

Metody snižování emisí VOC

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY, ROZDĚLENÍ METOD

VOC

(Volatile Organic Compounds)
těkavé organické sloučeniny

Organické látky, které se za běžných nebo provozních podmínek snadno uvolňují do plynné fáze.



EKOLOGICKÁ ŘEŠENÍ



Legislativní definice (směrnice 2010/75/EU – IED)

„Organická sloučenina, která má při teplotě 293,15 K (20 °C) tlak par 0,01 kPa nebo vyšší, případně má odpovídající těkavost za konkrétních podmínek použití.“

Další používaná definice (např. pro barvy a laky)

VOC je organická sloučenina s počátečním bodem varu $\leq 250\text{ °C}$ při 101,3 kPa.

Co to znamená?

- ✓ snadno se odpařují
- ✓ přecházejí z kapalné nebo pevné fáze do plynné fáze
- ✓ mohou se uvolňovat při běžných nebo technologických podmínkách (např. zahřívání, sušení, zpracování)

Typické příklady VOC



ethanol
 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$



aceton
 $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$



ethylacetát
 $\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3$



toluen
 C_7H_8



xylen
 C_8H_{10}



benzinové
uhlovodíky
(směs látek)



styren
 C_8H_8



formaldehyd
 CH_2O

aj.



VOC mají významný vliv na kvalitu ovzduší, přispívají k tvorbě přízemního ozonu a mohou mít negativní dopady na životní prostředí i lidské zdraví.

Typické průmyslové zdroje VOC

kde VOC vznikají a proč se liší charakter proudu

1 Lakovny

- toluen a xyleny
- solventní nafta
- aerosoly
- velké průtoky



2 Tisk a laminace

- ethanol
- IPA
- styren
- kontinuální provoz



3 Chemie a farmacie

- šarže
- kolísání
- speciální kontaminanty



4 Plasty a kompozity

- těžké uhlovodíky
- polymerace



5 Potravinářství

- alkoholy
- pachové složky
- vlhkost



6 Odmašťování

- halogenová rozpouštědla
- diskontinuální odsávání



Návrh technologie vždy začíná zdrojem: jak plyn vzniká, jak kolísá a co kromě VOC skutečně obsahuje.

Co potřebujeme znát před návrhem



Procesní data



průtok Nm^3/h

min / běžné / max hodnoty



koncentrace VOC / TOC

min / běžné / max hodnoty



teplota, vlhkost, tlak, O_2

provozní podmínky média



Kontaminanty



prach a aerosoly

pevné částice



silikony, síra, fosfor

problematické látky



halogeny, kovy

korozní a toxické složky



kondenzovatelné složky

těžší organika



Provoz



kontinuální / dávkový

režim provozu



hodiny za rok

plánovaná dostupnost



rozběhy a odstávky

četnost a délka



požadovaný emisní limit

cílové hodnoty a legislativa



Technologie se nenavrhuje na „průměr“ – bezpečnostně a provozně rozhodují špičky, změny a okrajové stavy.

Dvě základní strategie

Co s molekulou VOC uděláme?

VOC

těkavé organické látky



DESTRUKCE

chemicky rozložit

VOC jsou při procesu oxidace rozloženy především na CO_2 , H_2O a další neškodné látky.



Biofiltrace

Mikroorganismy rozkládají VOC na CO_2 , H_2O a biomasu.



Termická oxidace

VOC jsou zneškodněny vysokou teplotou (obvykle 700–850 °C).



Katalytická oxidace

VOC jsou rozloženy na nižší teplotě za přítomnosti katalyzátoru (obvykle 200–450 °C).



ZÁCHYT

zachytit nebo zakoncentrovat

VOC jsou zachyceny do média a následně odstraněny nebo zpracovány.



Absorpce

VOC jsou zachyceny na kapaliny (pračka, scrubber).



Adsorpce

VOC jsou zachyceny na pevném sorbentu (aktivní uhlí).



Vymražování

VOC jsou ochlazeny a kondenzovány na nízkou teplotu.

Třetí cesta: kombinované systémy

Často nejzajímavější řešení pro velký průtok a nízkou koncentraci

Kombinace zachytu a termické nebo katalytické oxidace umožňuje efektivně řešit velké objemy vzduchu s nízkými koncentracemi VOC.



ZACHYTIT

odstranit VOC ze vzduchu

- Adsorpce na aktivní uhlí nebo zeolit
- Vhodné pro velké průtoky a nízké koncentrace
- Vzniká koncentrovaný proud VOC



ZAKONCENTROVAT

zvýšit koncentraci VOC

- Regenerace adsorbentu (teplem, parou nebo vakuem)
- Vzniká malý objem plynu s vysokou koncentrací VOC
- Možnost rekuperace tepla z regenerace



ZOXIDOVAT

termická nebo katalytická oxidace

- RCO, RTO nebo TNV
- Oxidace VOC na CO₂ a H₂O
- Vysoká účinnost (> 95–99 %)
- Nízké provozní náklady díky vysoké koncentraci



Aktivní uhlí + regenerace + dopálení

- Záchyt VOC na aktivním uhlí
- Tepelná regenerace (desorpce)
- Oxidace koncentrovaného proudu na RTO/RCO/TNV
- Vhodné pro proměnné zatížení a široké spektrum látek



Zeolitový koncentrátor + RTO/RCO

- Záchyt VOC na zeolit (rotační koncentrátor)
- Regenerace horkým vzduchem
- Oxidace koncentrovaného proudu na RTO/RCO/TNV
- Kompaktní řešení s nízkou energetickou náročností



Cíl: neposílat do oxidace celý obrovský průtok, ale jen menší, zakoncentrovaný proud.

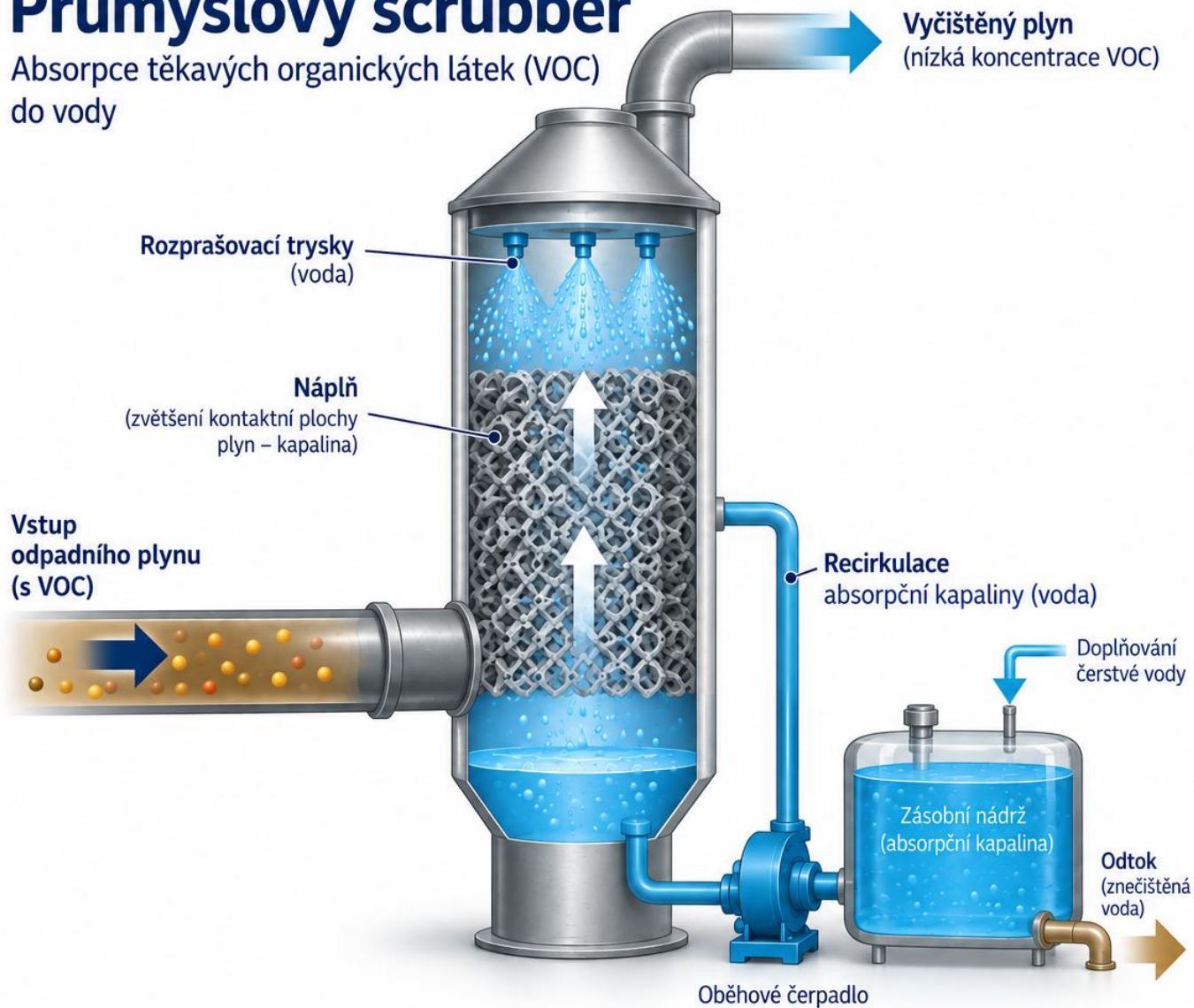
Výsledek: nižší spotřeba energie, nižší provozní náklady, vysoká účinnost.

2. NEDESTRUKTIVNÍ METODY - ZÁCHYT

2.1. Absorpce

Průmyslový scrubber

Absorpce těkavých organických látek (VOC)
do vody



Princip

- 1 Odpadní plyn s VOC vstupuje do scrubberu zdola.
- 2 Voda je rozprašována shora a stéká přes náplň.
- 3 Molekuly VOC se rozpouštějí (absorbují) ve vodě.
- 4 Vyčištěný plyn odchází horním výstupem.
- 5 Znečištěná voda je odváděna k dalšímu čištění (např. biologickému či chemickému).

Vhodné pro

- ✓ dobře ve vodě rozpustné látky (např. alkoholy, ketony)
- ✓ nižší koncentrace VOC
- ✓ možnost kombinace s dalším čištěním odpadní vody

Omezení

- nevhodné pro špatně rozpustné látky (např. vyšší uhlovodíky)
- vznik odpadní vody
- riziko emisí při vysoké teplotě a nízké rozpustnosti

Účinnost mokré vypírky pro různé VOC

Rozpustnost ve vodě a typická účinnost odstranění

Mokrý vypírka je vhodná především pro dobře ve vodě rozpustné látky.

Kategorie VOC	Typické látky	Rozpustnost ve vodě	Typická účinnost mokré vypírky
Alkoholy	ethanol, methanol, IPA (isopropanol)	mísitelné	✓ 90–98 %
Aldehydy	formaldehyd, acetaldehyd	vysoká	✓ 90–95 %
Ketony	aceton, MEK (metylethylketon)	střední až vysoká	✓ 85–95 %
Estery	ethylacetát, butylacetát	střední	! 70–90 %
Aromatické uhlovodíky	benzen, toluen, xyleny	nízká	✗ < 30 % vhodnější oxidace nebo aktivní uhlí
Halogenované uhlovodíky	dichlormethan, chloroform	nízká	✗ < 20 % vhodnější oxidace nebo aktivní uhlí

Typický provozní rozsah mokré vypírky



Průtok odpadního plynu
stovky až tisíce m³/h



Koncentrace VOC
jednotky až stovky mg/m³

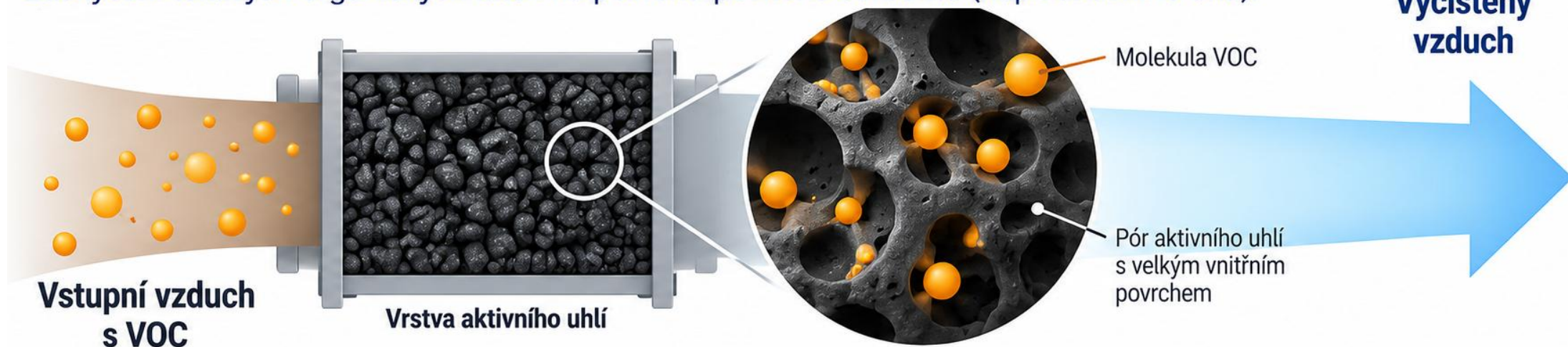


Uvedené hodnoty jsou orientační. Skutečná účinnost závisí na konkrétní látce, teplotě, poměru plyn/kapalina, typu náplně a složení absorpční kapaliny.

