

TECHNIKY ZNIŽOVANIA EMISIÍ DO OVZDUŠIA



Príručka pre okresné úrady
v oblasti ochrany ovzdušia

Názov: Techniky znižovania emisií do ovzdušia
Príručka pre okresné úrady v oblasti ochrany ovzdušia

Autor: prof. Ing. Marián Schwarz, PhD.

Jazykové korektúry: Denisa Dovičovičová

Grafická úprava: Mgr. Richard Watzka

Vydavateľ: © Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, Slovenská agentúra životného prostredia
Tajovského 28, 975 90 Banská Bystrica

Rok vydania: 2023

Počet strán: 47

Elektronická verzia

ISBN: 978-80-8213-113-3

OBSAH

1. PRIMÁRNE TECHNIKY ZNIŽOVANIA EMISÍ DO OVZDUŠIA	4
1.1. Techniky na obmedzenie emisií TZL pri skladovaní a manipulácii s látkami s vysokou prašnosťou	4
1.2. Techniky na obmedzenie emisií pri skladovaní a prečerpávaní prchavých látok	5
1.3. Techniky na obmedzenie tvorby POPs vrátane dioxínov a furánov	6
1.4. Techniky na obmedzovanie pachových látok	10
1.5. Primárne techniky znižovania NO _x v spalinách	11
2. SEKUNDÁRNE TECHNIKY ZNIŽOVANIA EMISÍ DO OVZDUŠIA	12
2.1. Odlučovanie TZL a tuhých anorganických látok vrátane kovov	12
2.2. Odlučovanie kyslých plynov	25
2.3. Odlučovanie prchavých organických látok (VOC)	27
2.4. Odlučovanie dioxínov a furánov	28
2.5. Koncové oxidačné zariadenia na čistenie odpadových plynov (zariadenia na rekuperáciu a regeneráciu)	32
3. LITERATÚRA	45

1. PRIMÁRNE TECHNIKY ZNIŽOVANIA EMISIÍ DO OVZDUŠIA

1.1. Techniky na obmedzenie emisií TZL pri skladovaní a manipulácii s látkami s vysokou prašnosťou

Tuhé znečisťujúce látky (TZL – prach) možno definovať ako drobný tuhý alebo kvapalný dispergovaný materiál ľubovoľného tvaru, štruktúry a mernej hmotnosti, ktorý vytvára dvojfázový alebo viacfázový systém (aerosól). Častice TZL dosahujú približne ustálenú spádovú rýchlosť menšiu ako $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pričom ich priemer nie je väčší ako 2 mm. Rýchlosť spádu častice TZL v značnej miere závisí od mernej hmotnosti a tvaru. Materiál TZL môže pozostávať aj z menšieho množstva hrubšieho, prípadne aj kusového materiálu. Tuhé úlety z kúrenísk so zrnami menšími ako 0,5 mm sa nazývajú popolčky, nespálené uhoľné zrnká s veľkosťou menšou ako 0,5 μm sa nazývajú dym alebo sadze. Pod pojmom aerosól rozumieme okrem TZL aj jemne dispergované kvapaliny.

TZL vznikajúce priemyselnou činnosťou môžu vznikáť ako vedľajší produkt, napr. pri otere, spracovaní, obrábaní alebo opotrebení materiálu, ako produkt zo spaľovania (horenia) a sublimácie, ako prach z priemyselných odpadových plynov, ale aj ako využiteľný prach vznikajúci najmä pri výrobe a manipulácii so sypkými materiálmi (napr. cement, sadra, vápno, uhoľný prach, múka a pod.). Za najvýznamnejšie priemyselné zdroje TZL sa považujú:

- spaľovacie procesy a zariadenia na výrobu pary a energie (elektrárne, teplárne, spaľovne, kotolne a lokálne vykurovanie),
- hutnícky priemysel (čierna a farebná metalurgia, huty, oceliarne, zlievarne, výroba ferozliatin, farebných kovov a pod.),
- priemysel stavebných hmôt (ťažba kameňa a zemín, výroba cementu a vápna, magnezitu, ostatných stavebných a izolačných hmôt, živičných obalovaných zmesí),
- priemysel keramiky, skla, porcelánu a kameňa,
- chemický priemysel (chémiá anorganická, organická a minerálnych olejov, výroba kyseliny sírovej, karbidu vápnika, sódy, sadzí, pigmentu, organických farbív),
- ťažba a spracovanie rúd a uhlia (úpravne rúd, generátory, plynárne, koksovne a briketárne, pelletizačné a spekacie zariadenia a pod.),
- doprava,
- ostatné priemyselné odvetvia (kovospracujúci a strojársky priemysel, textilný, papierenský, potravinársky a farmaceutický, drevopriemysel a i.).

Špecifické opatrenia týkajúce sa ochrany pred TZL spočívajú v zachytávaní TZL čo najbližšie k miestu jeho vzniku, v pravidelnom odstraňovaní už usadených TZL, aby nedochádzalo k jeho opätovnému zvíreniu, napr. priemyselnými vysávačmi, ďalej v izolácii prašných prác od ostatných (prachotesné pracovné kabíny, uplatnenie vhodného odsávania a ventilácie, prekrytie zdroja TZL kapotážou stroja a pod.).

V rámci technických opatrení spojených so zmenou technológie pracovného postupu sem treba zahrnúť:

- rezanie pod kvapalinou (tzv. rezné kvapaliny – Metal Working Fluids – MWFs),
- rezanie za použitia laseru,
- vŕtanie hornín s vodným výplachom,
- tryskanie odliatok kovovými brokmi namiesto pieskom,
- brúsenie s dokonalým odsávaním,

- zváranie na odsávaných stoloch,
- splachovanie TZL vodou alebo zmáčadlami,
- riedenie prašnosti zónovým alebo celkovým vetraním.

Usadené TZL by sa nemali odstraňovať ich odfúknutím, ale malo by sa použiť odsávanie, mokré zmývanie alebo minimalizácia prašnosti vhodnou technológiou kropenia a pod. Činnosti, pri ktorých môžu vzniknúť emisie TZL, a v zariadeniach, v ktorých sa vyrábajú, upravujú, dopravujú, vykladajú, nakladajú alebo skladujú prašné látky, je potrebné využiť technicky dostupné prostriedky na zabezpečenie prachotesnosti a prípadnú prašnú emisiu je potrebné odvádzať na odprášenie, napr. pri plnení uzatvorených nádob prašnými látkami. Prašné materiály je potrebné skladovať najmä v silách, sklad prašných materiálov musí byť zastrešený a uzatvorený zo všetkých strán, skládky odpadov s možnými emisiami TZL by mali byť prekryté, napr. zazelenaním, poprípade vybavené protivetrovými zemnými valmi, pričom treba udržiavať potrebnú vlhkosť povrchu uskladnených prašných materiálov.

Účinnosť zavedených opatrení predpokladá meranie obsahu škodliviny (objektívizáciu) vo vonkajšom ovzduší (odber vzorky vzduchu a stanovenie TZL, uskutočnenie environmentálnej štúdie kvality ovzdušia).

1.2. Techniky na obmedzenie emisií pri skladovaní a prečerpávaní prchavých látok

Pri skladovaní a prečerpávaní prchavých látok (najčastejšie organických rozpúšťadiel – OR) je potrebné zabezpečiť, aby manipulujúci pracovníci boli vyškolení na predchádzanie a zabezpečenie prípadných únikov rozpúšťadiel a aby boli vypracované a dodržiavané interné usmernenia týkajúce sa organizačného zabezpečenia odpadového hospodárstva pri úniku organických rozpúšťadiel aj pri bežnej prevádzke. Rovnako musia byť identifikované oblasti, kde by mohlo prísť k úniku organických rozpúšťadiel a kde je potrebné zabezpečiť vhodnú preventívnu ochranu z pohľadu ochrany podzemných vôd (napr. nepriepustná podlaha, zdvojenie dna a pod.). Na tento účel sa musia vykonávať pravidelné prehliadky skladovacích a prevádzkových priestorov, kde sa kontroluje skladovanie organických rozpúšťadiel v uzavretých kontajneroch. Veľkosť záchytných nádrží musí byť primeraná objemu skladovaných materiálov a podľa možnosti by mali byť nádrže vybavené vizuálnymi alebo zvukovými signálmi pre prípad preplnenia. Je potrebné skladovať len také množstvá prchavých látok, ktoré sú potrebné pre zabezpečenie najbližších potrieb v prevádzke, a mať vypracované samostatné plány pre malý aj pre veľký únik organického rozpúšťadla. Mala by sa minimalizovať priama manipulácia s prípravkami s obsahom organických rozpúšťadiel obsluhou a pri prečerpávaní organických rozpúšťadiel je nutné zabezpečiť odsávanie alebo zachytávanie pár.

Pri náhrade štandardných techník využívajúcich organické rozpúšťadlá lepšou dostupnou technikou je vždy potrebné deklarovat' aj minimalizáciu vplyvov na životné prostredie, pričom by prevádzkovateľ mal mať vypracovaný plán minimalizácie použitia organických rozpúšťadiel v procese. Pri povrchových úpravách existuje mnoho procesov využívajúcich organické rozpúšťadlá, ktorých spotrebu možno znížiť, napr. tenšou vrstvou náteru, znížením počtu používaných farieb, efektívnejším dávkovaním farieb (napr. rozstrekovaním sprejom), použitím náterov, farieb alebo lepidiel na báze vody. Náhrada organického rozpúšťadla vodou je často obmedzená typom činnosti, tvarom a druhom podkladu, na ktorý sa náter aplikuje, požiadavkami na kvalitu, potrebou vzájomnej kompatibility materiálov, spôsobov sušenia, vytvrdzovania a pod. Pri kovových predmetoch je však lepšia krycia schopnosť syntetických náterov, ktoré sa dajú naniest' v tenšej vrstve, na druhej strane pri vodou riediteľných farbách je dlhšia doba zasychania a vyššia možnosť poškodenia náteru. Všetky tieto aspekty je nutné dopredu zvážiť, aby sa následné reparácie pri nekvalitnom nátere

s vodným rozpúšťadlom nestali kontraproduktívnymi. Aj pri vodou riediteľných náteroch sa musí linka čistiť pri každej zmene farebného odtieňa s využitím organických rozpúšťadiel. Na zníženie potreby čistenia systémov po každej aplikácii sa odporúča zavedenie farebných blokov, použitie čistiacich materiálov na báze vody namiesto čistiacich prostriedkov s vysokým podielom organických rozpúšťadiel alebo galvanické nanášanie náteru. Vtedy sa farba disperguje vo vodnom roztoku a na substrát sa nanáša pod vplyvom elektrického poľa (elektroforetické nanášanie). Ako vysokokvalitné nátery bez emisií VOC sa ukazujú byť také farby alebo lepidlá, ktoré sa vytvrdzujú UV alebo IČ žiarením alebo sa pri nich využívajú dvojzložkové lepidlá bez organických rozpúšťadiel zložených zo živice a vytvrdzovača, alebo lepidlá tavené zo syntetických kaučukov a živíc bez použitia organických rozpúšťadiel. Výhodné sú aj práškové nátery, kde sa nanosený jemne rozomletý prášok termálne vytvrdzuje, pričom sa uprednostňuje robotické nanášanie pred manuálnym. V prípade, že je manuálne nanášanie nevyhnuté, správne vyškolenie a dobrá zručnosť operátorov (striekačov) môže viesť k zníženiu spotreby organických rozpúšťadiel.

Pre malé a stredné prevádzky môže byť využitie niektorých z uvedených postupov nielen ekonomicky nevýhodné, ale aj ekologicky neprípustné, napr. keď v dôsledku zníženia emisií VOC vo vstupných materiáloch vzniká veľké množstvo „nového“ druhu odpadu, niekedy s veľmi vysokým obsahom OR. Minimalizácia znečisťovania jednej zložky životného prostredia nesmie viesť k prenášaniam znečistenia do inej zložky ŽP.

Náhrada tradičných systémov s organickými rozpúšťadlami za vodou riediteľné farby z pohľadu malého a stredného prevádzkovateľa prináša celý rad výhod, ale aj nevýhod. Medzi najvýznamnejšie výhody patrí ochrana životného prostredia a zdravia ľudí pre nízky obsah VOC, minimálny zápach, nehorľavosť, na riedenie (zmenu viskozity pred použitím) nie je potrebné použiť organické rozpúšťadlo.

Najvýznamnejšou nevýhodou je kratšia životnosť, vyššia spotreba farby, kratšia doba použiteľnosti (farba zaschne pred využitím balenia – produkovanie zbytočného odpadu), umývanie výrobných liniek je stále nutné vykonávať s využitím organických rozpúšťadiel (neodpadá problém s produkciou nebezpečného odpadu s obsahom OR, ktorého produkcia je niekedy dokonca vyššia ako v prípade konvenčných systémov), vodou riediteľné farby potrebujú dlhšiu dobu sušenia aj vyššiu teplotu, pri požiadavke na kvalitné nátery je nutné obstarat' sušiacu kabínu – obstarávacie a zvýšené prevádzkové náklady na spotrebu energií a údržbu môžu byť pre malého prevádzkovateľa ekonomicky neúnosné.

Po využití dostupných primárnych techník alebo po zvážení, že ich použitie nie je vhodné (ekonomicky rentabilné) alebo je nedostatočné, pristupuje sa k využitiu sekundárnych techník, medzi ktoré v prípade prchavých látok patria koncové odlučovacie techniky ako rekuperatívna a regeneratívna termická oxidácia, rekuperatívna a regeneratívna katalytická oxidácia a i., ktoré sú uvádzané v kapitole 1.2.

1.3. Techniky na obmedzenie tvorby POPs vrátane dioxínov a furánov

Perzistentné organické látky sa označujú medzinárodne zaužívanou skratkou **POPs** (angl. Persistent Organic Pollutants). Do tejto skupiny patria ťažko degradovateľné látky obsahujúce halogénové prvky (najmä chlór), ktoré sú schopné pretrvávajúť dlhodobo v rôznych zložkách životného prostredia, ale aj v tkanivách ľudí a živočíchov, pretože organizmus ich nedokáže jednoduchou cestou vylučovať. Sú veľmi stabilné a odolné proti procesom fyzikálneho, chemického a biologického rozkladu, ľahko sa bioakumulujú pre dobrú rozpustnosť v tukoch (vo vode sú takmer nerozpustné) a vo vyšších článkoch potravného reťazca je ich koncentrácia vyššia. Patria medzi poloprchavé látky (označované ako SVOC – semivolatilné organické látky), čo im umožňuje v závislosti od teploty

pretrvávajú v plynnom, kvapalnom aj tuhom skupenstve. Odparujú sa veľmi pomaly a po odparení sú schopné transportu aj na veľmi dlhé vzdialenosti. Z hľadiska rizika predstavuje ich najnebezpečnejšiu vlastnosť toxicita, pretože po prekročení prípustných limitov môže dôjsť k trvalému poškodeniu zdravia (poruchy imunity a žliaz s vnútorným vylučovaním – endokrinné disruptory, poškodenie nervového systému, reprodukčné poruchy, viaceré sú podozrivé z karcinogenity).

Vďaka vynikajúcim priemyselným vlastnostiam nachádzali v minulosti niektoré POPs široké použitie, napr. PCB ako izolačné kvapaliny v transformátoroch a kondenzátoroch, v mazadlách, ako zmäkčovadlá vo farbách, lepidlách, tesneniach a pod. Pesticídy, najmä DDT, sa používali na ochranu poľnohospodárskych plodín pred škodcami, PCDD/F vznikajú tiež ako produkty spaľovania. Pre ich ubikvitný výskyt (nachádzajú sa vo všetkých zložkách životného prostredia) a vyššie spomenuté vlastnosti predstavujú POPs globálny problém, ktorého riešenie vyžaduje medzinárodnú spoluprácu.

Štokholmský dohovor zaväzuje signatárov (vrátane Slovenskej republiky) prijať opatrenia na elimináciu zdrojov 12 látok zo skupiny POPs (angl. tzv. dirty dozen), medzi ktoré patrí: deväť pesticídov (aldrín, chórdan, DDT, dieldrín, endrín, heptachlór, hexachlórkyklohexán-HCH, mirex a toxafén), dve priemyselné chemické látky (polychlórované bifenyly – PCB a hexachlórbenzén – HCB) a neúmyselne produkované vedľajšie produkty (predovšetkým polychlórované dibenzodioxíny – PCDD, polychlórované dibenzofurány – PCDF a polycyklické aromatické uhľovodíky – PAH). V súčasnosti je zoznam Štokholmského dohovoru rozšírený o ďalšie látky: alfa-hexachlórkyklohexán, beta-hexachlórkyklohexán, hexabromodifenyléter a heptabromodifenyléter, tetrabromodifenyléter a pentabromodifenyléter, chlórdekon, hexabrombifenyl, lindan (γ -hexa-chlórkyklohexán), penta-chlórbenzén, perfluórooktánsulfónová kyselina, jej soli a perfluór-oktánsulfonylfluorid.

Technológie používané na likvidáciu POPs musia vykazovať vysokú úroveň efektivity (stopercentná deštrukcia škodlivých látok), nesmú nastať žiadne nekontrolovateľné úniky do životného prostredia a musia úplne zabrániť rozširovaniu akýchkoľvek rezíduí procesu likvidácie do prostredia.

V ďalšom texte sa pozornosť venuje predovšetkým látkam vzbudzujúcim veľmi veľké obavy (SVHC – Substances of Very High Concern) a neúmyselne produkovaným vedľajším procesným látkam (PCDD/F, PAH), ktoré môžu mať vážne škodlivé účinky na zdravie ľudí aj životné prostredie.

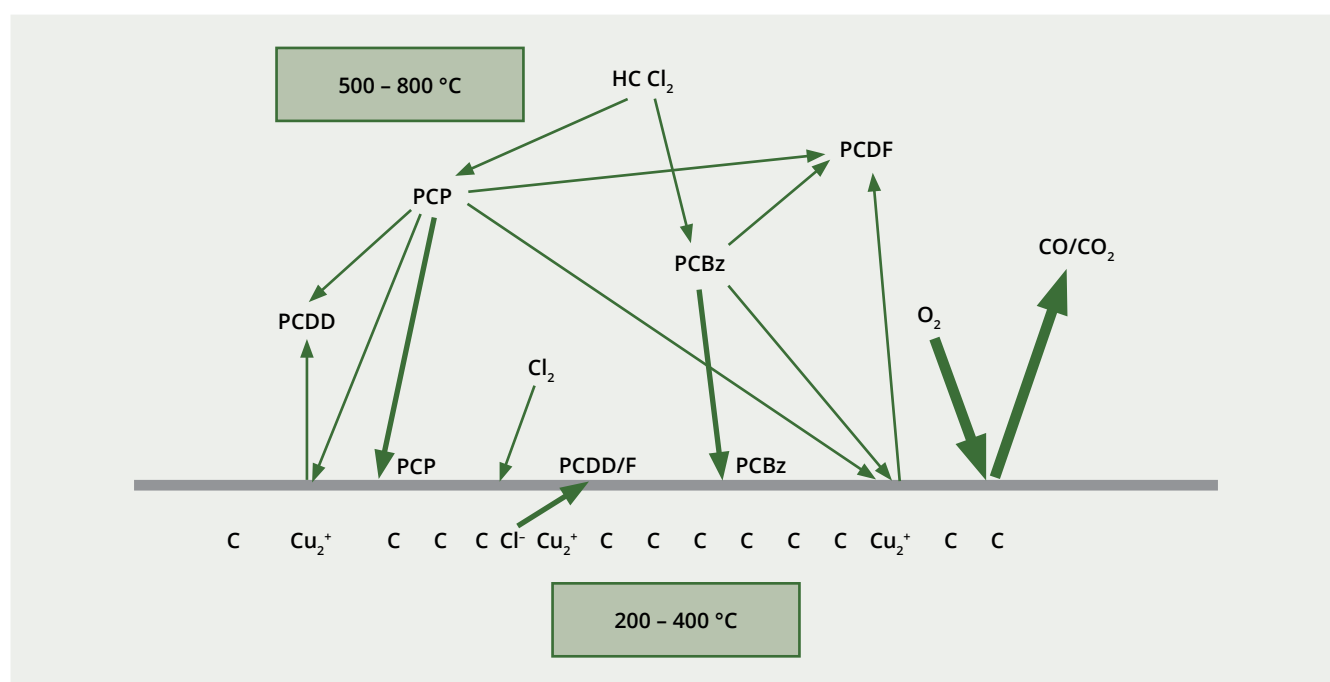
V 50. a 60. rokoch 20. storočia spaľovanie organického odpadu z chemických závodov, ale aj tuhého odpadu (najmä komunálneho) umožnilo zhodnotenie energie vznikajúcej pri spaľovaní, súčasné zníženie objemu odpadu o 80 – 90 % a s tým spojené zníženie plochy potrebnej na skládkovanie. Spaľovaním organického odpadu s obsahom chlóru dochádza k vzniku zmesi 210 kongenérovc PCDD/F, ktorých nebezpečenstvo bolo opísané koncom 80. rokov 20. storočia a vyjadruje sa ako „toxický ekvivalent“ dioxínov (TEQ). Termín dioxíny sa často používa na označenie týchto 210 kongenérovc ako celku, z ktorých 75 patrí medzi PCDD a zvyšných 135 patrí k PCDF. Z celkového počtu je 17 kongenérovc považovaných za vysoko toxické, ale najtoxickejší je kongenér 2,3,7,8-TCDD, ktorého TEQ bol položený za jednotku. Chlórované viacjadrové aromatické zlúčeniny vznikajú pri spaľovaní odpadov v prítomnosti kyslíka a kovov, ako napr. Cu, pri vysokých teplotách 200 až 800 °C. Vyvolávajú veľmi veľké obavy verejnosti kvôli ich potenciálnym karcinogénnym a mutagénnym účinkom. Mechanizmus tvorby PCDD/F počas spaľovania spočíva v dvoch typoch reakcií:

1. homogénne reakcie v plynnej fáze pri vysokých teplotách (500 až 800 °C), ktorých hlavná cesta mechanizmu sa uskutočňuje pomocou chlórových prekursorov, napr. chlórphenol (CP) alebo chlórbenzén (CB) v plynnej fáze – označuje sa ako „**prekursorová cesta**“;
2. heterogénne povrchovo katalyzované reakcie pri nižších teplotách (200 až 400 °C) – označuje sa ako „**cesta de novo**“, pri ktorej sa ako hlavný faktor prejavuje katalytický účinok popolčeka alebo sadzí.

Predpokladá sa, že obidve cesty tvorby dioxínov môžu prebiehať súčasne a nezávisle. Uhlík pri tvorbe PCDD/F heterogénnou cestou pochádza najmä z plynných prekursorov, pri ktorých je rýchlosť tvorby PCDD/F 72 99 000-krát vyššia ako rýchlosť tvorby cez uhlík z popolčeka.

Na obrázku 1 je znázornený mechanizmus tvorby PCDD/F v spaľovacích systémoch.

Na povrchu sú znázornené častice popola a šípky znázorňujú reakčné aj absorpcné procesy. Hrubé šípky označujú relatívnu dôležitosť ciest pri tvorbe PCDD/F, ktorých emisie priamo súvisia s množstvom použitého uhlíka.



Obrázok 1: Cesty tvorby PCDD/F v spaľovacích systémoch (zdroj: Safavi S.M., Richter Ch., Unnthorsson R., 2021)

Popri CP, CB, PAU a zvyškovom uhlíku existujú aj ďalšie kľúčové prvky, ktoré ovplyvňujú tvorbu PCDD/F, napr. čas zdržania v reaktore, množstvo prekursorov, teplota spaľovania, obsah chlóru v surovinách (palive), spracovanie surovín, doplnkové palivo a dostupnosť. K tvorbe dioxínov dochádza v teplotnom rozsahu 200 až 800 °C, maximálna rýchlosť reakcie sa dosahuje medzi 350 a 400 °C. Údaje z literatúry ukazujú, že rýchlosť pri 200 až 250 °C je veľmi pomalá. Pri optimálnych podmienkach spaľovania (dostatok kyslíka, miešanie a prúdenie vzduchu) sa prakticky všetky organické zlúčeniny vrátane PCDD/F pri teplote nad 800 °C rozložia. Avšak PCDD/F môžu vznikať pri vysokých teplotách aj za menej optimálnych podmienok, ako napr. nedostatok kyslíka, pričom ich tvorba dobre koreluje s dostupnosťou organických prekursorov, CO, solí kovov a chlorovodíka/chlóru, nespáleného uhlíka alebo produktov spaľovania (sadze). Dioxíny sa môžu tvoriť aj počas chladenia spalín v spaľovacích systémoch. Ukazuje sa, že hlavným mechanizmom tvorby dioxínov v spaľovacích systémoch je syntéza de novo, pri ktorej je rozhodujúca morfológia uhlíka.

