

# PRACOVNÍ POSTUP - WORKFLOW



Problém vždy nejprve analyzujte, nakreslete si obrázek, napište co znáte, co je úkolem, zjistěte jestli máte všechny vstupy, pomocí balance se ujistěte, že je to řešitelné, pak přejděte k výpočtu. Jako poslední krok nezapomeňte provést kontrolu výsledků (i všech mezivýsledků).

## TEPLO, TEPLOTA, TEPELNÝ TOK

**Teplota** [ $^{\circ}\text{C}$ , K,  $^{\circ}\text{F}$ ] je stavová veličina, která měří průměrnou kinetickou energii pohybujících se molekul v látce, zatímco **teplo**  $Q$  [J] je dějová veličina a forma energie, která se přenáší mezi tělesy o různých teplotách, a to z teplejšího do chladnějšího. **Výkon**  $\dot{Q}$  [ $\text{W} = \text{J/s}$ ] (nebo též tepelný tok) je množství tepla přenesené za jednotku času (měřené ve W). **Tepelný tok** je tedy míra rychlosti přenosu tepla, přičemž tepelný tok je přímo úměrný teplotnímu rozdílu, který je hnací silou toku. **Hustota tepelného toku**  $\dot{q}$  [ $\text{W/m}^2$ ] výkon vztažený na plochu. Pozor, někdy se vztahuje na délku [ $\text{W/m}$ ]. **Watthodina** [Wh] je jednotka energie. V praxi se nejčastěji používá její násobek kilowatthodina, kWh (1000 watthodin) pro měření spotřeby elektřiny. **1 Wh = 3600 J**.

**Entalpie**  $H$  [J] - je fyzikální veličina rozměru energie

**Měrná entalpie**  $h$  [J/kg] – entalpie vztažená na 1 kg (počítáme jako  $c_p \cdot dT$  – pokud není změna fáze)

**Měrná tepelná kapacita**  $c_p$  [J/(kg.K)] - množství tepla potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 teplotní stupeň (1 kelvin nebo 1 stupeň Celsia) – je závislá na teplotě

**Měrné skupenské teplo varu**  $l_v$  [J/kg] - teplo, které přijme 1 kilogram kapaliny, jestliže se za teploty varu celý přemění na plyn téže teploty. Naopak teplo, které odevzdá 1 kilogram plynu, pokud se celý přemění na kapalinu o téže teplotě, se nazývá měrné skupenské teplo kondenzace (též měrné skupenské teplo zkapalnění).

**Parní podíl (vapor fraction)**  $v_f$  – poměr hmotnosti páry k celkové hmotnosti dvoufázové (kapalina-pára) směsi, vyjádřený jako desetinné číslo nebo procento. Udává, jaká část látky je v nasycené směsi v plynném stavu, a pohybuje se v rozmezí od 0 pro čistou kapalinu do 1 pro čistou páru.

$c_p$  (stejně jako jiné vlastnosti závisí na teplotě a tlaku) může ale pro naše výpočty uvažovat pro vodu je cca 4180 J/(kg.K), pro vzduch 1000 J/(kg.K), pro spaliny 1300 J/(kg.K). Výparné teplo vody 2257 kJ/kg.

### Náklady na energii (1 hodina provozu):

- LED žárovka 10W: 0,046 Kč
- Notebook 65W: 0,30 Kč
- Ohřev 1L vody: 0,52 Kč
- Mikrovlnná trouba 800W: 3,69 Kč
- Elektrický radiátor 2000W: 9,22 Kč

Cena elektřiny a plynu se uvádí v Kč/kWh.

# TEPLO, TEPLOTA, TEPELNÝ TOK

## Výpočet entalpické bilance

Médium teče (m je v kg/s) dostaneme tepelný tok (např. výměník tepla)  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot h$  [ $W = J/s$ ]

Médium neteče (m je v kg) dostaneme potřebné teplo (např. rychlovarná konvice)  $Q = m \cdot h$  [J]

Ohřev kapaliny (plynu):  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$  [ $W = J/s$ ]  $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$  [J]

Odpaření syté kapaliny:  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot l_v$  [ $W = J/s$ ]  $Q = m \cdot l_v$  [J]

Částečné odpaření syté kapaliny:  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot v_f l_v$  [ $W = J/s$ ]  $Q = m \cdot v_f l_v \cdot \Delta T$  [J]

Ohřev kapaliny na bod varu, odpaření a přehřátí:  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{bp} - T_{in}) + \dot{m} \cdot l_v + \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{dp})$

$T_{bp}$  je bod varu (syťá kapalina),  $T_{dp}$  je rosny bod (syťý pára) – u čistých složek jsou si rovny, u směsí je  $T_{bp} < T_{dp}$

## Příkon, výkon, účinnost

## Spotřeba paliva

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{P_0} \quad \begin{array}{l} P_0 - \text{příkon [W]} - \text{na štítku přístroje} \\ P - \text{výkon [W]} - \text{dodáno do zařízení} \\ \eta - \text{účinnost [-]} \end{array} \quad \dot{V}_p = \frac{\dot{Q}}{LHV} \quad [Nm^3/s] \quad \dot{m}_p = \frac{\dot{Q}}{LHV} \quad [kg/s]$$

$LHV - \text{výhřevnost J/Nm}^3 \quad LHV - \text{výhřevnost J/kg}$

**Příklad 1:** Kolik energie je potřeba k ohřátí 1,2 l (1,2 kg) vody v rychlovarné konvici (z 20 °C na 95 °C). Její štítkový příkon je 1600 W. Jaká je potřeba teoretická doba k ohřevu? Kolik stojí ohřev, pokud cena elektřiny je 5 Kč/kWh? Jaká je účinnost konvice, pokud skutečná doba ohřevu je 300 s?

