VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

DATUM: 22. ZÁŘÍ 2026



JAK ČISTÝ JE OPRAVDU ZELENÝ VODÍK?

TECHNICKÁ ANALÝZA

MĚŘENÍ A HODNOCENÍ ČISTOTY VODÍKU

VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

SNÍMEK 01

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

Obsah

01 UHLÍKOVÁ STOPA VS. CHEMICKÁ ČISTOTA

02 DVOJÍ TVÁŘ TECHNOLOGIE PEM

03 CESTA H_2: Z ELEKTRÁRNY DO VOZIDLA

04 KONTAMINACE V DISTRIBUČNÍM ŘETĚZCI

05 PARADOX 99,97% ČISTOTY A RIZIKA

06 LIMITY NEČISTOT DLE ISO 14687

07 SPEKTRUM SLEDOVANÝCH LÁTEK

08 ROLE VYSOKOTLAKÉHO ODBĚRU VZORKŮ

09 ANALYTICKÁ ŘEŠENÍ VEC

10 POSTUP ODBĚRU NA STANICI

11 CITLIVOST MEA A PALIVOVÉHO ČLÁNKU

12 MECHANISMUS OTRAVY CO

13 VLIV H_2S NA KATALYZÁTOR

14 NH_3 A PROTONOVÁ VODIVOST

15 ANALÝZA DAT Z VODÍKOVÉHO POLYGONU

16 SHRNUTÍ

VŠB TE
UN
OS

Uh
che

ZELENÝ

- **ENVI**

