

Üvegolvasztó kemencék hőmérlege

Időtartam:

- folyamatos üzem: általában 1 órára,
- periodikus üzem esetén a hőkezelés teljes időtartamára vonatkozik.

A kemencék hőforgalma: a hőbevételek és hőkiadások meghatározása után felállított hőmérleg:

$$\boxed{\sum_{i=1}^9 \Phi_{b,i} = \sum_{j=1}^{14} \Phi_{k,j} + \Phi_m} \quad [\text{kJ/h}]$$

A kemence hőbevételi tételei:

- $\Phi_{b,1}$ a felhasznált tüzelőanyag kémiai hőtartalma,
- $\Phi_{b,2}$ a tüzelőanyag fizikai hőtartalma,
- $\Phi_{b,3}$ az égési levegő fizikai hőtartalma,
- $\Phi_{b,4}$ a hamis levegővel a kemencébe jutó hőtartalom,
- $\Phi_{b,5}$ a hűtőlevegő érzékelhető hőtartalma,
- $\Phi_{b,6}$ recirkuláció következtében a kemencébe jutó füstgáz hőtartalma,
- $\Phi_{b,7}$ a betétanyag fizikai hőtartalma,
- $\Phi_{b,8}$ a segédanyagok fizikai hőtartalma,
- $\Phi_{b,9}$ a szállító berendezés fizikai hőtartalma,

A kemence hőkiadásai:

- $\Phi_{k,1}$ tapadt és kötött víz eltávozásának hőtartalma,
- $\Phi_{k,2}$ az endoterm kémiai folyamatok hőtartalma,
- $\Phi_{k,3}$ a dehidratáció és karbonátbomláskor keletkezett gázok entalpiája,
- $\Phi_{k,4}$ a távozó betétanyag fizikai hőtartalma,
- $\Phi_{k,5}$ a távozó segédanyagok fizikai hőtartalma,
- $\Phi_{k,6}$ a szállító berendezés által elvitt fizikai hőtartalom,
- $\Phi_{k,7}$ a szárítóba elvezetett hűtőlevegő hőtartalma,
- $\Phi_{k,8}$ a kemencében előmelegített levegő hőtartalma,
- $\Phi_{k,9}$ falazatvesztesége,
- $\Phi_{k,10}$ a nyílások sugárzási vesztesége,
- $\Phi_{k,11}$ kilángolási veszteség,
- $\Phi_{k,12}$ hűtővízveszteség,
- $\Phi_{k,13}$ füstgázveszteség,
- $\Phi_{k,14}$ recirkuláció következtében a kemencéből elszívott füstgáz hőtartalma,
- Φ_m maradék veszteség.

A kemence hőbevételei

A tüzelőanyag kémiai hőtartalma

Szilikátipari kemencék hőbevételének legjelentősebb tétele a tüzelőanyag fűtőértékéből származó energia, más néven kémiai energia.

$$\Phi_{b,1} = V_{\text{gáz}} \cdot H_u \quad [\text{kJ/m}^3]$$

Az adott folyamathoz szükséges fajlagos tüzelőanyag mennyiséget (q [kJ/kg]) és a kemence tervezett termelését (N [kg/h]) szakirodalomból is vehetjük. A hőszükséglet:

$$Q = q \cdot N \quad [\text{kJ/h}]$$

Az égési levegő és a fűtőgáz előmelegítése nélkül a tüzelőanyag szükséglet:

$$V_{\text{gáz}} = \frac{Q}{H_u} \quad [\text{kg/h illetve m}^3/\text{h}]$$

A fűtőgáz fizikai hőtartalma

Az előmelegítésből származó hőbevételek a következők lehetnek:

- fűtőgáz entalpiája előmelegítésből,

$$\Phi_{b,2} = V_{gáz} \cdot c_{p,gáz} \cdot (T_{gáz,be} - 273) \quad [\text{kJ/h}],$$

ahol

$c_{p,gáz}$ [kJ/(m³·K)] a gázkeverék fajlagos hőkapacitása,
 $T_{gáz,be}$ [K] a fűtőgáz hőmérséklete.

Az égési levegő fizikai hőtartalma

Az égési levegő entalpiája, regeneratív vagy rekuperatív előmelegítésből, illetve az esetlegesen alkalmazott gőz entalpiája (olajtüzelésnél porlasztóközegként).