**Potřebné teplo (energie) – bez ztrát:**  $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 1,2 \cdot 4180 \cdot (95 - 20) = 376\,200 \text{ J}$

**Teoretická doba ohřevu:**  $t_{\text{teoretická}} = Q/P_0 = 376\,200/1600 = 235 \text{ s}$

**Výpočet teoretické ceny za ohřev (1Wh = 3600 J):**  $E_{kWh} = \frac{Q}{3600} = \frac{376\,200}{3600} = 104,5 \text{ Wh} = 0,1045 \text{ kWh}$

$\text{cena} = E_{kWh} \cdot C = 0,1045 \cdot 5 = 0,52 \text{ Kč}$

**Výpočet skutečného výkonu:**  $P_{\text{užitečný}} = \frac{Q}{t_{\text{měřený}}} = \frac{376\,200}{300} = 1254 \text{ W}$

**Účinnost rychlovarné konvice:**  $\eta = \frac{P_{\text{užitečný}}}{P_{\text{příkon}}} = \frac{1254}{1600} = 0,784 = 78,4 \%$

**Výpočet skutečné ceny za ohřev (1Wh = 3600 J):**  $E_{kWh} = \frac{P_{\text{příkon}} \cdot t_{\text{měřený}}}{3600} = \frac{1600 \cdot 300}{3600} = 133,3 \text{ Wh} = 0,1333 \text{ kWh}$

$\text{cena} = E_{kWh} \cdot C = 0,1333 \cdot 5 = 0,67 \text{ Kč}$

**Účinnost 78,4 %** znamená, že přibližně 78 % elektrické energie se skutečně přemění na teplo, které ohřeje vodu. Zbýlých 21,6 % energie se ztratí do okolí:

- Ohřev samotné konvice a jejích stěn
- Úniky tepla do okolního vzduchu
- Ztráty unikající párou
- Spotřeba na zvukové a světelné projevy konvice

Jedná se o **typickou hodnotu pro běžné domácí spotřebiče** tohoto typu. Moderní kvalitní rychlovarné konvice dosahují účinnosti 75-85 %.

# TEPLO, TEPLOTA, TEPELNÝ TOK

**Příklad 2:** Mějme plynový průtokový ohřivač vody. Jaký výkon musí mít, aby ohřál 5 l/min (cca 5 kg/min) vody o  $\Delta T = 35\text{ °C}$  (tj. např. z teploty  $20\text{ °C}$  na  $55\text{ °C}$ ). Pokud má ohřivač účinnost 75 %, jaký je jeho příkon? Kolik paliva (plynu) je potřeba, pokud výhřevnost zemního plynu je  $34\text{ MJ/Nm}^3$ ? Kolik stojí hodinový provoz, pokud cena zemního plynu je  $2\text{ Kč/kWh}$ ?

**Výpočet výkonu:**

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = 5 \cdot 4160 \cdot (55 - 20) = 12133\text{ W}$$

**Pozor!!** Tentokrát počítáme výkon, ten je ve Wattech. Voda teče – výkon je teplo za čas.

**Vypočtený výkon je zároveň užitečný příkon  $P_{\text{užitečný}}$ . Jen jiné pojmenování.**

**Příkon:**

$$P_{\text{příkon}} = \frac{\dot{Q}}{\eta} = \frac{12133}{0,75} = 16177\text{ W} = 16,18\text{ kW}$$

**Průtok zemního plynu:**

$$\dot{V}_{\text{plyn}} = \frac{P_{\text{příkon}}}{H_v} = \frac{16177\text{ J/s}}{34000000\text{ J/Nm}^3} = 0,000476 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} = 1,71\text{ Nm}^3/\text{h}$$

**Výpočet ceny provozu za 1 hodinu:**

$$\text{cena} = P_{\text{příkon}}[\text{kW}] \cdot \text{doba}[\text{h}] \cdot C[\text{Kč/kWh}] = 16,18 \cdot 1 \cdot 2 = 32,36\text{ Kč/h}$$

**Technické posouzení:** Výsledek ukazuje, že pro komfortní průtok teplé vody (5 l/min je typická hodnota pro umyvadlo nebo sprchu) je zapotřebí ohřivač se značným příkonem přibližně **16 kW**. To je běžná hodnota pro plynové průtokové ohřivače (často označované jako "karma").

**Elektrické vs. plynové ohřivače:** Elektrické průtokové ohřivače s takovým příkonem vyžadují silný jistič (obvykle  $3 \times 25\text{A}$ ) a samostatný elektrický okruh. Plynové ohřivače jsou v tomto ohledu flexibilnější.