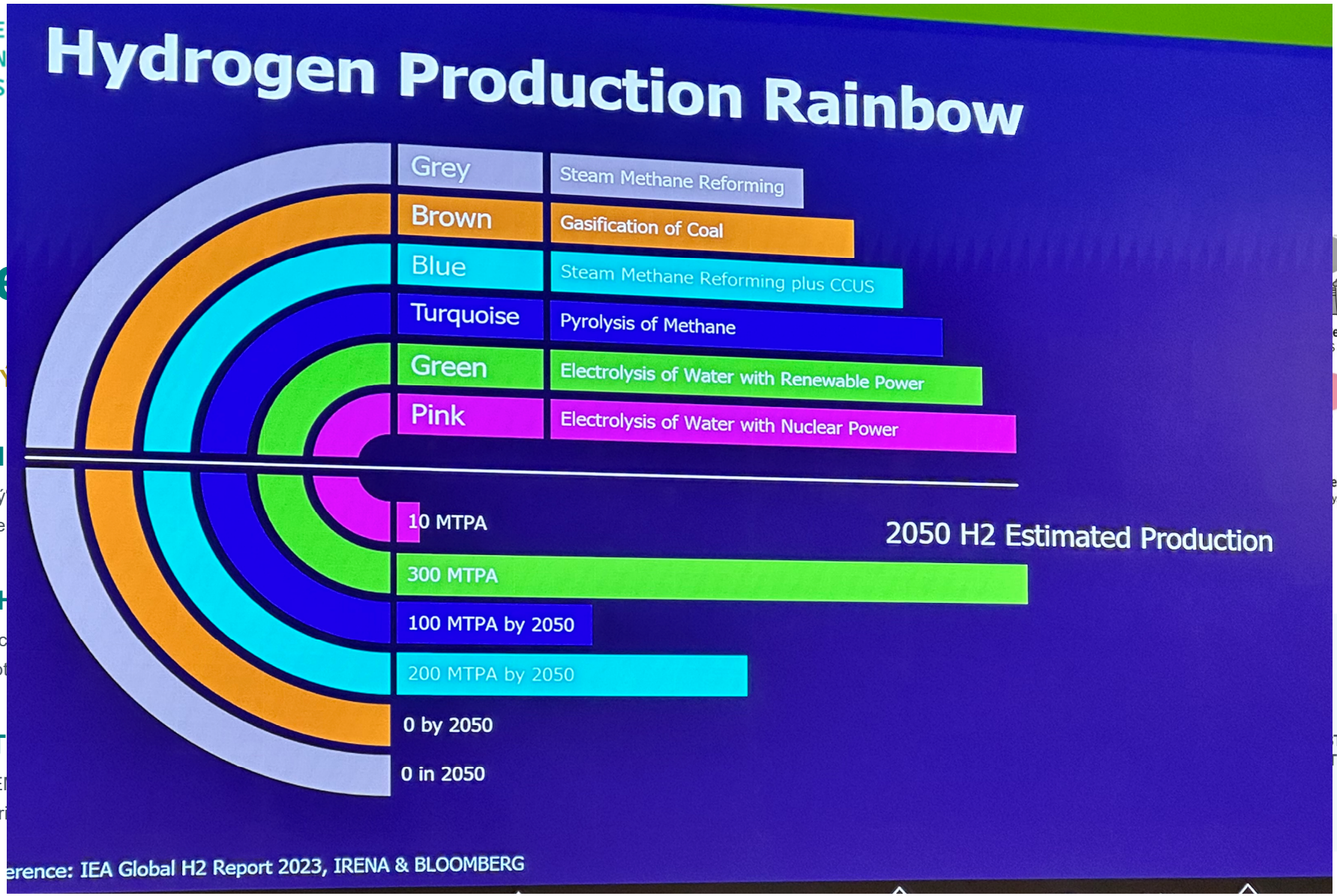
  „Zelený
  energie

- **TECH**

  Chemic
  nečistot

- **KRIT**

  Pro PE
  jsou stri



TOTU
TÉMY PEM

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

DVOJÍ TVÁŘ TECHNOLOGIE PEM

Protonvýměnná membrána se projevuje ve dvou symetrických procesech: v elektrolyzérech pro výrobu vodíku a v palivových článcích pro spotřebu energie. Ačkoliv sdílejí materiály, jejich požadavky na čistotu jsou kriticky rozdílné.

FÁZE VÝROBY

PEM elektrolyzér

Štěpení H_2O na ekologický zelený vodík pomocí elektrické energie.

MATERIÁLOVÁ SYMETRIE

Sdílené komponenty

Platinové katalyzátory a vysoce specializované membrány.

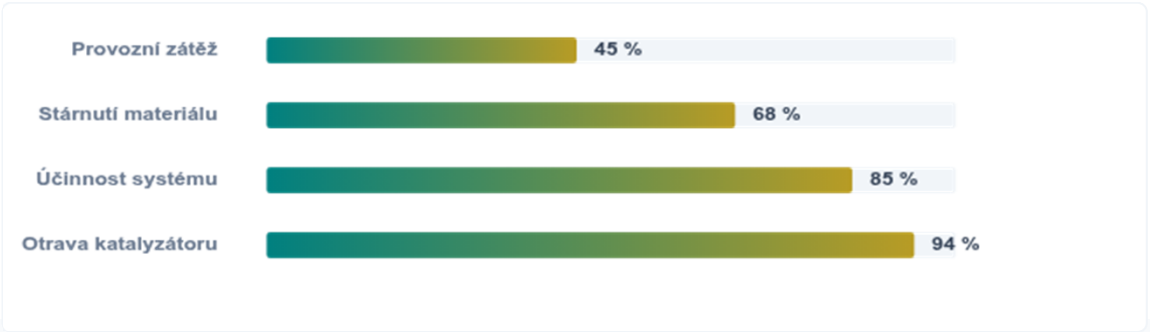
FÁZE SPOTŘEBY

PEM palivový článek

Zpětná přeměna H_2 na elektrickou energii a čistou vodu.

TECHNOLOGICKÝ CYKLUS

CITLIVOST NA NEČISTOTY (%)