Za najvýznamnejšie zdroje dioxínov v životnom prostredí sa považujú spaľovacie zdroje (spaľovne komunálneho, nebezpečného a biomedicínskeho odpadu), cementárne, spaľovacie motory, energetické zariadenia (teplárne, krematóriá), priemyselné zdroje (celulózo-papierenský priemysel, chemická výroba, metalurgický priemysel) a zásobníkové zdroje (biochemické procesy, fotolytické procesy, náhodné uvoľnenie, lesné požiare). Prehľad emisií dioxínov v spalinách z rôznych zdrojov spaľovania je uvedený v tabuľke 1, z ktorej vyplýva, že spaľovanie uhlia generuje najmenej dioxínov.

Tabuľka 1: Emisie dioxínov z rôznych spaľovacích zdrojov (zdroj: Mukherjee A., Debnath B., Ghosh S. K. 2016)

Zdroje spaľovania	Dioxíny v spalinách (ng-ITEQ/Nm ³) [*]
Spaľovanie komunálneho odpadu	0,2 – 63
Spaľovanie nebezpečného odpadu	0,1 – 0,5
Spaľovanie uhlia	Pod limit detekcie
Spaľovanie plynu	0,07 – 100
Pyrolýza plastov	Detegovateľné
Spaľovanie dreva	0,02 – 1,8
Prírodné drevo	2,7 – 14
Drevný odpad	0,03 – 0,3
Spaľovanie ropy	3,5 (pg/L)**
Olejová pec	10 – 60 (pg/L)**

* ITEQ znamená medzinárodná jednotka toxického ekvivalentu (International Toxic Equivalent Quantity) prepočítaná na najtoxickejší kongenér dioxínu.

** Táto jednotka je prepočítaná na 1 l kvapaliny (oleja).

Niektoré z potenciálnych výhod splyňovania v porovnaní so spaľovaním a im zodpovedajúce potenciálne nevýhody sú zhrnuté v tabuľke 2.

Tabuľka 2: Porovnanie výhod a nevýhod splyňovania vs. spaľovania

Potenciálne výhody splyňovania	Nevýhody splyňovania
S horľavým plynom generovaným splyňovaním sa ľahšie manipuluje a kontroluje sa v porovnaní s odpadovými produktmi spaľovania.	Pretože syngas* je vysoko toxický a výbušný, vyvoláva jeho prítomnosť veľké bezpečnostné obavy a vyžaduje sofistikované ovládacie zariadenia.
Môže sa uskutočniť homogénne spaľovanie syngasu* v plynnej fáze za priaznivejších podmienok, ako sú podmienky dosiahnuteľné s odpadovými produktmi spaľovania.	Pretože surovina je oxidovaná/konvertovaná v dvoch krokoch (splyňovanie + syngas spaľovanie/konverzia), zariadenia majú tendenciu byť zložitejšie a nákladnejšie, ťažšie ovládateľné a udržiavateľné, menej spoľahlivé.
Redukčné podmienky v splyňovači: <ul style="list-style-type: none"> • zlepšujú kvalitu pevných zvyškov, najmä kovov, • znižujú tvorbu niektorých znečisťujúcich látok (dioxíny, furány a NO_x). 	Skutočná produkcia znečisťujúcich látok závisí od spôsobu spracovania syngasu za splyňovačom; ak sa syngas nakoniec oxiduje, dioxíny, furány a NO _x môžu byť stále problematické.
Syngas sa môže po správnom ošetroaní použiť vo vysokoúčinnom internom spaľovacom cykle.	Požadované ošetrovanie syngasu je nákladné a spôsobuje značnú spotrebu/straty energie.
Syngas sa môže po správnom spracovaní použiť na výrobu vysokokvalitných palív (motorová nafta, benzín alebo vodík) alebo výrobu chemikálií.	Z dôvodu spotreby/strát splyňovania a čistenia syngasu je celková účinnosť premeny energie zvyčajne nižšia ako účinnosť spaľovacieho zariadenia.
Splyňovanie pri vysokom tlaku zvyšuje príležitosti na zvýšenie energetickej účinnosti konverzie a zníženie nákladov splyňovania.	V malom rozsahu typickom pre čistenie odpadových plynov účinnosť systémov s vnútorným spaľovaním je nízka (najmä ak sú založené na plynových turbínach).
	Požadované ošetrovanie syngasu je veľmi náročné a nákladné.
	V malom rozsahu typickom pre čistenie odpadových plynov môžu vzniknúť neprimerané náklady.

* Syngas alebo syntézny plyn je zmes vodíka a oxidu uhoľnatého v rôznych pomeroch (často obsahuje aj určité množstvo oxidu uhličitého a metánu), používa sa najmä na výrobu amoniaku alebo metanolu.

V súčasnosti sa na obmedzovanie POPs najčastejšie používajú techniky splyňovanie a spaľovanie, z ktorých každá má svoje výhody aj nevýhody. Medzi hlavné nevýhody spaľovania patria škodlivé zvyšky procesu a nebezpečné emisie. Splyňovanie sa objavilo s cieľom riešiť tieto problémy a zlepšiť energetickú účinnosť. Splyňovanie znižuje koróziu a emisie tým, že zachováva alkalické a ťažké kovy (okrem Hg a Cd), síru a chlór v procesných zvyškoch, výrazne bráni tvorbe PCDD a PCDF a vďaka nižším teplotám a redukčným podmienkam znižuje aj tvorbu tepelných oxidov dusíka (NO_x). Splyňovaním trosky sa môžu zlikvidovať nebezpečné zlúčeniny, avšak vo výrobnom plyne môžu zostať prítomné zlúčeniny síry alebo chlóru, ako napríklad H_2S a HCl . Keď je objem produkovaného plynu malý, stačí na čistenie plynu zariadenie s menšími rozmermi, čo šetrí investičné náklady. Pri použití O_2 namiesto vzduchu pri spaľovaní dochádza síce k zvýšeniu nákladov, ale súčasne sa zvyšuje aj výhrevnosť produkovaného plynu. Vyrobený plyn sa môže energeticky využívať v rôznych aplikáciách alebo ako surovina, ktorá má vyššiu účinnosť.

1.4. Techniky na obmedzovanie pachových látok

Pachové látky možno definovať ako vlastnosť plynov, tekutín alebo častíc, ktoré dráždia čuchový orgán. Koncentrácie pachových látok v ovzduší možno stanoviť metódou dynamickej olfaktometrie podľa STN EN 13725:2022; pachové látky v potrubných systémoch pre pitnú vodu sa stanovujú podľa STN EN 1420-1:2001.

Pri riešení problematiky pachových látok je najdôležitejšie zistiť ich zdroj. Pri uvádzaní potenciálnych zdrojov pachových látok do prevádzky treba používať nástroje, ktoré pomáhajú minimalizovať ich vznik a riadiť riziká vplyvu na zápach. Primárne treba používať opatrenia na zdroji (najmä pri príjme a nakladaní s pachovými materiálmi). Vysoko pachové materiály je potrebné identifikovať a následne buď odmietnuť, alebo nahradiť za materiály menej páchnuce. Ďalšími primárnymi opatreniami sú:

- zníženie rýchlosti odparovania rôznymi chemickými alebo fyzikálnymi metódami,
- zabránenie priamemu slnečnému žiareniu,
- zvýšenie vlhkosti v bezprostrednom prostredí,
- zníženie prúdenia vzduchu nad povrchom materiálov uvoľňujúcich zápach,
- zmenšenie povrchu páchnuceho materiálu (tým sa zníži rýchlosť odparovania),
- zadržiavanie kontaminovaného vzduchu (uzavreté okná a dvere na budovách používaných na izoláciu),
- pravidelná kontrola tesnosti/poškodenia potrubí, ventilov a nádrží.

V SR je najviac sťažností na zápachajúce látky v lokalitách so zlými rozptylovými podmienkami (zimné teplotné inverzie, kotliny, bezveterné obdobia a pod.), kde medzi najčastejšie zdroje patria bioplynové stanice, v rastlinnej výrobe silážne jamy, v živočíšnej výrobe hnojiská, kafilérie; v chemickom priemysle výroba buničiny a papiera (emisie sírnych zlúčenín), výroba hnojív (emisie nitrozných plynov) a ďalšie. Preto sa po vyčerpaní vyššie uvedených postupov odporúča používať vysoké komíny, ktoré umožnia rozptýlenie zápachových emisií skôr, ako sa dostanú na zem. Úspešné je aj vhodné načasovanie operácií s cieľom vyhnúť sa špičkovým nárazom (pozastavenie prevádzky v prípade inverzie alebo studeného odtoku, alebo pri smerovaní vetra smerom k blízkym obyvateľom, alebo vykonávanie činností v pracovnej dobe, keď je väčšina obyvateľov mimo bydliska).

1.5. Primárne techniky znižovania NO_x v spalinách

Primárne techniky znižovania NO_x predstavujú metódy na obmedzenie ich tvorby vo vlastnom spaľovacom procese. Vhodnými konštrukčnými úpravami a spôsobom prevádzky spaľovacích zariadení je možné znížiť tvorbu emisií NO_x až o 75 %.

Medzi faktory ovplyvňujúce tvorbu NO_x patrí teplota (čím je vyššia, tým je vyšší obsah NO_x). Preto sú plynové horáky konštruované tak, aby reakčná zóna plameňa bola čo možno najnižšia (rôzne konštrukčné prvky na odvod tepla, radiačné typy horákov a iné). Znížiť teplotu pri spaľovaní je možné voľbou prevádzkových podmienok – skrátenie doby spaľovania, recirkulácia spalín, zníženie koncentrácie O_2 v spaľovacej zóne, nútený odtah spalín a ďalšie. Technické a prevádzkové opatrenia v princípe prispievajú k znižovaniu teploty pri spaľovaní.

Ďalším prevádzkovým faktorom na zníženie obsahu NO_x je regulácia spaľovania – zmenšovanie pomeru vzduch/palivo na takmer stechiometrickú úroveň. Tým sa dosiahne nielen nízka hodnota NO_x , ale aj energetické úspory. Takýto režim vyžaduje monitorovanie koncentrácie CO , NO a CO_2 v spalinách (pri nedostatku vzduchu/ O_2 pod stechiometrickú potrebu sa zvýši koncentrácia CO).

Inými cestami znižovania NO_x v spalinách je postupné a/alebo opakované spaľovanie. Pri postupnom spaľovaní sa najprv spaľuje v horáku s podstechiometrickým množstvom vzduchu alebo paliva. Proces sa dokončuje v spaľovacej komore, kde sa dávkuje ďalší vzduch alebo palivo. Je niekoľko spôsobov postupného spaľovania. V súčasnosti sa v USA vyvíjajú postupy vháňania vzduchu obohateného kyslíkom. Týmto systémom je možné dosiahnuť až 70-percentné zníženie NO_x .

Opakované spaľovanie je modifikácia spaľovania, ktorá odstraňuje NO_x z produktov spaľovania použitím paliva ako redukčného činidla. Technika je založená na tom, že pyrolýzou vytvorené metínové radikály CH^\bullet z paliva v priebehu niekoľkých reakcií zredukujú NO_x na N_2 . Pri opakovanom spaľovaní bola dosiahnutá účinnosť odstránenia NO_x 50 – 65 %.

2. SEKUNDÁRNE TECHNIKY ZNIŽOVANIA EMISIÍ DO OVZDUŠIA

Integrovaná stratégia nakladania s odpadovými plynmi a ich spracovania vychádza z inventarizácie regulovaných a difúzných emisií do ovzdušia, pričom sa uprednostňujú integrované techniky spracovania pred technikami spracovania odpadových plynov. Zohľadňuje tiež faktory, ako sú emisie skleníkových plynov a spotreba alebo opätovné použitie energie, vody a materiálov, spojené s používaním rôznych techník. Ďalšie informácie sú uvedené v dokumentoch BREF CWW 2016 a BREF LVOC 2017.

2.1. Odlučovanie TZL a tuhých anorganických látok vrátane kovov

TZL možno obmedzovať jednou alebo kombináciou viacerých nižšie uvedených techník úpravy odpadových plynov. Úrovně emisií TZL sa vyjadrujú ako koncentrácia a/alebo hmotnostný tok. Medzi základné odlučovacie princípy využívané pri čistení odpadových plynov patria: **gravitačný** (vychádza z pôsobenia gravitačnej sily na pohyb častice, napr. usadzovacie komory), **zotrvačný** (v blízkosti odlučovacej plochy dochádza k zakriveniu rýchlostného poľa a trajektória častice sa vplyvom zotrvačnosti častice odchyľuje od prúdnice, napr. zotrvačné odlučovače, mokré hladinové alebo prúdové odlučovače), **odstredivý** (využíva sa pri rotácii plynu vo valcových komorách, napr. cyklóny), **difúzny** (uplatňuje sa pri obtekaní telies malou rýchlosťou, kde dochádza k difúzii častíc z prúdu plynu na povrch obtekaného telesa, napr. absorpčné čistenie TZL v kombinácii s filtračným zariadením, kde sa častice odlučujú na povrch filtračných vlákien tvoriacich filtračnú vrstvu) a **elektrický** princíp (pohyb častice k odlučovacej ploche je vyvolaný elektrickou silou, pôsobiacou na časticu, napr. elektrické odlučovače). Pri niektorých typoch odlučováčov pôsobí pri odlučovaní častíc súčasne viac odlučovacích princíпов, ktorých účinky sa vzájomne ovplyvňujú. Účinnosť odstraňovania TZL sa zvyčajne pohybuje od 90 % do viac ako 99 %.

Základným hľadiskom pri voľbe odlučovacích systémov je splnenie zákonných emisných limitov pre daný zdroj znečisťovania. Pri voľbe konkrétneho odlučovača treba vychádzať z celkového hodnotenia základných údajov, napr. celková odlučivosť, tlaková strata, nákupná cena, prevádzkové náklady, elektrický príkon, zastavaná plocha, životnosť zariadenia a ďalšie ekonomické ukazovatele (spotreba energie na vyčistenie 1 m³ plynu, merná spotreba energie K_p [kWh/1 000 m³], merná spotreba materiálu K_m [kg/1 000 m³/h], merný zastavaný priestor K_v [m³/1 000 m³/h], merná pôdorysná plocha K_A [m²/1 000 m³/h], merná spotreba vody pri mokrých odlučovačoch m [l.m⁻³]). Čím nižšia je hodnota príslušného merného ukazovateľa, tým hospodárnejšia je prevádzka zariadenia.

V prípade TZL môže byť absorpcia (označovaná aj ako čistenie TZL) kombinovaná s následnou úpravou filtráciou (t. j. absolútnymi filtrami alebo textilnými filtrami) alebo elektrostatickým zrážaním. V technológii čistenia odpadových plynov sa navrhuje vhodný systém podľa zložitosti výroby a na základe rozhodnutí manažmentu. Takýto systém pozostáva z dvoch techník:

1. **integrovaných do procesov**
2. **technik spracovania na konci potrubia** (EOP – End of Pipe), v súčasnosti tieto techniky ustupujú v prospech techník integrovaných do procesov.

Techniky integrované do procesov sú zdrojom významného zlepšenia životného prostredia v nových aj existujúcich zariadeniach, znižujú alebo úplne zabraňujú vzniku odpadov, čím sa súčasne

znížia aj náklady na dodatočné opatrenia, zvýši sa ekonomická efektívnosť (zvýšením výťažnosti a/alebo znížením vstupných surovín vrátane spotreby vody). Náklady na likvidáciu tiež ovplyvňujú posun smerom k procesne integrovaným technikám. Hoci zavádzanie techník integrovaných do procesov ako prevencia vzniku odpadových plynov je čoraz významnejšia, aj techniky čistenia odpadových plynov na konci potrubia sa budú naďalej používať najmä v prípadoch, keď techniky integrované do procesu nie sú realizovateľné v existujúcich výrobných závodoch.

Správna procesne integrovaná ochrana životného prostredia využíva všetky možné fyzikálne, chemické, biologické a iné techniky na prevenciu, zníženie a recykláciu zvyškov (BAT techniky), napr.:

- vytvorenie nových ciest syntézy;
- používanie čistejších alebo dokonca odlišných surovín a procesných činidiel;
- používanie čistejších alebo iných palív;
- optimalizácia procesných krokov;
- zlepšenie technológie zariadenia, riadenia procesu a postupnosti reakcií;
- technické úpravy procesu;
- zlepšenie používania katalyzátorov a/alebo rozpúšťadiel;
- recyklácia pomocných látok (napr. pracej vody, inertných plynov, rozpúšťadiel a katalyzátorov);
- okamžitá recyklácia zvyškov počas procesu;
- použitie zvyškov ako surovín pre iné výrobné procesy (integrácia výrobkov na mieste alebo mimo neho);
- využitie zvyškov na výrobu energie.

V existujúcich závodoch je implementácia úplne nových spôsobov syntézy skôr výnimkou, najmä z ekonomických dôvodov, a preto sa budú vyššie uvedené BAT princípy väčšinou uskutočňovať v procesoch používaných na výrobu hromadných produktov alebo produktov s vysokou ekonomickou hodnotou. V praxi bude ochrana životného prostredia integrovaná do výroby neustále napredovať v dôsledku mnohých individuálnych zlepšení v priebehu času.

Techniky na odlučovanie TZL možno podľa princípu a konštrukcie rozdeliť do viacerých skupín:

- mechanické odlučovače,
- zotrvačné odlučovače,
- odstredivé (vírové) odlučovače (cyklóny).

2.1.1. Mechanické odlučovače

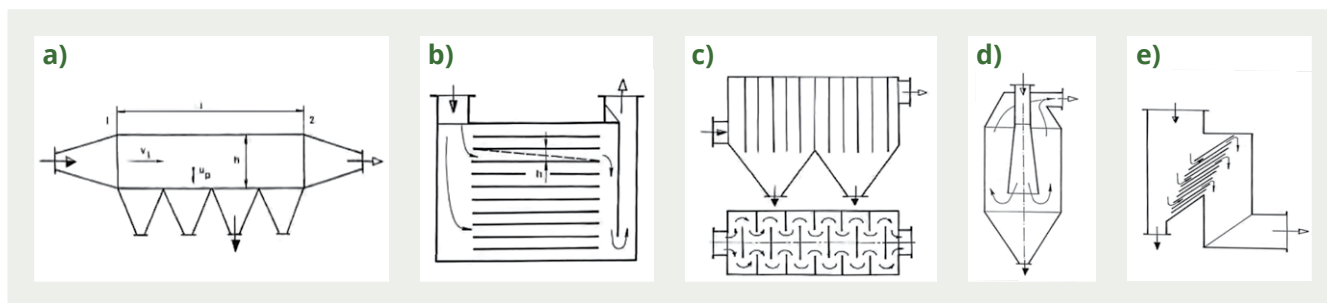
Podľa nutnosti použitia kvapalnej fázy možno mechanické odlučovače rozdeliť na:

- suché,
- mokré.

Suché mechanické odlučovače patria medzi najstaršie a v praxi pomerne rozšírené, ktoré na odlúčenie častíc využívajú gravitačný, zotrvačný aj odstredivý princíp. Sú charakterizované jednoduchou konštrukciou, prevádzkovou spoľahlivosťou, nenáročnosťou na obsluhu a údržbu, nižšími obstarávacími nákladmi, nižšou spotrebou energie a vhodnosť aj pre vyššie teploty plynu. Nevýhodou týchto odlučovačov je nízka odlučivosť pre jemné frakcie. Merná spotreba energie je nízka ($K_p = 0,1$ až $0,3$ kWh/1 000 m³). Len výnimočne spĺňajú tieto odlučovače požiadavky na emisné limity pri samostatnom použití, a preto sa väčšinou používajú na odlúčenie hrubších frakcií častíc ako prvý stupeň pri viacstupňových odlučovacích systémoch. Suché mechanické odlučovače možno rozdeliť do štyroch podskupín na: gravitačné, zotrvačné, vírové a rotačné.

Gravitačné odlučovače (alebo tiež tiažové) sú najjednoduchšie odlučovače, kde sa na odlúčenie častíc využíva gravitačný princíp. Rýchlosť plynu v komore sa spravidla pohybuje pod $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

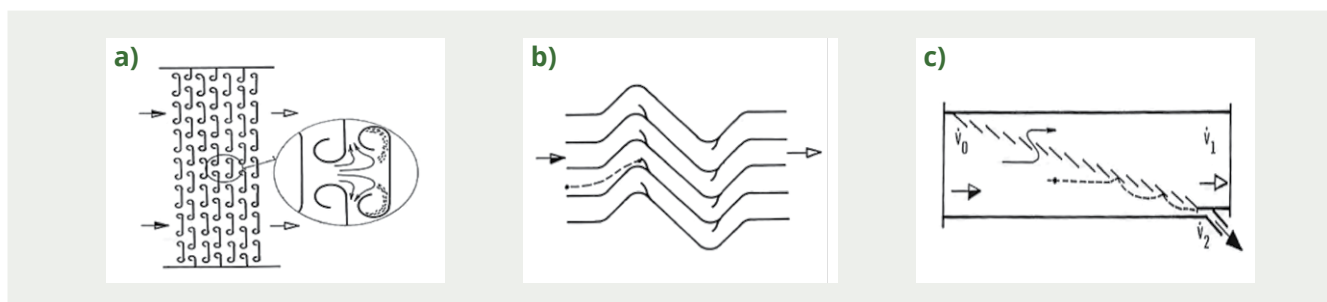
Príklady gravitačných odlučovačov sú uvedené na obr. 2, z ktorých najbežnejším typom je usadzovacia komora. Majú skôr historický pohľad na vývoj spôsobov a metód odprašovania, pretože pre nízku efektívnosť odlučovania sa už v súčasnosti nepoužívajú. Gravitačný princíp odlučovania je možné kombinovať so zotrvačným princípom, čoho príkladom sú prašníky.



Obrázok 2: Príklady gravitačných odlučovačov: **a)** usadzovacia komora, **b)** gravitačný odlučovač so zvýšeným počtom odlučovacích plôch a zníženou odlučovacou výškou, **c)** gravitačný odlučovač so zvislými priehradkami, **d)** prašík – kombinácia gravitačného a zotrvačného odlučovacieho princípu, **e)** gravitačný a zotrvačný predodlučovač

Gravitačné odlučovače sa používali ako predodlučovač pri vyšších teplotách alebo vysokých koncentráciách TZL a pre abrazívne TZL. Pre lepivé a vlákňité TZL však boli nevhodné. Ďalšou nevýhodou týchto odlučovačov je veľký pôdorysný a zastavaný priestor.

Zotrvačné odlučovače využívajú zotrvačný princíp na odlučovanie TZL na vhodne profilovaných prekážkach. Príklady zotrvačných odlučovačov sú na obr. 3. Plyn preteká niekoľkými radmi lamiel a častice sa aj po prípadnom odskoku od odlučovacej plochy sústreďujú v okrajových častiach lamely, kde nerušené sedimentujú do výsyvky. Na lepšie čistenie odlučovacích plôch sa využívajú vibračné zariadenia alebo sa môže použiť mokrý režim, v ktorom sa kvapôčky pri prechode plynu lamelami odlučujú v kapsách a kvapalina po ich stenách steká do zberného priestoru. V žalúziíovom odlučovači plyn preteká žalúziíovou mrežou, ktorá sa skladá z lopatiek. Na ich čelnú plochu narážajú častice, ktoré sa odrážajú späť do prúdu plynu, čím sa ich koncentrácia pozdĺž dĺžky mreže postupne zvyšuje. Odlúčené častice sa odvádzajú výstupným otvorom s čiastočným prúdom plynu. Žalúziíové odlučovače majú pomerne nízku tlakovú stratu.

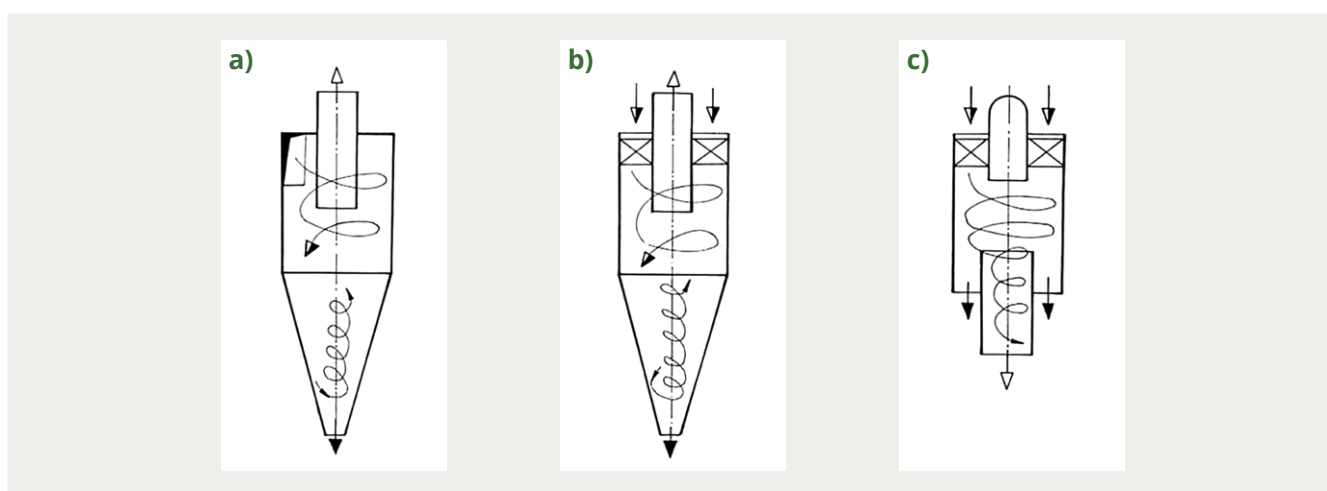


Obrázok 3: Príklady zotrvačných odlučovačov: **a)** lamelový odlučovač, **b)** lamelový odlučovač pre odlučovanie kvapiek, **c)** žalúziíový odlučovač

Nevýhodou zotrvačných odlučovačov je nevhodnosť pre vysoké koncentrácie, pre lepivé a abrazívne TZL. Ako výhodné sa javia ukazovatele mernej spotreby materiálu a merné priestorové ukazovatele. Žalúziíový odlučovač vyžaduje doplnkové zariadenie pre odlúčenie častíc z čiastočného prúdu, čo možno riešiť napr. paralelne radeným vírovým odlučovačom s vývodom späť do prúdu za žalúziíovým odlučovačom alebo použitím pomocného ventilátora s vývodom späť do priestoru

pred odlučovač. Okrem uvedeného rovinného usporiadania existuje aj usporiadanie lopatkové, v ktorom sú odlučovacie mreže v tvare kužela. Všeobecne sa ako výhodné javí usporiadanie, pri ktorom vstup plynu je vo vertikálnom smere zhora nadol, pričom pri odlučovaní častíc spolupôsobí gravitačný princíp.

