

Nitrogén-oxid kibocsátás csökkentése (DeNox eljárások)

A nitrogén-oxidok elnevezés a különböző arányú nitrogén-oxigén vegyületek összefoglaló neve. Szűkebb értelemben a nitrogén-monoxid és a nitrogén-dioxid keverékét nevezik így, melyekre az NO_x jelölést alkalmazzák. Nitrogén-oxidok minden tüzelési folyamatban keletkeznek, közel azonos koncentrációban, hazai erőműveinkben az országos átlagos érték 1 g/kWh. Képződése három reakciómechanizmus alapján lehetséges: tüzelőanyag NO_x képződés; prompt (pillanatnyi) NO_x képződés; termikus NO_x képződés. Általában a termikus NO_x képződés a meghatározó.

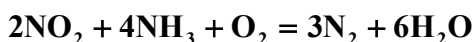
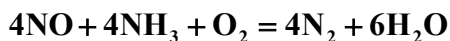
A tüzelés során keletkező nitrogén-oxidok mennyisége **primer** (elsődleges) intézkedésekkel - üzemviteli és tüzeléstechnikai módszerekkel - is csökkenthető, lényegében képződésük korlátozásával (kisebb láng hőmérséklet, nagyobb légfelesleg, füstgáz visszakeringtetés, az égéslevegő és/vagy a tüzelőanyag fokozatos adagolása, fluidizációs tüzelés). A primer eljárások gyakran nem alkalmazhatók vagy nem elég hatásosan csökkentik a nitrogén-oxidok koncentrációját, és így a **szekunder** (másodlagos) eljárásokat kell alkalmazni, vagyis a füstgázból kell a képződött nitrogén-oxidokat eltávolítani, mely az egyéb katalitikus, ill. nem katalitikus kémiai reakcióra példa.

A nitrogén-oxidok eltávolítására alkalmazott eljárások két nagy csoportba sorolhatók, melyek lehetnek:

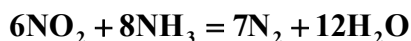
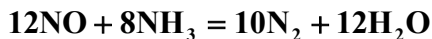
- **oxidációs eljárások és**
- **redukációs eljárások.**

Az oxidációs eljárások a nitrogén-oxidok oxidációját nagy oxigén tartalmú vegyületekkel valósítják meg, mint pl. peroxidokkal (pl. hidrogén-peroxid: H_2O_2 , nátrium-peroxid: Na_2O_2 stb., melyekben az oxigénatomok egymással kapcsolódnak, nagy oxigén tartalmú, könnyen bomló vegyületek, erélyes oxidálószer, mivel bomlásukkor naszcensz oxigén keletkezik), nátrium-hipoklorittal (NaClO , a kereskedelemben kapható vizes oldata a „hipó”, s fertőtlenítésre használják, mely tulajdonsága ugyancsak oxidációs hatásából adódik) vagy ózonnal, majd az oxidált gázt elnyeletik (abszorpció) pl. szóda oldattal (Na_2CO_3), miközben nátrium-nitrit vagy nátrium-nitrát képződik, vagy pedig ammónia (NH_3) vizes oldatával (szalmiákszesz), miközben ammónium-nitrát képződik. A nitrogén-oxidok oxidációja megvalósítható ammónia vizes oldatában is elektron besugárással (melyet Japánban dolgoztak ki), majd a kapott gázt elnyeletik és ammónium-nitrát képződik. Megjegyzés: Ammónia tartalmú vegyületként karbamid is alkalmazható ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$).

A **redukációs eljárások a nitrogén-oxidokat nitrogénre és vízre redukálják**, ammónia jelenlétében. Ez megvalósítható katalizátor alkalmazása nélkül és katalizátor alkalmazásával, az első eljárást **szelektív nem katalitikus redukálásnak** (az ún. **SNCR** vagy Selective Non Catalytic Reduction/Removal), a második eljárást **szelektív katalitikus redukálásnak** (**SCR** vagy Selective Catalytic Reduction/Removal) nevezik. Katalizátor alkalmazása nélkül a redukcióra értelem szerűen lényegesen nagyobb hőmérsékletet kell alkalmazni, mely általában 850-1100 °C (egyes utalások szerint az alsóhatár a reakciót gyorsító kémiai adalékokkal akár 600 °C-ra is csökkenthető), a katalizátoros eljárás fémkatalizátorral 250-400 °C, ill. aktív szén katalizátorral 80-120 °C hőmérséklet tartományban dolgozik, a katalizátortól függően. A katalitikus eljárás alapjait Japánban dolgozták ki, s ott is alkalmazták először (1978). Az erőművekben ma szinte kivétel nélkül a redukáló eljárásokat alkalmazzák, melyek során ammónia adagolással a következő kémiai reakciók mennek végbe:
oxigén jelenlétében:



ill. oxigén nélkül:



Lehetséges még a következő reakció is:



Előbbiekben a legkedvezőbb reakciókat írtuk fel, de a körülményektől függően mások is végbemehetnek.