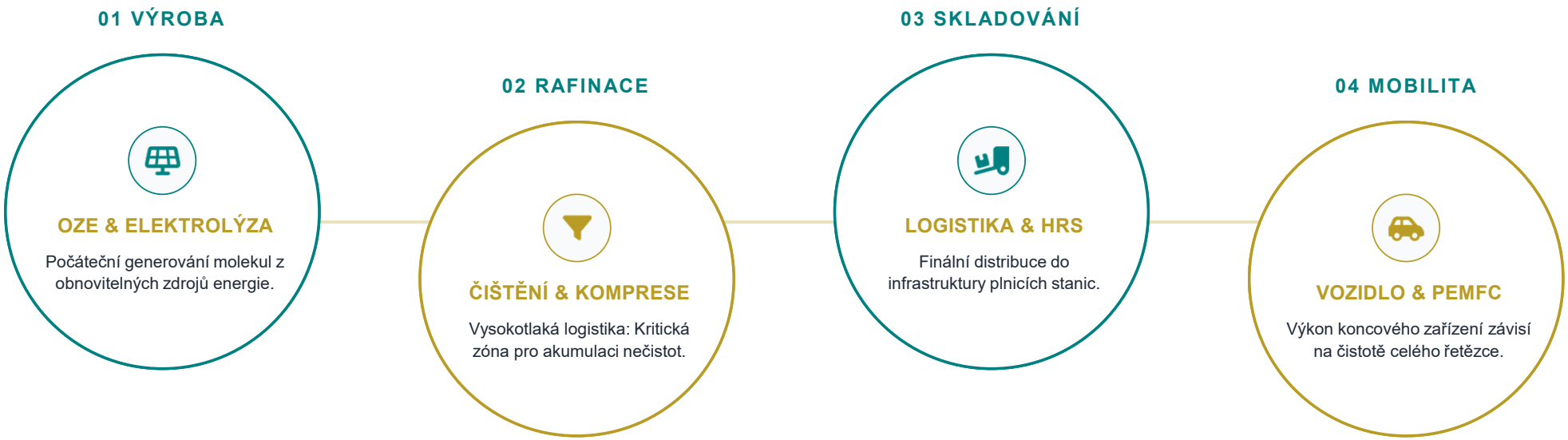
KRITIČNOST ČISTOTY

- Nečistoty z výroby, zpracování nebo skladovacích řetězců představují **přímou hrozbu**.
- Výrazné snížení výkonu palivového článku a zkrácení životnosti vnitřních komponent.
- Nutnost monitorování v řádech 1 ppm pro specifické kontaminanty.

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

CESTA MOLEKULY H_2 Z ELEKTRÁRNY DO VOZIDLA

Každá fáze technologického řetězce, zejména vysokotlaká logistika, představuje riziko akumulace nečistot ovlivňujících výkon PEMFC.



- Analýza čistoty vodíku: Monitoring souladu s normou ISO 14687.

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

Kritické body kontaminace v distribuci

Cesta vodíku od výroby k palivovému článku je doprovázena potenciálními zdroji znečištění. Každá fáze představuje specifické výzvy pro udržení extrémní čistoty.

ANALÝZA ČISTOTY VODÍKU

Kontaminanty, jako jsou uhlovodíky z maziv kompresorů, představují vážné riziko otrávení katalyzátoru palivového článku.

FÁZE DISTRIBUCE

Kompresory

Maziva vnášejí uhlovodíky, které ohrožují integritu katalyzátoru.

Infrastruktura

Degradace těsnění a povrchy potrubí či ventilů uvolňují pevné částice.

Plnicí stanice (HRS)

Kritické koncové rozhraní; čistota plnicí pistole a nádrže je klíčová.

Pokročilé materiály

Výběr komponent nádrží a trysek pro prevenci nežádoucích chemických reakcí.

PARADOX 99,97% ČISTOTY

MĚŘENÍ STOPOVÝCH NEČISTOT VS. TOLERANCE SYSTÉMU

01. NOMINÁLNÍ ČISTOTA

H_2 = 99,97%

Je skutečně čistý? Zbývajících **0,03 %** skrývá až **300 ppm** cizích složek, které ohrožují přesné systémy.

02. KATALYTICKÉ POŠKOZENÍ

Pro **palivové články PEM** jsou stopové nečistoty vysoce škodlivé. Blokují aktivní místa katalyzátoru, což způsobuje trvalou degradaci a ztrátu účinnosti.

03. EXTRÉMNÍ TOLERANCE

Oxid uhelnatý (CO):	**≤ 0,2 ppm**
Amoniak (NH_3):	**≤ 0,1 ppm**

04. KRITICKÉ JEDY

SLOUČENINY SÍRY (H_2S)

≤ 0,004 ppm

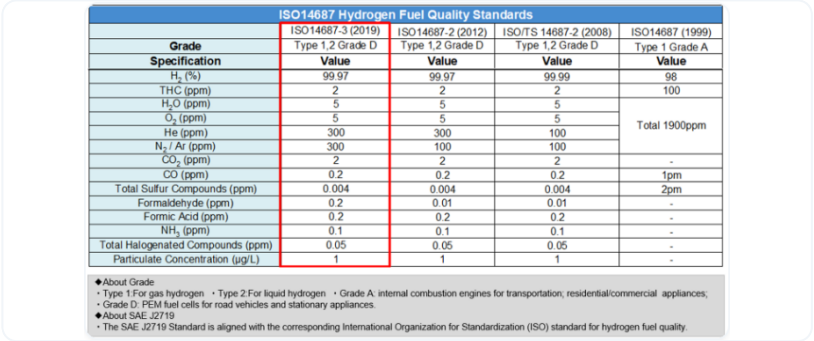
"Čistý podle normy neznamená dostatečně čistý pro katalýzu."