Az égéshez szükséges oxigén mennyisége földgáz tüzelés esetén:

$$O_{\min} = 2CH_4' + 3,5C_2H_6' + 5C_3H_8' \quad [\text{m}^3/\text{m}^3]$$

A levegőszükséglet:

$$L_{\min} = 4,762 \cdot O_{\min} \quad [\text{m}^3/\text{m}^3]$$

$$L_{gy} = n \cdot L_{\min} \quad [\text{m}^3/\text{m}^3]$$

$$V_{lev} = L_{gy} \cdot V_{gáz} = n \cdot L_{\min} \cdot V_{gáz} \quad [\text{m}^3/\text{m}^3]$$

Az égési levegő normál állapot fölötti fizikai hője:

$$\Phi_{b,3} = V_{lev} \cdot c_{p,lev} \cdot (T_{lev} - 273) \quad [\text{kJ/h}]$$

ahol $c_{p,lev}$ [kJ/(m³·K)] a levegő fajlagos hőkapacitása,
 T_{lev} [K] a levegő hőmérséklete.

A kemencébe belépő további szilárd és légnemű anyagokkal bevitt hő

- a betét, a segédanyagok, segédberendezések hotartalma,
- a szállítóberendezés (alagútkemence kocsi) hőtartalma,
- a hamis levegő hőtartalma,
- hűtő levegő hőtartalma,
- recirkuláltatott füstgázok entalpiája.

Hamis levegő

$$V_{\text{lev,hamis}} = (n_v - n) \cdot L_{\text{min}} \cdot V_{\text{gáz}} \text{ [m}^3\text{/h]}$$

ahol n_v a kemencéből távozó füstgáz levegőtényezője,

$$\Phi_{b,4} = V_{\text{lev,hamis}} \cdot c_{p,\text{lev}} \cdot (T_{\text{lev}} - 273) \text{ [kJ/h]}$$

ahol $c_{p,\text{lev}}$ [kJ/(m³·K)] a levegő fajlagos hőkapacitása,

T_{lev} [K] a levegő hőmérséklete.

Hűtőlevegő

$$\Phi_{b,5} = V_{\text{lev,h}} \cdot c_{p,\text{lev}} \cdot (T_{\text{lev}} - 273) \text{ [kJ/h]}$$

ahol $V_{\text{lev,h}}$ [m³/h] a hűtőlevegő térfogatárama,

$c_{p,\text{lev}}$ [kJ/(m³·K)] a levegő fajlagos hőkapacitása,

T_{lev} [K] a levegő belépő hőmérséklete.

Recirkuláció

$$\Phi_{b,6} = V_{fsg,rec} \cdot c_{p,fsg} \cdot (T_{fsg} - 273) \quad [\text{kJ/h}]$$

ahol $V_{fsg,rec}$ [m³/h] a recirkulált füstgáz térfogatárama,
 $c_{p,fsg}$ [kJ/(m³·K)] a recirkulált füstgáz fajlagos hőkapacitása,
 T_{fsg} [K] a recirkulált füstgáz hőmérséklete a kemencébe lépéskor.

Betétanyag bevitt hő

$$\Phi_{b,7} = q_{m,bet} \cdot c_{bet} \cdot (T_{bet} - 273) \quad [\text{kJ/h}]$$

ahol $q_{m,bet}$ [kg/h] a kemencébe adagolt betétanyag (nyersanyag) tömegárama,
 c_{bet} [kJ/(kg·K)] a betétanyag fajlagos hőkapacitása a kemencébe lépéskor,
 T_{bet} [K] a betétanyag hőmérséklete beadagolásakor.

Segédanyagok és a szállítóberendezés

$$\Phi_{b,8} = q_{m,sa} \cdot c_{sa} \cdot (T_{sa} - 273) \quad [\text{kJ/h}]$$

$$\Phi_{b,9} = q_{m,sz} \cdot c_{sz} \cdot (T_{sz} - 273) \quad [\text{kJ/h}]$$

ahol $q_{m,sa}$ és $q_{m,sz}$ [kg/h] a segédanyagok és a szállítóberendezések tömegárama,

c_{sa} és c_{sz} [kJ/(kg·K)] a segédanyagok és a szállítóberendezések fajlagos hőkapacitása,

T_{sa} és T_{sz} [K] a segédanyagok és a szállítóberendezés hőmérséklete a kemencébe lépéskor.