**Provozní náklady:** Spotřeba  $1,71\text{ Nm}^3$  plynu za hodinu a s tím spojená cena přibližně 32 Kč ilustruje náklady na nepřetržitý provoz. Při běžném používání:

- **10 minut sprchování:**  $\approx 5,40\text{ Kč}$
- **5 minut mytí nádobí:**  $\approx 2,70\text{ Kč}$
- **2 minuty mytí rukou:**  $\approx 1,08\text{ Kč}$

**Úspora energie:** Průtokové ohřivače jsou energeticky efektivní, protože ohřívají vodu pouze při jejím odběru, na rozdíl od zásobníkových ohřivačů, které musí udržovat teplotu i v době nečinnosti.

**Příklad 3:** Kolik energie je potřeba k odpaření 1,2 l (cca 1,2 kg) vody o počáteční teplotě  $20\text{ °C}$  na přehřátou páru o teplotě  $160\text{ °C}$ ? Uvažujeme atmosférický tlak, tj. teplota bodu varu je cca  $100\text{ °C}$ .  $c_p$  vody je  $4160\text{ J/(kg.K)}$ ,  $c_p$  páry je  $1100\text{ J/(kg.K)}$ , výparné teplo vody  $l_v$  je  $2257\text{ kJ/kg}$ .

**Ohřev na bod varu:**

$$Q_l = m \cdot c_{p,\text{water}} \cdot (t_{bp} - t_1) = 1,2 \cdot 4160 \cdot (100 - 20) = 399\,360\text{ J}$$

**Vypaření vody (změna fáze):**

$$Q_{lv} = m \cdot v_f \cdot l_v = 1,2 \cdot 1 \cdot 2257000 = 2\,708\,400\text{ J}$$

$v_f$  je vapor fraction a je rovno 1 – dojde k odpaření veškeré vody

**Přehřátí páry:**

$$Q_v = m \cdot c_{p,\text{vapor}} \cdot (t_2 - t_{bp}) = 1,2 \cdot 1100 \cdot (160 - 100) = 79\,200\text{ J}$$

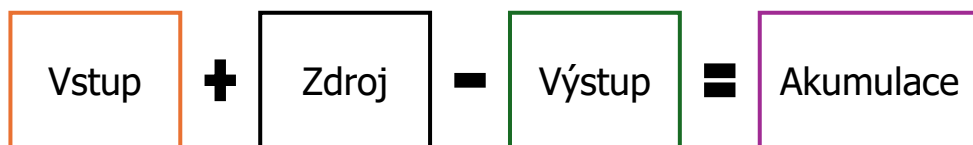
**Celkové potřebné teplo:**

$$Q = Q_l + Q_{lv} + Q_v = 3,19\text{ MJ}$$

**Ohřev vody představuje 12,5 %, vypaření vody 85,0 % a ohřev páry 2,5 %.**

**Další podobné příklady jsou kombinací těchto příkladů – jen se mění média, místo vody může být vzduch, ocel. Jako palivo může být elektřina, plyn, uhlí, dřevo. Různá média mají různé vlastnosti. Postup výpočtu se nemění.**

# BILANCE



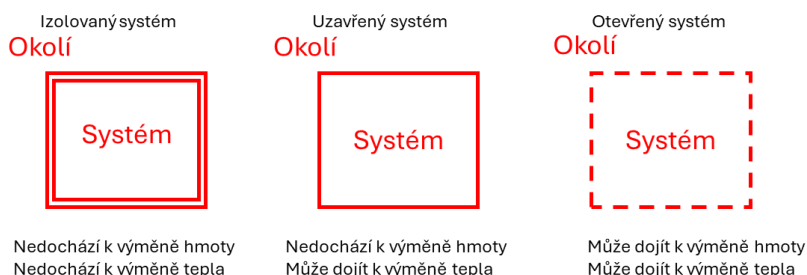
## Zákon zachování energie

$$\Delta \dot{H} + \Delta \dot{E}_k + \Delta \dot{E}_p = \dot{Q} - \dot{W}_s$$

Kinetickou energii ( $E_k$ ) a potenciální energii ( $E_p$ ) nebudeme uvažovat, nebudeme uvažovat ani práci systému ( $W_s$ ). Budeme řešit pouze entalpickou bilanci ( $H$ ) (jednotky, které budeme řešit do umožňují) – tj. systém budeme jen ohřívat a ochlazovat – dodávat nebo odebírat teplo ( $Q$ ).

## Hmotnostní bilance – co vstoupí do vystoupí (v ustáleném stavu)

### Hranice systému



Platí pro libovolnou extenzivní veličinu (hmotnost, vnitřní energii, látku,...)