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

LIMITY NEČISTOT (ISO 14687)

Složka nečistoty	Limit (ppm, v/v)
Oxid uhelnatý (CO)	**≤ 0,2**
Sirovodík (H_2S)	**≤ 0,004**
Amoniak (NH_3)	**≤ 0,1**
Voda (H_2O) / Kyslík (O_2)	≤ 5 / ≤ 5
Celkové uhlovodíky (jako CH_4)	≤ 2
Dusík (N_2)	≤ 100
Halogenované sloučeniny	≤ 0,05

- *Tyto přísné limity jsou pro PEM palivové články zásadní k prevenci otravy platinového katalyzátoru a degradace membrány.*



ISO14687 Hydrogen Fuel Quality Standards

	ISO14687-3 (2019)	ISO14687-2 (2012)	ISO/TS 14687-2 (2008)	ISO14687 (1999)
Grade	Type 1,2 Grade D	Type 1,2 Grade D	Type 1,2 Grade D	Type 1 Grade A
Specification	Value	Value	Value	Value
H_2 (%)	99.97	99.97	99.99	98
THC (ppm)	2	2	2	100
H_2O (ppm)	5	5	5	Total 1900ppm
O_2 (ppm)	5	5	5	
He (ppm)	300	300	100	
N_2 / Ar (ppm)	300	100	100	
CO_2 (ppm)	2	2	2	-
CO (ppm)	0.2	0.2	0.2	1pm
Total Sulfur Compounds (ppm)	0.004	0.004	0.004	2pm
Formaldehyde (ppm)	0.2	0.01	0.01	-
Formic Acid (ppm)	0.2	0.2	0.2	-
NH_3 (ppm)	0.1	0.1	0.1	-
Total Halogenated Compounds (ppm)	0.05	0.05	0.05	-
Particulate Concentration (μg/L)	1	1	1	-

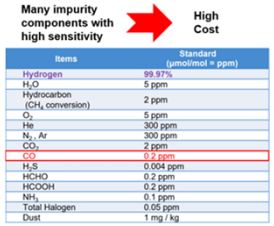
◆About Grade
• Type 1:For gas hydrogen • Type 2:For liquid hydrogen • Grade A: internal combustion engines for transportation; residential/commercial appliances;
• Grade D: PEM fuel cells for road vehicles and stationary appliances.
◆About SAE J2719
• The SAE J2719 Standard is aligned with the corresponding International Organization for Standardization (ISO) standard for hydrogen fuel quality.

KRITICKÝ LIMIT CO

0,2 ppm

0,004
H_2S (PPM)

0,1
NH_3 (PPM)



Items	Standard (μmol/mol = ppm)
Hydrogen	99.97%
H_2O	5 ppm
Hydrocarbon (CH_4 conversion)	2 ppm
O_2	5 ppm
He	300 ppm
N_2, Ar	300 ppm
CO_2	2 ppm
CO	0.2 ppm
H_2S	0.004 ppm
HCHO	0.2 ppm
HCOOH	0.2 ppm
NH_3	0.1 ppm
Total Halogen	0.05 ppm
Dust	1 mg / kg

KOMPLEXNÍ SPEKTRUM *SLEDOVANÝCH LÁTEK V H_2*

KRITICKÉ NEČISTOTY A DOPADY

THC / Uhlovodíky
Usazeniny na katalyzátoru, blokace aktivních míst PEMFC.

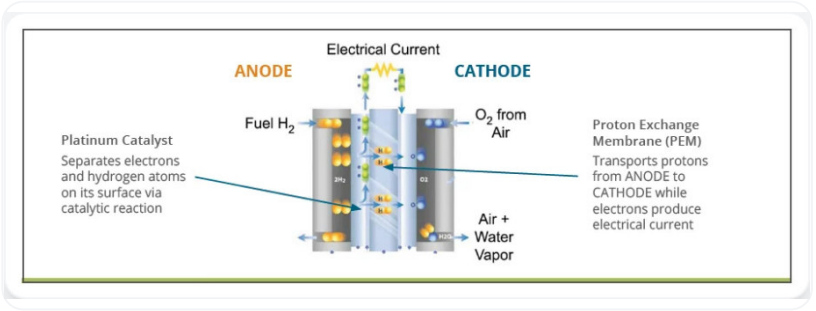
Voda (H_2O) & O_2
Vliv na membránu, degradace komponent, snížení čistoty.

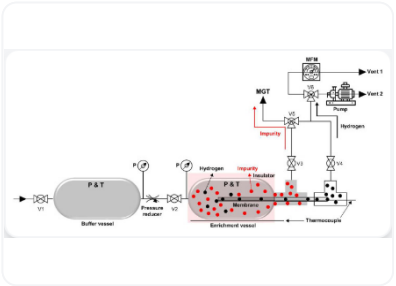
Dusík (N_2)
Inertní plyn, ředění H_2 v anodě, pokles parciálního tlaku.