A felírt kémiai reakciókból látható, hogy megvalósulásukhoz részben oxigén is szükséges (ami a nem tökéletes égés ill. a légfeslepleggel való tüzelés miatt mindig található a füstgázban), s ez gondot is okozhat. Ugyanis ha a füstgázban kén-dioxid is jelen van, ez szabad oxigén jelenlétében kén-trioxid keletkezéshez vezethet, ami kénsav kiválással járhat a berendezés hidegebb szerkezeti helyein vagy a kéményben. Mindkét redukáló eljárással alapvető követelmény, hogy a távozó füstgázban a nitrogén-oxid és a visszamaradó ammónia koncentrációja kisebb legyen a kibocsátási határértéknél (500 mg/m^3), minthogy az ammónia környezetszennyező anyag. Ezen eljárások előnye, hogy a reakció gázfázisban megy végbe, nem képződnek káros melléktermékek, hiszen a nitrogén-oxidok a levegő természetes komponenseire, nitrogénre és oxigénre redukálódnak.

Az ammónia szúrós szagú gáz, könnyezést és szemfájdalmat okoz, s kb. 0.7 mg/l felett keringési zavarokat idéz elő. A vízben jól oldódik, vizes oldata lúgos kémhatású (szalmiákszesz). A vízben oldott ammónia részben ammónium-hidroxid (NH_4OH), részben szabad ammónia formában van jelen. A szabad ammónia mérgező hatású, s az oldott oxigén tartalomtól függően halakra a mérgezési tartomány $0.2\text{-}2 \text{ mg/l}$. A vízben jelen lévő összes ammónia-ammóniumion mennyiségéből a szabad ammónia részaránya a hőmérséklettől és a kémhatástól függően $0\text{-}40 \%$ tartományban van, s mindkettő növekedésével növekszik. Így feltétlenül gondoskodni kell a felesleges ammónia leválasztásáról.

A **szelektív nem katalitikus** eljárás során a redukáláshoz szükséges ammóniát közvetlenül a kazán (kemence) utóégető terébe ill. a gázturbinák hőhasznosítójába fúvatják be, ahol a hőmérséklet általában $850\text{-}1100 \text{ }^\circ\text{C}$ tartományban van. Az ammóniát több szinten fúvatják be, a minél egyenletesebb elosztás és ebből következően a minél teljesebb átalakítás érdekében. A művelethez természetesen némi ammónia felesleg szükséges, így a redukcióhoz fel nem használt visszamaradt ammóniát a füstgázból el kell távolítani, melyre több lehetőség is van (pl. abszorpció, majd deszorpció után termikus vagy katalitikus égetés stb.). A szelektív nem katalitikus eljárás előnye az utólagos felszerelés lehetősége ill. egyszerűsége, s viszonylag kicsi beruházási költsége, hátránya a nagy ammónia felhasználás és a katalitikus eljárásoknál kisebb redukálási határfok.

A **szelektív katalitikus eljárás** esetében a nitrogén-oxidok redukálását külön ún. **DeNox reaktorban** valósítják meg, melyet beépítenek a füstgázvezetékbe. Az alkalmazott katalizátor döntően fénoxid, a szükséges reakció hőmérséklet $300\text{-}400 \text{ }^\circ\text{C}$ tartományban van. A eljárás alkalmazható kazánok, gázturbinák és kétütemű ill. négyütemű belsőégésű motorok füstgázának kezelésére. Az ammónia betáplálást úgy kell kialakítani, hogy a füstgázvezeték teljes keresztmetszetében megvalósuljon az ammónia egyenletes elosztása, tehát az azonos nitrogén-oxid/ammónia arány. Az ammónia egyenletlen eloszlása kisebb hatékonyságú nitrogén-oxid elbontást eredményez, tehát azonos követelményre nagyobb lesz a katalizátorigény. E feladatot rendszerint folyamatirányító számítógép szabályozza, a gázáram és a nitrogén-oxid koncentráció mért értékei alapján, az előre beállított ammónia/nitrogén-oxid arány szerint. A gázáram egyenletes elosztását a reaktorban is biztosítani kell, minthogy az egyenletlen sebességeloszlás a katalizátorigény növekedését vonja maga után. Ezt megfelelő terelőlemezek beépítésével lehet biztosítani, melyek megakadályozzák azt is, hogy a gázban lévő porszemcsék a katalizátor felső rétegére rakódjanak, így csökken a

