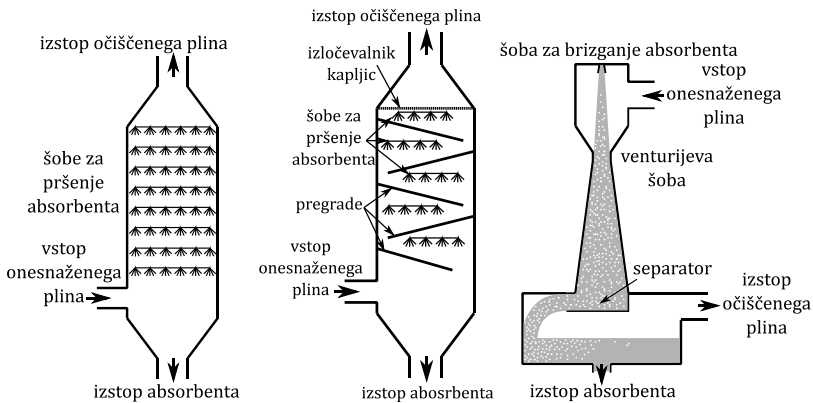
Prednosti pranja plinov pred ostalimi metodami odstranjevanja so:

- čiščenje gorljivih in eksplozivnih plinov brez večjega tveganja,
- istočasna absorpcija plinov in odstranjevanje trdnih delcev,
- hkratno hlajenje vročih plinov,
- možnost spreminjanja učinkovitosti delovanja,
- nevtralizacija korozivnih plinov in trdnih delcev,
- mogoče so različne izvedbe in velikosti, kar vodi v veliko raznovrstnost.

Slabosti pranja plinov so:

- veliki problemi zaradi korozije, abrazije in poškodb vrtečih delov,
- težave s čiščenjem odpadne vode,
- zaščita pred podhladitvijo, zato je včasih potrebno predgretje,
- izločenih delcev včasih ni mogoče reciklirati in je njihovo odlaganje drago,
- problemi z zagonom,

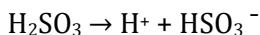
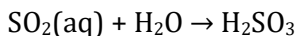
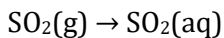
- velik padec tlaka in s tem povezana potrebna velika količina energije za delovanje.

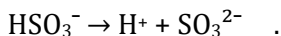


Slika 84: Delovanje pralnikov za pranje plinov. Levo: protitočno odpraševanje s pršenjem, v sredini: mokri odpraševalnik s pregradami in desno: Venturi pralnik.

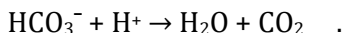
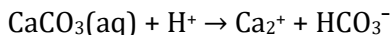
### 2.10.2.2 Naprave za čiščenje dimnih plinov v termoelektrarnah na premog po mokrem kalcitnem postopku

V nadaljevanju bomo predstavili mokri kalcitni postopek, ki se uporablja za čiščenje dimnih plinov termoelektrarn na premog. V svetu je mokri kalcitni postopek že več kot dvajset let poznana in uveljavljena tehnologija za izločanje žveplovih dioksidov iz dimnih plinov za velike termoenergetske objekte. Velika prednost tega postopka je visoka učinkovitost in poceni absorpcijsko sredstvo, to je mleti apnenec  $\text{CaCO}_3$ . Produkt procesa razžveplanja dimnih plinov je sadra  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , ki ni škodljiva za okolje, primerno obdelana pa se lahko uporablja tudi v gradbeništvu. Proces temelji na absorpciji žveplovega dioksida iz dimnih plinov v suspenzijo, kjer tvori s kalcitom stabilen produkt sadro (mavec). V pralniku prihaja v protitoku do stika med dimnimi plini in suspenzijo. Razlike parcialnih tlakov žveplovega dioksida  $\text{SO}_2$  v dimnem plinu in kapljevini povzročajo prehod žveplovega dioksida  $\text{SO}_2$  v razpršeno suspenzijo, kjer se hidratizira, pri čemer nastane žveplasta (IV) kislina, ki zelo hitro disociira

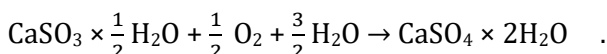
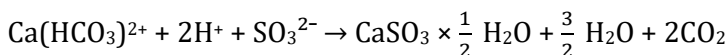
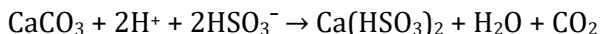




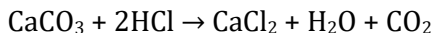
Pri raztapljanju kalcijevega karbonata  $\text{CaCO}_3$  se nevtralizirajo vodikovi ioni, nastane ogljikova kislina, ki disociira v vodo  $\text{H}_2\text{O}$  in ogljikov dioksid  $\text{CO}_2$ , ta pa zapušča kapljevito fazo in se odvaja skupaj z dimnimi plini



Presežek kalcijevih ionov v suspenziji reagira s hidrogensulfitnimi in sulfitnimi ioni, ki so nastali z disproporcijacijo žveplaste (IV) kisline. Nastali sulfitni ioni oksidirajo v sulfatne ione v pralniku s prisotnim kisikom v dimnih plinih in nadalje tudi v reakcijski posodi ob intenzivnem dovajanju zraka in mešanju suspenzije



V dimnih plinih so poleg žveplovih oksidov  $\text{SO}_x$  še kisle spojine vodikov klorid  $\text{HCl}$  in vodikov fluorid  $\text{HF}$ . Klor in fluor se vežeta na kalcij, ogljikov dioksid  $\text{CO}_2$  pa se odvaja



Po navedenih kemičnih reakcijah deluje večina čistilnih naprav termoelektrarn na premog. Na sliki 85 je prikazana čistilna naprava Termoelektrarne Trbovlje, ki je bila zgrajena v letu 2006. Kasneje je bil za Termoelektrarno Trbovlje leta 2015 sprožen likvidacijski postopek.

V nadaljevanju bomo opisali delovanje naprave za razžveplanje dimnih plinov v Termoelektrarni Šoštanj. Naprava za razžveplanje je projektirana za prostorninski tok dimnih plinov  $2.100.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$  z vsebnostjo žveplovega dioksida  $\text{SO}_2$   $8.200 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  dimnih plinov. Vrednost izpustov žveplovih oksidov iz hladilnega stolpa je  $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  dimnih plinov. Čistilna naprava za razžveplanje dimnih plinov deluje na načelu mokrega pralnika. Pralnik je konstruiran kot enojni razpršilni stolp s sistemom prisilne oksidacije, kjer prihaja v protitoku do stika med plinsko in kapljevito fazo. Shema delovanja čistilne naprave bloka 6 v Termoelektrarni Šoštanj je prikazana na sliki 86.



Slika 85: Čistilna naprava Termoelektrarne Trbovlje, levo: zgradba [www.rudis.si], v sredini: mešalo in aerator, desno: posušena sadra kot končni produkt razžveplanja

Glavni gradniki naprave za čiščenje dimnih plinov po mokrem kalcitnem postopku so:

- pralnik dimnih plinov,
- obtočne in ostale črpalke,
- sistem oksidacijskega zraka,
- sistem stisnjenega zraka,
- transport in priprava apnenčeve moke,
- odvodnjavanje suspenzije prve stopnje,
- sistem odvoda zgoščene sadre,
- sistem za praznjenje in drenažni sistem,
- sistem procesne vode,
- jeklene konstrukcije, etaže in fasade.

**Priprava absorpcijskega sredstva.** Apnenčeva moka se dovažata z avtocisternami. Ob procesni stavbi sta dva priključka za priklop avtocistern in dovod ustrezno pripravljenega komprimiranega zraka za pnevmatski transport apnenčeve moka v dnevni silos.

Absorpcijsko sredstvo, na katerega se vežejo kisli dimni plini, je suspenzija – zmes vode in v prah zmlatega apnenca  $\text{CaCO}_3$ . Za ustrezno delovanje čistilne naprave mora apnenčeva moka vsebovati 90 % delcev, manjših od 90  $\mu\text{m}$ .

Poleg dnevnega silosa za dodatno rezervo skladiščenja apnenčeve moka služi dodaten centralni silos. Ta zagotavlja manjše možnosti izpada sistema za razžveplanje dimnih plinov v primeru težav pri dobavi apnenčeve moka.

Apnenčeva moka se dozira iz dnevnega silosa s pomočjo dveh dozatorjev in dveh polžnih transporterjev v mešalno posodo za pripravo sveže suspenzije apnenčeve moka.

Apnenčeva moka se v mešalni posodi meša z redkejšim delom suspenzije sadre iz ločilnika s hidrocikloni, z vodo iz rezervoarja za filtrat od tračnega

filtra in s procesno vodo ter izteka po ustrezno izvedeni cevi v pralnik. Mešalna posoda je nameščena nad nivojem suspenzije v pralniku. Suspenzija, ki jo dodajajo v pralnik dimnih plinov, ima gostoto od 1080 do 1150 kg/m<sup>3</sup>, kar se uravnava s krmiljenjem črpalk za dodajanje suspenzije.

**Pot dimnih plinov.** Pred vstopom v pralnik iz dimnih plinov izločimo trdne delce, to je pepel. Za ta namen vodimo dimne pline skozi elektrostatične filtre, njihovo delovanje smo opisali v enem izmed prejšnjih poglavij. Njihova učinkovitost izločanja delcev znaša več kot 99,9 %. S predhodnim izločanjem pepela izboljšamo delovanje pralnika in zmanjšamo nastajanje oblog v gradnikih čistilne naprave. Tok dimnih plinov skozi pralnik omogoča kotlovski ventilator vleka. Dimne pline, očiščene prahu, ventilator vleka potiska skozi pralnik čistilne naprave, v izjemnih primerih in ob zagonu elektrarne pa jih lahko vodimo prek obvoda naravnost v dimnik. Dimnih plinov, kadar čistilna naprava ne deluje, ne smemo spuščati skozi čistilno napravo.

Zasilno hlajenje dimnih plinov je zagotovljeno s sistemom namestitve razpršilnih šob v področju vstopa dimnih plinov v kanal pred pralnikom. S prhanjem vode znižamo temperaturo dimnih plinov iz približno 150 na 63 °C z uparjanjem vode.

V elektrarnah, ki imajo dimnik, primer je Blok 5 Termoelektrarne Šoštanj, je treba pred vstopom v dimnik dimne pline ponovno ogreti. V takih elektrarnah pri normalnem delovanju vodimo dimne pline skozi grelnik dimnih plinov GAVO, obvodne lopute pa so zaprte. GAVO je regenerativni vrtljivi prenosnik toplote vrste Ljungström. Služi ogrevanju/hlajenju dimnih plinov, v njem neočiščeni dimni plini s temperaturo 160 °C oddajo svojo toploto grelnim paketom, ti pa nato oddajo toploto ohlajenim očiščenim dimnim plinom, preden jih vodimo v dimnik, da je njihova temperatura nad rosiščem približno od 90 do 95 °C.

Elektrarne, ki dimne pline odvajajo skozi dimnik v hladilnem stolpu, primer je Blok 6 Termoelektrarne Šoštanj, ne potrebujejo grelnika dimnih plinov GAVO. Iz elektrofiltrov potujejo dimni plini naravnost v pralnik. Pred vstopom v pralnik jih ohladimo s šobami absorpcijskega sredstva, ki so vgrajene v kanalu dimnih plinov.

V vrhnjem delu pralnika so v šestih nivojih nameščeni sistemi šob za razprševanje absorpcijskega sredstva. Vsakemu sistemu šob pripada obtočna črpalka, ki črpa suspenzijo iz zbiralnika pralnika, šobe pa zagotavljajo fino razprševanje. Prilagodljivo število delujočih obtočnih črpalk zagotavlja gospodarno delovanje tudi pri delnih obremenitvah. Vsaka obtočna črpalka napaja lastno ravnino razpršilnih šob. Črpalke so iz materialov, ki so odporni proti koroziji in abraziji. V območju razpršilnih šob potekata ohlajevanje dimnih plinov in bistvena faza očiščenja, difuzija žveplovega dioksida, fluoridov in kloridov skozi mejni plinski sloj na površino omočenega delca absorbenta. Spodaj je pralnik opremljen z mešali, ki zagotavljajo ustrezno



mešanje suspenzije, s čimer je preprečeno usedanje grobih delcev sadre, istočasno pa se v področje propelerja mešala vpihuje oksidacijski zrak.