A kemence hőkiadásai

A kémiai átalakulások hőigénye

- tapadt és kötött víz eltávozás hőigénye,
- karbonát bontás hőigénye,
- kémiai reakciók hőigénye.

A higroszkópos nedvesség elpárologtatása és felmelegítése a füstgáz hőmérsékletére:

$$\Phi_{k,1} = q_{m,bet} \cdot 0,01 \cdot W \cdot \left[c_{v\acute{z}} \cdot (373 - T_{bet\acute{e}t}) + q_{p\acute{a}r} + c_{p,H_2O} \cdot (T_{fsg} - 373) \right]$$

[kJ/h],

ahol $q_{m,bet}$ [kg/h]	a hevítendő betét, illetve a termék tömegárama,
W [%]	a betét higroszkópos nedvességtartalma,
$c_{v\acute{z}}$ [kJ/(kg·K)]	a betétben lévő tapadt víz fajlagos hőkapacitása,
c_{p,H_2O} [kJ/(kg·K)]	a vízgőz fajlagos hőkapacitása a füstgázkilépés hőmérsékletén,
$T_{bet\acute{e}t}$ [K]	a kemencébe adagolt betét hőmérséklete,
T_{fsg} [K]	a kemencéből távozó füstgáz hőmérséklete,
q_{olv} [kJ/kg]	a megolvasztott alapanyag fajlagos olvadáshője,
$q_{p\acute{a}r}$ [kJ/kg]	a víz párolgáshője.

Endoterm kémiai folyamatok

$$\Phi_{k,2} = \sum_{i=1}^n \cdot q_{m,i} \cdot q_i \quad [\text{kJ/h}]$$

ahol: $q_{m,i}$ [kg/h] a q_i -re vonatkozó elegyalkotók tömegárama,

q_i [kJ/kg] az egyes elegyalkotók reakcióhője, agyag dehidratációjakor, 2093 kJ/kg,
karbonátok termikus disszociációjakor:
1315 kJ/kg MgCO_3 , 1821 kJ/kg CaCO_3

A dehidratáció, karbonátbomlás során keletkezett gázok hője

$$\Phi_{k,3} = \frac{q_{m,ki}}{1000} \cdot \left[(4 \cdot \text{CaO} + 5,55 \cdot \text{MgO}) \cdot c_{p,\text{CO}_2} + \frac{22,4}{18} \left(\frac{i}{100-i} - 7,86 \cdot \text{CaO} - 10,9 \cdot \text{MgO} \right) \cdot c_{p,\text{H}_2\text{O}} \right] \cdot \vartheta_{fsg}$$

ahol: $q_{m,ki}$ [kg/h] a kemencéből kijövő termék tömegárama,

CaO [%] az égetett termék kalciumoxid tartalma,

MgO [%] az égetett termék magnéziumoxid tartalma,

c_{p,CO_2} [kJ/(kg·K)] a széndioxid fajlagos hőkapacitása,

$c_{p,\text{H}_2\text{O}}$ [kJ/(kg·K)] a vízgőz fajlagos hőkapacitása,

ϑ_{fsg} [°C] a füstgáz kilépési hőmérséklete

i [%] a száraz betétanyag izzítási vesztesége.

A kemencéből távozó szilárd anyagok és a felmelegedett hűtőlevegő entalpiája

Betét, a segédanyagok és a szállítóberendezés

$$\Phi_{k,4} = q_{m,bet} \cdot c_{bet,ki} \cdot (T_{bet,ki} - 273) \quad [\text{kJ/h}]$$

$$\Phi_{k,5} = q_{m,sa} \cdot c_{sa,ki} \cdot (T_{sa,ki} - 273) \quad [\text{kJ/h}]$$

$$\Phi_{k,6} = q_{m,sz} \cdot c_{sz,ki} \cdot (T_{sz,ki} - 273) \quad [\text{kJ/h}]$$

- ahol q_m [kg/h] a betétanyag, segédanyag és szállítóberendezések tömegárama,
 c_{ki} [kJ/(kg·K)] a fajlagos hőkapacitása a kemencéből történő kilépéskor,
 T_{ki} [K] a betétanyag hőmérséklete a kemencéből történő kilépéskor.