Vstupy: přichází dovnitř přes hranice systému

Zdroj : tvorba (spotřeba) uvnitř systému

Výstup: odchází ven přes hranice systému

Akumulace: růst (pokles) bilancované veličiny uvnitř systému

Aplikace vyžaduje definovat:

Co bilancujeme (jakou veličinu + jaké **složky**)

Jaký systém bilancujeme (hranice bilancovaného systému)

Časový úsek, pro který bilanci stanovujeme

### Klasifikace bilance

- Podle počtu složek
  - Jednosložková
  - Vícesložková
- Bez chemické reakce s chemickou reakcí
- Bez recyklu s recyklem
- Bez a s výměnou tepla (izolovaný systém)
- V ustáleném stavu nebo s akumulací hmoty

Různé typy úloh a jejich kombinací vedou na různou složitost řešeného problému (postup řešení, matematický aparát, vstupní data)

### Obecný postup při bilancování

- Nakreslit bilanční schéma, označit uzly, proudy a složky
- Zapsat souhrn předpokladů
- (Pro systémy s reakcemi: Určení stechiometrických koeficientů chemických reakcí)
- Zapsat složení všech proudů (složky, skupiny složek)
- Zvolit bilancované veličiny (hmotnost, mol. množství, energie, ...)
- Matematický zápis všech známých vztahů mezi veličinami (především bilanční a stavové rovnice)
- Přepočet vstupních dat a vztahů na jednotný základ bilancování
- Řešení (eliminační postup, sekvenční postup, soustava rovnic)
- Kompletní výpis – tabulku proudů
- Kontrola správnosti výpočtu (autokorekce)

# BILANCE (pokračování)

## Bilanční rovnice (obecné)

- Několik proudů vstupuje a několik proudů vystupuje
- Hmotnostní bilance:  $\sum_{vstupy} \dot{m}_i = \sum_{výstupy} \dot{m}_j$
- Bilance složek:  $\sum_{vstupy} \dot{m}_{A,i} = \sum_{výstupy} \dot{m}_{A,j}$   
 $\sum_{vstupy} \dot{n}_{A,i} = \sum_{výstupy} \dot{n}_{A,j}$   
pro  $\forall A \in \{\text{komponenty} - \text{např. } CH_4, O_2, H_2O\}$
- Energetická bilance:  $\sum_{vstupy} \dot{m}_{A,i} h_i = \sum_{výstupy} \dot{m}_{A,j} h_j$
- Pomocné vztahy – součty hmotnostních, objemových, molárních zlomků:  
 $\sum_{komponenty} w_A = 1$  pro všechny proudy

## Veličiny popisující látkové složení

- Hmotnostní zlomky ( $w_i = m_i/m_{tot}$ )
- Molární zlomky ( $x_i = n_i/n_{tot}$ )
- Objemové zlomky ( $\phi_i = V_i/\sum V_j$ )
- Parciální tlaky ( $p = \sum p_i$ )
- Koncentrace
  - Hmotnostní ( $\rho_i = m_i/V$ )
  - Molární ( $c_i = n_i/V$ )
  - Objemová ( $\Phi_i = V_i/V_{tot}$ ),  
totožná s objemovými zlomky  
pouze v ideálních směsích, kde  
objem složek je aditivní

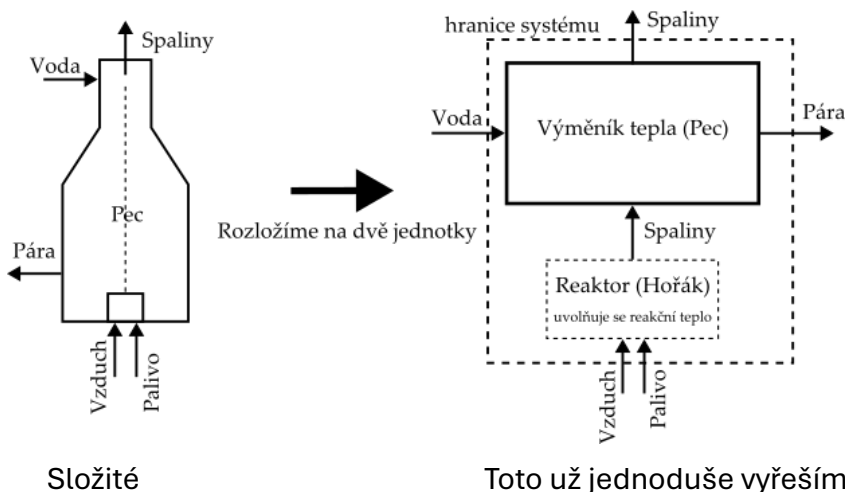
Chemické reakce je výhodné (nutné) řešit v molech (molové průtoky).

Opět platí rovnice hmotnostní bilance. Co vstupuje, to vystupuje.

Teplo vzniklé nebo absorbované reakcí budeme počítat v jiné části – teď ho nebudeme uvažovat.

## Rozložení složitého procesu na základní jednotky

Složitý proces rozložíme na jednodušší procesy.



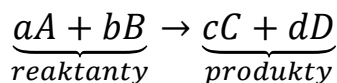
Nejprve provedeme bilanci systému, tzn. vstup do systému = výstup ze systému

Poté můžeme bilancovat jednotlivá zařízení

# BILANCE (pokračování)

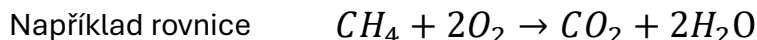
## Co když máme chemickou reakci

Mějme stechiometrickou rovnici



Než se pustíme do bilancování, musíme si ujasnit několik základních pojmů. Představte si chemickou reakci jako kuchařský recept.

**Stechiometrická rovnice** je náš "recept". Říká nám, že aby zreagovalo  $a$  molů složky  $A$ , tak potřebujeme  $b$  molů složky  $B$  a dostaneme  $c$  molů složky  $C$  a  $d$  molů složky  $D$ .