2.2. Adsorpce

Adsorpce VOC na sorbent

Zachycení těkavých organických látek na povrchu pevného sorbentu (např. aktivního uhlí).



1

Proud vzduchu s VOC

Znečištěný vzduch obsahuje těkavé organické látky (VOC), které proudí do vrstvy sorbentu.

2

Adsorpce na povrchu

Molekuly VOC se zachycují na vnitřním povrchu pórů sorbentu pomocí fyzikálních sil (van der Waalsovy síly).

3

Vyčištěný vzduch

Po průchodu vrstvou sorbentu odchází vyčištěný vzduch do ovzduší s výrazně nižší koncentrací VOC.

Postupné zaplňování pórů – po nasycení nutná výměna nebo reaktivace uhlí.

Adsorpce VOC na pevné sorbenty

Hlavní výhody, nejčastěji používané adsorbenty a důležité provozní upozornění.

Vhodná zejména pro nižší koncentrace VOC – typicky desítky až stovky mg/m³ a teploty do cca 50 °C.



Výhody

- ✓ **Vysoká účinnost** při vhodně zvoleném adsorbentu.
- ✓ Relativně **malá citlivost** na kolísání koncentrace VOC.
- ✓ Možnost **regenerace** adsorbentu a případného zpětného získání VOC.
- ✓ Vhodná zejména jako **dočišťovací technologie**.



Upozornění



Ketony rády hoří

Některé **ketony** se mohou na adsorbentu oxidovat za vývinu tepla, což může vést k **samozahřívání až k vznícení adsorbentu**.



Nejčastější adsorbenty



Aktivní uhlí

- hlavně nepolární VOC
- velmi vysoká adsorpční kapacita



Silikagel

- především polární látky
- adsorbuje také vodu



Zeolity

- vhodné pro polární a menší molekuly



Alumina

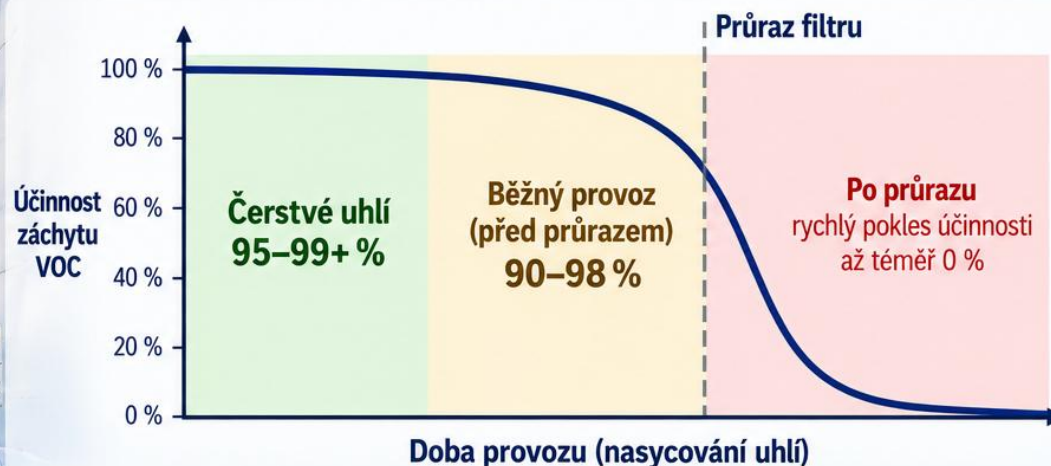
- polární látky



Směsné adsorbenty

- kombinace vlastností podle konkrétní aplikace

Účinnost záchytu VOC na aktivním uhlí



Vysoká účinnost
při nízkých
koncentracích VOC



Široké využití
pro různé typy
organických látek



Regenerace
možnost tepelné
desorpce a opakovaného
použití uhlí



Ekonomické řešení
zejména při nižších
koncentracích VOC

**Adsorpce VOC
na aktivním uhlí**

Skutečná účinnost závisí na druhu VOC, teplotě, vlhkosti,
době kontaktu a stupni nasycení aktivního uhlí.

Přibližné adsorpční kapacity aktivního uhlí pro jednotlivé skupiny látek

Skupiny uhlovodíků

Uhlovodíky
 $C_4 - C_6$

do 10 % hm.

Uhlovodíky
 $C_7 - C_{10}$

do 20 % hm.

Uhlovodíky
nad C_{10}

cca 25 % hm.



Uvedené hodnoty jsou přibližné adsorpční kapacity aktivního uhlí pro dané skupiny a jednotlivé látky a vyjadřují maximální hmotnostní podíl adsorbované látky v hmotnosti uhlí.

Jednotlivé látky



Aceton

do 5 % hm.



Methanol, ethanol

do 5 % hm.



Organické kyseliny

do 10 % hm.



MEK
(metyl ethyl keton)

do 10 % hm.



Ethylacetát, propylacetát

do 15 % hm.



Toluen

do 25 % hm.



Xylen

do 25 % hm.

2.3. Vymražování (kondenzace)

Technologie kondenzace VOC z odpadních plynů

Účinné řešení pro vysoké koncentrace organických látek a zpětné získávání cenných chemických produktů.

Jak to funguje?

- 1 Hluboké chlazení odpadního plynu (typicky na 60 až – 80 °C) způsobí kondenzaci organických látek.
- 2 Zkondenzované látky se oddělí a získávají se jako kapalný produkt (kondenzát).



Výhody technologie

- ✓ Vysoká účinnost při vysokých koncentracích VOC
- ✓ Možnost zpětného získávání cenných chemických produktů
- ✓ Vhodná pro kombinaci s jinými čisticími metodami
- ✓ Široké možnosti využití v průmyslových provozech

Typické použití

- Rafinérie pohonných hmot
- Chemický, petrochemický a farmaceutický průmysl
- Skladovací nádrže s benzínovými parami
- Procesy, kde je k dispozici potřebný chlad

Na co si dát pozor

- ! Technologie je provozně dražší
- ! Vyžaduje dostupnost a logistiku chladu (např. kapalný dusík)
- ! Někdy je vhodné kombinovat s dalšími metodami čištění (např. adsorpce)

Výsledek

- ✓ Spolehlivé snížení emisí VOC pod požadované limity
- ✓ Čistý plyn do atmosféry nebo do dalšího zpracování
- ✓ Zpětné získávání drahých chemických produktů

3. DESTRUKTIVNÍ METODY

3.1. Biofiltrace

Odstraňování VOC z odpadních plynů biofiltrací

Ekologická technologie pro nízké koncentrace organických látek využívající přirozené biologické procesy.

Princip funkce

- 1 Přívod odpadního plynu**
Odpadní plyn s nízkou koncentrací VOC je přiveden do biofiltru a rovnoměrně rozveden do vrstvy média.

- 2 Adsorpce a přenos na vlhký substrát**
Organické látky se zachytí na vlhkém povrchu substrátu (tvořeného např. dřevní štěpkou, kompostem nebo směsí organických materiálů) a rozpustí se ve vodním filmu.

- 3 Biologický rozklad**
Mikroorganismy (bakterie a houby) rozkládají organické látky na jednoduché a neškodné produkty, především oxid uhličitý, vodu a biomasu, které využívají jako zdroj energie a živin.

- 4 Čistý odpadní plyn**
Vyčištěný plyn odchází z biofiltru do atmosféry s výrazně sníženou koncentrací VOC.



Typické průtoky

cca 500 – 50 000 m³/h
(nejčastěji 1 000 – 20 000 m³/h)



Vhodné koncentrace VOC

cca 10 – 500 mg/m³
(nejčastěji 50 – 300 mg/m³)



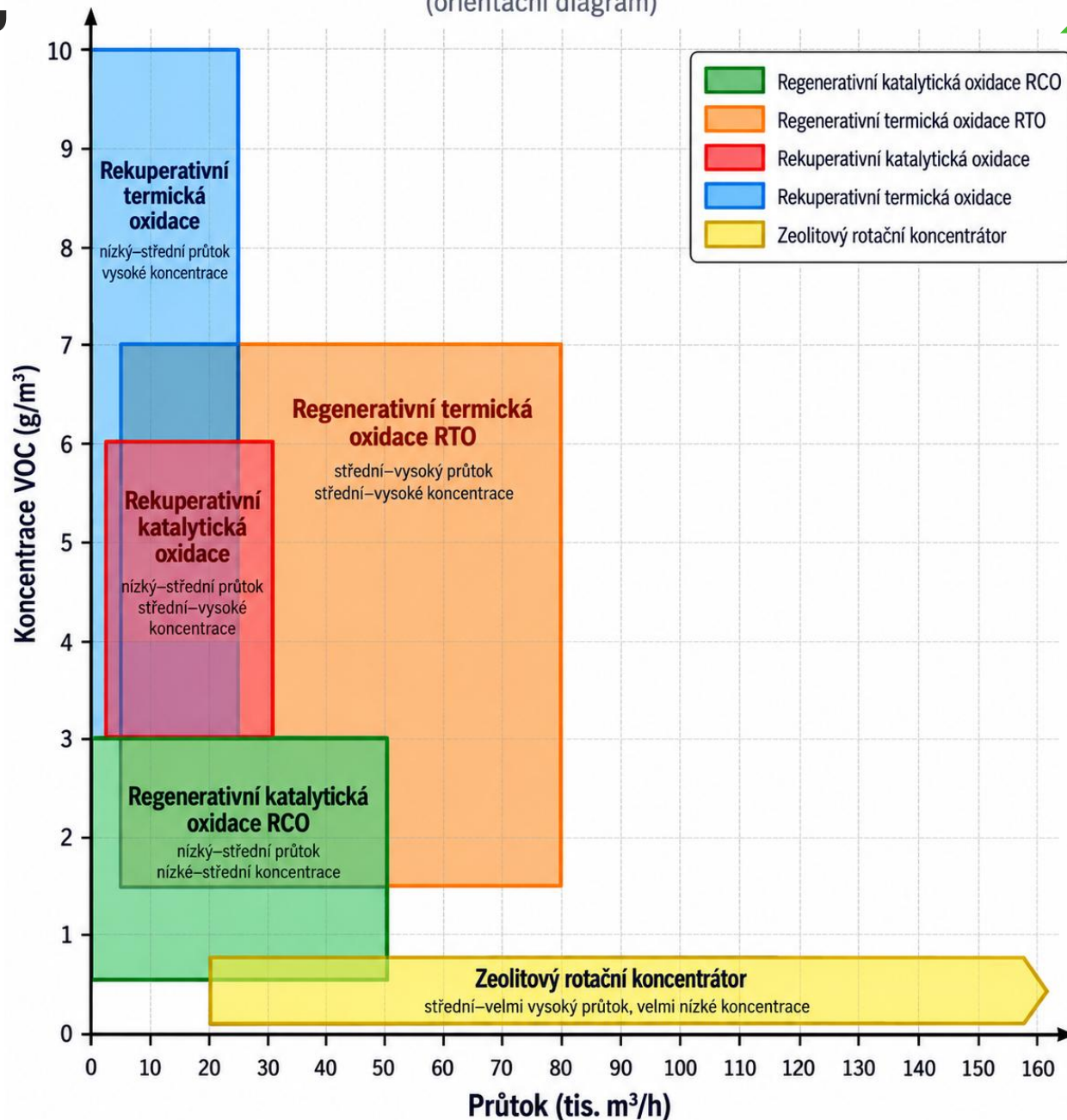
Typické organické látky

- těkavé organické látky dobře biologicky rozložitelné
- např. alkoholy (etanol, methanol), ketony (aceton), estery (ethyl acetát), aldehydy, organické kyseliny, étery, aromatické uhlovodíky (např. toluen, xyleny)
- používá se i pro pachové látky (sirovodík, amoniak v nízkých koncentracích)

3.2. Oxidace

Oblasti použití technologií pro čištění VOC

(orientační diagram)