Vírové odlučovače (cyklóny, obr. 4) patria medzi najrozšírenejšie suché mechanické odlučovače, ktoré sa prvýkrát uplatnili už v 19. storočí a odvtedy prešli dlhoročným konštrukčným vývojom. Základom všetkých typov je využitie odstredivej sily, ktorá pôsobí na častice pri špirálovom prechode plynu valcovou, resp. kuželovou časťou odlučovača. Charakteristickými znakmi vírových odlučovačov sú jednoduchá konštrukcia, malá spotreba materiálu, nenáročná obsluha, ľahká údržba a pomerne malá tlaková strata. Sú použiteľné pre náročnejšie prevádzky pri vyšších koncentráciách častíc aj vyšších teplotách plynu. V závislosti od typu, veľkosti, objemového prietoku a parametrov plynu sa hranica odlučivosti pohybuje v širokom rozpätí hodnôt – cca 2 až 40 μm , spotreba energie je 0,15 až 0,3 kWh/1 000 m^3 .



Obrázok 4: Typy vírových odlučovačov: **a)** s tangenciálnym vstupom, **b)** s osovým vstupom a vratným tokom, **c)** s osovým vstupom a priamym tokom

Nevýhodou týchto odlučovačov je vysoká náchylnosť na zalepovanie, znížená životnosť pre abrazívne TZL a nízka odlučivosť pre jemné častice. Ako samostatné odlučovače vyhovujú dnes emisným limitom len niektoré typy a iba pri vybraných technológiách, napr. pri odlučovaní hrubšieho drevného aerosólu. Základným uplatnením vírových odlučovačov je najmä súčasť odlučovacích systémov, kde pôsobia ako prvý odlučovací stupeň najmä pri technológiách s vysokými vstupnými koncentraciami častíc.

Pri cyklónoch s vratným tokom sa plyn vnútri cyklónu obracia a vracia sa späť po osi vstupujúceho plynu. V prípade cyklónov s priamym tokom vyčistený plyn opúšťa cyklón na opačnej strane, než vstupuje znečistený plyn. Pri paralelnom zapojení viacerých cyklónov, tzv. multicyklón, sa výrazne zvyšuje účinnosť separácie. Tlaková strata v cyklónoch sa pohybuje v rozpätí 500 až 1 200 Pa, pri nižších hodnotách preteká článkom malý objemový prietok plynu a odlučivosť je nízka, naopak, pri vyšších prietokoch s vyššou tlakovou stratou zasahuje zostupný špirálový prúd plynu výrazne do výsypky a pri spätnom prúde dochádza k vynášaniu už odlúčených častíc späť z výsypky.

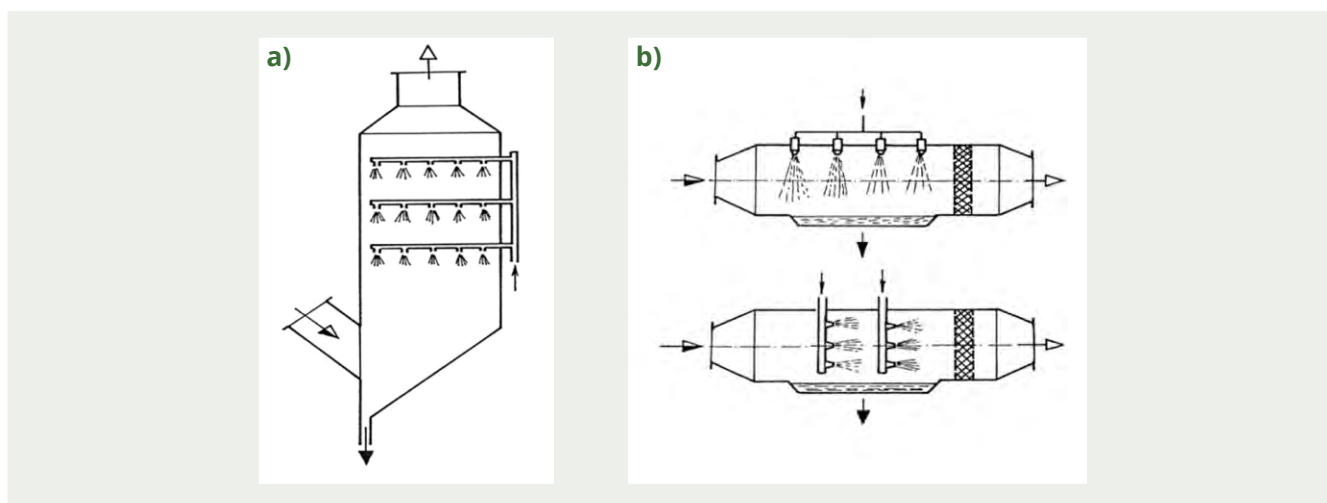
Mokrú mechanickú odlučovače sú založené na využití zotrvačného a odstrediveho odlučovacieho princípu. K odlúčeniu častíc do kvapaliny dochádza v zásade štyrmi spôsobmi:

- odlúčením častíc na kvapôdkach vplyvom zotrvačného princípu,
- odlúčením častíc na zmáčanom povrchu obtekaných telies vplyvom zotrvačného, resp. odstrediveho princípu,

- odlúčením častíc na hladine kvapaliny vplyvom zotrvačného princípu,
- odlúčením častíc na povrchu bublín plynu pri prechode plynu vrstvou kvapaliny.

Podľa typického spôsobu vytvorenia kontaktného povrchu plyn – kvapalina (odlučovacia plocha) a uplatňujúceho sa odlučovacieho princípu sa mokré mechanické odlučovače rozdeľujú do 6 základných podskupín: sprchové, zotrvačné, vírové, penové, prúdové a rotačné. V porovnaní so suchými mechanickými odlučovačmi sa dosahuje vyššia odlučivosť pre jemné častice, sú vhodné aj pre lepkavé a abrazívne častice pri vysokých koncentráciách, súčasne s tuhými časticami je možné zachytávať aj plynné znečisťujúce látky, pričom kondenzácia nenarušuje odlučovací proces, ale v oblasti jemných častíc ho dokonca zlepšuje. Mokrú odlučovače sú vhodné aj pre odlučovanie výbušných TZL, pretože sa minimalizuje vznik nebezpečných koncentrácií. Nevýhodami mokrých odlučovačov sú vyššia spotreba vody na odpar, vyššie riziko korózie a nebezpečenstvo zamrznutia, potreba kalového hospodárstva, vyššia tlaková strata pri niektorých typoch odlučovačov, vyššia náročnosť na obsluhu a údržbu. Mokrú odlučovače sú nevhodné pre cementujúce TZL a TZL so slabou zmáčanlivosťou. Pred vypustením plynu do atmosféry dochádza k nežiaducemu ochladeniu plynu. Charakteristickým ukazovateľom mokrých odlučovačov je merná spotreba vody m [$l \cdot m^{-3}$], spotreba energie na dezintegráciu kvapaliny a tlaková strata (pohybuje sa v rozpätí 100 Pa až 10 kPa). Na oddelenie vody od odlúčených častíc sa používajú kalové nádrže a usadený kal sa odstraňuje vyhrabávacím zariadením. Stratu odparenej vody a vody odvedenej s kalom je potrebné nahradiť určitým množstvom doplnkovej vody do cirkulujúceho vodného okruhu. Odpar závisí najmä od teploty plynu a veľkosti kvapôčok a je limitujúcim faktorom pre použitie mokrých odlučovačov pri vyšších teplotách plynu.

Medzi najjednoduchšie druhy mokrých odlučovačov patria **sprchové odlučovače**, pri ktorých je odlučovanie častíc založené na využití zotrvačného princípu pri obtekaní kvapiek plynom. Podľa spôsobu, akým sa dosahuje relatívna rýchlosť medzi plynom a kvapkou, rozdeľujeme sprchové odlučovače na sprchové veže a sprchové komory (obr. 5).



Obrázok 5: Typy mokrých odlučovačov: **a)** sprchová veža, **b)** rôzne usporiadania sprchových komôr

Sprchové veže sú zvislé, obvykle valcové veže, ktorými prúdi plyn zdola nahor nízkou strednou rýchlosťou $v < 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V jednom alebo viacerých radoch sa v hornej časti veže tryskami privádza do priestoru veže kvapalina tak, aby sa dosiahlo rovnomerné rozdelenie kvapaliny po priereze. Relatívna rýchlosť obtekania je vyvolaná najmä pádovou rýchlosťou kvapiek. Teoretický rozbor odlučovania častíc na kvapkách padajúcich v pokojnom prostredí ukazuje, že v širokom rozpätí veľkosti častíc sa najväčšia odlučivosť dosahuje pri veľkosti kvapiek okolo $800 \mu\text{m}$. Preto sa na rozprašovanie kvapaliny používajú iba nízkotlakové trysky. Aj keď je doba zdržania plynu vo veži

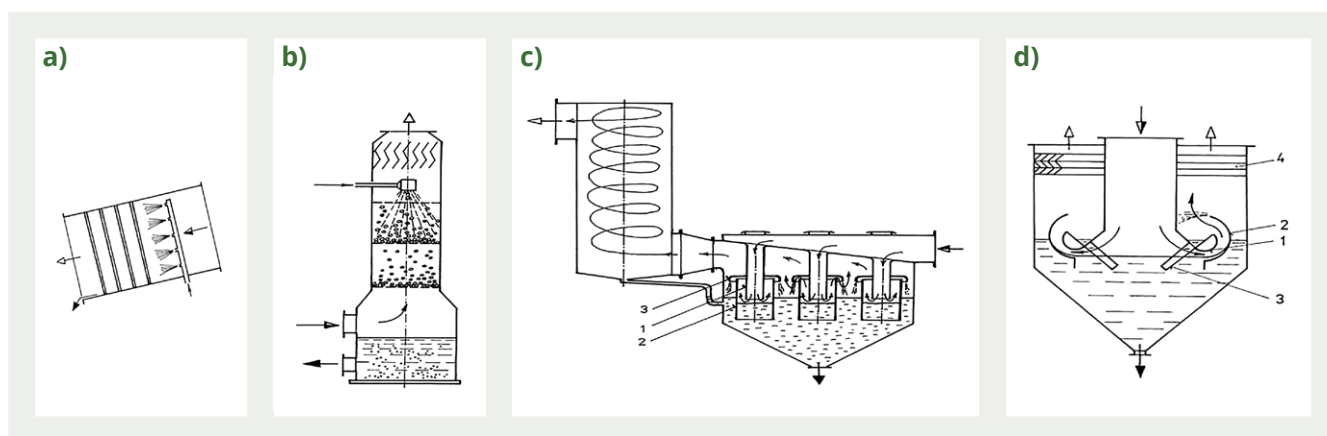
pomerne dlhá, nedosahuje sa pri týchto typoch vysoká odľučivosť, preto sú predurčené skôr ako predodľučovače. Merná spotreba vody je pomerne vysoká ($1 - 5 \text{ l.m}^{-3}$).

V sprchových komorách sa vysoké relatívne rýchlosti dosahujú vysokou rýchlosťou kvapiek rozprašovaných vysokotlakovými tryskami. Plyn tu spravidla prúdi horizontálne rýchlosťou do 3 m.s^{-1} , v dôsledku čoho je doba zdržania plynu kratšia. Optimálna veľkosť kvapiek, kde sa dosahuje maximálna odľučivosť častíc, sa pri tomto type usporiadania pohybuje v oblasti 100 až $300 \text{ }\mu\text{m}$. Merná spotreba vody je v porovnaní s predchádzajúcim typom nižšia. Aby sa zabránilo úniku kvapiek, na výstupe z odľučovača sa zaraďuje odľučovač kvapiek.

Mokrú zotrvačnú odľučovače možno podľa viacerých spoločných znakov rozdeliť na:

- odľučovače so zmáčanými prekážkami (obr. 6a),
- odľučovače so zmáčanou pevnou vrstvou (náplňové odľučovače) (obr. 6b),
- odľučovače so zmáčanou pohyblivou vrstvou (obr. 6c),
- odľučovače hladinové (obr. 6d).

Najjednoduchší mokrý zotrvačný odľučovač so zmáčanými priehradkami obtekanými prúdom plynu (obr. 7a) sa skladá z viacerých radov valcových tyčí zmáčaných rozprašovanou vodou. Nízku odľučivosť tohto odľučovača možno zvýšiť viacradovým usporiadaním tyčí, čím však zároveň stúpa aj tlaková strata, preto sa používa ako predodľučovač. Vyššiu odľučivosť možno dosiahnuť v náplňových mokrých odľučovačoch, kde plyn preteká zmáčanou vrstvou, tvorenou telieskami vhodných tvarov. Ako náplne sa používajú napr. Rashigove keramické krúžky alebo plastové krúžky Pall. Odľučivosť aj tlaková strata sa zvyšujú s hrúbkou vrstvy náplne. Rýchlosť plynu je s ohľadom na nebezpečenstvo strhávania kvapaliny z povrchu teliesok a odvod kvapaliny s časticami obmedzená na maximálnu hodnotu 15 m.s^{-1} . Merná spotreba vody je daná požiadavkami na rovnomerné zmáčanie celého prierezu a ďalej závisí od vstupnej koncentrácie TZL (pri koncentrácii do 20 g.m^{-3} sa udáva merná spotreba vody m do 1 l.m^{-3}).



Obrázok 6: Typy mokrých odľučovačov: **a)** zotrvačný odľučovač, **b)** odľučovač so zmáčanou pohyblivou vrstvou, **c)** mokrý kaskádový odľučovač, **d)** hladinový odľučovač s tangenciálnym odvodom plynu

Na odľučovanie tuhých, ale aj plyných prímiesí sa využíva odľučovač so zmáčanou pohyblivou vrstvou (obr. 6b). Odľučovač predstavuje kolónu s niekoľkými perforovanými poschodiami, na ktorých je umiestnená vrstva ľahkých plastových guľôčok. Vstup čisteného plynu je zospodu a pri prietoku nahor uvádza vrstvu guľôčok do intenzívneho vírového pohybu. Nad horné poschodie sa tryskou privádza premývacia kvapalina, ktorá zmáča guľôčky a steká po poschodiach na spodnú časť kolóny. Neustále nárazy guľôčok na stenu aj na seba navzájom spolu s ich omývaním zabraňujú tvoreniu usadenín. Rýchlosť plynu v kolóne sa pohybuje okolo 5 m.s^{-1} a je daná spodnou hranicou

fluidizácie použitej náplne. Je vhodný na odlučovanie lepivých TZL a používa sa okrem chemického priemyslu aj v iných oblastiach, napr. v potravinárstve.

Medzi najznámejšie a najviac rozšírené mokré zotrvačné odlučovače patria hladinové odlučovače (obr. 6c a 6d). Tento typ je možné ďalej rozdeliť na dva základné typy, a to s kolmým a s tangenciálnym prívodom plynu, ktorý je častejším usporiadaním. K odlučovaniu častíc dochádza impakciou (nárazom) na zvírenej hladine kvapaliny pri zmene smeru prúdu plynu o 180° , preto sa nazývajú tiež ako impakčné. V kaskádovom mokrom odlučovači (obr. 6c) sa plyn privádza vyššou rýchlosťou trúbkami (1) proti hladine a väčšie častice sa priamo odlúčia impakciou. Plyn pri prúde strháva z hladiny kvapalinu a v priestore medzi prívodnou trúbkou (2) dochádza k intenzívnemu zmiešavaniu vodnej triešte s časticami prímiesí. Na výstupe z vonkajšej trubky je umiestnené tvarové veko (3), kde sa prúd plynu znova obracia smerom dolu a na hrane veka sa vytvára kuželová vodná clona. Neodlúčené častice prechádzajú vodnou clonou, ktorá slúži ako druhý odlučovací stupeň. Na výstupe z odlučovača je umiestnený vírový článok na odlúčenie zostávajúcich kvapôčok a kvapalina sa vracia späť do vlastnej pracovnej nádrže.

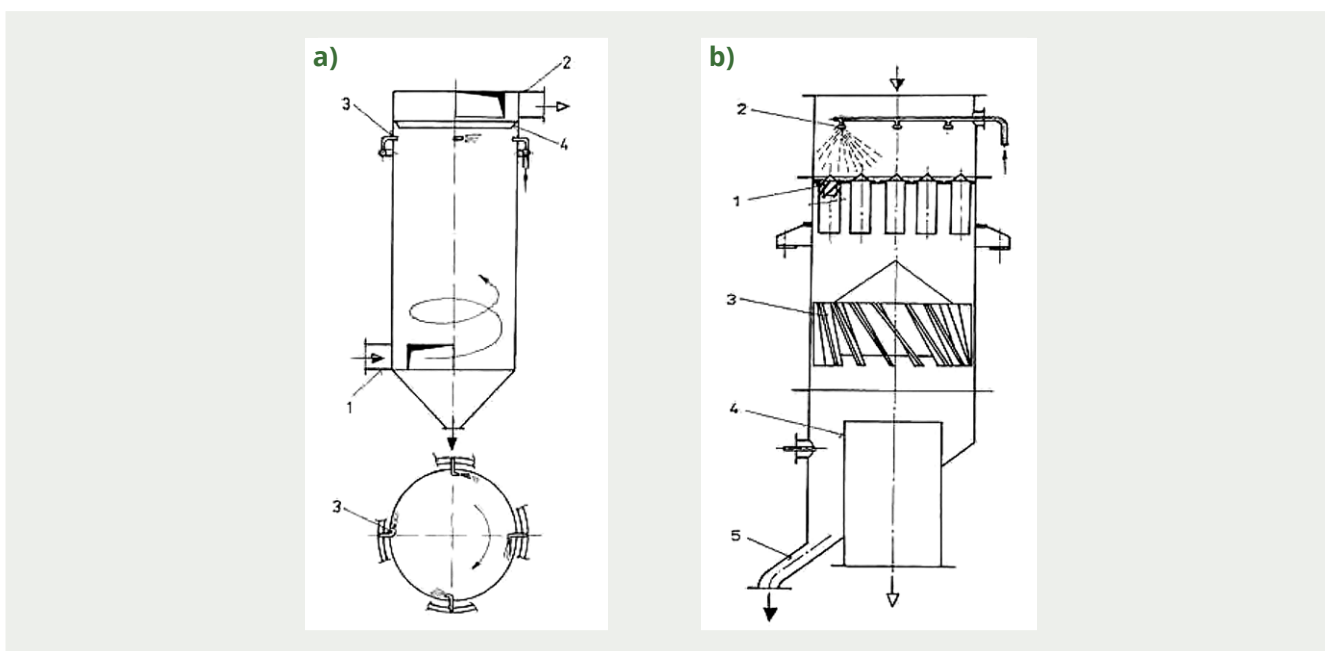
Na podobnom princípe pracujú hladinové odlučovače s usmerneným alebo tangenciálnym prívodom plynu nad hladinu kvapaliny. Na obr. 6d sú uvedené príklady konštrukcie hladinových odlučovačov s tangenciálnym prívodom plynu. Znečistený plyn sa privádza nad hladinu kvapaliny a preteká vysokou rýchlosťou štrbinou vytvorenou medzi hladinou a usmerňujúcimi lopatkami (1). Plyn so sebou strháva z hladiny kvapalinu a v priestore medzi usmerňujúcimi lopatkami (1) a usmerňujúcimi lopatkami (2) dochádza k intenzívnemu zmiešavaniu častíc a vznikajúcej vodnej triešti. Častice, ktoré sa neodlúčili už pri prechode štrbinou a v priestore medzi lopatkami, sa odlučujú prechodom vodnou clonou na výstupnej hrane lopatiek a spolu s kvapalinou stekajú späť do nádrže kanálom (3). Kvapky unášané plynom sa na výstupe odlučujú v odlučovači kvapiek (4).

Odlučovače tohto typu majú vysokú odlučivosť aj pre menšie častice (hranica odlučivosti dosahuje hodnoty okolo $1 \mu\text{m}$). Výhodou týchto odlučovačov je malá zmena tlakovej straty aj odlučovacích schopností pri zmene objemového prietoku plynu spôsobená zmenou šírky štrbiny medzi hladinou a usmerňujúcimi lopatkami. Tlaková strata hladinových odlučovačov je vyššia a pohybuje sa okolo $1\ 500 \text{ Pa}$. Obeh vody je pri týchto odlučovačoch samovoľný a do priestoru nádrže sa doplňuje iba odparená voda a voda odvedená s kalom. Správna funkcia hladinových odlučovačov závisí od nastavenia výšky hladiny. Obvykle je hladinový odlučovač kombinovaný s usadzovacou nádržou, takže nie je potrebné vytváranie zvláštneho kalového hospodárstva. Hladinové odlučovače sú vybavené vlastným ventilátorom a tvoria tak kompaktné odlučovacie zariadenie.

Mokré vírové odlučovače je možné podľa spôsobu prívodu kvapaliny a tvaru vírových článkov v zásade rozdeliť na dva rôzne typy. Pri prvom type zaistuje prívod kvapaliny iba zmáčanie stien odlučovacej komory, takže častice sa po odlúčení na stene odvádzajú vo forme kalu (obr. 7a), a má svoje špecifické znaky. Vstup (1) do valcovej komory je tangenciálny, ale v spodnej časti komory. Plyn prúdi špirálovým pohybom hore a odvádzajú sa opäť v tangenciálnom smere otvorom (2). Prívod vody je riešený v hornej časti komory tryskami (3) rozmiestnenými po obvode a nasmerovanými tangenciálne v smere prúdu plynu, takže sa vytvára na stene komory súvislý vodný film, ktorý splavuje odlúčené častice. V hornej časti komory je nad rovinou trysiek umiestnená kuželová vložka (4), ktorá bráni úniku kvapaliny z odlučovača. Tento typ odlučovača má nízku mernú spotrebu vody (menej ako $0,3 \text{ l}\cdot\text{m}^{-3}$), pretože kvapalina tu zmáča len odlučovaciu plochu. Ako maximálna vstupná koncentrácia častíc sa uvádza $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. Odlučovač tohto typu je však citlivý na vstupnú teplotu plynu a odporúča sa maximálna teplota $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Pri vyššej teplote a uvedenej mernej spotrebe vody dochádza k odpareniu kvapalného filmu a následne k nalepovaniu častíc na steny komory. Pri týchto odlučovačoch sa používajú väčšie priemery komôr okolo 1 m a tomu zodpovedajú aj nižšie odlučovacie schopnosti. Zníženie hodnoty hraničného zrna ($\approx 1 \mu\text{m}$) je možné uskutočniť zmenšením priemeru vírového článku alebo paralelným zaradením viacerých článkov.

Pri mokrom prevedení odpadá hlavná nevýhoda suchých vírových článkov – zvýšená abrázia a nebezpečenstvo zalepovania. Pri paralelnom zaradení článkov malých priemerov je však nutné riešiť prívod kvapaliny iným spôsobom ako tryskami po obvode a s tým súvisí aj použitie iných typov článkov.

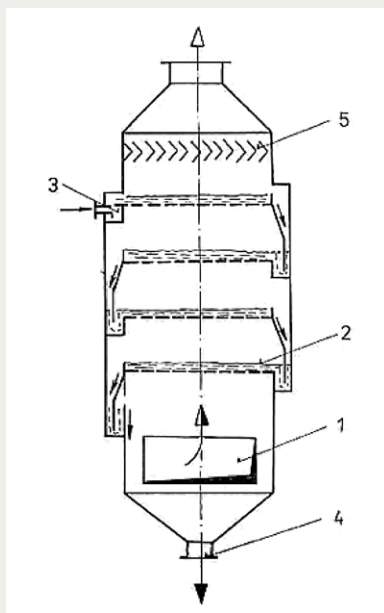
Vírniový odlučovač (obr. 7b) ako príklad druhého typu mokrého odlučovača používa tzv. vírniky (1), články s axiálnym vstupom a priamym tokom, kde rotáciu plynu zaisťujú lopatky na vstupe. Články tohto typu majú priemer 150 mm a kvapalina sa privádza systémom trysiek (2) proti ich ústiu. Kvapalina sa spolu s časticami odlučuje na stenách článkov a vzniknutý kal odkvapkáva od ich spodnej hrany k odlučovaču kvapiek (3). Čistý plyn sa odvádza stredovou trubkou (4), odlúčený kal steká po stene a odvádza sa výtokovou trubkou (5). Merná spotreba vody pri tomto type je 0,2 až 0,4 l.m⁻³, tlaková strata dosahuje hodnotu 1 000 Pa, hranica odlučivosti je približne 1 µm, maximálna vstupná koncentrácia sa udáva 20 g.m⁻³.