říká, že na reakci jednoho molu metanu potřebujeme dva moly kyslíku a dostaneme jeden mol oxidu uhličitého a dva moly vody (vodní páry).

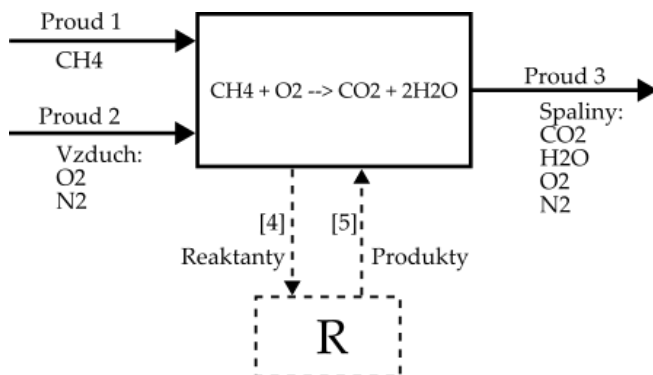
Toto je ale ideální (školní) případ. V reálném procesu může nastat, že ne všechna složka  $A$  zreaguje (má nějaký stupeň konverze) a velmi často je složka  $B$  v přebytku. To nám popisují následující vlastnosti:

**Stupeň konverze ( $\alpha$ ):** Udává, jaká část (v %) jednoho z reaktantů (většinou klíčové složky) skutečně zreagovala. Konverze 100 % znamená, že všechen tento reaktant se spotřeboval. Konverze 80 % znamená, že 20 % tohoto reaktantu zbylo a odchází z reaktoru spolu s produkty.

**Přebytek složky ( $\lambda$ ):** V praxi často dáváme jednoho reaktantu více, než je podle "receptu" potřeba, abychom měli jistotu, že ten druhý (dražší nebo důležitější) zreaguje co nejvíce. Přebytek 20 % vzduchu znamená, že jsme ho dodali o 20 % více, než je stechiometricky nutné.

$$\lambda = \frac{\text{skutečný přívod} - \text{stechiometrická spotřeba}}{\text{stechiometrická spotřeba}}$$

Reakce probíhají v zařízení nazývaném reaktor. Vstupuje do něho 1 nebo více proudů (Např.  $CH_4$  a vzduch (21 % obj.  $O_2$  a 79 % obj.  $N_2$ ) a vstupují z něj opět jeden nebo více proudů (složení záleží na reakce, stupni konverzi a přebytku složek). Pro lepší názornost a výpočty se zavádí fiktivní proudy (v obrázku čárkovaně), které popisují stechiometrickou reakci – Reaktanty zanikají, proto šipka směřuje ze systému ve. Produkty vznikají, proto šipka směřuje do systému.



Chemické reakce je výhodné (nutné) řešit v molech (molové průtoky).

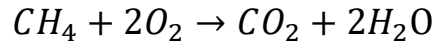
Opět platí rovnice hmotnostní bilance. Co vstupuje, to vystupuje.

Teplu vzniklé nebo absorbované reakcí budeme počítat v jiné části – teď ho nebudeme uvažovat.

# BILANCE (pokračování)

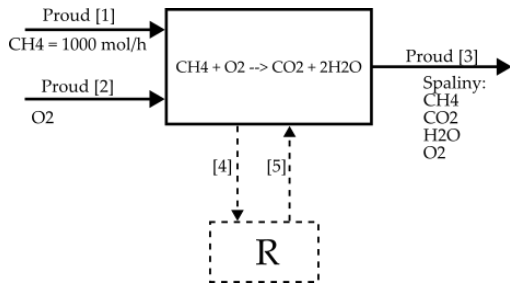
**Příklad 1:** Spalujeme 16 kg/h metanu ( $\text{CH}_4$ ) s přesně stechiometrickým množstvím kyslíku ( $\text{O}_2$ ) – přebytek kyslíku je 0 %. Konverze metanu je 100 %. Jaké je složení výstupního proudu?

**Reakce:**



**Molární hmotnosti:**  $M(\text{CH}_4) = 16 \text{ g/mol}$ ,  $M(\text{O}_2) = 32 \text{ g/mol}$ ,  $M(\text{CO}_2) = 44 \text{ g/mol}$ ,  $M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ g/mol}$ .

**Výpočet**



Přepočet na mol

$$n_{\text{CH}_4,1} = \frac{16000 \text{ g/h}}{16 \text{ g/mol}} = 1000 \text{ mol/h}$$

V proudu (1) už jiná složka není – ostatní jsou nulové.

Podle stech. rovnice potřebujeme 2x více molů  $\text{O}_2$ :

$$n_{\text{O}_2,2} = 2 \cdot n_{\text{CH}_4,1} = 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ mol/h}$$

V proudu (2) už jiná složka není – ostatní jsou nulové.