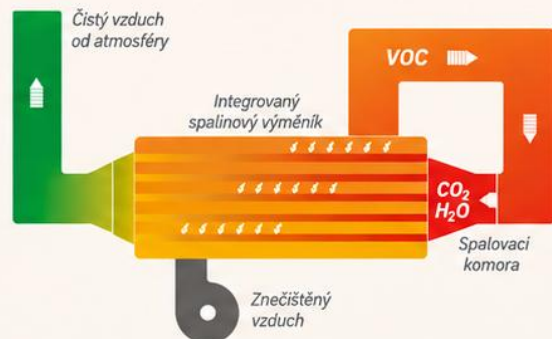


EKOLOGICKÁ ŘEŠENÍ

- **Autotermní provoz** znamená, že zařízení po zahřátí **už nepotřebuje další energii na ohřev**. Teplo potřebné k provozu si vyrábí samo **spalováním VOC obsažených v odpadním vzduchu**.
- „rozklad VOC dodává dostatek tepla pro provoz – není nutné přitápět.“

rekuperativní kovové výměníky (trubkové, deskové)

TERMICKÉ
750–950 °C



TNV
(termická, rekuperativní)

750–950 °C

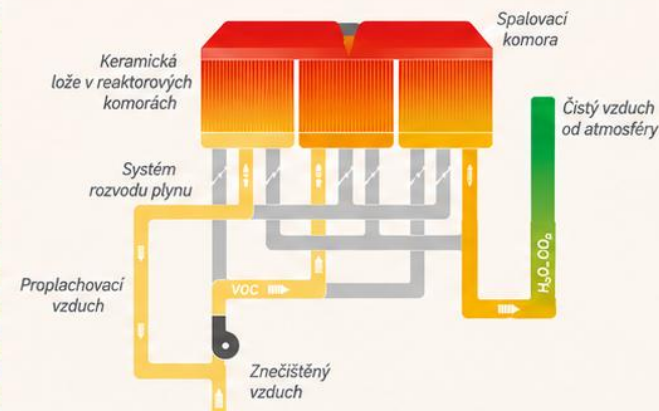
Autotermní hranice



Kovové výměníky: trubkové, deskové

Výměna tepla mezi horkými spaliny a přiváděným vzduchem.

regenerativní regenerativní keramické výměníky



RTO / RTNV
(termická, regenerativní)

750–950 °C

Autotermní hranice
cca

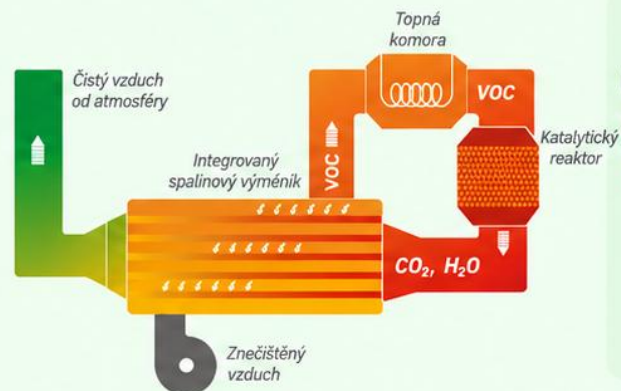
1,5 gTOC/m³



Regenerativní keramické výměníky

Akumulace tepla v keramických ložích (periodický provoz komor).

KATALYTICKÉ
250–450 °C



KNV
(katalytická, rekuperativní)

250–450 °C

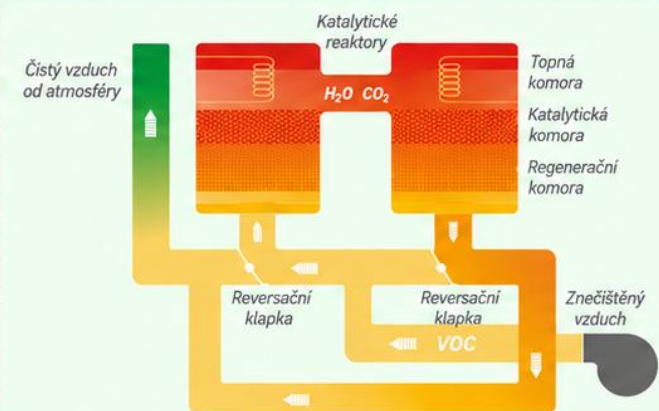
Autotermní hranice
cca

3 gTOC/m³



Kovové výměníky: trubkové, deskové

Výměna tepla mezi horkými spaliny a přiváděným vzduchem.



RCO
(katalytická, regenerativní)

250–450 °C

Autotermní hranice
cca

0,3 (0,5) gTOC/m³



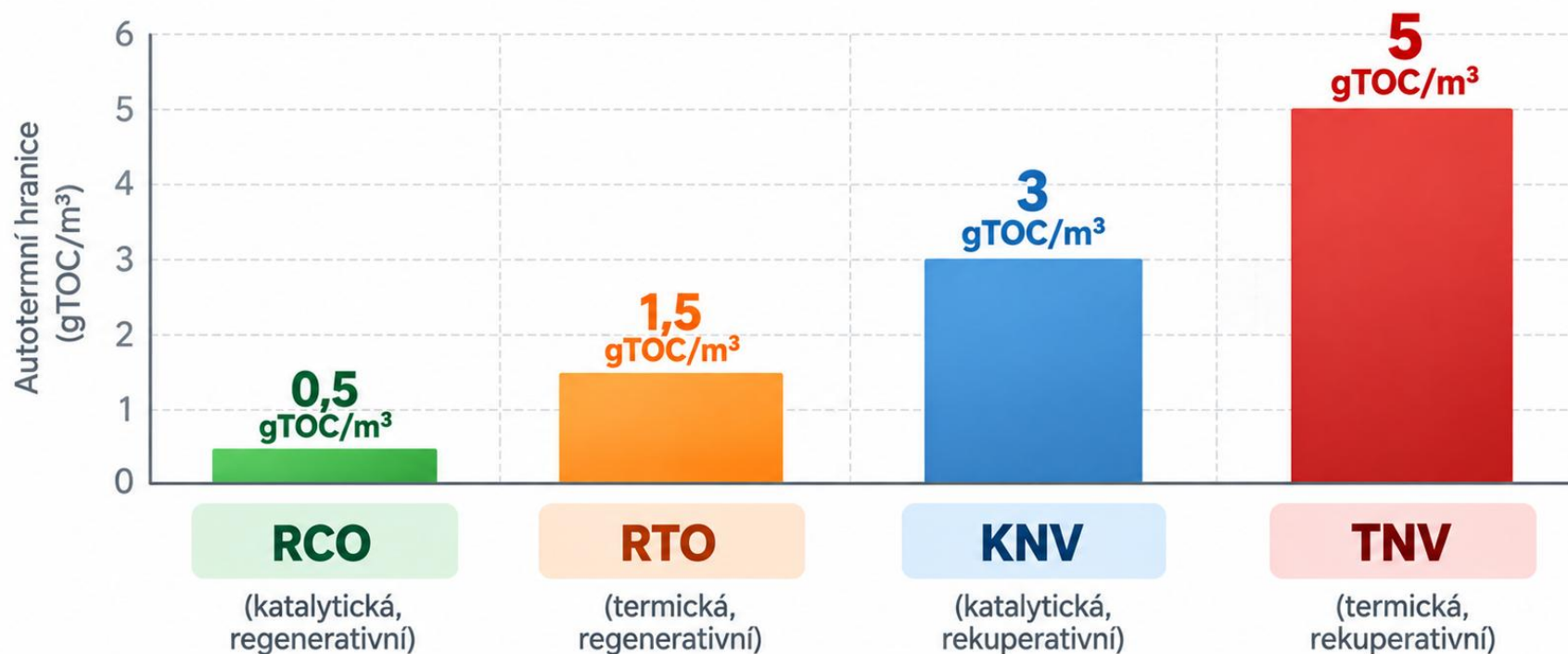
Regenerativní keramické výměníky

Akumulace tepla v keramických ložích (periodický provoz komor).

Autotermní hranice technologií

Orientační koncentrace TOC potřebná pro autotermní provoz

Nižší hodnota = výhodnější autotermní provoz



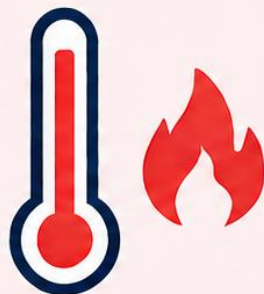
- Autotermní provoz znamená, že zařízení po zahřátí **už nepotřebuje další energii na ohřev**. Teplo potřebné k provozu si vyrábí samo **spalováním VOC obsažených v odpadním vzduchu**.
- „rozklad VOC dodává dostatek tepla pro provoz – není nutné přitápět.“

3.2.1. Rekuperativní termická oxidace (TNV)

3T spalovacího procesu

tři parametry, které zaručují optimální oxidaci

Temperature



dostatečná teplota

Time



dostatečná doba zdržení

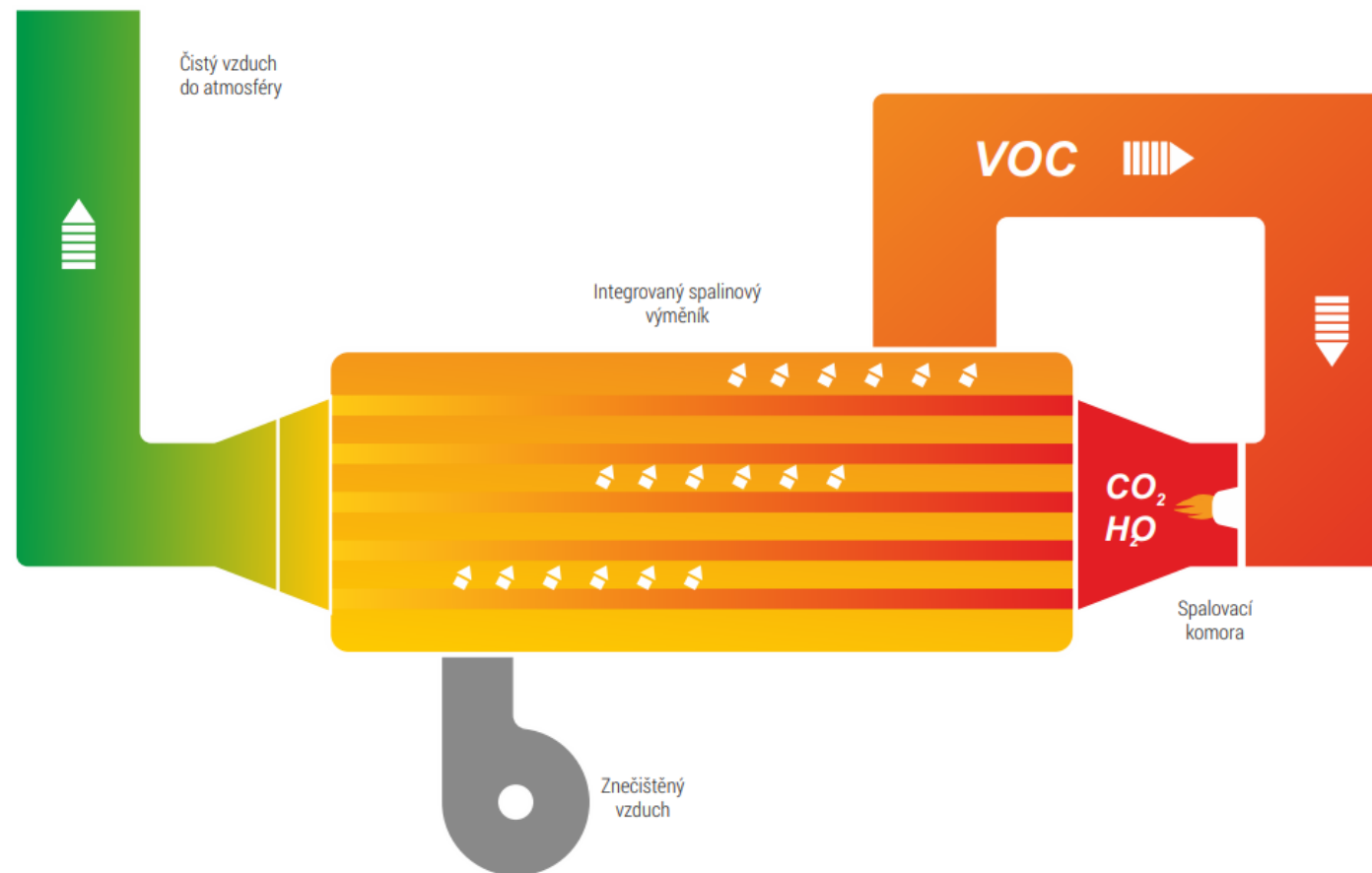
Turbulence



promíchání VOC s O₂

Typické provozní teploty oxidace se pohybují v oblasti mezi 750–900 °C
a typická doba zdržení je 0,7–1,2 s podle likvidované VOC a požadované účinnosti.