Obrázok 7: Typy mokrych vírových odlučovačov: **a)** so zmáčanými stenami, **b)** mokrý vírniový odlučovač

Penový odlučovač je založený na odlučovaní častíc v penovej vrstve, ktorá sa vytvára pri prechode plynu vhodnou rýchlosťou poréznou priehradkou (roštom), na ktorú nateká kvapalina, spravidla voda. Viacposchodové usporiadanie penového odlučovača je uvedené na obr. 8.

Plyn sa privádza otvorom (1) v spodnej časti valcovej komory a postupne preteká niekoľkými poschodiami odlučovača (2). Prívod kvapaliny je riešený cez nátokovú komoru (3) na horný rošt a pri tomto usporiadaní postupne preteká na spodné poschodia. Kal sa odvádza hrdlom (4). Proti úniku kvapaliny je v hornej časti umiestnený odlučovač kvapiek (5). Pri iných usporiadaniach odlučovača sú rošty umiestnené po celom priereze komory a kal vhodnou rýchlosťou preteká roštom do nižších poschodí. Vodná pena sa pri odlučovačoch vytvára bez prísady penotvorných látok. Rýchlosť plynu sa pohybuje okolo hodnoty 2 m.s⁻¹. Odlučovače sú citlivé na zmenu objemového prietoku.



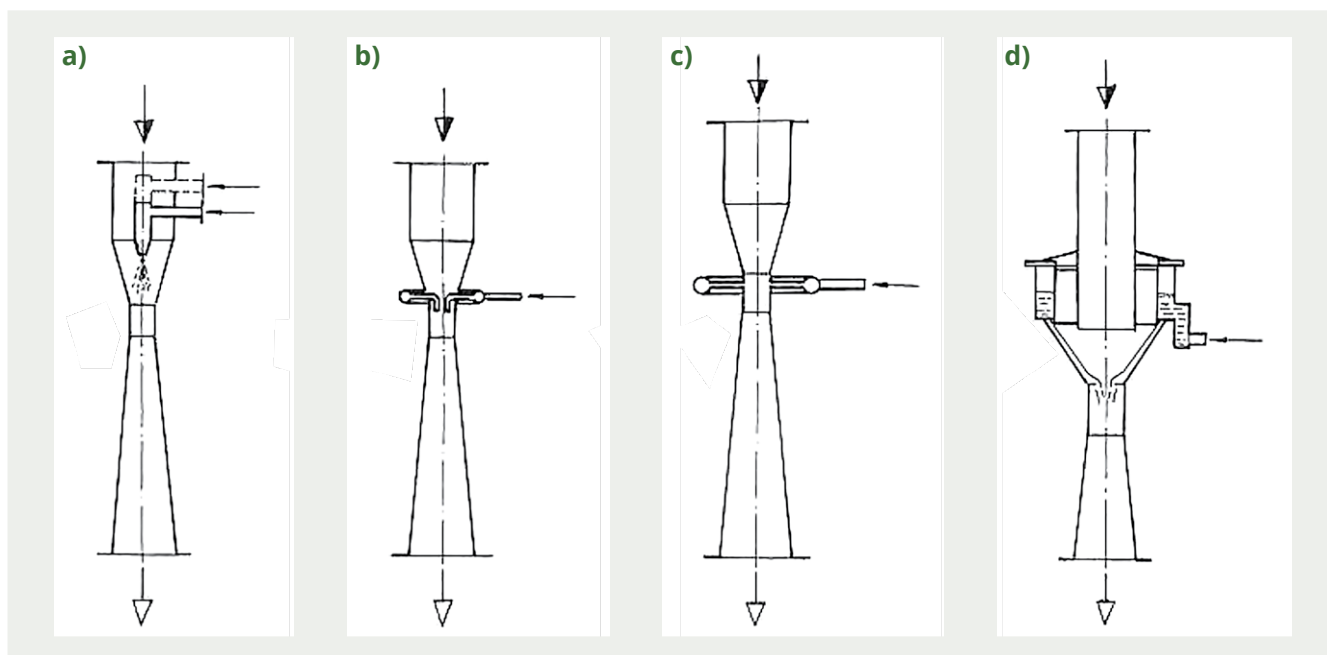
Obrázok 8: Penový odlučovač

Pri znížení rýchlosti o viac ako 20 % oproti pôvodnej hodnote sa zvyšuje prietok kvapaliny roštom a nedochádza k vytvoreniu peny príslušnej hrúbky. Naopak, pri zvýšení rýchlosti o viac ako 20 % sa vytvára nestabilná pena a dochádza k nadmernému úniku kvapaliny. Dôležitou podmienkou správnej funkcie odlučovača je vytvorenie rovnomernej vrstvy peny po celom priereze. Tým je obmedzená aj veľkosť roštu a odtiaľ aj veľkosť odlučovača. Tlaková strata odlučovača závisí od počtu poschodí a pri jednom poschodí dosahuje hodnoty okolo 300 Pa. Rovnako odlučovacia schopnosť závisí od počtu poschodí. Hranica odlučivosti sa pri jednom poschodí pohybuje okolo 1,5 μm a znižuje sa zvyšovaním počtu poschodí.

Merná spotreba vody závisí od vstupnej koncentrácie TZL (pri koncentráciách do 30 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ je okolo 0,3 $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$, pri koncentráciách 100 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ je už 0,6 $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$). Prednosťou penových odlučovačov je možnosť ich použitia aj pre extrémne vysoké vstupné koncentrácie až do 500 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Nie sú vhodné pre TZL s tendenciou vytvárania nánosov (cementujúce TZL). Tvorbu nánosu je však možné potlačiť umiestnením sklenených guľôčok na rošty. Penové odlučovače sú vhodné najmä pre dobre zmáčateľné TZL. Oproti iným mokrým odlučovačom s rozprašovaním kvapaliny dochádza v tomto prípade k nižšiemu odparovaniu vody a je možné ich používať aj pre vyššie teploty plynu. Súčasne s tuhými časticami je možné pri použití vhodných prísad do vody riešiť aj odlučovanie plyných prímiesí.

Prúdové odlučovače

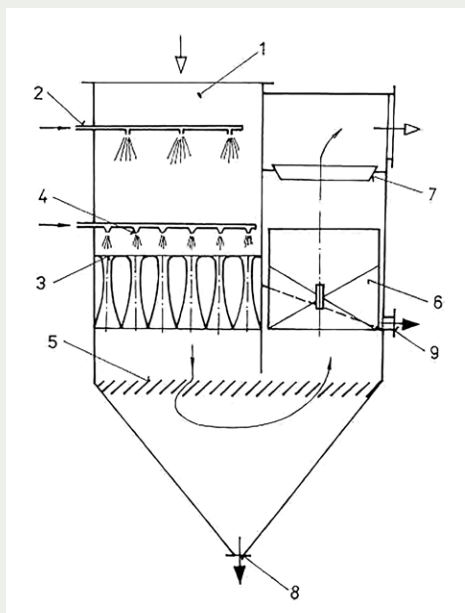
Z mokrých mechanických odlučovačov najvyššia odlučivosť, ale aj najvyššia tlaková strata sa dosahuje pri prúdových odlučovačoch. Pri týchto typoch sa na odlučovanie využíva zotrvačný odlučovací princíp pri vysokej relatívnej rýchlosti v_{rel} medzi plynom obsahujúcim častice a kvapalinou, ktorá sa rôznym spôsobom privádza do hrdla Venturiho trubice. Niektoré zo spôsobov riešenia prívodu kvapaliny sú uvedené na obr. 9, kde je prívod kvapaliny riešený cez hrdlo Venturiho trubice axiálnou tlakovou tryskou, prípadne s použitím tlakového vzduchu (obr. 9a), alebo sú trysky z kruhového prstenca okolo trubice zaústené priamo do hrdla (obr. 9b), alebo sú trysky zaústené do steny hrdla trubice v rovine kolmej na smer prúdenia (obr. 9c), alebo sú trysky nasmerované tak, aby prúd kvapaliny čo najviac vykryval prierez hrdla, alebo voľný nátok kvapaliny po stenách trubice, kde na hrane na vstupe do zúženého hrdla je kvapalina strhávaná dynamickým účinkom prúdu (obr. 9d).



Obrázok 9: Spôsoby riešenia prívodu kvapaliny do hrdla Venturiho trubice

Rýchlosť plynu v hrdle dosahuje vysoké hodnoty, až $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dynamickým účinkom prúdu dochádza k ďalšiemu triešteniu kvapaliny až na veľkosti kvapiek rádovo desiatky μm , ktoré sú schopné pri vysokej relatívnej rýchlosti prúdu zachytávať s vysokou účinnosťou aj častice submikrónových veľkostí. K ďalšiemu odlučovaniu častíc dochádza v difúzorovej časti trubice vplyvom intenzívnej turbulencie prúdu. Správna funkcia prúdových odlučovačov je podmienená dokonalým rozptýlením kvapaliny po priereze trubice. Túto požiadavku je možné zaistiť pri menších prierezoch trubíc, a preto sa pre väčšie objemové prietoky používa viacčlánkové usporiadanie alebo sú dýzy riešené v tvare štrbín. Venturiho trubice alebo štrbinové usporiadanie dýz tvorí základnú časť prúdového odlučovača, v ktorej sa tuhé častice viažu na kvapôčky. V ďalšej časti odlučovača je potrebné zaistiť odlúčenie kvapiek z prúdu plynu. Táto časť sa opäť rieši rôznymi spôsobmi – nátokom na hladinu, pomocou žalúzií, vírnikov, zaústením do vírového odlučovača s tangenciálnym vstupom a pod.

Na obr. 10 je uvedený príklad konštrukcie prúdového viacčlánkového odlučovača. Vstup čisteného plynu (1) je riešený zhora do komory, kde je zaústený prívod vody (2) s tryskami na ochladenie plynu a zníženie odparovania vo vlastnej odlučovacej časti. Venturiho trubice (3) vo viacčlánkovom zhotovení majú zaoblený vstup a nad ústím každej trubice sa rozstrekuje voda tryskami (4). Väčšie kvapôčky spolu s odlúčenými časticami sa odlučujú pri prechode žalúziovým odlučovačom kvapiek (5) a k odlúčeniu menších kvapôčok dochádza vo vírniku (6). Na výstupe z odlučovača je proti úniku kvapaliny zo stien vírnika umiestnená kuželová vložka (7). Kal sa z odlučovača odvádza jednak otvorom (8) zo spodnej časti odlučovača a súčasne bočným otvorom (9).



Obrázok 10: Prúdový viacčlánkový odlučovač

Tlaková strata prúdových odlučovačov je vysoká a dosahuje hodnoty 5 až 10 kPa, pri dosiahnutí hranice odlučivosti v oblasti desiatín μm . Vysoká tlaková strata nie je spôsobená vlastným prietokom plynu Venturiho trubicou, ale najmä energiou spotrebovanou na vytvorenie jemných kvapôčok a na ich urýchľovanie v prúde plynu. Preto je tlaková strata prúdových odlučovačov značne závislá od mernej spotreby vody, ktorá sa pohybuje v rozpätí $m \approx 0,2$ až $2 \text{ l}\cdot\text{m}^{-3}$. Vzhľadom na vysokú tlakovú stratu majú prúdové odlučovače vysokúmernú spotrebu energie K_p až $5 \text{ kWh}/1000 \text{ m}^3$, na druhej strane však vplyvom vysokých rýchlostí nie sú potrebné veľké rozmery ani vysoká spotreba materiálu.

2.1.2 Filtračné zariadenia

Zariadenia na odlučovanie tuhých častíc z nosných plynov **filtráciou** vytvárajú veľmi široký sortiment odlučovacích zariadení, ktoré je možné rozdeliť do dvoch základných oblastí – filtrácia atmosférického vzduchu a filtrácia priemyslová. Uvedené oblasti sa podstatne líšia v spôsobe realizácie a odlišné sú aj vstupné parametre plynu a častíc, miesta záchytu častíc vo filtračnej vrstve a regenerácia. Filtrácia atmosférického vzduchu sa používa pri vetraní a klimatizácii, pri úprave pracovného prostredia, pri úprave vzduchu, pri vysokoúčinnnej technologickej filtrácii. Maximálne vstupné koncentrácie častíc sa pohybujú v jednotkách $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, teplota vzduchu sa blíži k štandardným podmienkam. Častice sa odlučujú vo vrstve a filtračné materiály sa s výnimkou hrubých filtrov neregenerujú. Pri priemyselnej filtrácii sú častice TZL spravidla väčšie ako pri atmosférickom prachu, teplota plynov môže dosiahnuť až niekoľko stoviek stupňov Celzia. Častice sa po určitej nábehovej dobe odlučujú na povrchu filtračného materiálu a dochádza k vytváraniu vrstvy odlúčených častíc – filtračného koláča, ktorý sa v primeraných časových intervaloch odstraňuje – filtračný materiál sa regeneruje. Pri filtrácii atmosférického vzduchu a priemyselnej filtrácii sa môžu uplatniť prakticky všetky odlučovacie princípy. Filtráciu je možné všeobecne charakterizovať ako odlučovací proces, pri ktorom je možné dosiahnuť najvyššie odlučivosti aj pre submikrónové častice, ale za cenu vysokých investičných a prevádzkových nákladov a veľkých priestorových nárokov. Základné obmedzenie priemyselnej filtrácie vyplýva z obmedzenej teplotnej a chemickej odolnosti filtračných materiálov voči nosnému plynu a odlúčeným časticiam. Základom filtrácie je odlučovanie častí vo filtračnej vrstve, ktorej štruktúra môže byť variabilná v závislosti od druhu materiálu.

Najrozšírenejšie sú filtračné vrstvy vláknité, môžu byť aj zrnité alebo z poréznej hmoty. Okrem štruktúry filtračnej vrstvy sú najmä pri priemyselnej filtrácii dôležité fyzikálno-chemické vlastnosti látok, z ktorých je filtračná vrstva vyrobená. Základné veličiny, ktoré z hľadiska užívateľa najviac charakterizujú filtračnú vrstvu, sú odľučivosť a tlaková strata. Obidve veličiny závisia nielen od štruktúry vrstvy, ale aj od parametrov plynu a stavu zanesenia vrstvy odlúčenými časticami.

Tlaková strata filtra sa udáva pomerom hmotnosti zachytených častíc k filtračnej ploche. K ďalšiemu odľučovaniu častíc dochádza sitovým účinkom na vrstve už odlúčených častíc, takže ďalšia zmena tlakovej straty je úmerná hrúbke filtračného koláča. Pri prekročení určitej tlakovej straty danej najmä mechanickými vlastnosťami filtračných materiálov je potrebné filtračnú vrstvu regenerovať. Pri regenerácii sa z filtračnej vrstvy odstráni filtračný koláč a pri prvých regeneračných cykloch čiastočne aj častice z filtračnej vrstvy. Po určitom počte regeneračných cyklov sa na povrchu filtračnej vrstvy vytvorí stabilná blokačná vrstva, ktorá sa pri regenerácii neodstráni a zároveň výrazne bráni prenikaniu ďalších častíc do filtračnej vrstvy.

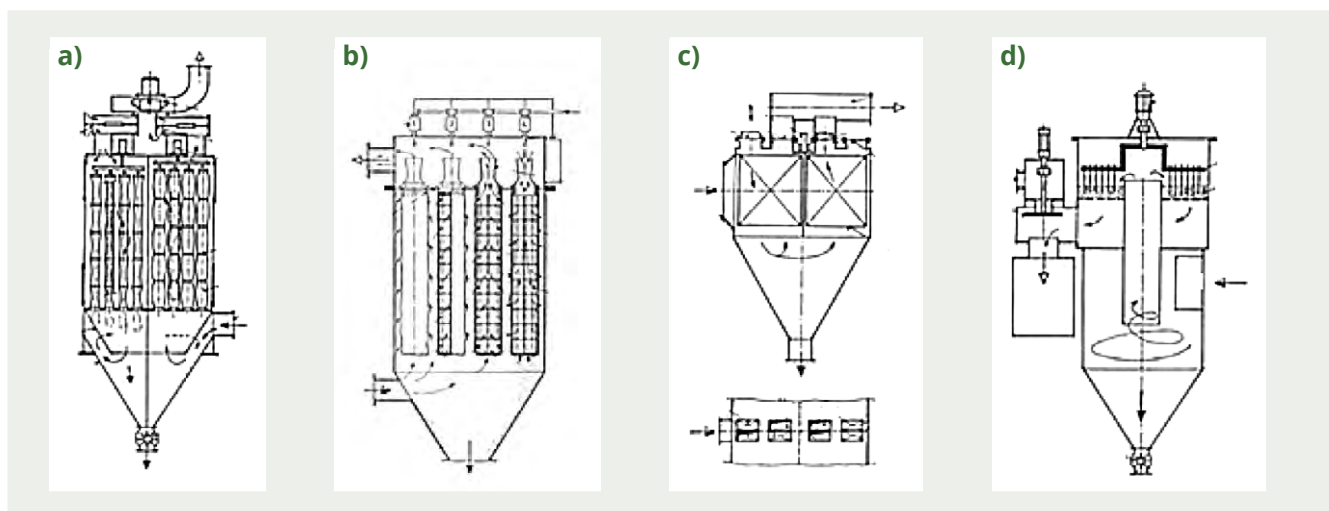
Filtračné materiály používané pri priemyselných filtráciách musia spĺňať veľké množstvo kritérií pre daný účel použitia. Základné fyzikálno-chemické vlastnosti filtrov sú: priemery a materiál vlákien, poréznosť vrstvy ε (l), hrúbka vrstvy s (mm), plošná hmotnosť ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), pevnosť v ťahu (N), ťažnosť pri pretrhnutí (%), teplotná odolnosť ($^{\circ}\text{C}$), rozmerová stálosť pri teplotnej odolnosti (%), priedušnosť ($\text{l}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ alebo $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), stupeň nehorľavosti, merný elektrický odpor (Ωm), navlhčivosť pri $t = 20^{\circ}\text{C}$ a relatívnej vlhkosti $\phi = 65\%$ (%), schopnosť zadržať vodu. Medzi najvýznamnejšie vlastnosti pri prevádzke filtrov patrí teplotná odolnosť (tab. 3) a chemická stálosť.

Tabuľka 3: Teplotná odolnosť materiálov používaných na výrobu filtračných textílií

Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Materiál	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Materiál
40 – 50	PVC – polyvinylchlorid	~ 150	PES – polyester
75 – 80	bavlna	200 – 250	PTFE – polytetrafluóretylén
80 – 90	vlna	~ 230	aramid
75 – 85	PAD – polyamid	250 – 300	sklenené vlákna
-90	POP – polypropylén	>300	kovové vlákna
~ 135	PAN – polyakrylonitril		

Technické riešenie filtrov je rôznorodé a podstatne sa líši podľa toho, či ide o filtráciu atmosférického vzduchu alebo priemyselnú filtráciu. Rozdiely vyplývajú nielen z rozdielných filtračných materiálov, ale sú spôsobené aj rozdielnymi parametrami čisteného plynu, objemovými prietokmi, koncentráciou tuhých prímiesí, umiestnením vo vzduchotechnickom potrubí siete, spôsobom regenerácie a pod.

Podľa spôsobu realizácie sa filtre atmosférického vzduchu rozdeľujú na suché a zmáčané, vložkové a pásové. Pri vložkových filtroch je filtračným členom jedna alebo viac výmenných vložiek, pri pásových filtroch je filtračným členom posuvný pás filtračného materiálu. Vložkové filtre môžu byť doskové, náplňové, vrecové, vrstvené, skladané a dielektrické. Pásové filtre môžu byť obehové alebo odmotávajúce. Priemyselné filtre sa rozdeľujú podľa usporiadania na hadicové a vrecové, podľa formy filtračného materiálu na filtre so zrnitou vrstvou alebo filtre s poréznu filtračnou vrstvou. Základný spôsob regenerácie pri hadicových a vrecových filtroch je spätný preplach (obr. 11a) alebo pulzný prefuk (obr. 11b). Hadicové filtre sa vyrábajú buď v kruhovom, alebo radovom usporiadaní. Pri kruhovom usporiadaní sú hadice usporiadané v kruhovej komore, pričom komora je z dôvodu regenerácie rozdelená na viacero sektorov.



Obrázok 11: Príklady filtračných zariadení: **a)** kruhový hadicový filter s regeneráciou spätným preplachom, **b)** kruhový hadicový filter s regeneráciou pulzným prefukom, **c)** vrecový filter s regeneráciou spätným preplachom, **d)** dvojstupňový odlučovač so zrnitou vrstvou

Vývoj netkaných vpichovaných filtračných textílií s teplotnou odolnosťou až do 150 °C s možnosťou ľahkej regenerácie priniesol široké využitie vrecových filtrov (obr. 11c), ktoré je možné zostavovať do väčších celkov – filtračných staníc vybavených spoločnou žľabovou výsypkou. Pri nelepivých prachoch sa dosahujú výstupné koncentrácie pod 1 mg.m⁻³.

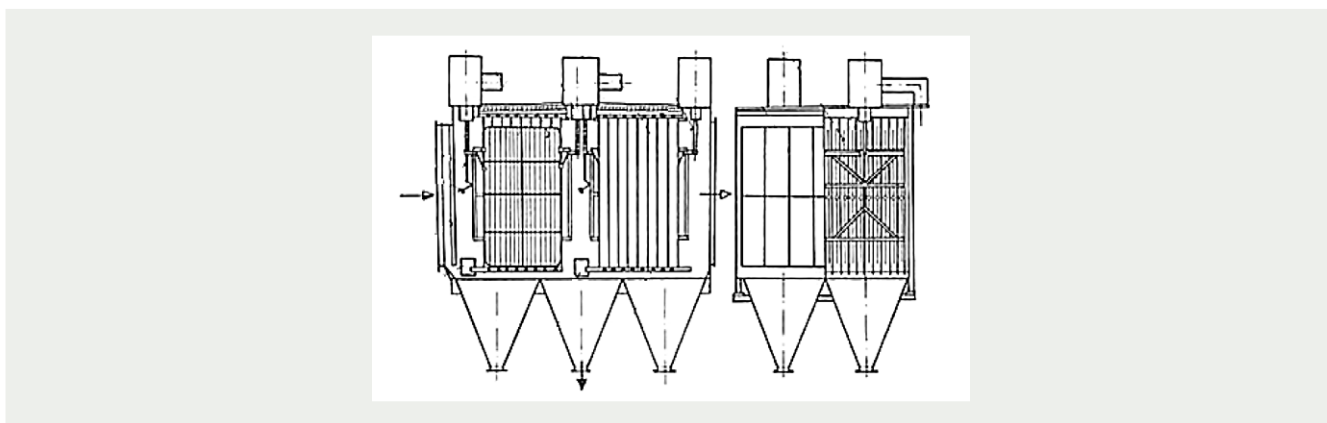
Typickým predstaviteľom filtrov so zrnitou vrstvou je dvojstupňový odlučovač, ktorého schéma je uvedená na obr. 11d. Ako zrnitý materiál je možné použiť napr. piesok umožňujúci odlučovanie aj pre vysoké teploty (až 500 °C), pričom tlaková strata sa pohybuje v rozmedzí 800 až 1 400 Pa. Znečistený plyn vstupuje točivo do vírového článku s veľkým priemerom, kde sa odlučujú hrubšie častice, ktoré sú odvádzané v spodnej časti odlučovača rotačným podávačom. Na konci vírového odlučovača vstupuje čiastočne vyčistený plyn do horného priestoru, kde sa odlúčia menšie častice prechodom cez zrnitú vrstvu. Po zanesení zrnitej vrstvy sa musí zariadenie prepnúť do režimu regenerácie, ktorá je možná iba pri odstavení odlučovača.

2.1.3. Elektrické odlučovače

Pri elektrickom odlučovaní sa tuhé alebo kvapalné častice odstraňujú z nosného plynu na základe pôsobenia elektrických síl. Prvé elektrické odlučovače boli použité na počiatku minulého storočia a od tej doby sa stali najrozšírenejšími odlučovačmi pre čistenie plynov s vysokými objemovými prietokmi. Dominantné je ich použitie v energetike pri veľkých spaľovacích zariadeniach. Výhodami elektrických odlučovačov sú: vysoká odlučovacia schopnosť aj pre jemné častice, nízka tlaková strata, vhodnosť pre veľké objemové prietoky plynov, menšia citlivosť na abrazívne častice; medzi nevýhody patria vysoké investičné náklady, vysoké nároky na pôdorysný a zastavaný priestor, náročnosť na kvalifikovanú obsluhu a údržbu, citlivosť na zmeny v zložení TZL, nevhodnosť na odlučovanie TZL s vysokým alebo, naopak, veľmi nízkym merným elektrickým odporom.