Dimni plini se pri prehodu skozi pralnik navlažijo do nasičenja ter ohladijo na temperaturo približno 63 °C. Ker dimni plini na izstopu iz pralnika vsebujejo fino razpršene kapljice, morajo skozi dvostopenjski izločevalnik kapljic na vrhu pralnika, kjer se izločijo skupaj s preostalimi kristalizacijskimi jedri. Absorbent se pri prehodu skozi pralnik delno upari, vodna para pa zapusti sistem. Izgubljeno vodno paro nadomestimo z dodano vodo, s katero izpiramo izločevalnik kapljic iz rezervoarja procesne vode.

Kalcijev sulfit, ki je nastal v razpršilnem območju pralnika, pade v zbiralnik. Tam ima dovolj dolg zadrževalni čas za oksidacijo v kalcijev sulfat. Za dobavo potrebnega stisnjenega zraka za proces oksidacije imamo na voljo tri puhala, ki dovajajo potrebno količino zraka v suspenzijo s kalcijevim sulfitom, ki ob intenzivnem vpihovanju zraka in mešanju oksidira v kalcijev sulfat. Pred pralnikom se skupni cevovod za dovod oksidacijskega zraka razdeli na štiri veje ter se priključi na pralnik nad mešali. Z dovodom zraka neposredno pred mešalo se pospeši proces oksidacije.

Prilagodljivo število delujočih puhal in njihova obremenitev zagotavlja ekonomično delovanje tudi v času delnih obremenitev. Krmiljenje puhal je mogoče v območju od 45 do 100 %.

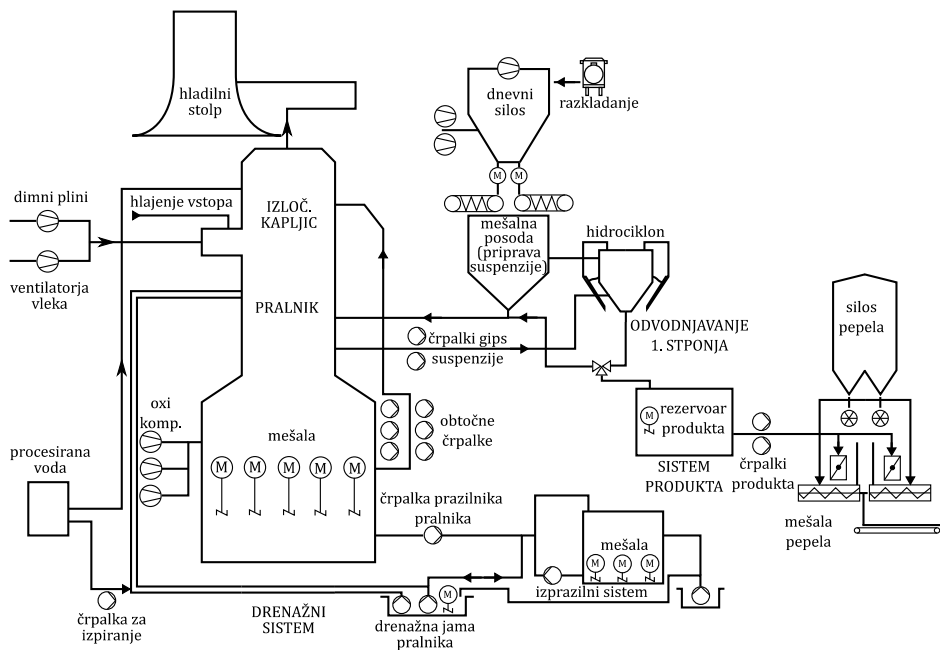
Za učinkovit proces izločanja žvepovega dioksida SO<sub>2</sub> iz dimnih plinov je zelo pomembno vzdrževanje pH med 5,4 in 5,6 ter ustrezna gostota in temperatura suspenzije. Ustrezna velikost kristalov sadre v pralniku se krmili z vrtilno frekvenco črpalke za izpust sadre iz pralnika in številom delujočih hidrociklonov.

**Pot sadre.** Črpalke za izpust sadre iz pralnika imata zmogljivost  $2 \cdot 100\%$ , pri čemer je ena v delovanju, druga pa v rezervi pri polni obremenitvi pralnika dimnih plinov.

Del suspenzije iz pralnika se prek črpalk za sadro prečrpava v ločilnik s hidrocikloni. V hidrociklonu poteče ločevanje obeh faz zaradi različnih gostot kapljevite in trdne faze v suspenziji. Hidrociklon ločuje fazi na trdno fazo z vsebnostjo trdnih delcev v raztopini približno 55 % in vodo ter lažje delce z vsebnostjo trdnih delcev v raztopini približno od 1 do 3 %.

Voda in lažji delci se dvignejo v zgornji del in nato v preliv hidrociklona. Preliv iz hidrociklona vsebuje v glavnem fine trdne delce, to so drobni delci sadre in elektrofilitrskega pepela, svež apnenec in netopljive nečistoče apnenca. Preliv gravitacijsko teče v mešalno posodo za dodajanje apnenčeve moke. Preliv iz hidrociklona v mešalni posodi ustvari močan tangencialni tok, v katerega je doziran sveži apnenec. Pripravljena zmes se gravitacijsko pretaka v pralnik. Trdna faza se prelije v rezervoar produkta. Prostornina rezervoarja produkta omogoča hranjenje zgoščene sadre 24 ur pri delovanju naprave za čiščenje dimnih plinov pri imenski moči bloka. Črpalke za odvod zgoščene sadre zagotavljata praznjenje rezervoarja produkta na mešalno postajo produktov

in/ali na tračni vakuumski filter. Na mešalni postaji produktov se meša zgoščena sadra s pepelom in vodo v ustreznem razmerju, da nastane produkt s stabilnimi fizikalno-kemijskimi lastnostmi. Ta produkt se z gumijastim cevnim trakom transportira do vmesne deponije, kjer se nalaga na transportna vozila in odvažna na končna odlagališča.



Slika 86: Shema razžveplalne naprave bloka 6 v Termoelektrarni Šoštanj. V razžveplalno napravo ventilatorja vleka potiskata dimne pline iz elektrostatičnega filtra (slika 77).

Sadra po odvodnjavanju na tračnem vakuumskem filtru pade na gumijasti transportni trak, ki jo vodi v silos sadre ali na transporter za transport pepela na odlagališče.

Čistilna naprava dimnih plinov je opremljena tudi z izpraznilnim rezervoarjem. Izpraznilni rezervoar je namenjen vmesnemu shranjevanju vsebine pralnika za primer, če je treba pralnik izprazniti za potrebe revizije ali napake v delovanju.

Sistem priprave in dobave procesne vode je namenjen oskrbi celotne čistilne naprave dimnih plinov s svežo procesno vodo. S to vodo se pokrivajo izgube zaradi izparevanja vode v pralniku, odvoda suspenzije produkta, izgube na vakuumskem tračnem filtru itd.

### **2.10.2.3 Kondenzatorji**

Plinasto onesnažilo se bo (delno) kondenziralo, če bo vrednost njegovega parcialnega tlaka v nosilnem plinu preseгла vrednost tlaka nasičenja pri določeni temperaturi. Ko dosežemo temperaturo rosišča specifičnega plinastega onesnažila, se začnejo izločati kapljice onesnažila, ki jih lahko nato ujamemo. Kljub temu da lahko kondenzacijo pospešimo s povišanjem tlaka, je tovrsten postopek pri izločanju plinastih nečistoč iz dimnih plinov oziroma zraka bolj redko v uporabi. V praktičnih primerih naletimo na dve osnovni vrsti kondenzatorjev za izločanje plinastih onesnažil iz dimnih plinov: površinski in kontaktni kondenzator. V primeru površinskih kondenzatorjev predstavlja proces adsorpcije kondenziranega plina ključno vlogo, kot hladilni medij pa sta najpogosteje uporabljena voda oziroma zrak. Pri kontaktnem kondenzatorju pa so pare plinastega onesnažila in hladilnega medija v neposrednem stiku. Vsekakor obstaja veliko število konstrukcijskih rešitev tovrstnih kondenzatorjev, uporaba katerih pa je v veliki meri odvisna od količine in vrste onesnažila ter prostorninskega toka dimnih plinov.

### **2.10.2.4 Zgorevanje**

Pri določenih izdelovalnih postopkih in procesih nastajajo večje količine predvsem ogljikovega monoksida CO in ogljikovodikov HC, ki jih je treba odvesti z mesta izvora. Dokler so koncentracije pod mejo dovoljenih izpustov, običajno tako onesnažen plin skozi dimnik spustimo v ozračje. V primeru povišanih koncentracij je treba te nečistoče iz plina izločiti, pri čemer se je izkazal postopek zgorevanja za najprimernejšega. S tem se pretvorijo gorljive nečistoče v ogljikov dioksid in vodo. Pri zagotavljanju učinkovitega procesa zgorevanja je izrednega pomena zadostna količina oksidanta, dovolj visoka temperatura, intenzivnost mešanja gorljivih substanc s kisikom in čas zadrževanja gorljivih nečistoč v coni reakcije. Glede na vsebnost gorljivih plinov v odpadnih plinih ali onesnaženem zraku ločimo tri postopke zgorevanja (Samec, 2006):

- plamensko zgorevanje,
- termično zgorevanje,
- katalitično zgorevanje.

Postopek neposrednega, to je **plamenskega zgorevanja**, uporabimo v primeru zadostne koncentracije gorljivih onesnažil v dimnih plinih, pri čemer je pomembno vzdrževanje plamena. Odpadne pline, ki vsebujejo nezagorele ogljikovodike, vodimo neposredno v gorilnik, kjer ob dovajanju potrebne količine oksidanta, običajno zraka, zgorijo brez dodajanja dodatnega goriva. Tovrstni postopek pogosto uporabljamo v naftno predelovalni industriji. Pri uvajanju plamenskega zgorevanja odpadnih plinov moramo posvetiti veliko pozornost nadzoru procesa zgorevanja, kajti v nasprotnem primeru lahko nastanejo nove vrste onesnažil, ki so značilne za običajne procese zgorevanja, npr. dušikovi oksidi NO<sub>x</sub> ali žveplove oksidi SO<sub>x</sub>.

V primerih, ko odpadni plini ne vsebujejo dovolj gorljivih onesnažil, lahko le-te izločimo z uporabo **termičnega zgorevanja**. Odpadni plini vstopajo v zgorevalni prostor, kamor dovajamo tudi manjšo količino goriva, na ta način omogočimo zgorevanje gorljivih snovi v odpadnih plinih, katerih količina sicer ne bi zagotavljala obstoja plamena. Kurišče imenujemo termični gorilnik, ker je konstruirano tako, da so odpadni plini prisotni dovolj časa v prostoru nad temperaturo vžiga posameznih gorljivih sestavin odpadnih plinov.

**Katalitično zgorevanje** je tretja možnost izločanja gorljivih onesnažil iz odpadnih plinov v primeru, ko so njihove koncentracije prenizke, da bi bilo možno vzdrževanje plamena. Katalizator pospešuje proces oksidacije, pri čemer pa sam ni deležen kemijske pretvorbe.

#### **2.10.2.5 Avtomobilski katalizatorji**

Avtomobilski katalizator (angl. *catalytic converter*) je naprava za nadzor izpustov iz motorjev z notranjim zgorevanjem. Avtomobilski katalizator z redoks reakcijami pretvarja strupene pline na izstopu iz izpušne cevi motorjev z notranjim zgorevanjem v manj škodljive pline. Katalizatorji se uporabljajo pri bencinskih in dizelskih motorjih. V Združenih državah Amerike se katalizatorji v vozilih uporabljajo že od leta 1975. Čeprav so katalizatorji najpogostejši v avtomobilih, avtobusih in tovornjakih, se uporabljajo tudi v viličarjih, lokomotivah, električnih generatorjih itd.