Rekuperativní termická oxidace (TNV) – princip funkce



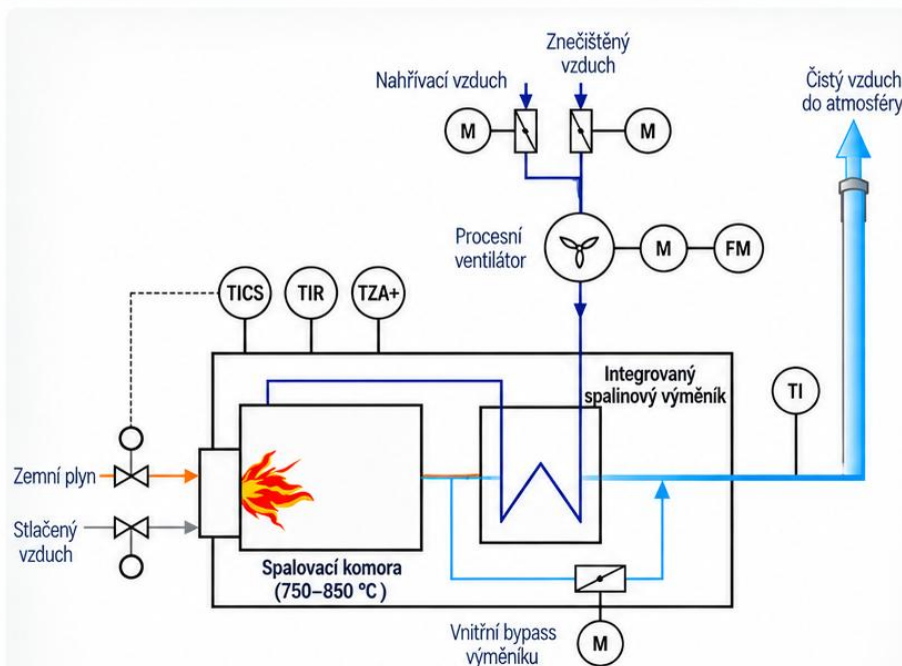
Rekuperativní termická oxidace

Čištění VOC přímým spalováním s rekuperací tepla



Princip

Odpadní vzdušina s VOC se předeřívá v integrovaném výměníku, následně se ve spalovací komoře s plynovým hořákem oxiduje na CO_2 a H_2O . Teplo ze spalin se v integrovaném výměníku předává přicházejícímu znečištěnému vzduchu, čímž se snižuje spotřeba paliva.



Klíčové parametry

Teplota oxidace	750 – 850 °C
Doba zdržení	≥ 1 s
Účinnost výměníku	65 – 70 %
Účinnost odstranění VOC	≥ 99,9 %
Vhodné koncentrace VOC	cca 3 – 10 g/m ³
Průtoky	jednotky až desítky tisíc m ³ /h



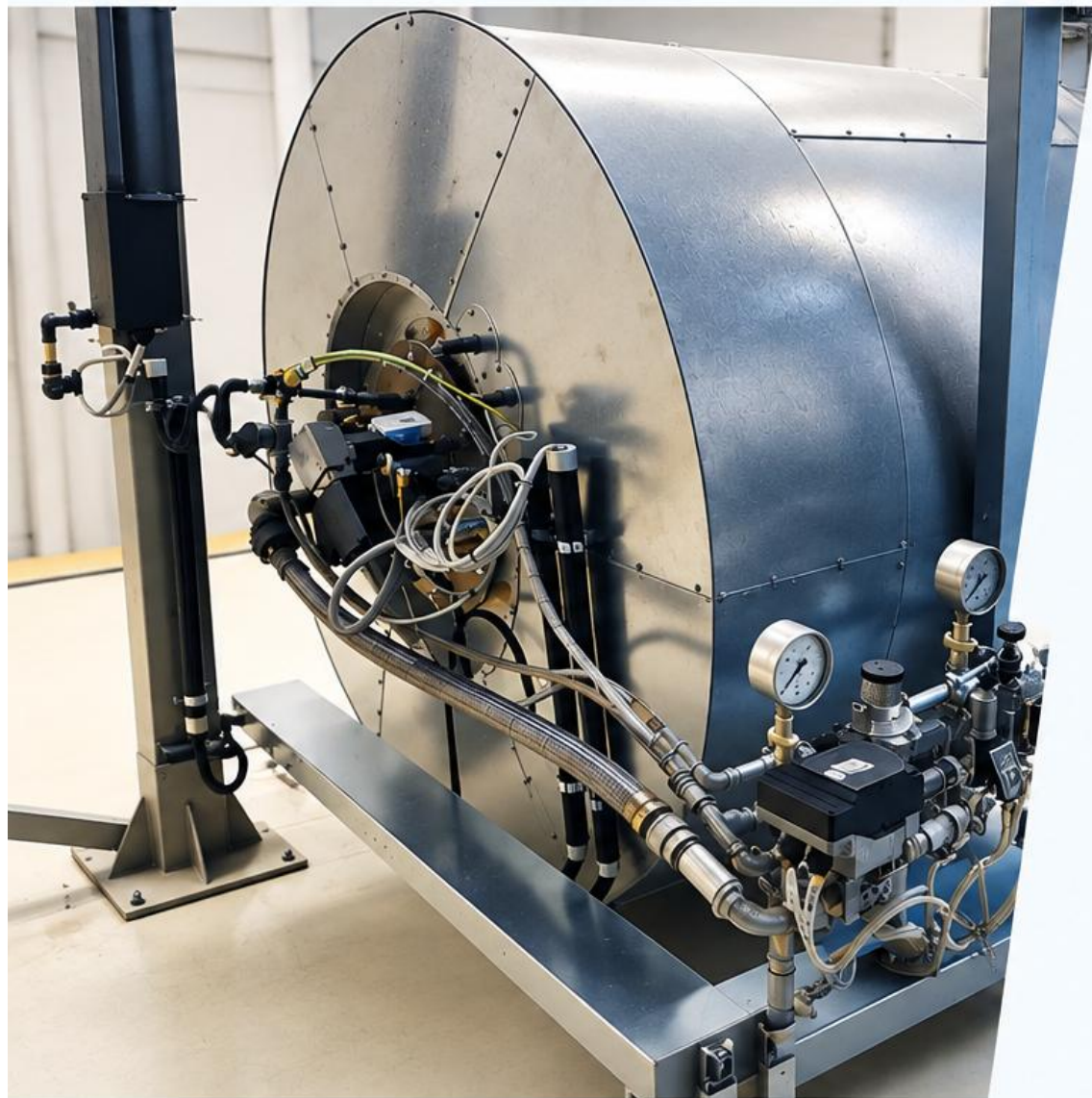
Hlavní výhody

- robustnost zařízení a spolehlivost provozu
- vysoká flexibilita – zvládá kolísání koncentrací VOC
- vhodné pro střední a vyšší koncentrace VOC



Výstupy a využití tepla

- produkty oxidace: CO_2 + H_2O
- ekonomicky výhodné pouze pokud lze využít odpadní teplo (např. pro ohřev oleje, vody, vzduchu apod.)
- bez využití odpadního tepla je provoz neekonomický (vysoká spotřeba paliva)



Bez autotermního provozu



Bez rychlého stand-by režimu



Nižší rekuperace tepla



Náhřev 2-3 hodiny



Vysoká provozní teplota



Klapky neovlivňují účinnost



Řízené chlazení



Výhodné při využití odpadního tepla



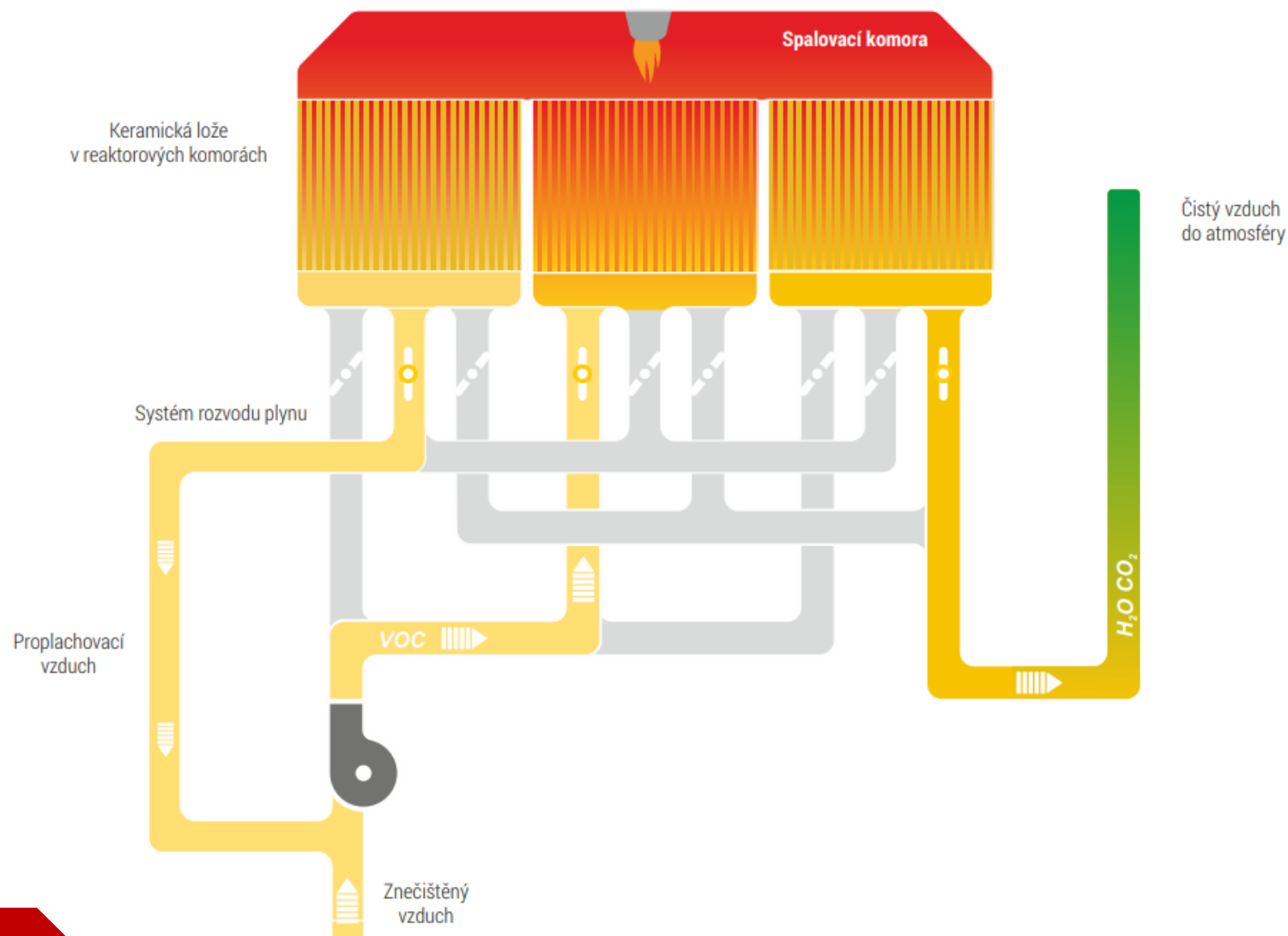
Obtížné čištění úsad



Ohřev plynem

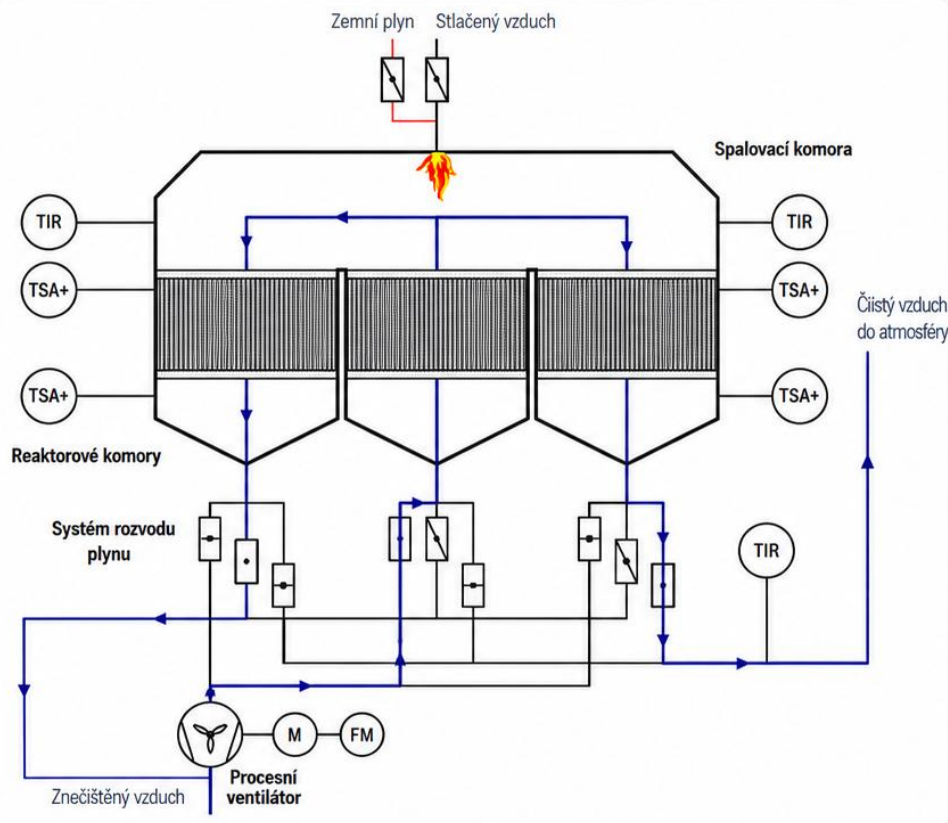
3.2.2. Regenerativní termická oxidace (RTO)