Podle stechiometrické rovnice víme, že reakce (proud (4)) se účastní 1000 mol/h  $\text{CH}_4$  a 2000 mol/h  $\text{O}_2$ . Tyto složky jsou v proudu (3).

$$n_{\text{CH}_4,3} = \text{konverze} \cdot n_{\text{CH}_4,1} = 1 \cdot 1000 = 1000 \text{ mol/h}$$

$$n_{\text{O}_2,3} = 2 \cdot n_{\text{CH}_4,3} = 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ mol/h}$$

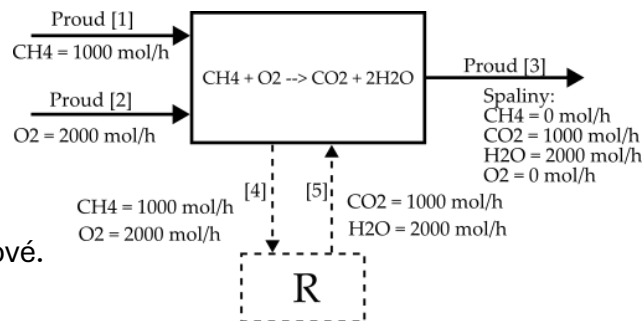
V proudu (3) už jiná složka není – ostatní jsou nulové.

Podle stech. rovnice víme, že vzniká (proud (5))  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  v poměru 1:1 a 1:2 vůči  $\text{CH}_4$ .

$$n_{\text{CO}_2,4} = 1 \cdot n_{\text{CH}_4,3} = 1 \cdot 1000 = 1000 \text{ mol/h}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O},4} = 2 \cdot n_{\text{CH}_4,3} = 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ mol/h}$$

V proudu (4) už jiná složka není – ostatní jsou nulové.



**Bilance: VSTUP = VÝSTUP.**

$$n_{\text{CH}_4,1} + n_{\text{CH}_4,2} + n_{\text{CH}_4,5} = n_{\text{CH}_4,3} + n_{\text{CH}_4,4}$$

$$n_{\text{O}_2,1} + n_{\text{O}_2,2} + n_{\text{O}_2,5} = n_{\text{O}_2,3} + n_{\text{O}_2,4}$$

$$n_{\text{CO}_2,1} + n_{\text{CO}_2,2} + n_{\text{CO}_2,5} = n_{\text{CO}_2,3} + n_{\text{CO}_2,4}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O},1} + n_{\text{H}_2\text{O},2} + n_{\text{H}_2\text{O},5} = n_{\text{H}_2\text{O},3} + n_{\text{H}_2\text{O},4}$$

$$1000 + 0 + 0 = n_{\text{CH}_4,3} + 1000$$

$$0 + 2000 + 0 = n_{\text{O}_2,3} + 2000$$

$$0 + 0 + 1000 = n_{\text{CO}_2,3} + 0$$

$$0 + 0 + 2000 = n_{\text{H}_2\text{O},3} + 0$$

$$n_{\text{CH}_4,3} = 0 \text{ mol/h}$$

$$n_{\text{O}_2,3} = 0 \text{ mol/h}$$

$$n_{\text{CO}_2,3} = 1000 \text{ mol/h}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O},3} = 2000 \text{ mol/h}$$

	1	2	3	4	5
CH <sub>4</sub>	1000	0	0	1000	0
O <sub>2</sub>	0	2000	0	2000	0
CO <sub>2</sub>	0	0	1000	0	1000
H <sub>2</sub> O	0	0	2000	0	2000
Suma	1000	2000	3000	3000	3000

Molové průtoky [mol/h]

	1	2	3	4	5
CH <sub>4</sub>	16	0	0	16	0
O <sub>2</sub>	0	64	0	64	0
CO <sub>2</sub>	0	0	44	0	44
H <sub>2</sub> O	0	0	36	0	36
Suma	16	64	80	80	80

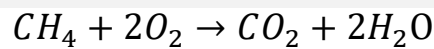
Hmotnostní průtoky [kg/h] – **VSTUP = VÝSTUP**



# BILANCE (pokračování)

**Příklad 2:** Spalujeme 16 kg/h metanu ( $CH_4$ ) s přesně stechiometrickým množstvím kyslíku ( $O_2$ ) – přebytek kyslíku je 20 %. Konverze metanu je 80 %. Místo čistého kyslíku použijeme vzduch (21 % mol.  $O_2$ , 79 % mol.  $N_2$ ). Jaké je složení výstupního proudu?

**Reakce:**

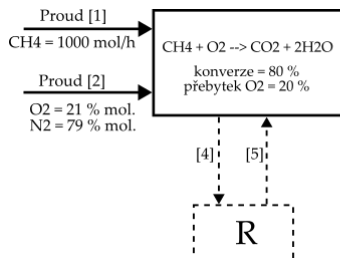


**Molární hmotnosti:**  $M(CH_4) = 16 \text{ g/mol}$ ,  $M(O_2) = 32 \text{ g/mol}$ ,  $M(CO_2) = 44 \text{ g/mol}$ ,  $M(H_2O) = 18 \text{ g/mol}$ .

**Výpočet**

Přepočet na mol

$$n_{CH_4,1} = \frac{16000 \text{ g/h}}{16 \text{ g/mol}} = 1000 \text{ mol/h}$$



Podle stech. rovnice potřebujeme 2x více molů  $O_2$  + 20% přebytek:

$$n_{O_2,2} = 2 \cdot n_{CH_4,1} (1 + \text{přebytek}) = 2 \cdot 1000 \cdot (1 + 0,2) = 2400 \text{ mol/h}$$

$$n_{N_2,2} = \frac{79}{21} \cdot n_{O_2,2} = \frac{79}{21} \cdot 2400 \approx 9029 \text{ mol/h}$$

Dusík je „balast“ - nereaguje

Podle stechiometrické rovnice víme, že reakce (proud (4)) se účastní jen 80 % množství  $CH_4$  a  $O_2$ , tj. 800 mol/h  $CH_4$  a 1600 mol/h  $O_2$ . Tyto složky jsou v proudu (3).