katalizátorszemcsék eróziója. Tekintettel arra, hogy a katalizátor idővel veszít az aktivitásából, a DeNox reaktorban a katalizátort több (legalább kettő vagy három) rétegben helyezik el. Nagyméretű reaktorokban általában lehetőséget biztosítanak legalább egy katalizátorréteg későbbi behelyezésére, arra az esetre, amikor az üzemelő rétegek már nem képesek biztosítani az elvárt mértékű tisztítást. Ugyanis úgy találták, hogy az üzemelő rétegek egy réteggel való bővítése gazdaságosabb, mintha a már használt rétegek közül egyet vagy többet (esetleg mindet) új réteggel kicserélnék. A tapasztalat szerint így hosszabb időszakot tekintve (legalább 10 év) kisebb lesz az átlagos katalizátorigény, hatásosabb a katalizátor aktivitásának átlagos kihasználtsága, kisebb a katalizátorra fordított költség.

Erőművekben a DeNox reaktort rendszerint a kazán és az égéslevegőt előmelegítő hőhasznosító hőcserélő közé helyezik, megelőzve a porleválasztót és a kén-dioxid mentesítő berendezést (ha van), de elhelyezhető e berendezések után is, vagy esetleg közülük. Így tehát nagy portalmú ill. kén-dioxid tartalmú gázokat vagy kis portalmú ill. kén-dioxid „mentes” gázokat kell kezelni, s ennek megfelelően gyakran nyersgáz vagy tisztgáz DeNox reaktort említene (ill. nagy porterhelésű - high-dust - vagy kis porterhelésű - low-dust - DeNox reaktorról beszélnek). Így az esetleges porlerakódás hátrányos hatásainak csökkentésére poros gázok tisztítására nagyobb szemcseméretű katalizátor, kevesebb és nagyobb méretű csatornákkal, pórusokkal (így kisebb fajlagos felülettel) alkalmazható, tiszta gázok értelem szerűen kisebb szemcseméretű, több és kisebb méretű csatornákkal, pórusokkal (így nagyobb fajlagos felülettel) rendelkező katalizátorral kezelhetők, tehát e feladatra hatékonyabb katalizátor alkalmazható, és kisebb a katalizátor igény is. Az elhelyezésnek megfelelően kell megválasztani a katalizátort összetétel tekintetében is. Ha a reaktor megelőzi a porleválasztót és a kén-dioxid mentesítőt, olyan katalizátorra van szükség, melynek minél nagyobb az aktivitása a nitrogén-oxidok redukciójára a teljes hőmérséklet-tartományban és kicsi az aktivitása a kén-dioxid oxidációjára kén-trioxiddá. Ha viszont a DeNox reaktort mindkét berendezés megelőzi, már kevésbé fontos a kén-dioxid oxidációjára vonatkozó kis aktivitás (hiszen már kicsi a kén-dioxid tartalom), de olyan katalizátorra van szükség, melynek minél nagyobb a nitrogén-oxidok redukciójára vonatkozó aktivitása, minél kisebb hőmérsékleten (tehát már közvetlenül 300 °C felett, hiszen ezzel kisebb az előmelegítési igény, így energetikailag kedvezőbb a rendszer).

A szelektív katalitikus eljárással üzemelő DeNox berendezések 2000-2500000 Nm³/h füstgázáram tartományban dolgoznak.

A feladat megoldására többféle összetételű **katalizátor** alkalmazható, melyek kiválasztásánál tekintetbe kell venni, hogy a füstgázban kén-dioxid is jelen lehet, ami oxidálódva kén-trioxiddá alakulhat. Ez részben a füstgázban jelenlévő ammóniával és vízgőzzel ammónium-szulfátot képez, ami lerakódhat a katalizátor felületére, csökkentve aktivitását és növelve áramlási ellenállását, vagy a kéményben kénsav kiváláshoz vezethet. Ezért tehát fontos az is, hogy a katalizátornak minél kisebb legyen az aktivitása a kén-dioxid oxidálására. Ha e szempontból vizsgáljuk a lehetséges katalizátorokat, a következő csoportosítás adható:



V₂O₅/MoO₃ melyeknek nagy az aktivitása az NO_x redukcióra



ill.



Cr₂O₃ melyeknek nagy az aktivitása az SO₂ oxidációjára.