Regenerativní termická oxidace (RTO) – princip funkce



Regenerativní termická oxidace

Čištění VOC přímým spalováním s regenerací tepla



Klíčové parametry

	Teplota oxidace	750 – 850 °C
	Rekuperace tepla	cca 95 %
	Účinnost odstranění VOC	> 99 %
	Vhodné koncentrace VOC	cca 1,5 – 7 g/m ³
	Průtoky	jednotky až desítky tisíc m ³ /h
	Autotermní provoz	od cca 1,5 g TOC/m ³
	Uspořádání	obvykle 3 reaktorové komory



Hlavní výhody

- ✓ nízké provozní náklady v typické oblasti použití
- ✓ vysoká účinnost rekuperace tepla (cca 95 %)
- ✓ robustnost zařízení a spolehlivost provozu
- ✓ flexibilita zařízení z hlediska koncentrací VOC i průtoků vzduchu
- ✓ vhodné pro střední koncentrace VOC



Důležité upozornění

- vyšší pořizovací cena
- ekonomicky výhodné díky vysoké rekuperaci tepla a nízké spotřebě paliva při stabilním provozu



Princip

Znečištěný vzduch s VOC se přímo spaluje v hořáku, horké spaliny předávají teplo keramické výplni reaktorových komor, ve kterých se teplo akumuluje. Komory se periodicky přepínají, takže keramika střídavě přijímá teplo ze spalin a předává ho vstupujícímu znečištěnému vzduchu. Tím se dosahuje velmi vysoké rekuperace tepla a nízkých provozních nákladů.



EKOLOGICKÁ ŘEŠENÍ



Vysoká regenerace
tepla



Nízká autotermní
hranice



Velké až extrémní
průtoky



Modulární řešení



3 / 5 / 7 komor



Citlivé na lepkavé
úsady



Klapky ovlivňují
účinnost



VOC peak
při reverzi



Vysoká tepelná
setrvačnost



Nutné řízení
vychlazení



Elektřina
ekonomicky nevhodná



Bez katalytických
jedů

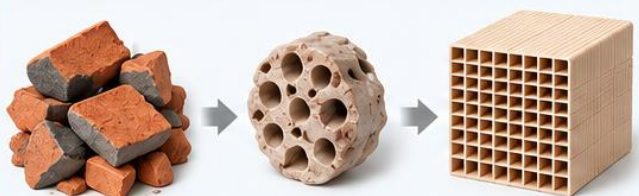
Regenerativní média

Vývoj, typy a hlavní vlastnosti

Regenerativní média akumulují teplo v keramické hmotě a předávají ho mezi dvěma proudy plynů v čase (regenerativní ohřev/spalování, rekuperace tepla).

1. Historický vývoj

Od drcených cihel k moderním voštinám



Drcené cihly
(historicky)

Keramické kusové náplně
(starší řešení)

Voštinové monolity
(dnes nejčastěji)

2. Typy regeneračních médií

Pro různé aplikace a podmínky



Voštinové monolity

- nejčastější řešení
- nízká tlaková ztráta
- vysoká účinnost
- různé velikosti kanálků



Sedýlka

- pro náročné aplikace
- dobrá čistitelnost
- vyšší tlaková ztráta



Raschigovy kroužky

- jednoduchý tvar
- snadnější čištění
- vyšší tlaková ztráta

3. Voštinové náplně – detaily

Různé velikosti kanálků a tepelné kapacity



Velké kanálky

- nižší tlaková ztráta
- vyšší odolnost proti zanášení
- menší tepelná kapacita



Malé kanálky

- vyšší přestup tepla
- vyšší tepelná kapacita
- vyšší riziko zanášení

Velikost kanálků, materiál a množství keramické hmoty ovlivňují účinnost výměny tepla, tlakovou ztrátu a odolnost proti zanášení.

4. Srovnání typů náplní

Typ náplně	Tlaková ztráta	Účinnost výměny tepla	Čištění při úsadách	Typické použití
Drcené cihly	vysoká	nízká	obtížné	historicky
Voštinové monolity	nízká	vysoká	obtížnější	nejčastěji
Sedýlka	vyšší	střední	snadnější	náročné aplikace
Raschigovy kroužky	vyšší	střední	snadnější	náročné aplikace

5. Návrh a dimenzování

Regenerační náplň se volí podle:



požadované účinnosti výměny tepla



průtoku plynů



přípustné tlakové ztráty



charakteru nečistot a rizika zanášení



materiálu a provozních podmínek (teplota, chemická odolnost, životnost)



Důležité

- Více keramické hmoty a intenzivnější přestup tepla vedou k lepší regeneraci.
- Obvykle to však znamená vyšší tlakovou ztrátu nebo větší citlivost na zanášení.



Hlavní myšlenka:

Správná volba regeneračního média je kompromisem mezi účinností výměny tepla, tlakovou ztrátou a odolností proti zanášení – vždy podle konkrétní aplikace.

Srovnání konfigurace keramického lože

RTO 16.0 | Uspořádání 20 × 8

	Varianta 1 Požadovaná konfigurace	Varianta 2 Další hodnocení	Varianta 3 Doporučená alternativa pro vyšší tepelnou rekuperaci
 Horní vrstva (voštinová)	2 × 300 mm, 25 × 25 buněk (960 ks / 6,53 m³)	1 × 300 mm, 25 × 25 buněk (480 ks / 3,27 m³) + 1 × 150 mm, 25 × 25 (480 ks / 1,64 m³)	1 × 300 mm, 25 × 25 buněk (480 ks / 3,27 m³) + 1 × 150 mm, 25 × 25 (480 ks / 1,64 m³)
 Spodní vrstva (voštinová)	3 × 300 mm, 43 × 43 buněk (1 440 ks / 9,80 m³)	3 × 300 mm, 32 × 32 buněk (1 440 ks / 9,80 m³) + 1 × 150 mm, 32 × 32 (480 ks / 1,64 m³)	4 × 300 mm, 32 × 32 buněk (1 920 ks / 13,06 m³) + 1 × 150 mm, 32 × 32 (480 ks / 1,64 m³)
 Celková výška keramiky	1 500 mm	1 500 mm	1 800 mm
 Celkový objem keramiky	16,33 m³	16,35 m³	19,59 m³
 Tepelná účinnost	95,30 %	93,10 %	94,60 %
 Průměrná výstupní teplota	65 °C	84 °C	71 °C
 Tlaková ztráta (dvě komory)	2 278 Pa	1 757 Pa	2 140 Pa

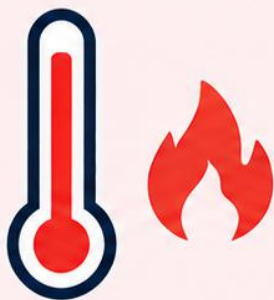
Vyšší keramická náplň = vyšší tepelná účinnost, ale také vyšší tlaková ztráta.

3.2.3. Rekuperativní kalytická oxidace (KNV)

3 klíčové parametry katalytické oxidace

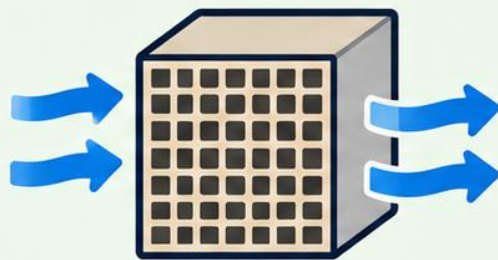
Parametry, které zaručují efektivní a spolehlivou oxidaci VOC

Teplota



nižší provozní teplota
díky katalyzátoru

GHSV



vhodná prostorová rychlost
plynu přes katalyzátor

Kyslík



stačí jen mírný přebytek O_2
nad stechiometrickým
poměrem

Typické provozní teploty katalytické oxidace se pohybují v oblasti 300–450 °C.
Pro řádnou oxidaci VOC stačí jen trochu více kyslíku, než je stechiometrický poměr.

GHSV – hodinová prostorová rychlost plynu

Klíčový parametr pro dimenzování katalytické oxidace

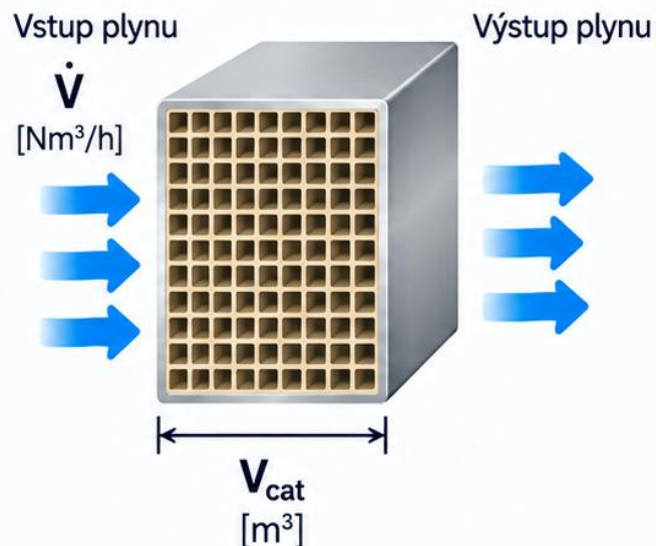
Co je GHSV?

GHSV (Gas Hourly Space Velocity) udává, kolik objemu plynu projde za hodinu jednotkovým objemem katalytického lože.

Vyjadřuje zatížení katalyzátoru a souvisí s kontaktní dobou plynu s katalytickým povrchem.



Vyšší GHSV = větší zatížení katalyzátoru a kratší kontakt plynu.
Nižší GHSV = delší kontakt a obvykle vyšší účinnost.