Pri elektrickom odlučovaní musia byť častice nabité na náboj opačnej polarity, ako je polarita usadzovacích elektród, na ktorých musí byť vytvorená dostatočne vysoká intenzita elektrického poľa. Zdrojom voľných iónov je elektrický výboj v silne nehomogénnom elektrostatickom poli, označovaný ako koróna. K vzniku spätnej koróny, resp. k odskakovaniu častíc dochádza v prípade, že častice vo vrstve majú príliš vysoký alebo príliš nízky merný elektrický odpor, čím sa celková odlučivosť znižuje. Pri elektrických odlučovačoch existuje celý rad sústav usporiadania elektród: trubkové a komorové usporiadanie, doskový ionizátor.

Po stránke elektrickej aj z hľadiska prietoku plynu sú jednotlivé prvky zaradené paralelne. Podľa smeru prietoku plynu sa odlučovače rozdeľujú na horizontálne (väčšina komorových) a vertikálne (trubkové). Podľa spôsobu odvodu odlúčených častíc z usadzovacích elektród je možné rozlišovať odlučovače suché a mokré. Ak je pri odlučovačoch oddelená ionizačná zóna od zóny odlučovacej, rozdeľujeme odlučovače na dvojjónové a jednojónové. Komorové odlučovače sa v smere prietoku plynu zapájajú po elektrickej stránke do sekcií. Maximálny počet sekcií je 4 až 5, každá sekcia má samostatné napájanie spravidla rôzne vysokým napätím. Pri väčších objemových prietokoch je možné odlučovače radiť aj vedľa seba (zdvojené usporiadanie) (obr. 12).



Obrázok 12: Schéma suchého horizontálneho komorového elektrického odlučovača

Najrozšírenejší typ elektrických odlučovačov na čistenie odpadových plynov je suchý horizontálny komorový odlučovač. Trubkové odlučovače sa v praxi používajú iba v špeciálnych prípadoch, a to na odlučovanie kvapalných prímiesí (dechtov, olejov a hmiel z rôznych technológií). Tieto odlučovače majú iba jednu sekciu elektród a sú tvorené paralelne radenými trubkami s polomerom 100 až 125 mm, prípadne šesťhrannými doskami.

2.2. Odlučovanie kyslých plynov

Najvyužívanejšie techniky na odlučovanie kyslých plynov sú sorpčné techniky (absorpcia a adsorpcia, ktoré môžu byť fyzikálne alebo s chemickou reakciou) najmä pre svoju univerzálnosť, navyše je možné zachytávať súčasne znečisťujúce látky plynného charakteru, kvapalné aerosóly aj tuhé látky.

2.2.1. Absorpcia

Absorpcia (mokré pranie) je dej, pri ktorom je plynná zložka odstraňovaná z čistenej plynnej zmesi a pohlcovaná vhodnou kvapalinou. Prechod hmoty z plynnej do kvapalnej fázy sa uskutočňuje difúziou, pričom podmienkou zdieľania hmoty medzi oboma fázami je, že nesmú byť v rovnovážnom stave, t. j. koncentrácia odstraňovanej zložky je väčšia v plynnej fáze ako vo fáze kvapalnej. Absorbovaná zložka prechádza z čistého plynu v smere nižšej koncentrácie (koncentračný spád) do absorbentu, ktorý by mal byť dostatočne selektívny a inertný k ostatným zložkám zvyšnej plynnej zmesi. Rýchlosť absorpcie je ovplyvňovaná najmä tlakom a teplotou – vzrastá so stúpajúcim tlakom a klesajúcou teplotou. Opačným procesom je desorpcia, ktorá nastane znížením tlaku alebo zvýšením teploty, čo umožňuje vykonať absorpciu, resp. desorpciu ako cyklický proces s koncentrovaním a využitím odlučovanej zložky. Ako absorbenty sa používajú roztoky vhodných látok, v ktorých sa absorbovaná zložka dobre rozpúšťa alebo s nimi reaguje – vtedy hovoríme o chemisorpcii.

Absorpciu možno okrem kvapaliny vykonať aj v suspenzii tuhej látky a kvapaliny, ktorá ju nerozpúšťa, napr. pohlcovanie kyslých plynov, (SO_2) v suspenzii mletého vápenca.

Absorpčnými postupmi sa odlučujú z odpadových plynov (OP) plynné znečisťujúce látky a v určitej miere aj tuhé a kvapalné častice. Podstatou absorpcie je látková výmena medzi kvapalnou fázou (absorbentom) a plynnou fázou, resp. zložkami plynnej fázy. Znečisťujúce látky v OP sa buď rozpúšťajú v absorbente, alebo môžu s absorbentom reagovať za vzniku zlúčeniny. Absorpcia sa používa predovšetkým na odstránenie halogénovodíkov, SO_2 , NH_3 , H_2S alebo VOC.

Ako absorbent môže principiálne slúžiť každá kvapalina, ktorá dokáže rozpúšťať alebo chemicky viazať ZL. Rozpustnosť danej plynnej zložky, ktorá s absorbentom nereaguje, je závislá od charakteru absorbenta, teploty (nepriamoúmerne) a tlaku. V prípade, že plynná zložka nereaguje s absorbentom, rozpustnosť je priamo úmerná parciálnemu tlaku nad roztokom (Henryho zákon). Pri výbere absorbenta treba okrem jeho účinnosti pre absorpciu danej zložky OP zvažovať korozívne vlastnosti a v neposlednom rade aj cenu a možnosti ďalšieho využitia (regenerácie) alebo čistenia.

Ako absorbenty sa používajú nasledujúce kvapaliny:

- voda na odstránenie halogénovodíkov, NH_3 s cieľom tieto látky rekuperovať a znovu použiť,
- zásadité roztoky na odstránenie kyslých zložiek, ako sú halogénovodíky, SO_2 , fenoly, Cl_2 (používajú sa aj ako druhý stupeň na odstránenie reziduálnych halogénovodíkov po prvom stupni vodnej absorpcie),
- zásadité oxidačné roztoky, t. j. roztoky s NaClO , ClO_2 , O_3 a H_2O_2 ,
- roztoky Na_2SO_3 odstraňujúce zápach (napr. aldehydy),
- roztoky Na_2SO_4 na odstraňovanie Hg,
- kyslé roztoky odstraňujúce NH_3 a amíny,
- roztoky mono- a dietanolamínu, vhodné na odstraňovanie H_2S .

Ako absorpčné zariadenia (mokrú práčku) sa najčastejšie používajú tri typy kolón:

- sprchové kolóny (beznáplňové),
- náplňové kolóny,
- etážové kolóny.

Voľba typu kolóny je závislá od jej funkčnosti, investičných a prevádzkových nákladov. Sprchové kolóny sa vyznačujú najnižšími tlakovými spádmi (10 – 100 Pa na 1 m výšky kolóny) a sú vhodné na čistenie veľkých objemov plynov, napr. v odsírovacích jednotkách. Etážové kolóny majú tlakový spád 400 až 2 000 Pa na 1 m výšky kolóny a náplňové kolóny majú najvyšší tlakový spád (1,2 až 3,5 kPa na 1 m výšky náplne). Výška investičných nákladov pre jednotlivé typy kolón je nasledovná: sprchové < náplňové < etážové.

Spracovanie použitých absorbentov

Absorpčné postupy často presunú problém znečisťovania ovzdušia na problém čistenia odpadových vôd z absorpcie a zneškodňovania kalov (napr. v sklárňach, kde odlúčenie HF z odpadového plynu vedie k tvorbe kalu CaF_2). Menej často sa absorbent regeneruje, napr. desorpciou s následným využitím alebo zneškodnením desorbovanej látky. Možnosť regenerácie alebo prijateľný spôsob odstraňovania použitého absorbenta sú pre použitie absorpcie ako spôsobu čistenia odpadových plynov rozhodujúce.

Použitý absorbent je možné len zriedka vypúšťať priamo do vodných tokov alebo kanalizácie, príp. skládkovať. Väčšinou nie je možné priame využitie alebo skládkovanie znečisťujúcej látky po jej separácii od absorbenta. Obyčajne sa tieto odpady z čistenia odpadových plynov zaraďujú do kategórií nebezpečných odpadov. Pred ich konečným zneškodnením, príp. využitím sa upravujú fyzikálnymi alebo chemickými postupmi.

2.2.2. Adsorpcia

Adsorpcia je difúzny dej, pri ktorom sa zvyšuje koncentrácia plynnej alebo kvapalnej látky na fázovom rozhraní, a to jej viazaním na povrch vhodnej tuhej alebo kvapalnej látky pôsobením van der Waalsových síl pri teplote vyššej, ako je teplota kondenzácie. Povrch tuhej látky sa pri adsorpcii pokrýva vrstvou molekúl adsorbovanej látky, pričom môže dôjsť k pokrytiu povrchu adsorbentu mnohými vrstvami molekúl adsorbovanej látky. Fyzikálna adsorpcia prebieha zvyčajne veľmi rýchlo a uvoľňuje sa pri nej teplo, ktoré sa väčšinou rovná 1,5- až 2-násobku kondenzačného tepla. Viazanú látku možno reverzným procesom (desorpciou) uvoľniť napr. znížením tlaku alebo zvýšením teploty podobne ako pri absorpcii. Uvoľnenú látku možno ďalej spracovať a zregenerovaný adsorbent opakovane využiť v cyklickom procese. Sorpčná kapacita adsorbentu sa môže mnohonásobne zväčšiť zvýšením pórovitosti, pričom póry musia byť väčšie než priemer molekúl adsorbovanej látky (napr. 1 g aktívneho uhlia môže mať aktívny povrch až 1 000 m²). Pri kondenzovateľných plynách a parách majú póry ďalší význam. V dostatočne úzkych póroch (jednotky až desiatky nm) nastáva skvapalnenie pary za nižšieho tlaku, ako je tlak nasýtenej pary pri danej teplote – dochádza ku kapilárnej kondenzácii, pri ktorej sa sorpčná kapacita významne zväčšuje.

Najčastejšie používané adsorbenty sú: aktívne uhlie, silikagél, alufol, molekulové sitá (syntetické zeolity), bentonit atď. Druhým prípadom adsorpcie je tzv. chemisorpcia, pri ktorej dochádza k prenosu elektrónov medzi adsorbovanou látkou a adsorbentom ako v chemických zlúčeninách. Keďže dochádza k chemickej reakcii medzi adsorbovanou a adsorbujúcou látkou a ku vzniku v podstate novej povrchovej zlúčeniny, je uvoľnené teplo spravidla podstatne vyššie ako pri fyzikálnej adsorpcii (dosahuje rádovo desiatky až stovky kilojoulov na mol), väčšinou ide o ireverzibilný pochod, pri ktorom dochádza k fragmentácii molekúl a regenerácia sorbentu je zložitejšia.

2.3. Odlučovanie prchavých organických látok (VOC)

Na odstraňovanie VOC je možné použiť viaceré spôsoby, ako napr. priame spaľovanie, katalytické spaľovanie, katalytický rozklad ozónom alebo plazmou, fotokatalytický rozklad, adsorpčné metódy, biologické čistenie, absorpciu, kondenzáciu a ďalšie techniky (pozri kap. 1.2.5).

Kondenzáciou sa odstraňujú výpary VOC z odpadových plynov tak, že sa ochladia pod teplotu rosného bodu. Ku kondenzácii dochádza priamym chladením (t. j. kontaktom plynu s chladiacou kvapalinou) alebo nepriamym chladením (t. j. chladením pomocou tepelného výmenníka). Nepriama kondenzácia sa používa častejšie, pretože priama kondenzácia vyžaduje dodatočné čistenie.

Pri biologickom čistení buď biologickou filtráciou, alebo biologickým praním sa využíva schopnosť mikrobiálneho konzorcia utilizovať organické látky (tvorba mikrobiálnej biomasy, CO₂, H₂O). Pri biologickej filtrácii odpadové plyny prechádzajú vrstvou organického materiálu (rašelina, kompost) alebo vrstvou inertného materiálu (íl, drevné uhlie, polyuretán), v ktorej vegetuje mikroflóra. Pri biologickom praní obsahuje pracia voda pomnoženú mikroflóru (inokulum). Takto možno zneškodniť biologicky ľahko odbúrateľné látky, ako sú napr. amíny, uhľovodíky, H₂S, toluén, styrén a zapáchajúce látky.

Na odlúčenie celkových organických látok (TOC) z odpadových plynov sa však využívajú najmä adsorpčné metódy alebo procesy využívajúce spaľovanie. Pri adsorpcii sa na povrch pevného adsorbentu viažu (koncentrujú) niektoré zložky odpadového plynu (adsorbát). Táto väzba má prevládajúci charakter buď fyzikálnej adsorpcie (van der Waalsovými silami alebo elektrostatickými silami), alebo chemisorpcie (silami podobnými chemickým väzbám). Ako adsorbenty sa najviac používajú aktívne uhlie, silikagél, zeolity a iné. Adsorpcia na aktívnom uhlí je účinnejšia pre veľké molekuly. Pri odlučovaní TOC adsorpciou na aktívnom uhlí existujú v podstate dva spôsoby: spôsob bez regenerácie uhlia alebo spôsob s regeneráciou uhlia. Spôsob bez regenerácie sa využíva tam,

kde je koncentrácia pár veľmi nízka. Adsorbent sa po nasýtení spaľuje v spaľovni spolu s nasorbovanou látkou.

Pri spôsobe s regeneráciou uhlia sa sorbovaná zložka plynu desorbuje a uhlie sa znovu použije. Pracuje sa obvykle v sérii dvoch a viacerých adsorbérov, kde jeden je v prevádzke (prebieha adsorpcia) a druhý sa regeneruje. Na regeneráciu uhlia sa obvykle používa nízkotlaková para alebo inertný plyn. Pri parnej regenerácii vznikne po kondenzácii (ochladení) odpadová voda, ktorá sa potom čistí v čistiarni odpadových vôd. Investične aj prevádzkovo sú systémy s regeneráciou uhlia nákladnejšie ako systémy bez regeneračného príslušenstva. Dôležitým faktorom ovplyvňujúcim efektívnosť adsorpcie je teplota pri adsorpčnej fáze procesu (prekročenie optimálnej teploty znižuje adsorpciu).

Spalovanie (termická oxidácia) je v súčasnosti najrozšírenejším spôsobom na zneškodnenie organických pár, pri ktorom sa tieto škodliviny transformujú na relatívne neškodné základné splodiny CO_2 a vodnú paru. Podmienkou je, aby spalovanie bolo dokonalé. Účinnosť a rýchlosť spaľovacieho procesu sú ovplyvnené časom, teplotou (zvyčajne sú tieto vyššie ako $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ alebo pri použití vhodných katalyzátorov je to od 250 do $400\ ^\circ\text{C}$), miešaním a dostatkom kyslíka. Odpadový plyn pred vstupom do spaľovacej komory prechádza predhrievačom, kde sa teplota plynu zvyšuje na oxidačnú teplotu. Následne vstupuje do spaľovacej komory, v ktorej sa horákmi udržuje teplota $800\ ^\circ\text{C}$. Potom opúšťa spaľovaciu komoru a prechádza tepelným výmenníkom, kde odovzdáva teplo na opätovné použitie v predhrievači. Vyčistený OP sa následne vypúšťa do voľného ovzdušia.

Katalytická oxidácia sa od termickej odlišuje tým, že OP po prechode plameňom prechádza cez katalyzátor. Ten zintenzívňuje oxidačné reakcie a umožňuje konverziu pri teplotách nižších ako pri termickej oxidácii. Pri oxidácii VOC obsahujúcich S sa ako katalyzátory používajú drahé kovy (Pt, Pd, Rh) uložené na keramickom materiáli alebo kove, pri oxidácii plynov obsahujúcich zlúčeniny chlóru sa používajú farebné kovy alebo oxidy kovov (Cu, Cr, Mn, Ni, Co) a ich zmesi uložené na nosiči.

Aby sa obmedzila tvorba dioxínov pri spaľovaní halogenovaných organických látok, treba dodržať nasledujúce podmienky: doba zdržania $> 1\ \text{s}$, teplota $> 1\ 100\ ^\circ\text{C}$, obsah kyslíka $> 3\ \%$, rýchle ochladenie plynov po spaľovaní.

2.4. Odlučovanie dioxínov a furánov

Najdominantnejším procesom splyňovania je využitie syntézneho plynu na výrobu elektrickej a tepelnej energie. Medzi produkty splyňovacích zariadení patria: tuhé častice, uhľovodíky, CO, dechty, N_2 , SO_x , PCDD/F a emisie Cd. Pri hodnotení rizika karcinogenity pre ľudí v dôsledku uvoľňovania PCDD/F a Cd zo zariadenia na splyňovanie odpadu bolo zistené, že emisie Cd sú oveľa vyššie ako emisie PCDD/F napriek ich vyššej toxicite a že až $95\ \%$ karcinogénneho rizika je spôsobených expozíciou Cd.

Uholné filtre boli prvými technológiami znižujúcimi obsah dioxínov, ktoré boli inštalované v zariadeniach na výrobu energie z odpadov koncom 80. rokov 20. storočia. Filtre pomáhali absorbovať aj iné organické zlúčeniny a ortuť, úskalím však bol ich veľký objem a pravdepodobnosť vznietenia. Z bezpečnostných dôvodov sa namiesto filtrov začali používať anorganické sorbenty, ako sú zeolity. Neskôr sa zistilo, že oxidačné katalyzátory majú vysoký degradačný potenciál pre dioxíny. Spočiatku sa používali pri teplote 300 až $350\ ^\circ\text{C}$, po ďalšom vývoji mohli pracovať aj pri nižších teplotách (okolo $230\ ^\circ\text{C}$), kde dosiahli aj vyššiu účinnosť deštrukcie – až $99\ \%$.

Vysoká prevádzková teplota ($> 1\ 000\ ^\circ\text{C}$) spolu s nedostatkom kyslíka eliminuje všetky PCDD/F, ktoré môžu byť prítomné v surovine, a eliminuje aj ich potenciálnu tvorbu. Vysokoteplotné splyňovanie znižuje tvorbu dioxínov, aj pri vysokom obsahu chlóru v surovine. Ďalším účinným a ľahko

uplatniteľným opatrením je rýchle ochladzovanie syntézneho plynu ponorením do vody, ktoré inhibuje syntézu PCDD/F. Zachytávanie PCDD/F špeciálnym viacstupňovým absorpčným filtrom je najúčinnějšíou metódou odstraňovania dioxínov. Prchavé organické zlúčeniny vrátane PCDD/F sa účinne odstraňujú v plynných a kvapalných fázach vďaka vysokej teplote reaktora a šokovému chladeniu. Ako príklad úspešného zníženia koncentrácie dioxínov bolo použité zvýšenie koncentrácie SO_2 v spalinách a úprava pomeru Cl/S tak, aby sa znížila koncentrácia dioxínov na približne $0,1 \text{ ng (TEQ)}/\text{m}^3$ v surovom plyne. Ďalším príkladom je použitie technológie REMEDIA v spaľovni pevného komunálneho odpadu, pričom sa menila prevádzková teplota od 180 do $260 \text{ }^\circ\text{C}$. Účinnosť rozkladu sa tak zvýšila na $97 - 99 \%$, pričom sa emisie dioxínov znížili pod $0,1 \text{ ng (TEQ)}/\text{m}^3$ vďaka katalytickým substrátom, ktoré sú prekryté dvojvrstvom polytetrafluóretylénovým (PTFE) membránovým materiálom na filtrovanie a elimináciu PCDD/F.

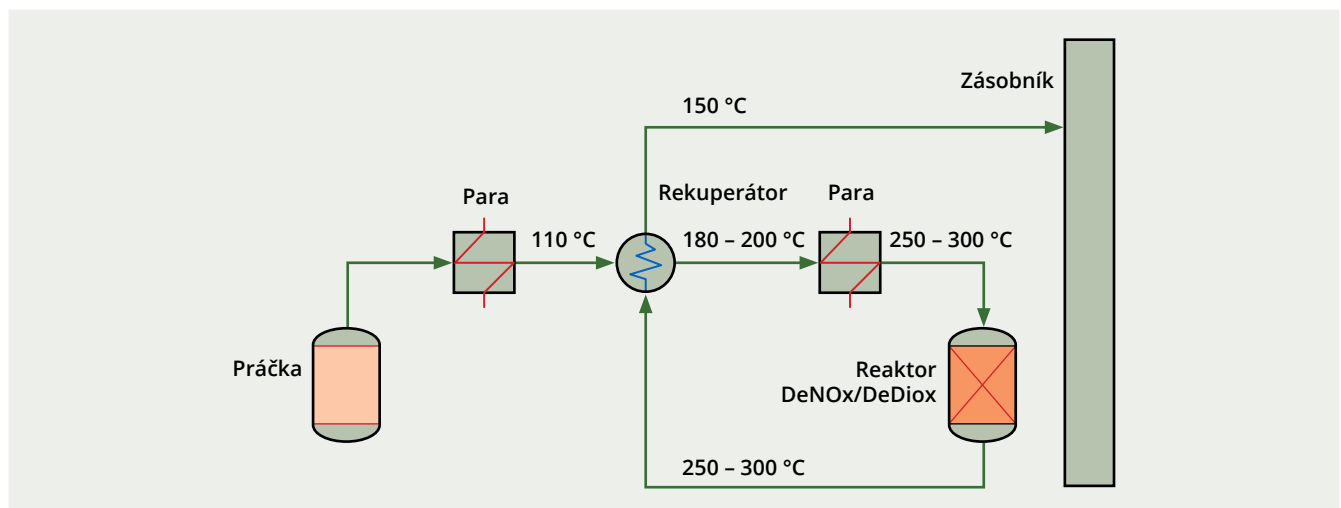
2.4.1. Katalytická filtrácia PCDD/F

Na základe aplikovaných postupov sa zistilo, že odstraňovanie dioxínov katalytickou filtráciou metódou REMEDIA je vysoko účinné. Špeciálne textilné filtračné vrecká GORE-TEX sa zvyčajne používajú pri katalytickej filtrácii, pomocou nich sa častice tuhého popolčeka oddeľujú prostredníctvom okamžitého odstránenia dioxínov v spalinách. Účinnosť filtrácie plynov sa môže zvýšiť na približne $96,6 \%$ vďaka membráne typu PTFE použitej vo vonkajšej filtračnej vrstve. Takto vyčistený plyn sa potom vedie do vnútra vnútornej filtračnej vrstvy zloženej z katalyticky aktívnych zlúčenín, ktoré môžu ďalej eliminovať dioxíny a dosiahnuť účinnosť $98,8 \%$. Vonkajšia filtrácia sa pravidelne obnovuje pomocou bežného pulzného čistiaceho systému.

2.4.2. Technológia DeNOx/DeDiox

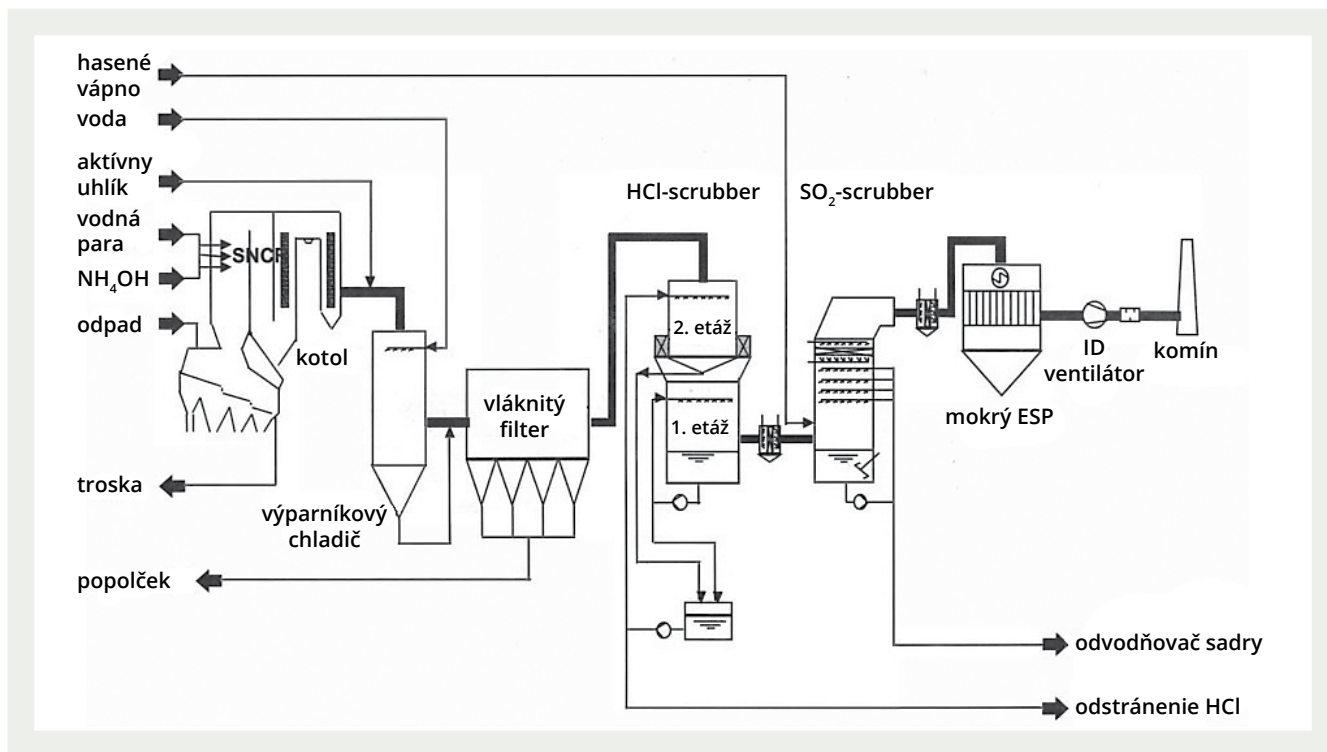
Jedným z výhodných prístupov na odstránenie dioxínu je kombinácia jeho katalytickej degradácie so selektívnou redukciovou reakciou NO_x . Na selektívne zníženie NO_x sa vstrekuje amoniak do katalytického reaktora, v ktorom sa súčasne odstraňujú NO_x aj dioxíny (DeNOx/DeDiox) pri teplote 200 až $300 \text{ }^\circ\text{C}$ s vysokou účinnosťou, avšak jednou z hlavných prekážok je otrava katalyzátora. Okrem mechanického a chemického čistenia sa reaktor v tomto usporiadaní musí inštalovať po odstránení TZL zo spalín plynov (obr. 13) pri opätovnom zahriatí spalín na $200 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ročná ekonomická bilancia prevádzky katalytickej filtrácie REMEDIA sa skladá z: nákladov na filtračné vaky (garantovaná životnosť a skutočná životnosť filtrácie bola 4 a 8 rokov), nákladov na energiu pohonu ventilátora, nákladov potrebných na rozprašovanie spalín pred vstupom do filtra.