Katalizator sestavljajo naslednji deli:

- podporni material,
- porozna oksidna plast,
- plast iz cerijevega oksida in
- plast katalizatorja.

Podporni material (angl. *catalyst support*) je izdelan iz keramike s satasto strukturo. Podporni material mora zagotoviti veliko površino in biti temperaturno obstojen.

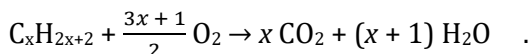
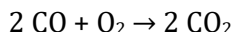
Porozna oksidna plast (angl. *washcoat*) je tanka plast, ki ima veliko površino. Zaradi velike površine porozna oksidna plast omogoča disperzijo kovinskih katalizatorjev. Dobri materiali so temperaturno obstojni in imajo nepravilno hrapavo površino. Z uporabo porozne oksidne plasti se na največjo možno mero poveča površina za potek katalitične reakcije. Uporabljajo se aluminijevi oksidi, titanov dioksid itd.

Plast iz cerijevega oksida služi za shranjevanje kisika.

Plast katalizatorja je običajno zmes različnih žlahtnih kovin. Najpogosteje se uporablja platina, v manjši meri pa paladij in rodij. Platina se uporablja za reakcije oksidacije in redukcije, rodij za redukcijo in paladij za oksidacijo.

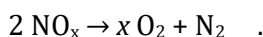
Katalizatorji so dvostezni in tristezni. Danes se uporabljajo samo še tristezni katalizatorji. Kljub poimenovanju dvostezni ali tristezni katalizatorji nimajo ločenih kanalov, temveč se poimenovanje stezni nanaša na vrsto reakcije, ki poteka v katalizatorju.

**Dvostezni katalizatorji** so oksidacijski in oksidirajo ogljikov monoksid CO v ogljikov dioksid CO<sub>2</sub> in ogljikovodike do vode H<sub>2</sub>O in ogljikovega dioksida CO<sub>2</sub>. Pri tem potekata v bencinskih in dizelskih motorjih naslednji reakciji:



Zaradi nezmožnosti redukcije dušikovih oksidov, se dvostezni katalizatorji ne uporabljajo več.

**Tristezni katalizatorji** omogočajo poleg obeh zgoraj navedenih reakcij, ki potekata v dvosteznem katalizatorju, v bencinskih motorjih še redukcijo dušikovih oksidov:



Redukcija in oksidacija se odvijata v istem ohišju katalizatorja.

Navedene reakcije najučinkoviteje potekajo, če motor deluje rahlo nad stehiometrično točko razmerja zraka in goriva. Pri bencinskih motorjih to ustreza približni vrednosti  $\lambda = 1$ . Za delovanje tristeznega katalizatorja je ključen gradnik lambda zaznavalo, ki z nadzorom količine kisika v izpušnih plinih, prek elektronskega krmiljenja vbrizgavanja goriva, omogoča, da motor in katalizator delujeta pri optimalnem razmerju goriva in zraka. Zaradi značilnosti lambda zaznavala motorji delujejo tako, da gorivna mešanica niha med revno (presežek zraka) in bogato (presežek goriva). Izkoristek katalitične pretvorbe močno pade, če motor deluje izven tega področja. Pri delovanju pri revni zmesi izpušni plini vsebujejo presežek kisika in redukcija dušikovih oksidov NO<sub>x</sub> ne poteče. Pri delovanju pri bogati zmesi se pri zgorevanju porabi ves kisik, zato je za delovanje na voljo le kisik, ki je shranjen v katalizatorju v plasti cerijevega oksida. Ko se tudi ta kisik porabi, katalizator ni več sposoben oksidirati izpušnih plinov. Pri pospeševanju motor deluje pri bogati zmesi. Po končanem pospeševanju mora nadzorni sistem motorja natančno uravnavati količino kisika v izpušnih plinih, da se plast cerijevega oksida ponovno napolni s kisikom, da pa hkrati ne poteče oksidacija dušikovih oksidov NO<sub>x</sub>.

V dizelskih motorjih je najpogosteje uporabljan katalizator **dizelski oksidacijski katalizator** DOC (angl. *diesel oxidation catalyst*). V osnovi je to dvostezni katalizator. Dizelski oksidacijski katalizator pretvarja ogljikov monoksid CO v ogljikov dioksid CO<sub>2</sub> in ogljikovodike do vode H<sub>2</sub>O in ogljikovega dioksida CO<sub>2</sub> na enak način, kot smo to že navedli pri bencinskih motorjih. Katalizatorji v dizelskih motorjih niso primerni za redukcijo dušikovih oksidov NO<sub>x</sub> zaradi presežka zraka v izpušnih plinih dizelskih motorjev. Zmanjšanje koncentracije dušikovih oksidov v izpušnih plinih dizelskih motorjev se je v preteklosti reševalo s ponovnim kroženjem izpušnih plinov EGR (angl. *exhaust gas recirculation*), danes pa se to izvaja s selektivno

katalitično redukcijo SCR (angl. *selective catalytic reduction*). Večina izdelovalcev motornih vozil se je namesto za dražje NO<sub>x</sub> adsorberje, ki vsebujejo žlahtne kovine, odločila za uporabo sistemov selektivne katalitične redukcije SCR, ki z amonijakom ali sečnino reducirajo dušikove okside NO<sub>x</sub> v molekularni dušik in vodo.

V katalizatorju se pod določenimi pogoji pojavljajo nezaželene reakcije, pri katerih nastajajo spojine žveplov sulfit, amonijak itd.



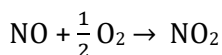
Slika 87: Izrabljen avtomobilski katalizator, keramično jedro s satasto strukturo [www.wikipedia.org]

#### **2.10.2.6 Adsorber dušikovitih oksidov**

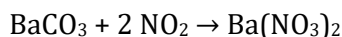
Adsorber dušikovitih oksidov ali past za dušikove okside je katalizator, ki z adsorpcijo reducira dušikove okside NO<sub>x</sub> v dušik N<sub>2</sub>. Uporablja se za bencinske motorje, ki delujejo z revno zmesjo oziroma pri prebitku zraka in za dizelske motorje. Zaradi tega, ker deluje pri revni zmesi, se imenuje tudi LNT (angl. *lean NO<sub>x</sub> trap*).

Adsorber uporablja adsorber npr. platino in barijev karbonat. Ko se past napolni, ne more več sprejeti dušikovitih oksidov. Adsorber se nato regenerira z vbrizgavanjem goriva pred adsorber, pri čemer postane za kratek čas  $\lambda < 1$ .

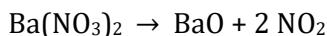
Zaporedje korakov pri adsorpciji je naslednje. V prvem koraku se dušikov monoksid NO oksidira v dušikov dioksid NO<sub>2</sub> v plinu nad platino.



Nastali dušikov dioksid NO<sub>2</sub> se adsorbira na oksidno površino barijevega karbonata BaCO<sub>3</sub> kot barijev nitrat Ba(NO<sub>3</sub>).



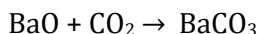
Zgornji reakciji potekata v revni zmesi. Kasneje se v bogati zmesi adsorbirani barijev nitrat  $Ba(NO_3)_2$  sprosti kot barijev oksid.



Dušikov dioksid  $NO_2$  se ob prisotnosti ogljikovega monoksida  $CO$  in ogljikovodikov  $HC$  pretvori v dušik



barijev oksid pa se pretvori nazaj v barijev karbonat.

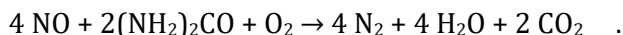


Sčasoma se na adsorber dušikovih oksidov veže žveplo, ki onemogoča adsorpcijo dušikovih oksidov.

#### **2.10.2.7 Selektivna katalitična redukcija SCR**

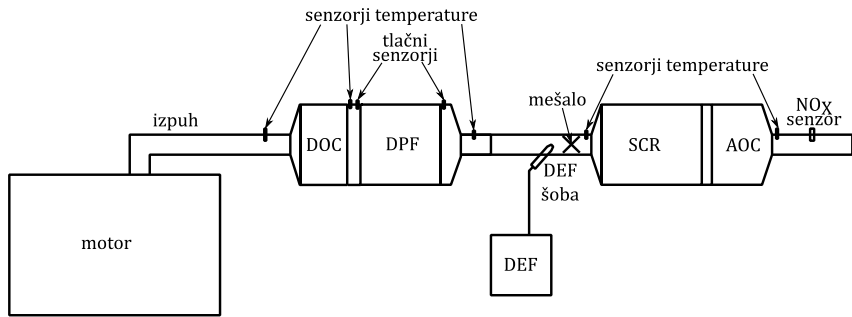
Selektivna katalitična redukcija je metoda pretvorbe dušikovih oksidov  $NO_x$  s pomočjo katalizatorja SCR v molekularni dušik in vodo. Pri tem se uporabljata amonijak ali sečnina, ki se dodajata toku izpušnih plinov in ki se adsorbirata na katalizator. V primeru, če uporabljamo sečnino, ob tem nastane tudi ogljikov dioksid. Shema delovanja katalizatorja in sistema selektivne katalitične redukcije SCR je prikazana na sliki 88.

Katalizator SCR je izdelan iz keramičnih materialov za substrat in iz kovin (vanadij, molibden, volfram, žlahtne kovine). V katalizatorju SCR ob dodajanju npr. vodne raztopine sečnine poteka v primeru dušikovega oksida  $NO$  naslednja reakcija:



Ob tem poteka še več sekundarnih reakcij. katalizatorji SCR so občutljivi na zastrupljanje in imajo zato omejen rok trajanja.

Pri delovanju sistema za selektivno katalitično redukcijo SCR znaša poraba vodne raztopine sečnine približno 2 % porabe goriva. Ker pa motor s SCR lahko deluje pri višjih temperaturah in pri višjem izkoristku, je poraba goriva manjša in kompenzira porabo sečnine.



Slika 88: Primer sheme sistema za čiščenje izpušnih plinov v vozilih z dieselskim motorjem

Nekateri izdelovalci motornih vozil v svojih vozilih uporabljajo obe konkurenčni tehnologiji za odstranjevanje dušikovih oksidov adsorpcijo dušikovih oksidov in selektivno katalitično redukcijo SCR. Celoten sistem čiščenja izpušnih plinov sestavljajo naslednji gradniki:

- dizelski oksidacijski katalizator DOC,
- filter delcev DPF,
- adsorber dušikovih oksidov LNT,
- katalizator SCR in
- katalizator za amonijak AOC.

Nekatera podjetja v svojih osebnih ali tovornih vozilih kot zadnjo stopnjo čiščenja izpušnih plinov uporabljajo še katalizator za amonijak AOC.



## 3 Voda

Voda je ključni sestavni del okolja, brez katerega ne bi bilo življenja na Zemlji. Razvoj in obstoj življenja na Zemlji sta pogojena z ohranitvijo zdravega okolja, katerega najpomembnejši gradnik je prav voda. Poleg omogočanja življenja za današnje stopnjo civilizacije je voda eno temeljnih surovin, ki omogoča energetsko-tehnološke procese. Množina uporabne vode nastaja na osnovi naravnega hidrološkega ciklusa in se zmanjšuje zaradi človeške dejavnosti. Zmanjšanje je ponekod napredovalo tako daleč, da je treba za najbližjo prihodnost iskati nove vire pitne in tehnološko uporabne vode, kar je povezano z visokimi stroški. Človek tako s svojimi vsakdanjimi aktivnostmi ekološko najbolj obremenjuje zanj najpomembnejši del vodnih zalog.

Odpadne vode analiziramo na terenu in v laboratoriju. Na terenu, kjer odpadno vodo vzorčimo, kontinuirano merimo prostorninski tok, temperaturo, pH in koncentracije raztopljenih plinov kisika  $O_2$ , vodikovega sulfida  $H_2S$  itd.