A katalizátorok aktivitását a kén-dioxid oxidációjára wolfram-trioxid (WO₃) adagolásával csökkentik. A katalizátorokat hordozóra viszik fel, általában méhsejt-szerű kiképzést alkalmaznak. Katalizátor hordozóként a következő anyagok a leggyakoribbak:

- Titán-dioxid (TiO_2): saját aktivitása is van, szulfátmérgezéssel szemben ellenálló, fajlagos felülete nagy, drága;
- Alumínium-trioxid (Al_2O_3): fajlagos felülete nagy, hőállósága jó, kén-dioxid jelenlétében gyorsan károsodik (alumínium-szulfát képződik);
- Vas-trioxid (Fe_2O_3): saját aktivitása is van, hőállósága nem megfelelő, olcsó, kén-dioxid mérgezi.

Ma általában titán-dioxid (TiO_2) hordozón a vanádium-pentoxid és wolfram-trioxid ($\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3$) keverékét használják, egyenletesen elosztva a hordozó felületén (a gyakorlatban rendszerint titán bázisú vanádium-pentoxid katalizátort említenek). A titán-dioxid optimális aktivitása már néhány százalék (5-10 %) vanádium-pentoxid rávitelével elérhető.

A DeNox reaktorokban használt katalizátorokat paralelepipedon (rendszerint téglatest) formában készítik. Egy elem szokásos mérete 466*466*572 mm, s egy modulban 8 vagy 16 elemet helyeznek el. Nyomás alatt üzemelő reaktorokra (belsőégésű motorok füstgázának kezelése) főleg hengeres formát alkalmaznak, ahol az átmérő elérheti az 1 métert, az elem magassága általában átmérőjénél kisebb. A katalizátorok porozitása 55-75 %, a fajlagos felület 450-800 m^2/m^3 , a csatornák hidraulikus egyenértékű átmérője 3-7 mm között van.

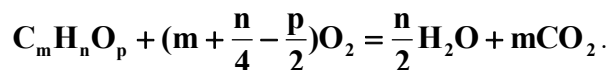
A katalizátorok átlagos élettartama 4-7 év olajtűzelés esetén, 7-10 év gáztűzelés esetén. Az öregedés az aktivitás csökkenésével jár, s ennek jelentkezésekor cserélni kell a katalizátort. A DeNox reaktor függőleges vagy vízszintes átáramlású, kör vagy négyszög keresztmetszetű berendezés, melyben a katalizátort a szükségletnek megfelelően több rétegben helyezik el. Az egyes rétegek aktivitása általában nem azonos sebességgel csökken, minthogy a füstgáz belépő keresztmetszete közelében az igénybevétel értelemszerűen nagyobb, így tehát itt kell először cserélni a katalizátort, s fokozatosan kell az áramlási irányba előre haladni a cserével. Ma az irányadó katalizátor szükséglet abból határozható meg, hogy 1 m^3 katalizátorral 6000-8000 m^3 füstgáz tisztítható óránként (vagyis 6000-8000 $\text{m}^3/\text{m}^3\text{h}$). A gyakorlatban azonban biztonsági okokból ennél kisebb értékeket alkalmaznak: poros gázok kezelésére 2500-3500 $\text{m}^3/\text{m}^3\text{h}$, pormentesített gázok kezelésére 4500-5000 $\text{m}^3/\text{m}^3\text{h}$ a biztonságos „tervezési” adat.

Az eljárás mai technikai színvonala lehetővé teszi a nitrogén-oxidok 90-95 % körüli ill. gyakran még ezt meghaladó mértékű eltávolítását, a sztöchiometrikusnak közel megfelelő ammónia betáplálásával, s a redukciós folyamatban fel nem használt ammónia katalitikus oxidációjával a DeNox reaktor után, mellyel a kezelt füstgázban az ammónia koncentrációja 2 ppm alá csökkenthető.

Véggázok kémiai kezelése - Oxidáció (termikus és katalitikus égetés)

Ipari üzemek nagyon sok szerves anyagot bocsátanak ki a légkörbe. Ezek az anyagok kémiai oxidációval szén-dioxiddá és vízzé alakíthatók, s ez a véggázok által tartalmazott szerves szennyező anyagok leghatásosabb kezelési módja. E szennyezők főleg gázfázisúak (gőz), de lehetséges a gázban diszpergált állapotban lévő folyadék, ill. szilárd halmazállapotú szennyezés is. Megfelelő mértékű ártalmatlanítás érdekében általában nagy hőmérsékletet kell alkalmazni, melyhez a belépő gázáramot elő kell melegíteni olyan hőmérsékletre, melyen az alkotók meggyulladnak, s ehhez rendszerint pótenergia is szükséges. Így az alkalmazott berendezésbe a szennyezett gázárammal együtt levegőt (ha annak oxigéntartalma nem elégséges) és pótlólagos tüzelőanyagot kell betáplálni. A reakciónyomáspontba való belépés előtt gondoskodni kell ezek megfelelő mértékű összekeveredéséről. A legtöbb szerves komponensre a minimálisan szükséges hőmérséklet általában 650-820 °C (de a szén-monoxid