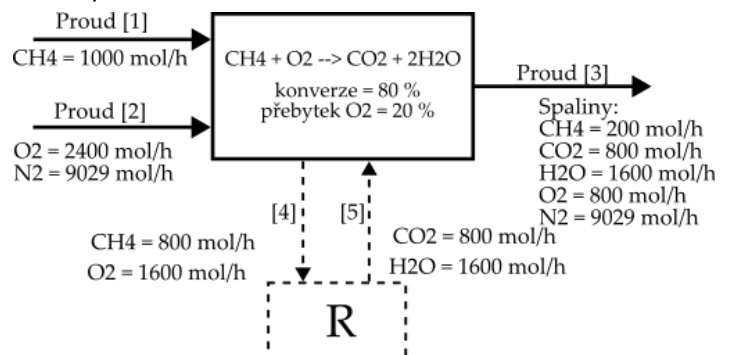
$$n_{CH_4,3} = \text{konverze} \cdot n_{CH_4,1} = 0,8 \cdot 1000 = 800 \text{ mol/h}$$

$$n_{O_2,3} = 2 \cdot n_{CH_4,3} = 2 \cdot 800 = 1600 \text{ mol/h}$$

Podle stech. rovnice víme, že vzniká (proud (5))  $CO_2$  a  $H_2O$  v poměru 1:1 a 1:2 vůči  $CH_4$ .

$$n_{CO_2,4} = 1 \cdot n_{CH_4,3} = 1 \cdot 800 = 800 \text{ mol/h}$$

$$n_{H_2O,4} = 2 \cdot n_{CH_4,3} = 2 \cdot 800 = 1600 \text{ mol/h}$$



**Bilance: VSTUP = VÝSTUP.**

$$n_{CH_4,1} + n_{CH_4,2} + n_{CH_4,5} = n_{CH_4,3} + n_{CH_4,4}$$

$$1000 + 0 + 0 = n_{CH_4,3} + 800$$

$$n_{CH_4,3} = 200 \text{ mol/h}$$

$$n_{O_2,1} + n_{O_2,2} + n_{O_2,5} = n_{O_2,3} + n_{O_2,4}$$

$$0 + 2400 + 0 = n_{O_2,3} + 1600$$

$$n_{O_2,3} = 800 \text{ mol/h}$$

$$n_{N_2,1} + n_{N_2,2} + n_{N_2,5} = n_{N_2,3} + n_{N_2,4}$$

$$0 + 9029 + 0 = n_{N_2,3} + 0$$

$$n_{N_2,3} = 9029 \text{ mol/h}$$

$$n_{CO_2,1} + n_{CO_2,2} + n_{CO_2,5} = n_{CO_2,3} + n_{CO_2,4}$$

$$0 + 0 + 800 = n_{CO_2,3} + 0$$

$$n_{CO_2,3} = 800 \text{ mol/h}$$

$$n_{H_2O,1} + n_{H_2O,2} + n_{H_2O,5} = n_{H_2O,3} + n_{H_2O,4}$$

$$0 + 0 + 1600 = n_{H_2O,3} + 0$$

$$n_{H_2O,3} = 1600 \text{ mol/h}$$

	1	2	3	4	5
CH4	1000	0	200	800	0
O2	0	2400	800	1600	0
N2	0	9029	9029	0	0
CO2	0	0	800	0	800
H2O	0	0	1600	0	1600
Suma	1000	11429	12429	2400	2400

	1	2	3	4	5
CH4	16	0	3,2	12,8	0
O2	0	76,8	25,6	51,2	0
N2	0	252,81	252,81	0	0
CO2	0	0	35,2	0	35,2
H2O	0	0	28,8	0	28,8
Suma	16	329,6	345,6	64	64

Molové průtoky [mol/h]

Hmotnostní průtoky [kg/h] – **VSTUP = VÝSTUP**



# REAKČNÍ ENTALPIE

**Reakční entalpie ( $\Delta H$ )** nám říká, kolik energie (tepla) se spotřebuje, nebo naopak uvolní, když z reaktantů vytvoříme produkt. Pokud se teplo uvolňuje, reakční entalpie je záporná, je reakce exotermická. Pokud se teplo spotřebovává, musíme energii dodat, entalpie má kladné znaménko a reakci říkáme endotermická.

## Výpočet reakční entalpie

Tady se opíráme o geniálně jednoduchý **Hessův zákon**. Ten říká: "Je úplně jedno, jak složitou cestou se z reaktantů stanou produkty. Celková energetická změna bude vždycky stejná.,,

Představte si to jako výlet na Sněžku. Je jedno, jestli jdete přímo nahoru, nebo oklikou přes pět dalších kopců. Výškový rozdíl mezi startem a cílem bude pořád stejný. Díky tomu můžeme spočítat i entalpii u reakcí, které v praxi probíhají složitě nebo je nelze změřit.