Za vrednotenje onesnaževanja uporabljamo specifične in nespecifične parametre onesnaževanja. Za vrednotenje onesnaženja vode specifične parametre uporabljamo predvsem takrat, ko zaradi poznavanja tehnoloških postopkov pričakujemo, da bo voda vsebovala izbrane kemijske spojine, npr. fenol, formaldehid, organska topila, tenzide, cianide, težke kovine, pesticide itd. Če se specifični parametri pojavljajo v visokih koncentracijah, jih je treba znižati, lahko pa tudi zavirajo delovanje npr. komunalnih čistilnih naprav.

Večinoma za vrednotenje onesnaženja v okolju uporabljamo nespecifične parametre. Določanje vrednosti nespecifičnih parametrov ne zahteva poznavanja kemijske sestave posameznih odpadnih vod. Nespecifični parametri so npr. biokemijska potreba po kisiku, kemijska potreba po kisiku, celotni organski ogljik in raztopljeni organski ogljik.

V poglavju o vodi bomo predstavili merilne metode, ki se uporabljajo v okoljskem strojništvu. Merilne metode bomo razdelili na hidravlične meritve, kemijske meritve in biološke meritve.

### 3.1 Hidravlične meritve

Pri hidravličnih meritvah bomo obravnavali meritve prostorninskega toka vodotokov brez merskih objektov in z njimi ter vzorčenje za potrebe kasnejših laboratorijskih kemijskih in bioloških meritev.

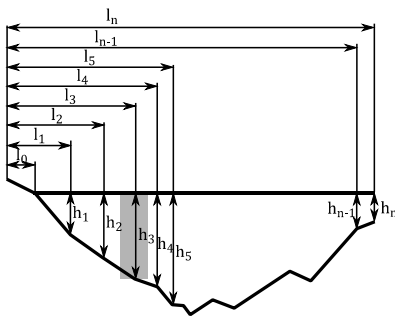
### 3.1.1 Merjenje prostorninskega toka vodotokov brez merskih objektov

Na splošno delimo meritve prostorninskega toka vodotokov brez merskih objektov na dve skupini:

- prostorninske meritve in
- meritve prostorninskega toka s traverziranjem.

Pri neposrednih oz. prostorninskih meritvah prostorninski tok določimo z meritvijo prostornine pretečene vode v določenem času. Prostorninske meritve so zelo natančne, vendar so omejene na manjše prostorninske tokove, ki jih v primernem časovnem intervalu zajamemo v merilno posodo za merjenje prostornine.

Pri meritvah prostorninskega toka s traverziranjem merimo hitrost toka v izbrani mreži točk (slika 89).



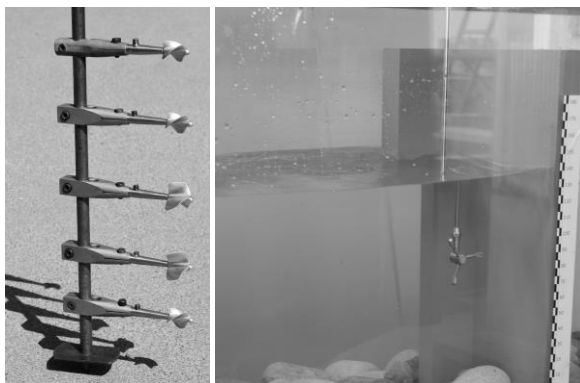
Slika 89: Postopek merjenja prostorninskega toka vodotoka s hidrometričnimi krilci ali z ultrazvočnimi anemometri. Levo: shema razporeditve lamel in desno naprava za merjenje prostorninskega toka vodotoka, Isar, Mittenwald, Nemčija.

Skupen prostorninski tok je vsota delnih prostorninskih tokov, to je skalarnih produktov vektorjev ploščine prečnega preseka in srednje hitrosti vode na tem. Med meritvami predstavljamo hidrometrična krilca ali ultrazvočne anemometre med posameznimi merilnimi mesti in vsaki izmerjeni hitrosti pripišemo navidezni delni presek vodotoka. Meritvi hitrosti in površine sta ločeni meritvi in se izvajata z različno metodologijo. Površino izmerimo z meritvijo globine vode na posameznih oddaljenostih od izhodiščne točke na enem od bregov. Predpostavimo, da je potek dna med posameznimi meritvami globine (navpičnicami) linearen. Na ta način dobimo t. i. lamele, za katere moramo izmeriti srednjo hitrost. Srednjo hitrost določimo kot povprečje posameznih izmerkrov hitrosti v različnih globinah navpičnice.

Za vodotoke obstaja teoretična navpična razporeditev hitrosti po globini. Nanjo v največji meri vplivata oblika prečnega in vzdolžnega preseka ter

hrapavost ostenja. V idealnih razmerah lahko zadovoljivo določimo srednjo hitrost v navpičnici z meritvijo le na eni globini, in sicer merimo hitrost vodnega toka na 60 % globine pod gladino. Celotni prostorninski tok je vsota posameznih prostorninskih tokov skozi ustrezne lamele. Običajno predpostavimo, da je hitrost toka pravokotna na vsako posamezno lamelo.

Namesto hidrometričnih krilc se za meritve hitrosti toka vodotokov v posameznih lamelah uporabljajo tudi ultrazvočni merilniki hitrosti. Obe vrsti merilnikov sta prikazani na sliki 90. Z nekaterimi ultrazvočnimi merilniki hitrosti lahko sočasno izmerimo tudi globino vodotoka. Taki merilniki uporabljajo načelo Dopplerjevega pojava, torej merijo spremembo med oddano in sprejeto frekvenco ultrazvoka. Frekvence delovanja znašajo približno od 500 do 1500 kHz. Za določitev hitrosti vode se meri frekvenca odbojev od mimobežnih delcev v vodi, ki potujejo skupaj s tokom, za določitev globine pa od struge vodotoka. Ker meri merilnik na način, da se giblje prečno na vodotok, mora v vsakem trenutku poznati svoj položaj. Le-tega določi merilnik glede na položaj na začetku gibanja, lastne hitrosti in smeri gibanja ter časa, ki je pretekel med posameznima meritvama hitrosti in globine. Zaradi več odbojev od tal in delcev na različnih višinah se taki navpični meritvi reče garnitura (angl. *ensemble*).

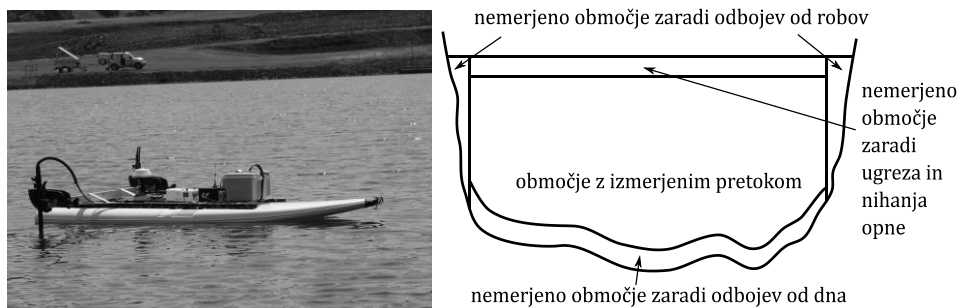


Slika 90: Za meritve hitrosti vode se v vodotokih in modelih uporablja hidrometrična krilca (levo) ali ultrazvočni merilnik hitrosti, ki deluje na načelu merjenja časa preleta (desno).

Hitrost premikanja dna vodotoka oz. prodonosnost se meri z ultrazvočnimi Dopplerjevimi merilniki na podoben način kot hitrost vodnega toka (slika 91). Gibanje dna ugotovimo tako, da prehoda struge ne zaključimo na nasprotnem bregu, ampak nadaljujemo na začetni breg. Meritev začnemo in končamo na istem mestu. Če je merilnik zabeležil navidezni premik med začetno in končno pozicijo, je ta posledica gibajočega dna oz. prodonosnosti.

Z ultrazvočnim merilnikom hitrosti ne moremo izmeriti v vseh točkah vodotoka. Območja, kjer ni mogoče meriti, so tik ob gladini, tik ob dnu in ob

straneh vodotoka. Območje tik pod vodno gladino je posledica dejstva, da potrebuje merilnik za delovanje globino vsaj približno od 0,2 do 0,3 m. Merilnik vsebuje zaznavalo, ki je oddajnik in sprejemnik hkrati. Ko zaznavalo odda ultrazvočni signal, opna zaniha, preden pa se izniha, pa zvočni val prepotuje določeno razdaljo. Šele potem je ultrazvočni merilnik pripravljen za sprejemanje odbitih signalov. Težave pri zaznavanju območja na dnu in ob straneh vodotoka so posledica stranskih šibkejših pulzov, ki nastanejo ob tvorbi glavnega pulza.



Slika 91: Merjenje prostorninskega toka vodotoka z akustičnim Dopplerjevim merilnikom, levo: namestitvev merilnika na trimaran in desno: merjeno območje in območja, kjer ni mogoče meriti.

Obstajajo še druge metode merjenja prostorninskega toka vodotoka brez merskih objektov, ki jih tu zgolj omenjamo, npr. metoda razredčenja, elektromagnetna metoda, metoda s pomočjo plovca in metoda naklon/površina.

### 3.1.2 Merjenje prostorninskega toka vode z merskimi objekti

Objekti za meritve prostorninskega toka so objekti, postavljeni v odprtih kanalih ali zaprtih cevovodih s prosto gladino, s pomočjo katerih določimo prostorninski tok iz gorvodno izmerjene gladine vode. Z merskimi objekti umetno zmanjšamo prečni presek vodotoka, da se gorvodno poviša nivo vode. Merski objekti so za odprte kanale ekvivalentni merjenju prostorninskega toka v ceveh z zaslonko ali Venturijevo cevjo. Če je zmanjšanje prečnega preseka odprtega kanala zadostno, lahko dobimo razmerje med dvigom vodne gladine in prostorninskim tokom. Na to razmerje vplivata bolj ali manj samo oblika in dimenzije objekta, zelo malo pa geometrija kanala oziroma cevi, gorvodno od objekta.

Navedemo lahko naslednje merske objekte za merjenje prostorninskega toka vode:

- široki prag,

- ostrorobi preliv in
- zožitev.

Poleg navedenih merskih objektov poznamo še druge [Steinmam, 2010], vendar jih tu ne bomo omenjali. Če je krona jezovne zgradbe višja od gladine vode pri normalnem, to je ob nemotenem odtoku na odseku pod objektom, govorimo o prelivu. Obravnavali bomo samo nepotopljene prelive in pragove, kjer je na prelivu dosežen prehod v deroči tok oz. prehod prek kritične globine. To pomeni, da razmere v obravnavanih primerih na dolvodnem odseku za merskim objektom ne vplivajo na prelivne razmere. Energija spodnje vode tedaj ne vpliva na razpoložljivo energijo za prelivanje.

Pri konstantni pretočni površini štejejo kot najugodnejšo tisto obliko preliva, kjer se pojavlja najmanj odlepljanja toka od konstrukcije oz. vrtinčenja. To povzroča dodatne energijske izgube, kar zmanjšuje prelivno sposobnost objekta oz. koeficient preliva  $\mu$  [Steinman, 2010]. V tem primeru potrebujemo za isto količino prostorninskega toka večjo prelivno višino in s tem večjo zajezitev gorvodno.

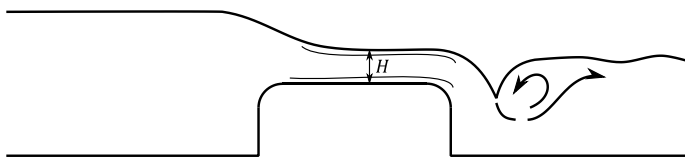
V nadaljevanju bomo opisali navedene merske objekte za merjenje prostorninskega toka vodotokov.