A szárítóba elvezetett, felmelegedett **hűtőlevegő**

$$\Phi_{k,7} = V_{lev,h} \cdot c_{p,lev} \cdot (T_{lev} - 273) \quad [\text{kJ/h}]$$

- ahol $V_{lev,h}$ [m³/h] a hűtőlevegő térfogatárama,
 $c_{p,lev}$ [kJ/(m³·K)] a kilépő levegő fajlagos hőkapacitása,
 T_{lev} [K] a kilépő levegő hőmérséklete.

Az elszívott égési levegő hője:

$$\Phi_{k,8} = V_{\text{lev,elsz}} \cdot c_{p,\text{lev}} \cdot (T_{\text{lev}} - 273) \text{ [kJ/h]}$$

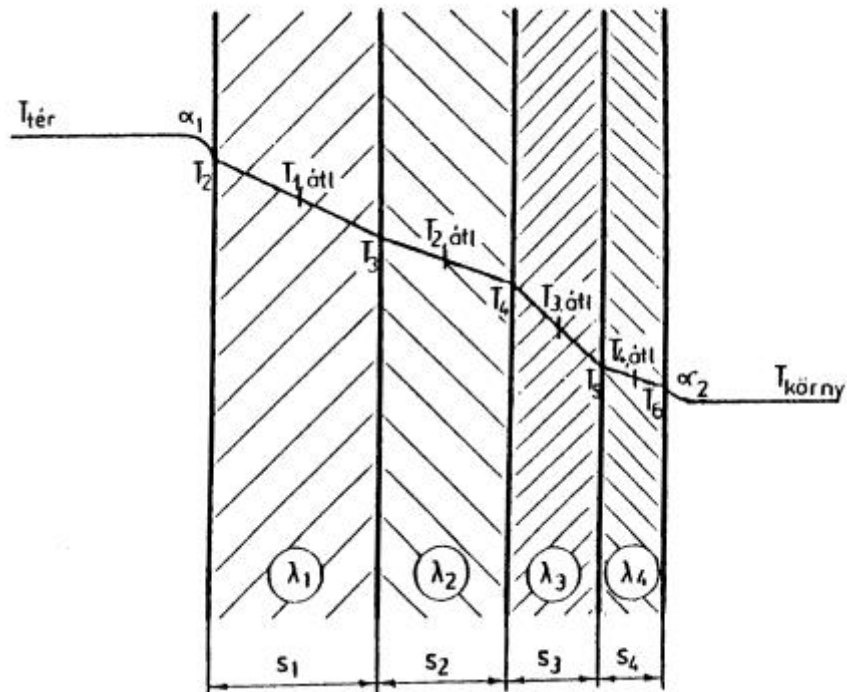
ahol $V_{\text{lev,elsz}}$ [m³/h] a kemencéből elszívott égési levegő térfogatárama,

$c_{p,\text{lev}}$ [kJ/(m³·K)] a kilépő levegő fajlagos hőkapacitása,

T_{lev} [K] a kilépő levegő hőmérséklete.

Falvesztéség

Többrétegű fal falvesztéségei iterációval határozhatók meg.



Hőátadás négyrétegű fal esetén

$$q = \frac{T_{\text{tér}} - T_{\text{körny}}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [\text{W/m}^2]$$

A hőátadási tényező a kemencetérben a füstgáz és a belső oldalfelület között:

$$\alpha_1 = 31,5 + 0,026 \cdot T_{\text{tér}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

A külső T_6 hőmérsékletű függőleges falfelület és a $T_{\text{körny}}$ hőmérsékletű környező levegő között:

$$\alpha_1 = 1,6 \cdot 2,56 \cdot \sqrt[4]{T_6 - T_{\text{körny}}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Az 1,6-os szorzó a sugárzás részarányát fejezi ki.