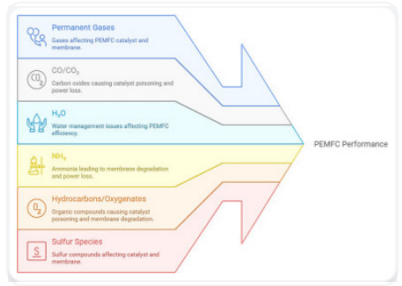
Halogeny (HCl)
Extrémní koroze, nevratné poškození membrány v sub-ppb.

ANALYTICKÉ POŽADAVKY

- **Nízké limity:** Detekce v řádech ppm až sub-ppb pro vybrané halogeny.
- **Pokročilé techniky:** Robustní metody GC-MS, FTIR a specializované detektory.
- **Odběr vzorků:** Zajištění reprezentativnosti pro reálnou kvalitu plynu.







PŘESNOST MONITOROVÁNÍ — ULTRA-STOPY

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

KRITICKÁ ROLE REPREZENTATIVNÍHO ODBĚRU VZORKŮ

VÝZVY VYSOKÉHO TLAKU A INTEGRITA VZORKU

ZÁKLAD ANALÝZY

Reprezentativní vzorek je stejně důležitý jako samotná laboratorní analýza. Chybný odběr vede k neplatným výsledkům.

ISO 14687

SHODA S NORMOU

INTEGRITA TLAKU

Zvládání extrémních bezpečnostních rizik při současném zamezení kontaminace nebo ztráty stopových nečistot.

700 BAR

MAXIMÁLNÍ TLAK

POVRCHOVÉ JEVY

Stopové nečistoty se adsorbují na vnitřní stěny. Volba materiálu a proplachování jsou klíčové pro minimalizaci tohoto jevu.

Laboratoř VEC

ZAMĚŘENÍ NA VALIDACI

- BEZPEČNOSTNÍ PROTOKOL OVĚŘEN
- VALIDOVANÁ METODIKA
- CERTIFIKOVANÝ ODBĚR

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

INOVATIVNÍ ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ

Přesná analýza čistoty vodíku využívající sofistikovanou vzorkovací aparaturu s regulátory tlaku. Tato konfigurace zajišťuje přesnou detekci nečistot v reálném čase pro vysoce výkonné palivové články.

METODIKA: VECV 006

LABORATOŘ VEC • VÝVOJ ČISTOTY H_2

// VSTUP ZDROJE

700 BAR

Vysokotlaký vstupní uzel
Regulace TESCOM

// ODBĚR DO VÁLCE

100 BAR

Reprezentativní sběr
vzorků plynu

// ANALÝZA PROCESŮ

0,2-0,3 BAR

Kontinuální detekce
nečistot v H_2

SLEDOVANÉ SLOŽKY:	CO, CO_2, CH_4 (ppm)	NH_3, H_2S, H_2O (ppm)	Celkové uhlovodíky

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

ODBĚR VZORKŮ NA PLNICÍ STANICI

BEZPEČNOSTNÍ PROTOKOL

Důsledné dodržování bezpečnostních norem při manipulaci s vysokotlakým vodíkem je zásadní, přičemž tlaky dosahují až **700 bar**.

MAXIMÁLNÍ TLAK
700 BAR

DATA Z TERÉNU
100% BEZPEČNÉ

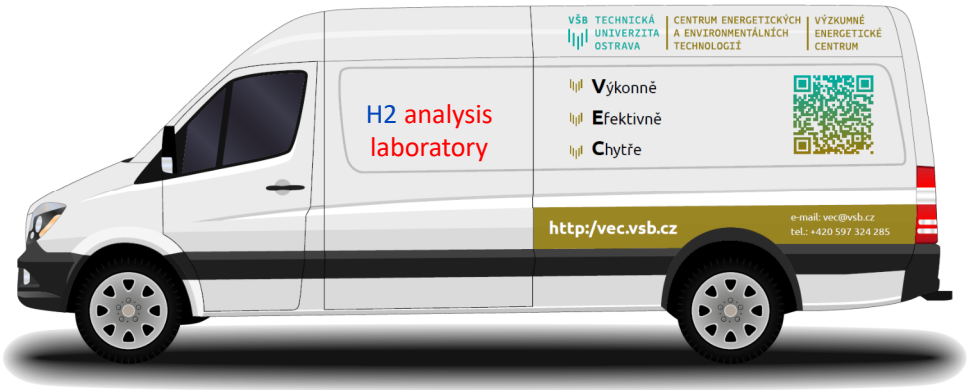
- **PŘIPOJENÍ SYSTÉMU**
  Připojení specializované plnicí pistole k vyhrazenému odběrnému místu infrastruktury.
- **PROPLÁCHNUTÍ SYSTÉMU**
  Povinné propláchnutí celého odběrového okruhu pro zajištění reprezentativnosti vzorku a eliminaci nečistot.
- **VYSOKOTLAKÝ ODBĚR**
  Samotná extrakce vysokotlakého vodíku do certifikované speciální tlakové nádoby pro laboratorní analýzu.
- **TERÉNNÍ DOKUMENTACE**
  Komplexní vizuální dokumentace procesu z reálného měření v terénu a integrované bezpečnostní kontroly.