további oxidálásához legalább 730 °C szükséges) átalakításához, mely katalizátor alkalmazásával csökkenthető. Ha a reakció nem megy végbe teljesen, aldehidek, szerves savak, szén és szén-monoxid képződhet, mely környezetvédelmi szempontból nem engedhető meg. A kémiai kezelést igen elterjedten alkalmazzák, mivel a szerves komponensek teljes eltávolítását teszi lehetővé, azok kémiai tulajdonságaitól függetlenül, s a művelet végén a legtöbb esetben nem keletkezik további kezelést igénylő szennyvíz vagy szilárd hulladék, de ezeket az előnyöket általában drágán kell megfizetni, mivel a berendezés, a katalizátor és az energia igen költséges lehet. A szénhidrogének kémiai átalakulása a következő általános reakcióegyenlet szerint megy végbe:



s ebben az egyszerű esetben a reakció terméke víz és szén-dioxid. Ez a reakcióegyenlet szolgál az égés oxigén, ill. levegőszükségletének meghatározására is. A legtöbb esetben azonban az átalakulás több átmeneti állapoton megy keresztül és részlegesen valósul meg, amikor köztes vegyületek keletkeznek, melynek részletei még ma sem ismertek kellően. Az egyik ilyen köztes termék a szén-monoxid, mely további oxidációval szén-dioxiddá alakítható. A berendezés neve általában égetőüzem vagy utóégető.

A szerves vegyületek kémiai átalakítása lényegében **oxidációs folyamat**, mely minden egyes szerves vegyületre egy meghatározott koncentráció tartományban spontán módon (tehát külső beavatkozástól függetlenül) továbbterjed. Ennek jellemzésére az **alsó és a felső robbanási határt** alkalmazzák, mely a szennyező anyag típusától, a gázkeverék nedvességtartalmától, hőmérsékletétől, nyomásától, gyulladási hőmérsékletétől és valamely mértékben az alkalmazott készülék geometriai méreteitől függ. A határértékeken kívül a spontán oxidációs folyamat lehetősége megszűnik. Műszaki alkalmazásokra az alsó és a felső robbanási határ által meghatározott összetétel-tartományt értelemszerűen kerülni kell, minthogy az égés folyamata e tartományban szabályozhatatlan (vagy legalábbis nehezen szabályozható), tehát a szennyező komponens koncentrációjának célszerű e veszélyes tartományon kívül lennie. A robbanási határok alapján az oxidációs folyamat négy típusát különböztetik meg:

- a szennyező komponens koncentrációja kb. 25 %-kal kisebb az alsó robbanási határnál (tehát annak legfeljebb 75 %-át éri el), az oxigén koncentrációja a gázelegyenben pedig legalább 15 %, mely elégséges a pótlólagos tüzelőanyag elégetéséhez és a reakció hőmérsékletének eléréséhez, s ekkor mind a termikus, mind pedig a katalitikus kezelés alkalmazható;
- a szennyező komponens koncentrációja kb. 25 %-kal kisebb az alsó robbanási határnál, de az oxigén koncentrációja a gázelegyenben 15 % alatt van, mely kevés a pótlólagos tüzelőanyag elégetéséhez és így pótlevegő bevitelére szükség van, melyet követően mindkét kémiai kezelés alkalmazható, akár utóégetőben, akár kazánban (ritkábban);
- a szennyező anyag koncentrációja az alsó és a felső robbanási határ között van ill. az alsó robbanási határt 25 %-on belül megközelíti, ekkor a kezelés nem biztonságos, célszerű az elegyet úgy hígítani, hogy eleget tegyünk az első két eset valamelyikének;
- a szennyező anyag koncentrációja a felső robbanási határ felett van, s ha nincs elegendő oxigén a gázelegyenben, akkor pótlevegőt vezethetünk be, ha lehetséges, ha nem, akkor a művelet a talajszintre vagy magasabb szintre telepített fáklyával (ún. fáklyázással) valósítható meg, ha viszont elégséges oxigén van a gázelegyenben, s az égetés hagyományos kazánban valósítható meg (vagyis lényegében tüzelőanyagként használható a gázelegyen, melyhez fűtőértékének növelése szükséges lehet).