Základní vzorec

$$\text{GHSV} = \frac{\dot{V}}{V_{\text{cat}}} \quad [\text{h}^{-1}]$$

$\dot{V}$ – objemový průtok plynu [Nm³/h]

V_{cat} – objem katalytického lože [m³]

GHSV – hodinová prostorová rychlost plynu [h⁻¹]

Dimenzování katalyzátoru

$$V_{\text{cat}} = \frac{\dot{V}}{\text{GHSV}} \quad [\text{m}^3]$$

Příklad dimenzování

Objemový průtok plynu $\dot{V} = 10\,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Požadované GHSV $= 20\,000 \text{ h}^{-1}$

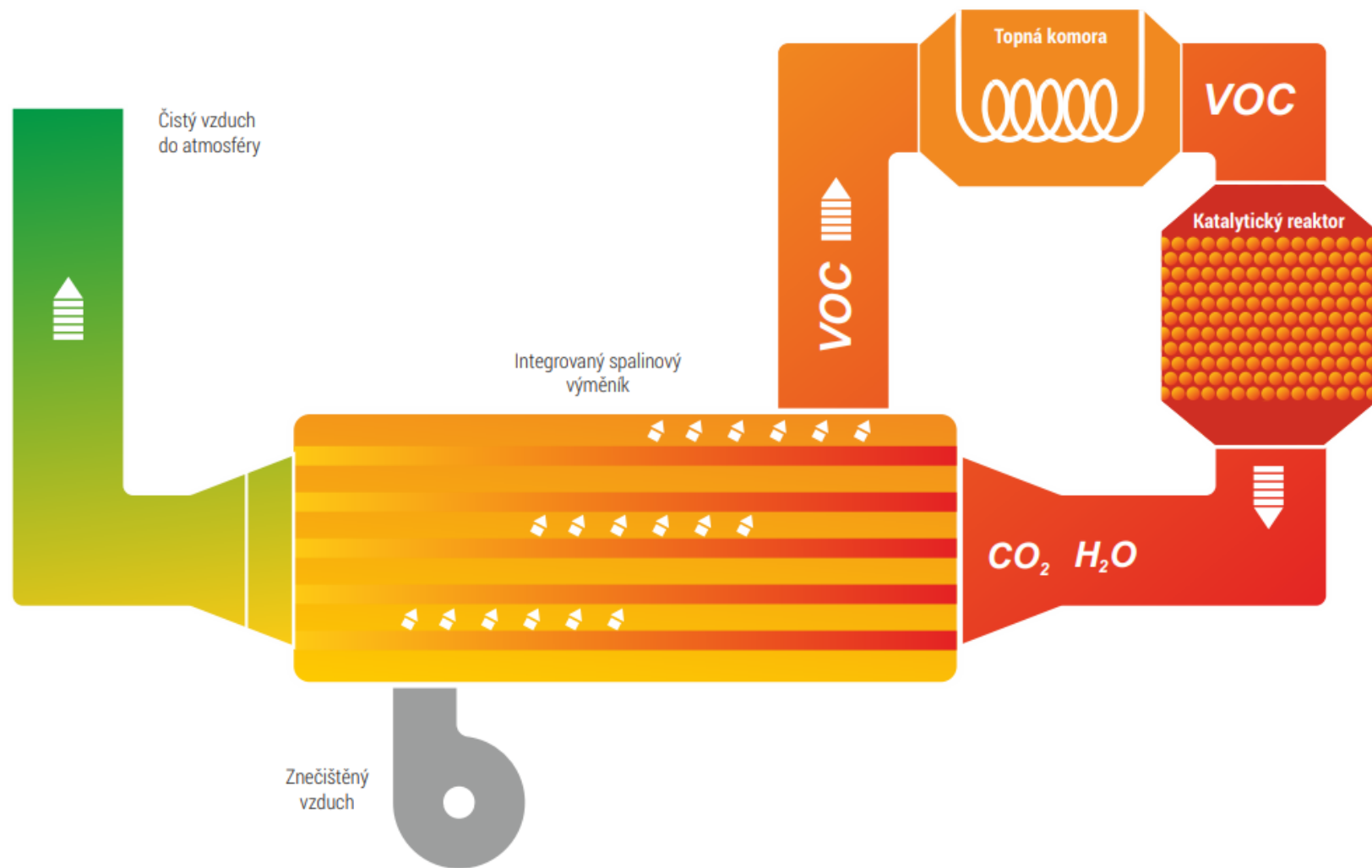
Potřebný objem katalyzátoru

$$V_{\text{cat}} = \frac{10\,000}{20\,000} = 0,5 \text{ m}^3$$



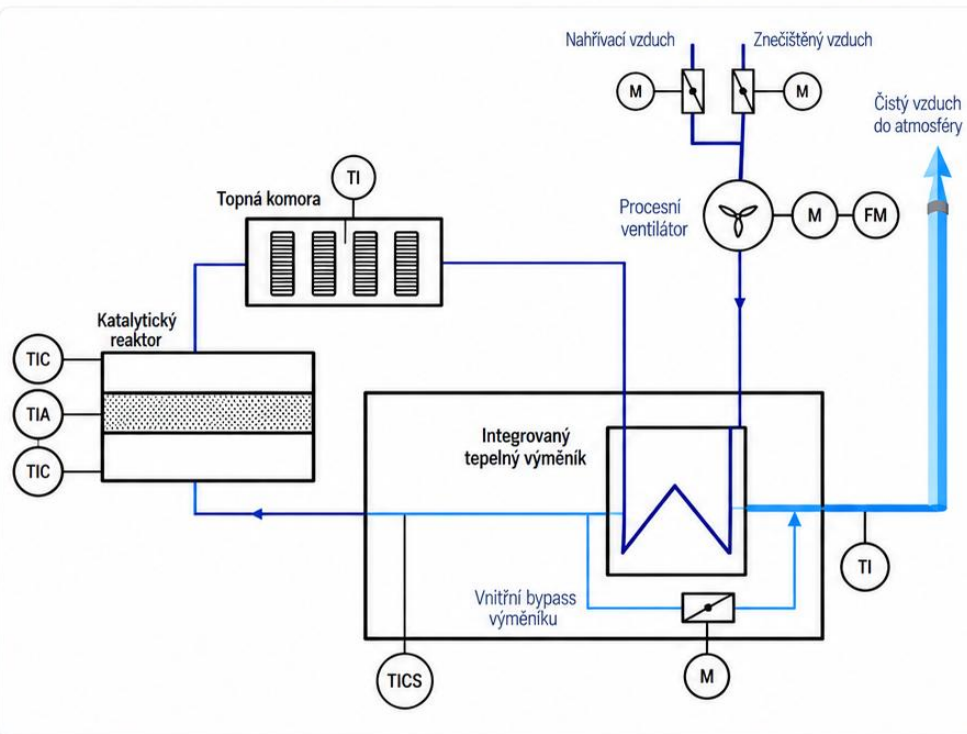
Správná volba GHSV zajišťuje dostatečný kontakt plynu s katalyzátorem a požadovanou účinnost oxidace.

Rekuperativní katálytická oxidace (KNV) – princip funkce



Rekuperativní katalytická oxidace

Čištění VOC katalytickou oxidací s rekuperací tepla



Princip

Znečištěný vzduch s VOC prochází katalytickým reaktorem, kde jsou VOC oxidovány na CO_2 a H_2O při nižší teplotě (obvykle nad 300°C). Teplo vznikající katalytickou reakcí je předáváno v integrovaném tepelném výměníku přicházejícímu znečištěnému vzduchu. Za výměníkem následuje topná komora, která v případě potřeby ohřívá vzduch na požadovanou teplotu reakce.

Tato technologie dosahuje běžné účinnosti odstranění VOC nad 99 %. Hranice autotermního provozu se obvykle pohybuje na úrovni cca 2 g TOC/m^3 .



Klíčové parametry

	Teplota reakce	obvykle $> 300^\circ\text{C}$
	Rekuperace tepla	65 – 70 %
	Účinnost odstranění VOC	$> 99 \%$
	Vhodné koncentrace VOC	cca $2 - 6 \text{ g/m}^3$
	Průtoky	jednotky až desítky tisíc m^3/h
	Katalytický reaktor	granulovaná náplň nebo voštinové monolity
	Autotermní provoz	od cca 2 g TOC/m^3



Hlavní výhody

- ✓ relativně nízká pořizovací cena ve vztahu k objemům čištěného vzduchu
- ✓ robustnost zařízení a spolehlivost provozu
- ✓ flexibilita zařízení z hlediska koncentrací VOC i průtoků vzduchu
- ✓ vysoká účinnost odstraňování emisí VOC
- ✓ vhodná pro nízké teploty, při kterých se netvoří oxidy dusíku
- ✓ velmi nízké provozní náklady při aut. provozu



Důležité upozornění

- je nutné zajistit kvalitu vstupního vzduchu (bez látek deaktivujících katalyzátor)
- technologii lze vytápět jak elektricky, tak plynem



Nižší oxidační
teplota



Široký
ekonomický rozsah



Autotermně
cca 2–6 g TOC/m³



Trubkový
výměník



Interní
bypass



Obtížné
čištění úsad



Ohřev
elektrinou i plynem



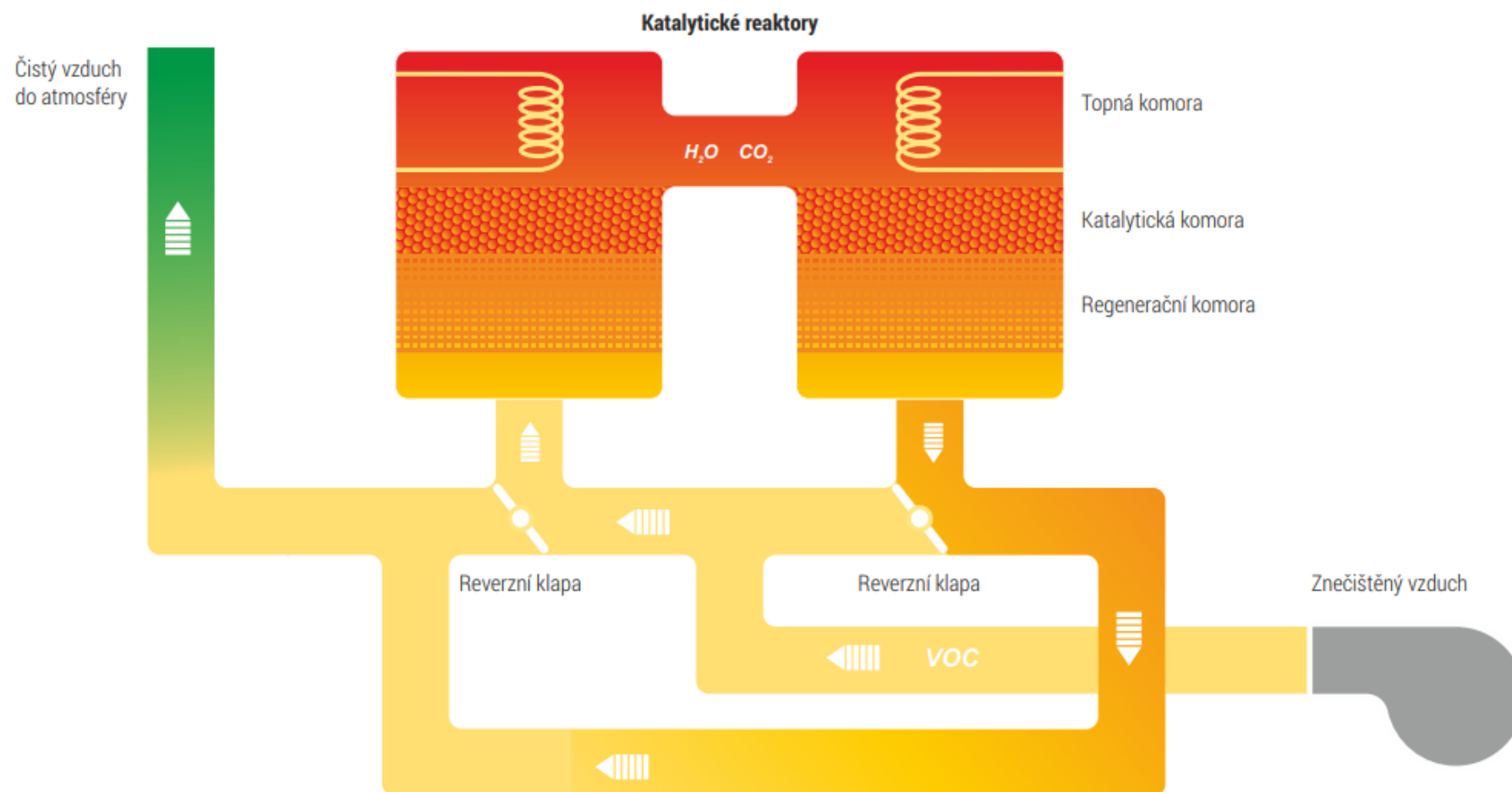
Citlivost na
katalytické jedy



Robustní
katalyzátor

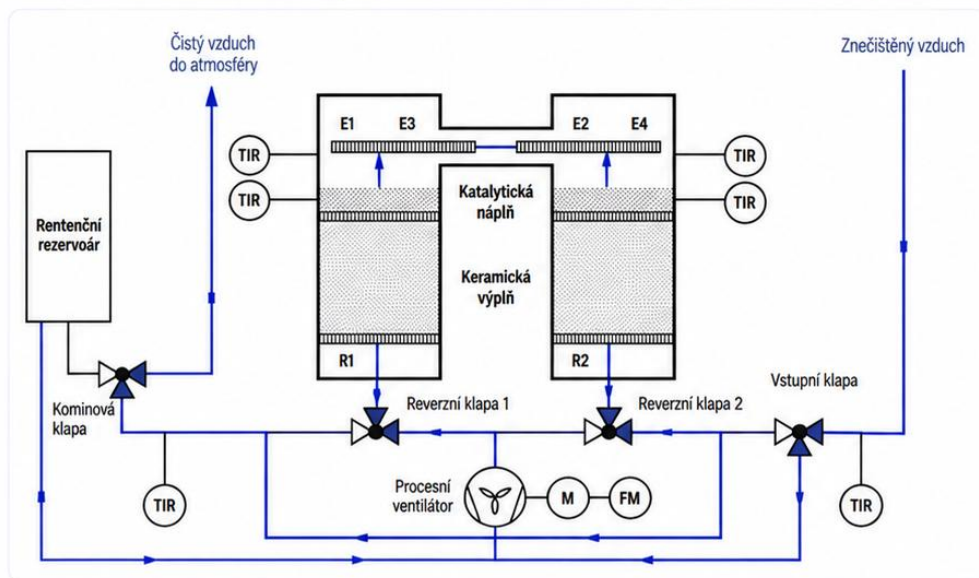
3.2.4. Regenerativní kalytická oxidace (RCO)

Regenerativní katalytická oxidace (RCO) – princip funkce



Regenerativní katalytická oxidace (RCO)

Čištění VOC katalytickou oxidací s regenerací tepla



Princip

Znečištěný vzduch s VOC prochází dvěma reaktory s keramickou výplní, na kterou je nanesena katalytická náplň. Při průchodu přes katalytickou vrstvu jsou VOC oxidovány na CO_2 a H_2O při nižší teplotě (obvykle nad 300°C). Uvolněné teplo se s účinností cca 95 % akumuluje v keramické výplni druhého reaktoru. Směr proudění se periodicky přepíná, takže keramická výplň obou reaktorů se střídavě ohřívá a ochlazuje. Tato technologie dosahuje běžné účinnosti odstranění VOC nad 99 %.