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

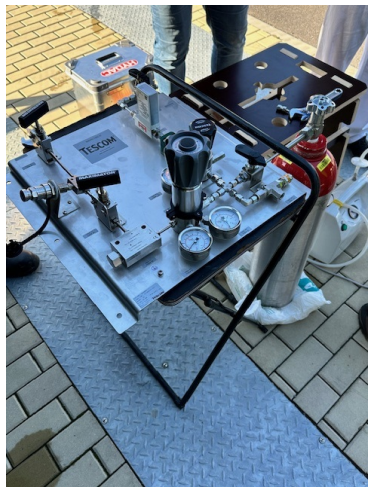
Analýza čistoty vodíku a odběr vzorků za vysokých tlaků

- Akreditovaná metodika kontinuálního měření čistoty H_2
- Vývoj a validace metod odběru
- Soulad s normou ISO 14687
- Optimalizace analytických metod (GC, MS, FTIR)

COMPONENT	ISO 14687-2 LIMITS (ppm)	LOD ProCeas®A (ppm)
H2O	5	0,01
CH4	2	0,001
O2	5	1
CO2	2	0,2
CO	0,2	0,001
H2S	0,004	0,001
HCHO	0,01	0,001
HCO2H	0,2	0,005
NH3	0,1	0,001
HCl	0,05	0,001







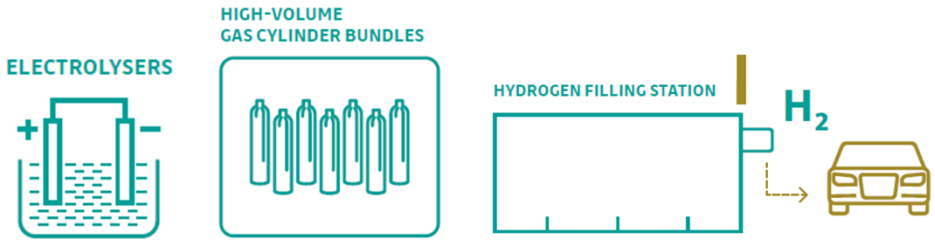


VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

Plnicí stanice vodíku pro vozidla

- Tankování vodíku při tlaku 700 bar
- Online monitoring tlaku, teploty a průtoku
- Integrované bezpečnostní systémy







VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

ARCHITEKTURA A CITLIVOST MEA

Sestava membrány a elektrod (MEA) je srdcem PEMFC, kde probíhá elektrochemická přeměna vodíku.

ANODA

DISOCIACE H_2

Místo vstupu vodíku, kde dochází k rozkladu molekul.

KATALYZÁTOR

PLATINA (PT)

Zajišťuje efektivitu reakce $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$.

MEMBRÁNA

VEDENÍ PROTONŮ

Selektivní transport H^+ a separace plynů.

KATODA

REDUKCE O_2

Místo vstupu kyslíku pro finální chemickou redukci.

KRITICKÁ ZRANITELNOST

- Katalyzátor a membrána jsou extrémně citlivé na nečistoty. Stopové příměsi mohou drasticky ovlivnit výkon a životnost.

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

MECHANISMUS OTRAVY CO

01. PŘEDNOSTNÍ VAZBA

Vysoká afinita k platině

Oxid uhelnatý (CO) vykazuje výrazně silnější afinitu k aktivním místům platinového katalyzátoru na anodě ve srovnání s vodíkem (H_2).

02. BLOKOVÁNÍ PŘÍSTUPU H_2

Fyzikální chemisorpce

Molekuly CO se chemicky vážou na povrch platiny, čímž obsazují klíčová reakční centra a fyzicky brání molekulám H_2 v přístupu k místům pro disociaci.