A csoportosításból következik, hogy szerves gőzökre a kémiai kezelés általában korlátozottan alkalmazható, mivel a koncentrációnak az alsó robbanási határ alatt kell lennie legalább a határérték 25 %-ával vagy a felső robbanási határ felett, de a kezelendő gázelegyenek

többsége az első három csoportba tartozik. Az elégethetőség (a fűtőérték) szempontjából még szokásos az alábbi osztályozás is:

- alacsony fűtőértékű véggázok, melyek önálló égése támasztólánggal sem tartható fenn;
- szegény véggázok, melyek égetése támasztólánggal biztosítható és
- dús véggázok, melyek égetése önállóan megvalósítható, s még hőhasznosításra is lehetőséget adnak.

Az első két esetben a folyamat fenntartása pótlólagos energia bevitelét igényeli, melynek mennyiségét a pótlevegő bevitele is növeli, minthogy hígítja a gázelegyet, csökkentve annak fűtőértékét.

A kémiai kezelés (átalakítás) két módozata lehetséges: a művelet megvalósítható katalizátor alkalmazásával vagy katalizátor alkalmazása nélkül, ilyen módon beszélhetünk nem katalitikus és katalitikus kémiai kezelésről. Katalizátor nélkül értelemszerűen magasabb hőmérséklet szükséges a kémiai kezeléshez, amit termikus kezelésnek is hívnak, katalizátor alkalmazásával a kémiai reakció kisebb hőmérsékleten is gyorsabb, s ezt a kisebb hőmérsékletű műveletet katalitikus kezelésnek hívják. Katalitikus kezelés esetén az alkalmazott hőmérséklet-tartomány 400-500 °C, katalizátor alkalmazása nélkül 700-1200 °C hőmérséklet tartományban dolgoznak. Mindkét eljárást alkalmazzák az iparban, a termikus kezelést talán nagyobb mértékben, mivel olcsóbb és kezelése egyszerűbb, mint a katalitikus eljárásé. Lényegében a termikus kezelés különleges esete a fáklyázás (közvetlen elégetés). A fáklyás és a termikus égetés során közvetlenül láng van jelen a folyamatban, a katalitikus égetés során fém katalizátorokat alkalmazunk a kisebb reakcióhőmérséklet érdekében, s ekkor láng nem keletkezik, vagyis ez láng nélküli oxidáció. A termikus és a katalitikus berendezés neve égetőüzem vagy utóégető.

A katalitikus utóégetők legfontosabb részét a katalizátor képezi, mivel a művelet **gazdaságosságát** alapvetően meghatározza a **kémiai reakció hőmérséklete**. A hordozó anyag lehet fém, alumínium-oxid, szilikát, azbeszt vagy fém-oxid, s rendszerint rendkívül porózus anyag annak érdekében, hogy nagy felületet biztosítson az aktív anyag felvitelére. A **katalizátorok** leggyakrabban **platina** vegyületek, de réz, króm, vanádium, nikkel és kobalt oxidok is alkalmazhatók. Gyakran méhsejt-szerű, szalagszerű vagy drótfonat kiképzést alkalmaznak (un. monolit egységet képeznek ki), mivel ilyen alakzatnál a hőtágulás miatt a katalizátor nem válik le a hordozóról.

A **termikus utóégetők előnyei** a katalitikus berendezéshez viszonyítva: a μm -nél kisebb méretű szilárd részecskék eltávolítása, rugalmas a gázelegy összetételének és térfogatáramának változására, viszonylag egyszerű szerkezet, kis helyszükséglet, kis fenntartási igény és költség, és **hátrányai** a katalitikus berendezéshez viszonyítva: nagy üzemeltetési költség, tűzveszély, visszaégési lehetőség.

A **katalitikus utóégetők előnyei** a termikus berendezéshez viszonyítva: a kisebb energiaigény, a kisebb szigetelési költségek, a kisebb tűzveszély, a kisebb visszagyulladás lehetőség, és **hátrányai** a termikus berendezéshez viszonyítva: a nagyobb beruházási költség, a katalizátor mérgezési lehetőség, a szilárd szemcsék eltávolításának igénye és a katalizátor regenerálási igény.

Véggázok biológiai kezelése

A biológiai szennyvízkezelés már több mint egy évszázada alkalmazott, jól bevált és kellően ismert technológia, a mikroorganizmusok közreműködésével megvalósított biológiai véggáz kezelés azonban csak a 20. század ötvenes éveitől vált ismertté. Az ún. bűzös (szagos, illatos) gázok biológiai módszerekkel történő tisztításának gondolatát először H. Bach vetette fel Németországban 1923-ban, szennyvízkezelő üzemből távozó kén-hidrogén tartalmú gáz

kezelésére. Az első alkalmazásokról szóló közlemények az ötvenes években jelentek meg Németországban és az USA-ban, így tehát a bioszűrőket szaganyagok eltávolítására már közel félévszázada használják a világ több országában (az említett országok mellett Hollandia, Svájc, Japán, Ausztria), s hazánkban is tudunk néhány alkalmazásról. Az első berendezések a légtér felé általában nyitottak voltak, a szigorodó környezetvédelmi előírások miatt ma már gyakran zárt rendszereket alkalmaznak. (A bioszűrő kifejezéssel kapcsolatban fontos megjegyezni, hogy lényegében semmiféle szűrésről nem beszélhetünk a „szűrés” szó hagyományos jelentése alapján, a bioszűrőben egyes kémiai komponensek aerob biológiai átalakítása megy végbe).