### 3.1.2.1 Široki prag

Široki prag (angl. *broad crested weir*) je namenjen merjenju velikih prostorninskih tokov. Dolžina praga v smeri toka mora biti taka, da so na kroni tokovnice vzporedne s krono praga, kot je prikazano na sliki 92. Krona mora biti določene višine. Široki prag omogoča meritve pri večjih prostorninskih tokovih in prepuščanje plavajočih predmetov. Najbolj uporabljeni so široki pragovi trikotne oblike, pravokotne oblike z močno zaobljenimi robovi in pravokotne oblike. Osnovna enačba za izračun prostorninskega toka vodotoka s širokim pragom je [Steinman, 2010]:

$$\dot{V} = \frac{3}{2} \sqrt{2g} \mu b H^{\frac{3}{2}} \quad . \quad (22)$$

V enačbi (21) je  $H$  je višina gladine vode nad pragom,  $b$  širina praga in  $\mu$  s standardom ali v literaturi podan pretočni koeficient.



Slika 92: Meritev prostorninskega toka vodotoka s širokim pragom

### 3.1.2.2 Ostrorobi preliv

Ostrorobi preliv (angl. *sharp crested weir*) je tanek, na tok pravokoten merski objekt (slika 93). Ostrorobi preliv je močno zožen široki prag, tako da je prelivna krona debela največ 6 mm. Kota prelivne krone mora biti višja od gladine spodnje vode. Geometrijska oblika prelivnega prečnega preseka je lahko trikotna (Thompson), pravokotna (Rehbock), trapezna (Cipoletti) in sorazmerna (Sutro) [Steinman, 1999]. Pomanjkljivost prelivov je, da so bolj občutljivi na plavajoče predmete in prod, zato jih v naravnih vodotokih ne uporabljamo.

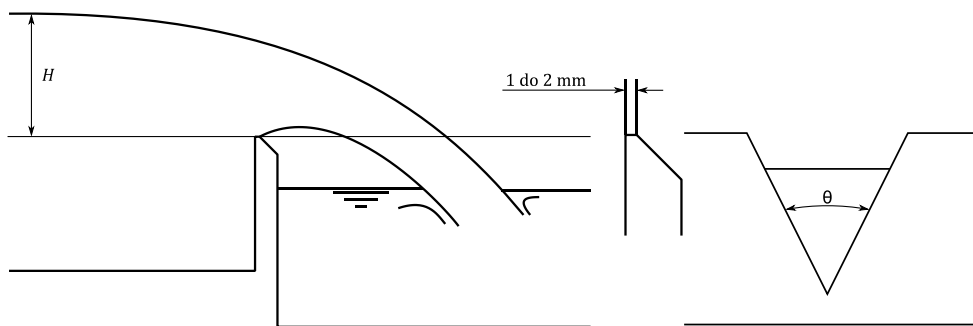
Prelivi se uporabljajo npr. v kanalih čistilnih naprav in za modelne laboratorijske preizkuse. Prostorninski tok je za trikotni preliv s kotom  $\theta$  enak [Steinman, 2010]

$$\dot{V} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \mu \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{\frac{5}{2}} \quad , \quad (23)$$

medtem ko za pravokoten preliv velja [Steinman, 2010]

$$\dot{V} = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} \quad . \quad (24)$$

V enačbi (23) je  $b$  širina pravokotnega preлива. Meritev višine se izvede od 2 do 6  $H$  pred pragom. Eksperimentalni podatki kažejo, da se vrednost koeficienta preлива  $\mu$  ne spreminja z višino  $H$ . Izjema so najmanjše višine, kjer na tok vode vplivajo dodatne sile npr. sila površinske napetosti.



Slika 93: Meritev prostorninskega toka vodotoka s prelivom

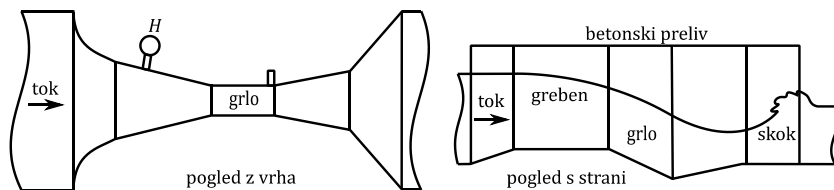
V praksi se prelivi uporabljajo kot standardizirane priprave za merjenje prostorninskega toka v odprtih kanalih.

### 3.1.2.3 Zožitev

Kjer imamo na voljo minimalen padec struge, za meritev prostorninskega toka uporabljamo zožitev. Glede na dolžino zožitve oz. grla jih delimo na zožitve s kratkim in dolgim grlom. Glede na obliko pa poznamo zaokroženo zožitev, pravokotno in trapezno zožitev. Običajno jih vgradimo v manjše vodotoke, čistilne naprave ter v namakalne jarke. Najlažja za izvedbo je pravokotna zožitev, vendar ima taka meritev največjo merilno negotovost. Zato tam, kjer je zahtevana majhna merilna negotovost meritve, uporabljamo trapezne zožitve. Pri pravokotni zožitvi izračunamo prostorninski tok [ISO 9826, 1992] po naslednji enačbi [25]:

$$\dot{V} = C \cdot H^n \quad . \quad (25)$$

V enačbi (25) je  $C$  konstanta zožitve,  $H$  globina vode pred zožitvijo in  $n$  eksponent.

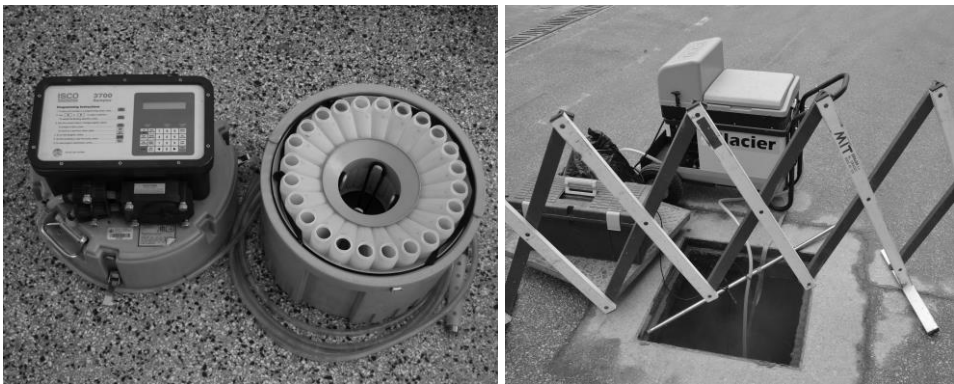


Slika 94: Parshallova zožitev za merjenje prostorninskega pretoka vode

Vrednost konstant  $C$  in  $n$  podaja standard [ISO 9826, 1992]. Zožitve omogočajo dober pretok proda, zato jih velikokrat vgradimo tam, kjer je ta lastnost potrebna.

### 3.2. Vzorčenje vode za potrebe kemijskih in bioloških meritev

Vzorčenje je zajemanje vzorcev vode. Za pravilnost analize vode moramo zajeti vzorec, ki je ustrezno povprečje vode, ki jo nameravamo analizirati s kemijskimi in biološkimi metodami. Način odvzema vzorcev je za analizo pomembna komponenta in lahko močno vpliva na rezultat. Vzorčimo lahko ročno ali avtomatsko. Pri ročnem vzorčenju zajamemo trenutni vzorec. To je vzorec, ki predstavlja kakovostno stanje vode v določenem času. Zaradi tega moramo pri podajanju rezultatov analize podati tudi čas zajetja vzorca. Tako lahko vzorčimo vode, katerih kakovost se sčasoma le malo spreminja, oziroma se spreminja počasi, npr. vodotoki. Vzorec zajamemo iz glavnega toka vode v čisto posodo. Pogosto se kakovost odpadnih vod spreminja sorazmerno hitro, npr. iztoki iz industrijskih obratov in industrijskih čistilnih naprav. Pri trenutnem vzorčenju bi prišlo do velikih kakovostnih razlik odvisno od časa zajetja vzorca, če bi en trenutni vzorec upošteval kot celodnevni ali celo tedenski vzorec. Zato pogosto zajemamo povprečni 24-urni vzorec. Za takšno vzorčenje uporabljamo avtomatske vzorčevalnike (slika 96).



Slika 95: Vzorčevalnik vode, levo: vzorčevalnik s komoro za shranjevanje vzorcev, desno: vzorčevalnik v industriji steklene volne zbira vzorce črepinjske vode pri zaustavitvi proizvodnje, ker steklarska peč z zmanjšano obremenitvijo še vedno deluje tudi med zaustavitvami proizvodnje.

Avtomatski vzorčevalnik nam omogoča časovno in pretočno proporcionalno zajemanje vzorca v pravilnih razmikih prek celotnega izbranega časa vzorčenja. Najpogosteje je ta čas 24 ur, saj se kakovost vzorca spreminja prek posameznega dne zaradi delovnega procesa, ponavlja pa se običajno vsak delovni dan. Zato je kakovost povprečnih 24-urnih vzorcev med seboj primerljiva. Avtomatski vzorčevalnik sestavljajo računalniški del, črpalka, posode za zajeti vzorec, cev, hladilnik in ohišje. Omogoča nam, da nastavimo



čas začetka in konca vzorčenja, časovne razmike zajetja vzorca, prostornino zajetega vzorca, temperaturo shranjenih vzorcev itd.

Vzorčevalnik lahko nastavimo tudi tako, da vzorce v posameznih razmikih med seboj ločuje in nam tako omogoči, da spremljamo kakovost vode ob posameznem času. Kadar izberemo pretočno sorazmerno vzorčenje, avtomatski vzorčevalnik zajema vzorce glede na količino pretečene vode. V tem primeru vzorčevalnik povežemo s števcem pretočene količine, ki je merilnik prostorninskega toka. Vzorce, ki vsebujejo velike količine aktivnih povzročiteljev onesnaženja, je treba po vzorčenju in pred analizo v kemijskem laboratoriju razredčiti z demineralizirano vodo.

Čas od odvzema vzorca z vzorčevalnikom do kemijske ali biološke analize mora biti čim krajši. Priporoča se, da se analiza izvede takoj po odvzemu, v skrajnem primeru najkasneje po 24 urah. Idealno bi bilo, da bi analizo izvedli na kraju samem, kar pa navadno ni izvedljivo.

### **3.3. Kemijske meritve**

V nadaljevanju bomo predstavili merjenje naslednjih kemijskih parametrov:

- količine neraztopljenih snovi,
- pH,
- koncentracije raztopljenega kisika,
- kemijske potrebe po kisiku,
- biokemijske potrebe po kisiku,
- celotnega organskega ogljika,
- raztopljenega organskega ogljika in
- merjenje dušika.

#### **3.3.1. Merjenje količine neraztopljenih snovi**

Neraztopljene snovi so trdne snovi v kapljevini, ki jih običajno izločimo s filtracijo ali centrifugiranjem in nato sušimo pri določenih pogojih, njihovo vsebnost pa določimo gravimetrično. Med neraztopljene snovi sodijo sedimentirajoče, lebdeče in plavajoče anorganske in organske snovi. Pod pojmom neraztopljene snovi razumemo tisti del snovi, ki jih v procesu filtracije zadrži filter s predpisano standardizirano velikostjo por.

Meritve v grobem potekajo na naslednji način. Papirnati ali stekleni filter speremo z destilirano vodo in ga damo sušiti v sušilnik pri 105 °C, sušimo ga do konstantne mase. Nato stehtamo ohlajen filter ter skozenj prefiltriramo npr. 100 mL vzorca. Filter s filtratom nato sušimo na temperaturi 105 °C eno uro oziroma do konstantne mase. Ohlajenega ponovno stehtamo.

Vsebnost neraztopljenih snovi (usedljivih in suspendiranih) je kriterij, na osnovi katerega sklepamo o potrebnosti mehanskega čiščenja.

### 3.3.2. Merjenje pH

pH je merilo za koncentracijo hidroksidnih ionov v raztopini in s tem posledično za njeno kislost ali alkalnost. pH merimo običajno s kombinirano stekleno elektrodo. Sestavljena je iz Ag/AgCl žičke, potopljene v raztopino HCl v tanki, okrogli stekleni membrani. Referenčna elektroda je v stiku z merjeno kapljevino prek membrane, ki omogoča ionom prehod. Električno merjenje pH vrednosti deluje na načelu merjenja razlike potencialov med tema dvema elektrodama.