03. ZTRÁTA VÝKONU

Pokles účinnosti PEMFC

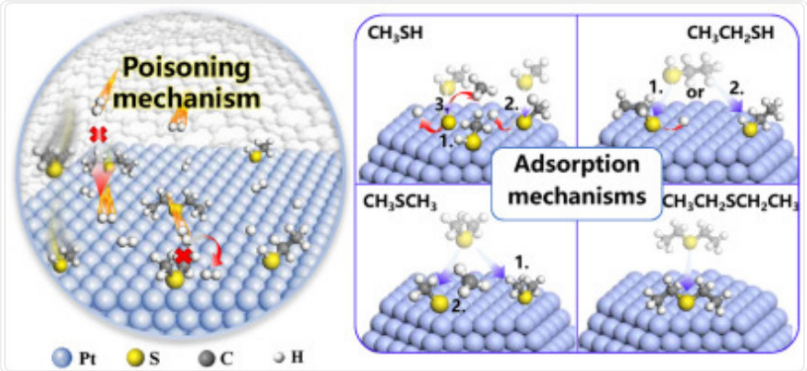
Snížení počtu dostupných aktivních míst vede k výraznému poklesu účinnosti katalyzátoru, což má za následek měřitelný propad celkového výkonu palivového článku.

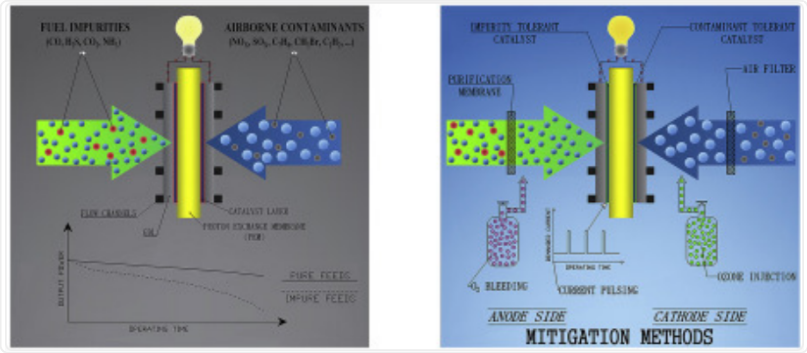
04. REVERZIBILITA

Možnost obnovy aktivity

Tato degradace je při včasném zásahu vratná. Katalyzátor může obnovit svou aktivitu, jakmile je CO odstraněn z přívodního proudu vodíku.

DESTRUKTIVNÍ VLIV H_2S NA KATALYZÁTOR





KRITICKÁ KONTAMINACE POVRCHU KATALYZÁTORU

SILNÁ CHEMISORPCE NA PLATINĚ

CHEMICKÁ VAZBA

Sirovodík se disociuje na povrchu Pt a vytváří extrémně silné vazby s aktivními místy, které výrazně překonávají vazby CO-Pt.

OBTÍŽNÁ REGENERACE

PROVOZNÍ RIZIKO

Síra je na platině vysoce stabilní. Účinná regenerace vyžaduje drastické podmínky, které jsou pro standardní provoz PEMFC destruktivní.

TRVALÉ POŠKOZENÍ

IREVERZIBILNÍ ZTRÁTA

Dochází k trvalému blokování aktivního povrchu Pt, což vede k fatální ztrátě výkonu a zkrácení životnosti palivového článku.

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

VLIV AMONIAKU (NH_3) NA PROTONOVOU VODIVOST

> *"Jak čistý je opravdu zelený vodík? Měření čistoty a vliv kontaminantů na palivové články."*

CHEMICKÁ REAKCE

NH_3 reaguje v ionomeru s H^+ skupinami.

$$NH_3 + H^+ \rightleftharpoons NH_4^+$$

MECHANISMUS POŠKODZENÍ

Kationty **NH_4^+** nahrazují klíčové protony **H^+**. To vede k drastickému snížení vodivosti a výkonu článku.