Az 1980-as évektől a bioszűrőket egyre elterjedtebben használják a világ több országában (de talán Németország jár ebben az élen) vegyipari üzemek, öntödék, nyomdák, húsfeldolgozó üzemek stb. szerves illékony komponenseket, kellemetlen szagú gázokat, mérgező gázokat tartalmazó gázáramainak kezelésére, melyet részben a környezetvédelmi előírások kényszerítettek ki, s ehhez gyakran jelentős kutatási támogatás is kapcsolódott.

A biológiai szűrők (bioszűrők) porózus töltött ágyas mikroba rendszerek, amelyek szilárd közegen kifejlesztett, ill. arra telepített mikroorganizmusokat tartalmaznak. A szilárd közeg (az ún. szűrőközeg) lehet: talaj, komposzt, tőzeg, fakéreg vagy ezek keveréke, de lehet az előzőekben felsorolt szerves anyagok és inert anyagok keveréke is (pl. aktívszén). **Működési alapelve: a szennyező komponens biológiai oxidációval történő lebontása a szűrőközeg felületére telepített mikroorganizmusok segítségével.** A szűrőközeget és a rajta élő mikrobakultúrát vékony folyadékfilm veszi körül, melyen a gázok átbuborékolnak (átdiffundálnak), s a biológiailag lebontható komponenseket kevésbé veszélyes vagy gyakran teljesen veszélytelen anyagokká alakítják át a mikroorganizmusok. Az átalakítás tehát a szilárd szemcse felületén kialakuló folyadékfilmben (biofilmben) megy végbe, és így a biológiai gázkezelés alapvetően két lépésből áll:

- a szennyező komponens abszorpciója a folyadékfázisban és adszorpciója a szűrőközeg felületen,
- a vegyület biológiai lebontása a filmben a mikroorganizmusok segítségével,

melyet követően a szén-dioxidot el kell távolítani a biofilmből, anyagátadással. A bioreakció alapvetően a következő összefüggéssel adható meg:

átalakítandó anyagok + oxigén → sejtanyag (biomassza) + szén-dioxid + víz

vagyis az oxidációval a szennyező anyagokat a mikroorganizmusok egyrészt saját sejtömegük felépítésére (biomassza), másrészt energiaforrásként használják, miközben azokat ideális esetben szén-dioxiddá és vízzé alakítják. Az oxidáció nem igényel járulékos energiát vagy vegyszert. A biofilmbe bejutó komponensek adszorbeálódhatnak a szilárd anyag felületén, s ekkor az adszorpciót követően megy végbe a biológiai lebontás. A hagyományos abszorpció ill. adszorpció alkalmazásakor általában elengedhetetlen az abszorbens ill. az adszorbens regenerálása, hiszen szorpciós felvételi kapacitásuk véges, s így előbb-utóbb telítődnek, kimerülnek. A biológiai lebontásban a regenerálást lényegében a mikroorganizmusok hajtják végre folyamatosan, hiszen biológiailag átalakítják a megkötött anyagokat, így a folyadékfilmben az eredeti komponensek koncentrációja (ideális esetben) mindig közel van zérushoz (mint pl. ideális esetben a kémiai abszorpciónál is). Az átalakításhoz szükséges oxigént a levegő diszpergálásával vihetjük be a bioszuszpenzióba (víz, baktériumok, szennyező anyagok és levegő buborékok keveréke), s a tapasztalatok szerint a szennyező anyagok tökéletes lebontásához a filmben legalább 1.5 mg/l oxigén koncentráció szükséges.