Obrázok 13: Schéma odlučovača DeNOx/DeDiox

Spalovňa komunálneho odpadu Müllverbrennungsanlage Borsigstraße (MVB) v Hamburgu pozostáva z dvoch identických zariadení s kapacitou 520 ton odpadu denne. Bola navrhnutá na celkovú kapacitu 320 000 t/rok. Každá linka obsahuje spalovaciu jednotku vrátane kotla na spätné získavanie tepla, ako aj celé zariadenie na čistenie spalín (obr. 14). Systémy rekuperácie pre kyselinu chlórovodíkovú a sadru sú spoločné pre obe linky. Zariadenie je v komerčnej prevádzke od roku 1994.



Obrázok 14: Schéma odstraňovania emisií PCDD/PCDF v MVB Borsigstrasse (zdroj: Hartenstein H.U., Power B.B., Worcester R., Licata A. 2010)

Tabuľka 4: Prehľad technológií na znižovanie emisií dioxínov/furánov (zdroj: Hartenstein H.U., Power B.B., Worcester R., Licata A. 2010)

	Proces (*)	Adsorbent	Operačná teplota [°C]	Hlavné prevádzkové zariadenie
Rekuperátor	Vstrekovanie adsorbentu	Aktívne uhlie, vysokopecný koks, špeciálne minerálne látky	135 – 200	Prívod čerstvého adsorbentu, systém vstrekovania, FF alebo ESP pre nové zariadenia
Rekuperátor	Reaktor so zachyteným prietokom	Aktívne uhlie, vysokopecný koks, špeciálne minerálne látky a zmesi týchto látok s Ca(OH) ₂ alebo inertami	110 – 150	Prívod čerstvého adsorbentu, FF recirkulačný systém, systém spotrebovaného adsorbentu
	Reaktor s aktívnym uhlím(ACR)	Koks z pece, aktívne uhlie, prívod čerstvého adsorbentu, pevný	110 – 150	Prívod čerstvého adsorbentu, reaktor s fixným lôžkom, systém spotrebovaného adsorbentu
	Katalytická oxidácia na konci komína	Žiaden (len amoniak na odstránenie NO _x)	130 (260) – 350	Reaktor s katalyzátorom, prívod amoniaku

* Sú možné aj rôzne kombinácie týchto procesov, ktoré sa používajú v plnom rozsahu (napr. reaktor s prietokom so vstrekovaním adsorbentu, vstrekovanie adsorbentu s katalytickou oxidáciou na konci komína alebo katalytická oxidácia na konci komína s reaktorom ACR – activated carbon reactor).

FF – látkový filter – napr. vrecový, hadicový, rukávový, netkaný vpichovaný.

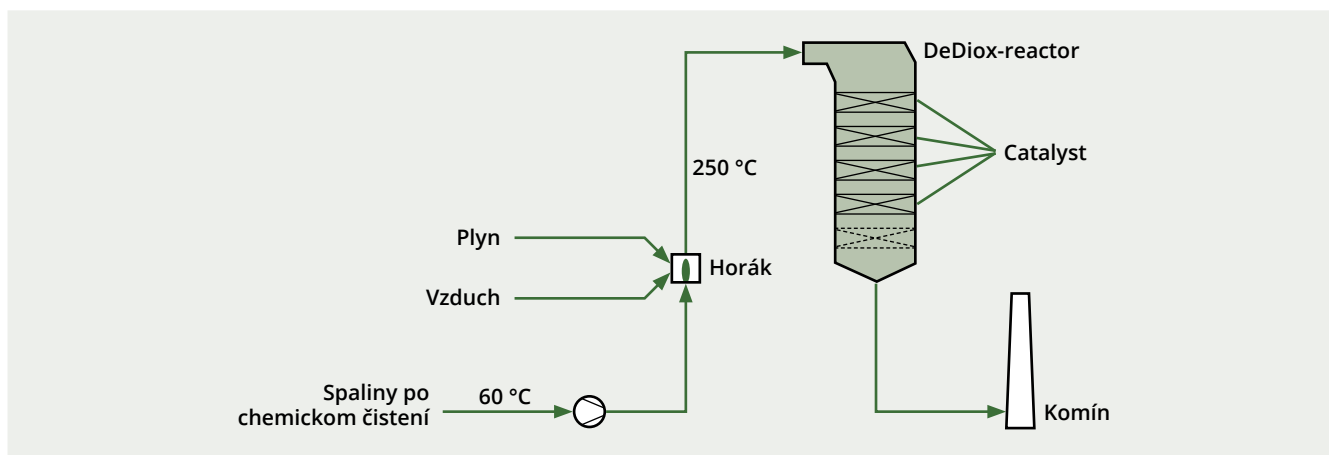
ESP – elektrostátické odlučovače.

Tabuľka 5: Technológie používané vo svete na obmedzovanie emisií dioxínov zo spalín (zdroj: Mukherjee A., Debnath B., Ghosh S. K. 2016)

Proces	Mechanizmus procesu	Výhody	Nevýhody
Správna spaľovacia prax spojená s úpravou na konci potrubia pomocou skrubera a vrecového filtra	Zmeny prevádzkových parametrov alebo spaľovacej praxe, ktoré zahŕňajú prípravu vstupných surovín a kontrolu vstupných surovín, maximalizáciu účinnosti spaľovania, riadenie podmienok kotla na odpadové teplo, manažment a monitorovanie systémových premenných, havarijný a bezpečnostný systém	Účinný proces na znižovanie emisií dioxínových zlúčenín až na 99 % (0,01 ng TEQ/Nm ³), nákladovo efektívny, jednoduchý z technického hľadiska	Aj pri úprave na konci potrubia nemožno emisie dioxínov kontrolovať, ak bude vstupná surovina obsahovať veľké množstvo chlóru, preto je potrebné venovať pozornosť výberu a príprave vstupnej suroviny; v dôsledku pamätového efektu sa môže zvýšiť vypúšťanie dioxínov
Selektívna katalytická oxidácia s použitím katalyzátorov NH ₃ -SCR (V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂), NH ₃ a močoviny	Do katalytického reaktora sa pridávajú ohriate spaliny, pričom vysoká teplota uľahčuje oxidáciu dioxínov cez katalyzátor	Účinný proces, ktorý pri dodržaní správnej praxe spaľovania môže priniesť lepší výsledok s účinnosťou viac ako 90 %	Podávanie katalyzátora by sa malo pravidelne monitorovať, aby sa zabránilo jeho prebytku, ktorý by mohol ovplyvniť proces redukcie; vysoké investičné a prevádzkové náklady obmedzujú použitie v plnom rozsahu
Vstrekovanie zlúčenín síry spojené s jej recykláciou	Zlúčeniny obsahujúce síru znižujú schopnosť inhibovať tvorbu PCDD/F kovových katalyzátorov, ktoré sa môžu premieňať na sulfáty (oxidáciou) alebo sulfidy (redukciou); zlúčeniny síry možno recyklovať na ďalšie použitie	Účinný proces, najmä v kombinácii s pyritom; stáva sa nákladovo efektívnejším, keď sa recykluje inhibítor	Zlúčeniny obsahujúce síru premieňajú kovové katalyzátory otravou povrchu kovových katalyzátorov buď redukciou, alebo oxidáciou
Vstrekovanie zlúčeniny dusíka (tiomočoviny)	Podlieha komplexnej reakcii s kovovými katalyzátormi za vzniku silne viazaného organokovového nitridového komplexu	Nedochádza k otrave katalyzátorov, skôr sa deaktivujú aktívne miesta na povrchu katalyzátora	Nezistené

2.4.3. Selektívna katalytická redukcia (SCR)

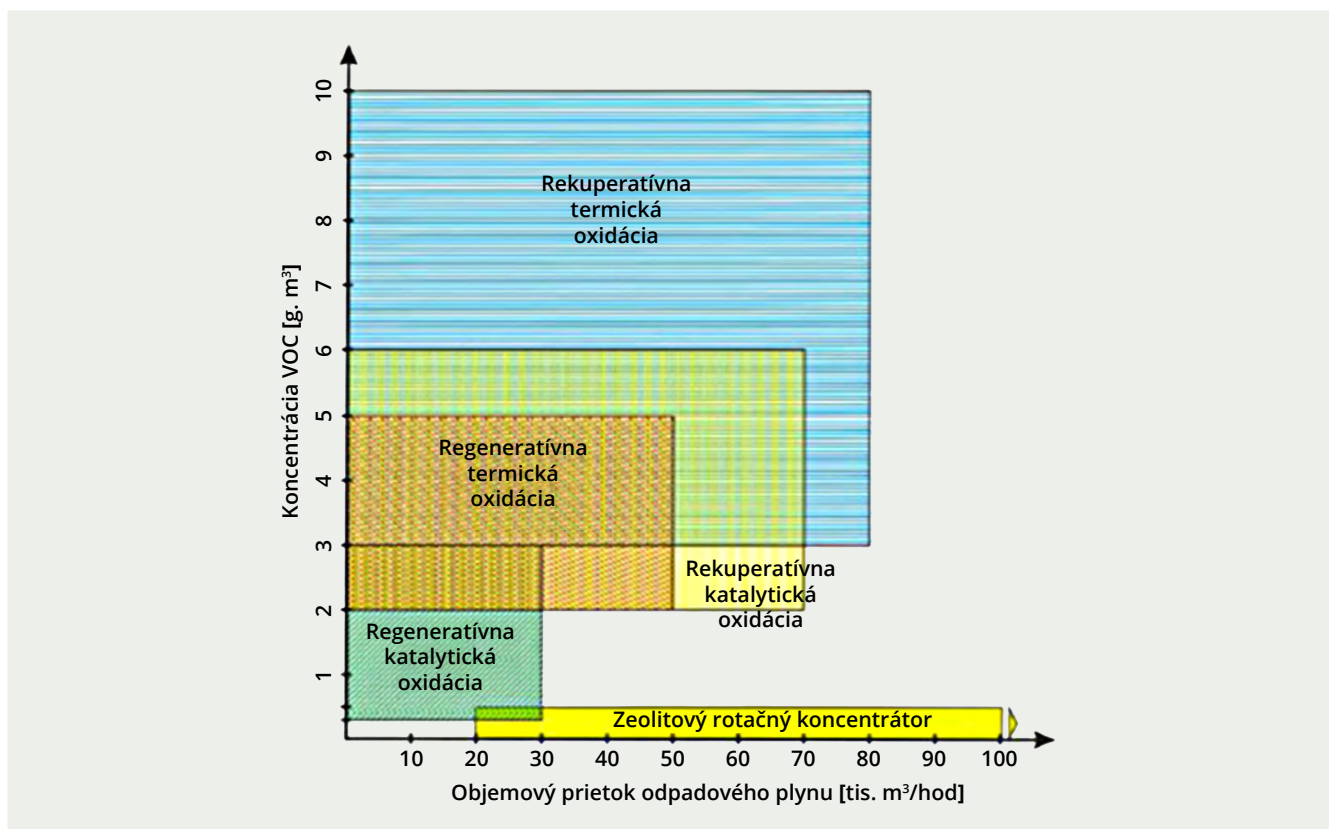
Okrem adsorpčných procesov sa na znižovanie emisií dioxínov a furánov široko uplatňuje aj selektívna katalytická redukcia. V prítomnosti kyslíka sa na povrchu katalyzátora vyskytujú najmä CO₂ a HCl ako produkty deštrukcie. Testovanie dioxínov/furánov na komerčných zariadeniach v plnej prevádzke ukázalo, že hodnoty emisií sú nižšie ako 0,01 ng TEQ/Nm³ (v suchom stave, 11 % O₂). Hlavnými výhodami tohto procesu (obr. 15) sú jednoduchá prevádzka a žiadne zvyšky okrem veľmi malého množstva použitého katalyzátora (po niekoľkých rokoch), ktorý sa môže tiež recyklovať. Pri nízkych prevádzkových teplotách (pod 200 °C) sa nevyžadujú bezpečnostné opatrenia. Pri vyšších prevádzkových teplotách sa odporúča bezpečnostný bypass, aby sa katalyzátor ochránil pred potenciálnym zničením spôsobeným teplotnými výkyvmi. Takéto prekročenia teploty boli pozorované v ojedinelých prípadoch v dôsledku emisií VOC a CO z pece počas rozrušených podmienok spaľovania.



Obrázok 15: Schéma zapojenia De-Diox reaktora

2.5. Koncové oxidačné zariadenia na čistenie odpadových plynov (zariadenia na rekuperáciu a regeneráciu)

V prípadoch, keď náhrada organického rozpúšťadla v používanom prípravku alebo zníženie jeho obsahu nie sú možné, vykonané opatrenia nepriniesli očakávaný výsledok, na zníženie emisií VOC sa môžu použiť aj rôzne techniky tzv. koncového odľučovania VOC. Najbežnejšie používané sú techniky v nižšie uvádzaných podkapitolách, ktorých porovnanie je znázornené na obr. 16.



Obrázok 16: Porovnanie charakteristík koncových zariadení na čistenie odpadových plynov (zdroj: Odlučovacie zariadenia VOC_ELVAČ KOTECHNIKA, a. s., Ostrava – Vítkovice, Česká republika)

2.5.1. Rekuperatívna termická oxidácia

Pri rekuperatívnej termickej oxidácii sú odpadové plyny s obsahom VOC čistené priamym spaľovaním (oxidáciou) organických látok obsiahnutých v odpadovom plyne.

Funkčný princíp: ide o pomerne jednoduchý systém pozostávajúci z:

- centrálnej ocelevej spaľovacej komory s plynovým horákom,
- integrovaného spalinového výmenníka tepla so zväzkom trubiek usporiadaných do kruhu,
- ventilátora na transport čisteného odpadového plynu.

Čistený odpadový plyn najskôr prechádza integrovaným výmenníkom tepla, kde sa predhreje. Z výmenníka vstupuje do spaľovacej komory s plynovým horákom, v ktorom sa odpadový plyn nahreje na reakčnú (prevádzkovú) teplotu, obvykle medzi 700 – 800°C. Veľkosť komory je dimenzovaná tak, aby bola doba zdržania čisteného plynu na reakčnú teplotu po dobu minimálne jednej sekundy. V komore dochádza k spáleniu VOC, vzniká CO₂ a H₂O a uvoľňuje sa reakčné teplo. Toto teplo je následne v integrovanom výmenníku odovzdané privádzanému znečistenému odpadovému plynu. Táto technológia dosahuje bežne účinnosť čistenia nad 95 %. Hranica autotermného procesu, keď zariadenie už nepotrebuje dodávku externej tepelnej energie (nábehový a stabilizačný horák na zemný plyn) a je úplne sebestačné, sa pohybuje na úrovni cca 3 g_{TOC}/m³.

Typická oblasť použitia: toto zariadenie je vhodné na čistenie plynu so stredným a vyšším obsahom VOC, cca 3 – 10 g/m³. Z hľadiska objemu čisteného odpadového plynu ide o jednotky schopné čistiť až desiatky tisíc m³/h odpadového plynu. Typickými zdrojmi znečisťovania ovzdušia, kde tieto zariadenia nachádzajú uplatnenie, sú chemický priemysel, povrchové úpravy materiálov a výrobníkov.

Výhody použitia: robustnosť zariadenia a spoľahlivosť prevádzkovania, vysoká flexibilita zariadenia z hľadiska koncentrácií VOC, efektívne využitie odpadového tepla, nízke prevádzkové náklady pri používaní zariadenia nad hranicou autotermného prevádzkovania.

2.5.2. Regeneratívna termická oxidácia

Pri regeneratívnej termickej oxidácii sú odpadové plyny s obsahom VOC čistené priamym spaľovaním (oxidáciou) organických látok obsiahnutých v odpadovom plyne a uvoľnené teplo sa používa na predohrev privádzaného odpadového plynu určeného na čistenie.

Funkčný princíp: zariadenie na regeneratívnu termickú oxidáciu obvykle pozostáva z:

- troch komôr (možný počet 2 až 5),
- prepojovacích kanálov s armatúrami,
- ventilátorov na transport čisteného a vyčisteného odpadového plynu.

Komory sú vyplnené keramickým lôžkom, ktoré je tvorené sypanou keramickou náplňou alebo voštinovými (komôrkovými, bunkovými) monolitmi, ktoré fungujú ako integrovaný výmenný tepelný systém. V hornej časti je spaľovací priestor s plynovým horákom, s ktorým sú komory prepojené.

Tento systém pracuje na princípe periodického prepínania prúdenia čisteného vzduchu medzi všetkými reaktorovými komorami. Jedna z nich je vždy vo fáze odovzdávania tepla (predhrievanie vstupujúceho odpadového plynu, ktorý je čistený), druhá vo fáze akumulovania tepla vyprodukovaného plynovým horákom a uvoľneného oxidáciou VOC a tretia komora je vyplachovaná vyčisteným vzduchom (obr. 17).

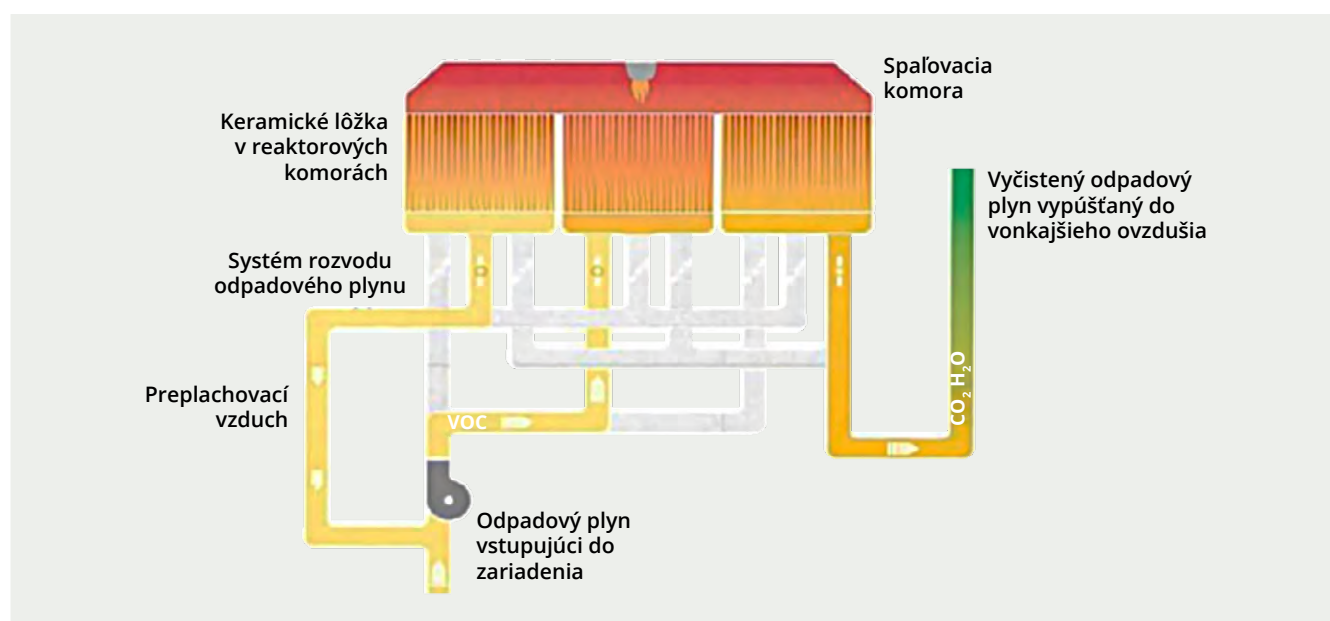
Odovzdávanie tepla dosahuje účinnosť cca 96 %, takže znečistený odpadový plyn vstupujúci do spaľovacieho priestoru má takmer prevádzkovú teplotu zariadenia a prídavným horákom (zvyčajne

na zemný plyn) je iba dohrievaný na spaľovaciu teplotu 750 – 850 °C. Za týchto podmienok sú prítomné VOC, prípadne CO zo spaľovania zemného plynu, oxidované na CO₂ a H₂O za súčasného uvoľňovania reakčného tepla.

Táto technológia dosahuje bežne účinnosť čistenia nad 95 %. Hranica autotermného procesu, keď zariadenie už nepotrebuje dodávku externej tepelnej energie a je úplne sebestačné, sa pohybuje na úrovni cca 1,5 g_{TOC}/m³.

Typická oblasť použitia: tieto zariadenia sú vhodné na čistenie vzduchu so stredným obsahom VOC, cca 2 – 5 g/m³. Z hľadiska objemu čisteného vzduchu ide o jednotky schopné čistiť desiatky tisíc m³/h odpadového plynu. Typickými zdrojmi znečisťovania ovzdušia, kde tieto zariadenia nachádzajú uplatnenie, sú chemický priemysel, povrchové úpravy materiálov a výrobkov, tlačiarne a farmaceutický priemysel.

Výhody použitia: nízke prevádzkové náklady priameho spaľovania v oblasti optimálneho použitia, prijateľná nákupná cena, robustnosť zariadenia a spoľahlivosť prevádzky, flexibilita zariadenia z hľadiska premenlivej koncentrácie VOC.



Obrázok 17: Zariadenie na regeneratívnu termickú oxidáciu (zdroj: *Odlučovacie zariadenia VOC_ELVAC KO-TECHNIKA, a. s., Ostrava – Vítkovice, Česká republika*)

2.5.3. Rekuperatívna katalytická oxidácia

Pri rekuperatívnej katalytickej oxidácii sú odpadové plyny s obsahom VOC čistené spaľovaním (oxidáciou) organických látok obsiahnutých v odpadovom plyne na katalyzátore.

Funkčný princíp: ide o jednoduchý systém pozostávajúci z:

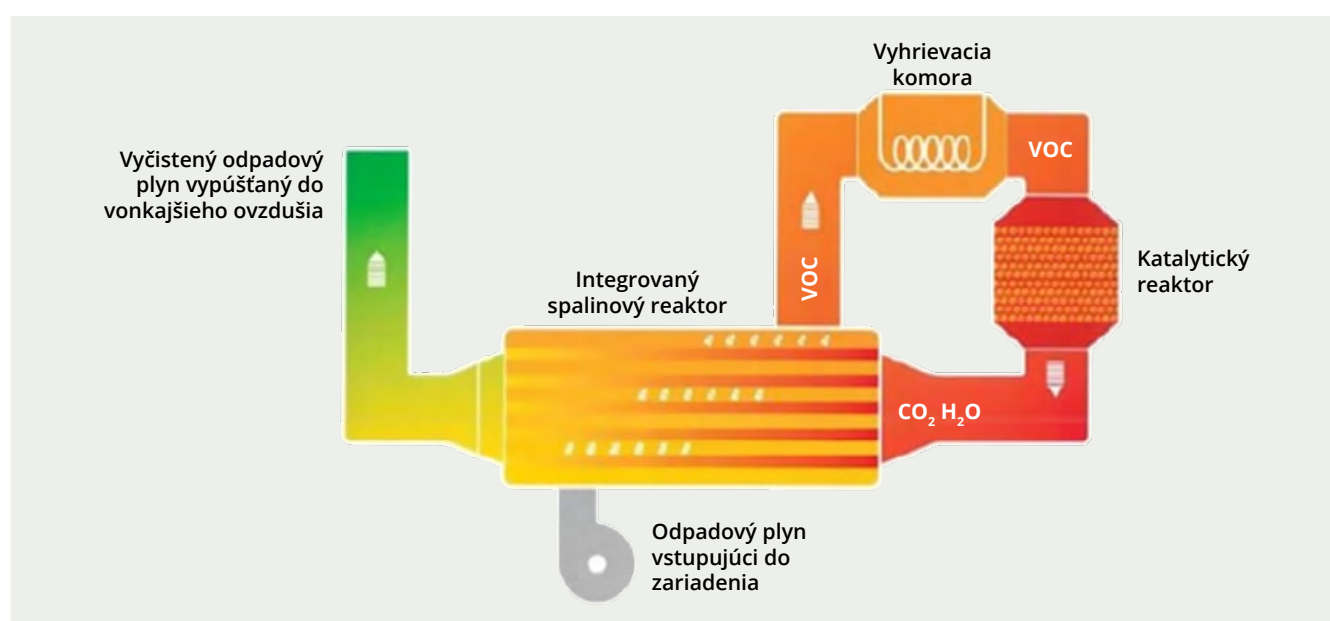
- katalytického reaktora s uloženou katalytickou vrstvou (granulovaná náplň alebo voštinové monolity),
- predradeného spalínového výmenníka tepla vykurovacích komôr (ohrievačov),
- ventilátora na transport čisteného odpadového plynu.