Stekleni merilni del elektrode na dnu je prevlečen zunaj in znotraj s približno 10 nm debelo plastjo hidriranega gela. Ti dve plasti ločuje plast stekla. Struktura stekla je taka, da omogoča kovinskim kationom  $\text{Na}^+$  iz hidriranega gela omejeno mobilnost. Kovinski natrijevi kationi  $\text{Na}^+$  v hidriranem gelu difundirajo iz stekla v raztopino, medtem ko lahko vodikovi ioni  $\text{H}^+$  iz raztopine difundirajo v hidrirani gel. Hidrirani gel na ta način omogoča, da je pH elektroda ionsko selektivna elektroda.  $\text{H}^+$  ioni ne prehajajo skozi stekleno membrano pH elektrode, medtem ko  $\text{Na}^+$  ioni prehajajo, s tem pa prihaja do sprememb proste energije.

Laboratorijski merilnik pH je prikazan na sliki 96.



Slika 96: Laboratorijski merilnik pH

### 3.3.3. Merjenje koncentracije raztopljenega kisika

Merjenje koncentracije raztopljenega kisika sodi med najpogostejše meritve na področju okoljskega strojništva. Kisik, čeprav je slabo topen v vodi, je za življenje v vodi nujen. Količina raztopljenega kisika je inverzno sorazmerna temperaturi, največja količina se ga raztopi v vodi pri  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , to je  $14,6\text{ mg/L}$ .

Nadzor in vodenje procesov na čistilnih napravah, kot so odstranjevanje ogljikovih spojin, nitrifikacija in denitrifikacija, so močno odvisni od koncentracije kisika v prezračevalnih bazenih.

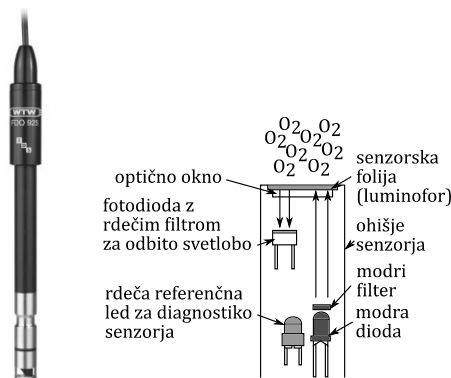
Količina kisika se meri v vodi z naslednjimi glavnimi metodami:

- optično metodo,
- elektrokemijsko metodo in
- titracijsko metodo, katero imenujemo Winklerjev preizkus.

### 3.3.3.1. Merjenje koncentracije raztopljenega kisika z optično metodo

Prednost optične metode merjenja koncentracije kisika pred elektrokemijskimi je, da se optično zaznavalo ne obrablja. Optična metoda temelji na fizikalnem pojavu luminiscence oziroma optične luminiscence. Luminiscenca je pojav, da posamezna snov (ta vsebuje snov, ki jo imenujemo luminofor) oddaja svetlobo, če jo vzbudimo. Metoda je na ta način podobna metodi ultravijolične fluorescence z razliko, da v tem primeru za vzbujanje uporabljamo modro svetlobo namesto ultravijolične in da ne merimo koncentracije plinov.

Zaznavalo koncentracije raztopljenega kisika je prikazano na sliki 97.

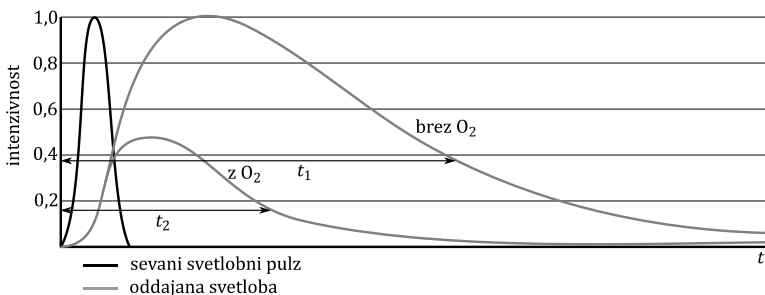


Slika 97: Zaznavalo koncentracije raztopljenega kisika z optično metodo. Levo: optično zaznavalo za merjenje koncentracije raztopljenega kisika. Luminofor kisikovega zaznavala je na dnu zaznavala. Zaznavalo seva modro svetlobo z LED diodo in meri izsevano rdečo svetlobo s fotodiodo. Desno: načelo delovanja. [www.wtw.com].

Zaznavalo imenujemo tudi LDO (angl. *luminescent dissolved oxygen*). Optično zaznavalo za merjenje koncentracije kisika v vodi je sestavljeno iz vira modre svetlobe in luminofora. Luminofor je izveden v obliki tankega folijskega zaznavala. Pokrov zaznavala z luminoforjem je pritrjen na zaznavalo in je med meritvami v vodi. Ko vir svetlobe, ki je nameščen ob luminoforu, posveti na luminofor, sta jakost in čas trajanja izsevane svetlobe sorazmerna koncentraciji kisika v raztopini v okolici luminoforja. Molekule kisika v vodi so zaradi tega v stiku z luminoforjem. V zaznavalu vir modre svetlobe oddaja pulze z veliko energijo. Čas trajanja pulzov je približno 50 ms. Energija

svetlobe se prenese na luminofor, zaradi česar se elektroni v luminoforju vzbudijo na višji energijski nivo, nato v zelo kratkem času preidejo naravnost ali prek vmesnih nivojev nazaj na osnovni nivo. Ko so kisikove molekule v stiku z luminoforjem, omogočijo, da molekule kisika absorbirajo energijo vzbujenih elektronov in jim omogočijo vrnitev na osnovni nivo, ne da bi elektroni pri tem oddali svetlobo. Čim večja je koncentracija kisika, večje je zmanjšanje jakosti luminiscirane rdeče svetlobe. Molekule kisika v okolici luminoforja s tem, da absorbirajo energijo vzbujenih elektronov brez luminiscence, tudi skrajšajo čas, v katerem se pojavi luminiscenca. Obema učinkoma pravimo tudi gašenje (angl. *quenching*). Prednost metode je torej v tem, da ne meri jakosti izsevane svetlobe v absolutnem smislu, temveč zgolj časovno razliko, za koliko se skrajša čas pojavljanja vrha luminiscirane rdeče svetlobe, kot to prikazuje slika 98.

Pri uporabi optične metode merjenja koncentracije kisika v vodi ni potrebno mešanje, ker se pri tej metodi kisik ne porablja. Prav tako ni nevarnosti onesnaženja zaznavala z vodikovim sulfidom  $H_2S$ .



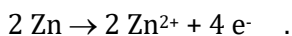
Slika 98: Gašenje luminiscence. Po sprejetem pulzu luminofor takoj začne oddajati rdečo svetlobo. Maksimalna jakost luminiscirane svetlobe in čas ugašanja sta odvisna od koncentracije kisika v okolici, čas ugašanja je določen kot čas, ki preteče od vzbujanja, da se jakost rdeče svetlobe zmanjša na  $1/e$  največje jakosti.

### 3.3.3.2. Merjenje koncentracije kisika z elektrokemično metodo

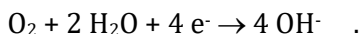
Merjenje koncentracije kisika z elektrokemično metodo je še vedno najbolj razširjena metoda merjenja. Elektrokemična zaznavala so podobna kot tista, ki smo jih opisali v poglavju o merjenju koncentracije plinov z elektrokemično metodo. Načelo delovanja elektrokemične celice je prikazan na sliki 41. V konici elektrode za merjenje se nahaja glava elektrode z zelo tanko membrano, ki je prepustna za molekule kisika, vendar pa ne za nekoliko večje molekule elektrolita. Pri merjenju prodirajo molekule kisika v elektrolit in do merilne elektrode. Debelina membrane in material, iz katere je izdelana, določa odzivni čas zaznavala. Membrane so npr. iz teflona ali polietilena.

Kisik vstopi v zaznavalo skozi permeabilno membrano z difuzijo in se reducira na katodi, s tem pa nastane merljiv električni tok.

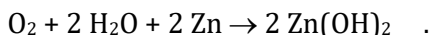
Najpreprostejša elektroda, hkrati tudi prva, ki se je uporabljala za merjenje koncentracije raztopljenega kisika v vodi, deluje na načelu galvanske celice. Če celica uporablja srebrno in cinkovo elektrodo, sta elektrodi dovolj različni, da se sami polarizirata in reducirata molekule kisika, ne da bi nanjo narinili napetost. Elektrokemična galvanska celica vsebuje tudi merilnik toka, ki prebere električni signal, to je tok med obema elektrodama in ta tok je sorazmeren količini kisika, ki potuje skozi membrano, kemično pa je to posledica oksidacije cinka in redukcije kisika na srebrni elektrodi. Na cinkovi elektrodi poteka reakcija



Na srebrni elektrodi poteka reakcija



Skupna reakcija je



Ker se kisik na elektrodi porablja s hitrostjo, ki je enaka difuziji prek membrane, se zato koncentracija kisika v okolici membrane zmanjšuje. Zato je potrebno vodo v okolici zaznavala mešati ali pa zaznavalo premikati v kapljevini.

Poznamo še nekaj drugih vrst elektrokemičnih celic za merjenje koncentracije kisika.

### **3.3.3.3. Merjenje koncentracije kisika s titracijsko metodo**

Titracijska metoda za določitev koncentracije raztopljenega kisika v vodi se imenuje Winklerjeva metoda. To je standardizirana metoda merjenja koncentracije raztopljenega kisika.

Pri tej metodi se prek serije kemijskih reakcij kisik združi z jodom in tvori zlatorumeno snov. Ker je vsaka molekula kisika povezana z molekulo joda, lahko določimo količino kisika na osnovi merjenja količine joda, saj sta si množini komplementarni. Pri nevtralizaciji joda z dodatkom tiosulfata se zlatorumena barva izgubi in tako lahko določimo, koliko joda oziroma kisika je v vzorcu.

### **3.3.4. Merjenje biokemijske potrebe po kisiku**

Biokemijska potreba po kisiku  $\text{BPK}_5$  (angl. *biochemical oxygen demand*,  $\text{BOD}_5$ ) je množina kisika, ki je v 5 dneh potrebna za oksidacijo razgradljivih organskih

snovi s pomočjo mikroorganizmov. Meritev torej traja 5 dni. Organske snovi služijo mikroorganizmom kot hrana pri oksidaciji organskih snovi v ogljikov dioksid in vodo. BPK<sub>5</sub> je torej merilo za onesnaževanje površinskih vod z razgradljivimi organskimi snovmi, za razgradnjo katerih mikroorganizmi porabljajo kisik in istočasno izločajo ogljikov dioksid.

Najbolj čisti vodotoki imajo koncentracijo BPK<sub>5</sub> 1 mg/L, zmerno onesnažen okrog 2 do 5 mg/L, odpadna komunalna voda okrog 600 mg/L in odpadna komunalna voda po čiščenju okrog 20 mg/L.

Po **klasični metodi merjenja biokemijske potrebe po kisiku** se vzorec inkubira pri 20 °C v stekleničkah in se določi koncentracija kisika v začetku in na koncu inkubacije kemijsko po Winklerjevi metodi.

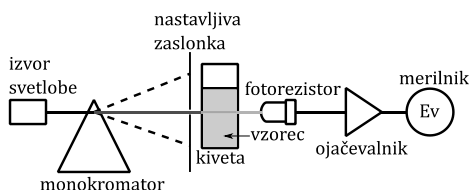
Pri manometrični metodi merjenja BPK<sub>5</sub> merjenje poteka manometrično v zaprtem sistemu. Oksidacijo amonijaka pri meritvi blokiramo oziroma inhibiramo. Mikroorganizmi v vzorcu porabljajo kisik in tvorijo ogljikov dioksid CO<sub>2</sub>, ki se absorbira. Absorpcija ogljikovega dioksida CO<sub>2</sub> poteka običajno z litijevim hidroksidom, ki ga dodamo v merilno steklenico nad gladino vode, zaradi česar nastane podtlak, katerega vrednost po petih dneh izmerimo kot vrednost BPK<sub>5</sub> v mg/L, merilne steklenice morajo biti nepredušno zaprte.