A mikroorganizmusok sokféle változatban állnak rendelkezésre, és általánosan állítható, hogy a természetben előforduló szerves szennyeződések a mikroorganizmusok képesek lebontani és felhasználni. Tehát nagy valószínűséggel minden szerves szennyező

anyaghoz megtalálhatjuk a megfelelő mikroorganizmust, mely a körülményekhez való alkalmazkodás után képes lesz az adott szennyező anyag átalakítására. **Alkalmazásukhoz tehát adaptáció (akklimatizálódás) szükséges**, mely időszak alatt hatékonyságuk folyamatosan növekedve eléri a tartósan fenntartható szintet. Ezen időszak alatt a mikroorganizmus alkalmazkodik a rendelkezésre álló szennyező anyaghoz (tápanyaghoz), s a jelenlévő mikroba kultúrában értelemszerűen azok a törzsek szaporodnak el, melyek könnyebben képesek „elfogyasztani” a megcélzott vegyület(ke)t. Ezt gyakran azzal az időtartammal mérik, mely alatt a lebontás hatásfoka 95 %-ot vagy ennél nagyobb értéket ér el. Ez rendkívül fontos időszak, s az adaptáció értelemszerűen vonatkozik a leállás utáni újraindulásra is (minthogy a bioszűrők gyakran nem folyamatosan üzemelnek), bár ez általában rövidebb a kezdeti alkalmazásra vonatkozó időszagnál (ugyanis megfigyelték, hogy a mikroorganizmusok táplálék nélkül viszonylag hosszú időszakot is képesek „átvészelni”). Az adaptáció hosszabb időt vehet igénybe, ha a szűrőközeget keverékből hozták létre ill. ha nem természetes szűrőközeget alkalmazunk. A vizsgálatok szerint hosszabb állás után hosszabb az alkalmazkodási idő; más kémiai komponensre való átálláshoz rövidebb alkalmazkodás szükséges, mint az első alkalmazáskor; az állás időszakában (tehát ha nincs elfogyasztható kémiai komponens) célszerű nedves levegőt átáramoltatni a szűrőrétegen, mivel ekkor rövidebb az adaptáció időtartama. Az adaptáció igénye és mértéke függ a tápanyagtól (szubsztrátumtól), a szennyezőanyag koncentrációjától, a szűrőközegetől, az üzemeltetéstől és a környezeti körülményektől, de gyorsítható levegőztetéssel, az optimális nedvességtartalom és hőmérséklet fenntartásával. Az adaptáció időtartama könnyen lebontható komponensekre 10 nap körüli, nehezen lebomló komponensekre értelemszerűen (lényegesen) hosszabb (2-4 hét), mely alkalmas mikroba kultúrával való „beoltással” rövidíthető. A teljesség érdekében meg kell jegyezni, hogy ennél lényegesen rövidebb alkalmazkodási időszakot is tapasztaltak (néhány órát).

A bioszűrők fontos **üzemeltetési szempontjai** a megfelelő **hőmérséklet**, a **nedvességtartalom** és a **kémhatás** biztosítása. Hőmérséklet tekintetében rendszerint a közepes hőigényű mikroorganizmusokat alkalmazzuk, melyekre az optimális hőmérséklet 35-37 °C. A nedvességtartalom tekintetében a szűrőréteg optimális nedvességtartalma 40-60 tömeg %, ami a pórusokban 90-95 % relatív nedvességtartalomnak felel meg. A pH tekintetében az optimális pH tartomány 7-8. A halmazt időszakonként át kell forgatni, mivel az üzemelés során tömörödik, így elkerülhető az áramlási nyomásvesztés nagymérvű növekedése.

A biológiai gázkezelés elsősorban nagy térfogatú anyagok és biológiailag könnyen lebontható, kis koncentrációban jelen lévő szennyezések eltávolítására alkalmazható. Erre tipikus példa a szennyvíztisztító telepek bűzös gáza. Használatuk olcsó, üzembiztos, társadalmilag elfogadottabb. Környezetvédelmi szempontból a bioszűrők minden más megoldást megelőznek, energiafogyasztásuk kicsi, nem keletkezik káros melléktermék, a melléktermékek nem halmozódnak fel a szűrőközegekben (talajban), a bioszűrő anyaga használat után sem veszélyes hulladék, s talaj feltöltésekben is felhasználható. Ezért a következő évtizedekben jelentős előrelépést prognosztizálnak ennek a vitathatatlanul környezetbarát eljárásnak.

Az itt tárgyalt szennyező anyagok leválasztására, a kibocsátásuk csökkentésére a bemutatott eljárások közül gyakran több módszer is alkalmazható, mint pl. a füstgázok kén-dioxid tartalmának csökkentésére alkalmazható a fizikai és a kémiai abszorpció, ill. az adszorpció, vagy pl. membrántechnika. Ekkor gazdaságossági szempontok, vagyis a beruházási és az üzemeltetési költségek vizsgálata, összehasonlítása, valamint egyéb tényezők alapján kell választanunk a módszerek között (pl. mi a leválasztott anyag sorsa, helyi adottságok stb.). E szempontok rendszerint a kezelendő gáz térfogatáramától és a szennyező anyag koncentrációjától függenek.