Typická oblasť použitia: technológia je vhodná na čistenie plynu so stredným a vyšším obsahom VOC, cca 2 – 6 g/m³. Z hľadiska objemu čisteného odpadového plynu ide o jednotky až desiatky tisíc

m³/h. Typickými zdrojmi znečisťovania ovzdušia, kde tieto zariadenia nachádzajú uplatnenie, sú tlačiarne, chemický priemysel, farmaceutický priemysel, povrchové úpravy materiálov a výrobkov.

Výhody použitia: relatívne nízka nákupná cena vzhľadom na objem čisteného odpadového plynu, robustnosť zariadenia a spoľahlivosť prevádzky, vysoká flexibilita zariadenia z hľadiska koncentrácií aj prítokov vzduchu, veľmi nízke prevádzkové náklady pri používaní zariadenia nad hranicou automatického prevádzkovania.

Čistený vzduch či iný procesný plyn najskôr prechádza výmenníkom tepla, kde sa ohreje. Za výmenníkom nasleduje vyhrievacia komora (s elektrickými vyhrievacími telesami, prípadne s plynovým horákom), v ktorej sa vzduch, ak je to potrebné, nahreje na prevádzkovú teplotu katalytickej reakcie, zvyčajne nad 300 °C. Prechodom cez katalytické lôžka v reaktore sú VOC v odpadovom plyne oxidované na CO₂ a H₂O. Výhodou je, že katalytická oxidácia prebieha pri nízkych teplotách, pri ktorých sa netvoria oxidy dusíka. Pri katalytických reakciách sa uvoľní teplo, ktoré je následne vo výmenníku odovzdané prichádzajúcemu znečistenému odpadovému plynu (obr. 18).



Obrázok 18: Zariadenie na rekuperatívnu katalytickú oxidáciu (zdroj: *Odlučovacie zariadenia VOC_ELVAC KO-TECHNIKA, a. s., Ostrava – Vítkovice, Česká republika*)

Toto zariadenie dosahuje bežne účinnosť vyše 95 %, v prípade potreby sa dá úpravami dosiahnuť aj vyššia účinnosť. Hranica autotermného procesu, keď zariadenie už nepotrebuje dodávku externej tepelnej energie a je úplne sebestačné, sa pohybuje na úrovni cca 2 g_{VOC}/m³.

2.5.4. Regeneratívna katalytická oxidácia

Pri regeneratívnej katalytickej oxidácii sú odpadové plyny s obsahom VOC čistené oxidáciou organických látok obsiahnutých v odpadovom plyne na katalyzátore.

Funkčný princíp: zariadenie na regeneratívnu katalytickú oxidáciu pozostáva z:

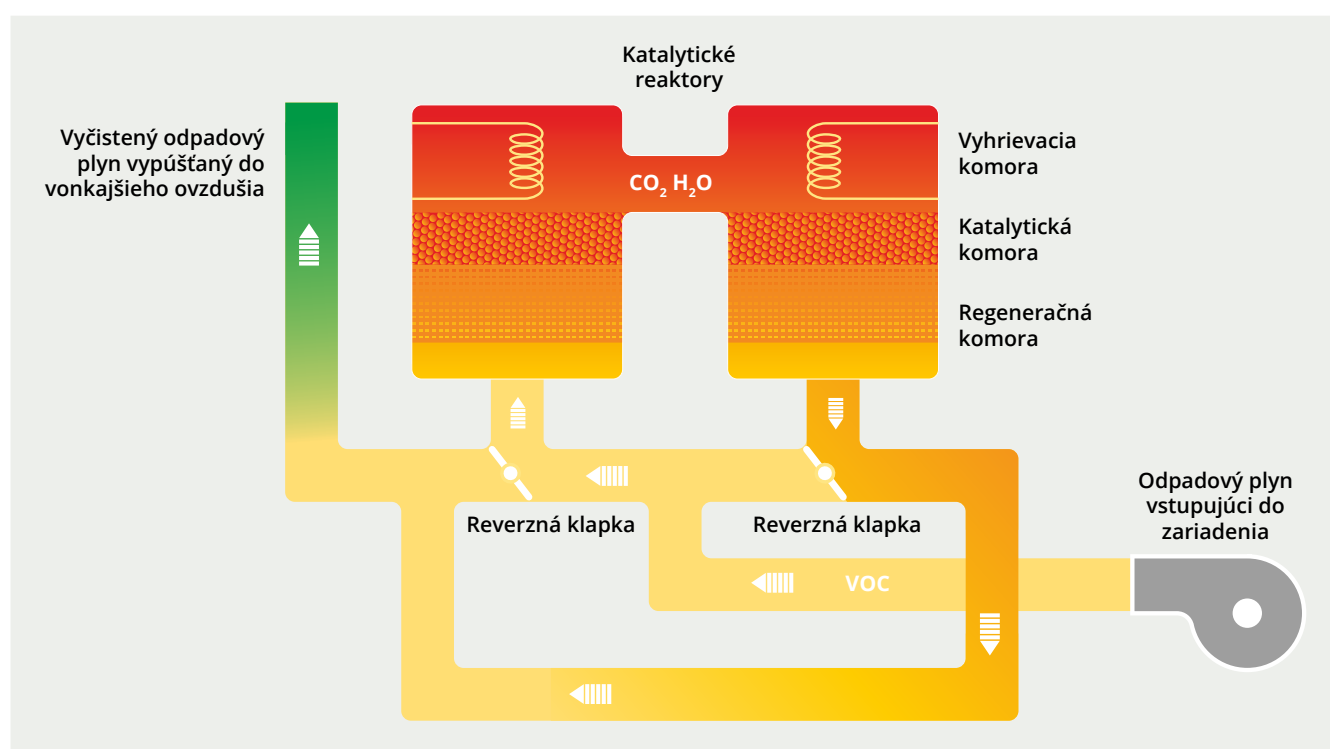
- dvoch reaktorov (komôr),
- expanznej časti na vyrovnanie koncentračných výchyliet v systéme,
- ventilátorov na transport čisteného a vyčisteného odpadového plynu.

Typická oblasť používania: technológia je vhodná na čistenie plynov s nízkym a so stredným obsahom VOC, cca 0,3 – 3,0 g/m³. Z hľadiska objemu čisteného odpadového plynu ide o jednotky

až desiatky tisíc m³/h. Typickými zdrojmi znečisťovania ovzdušia, kde tieto zariadenia nachádzajú uplatnenie, sú tlačiarne, chemický priemysel, farmaceutický priemysel, povrchové úpravy materiálov a výrobkov, laminovanie, odmasťovanie a čistenie povrchov.

Výhody použitia: najnižšie prevádzkové náklady priameho spaľovania, robustnosť zariadenia a spoľahlivosť prevádzkovania pri vysokej účinnosti oxidácie, flexibilita zariadenia z hľadiska koncentrácií VOC aj prietokov vzduchu, prijateľná nákupná cena.

Táto technológia dosahuje bežne účinnosť čistenia vyše 95 %. Hranica autotermného procesu, keď zariadenie už nepotrebuje dodávku externej tepelnej energie (zvyčajne elektrickej) a je úplne sebestačné, sa pohybuje na úrovni cca 0,55 g_{TOC}/m³. Zariadenie je možné odstaviť bez potreby jeho vychladnutia. Po odstávke, netrvajúcej viac ako približne jednu pracovnú zmenu, sa môže jednotka okamžite naštartovať do režimu katalytického spaľovania bez nároku na jej vyhriatie na prevádzkovú teplotu. Naakumulované teplo je dostatočné na naštartovanie katalytickej reakcie (obr. 19).



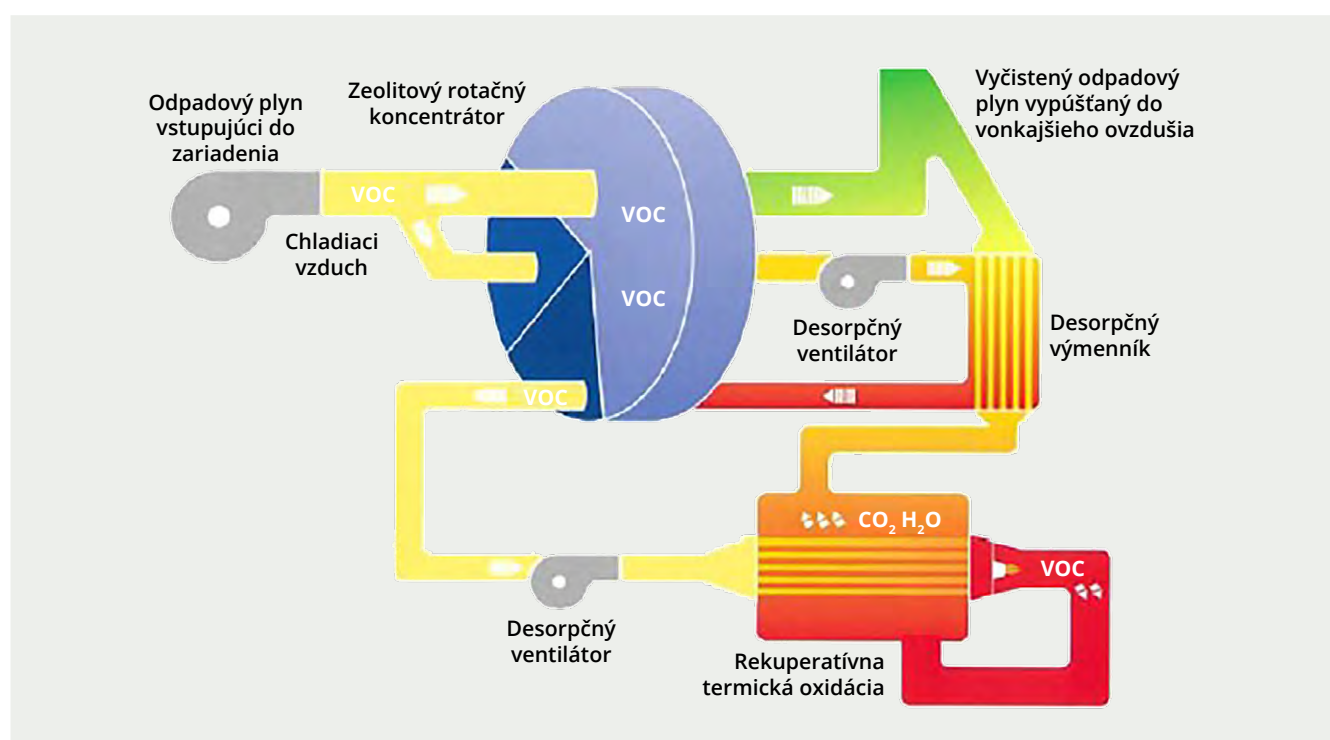
Obrázok 19: Zariadenie na regeneratívnu katalytickú oxidáciu (zdroj: *Odlučovacie zariadenia VOC_ELVAC KO-TECHNIKA, a. s., Ostrava – Vítkovice, Česká republika*)

V dolnej časti oboch reaktorov (generačná komora) sa nachádza keramická výplň (Raschigove krúžky, keramické voštiny). Nad keramickou výplňou je katalytická komora s vrstvou katalyzátora (granulovaná náplň alebo voštinové monolity). V hornej časti, kde sú reaktory prepojené spojovacím článkom, sú vykurovacie komory s elektrickými vykurovacími telesami, prípadne horákmi na zemný plyn alebo LPG. Tento systém pracuje na princípe periodického prepínania smeru prúdenia čisteného odpadového plynu medzi oboma reaktormi (komorami). Znečistený vzduch najprv prechádza ohriatou keramickou výplňou prvého reaktora, kde sa nahreje na prevádzkovú teplotu katalytickej reakcie. Prechodom cez katalytické lôžko prvého aj druhého reaktora sú VOC v čistenom odpadovom plyne oxidované na CO₂ a H₂O, pričom sa uvoľní reakčné teplo. Toto teplo je s účinnosťou cca 96 % následne akumulované v keramickej náplni druhého reaktora. V jednom smere prúdenia keramická náplň prvého reaktora chladne, v druhom reaktore sa nahrieva. Preto je generátor doby reverzného smeru prúdenia periodicky prepínaný.

2.5.5. Zeolitový rotačný koncentrátor

Účelom zeolitového rotačného koncentrátoru je skoncentrovanie prchavých organických látok (VOC) zastúpených v nízkych koncentráciách vo veľkých objemoch odpadového plynu do malého objemu vzduchu s vysokým obsahom VOC.

Funkčný princíp: veľké objemy znečisteného vzduchu prechádzajú otáčajúcim sa adsorpčným diskom (rotorom). Disk je rozdelený na tri časti: adsorpčná zóna (najväčšia plocha, cca 80 %), chladiaca zóna a desorpčná zóna. V adsorpčnej časti sú VOC adsorbované na vrstve zeolitu (syntetický hlinito-kremičitanový keramický adsorbent) nanesej na lamelách z minerálnych vlákien alebo sú zachytávané v aktívnom uhlí. Vyčistený odpadový plyn zbavený VOC odchádza do vonkajšej atmosféry. Účinnosť záchytu VOC je zvyčajne cca 95 %. Časť čisteného odpadového plynu je z hlavného prúdu oddelená a využitá najskôr ako chladiaci vzduch na ochladzovanie zeolitej výplne pred jej opätovným použitím (chladiaca časť disku) a potom po prechode desorpčným výmeníkom ako desorpčný vzduch po vytesnení VOC z vrstvy zeolitu (desorpčná časť disku) (obr. 20).



Obrázok 20: Zeolitový rotačný koncentrátor (zdroj: *Odlučovacie zariadenia VOC_EL VAC KOTECHNIKA, a. s., Ostrava – Vítkovice, Česká republika*)

Tento vzduch s vysokou koncentráciou VOC (jednotky g/m^3) je odvádzaný priamo do jednotky termickej, prípadne katalytickej oxidácie. Teplo, ktoré v tejto jednotke vzniká (z plynového horáka aj spálením VOC), je čiastočne využité na predhriatie vstupujúceho odpadového plynu a v následnom desorpčnom výmeníku na nahriatie desorpčného vzduchu.

Typická oblasť použitia: toto zariadenie je vhodné pre nízke koncentrácie VOC ($50 - 500 \text{ mg}/\text{m}^3$) a veľké objemy čisteného vzduchu na úrovni desiatok až stoviek tisíc m^3/h . Obmedzujúcimi parametrami sú vysoká vlhkosť vstupujúceho vzduchu a obsah TZL. Tieto problémy sa musia vyriešiť pred privedením odpadového plynu do tejto jednotky. Typickými zdrojmi znečisťovania ovzdušia, kde tieto zariadenia nachádzajú uplatnenie, sú tlačiarne, chemický priemysel, povrchové úpravy materiálov a výrobkov, laminovanie.

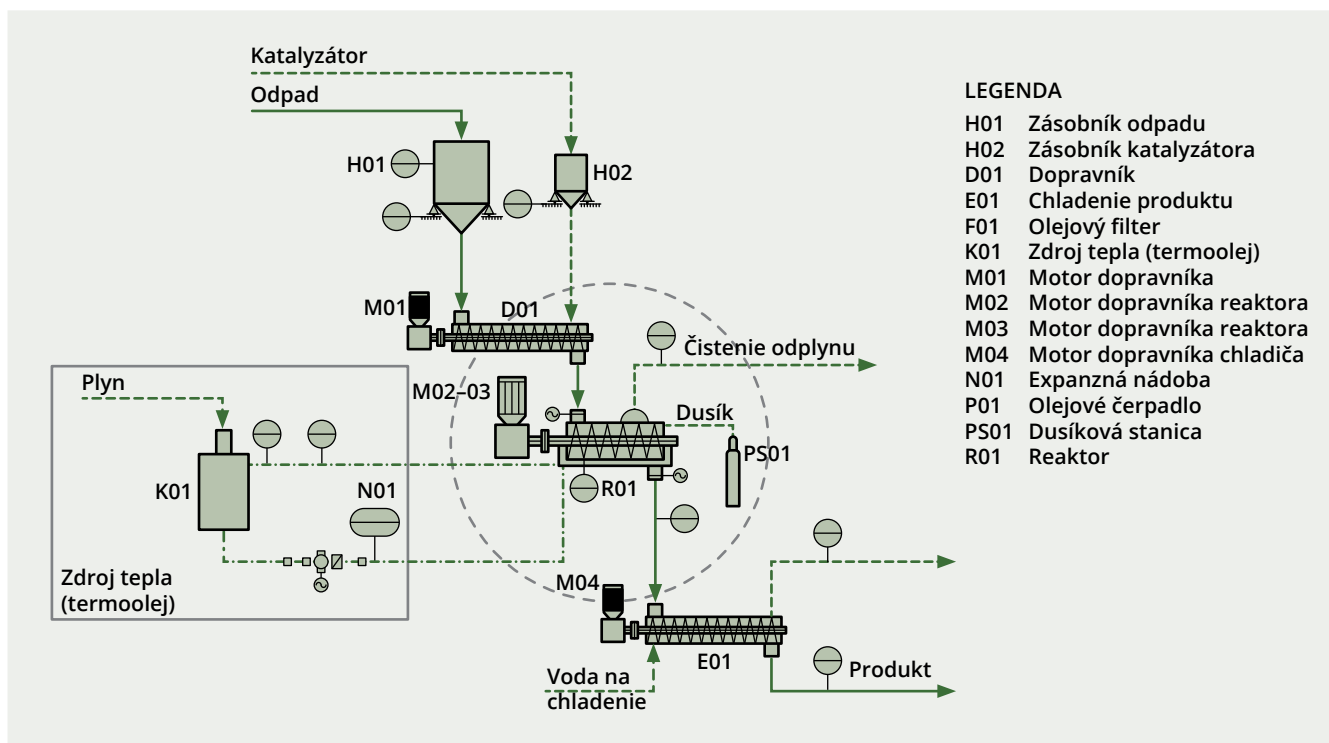
Výhody použitia: nízka nákupná cena vzhľadom na objem vyčisteného odpadového plynu, najnižšie prevádzkové náklady v oblasti typického používania, flexibilita zariadenia z hľadiska koncentrácií aj prítokov odpadového plynu, požiarne bezpečnosť (v porovnaní s aktívnym uhlím) a dlhá životnosť adsorpčného materiálu.

2.5.6. Nové techniky

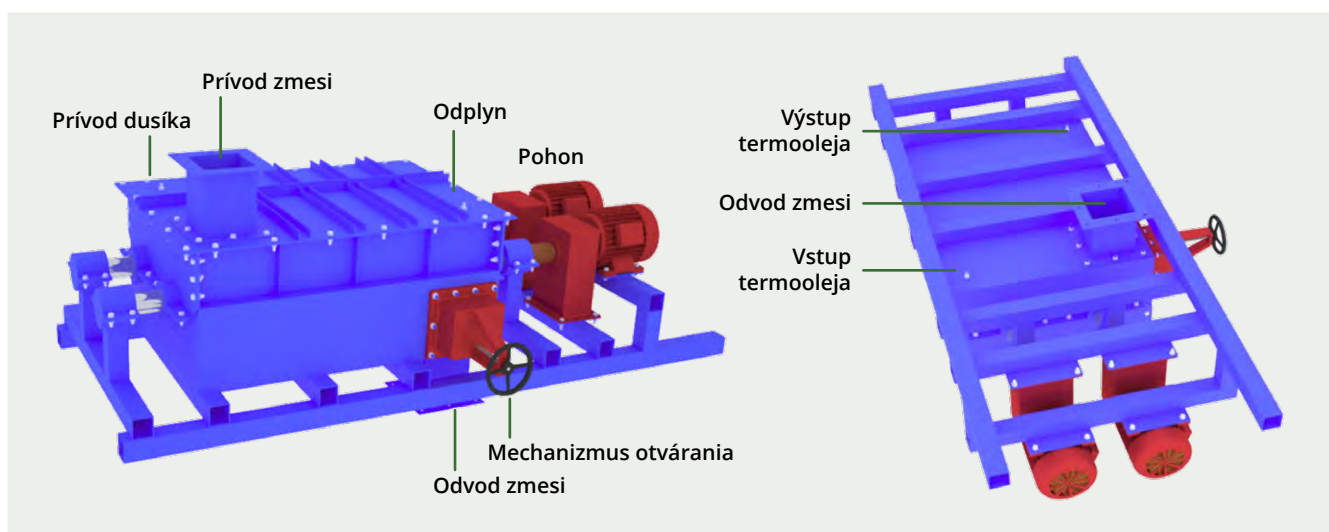
TECHNOLÓGIA CMD

Technológia CMD (Copper Mediated Destruction) (Ústav chemických procesov AV ČR, Praha) je česká patentovaná technológia, určená na zníženie obsahu dioxínov v popolčeku zo spaľovni. Technológiu možno nájsť pod patentom CZ 294995 B6. Technológia CMD využíva katalytickú reakciu, pri ktorej dochádza k dechlorácii všetkých perzistentných organických látok. Výsledkom procesu sú netoxické produkty, ktoré sa môžu ďalej využiť pri výrobe stavebného materiálu. CMD je určený na spracovanie popolčeka napr. z elektrofiltra a z rukávových filtrov technológiou REMEDIA. Chemický rozklad je založený na princípe reakcie halogénovej aromatickej látky s meďou v kovovej forme alebo vo forme zlúčeniny medi, donoru vodíka, uhlíka a aspoň jednej látky, ktorá je schopná redukovať meďnaté a medené ióny na elementárnu meď. Celá reakcia prebieha pri teplote 300 °C v uzavretom systéme v inertnej atmosfére. Bez pridania medi a inertnej atmosféry by detoxikácia neprebehla a popolček by mohol vykazovať ešte vyššiu toxicitu ako pred dehalogenáciou. Pri tejto technológii sa dosahuje veľmi vysoká účinnosť, za optimálnych podmienok až 99,9 %.

Na obr. 21 je znázornená spracovateľská linka (v krúžku je vyznačené separačné technologické zariadenie). Zariadenie je určené na spracovania popolčeka z elektrofiltrov a z rukávových filtrov. Popolček zo spaľovne vstupuje do procesu spracovania ako odpad a je uskladnený v zásobníku H01. Popolček je dávkovaný do skrutkového dopravníka M01, kde sa na konci zmieša s katalyzátorom zo zásobníka H02. Zmes sa nasype do reaktora R01, kde je zmes pomaly ohrievaná na teplotu 320 °C. Objem zmesi v reaktore je 0,250 m³, čo je približne 68 kg. Spracovávaná zmes je neustále premiešavaná, aby dochádzalo k rovnomernému ohrevu a dokonalému premiešaniu zmesi. Na úplný priebeh dechlorácie je potrebné zdržanie 2 hodín pri pracovnej teplote 320 °C. Do reaktora je privádzaný inertný plyn (dusík) z PS01, ktorý zabezpečí inertnú atmosféru. K ohrevu sa používa termoolej z ohrievača K01, ktorý je privedený do ohrievacieho labyrintu reaktora. Prebytočný plyn, ktorý je pri reakcii uvoľňovaný, je odvádzaný do jednotky čistenia odplynu. Po skončení dechlorácie je zmes nasypaná do chladiča E01, kde je ochladená a po vyprázdnení sa môže ďalej spracovávať, napríklad na výrobu stavebných materiálov.



Obrázok 21: Schéma okruhu spracovania popolčeka (zdroj: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7136)



Obrázok 22: Opis reaktora pre technológiu CMD (zdroj: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7136)

Na obr. 22 sú detaily opisu reaktora pre technológiu CMD. Zmes popolčeka s katalyzátorom je privádzaná otvorom v hornej časti reaktora. Odvod spracovaného popolčeka sa nachádza v dolnej časti a je ovládaný otváracím mechanizmom. Pohon skrutkovic je riešený dvoma elektromotormi. Na vrchnej doske reaktora sú ventily na prívod dusíka a odplynenie. V spodnej časti sa nachádza prívod a odvod termooleja.