Slika 99: Merjenje BPK z metodo respiracije, levo: steklenice Oxitop imajo na vrhu v merilni glavi nameščen manometer, hkrati morajo biti nepredušno zaprte. Desno: merjenje tlaka z U cevnimi manometri [www.wtw.com in www.jingkeyiqi.com].

Merjenje biokemijske potrebe po kisiku BPK<sub>5</sub> izvajamo tudi s **kivetskimi preizkusi**. Kivetni preizkusi so vrsta spektrofotometričnih ali spektroskopskih meritev koncentracije različnih snovi v vodi. Molekulska spektroskopija, ki temelji na UV, vidnem in IR-valovanju, se v veliki meri uporablja za identifikacijo in merjenje koncentracije organskih in anorganskih spojin v vodi. Spektrofotometer za uporabo s kivetnimi preizkusi je sestavljen iz izvora svetlobe, monokromatorja, kivete in zaznavala. Za izvor svetlobe

uporabljam devterijevo ali volframovo žarnico. S prvo merimo v območju med 195 in 375 nm, z drugo pa v območju med 350 in 1000 nm. Monokromator je sestavljen iz optične rešetke, optične prizme ali iz optičnega filtra. Z izbiro kota padanja svetlobe na optično rešetko ali optično prizmo lahko izberemo valovno dolžino svetlobe, ki jo bo monokromator prepustil. Kivete so dolge nekaj centimetrov in so kvadratnega ali okroglega preseka (slika 100). So iz kvarčnega stekla, navadnega stekla ali pa plastične. Tisti stranici, kjer prestopa skozi kiveto žarek svetlobe, morata biti gladki in čisti, saj to vpliva na točnost merjenja. Zaznavalo meri intenziteto prepuščene svetlobe skozi vzorec v kivetu.



Slika 100: Spektrofotometrične meritve, levo: spektrofotometer z vstavljeno okroglo kiveto, grelnikom in stojalom za kivete, desno: načelo delovanja enožarkovnega spektrofotometra

Spektrofotometrijska merjenja absorpcije se izvajajo pri valovni dolžini, ki odgovarja nekemu absorpcijskemu maksimumu. V tej točki je sprememba absorpcije na enoto koncentracije največja. Absorpcijska krivulja je v maksimumu skoraj vedno ravna, kar omogoča dobro linearnost in manjšo možno napako, če se ne doseže točna valovna dolžina na monokromatorju.

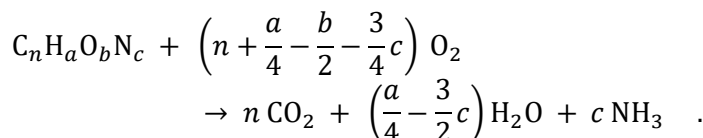
Na absorpcijo v raztopini vplivajo koncentracije naravnih topil, pH, temperatura, koncentracije elektrolitov, čas trajanja reakcije ter prisotnost snovi, ki motijo kemijsko reakcijo, ki poteka v kivetu.

Spektrofotometer primerja delež svetlobe, ki preide skozi referenčno raztopino in skozi merjen vzorec. Ko svetloba potuje skozi vzorec, se del svetlobe pri tem absorbira, prepuščena svetloba pa nadaljuje pot do zaznavala. Absorpcijo svetlobe podaja Beerov zakon, ki velja za razredčene raztopine. Obstajata dve glavni različici spektrofotometra, enožarkovni (slika 100) in dvožarkovni. V dvožarkovnem spektrofotometru delilnik snopa razdeli svetlobo na dva dela. En snop prehaja skozi referenčno raztopino proti fotozaznavalu, istočasno pa drugi prehaja skozi vzorec proti drugemu

fotozaznavalu. Pri enožarkovnem spektrofotometru pa merjenje zahteva dva koraka. V prvem koraku pomerimo absorpcijo z referenčno kiveto, v drugem pa z merjeno kiveto.

### 3.3.5. Merjenje kemijske potrebe po kisiku KPK

V okoljski kemiji je merjenje kemijske potrebe po kisiku KPK namenjeno ocenjevanju količine organskih spojin v vodi. Največkrat se meritev izvaja za določitev koncentracije organskih spojin v vodotokih in odpadni vodi. Zaradi tega je KPK ustrezno merilo kakovosti voda, izraža se ga v mg/L oziroma ppm, kar vrednoti količino kisika, ki se pri tem porabi za oksidacijo. Osnova za meritev kemijske potrebe po kisiku je, da se skoraj vse organske spojine lahko oksidirajo do ogljikovega dioksida v prisotnosti močnega oksidanta in pod kislimi pogoji. Količina kisika, ki je potrebna za oksidacijo organskih spojin v ogljikov dioksid, amonijak in vodo, je podana z naslednjo splošno kemijsko reakcijo



Zgornja kemijska reakcija vsebuje potrebo po kisiku za proces oksidacije amonijaka v nitrat. Ta proces se imenuje nitrifikacija.

Meritev KPK poteka na osnovi reakcije s kalijevim dikromatom, čeprav se je v zgodovini uporabljalo še več drugih spojin. Znano količino oksidanta dodamo vzorcu raztopin, ki jih analiziramo.

Organska snov se pri oksidaciji oksidira s kalijevim dikromatom v 50 % raztopini žveplove (VI) kisline z dodatkom srebrovega sulfata  $Ag_2SO_4$  kot katalizatorja. Reakcijo motijo kloridni ioni. Oksidacijo kloridnih ionov preprečimo z dodatkom  $HgSO_4$ , da nastane topen kloromerkuratni (II) kompleks. Bromidni in jodidni ioni reagirajo podobno.

Po dveurni reakciji pri 148 °C s spektrofotometrom ali fotometrom izmerimo absorpcijo šibko obarvanih kromovih ionov  $Cr^{3+}$ .

S kemijskimi metodami lahko po končani reakciji presežek dodanega dikromata v vzorcu tudi titriramo. Ta meritev je standardizirana. Za merjenje kemijske potrebe po kisiku so na voljo tudi kivetni preizkusi.

V primeru, da je v vodi vsa organska snov razgradljiva, sta kemijska in biološka potreba po kisiku enaki. Kadar pa voda vsebuje biološko nerazgradljive organske substance, npr. poleg komunalnih še druge oblike industrijskih odpadnih vod, potem je kemijska potreba po kisiku večja od biološke. Za mnoge vrste odpadnih voda je možno potegniti vzporednico med vrednostma KPK in  $BPK_5$ . Slednje je lahko zelo koristno, saj je KPK mogoče določiti v roku treh ur, medtem ko za določitev  $BPK_5$  potrebujemo pet dni.



Biološka razgradljivost nam pove, ali je mogoče odpadno vodo biološko čistiti. Prve informacije o razgradljivosti primesi v odpadni vodi nam daje razmerje BPK<sub>5</sub>/KPK. Vrednost razmerja BPK<sub>5</sub>/KPK je za biološko razgradljive odpadne vode višja kot 0,5.

### 3.3.6. Merjenje koncentracije celotnega organskega ogljika (TOC) in raztopljenega organskega ogljika (DOC)

Koncentracija celotnega organskega ogljika TOC (angl. *total organic carbon*) je parameter, s katerim ugotavljamo prisotnost oz. koncentracijo organskih snovi v pitni ali odpadni vodi. Koncentracija celotnega organskega ogljika v vodi vsebuje raztopljene in suspendirane snovi. Vključene so najrazličnejše oblike ogljika: elementarni ogljik, delci saj, onesnažila benzen, toluen, cikloheksan, kloroform, cianidi itd.

Za določevanje koncentracije celotnega organskega ogljika TOC se uporablja analizator TOC, ki omogoča določanje koncentracij celotnega, organskega in anorganskega ogljika. Koncentracije celotnega organskega ogljika TOC določamo kot razliko med vsebnostjo skupnega in anorganskega ogljika. Za določevanje celotnega organskega ogljika TOC vzorec vode prelijemo v steklene epruvete in vstavimo v analizator. Za določevanje raztopljenega organskega ogljika DOC (angl. *dissolved organic oxygen*) vzorec vode najprej prefiltriramo skozi filter papir in filtrat prelijemo v epruveto ter vstavimo v analizator. Pripravimo tudi slepi poskus, pri čemer namesto vzorca vzamemo destilirano vodo.

Za rezultate monitoringa pitne vode v Sloveniji je za oceno skladnosti dogovorjena mejna vrednost za koncentracijo celotnega organskega ogljika TOC 4 mg/L.

### 3.3.7. Merjenje koncentracije dušika v vodi

Celotni dušik je vsota vseh vrst dušikovih spojin, organskega dušika, amonijevega dušika ter nitratnega in nitritnega dušika. Metoda neposrednega določanja koncentracije organskega dušika ni mogoča, saj pri vsaki merilni metodi še vedno ostane nekaj vezanega anorganskega dušika. Elementarni dušik se prav tako pojavlja v vodi, za biološke procese je nevtralen in se iz vode sam od sebe izloča.

Zato za določanje koncentracije **organskega dušika** določamo koncentracijo celotnega dušika, ki mu odštejemo koncentracijo nitratov, nitritov in amonijevega dušika. Koncentracije nitratov, nitritov in amonijevega dušika so neposredno določljive. Glavni vir organskega dušika v odpadnih vodah so beljakovine, ki prispevajo tudi do 80 % k skupni koncentraciji. Določanje poteka s pomočjo Kjeldahlove metode, pri kateri pustimo vzorec vode najprej zavreti, da amonijak anorganskega izvora izhlapi. Ta vzorec prepustimo

procesu presnove. Med presnovo se organski dušik pretvori v amonijak, katerega koncentracijo pa lahko določimo.

Koncentracija **Kjeldahlovega dušika** se ugotavlja po enakem postopku kot koncentracija organskega dušika, vendar s to razliko, da se pred pričetkom presnove amonijaka ne odstrani. Koncentracija Kjeldahlovega dušika je vsota koncentracij organskega dušika in amonijevega dušika.

Za določanje koncentracije **amonijevega dušika** se uporabljajo precej različne metode, med njimi destilacija, titriranje ter spektrofotometrija z natrijevim diklorizocianuratom in natrijevim salicilatam.

Koncentracijo **nitritnega dušika** se določa spektrometrično. Je nestabilen in se lahko oksidira v nitratno obliko. Kljub nizkim koncentracijam, v katerih se pojavlja, je pomemben parameter za preučevanje obremenitve voda, saj je zelo strupen za večino vrst rib in drugih v vodi živečih vrst. Za določanje nitritov v odpadni vodi se uporablja metoda spektrofotometrije ter ionska kromatografija.

**Nitratni dušik** je v obliki nitratnih ionov, ki so največja oksidacijska oblika dušika v odpadnih vodah. Nitratni dušik je mogoče reducirati do elementarnega dušika. Nitratni dušik v vodi določamo s pomočjo ionske kromatografije in spektrofotometrije.

### 3.4. Biološke meritve

Bakteriološko onesnaženost odpadne vode ugotavljamo z določanjem skupnega števila klic, z določanjem števila koliformnih bakterij ali indeksom biološke pestrosti vodotokov (Samec, 2006).

Število koliformnih bakterij izražamo z najverjetnejšim številom MPN (angl. *most probable number*), ki nam pove, koliko koliformnih bakterij je v 100 mL ali 1 L odpadne vode. Število koliformnih bakterij lahko prikažemo tudi s koli titrom, kar pomeni najmanjšo količino vode, v kateri je vsaj ena bakterija, njihovo prisotnost pa določamo tudi z metodo membranske filtracije. Membranska filtracija poteka tako, da filter, skozi katerega smo precedili odpadno vodo, položimo na specifično selektivno gojišče, kjer zrastejo koliformne bakterije v značilni obliki in barvi. Bakterijske kolonije preštejemo in jih izrazimo v količini na 100 mL ali na 1 L vzorca.

Določamo še število koliformnih bakterij fekalnega izvora in streptokokov fekalnega izvora, strupenost za vodne bolhe, inhibicijo nitrifikacije, biološko razgradljivost, aerobno razgradljivost (Zahn-Wallensov preizkus), anaerobno razgradljivost itd.