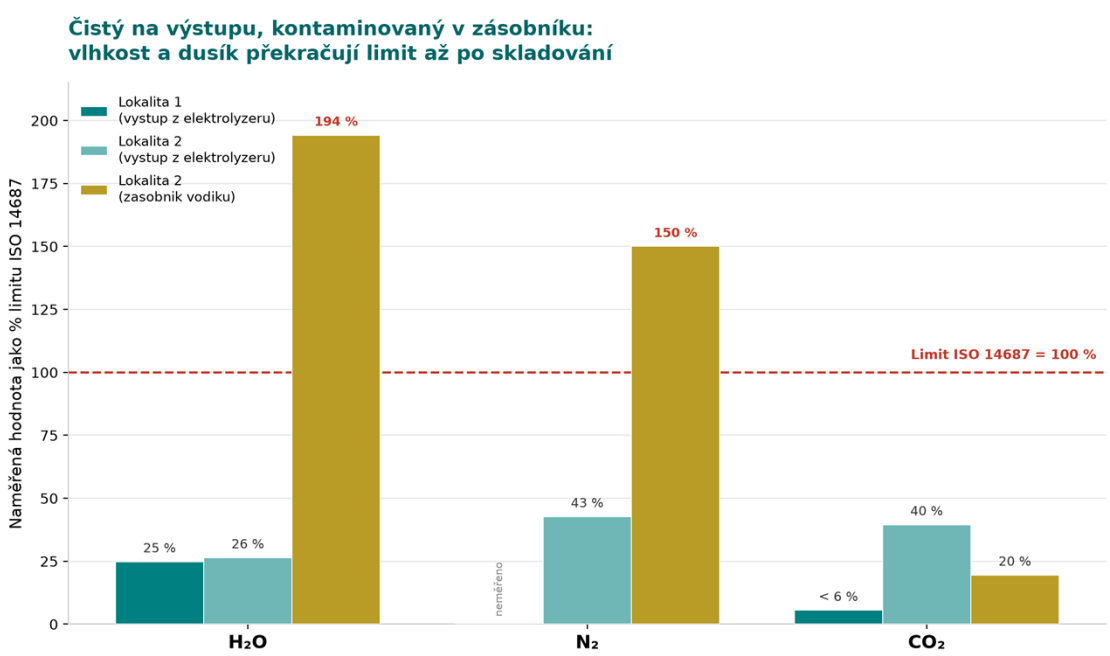
KLÍČOVÁ ODLIŠNOST

Nejedná se o otravu Pt katalyzátoru (jako u CO/H_2S), ale o přímou **degradaci transportní schopnosti** membrány.

- Analýza systému
- Cesta degradace NH_3
- VEC / CEET Výzkum

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

NAŠE VÝSLEDKY
Z REÁLNÝCH ODBĚRŮ



- **Dvě reálné lokality:** Akreditovaná metoda OFCEAS + GC dle ČSN ISO 14687 a ČSN ISO 19880. **Lokalita 1** – elektrolyzér; **Lokalita 2** – elektrolyzér a zásobník vodíku.

- **Výstup z elektrolyzéru:** Vodík je u obou lokalit čistý. CO, NH_3, H_2S, COS, HCl jsou pod mezí detekce. H_2O dosahuje pouze ~25 % limitu.

- **Zásobník (Lokalita 2):** Limit překračují dvě složky: **H_2O 9,71 µmol/mol (194 % limitu)** a **N_2 450 µmol/mol (150 % limitu)**.

- ***Klíčové zjištění: Nečistoty nevznikají při výrobě, ale až při skladování a v infrastruktuře → nezbytný vysokotlaký odběr přímo na výdejním místě.***

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM

Přehled výsledků z odebraných vzorků H_2

Složka	Jedn.	Lok. 1 – elektrolyzér (prot. 233/25)	Lok. 2 – elektrolyzér (prot. 199/25)	Lok. 2 – zásobník (prot. 199/25)	Limit ISO 14687
O_2	µmol/mol	< 0,85	< 1,8	< 1,35	5
CO	µmol/mol	< 0,011	< 0,011	< 0,011	0,2
CH_4 (methan)	µmol/mol	< 5,66	< 5,66	< 5,66	100
CO_2	µmol/mol	< 0,11	0,79	0,39	2
NH_3	µmol/mol	< 0,006	< 0,06	< 0,06	0,1
HCHO	µmol/mol	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,2
HCOOH	µmol/mol	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,2
COS	µmol/mol	< 0,003	< 0,003	< 0,003	0,004
HCl	µmol/mol	< 0,003	< 0,003	< 0,003	0,05
H_2S	µmol/mol	< 0,003	< 0,003	< 0,003	0,004
H_2O	µmol/mol	1,24	1,32	**9,71**	5
He	µmol/mol	-	< 50	< 50	300
Ar	µmol/mol	-	< 25	< 25	300
N_2	µmol/mol	-	128	**450**	300

Červeně = překročení limitu.

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | CENTRUM ENERGETICKÝCH A ENVIRONMENTÁLNÍCH TECHNOLOGIÍ | VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM



KONTAKTNÍ INFORMACE

Ing. Karel Borovec, Ph.D.

karel.borovec@vsb.cz

ZÁVĚREČNÉ SHRNUTÍ

> ***"O původu vodíku rozhoduje způsob výroby. O jeho použitelnosti rozhoduje kvalita na výdejní pistoli."***

- **Zelený ≠ Čistý:** Nízká uhlíková stopa automaticky nezaručuje chemickou čistotu plynu.
- **Odběr je klíčový:** Reprezentativní vysokotlaký odběr vzorků je jediný způsob, jak ověřit kvalitu.
- **Ochrana PEMFC:** I stopové nečistoty kriticky ovlivňují životnost a výkon palivových článků.

ZÁVĚR

KVALITA NA PRVNÍM MÍSTĚ

PROVOZNÍ BEZPEČNOST

DĚKUJI ZA POZORNOST

DOTAZY A DISKUSE