Typická oblast použití

Vhodná pro čištění plynů s nízkým a středním obsahem VOC, cca $0,3 - 3 \text{ g/m}^3$. Z hlediska objemu čištěného vzduchu se jedná o jednotky až desítky tisíc m^3/h . Typické zdroje emisí jsou lakovny, laminovny, povrchové úpravy materiálů a výrobní, tiskárny a chemický a farmaceutický průmysl.



Klíčové parametry

	Teplota reakce	obvykle $> 300^\circ\text{C}$
	Rekuperace tepla	cca 95 %
	Účinnost odstranění VOC	$> 99 \%$
	Vhodné koncentrace VOC	cca $0,3 - 3 \text{ g/m}^3$
	Průtoky	jednotky až desítky tisíc m^3/h
	Uspořádání	dva reaktory s keramickou výplní
	Autotermní provoz	od cca $0,55 \text{ g TOC/m}^3$



Hlavní výhody

- ✓ nejnižší provozní náklady přímého spalování v oblasti typického použití
- ✓ přijatelná pořizovací cena
- ✓ robustnost zařízení a spolehlivost provozu při vysoké účinnosti oxidace
- ✓ flexibilita zařízení z hlediska koncentrací i průtoků vzduchu
- ✓ možnost i krátkodobých odstávek bez potřeby provozního vychlazení a okamžité uvedení do provozu bez potřeby předehřívání



Důležité upozornění

- je nutné zajistit kvalitu vstupního vzduchu (bez látek deaktivujících katalyzátor)
- technologii lze vytápět jak elektricky, tak plynem



Nejvýhodnější
pro nízké koncentrace



Autotermně už od
cca 300 mg TOC/m³



Vysoká regenerace
tepla



Nízká provozní
teplota



Okamžitý stand-by



Rychlé odstavení



Retenční komora
proti VOC peakům



Elektrina i plyn



Katalytické jedy



Odolné katalyzátory
a robustní katalytická náplň

Katalytické náplně – doporučení podle typu VOC

Volba katalyzátoru závisí na složení plynu, koncentraci VOC a přítomnosti případných katalytických jedů.

Platina (Pt)



- široké spektrum VOC
- aromatické látky
- vysoká účinnost
- dobrá tolerance k síře
- nízké pracovní teploty

Palladium (Pd)



- zejména krátké alkany
- velmi účinné pro obtížně oxidovatelné VOC
- vysoká aktivita
- vhodné pro nízké koncentrace

Měď – mangan (Cu–Mn)



- běžná rozpouštědla (alkoholy, ketony, estery)
- široké spektrum VOC
- ekonomické řešení
- dobrá tolerance ke křemíku (organosilikony, odpěňovače)

Manganové oxidy (MnO_x)



- vysoká tolerance k halogenům (Cl, Br, F)
- vhodné pro halogenované VOC
- robustní v náročných podmínkách

Doporučení pro vybrané VOC

Látka (VOC)	Doporučený typ katalyzátoru	Aktivní složka	Poznámka	Typická pracovní teplota (°C)
Ethanol	Cu–Mn	Cu, Mn	snadno oxidovatelný alkohol	200 – 350
Methanol	Cu–Mn	Cu, Mn	snadno oxidovatelný alkohol	200 – 350
Aceton	Cu–Mn	Cu, Mn	keton	200 – 350
MEK (2-butanon)	Cu–Mn	Cu, Mn	keton	200 – 350
Ethylacetát	Cu–Mn	Cu, Mn	ester	200 – 350
Toluen	Pt	Pt	aromatická látka	200 – 350
Xyleny	Pt	Pt	aromatické látky	200 – 350
Styren	Pt	Pt	aromatická látka	200 – 350
DME (dimethylether)	Cu–Mn / Pd	Cu, Mn / Pd	ether, oxidovatelný	200 – 350
Pentan	Pd	Pd	alkan (hůře oxidovatelný)	250 – 400



Pracovní teplota

- typicky 200 – 400 °C
- dle typu katalyzátoru až 650 °C
- volí se podle složení plynu a požadované konverze



Důležité provozní faktory

- složení VOC a jejich koncentrace
- přítomnost O₂, vody, síry, halogenů, křemíku a dalších katalytických jedů
- požadovaná konverze
- tlakový spád
- konkrétní aplikační podmínky

Katalytické náplně – typy a vlastnosti

Různé konstrukční tvary pro různé aplikace.

Sypané náplně

Keramické tvary s katalytickou vrstvou, vhodné zejména pro rekuperativní aplikace.



Peletky

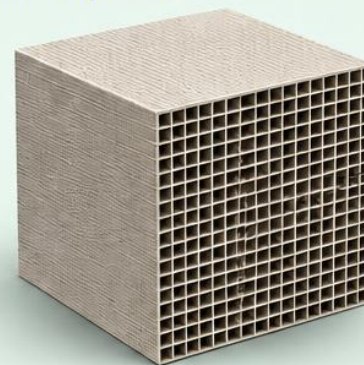


Kuličky
(typicky 3–8 mm)

- + Výrazně nižší pořizovací cena
- + Vhodné pro rekuperativní aplikace
- Vyšší tlaková ztráta
- Riziko mikropohybů náplně
- Mechanické opotřebení, vznik prachu
- Náročnější ukotvení v rámci RCO

Voštinové monolity

Moderní řešení s nízkým odporem, vhodné zejména pro RCO, ale i pro rekuperativní aplikace.



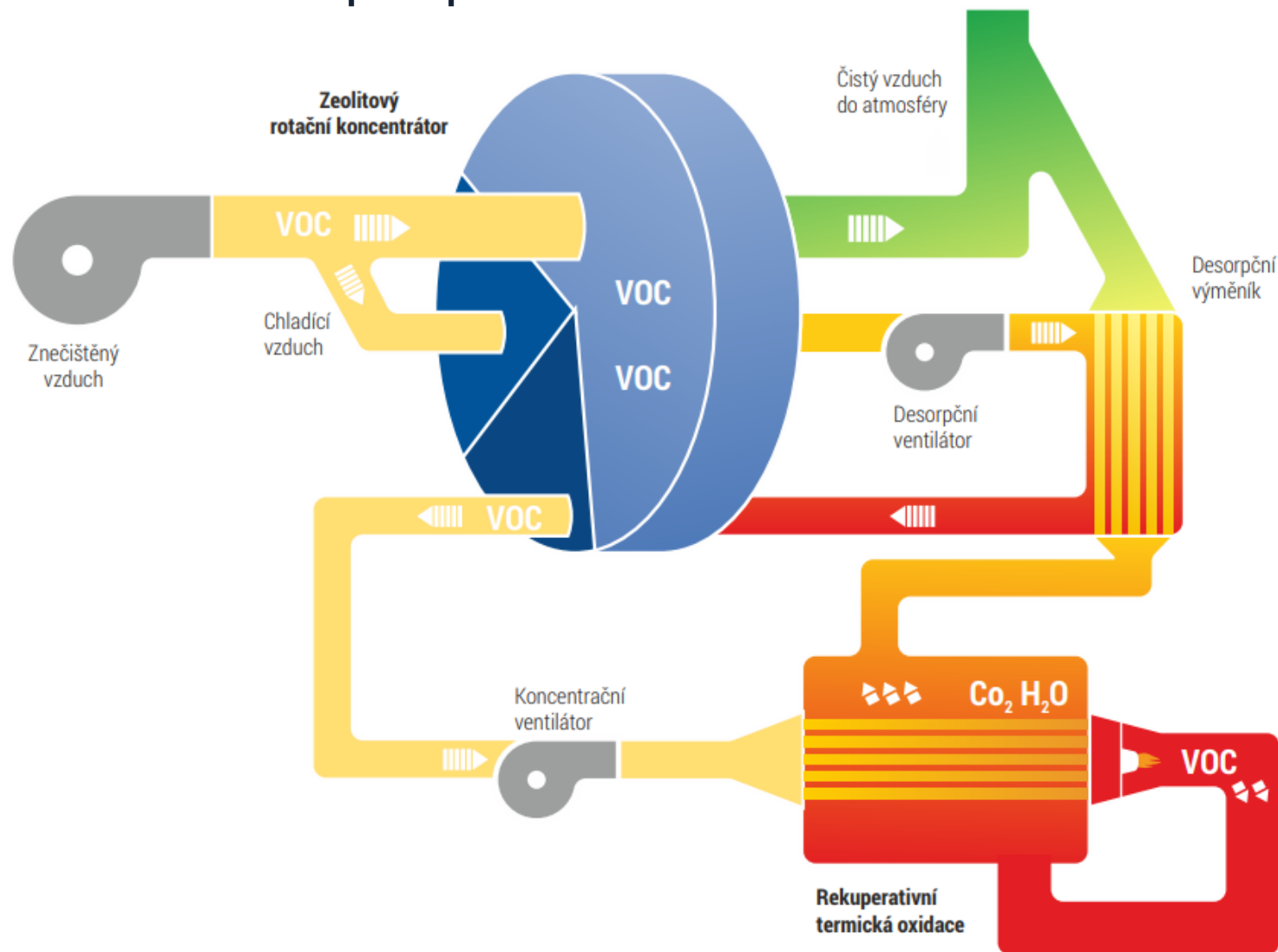
Monolit – hranatý

- + Nízká tlaková ztráta (typicky v jednotkách kPa)
- + Vhodné pro velké průtoky
- + Mechanicky stabilní, bez pohybu jednotlivých částic
- + Moderní řešení zejména pro RCO
- Vyšší pořizovací cena
- Používají se i v rekuperativních aplikacích