Z indeksom biološke pestrosti merimo množino organizmov določenih vrst, kar je dober indikator prisotnosti različnih onesnažil v omenjenih vodnih sistemih (Samec, 2006).

## 4. Literatura

- Bank, M., *Basiswissen Umwelttechnik. Wasser, Luft, Abfall, Lärm, Umweltrecht*, Vogel Business Media, 2006.
- Beychok, Milton R., *Fundamentals Of Stack Gas Dispersion*, 4. izdaja, samozaložba, 2005
- Corbitt, R. A., *Standard handbook of environmental engineering*, New York, McGraw-Hill, 1999
- Gajendra Babu, M.K., Subramanian, K.A. *Alternative Transportation Fuels: Utilisation in Combustion Engines*, CRC Press, str. 230, 2013
- Goldenberg, E., Depollution des gaz d'échappement des moteurs Diesel au moyen de pots catalytiques, *Revue Inst. Franc. du Petrole*, 38, str. 793-805, 1983
- Goody, M., Robinson, G. D., Radiation in the Troposphere and Lower Stratosphere, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 77 (153), 1951
- Hales, J. M., Wet removal of sulfur compounds from the atmosphere, *Atmospheric Environment*, 12, str. 389-399, 1978
- Hinds, W.C., *Aerosol Technology*, J. Willey & Sons, New York, 1999
- Horiba, OBS-2200 Instruction manual, 2007
- Howard, J. N., Absorption spectra for major natural greenhouse gases in the earth's atmosphere, *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, str. 1459, 1959
- ISO 9826:1992, Measurement of liquid flow in open channels - Parshall and SANIIRI flumes, 1992
- Levpušček, P., Izbira primerne vetrne turbine za razmere na Kanalskem vrhu, diplomsko delo, Univerza v Novi Gorici, Poslovno - tehniška fakulteta, 2012
- Kakovost zraka v Sloveniji v letu 2011, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana, 2012
- Mackenzie, F.T. and J.A. Mackenzie, *Our changing planet*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, str. 288-307, 1995
- Pasquill, F., The estimation of the dispersion of windborne material, *The Meteorological Magazine*, 90(1063), str. 33-49, 1961
- Pravilnik št. 83 Ekonomske komisije Združenih narodov za Evropo (UN/ECE) – Enotne določbe za homologacijo vozil v zvezi z emisijami onesnaževal glede na zahteve za gorivo [2015/1038], Uradni list Evropske unije, L 172/1, 2015

- Rabl, A., Environmental benefits of natural gas for buses, *Transportation Research Part D*, 7, str. 391–405, 2002
- Rajar, R., *Hidravlika nestalnega toka*, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, Ljubljana, 1986
- Samec, N., *Okoljsko inženirstvo*, Študijski program za podiplomski študijski program tehniškega varstva okolja, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, 2006
- Schnelle, K. B., Brown, C. A., *Air Pollution Control Technology Handbook*, CRC Press, 2001
- Steinman, F., *Hidravlika*, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, 2. ponatis, Ljubljana, 2010
- Turner, D.B., *Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling*, 2. izdaja, CRC Press, 199
- Uredba (ES) št. 715/2007 evropskega parlamenta in sveta, o homologaciji motornih vozil glede na emisije iz lahkih potniških in gospodarskih vozil (Euro 5 in Euro 6) in o dostopu do informacij o popravilu in vzdrževanju vozil, Uradni list evropske unije, L171, 2007
- Vesilind, P. A., Peirce, J. J., *Environmental engineering*, Ann Arbor Science, 1982
- Wang, I., Parnell, C. B., Shaw, B. W., Lacey, R. E., A theoretical approach for predicting number of turns and cyclone pressure drop, *Transactions of the ASABE*, 49 (2), str. 491–503, 2006
- Weiner, R. F., Matthews, R. A., *Environmental Engineering*, četrta izdaja, Butterworth-Heinemann, 2003
- [www.avl.com](http://www.avl.com),  
[https://www.avl.com/documents/10138/1513689/MSSplus\\_with\\_Conditioning\\_Unit.jpg/5d8e294e-837c-4cb7-9d12-10fb54f6efe9](https://www.avl.com/documents/10138/1513689/MSSplus_with_Conditioning_Unit.jpg/5d8e294e-837c-4cb7-9d12-10fb54f6efe9), prebrano 15.6.2016
- [www.boschautoparts.com](http://www.boschautoparts.com),  
[https://www.boschautoparts.com/documents/101512/146401/LeanBurn\\_Desktop.png/6926d2d7-f4c3-475b-a975-064de5d26331?t=1414513225740](https://www.boschautoparts.com/documents/101512/146401/LeanBurn_Desktop.png/6926d2d7-f4c3-475b-a975-064de5d26331?t=1414513225740), prebrano 15.6.2016
- [www.bristolfilter.de](http://www.bristolfilter.de), [http://www.bristolfilter.de/wp-content/uploads/2014/09/b1000\\_ef\\_ansicht.jpg](http://www.bristolfilter.de/wp-content/uploads/2014/09/b1000_ef_ansicht.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.fuehlersysteme.de](http://www.fuehlersysteme.de), [http://www.fuehlersysteme.de/wind-speed-transmitter-classic.html?\\_\\_store=de\\_en&\\_\\_from\\_store=de\\_en](http://www.fuehlersysteme.de/wind-speed-transmitter-classic.html?__store=de_en&__from_store=de_en), prebrano 15.6.2016
- [www.hi-q.net](http://www.hi-q.net), [http://www.hi-q.net/images/Products/Hvp-3500X\(ge2cx2\).jpg](http://www.hi-q.net/images/Products/Hvp-3500X(ge2cx2).jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.hoecker-polytechnik.com](http://www.hoecker-polytechnik.com), [https://www.hoecker-polytechnik.com/files/hoecker/content/images/content/02\\_produkte/00\\_2013/produkt\\_bild\\_17\\_2.jpg](https://www.hoecker-polytechnik.com/files/hoecker/content/images/content/02_produkte/00_2013/produkt_bild_17_2.jpg), prebrano 15.6.2016

- [www.horiba.com](http://www.horiba.com), <http://www.horiba.com/typo3temp/pics/fc43f78ef0.jpg>, prebrano 15.6.2016
- [www.inspectapedia.com](http://www.inspectapedia.com), [http://inspectapedia.com/aircond/Anemometer\\_Vane\\_Wik.jpg](http://inspectapedia.com/aircond/Anemometer_Vane_Wik.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.jdevs.com](http://www.jdevs.com), [http://www.jdevs.com/portal/en//uploads/posts/1363963808\\_gheshm1.jpg](http://www.jdevs.com/portal/en//uploads/posts/1363963808_gheshm1.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.jingkeyiqi.com](http://www.jingkeyiqi.com), [http://www.jingkeyiqi.com/up\\_files/product/94660000.jpg](http://www.jingkeyiqi.com/up_files/product/94660000.jpg), prebrano 16.6.2016
- [www.mageesci.com](http://www.mageesci.com), <http://www.mageesci.com/>, prebrano 15.6.2016
- [www.malvern.com](http://www.malvern.com), [http://www.malvern.com/Assets/600x400\\_mastersizer\\_3000E\\_1.jpg](http://www.malvern.com/Assets/600x400_mastersizer_3000E_1.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.mru.com](http://www.mru.com), <http://en.mru.eu/fileadmin/medien/produkte/detailseite-bilder/optima-7.jpg>, prebrano 15.6.2016
- [www.mru.eu](http://www.mru.eu), [http://en.mru.eu/fileadmin/medien/produkte/detailseite-optionen/54904\\_NO\\_Sensor\\_bis\\_4000\\_ppm\\_klein.jpg](http://en.mru.eu/fileadmin/medien/produkte/detailseite-optionen/54904_NO_Sensor_bis_4000_ppm_klein.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.onsetcomp.com](http://www.onsetcomp.com), [http://www.onsetcomp.com/files/styles/image\\_widget\\_large/public/HOBO-Data-Logging-Rain-Gauge-RG3.jpg?itok=07idAVSQ](http://www.onsetcomp.com/files/styles/image_widget_large/public/HOBO-Data-Logging-Rain-Gauge-RG3.jpg?itok=07idAVSQ), prebrano 15.6.2016
- [www.podlipa-smrecje.si](http://www.podlipa-smrecje.si), [http://www.podlipa-smrecje.si/Objects/Galleries/36/Soncna\\_ura\\_04.jpg](http://www.podlipa-smrecje.si/Objects/Galleries/36/Soncna_ura_04.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.retsch.com](http://www.retsch.com), <http://www.retsch.com/products/sieving/sieve-shakers/as-400-control/>, prebrano 15.6.2016
- [www.rudis.si](http://www.rudis.si), <http://www.rudis.si/wp-content/uploads/2013/01/TET11.png>, prebrano 15.6.2016
- [www.sensidyne.com](http://www.sensidyne.com), [http://www.sensidyne.com/assets/images/Sensidyne\\_Nephelometer\\_with\\_Boot\\_small-250px.png](http://www.sensidyne.com/assets/images/Sensidyne_Nephelometer_with_Boot_small-250px.png), prebrano 15.6.2016
- [www.siemens.com](http://www.siemens.com), [http://www.malvern.com/Assets/600x400\\_mastersizer\\_3000E\\_1.jpg](http://www.malvern.com/Assets/600x400_mastersizer_3000E_1.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.tet.si](http://www.tet.si), [http://www.tet.si/images/yootheme/demo/frontpage/post\\_03.jpg](http://www.tet.si/images/yootheme/demo/frontpage/post_03.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.themoscowtimes.com](http://www.themoscowtimes.com), <http://www.themoscowtimes.com/upload/iblock/87e/norilsk.jpg>, prebrano 15.6.2016

- [www.theolivecentre.com, http://www.theolivecentre.com/RainMAXX-280mm-Rain-Gauge-image.jpg](http://www.theolivecentre.com/RainMAXX-280mm-Rain-Gauge-image.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.thiesclima.com, http://www.thiesclima.com/Ultrasonic3d.jpg](http://www.thiesclima.com/Ultrasonic3d.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.tuurdemeester.com http://www.tuurdemeester.com/wp-content/uploads/2011/04/Chernobyl-map-Caesium-137-contaminated-areas-in-European-countries.jpeg](http://www.tuurdemeester.com/wp-content/uploads/2011/04/Chernobyl-map-Caesium-137-contaminated-areas-in-European-countries.jpeg), prebrano 15.6.2016
- [www.wikipedia.org, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/Sunshine\\_car\\_d\\_closeup.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/Sunshine_car_d_closeup.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.wikipedia.org, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f1/EM\\_spectrum.svg/1280px-EM\\_spectrum.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f1/EM_spectrum.svg/1280px-EM_spectrum.svg.png), prebrano 15.6.2016
- [www.wikipedia.org, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Baghouse-dust-collector-for-asphalt-plants.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Baghouse-dust-collector-for-asphalt-plants.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.wikipedia.org, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/FAP-Filter\\_Peugeot.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/FAP-Filter_Peugeot.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.wikipedia.org, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/Inside\\_of\\_the\\_electrostatic\\_precipitator.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/Inside_of_the_electrostatic_precipitator.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.wikipedia.org, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b2/Pot\\_catalytique\\_vue\\_de\\_la\\_structure.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b2/Pot_catalytique_vue_de_la_structure.jpg), prebrano 15.6.2016
- [www.wtw.com, http://www.wtw.com/en/products/product-categories/accessories/thermo-cabinetsincubators/oxitopr-box.html](http://www.wtw.com/en/products/product-categories/accessories/thermo-cabinetsincubators/oxitopr-box.html), prebrano 16.6.2016
- [www.wtw.com, http://www.wtw.com/en/products/product-categories/sensor-technology/digital-ids-sensors-lab/ids-optical-dissolved-oxygen-sensors.html](http://www.wtw.com/en/products/product-categories/sensor-technology/digital-ids-sensors-lab/ids-optical-dissolved-oxygen-sensors.html), prebrano 16.6.2016