## Výpočet pomocí slučovací entalpie

**Standardní slučovací entalpie** ( $\Delta H_{sluč}^0$ ) je energie, která se spotřebuje/uvolní při vzniku **jednoho molu** sloučeniny z jejích **prvků** v nejstabilnější podobě (např. kyslík jako  $O_2$ , uhlík jako grafit). Tyto hodnoty najdeme v chemických tabulkách.

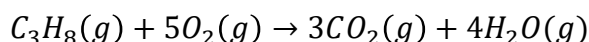
**Zlaté pravidlo:** Slučovací entalpie **prvků** (jako  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ , Fe, C) je **vždy nula**. Je to náš výchozí bod, naše "nadmořská výška nula".

$$\Delta H_{298}^0 = \sum_{\text{produkty}} \nu_p (\Delta H_{sluč,298}^0)_p - \sum_{\text{reaktanty}} \nu_r (\Delta H_{sluč,298}^0)_p$$

v je stechiometrický koeficient dané látky v rovnici.

### Příklad 1: Spalování propanu v grilu

Chceme zjistit, kolik tepla uvolní spálení propanu.



Hodnoty z tabulek (v kJ/mol)

$C_3H_8(g) = -103,8$      $O_2(g) = 0$      $CO_2(g) = -393,5$      $H_2O(l) = -241,8$

$$\Delta H_{298}^0 = (3 \cdot (-393,5) + 4 \cdot (-241,8)) - (1 \cdot (-103,8) + 5 \cdot 0) = -2043,9 \text{ kJ/mol}$$

**Závěr:** Při spálení jednoho molu propanu (cca 44 gramů) se uvolní obrovské množství tepla, 2043,9 kJ. Znaménko mínus potvrzuje, že reakce je silně **exotermická** – proto na tom můžeme grilovat.

Jakou teplotu mají spaliny? Na jakou teplotu ohřejeme 2 l vody z 15 °C, když spálíme 2 g propanu?

## Výpočet pomocí spalných entalpií

Tato metoda se používá hlavně u organických sloučenin. Využívá **standardní spalné entalpie** ( $\Delta H_{spal,2980}$ ), což je teplo, které se uvolní při dokonalém spálení jednoho molu látky na konečné oxidační produkty (např.  $CO_2(g)$ ,  $H_2O(l)$ ) za standardních podmínek.

**Princip:** Na rozdíl od slučovacích entalpií se reakční teplo vypočítá jako rozdíl sumy spalných entalpií reaktantů a sumy spalných entalpií produktů.

Důležité pravidlo: **Spalná entalpie konečných produktů spalování (např.  $CO_2$ ,  $H_2O$ ) je nulová.**

$$\Delta H_{298}^0 = \sum_{\text{reaktanty}} \nu_p (\Delta H_{spal,298}^0)_p - \sum_{\text{produkty}} \nu_r (\Delta H_{spal,298}^0)_p$$

# REAKČNÍ ENTALPIE (pokračování)

Název sloučeniny	Vzorec	Stav	$\Delta H_{\text{sluč}}^0$ (kJ/mol)	$\Delta H_{\text{spal}}^0$ (kJ/mol)	Poznámka
Anorganické sloučeniny					
Voda	H <sub>2</sub> O	(l)	-285,8	0	Produkt spalování
Voda (plyn)	H <sub>2</sub> O	(g)	-241,8	0	Produkt spalování
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	(g)	-393,5	0	Produkt spalování
Oxid uhelnatý	CO	(g)	-110,5	-283	
Amoniak (čpavek)	NH <sub>3</sub>	(g)	-46,1	-382,6	
Kyselina sírová	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	(l)	-814	N/A	
Oxid siřičitý	SO <sub>2</sub>	(g)	-296,8	N/A	
Chlorovodík	HCl	(g)	-92,3	N/A	
Uhličitan vápenatý	CaCO <sub>3</sub>	(s)	-1206,9	N/A	
Oxid vápenatý	CaO	(s)	-635,1	N/A	
Základní uhlovodíky (alkany)					
Methan	CH <sub>4</sub>	(g)	-74,8	-890,4	Hlavní složka zem. plynu
Ethan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	(g)	-84,7	-1560,7	
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	(g)	-103,8	-2219,9	Propan-butan
Butan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	(g)	-125,6	-2877,5	Propan-butan
Oktan	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	(l)	-249,9	-5470,5	Složka benzínu
Nenasycené uhlovodíky					
Ethen (Ethylen)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	(g)	+52,3	-1411,2	
Ethyn (Acetylen)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	(g)	+226,7	-1301,1	Používá se ke sváření
Benzen	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	(l)	+49,0	-3267,6	Aromatický uhlovodík
Alkoholy a karboxylové kyseliny					
Methanol	CH <sub>3</sub> OH	(l)	-238,6	-726,1	
Ethanol (Líh)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	(l)	-277,7	-1366,8	
Kyselina mravenčí	HCOOH	(l)	-424,7	-254,4	
Kyselina octová	CH <sub>3</sub> COOH	(l)	-484,3	-874,5	
Sacharidy					
Glukóza	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	(s)	-1274,4	-2805	Základní cukr