Pre technológiu CMD bolo navrhnuté technologické zariadenie, ktoré musí spĺňať podmienky ohrevu, dôkladného miešania, dostatočne rýchleho vyprázdňovania, zabezpečenie inertnej atmosféry a ľahkú údržbu, aby sa dal ľahko rozoberať. Hlavnou časťou navrhovaného reaktora sú dve skrut-

kovice s podávacími lopatkami, ktoré sú poháňané dvoma elektromotormi s prevodovkami. Týmito lopatkami je zabezpečené dokonalé premiešanie zmesi popolčeka a katalyzátora. Vyprázdňovanie reaktora je na dne pod jednou z podávacích lopatiek.

2.5.7. Sekundárne techniky znižovania NO_x v odpadových plynoch

Sekundárnymi postupmi je možné znížiť obsah oxidov dusíka prídavkom dusíkatých reagensí (čpavok, močovina), ktoré reagujú s NO_x za vzniku N₂ a vody. Najčastejšie používané metódy sú selektívna katalytická redukcia (SCR) a selektívna nekatalytická redukcia (SNCR). Majoritnými produktmi obidvoch metód sú N₂ a vodná para (H₂O).

Obidve metódy boli po prvýkrát inštalované v 70. rokoch minulého storočia v Japonsku a neskôr sa rozšírili do USA a Európy. Viac ako 90 % technológií bolo inštalovaných po roku 1986, pričom metóda SCR je asi dvojnásobne viac využívaná ako SNCR. Porovnanie obidvoch metód je uvedené v tab. 5.

Tabuľka 5: Porovnanie metód SCR a SNCR na odľučovanie NO_x

Parameter	SCR	SNCR
Účinnosť odstránenia NO _x (%)	70 – 90	30 – 80
Pracovná teplota (°C)	200 – 500	800 – 1 100
Molárny pomer NH ₃ : NO _x	0,4 – 1,0	0,8 – 2,5
Straty NH ₃ (ppm)	< 5	5 – 20
Kapitálové náklady	vysoké	nízke
Prevádzkové náklady	primerané	primerané

Pri SCR reagujú NO_x za prítomnosti katalyzátora s NH₃. Niekedy sa používa na redukciu aj močovina a rôzne uhľovodíky. Pri akomkoľvek použitom katalyzátore je dôležité zachovať správnu prevádzkovú teplotu, zvyčajne 200 – 500 °C (optimum 300 – 450 °C). Životnosť katalyzátora závisí od mnohých faktorov, hlavne od zloženia spalín a konštrukcie zariadenia.

Najbežnejšími katalyzátormi sú oxidy vanádu a titánu (zvyčajne TiO₂ a V₂O₅) na kovovej alebo keramickej podložke. V menšej miere sa používa aj WO₃. Taktiež sa môžu použiť zeolitové molekulárne sitá, na ktorých prebiehajú reakcie v mikropóroch ich mriežky pri 350 – 600 °C. Zeolity možno modifikovať prídavkom kovov Pt alebo Pd do štruktúry. Ako katalyzátory sa tiež používajú oxidy kovov, napr. Al₂O₃. S katalyzátormi na báze Pt alebo Rh možno pracovať pri teplotách 170 – 300 °C. Ich použitie je výhodné z hľadiska ich vysokej redukčnej aktivity a zvýšenej odolnosti voči pôsobeniu SO₂ v porovnaní s oxidmi kovov.

Metódou SCR sa dosiahne zníženie NO_x o 75 – 90 %. Teoreticky sa účinnosť redukcie NO_x zvyšuje s pomerom NH₃ : NO_x. Zvyčajne sa tento pomer udržiava pod hodnotou 1,1 : 1, aby sa minimalizoval únik čpavku. Reakcie NO_x s NH₃ normálne prebiehajú pri cca 950 °C, ale prítomnosť katalyzátora znižuje teplotu absorbovaním NH₃, ktorý reaguje s NO_x z plynnej fázy. Potenciálny problém pri použití metódy SCR predstavuje nezreagovaný NH₃. Koncentrácia nezreagovaného a do ovzdušia unikajúceho NH₃ je zvyčajne 0,5 – 2 ppm a nepredstavuje vážne environmentálne riziká. Pri použití vzácnych kovov ako katalyzátorov môže pri vysokých teplotách v dôsledku oxidácie NH₃ vznikáť nežiaduci N₂O, ktorého emisie možno znížiť reguláciou teploty procesu. Problémom SCR môže byť aj vznik SO₃ a jeho následná reakcia s NH₃ na hydrogénsíran amónny (NH₄HSO₄), hlavne pri palivách s vysokým obsahom síry. NH₄HSO₄ môže „otráviť“ katalyzátor a spôsobiť koróziu zariadenia.

Ako katalytické jedy môžu pôsobiť aj niektoré TZL obsahujúce alkalické kovy, kovy alkalických zemín (MgO, CaO, Na₂O, K₂O) alebo ťažké kovy.

Pri selektívnej nekatalytickej redukcii (SNCR) sa oxidy dusíka v spalinách redukujú na dusík reakciou s redukčným činidlom, ktoré sa dávkuje do prúdu odpadového plynu. Ako redukčné činidlá sa používajú zlúčeniny obsahujúce aminoskupiny, ako sú čpavok, močovina alebo kyselina kyanúrová. Tieto zlúčeniny redukujú NO_x na molekulárny dusík (N₂) a vodnú paru (H₂O). Chemické reakcie sú rovnaké ako pri postupe SCR, ale prebiehajú pri vysokej teplote bez prítomnosti katalyzátora. Prevádzková teplota je v rozmedzí 800 – 1 000 °C, najúčinnnejšia je pri 950 °C. Účinnosť procesu závisí najmä od týchto faktorov:

- teplota,
- počiatočná koncentrácia NO_x,
- rovnomerné zmiešanie reakčnej látky a spalín,
- pomer čpavku k NO_x,
- reakčná doba (1 až 2 sekundy).

Dôležité je hlavne zabezpečiť optimálny teplotný rozsah a rovnomerné rozdelenie redukčného činidla v spalinách. Pre dosiahnutie vhodnej teploty je kritické umiestnenie vstrekača čpavku. Teplotný rozsah požadovaný pre reakcie SNCR, často nazývaný aj „teplotné okno“, sa pohybuje približne medzi 850 – 1 100 °C. Tento rozsah možno znížiť prídavkom spáliteľnej prísady, napr. H₂, CO, uhľovodík. Ak však teploty klesnú pod požadovanú/optimálnu hodnotu, reakcia sa spomalí, klesne účinnosť konverzie NO_x a nezreagovaný NH₃ odchádza spolu s odpadovým plynom.

Ak teplota odpadového plynu prekročí 1 100 °C, vzniká ďalší nežiaduci NO v dôsledku oxidácie NH₃. Problémy pri použití metódy SNCR sú rovnaké ako pri SCR: straty NH₃, tvorba NH₄HSO₄ a N₂O. Tvorba NO je vyššia, ak sa namiesto NH₃ používa močovina alebo kyselina kyanúrová a to v dôsledku reakcie izokyanátu s NO_x.

2.5.8. Odlučovanie oxidu siričitého (SO₂)

Odlučovanie SO₂ (odsírovanie) sa týka hlavne zníženia emisií SO₂ z odpadových plynov (sekundárne metódy znižovania emisií v odpadovom plyne). Podstatou procesu je adsorpcia a reakcia SO₂ na pevných alkalických sorbentoch za vzniku pevných produktov, ktoré sa z prúdu odpadového plynu oddelia. Ako sorbenty sa používajú najmä vápno, NaHCO₃ a Na₂CO₃. Pomocou takýchto sorbentov možno zneškodňovať aj iné kyslé plyny, hlavne HCl a HF. Pri odsírovaní sa sorbent vstrekuje a rozptyľuje do prúdu odpadového plynu. Najčastejšie sa používa prietokový režim, pri ktorom sa sorbent neregeneruje, ale vo forme vedľajšieho produktu sa z procesu odvádza. Takto pracuje 85 – 90 % odsírovacích technológií vo svete. V súčasnosti sú známe tieto metódy:

Suchá metóda – jemný práškový sorbent sa vstrekuje do prúdu odpadového plynu. Výhodou tejto metódy je, že problém s nakladaním s odpadovými vodami odpadá.

Polosuchá metóda – sorbent sa pridáva vo forme roztoku alebo suspenzie tak, že sa kvapalina v priebehu reakcie neustále odparuje. Výsledkom je suchý vedľajší produkt, ktorý sa hromadí na dne komory alebo v zariadení na znižovanie obsahu TZL.

Mokrý spôsob – SO₂ sa odstraňuje z odpadového plynu v absorbéri priamym kontaktom s vodnou suspenziou jemne mletého CaCO₃. Vypraný odpadový plyn sa vypúšťa komínom do ovzdušia, reakčný produkt sa po odstránení z absorbéra odvodňuje a ďalej spracuje.

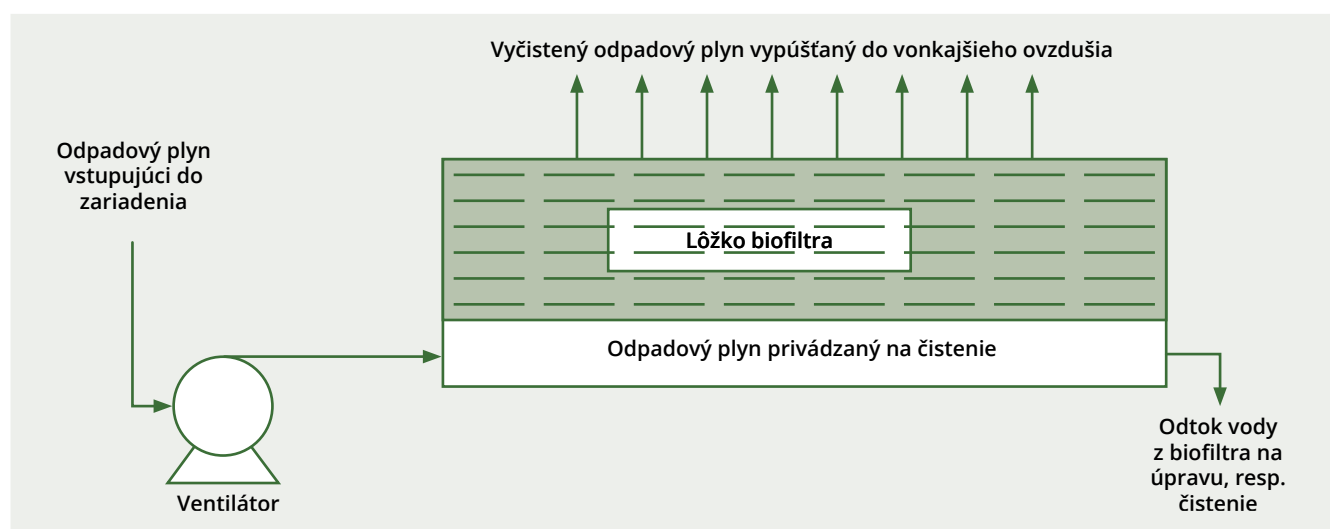
2.5.9. Zariadenia na odstraňovanie pachových látok

Ako koncové techniky na odstraňovanie pachových látok sa používajú adsorpcia s použitím aktívneho uhlia, zeolitu, oxidu hlinitého (na jedno použitie alebo s regeneráciou), suché chemické alebo biologické čistenie (biofiltre – rašelina, vres, drevná kôra, kompost), tepelné spracovanie – existujúca kotolňa, tepelná alebo katalytická oxidácia. Ako ďalšie techniky sa používajú chemikálie na úpravu zápachu, kondenzácia, plazmová technológia (ozón), katalytické železné filtre a UV. Rovnako ako v prípade uskladnenia je zvyčajne lacnejšie a efektívnejšie upravovať malé množstvá silne zapáchajúceho vzduchu než čistiť veľké množstvo menej zapáchajúceho vzduchu.

Biofiltrácia je čistenie vzduchu založené na využití mikroorganizmov na rozklad alebo biotransformáciu organických znečisťujúcich látok alebo pachových látok. Mikroorganizmy (nižšie huby, baktérie, kvasinky) využívajú organické látky väčšinou ako zdroj energie na svoj rast a rozmnožovanie.

Funkčný princíp: princíp biologického rozkladu plyných látok spočíva v tom, že molekuly VOC sa sorbujú na povrchu biofilmu tvoreného mikroorganizmami ukotvenými na pevných časticách náplne, ktoré tak predstavujú biofilter.

Biofiltrácia je niekoľkostupňový proces. Prvým krokom je rozpustenie molekúl znečisťujúcich látok vo vode, nasleduje transport molekuly biofilmom k bakteriálnej bunke a transport molekuly cez bunkovú membránu do baktérie. Tam prebieha samotný metabolizmus a rozklad znečisťujúcich látok. Na elimináciu znečisťujúcich látok v plynnom stave sa využíva niekoľko biologických technológií. Princíp je pri všetkých rovnaký, odlišné sú len technické riešenia. Najznámejšie a najviac používané je čistenie vzduchu v biofiltroch s pevným lôžkom. Biofilter s pevným lôžkom je najjednoduchšia alternatíva z hľadiska technického riešenia aj investičných nákladov. Má však najnižšiu odbúravaciu kapacitu v jednotkovom objeme zariadenia. Schéma biofiltra s pevným lôžkom je na obrázku 23.



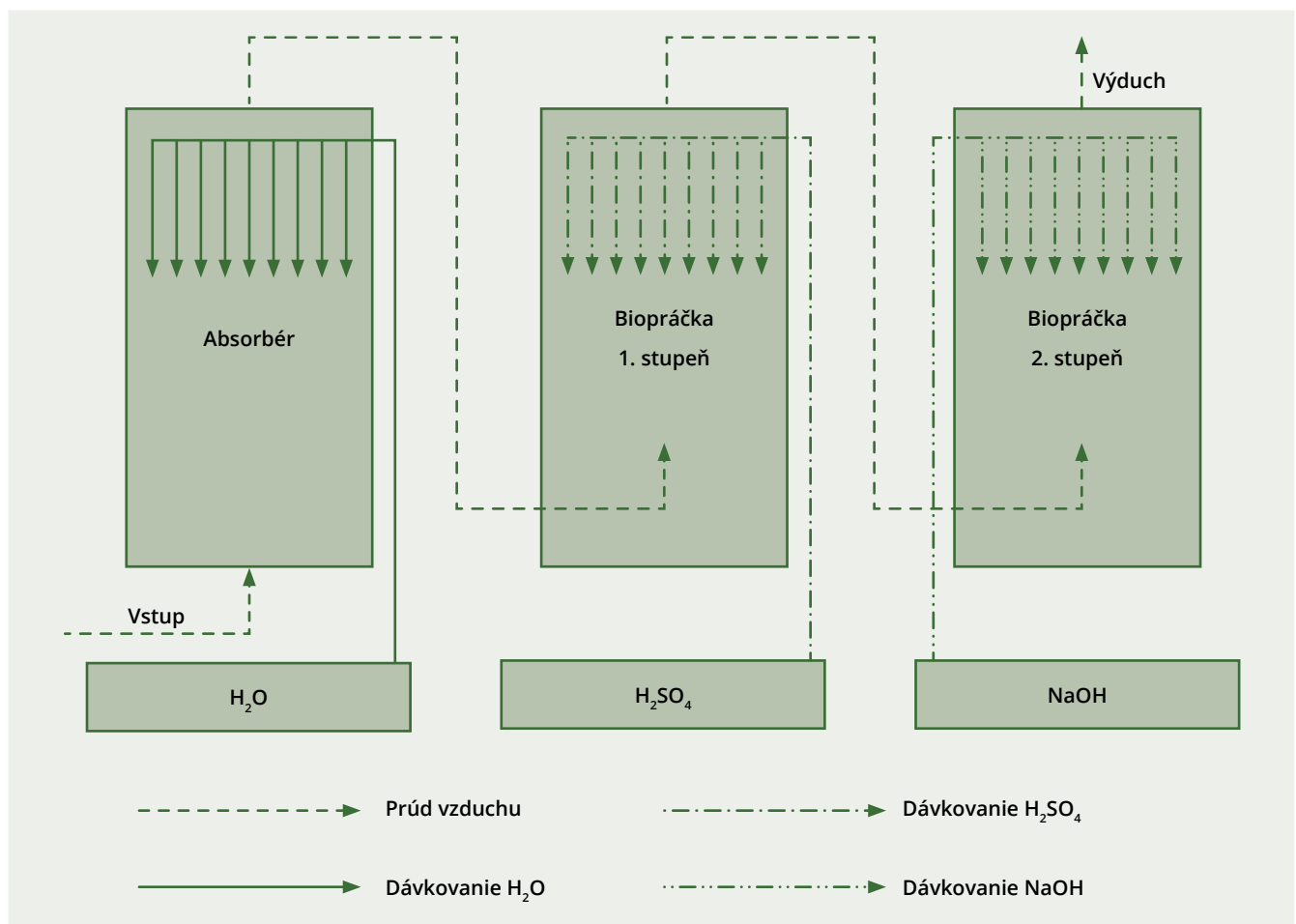
Obrázok 23: Technologická schéma biofiltrácie (zdroj: <https://www.slideshare.net/AshishkumarYadav3/biofilters-for-control-of-air-pollution>)

Ďalšími technickými alternatívami sú kropený biofilter a biovypieranie. Kropený biofilter sa využíva predovšetkým na elimináciu znečisťujúcich látok rozpustných vo vode. Biovypieranie je najvhodnejšie na odstraňovanie vo vode rozpustných znečisťujúcich látok, avšak s vyššími vstupnými koncentraciami, prípadne na odstraňovanie pevných častíc.

Typická oblasť použitia: biofiltrácia je veľmi vhodná pri výskyte jednej alebo dvoch VOC ľahko rozpustných vo vode v nízkej koncentrácii v odsávanom odpadovom plyne. Obyčajne sa nepoužíva pri odpadových plynách s veľkým množstvom rôznych druhov VOC (zmes VOCs). Pri vyššej koncentrácii znečisťujúcich látok (približne 1,5 až 2,0 g/m³) sú ekonomicky výhodnejšie oxidačné metódy (termická a/alebo katalytická oxidácia). Obmedzujúcimi parametrami sú nutnosť dotovania biofiltra odpadovým plynom aj v čase odstávok, prítomnosť biologických jedov a obsah TZL. Typickými zdrojmi znečisťovania ovzdušia, kde tieto zariadenia nachádzajú uplatnenie, sú laminátovne a farmaceutické prevádzky.

Výhodami použitia sú jednoduchá konštrukcia, vysoká efektivita pre selektívne VOC a pachové látky. Nevýhodami použitia sú: priestorová náročnosť, optimálna pracovná teplota biofiltra je 18 – 32 °C (preto je v lete potrebné jeho chladenie), teplota biofiltra by nemala na dlhší čas klesnúť pod 8 °C (v zimnom období je preto potrebné vyhrievanie), možnosť vysušenia lôžka biofiltra, ktorého opätovné zvlhčenie býva technicky aj ekonomicky náročné, optimálna vlhkosť lôžka dosahuje takmer úplné nasýtenie vodou (95 %), chýlostivosť náplne na kolísanie koncentrácie, intoxikáciu, prekyslenie alebo prítomnosť TZL, v prípade dlhšie trvajúcich prevádzkových odstávok je potrebné dotovanie biofiltra „živinami“ = VOC, prúd vzduchu môže dosahovať maximálnu rýchlosť 100 – 400 m³ za hodinu na m² filtračného povrchu.

Príkladom zariadenia na odstraňovanie pachových látok je biopráčka rakúskeho výrobcu ÖSKO a tepelný oxidizér (obr. 24).



Obrázok 24: Technologická schéma biopráčky rakúskeho výrobcu ÖSKO

Zariadenie so systémom prania vzduchu odstraňuje zápach odsávaného vzduchu z výroby pomocou aktívnych činidiel. Slúži ako záložná dezodorizácia vzduchu v prípade, že je odstavený hlavný systém oxidizéra. Systém biopráčky neodsáva pary z výrobných zariadení, ale iba vzduch. Pary kondenzujú v kondenzátoroch. Dezodorizačné zariadenie pracuje automaticky, vyžaduje obsluhu jednej osoby, ktorá kontroluje chod a stav nádrží, odkiaľ si systém dopĺňa potrebné chemikálie. Prevádzkový vzduch sa pomocou ventilátora odsáva zo zberného kanála cez absorbér a biopráčku až von do ovzdušia. V absorbéri odpadový vzduch prechádza cez vložkové absorbéry, kde sa očisťuje od pevných častíc pomocou striekajúcej vody na princípe protiprúdu. V 1. stupni biopráčky sa alkalické a neutrálne organické zložky odpadového vzduchu neutralizujú a biologicky rozkladajú, pričom sa súčasne absorbuje čpavok. V 2. stupni biopráčka neutralizuje kyslé a neutrálne zápachové látky, ktoré sa súčasne biologicky odbúravajú. Stanica nádrží pozostáva z dávkovača kyseliny sírovej, hydroxidu sodného, fosfátu podľa predpisu. Na dezodorizačnom zariadení sa vykonáva kontrolné meranie pH a teploty.

3. ZOZNAM LITERATÚRY

- BREF CWW 2016. Běžné čištění odpadních vod a odpadních plynů. Systémy managementu v chemickém průmyslu Dostupné na: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecistení/referencni-dokumenty-bref/2017/1/cww_10-6-_complete.pdf
- BREF LVOC 2017. Referenční dokument BAT Velkoobjemové organické chemikálie. Dostupné na: <https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecistení/referencni-dokumenty-bref/2017/1/>
- BREF WGC 2022. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Gas Management and Treatment Systems in the Chemical Sector, Final Draft (europa.eu)
- EIPPCB, Facts and Figures on the chemical industry in Europe, 2018
- Hartenstein H.U., Power B.B., Worcester R., Licata A. 2010: Modern Technologies to reduce emissions of Dioxins and Furans from Waste Incineration. Dostupné na: [PDF] [Modern technologies to reduce emissions of dioxins and furans from waste incineration \(silo.tips\)](#)
- Mačala J., Vanek M., Ďuricová A., Salva J., Carach V.: Ochrana ovzdušia (časť: Separácia tuhých častíc), TU vo Zvolene, 2018. ISBN 978-80-228-3139-0
- Michalková E., Kubovčík V., Lalík V., Máša B., Novikmec M., Schwarz M., Stašiov S., Svitok M.: Environmentálne vplyvy výroby II. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2013. 373s. ISBN 978-80-228-2596-2.
- Michalková E., Lalík V., Schwarz M.: Environmentálne vplyvy výroby I., 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2013. 325s. ISBN 978-80-228-2590-0.
- Mukherjee A., Debnath B., Ghosh S. K. 2016: A Review on Technologies of Removal of Dioxins and Furans from Incinerator Flue Gas. *Procedia Environmental Sciences* 35 (2016) 528 – 540. DOI: [10.1016/j.proenv.2016.07.037](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.037) Available online at www.sciencedirect.com ScienceDirect International Conference on Solid Waste Management, 5IconSWM 2015.
- Najlepšie dostupné techniky a možnosti obmedzovania prchavých organických látok – všeobecne pre všetky vymedzené zariadenia používajúce organické rozpúšťadlá. Dostupné na: <https://www.enviroportal.sk/uploads/files/ovzdušie/2020/>
- Plch M.: 3D Modelování technologické jednotky. Bakalárska práca. VÚT Brno, Fakulta strojnínho inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství. Dostupné na: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7136
- Safavi S.M., Richter Ch., Unnthorsson R. 2021. Dioxin and Furan Emissions from Gasification DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.95475> a) in Gasification (IntechOpen) Edited by Valter Silva
- Safavi, S.M., Richter Ch., Unnthorsson R.: Dioxin and Furan Emissions from Gasification. IntechOpen 2020. Dostupné na: DOI: [10.5772/intechopen.95475](https://doi.org/10.5772/intechopen.95475).
- SHMÚ 2022. Nová webová aplikácia Čo dnes dýcham? <https://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=1093>; <https://dnesdycham.popular.sk/zdroje-znecistovania-ovzdušia>.
- Schwarz M., Michalková E., Lalík V.: Environmentálne problémy v priemysle a ťažbe: vysokoškolská elektronická učebnica Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1. vyd. 2013. ISBN 978-80-228-2546-7.

STN EN 13725:2022. Ochrana ovzdušia. Stacionárne zdroje emisií. Stanovenie koncentrácie pachu a intenzity emisií pachu zo stacionárnych zdrojov dynamickou olfaktometriou.

STN EN 1420-1:2001. Vplyv organických materiálov na pitnú vodu. Stanovenie pachu a posudzovanie chuti vody v potrubných systémoch. Časť 1: Skúšobná metóda Definícia: organoleptická vlastnosť vnímateľná čuchovým orgánom pri vdychovaní určitých prchavých látok nosom (ISO 5492).

ISBN: 978-80-8213-113-3



Aktivita je realizovaná v rámci národného projektu
Zlepšovanie informovanosti a poskytovanie poradenstva v oblasti zlepšovania kvality životného prostredia na Slovensku.
Projekt je spolufinancovaný z Kohézneho fondu v rámci Operačného programu Kvalita životného prostredia.