3.3. Kombinované systémy

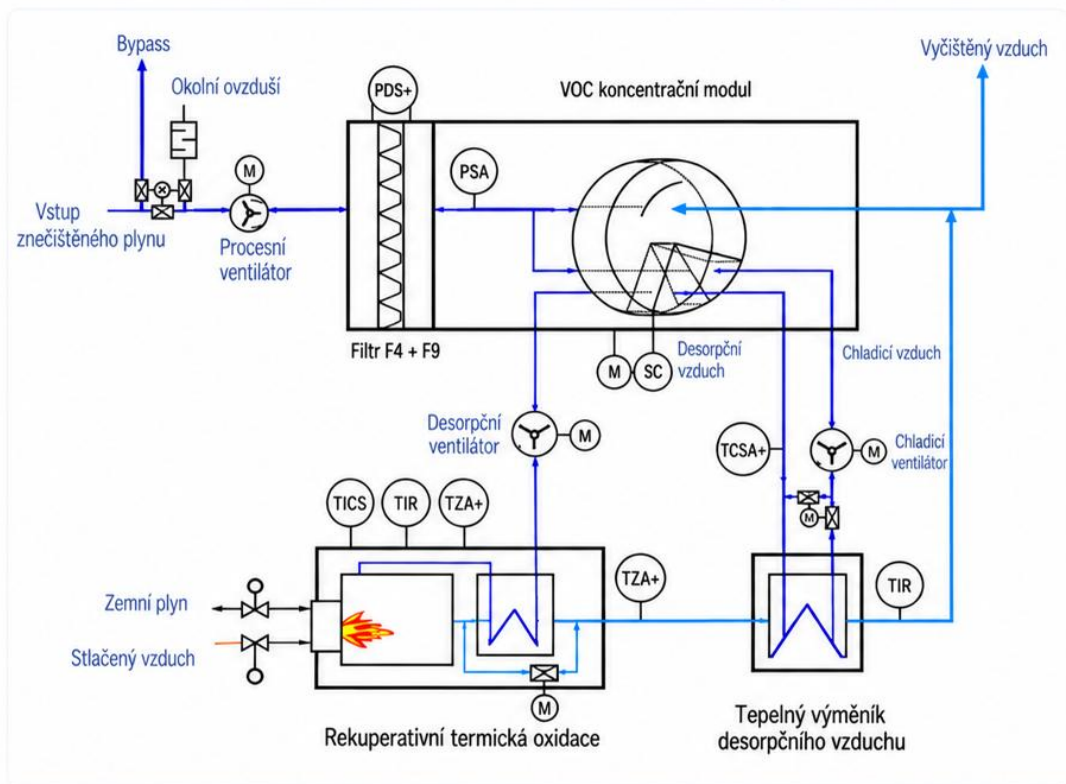
Zeolitový rotační koncentrátor

Zeolitový rotační koncentrátor – princip funkce



Zeolitový rotační koncentrátor

Záchyt VOC na rotor s následnou regenerací



Princip

Znečištěný vzduch s VOC prochází rotačním koncentrátorem, ve kterém jsou látky adsorbovány na vrstvě zeolitu na povrchu rotoru. Rotor je rozdělen na tři zóny: adsorpční (záchyt VOC), chladicí a desorpční. Zeolitová výplň se kontinuálně otáčí mezi jednotlivými zónami. Nasycená část rotoru je v desorpční zóně proplachována ohřátým vzduchem, kterým se VOC uvolňují ve formě koncentrovaného proudu. Koncentrovaný plyn je následně veden do spalovací komory (např. rekuperativní termické oxidace), kde jsou VOC oxidovány na CO_2 a H_2O .

EKOLOGICKÁ ŘEŠENÍ



Klíčové parametry

	Vhodné koncentrace VOC	50 – 500 mg/m ³
	Průtoky	desítky až stovky tisíc m ³ /h
	Účinnost záchytu VOC	cca 95 %
	Adsorpční materiál	zeolit (syntetický hlinitokřemičitan)
	Uspořádání	rotační disk (rotor) – 3 zóny
	Způsob desorpce	dle zvoleného způsobu (RTO horký bypass / výměník / ohříváč)



Hlavní výhody

- ✓ nízká pořizovací cena ve vztahu k vysokým objemům čištěného vzduchu
- ✓ nejnižší provozní náklady v oblasti typického použití
- ✓ požární bezpečnost (ve srovnání s aktivním uhlím)
- ✓ dlouhá životnost adsorpčního materiálu



Důležité upozornění

- technologie není příliš flexibilní
- vhodná pro kontinuální provoz bez velkých výkyvů koncentrací a průtoků



EKOLOGICKÁ ŘEŠENÍ



Není samostatná
oxidační technologie



Koncentruje VOC
před oxidací



Pro velmi nízké
koncentrace VOC



Velké až extrémní
průtoky



Výrazné snížení průtoku
do spalovačky



Koncentrační poměr
typicky 5–20×



Nejčastěji v kombinaci
s RTO / RCO



Nízké provozní náklady



Citlivost na vysokovroucí látky



Riziko zanášení zeolitu



Návrh na konkrétní VOC



Nutná filtrace TZL



Desorpce horkým vzduchem
TNV / RTO / výměník / hořák



Vhodné pro kontinuální provoz

4. EKONOMIKA

Provozní náklady na likvidaci VOC v lakovně

Modelový příklad: 10 000 m³/h, 300 mg TOC/m³, provoz 2 směny (4 000 h/rok)

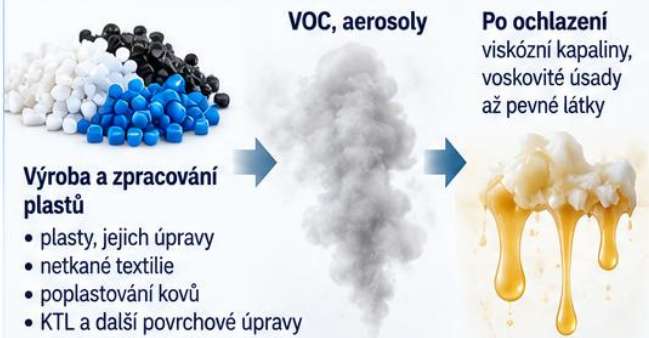
Technologie	Aktivní uhlí (výměna)	Aktivní uhlí (reaktivace)	RCO (autotermní od 500 mg/m ³)	RTO (autotermní od 1,2 g/m ³)
Vstupní koncentrace TOC	300 mg/m ³	300 mg/m ³	300 mg/m ³	300 mg/m ³
Roční množství VOC	12 t/rok	12 t/rok	12 t/rok	12 t/rok
Hlavní spotřeba	Nové aktivní uhlí	Reaktivace AU (+ doplnění)	Zemní plyn	Zemní plyn
Množství/spotřeba za rok	60 000 kg AU	60 000 kg AU (+ 10 % doplnění)	≈ 28 000 m ³	≈ 50 000 m ³
Orientační jednotková cena	80 Kč/kg (+ odpad 15 Kč/kg)	30 Kč/kg (+ doprava 10 Kč/kg)	12 Kč/m ³	12 Kč/m ³
Roční provozní náklady	5,8 mil. Kč/rok	3,0 mil. Kč/rok	0,34 mil. Kč/rok	0,60 mil. Kč/rok

Závěr: Při 300 mg/m³ jsou provozní náklady na plyn (RCO, RTO) výrazně nižší než u aktivního uhlí.

Pozn.: Ceny jsou orientační.
Skutečné náklady závisí na složení VOC,
účinnosti zařízení a aktuálních cenách energií.

5. PATÁLIE

1 Vysokovroucí organické látky Problém zanášení



Zanesené potrubí Zanesené filtry Úsady na teplosměnných plochách / katalyzátoru

Důsledky

- zanášení potrubí, filtrů, ventilátorů, výměníků i technologie
- úsady na teplosměnných médiích nebo katalyzátoru
- zhoršení provozu a účinnosti

Řešení

- předúprava vzdušiny (filtrace, kondenzace, vypírka)
- vhodné teploty / přehřev
- volba vhodného teplosměnného média
- pravidelné čištění a údržba
- individuální řešení – univerzální postup neexistuje

2 Organokřemičité látky Problém SiO₂



Zanesené keramické lože (RTO) Vrstva SiO₂ na katalyzátoru

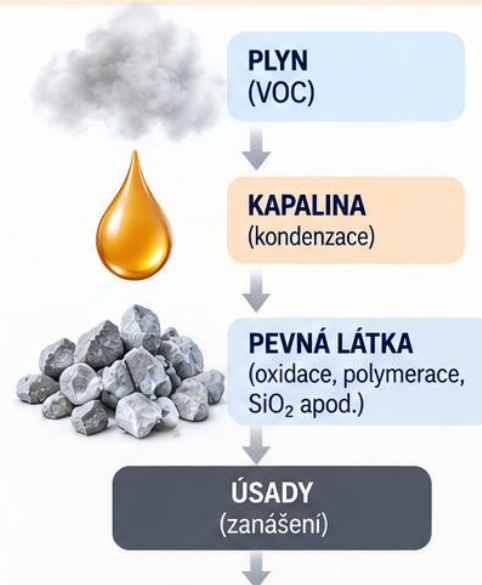
zvýšení tlakové ztráty, až mechanické poškození omezuje kontakt s aktivním povrchem

Závažnost problému

- nízké koncentrace – lze zachytávat předfiltrací
- střední koncentrace – konstrukční opatření + pravidelný servis
- vysoké koncentrace – zásadní technologický problém bez jednoduchého řešení
- každý zdroj je prakticky samostatný vývojový úkol

3 Proč jsou tyto aplikace obtížné? Nejde jen o koncentraci VOC

Největším problémem nemusí být koncentrace VOC, ale změna skupenství nebo vznik pevné fáze.



PROVOZNÍ PROBLÉMY

- vyšší tlaková ztráta
- snížení účinnosti
- častější čištění a údržba
- riziko poškození zařízení

Těžké aplikace VOC vyžadují komplexní řešení už na úrovni charakteru odpadní vzdušiny.

Katalytické jedy

Látky, které snižují aktivitu katalyzátoru a ohrožují účinnost katalytické oxidace VOC



I nízké koncentrace některých látek mohou výrazně snížit aktivitu katalyzátoru.

Síra a její sloučeniny



- H_2S
- SO_2
- merkaptany
- další sírné organické látky

Silně se vážou na aktivní místa katalyzátoru.

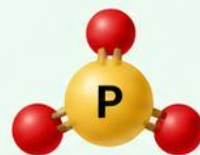
Halogenované sloučeniny



- organické a anorganické sloučeniny chloru, bromu, fluoru

Mohou způsobit dočasnou deaktivaci, ale lze je termicky rozložit a katalyzátor regenerovat při vyšší teplotě.

Fosfor a jeho sloučeniny



- organické fosfáty
- anorganické fosfory

Silně se adsorbují na aktivní povrch a snižují aktivitu.

Sloučeniny křemíku



- siloxany (např. z olejů, tmelů, silikonů)
- další sloučeniny křemíku

Vytvářejí vrstvu SiO_2 na povrchu katalyzátoru, zanášejí póry.

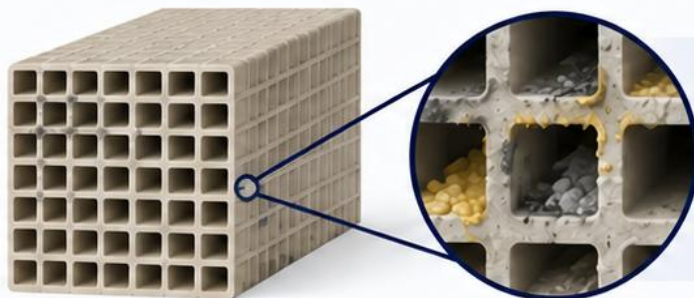
Těžké kovy a jejich sloučeniny



- olovo, rtuť
- arsen, kadmium
- další těžké kovy

Chemicky deaktivují aktivní složku katalyzátoru.

H_2S
Cl/Br
P
Si
těžké kovy
prach, oleje



Usazeniny a chemické reakce na povrchu katalyzátoru blokují aktivní místa a snižují průchodnost kanálků.



Doporučení

- Znat kompletní složení odpadního plynu včetně stopových příměsí.
- V případě rizikových látek použít předúpravu plynu (filtrace, odlučování, promývání).
- Volit vhodný typ katalyzátoru podle složení plynu.



Katalytické jedy mohou vést k nevratnému poškození katalyzátoru a výraznému poklesu účinnosti.

Prevence je vždy levnější než výměna katalyzátoru.

6. ZAMYŠLENÍ

CO BY MĚLO BÝT CÍLEM?

Nejvyšší skutečný environmentální přínos – při rozumné spotřebě zdrojů a energie.



ČISTŠÍ OVZDUŠÍ

- Snížit emise VOC na úroveň environmentálně dostatečnou.
- Chráníme zdraví lidí a životní prostředí.



EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ ZDROJŮ

- Upřednostnit energeticky nejefektivnější řešení.
- Minimalizovat spotřebu zemního plynu a elektrické energie.
- Snížit produkci CO₂.



EKONOMICKÁ UDRŽITELNOST

- Rozumné investiční náklady.
- Přiměřené provozní náklady.
- Dlouhá životnost technologie.



SPOLEHLIVÝ A STABILNÍ PROVOZ

- Dlouhodobě plnit stanovené limity.
- Minimalizovat provozní rizika.
- Využívat ověřené a robustní technologie.



UDRŽITELNÝ ROZVOJ

- Zohlednit dopady na ekosystémy a klimatické cíle.
- Preferovat řešení s nižší uhlíkovou stopou.
- Myslet v dlouhodobém horizontu.



VYVÁŽENÝ PŘÍSTUP

- Nastavovat emisní limity s ohledem na reálné podmínky a dostupné technologie.
- Nepreferovat co nejnižší číslo za každou cenu, ale nejvyšší celkový přínos.
- Vnímat souvislosti – emise, energie, náklady, provoz, legislativa.

„Cílem ochrany ovzduší by nemělo být dosažení co nejnižšího čísla za každou cenu, ale dosažení nejvyššího skutečného environmentálního přínosu při rozumné spotřebě zdrojů a energie.“

7. DOTAZY