Réteghatár hőmérsékletek:

$$T_2 = T_{\text{tér}} - \frac{q}{\alpha_1} \qquad T_3 = T_2 - q \cdot \frac{s_1}{\lambda_1}$$

$$T_4 = T_3 - q \cdot \frac{s_2}{\lambda_2} \qquad T_5 = T_4 - q \cdot \frac{s_3}{\lambda_3}$$

$$T_6 = T_5 - q \cdot \frac{s_{41}}{\lambda_4}$$

ahol

s_i az egyes rétegek vastagsága,

λ_i az illető réteg hővezetési tényezője a réteg $T_{i,\text{átl}}$ átlaghőmérsékletén.

Réteg átlaghőmérsékletek:

$$T_{1,\text{átl}} = \frac{T_2 + T_3}{2} \qquad T_{2,\text{átl}} = \frac{T_3 + T_4}{2}$$

$$T_{3,\text{átl}} = \frac{T_4 + T_5}{2} \qquad T_{4,\text{átl}} = \frac{T_5 + T_6}{2}$$

Ezeket az új adatokat felhasználva kiszámítható egy $q_{új}$ hőáramsűrűség. Ha q és $q_{új}$ egy meghatározott értéknél (pl. 1%) kisebb mértékben tér el egymástól, akkor ez a q már elfogadható „pontos” értéknek, így ebből számítható a falveszteség:

$$\Phi_{k,9} = 3,6 \cdot \sum_i (A_i \cdot q_i) \quad [\text{kJ/h}],$$

ahol

A_i [m²] a megfelelő falfelület nagysága

A kemencenyílások sugárzási vesztesége

- rendeltetészerű
 - ajtó, adagoló nyílás, nézőablak
- nem rendeltetészerű
 - elhasználódás következtében létrejövő nyílások

A sugárzási veszteség (Stefan-Boltzmann képletet)

$$\Phi_{k,10} = A \cdot C \cdot \left[\left(\frac{T_{tér}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{körny}}{100} \right)^4 \right] \quad [\text{kJ/h}],$$

ahol A [m²] a nyílás felülete, ahol a zárható nyílások területét nyitva tartásuk arányában kell figyelembe venni.

Kilángolási veszteség

Ha a munkatérben túlnyomás van. A kiáramlott füstgáz térfogata:

$$V_i = 3600 \cdot \varphi \cdot A_1 \cdot \frac{273}{T_{\text{láng},i} + 273} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{273} \cdot \rho_{\text{láng}}} \cdot \sqrt{T_{\text{láng},i} + 273}$$

[m³/h]

itt: A_1 [m²] a nyílás keresztmetszete,
 $\varphi=0,8 \dots 0,85$ az átömlési tényező,
 Δp [Pa] a túlnyomás a munkatérben,
 $T_{\text{láng},i}=T_{\text{tér},i}$ [°C] a láng (füstgáz) hőmérséklete,
 $\rho_{\text{láng}}$ [kg/m³] a láng (füstgáz) sűrűsége $T=0$ °C-n,
mely számolható a komponensek sűrűségéből:

$$\rho_{\text{láng}} = 1,977 \cdot \text{CO}_2' + 1,25 \cdot \text{N}_2' + 1,429 \cdot \text{O}_2' \quad [\text{kg/m}^3]$$

A kilángolt gázzal távozó fizikai hő:

$$\Phi_{k,11,i} = V_i \cdot c_{p,i} \cdot T_{\text{tér},i} \quad [\text{kJ/h}]$$

$c_{p,i}$ [kJ/(m³·K)] a füstgáz fajhője, mely a bennelévő gázok fajhőjének súlyozott átlagaként számítható. Az egyes komponensek fajhőértékeit természetesen $T_{\text{tér},i}$ hőmérsékleten kell venni.

Ezek után a teljes kilángolási veszteség (i nyílásra):

$$\boxed{\Phi_{k,11} = \sum_i \Phi_{k,4,i}} \quad [\text{kJ/h}]$$

Hűtővízvesztesség

$$\Phi_{k,12} = \dot{m}_{\text{víz}} \cdot c_{\text{víz}} \cdot (T_{\text{víz,ki}} - T_{\text{víz,be}}) \quad [\text{kJ/h}]$$

ahol $V_{\text{víz}}$ $[\text{m}^3/\text{h}]$ víztérfogatáram felhasználásával

$\dot{m}_{\text{víz}} = 1000 \cdot V_{\text{víz}} \quad [\text{kg/h}]$ a víz tömegárama,

$c_{\text{víz}} = 4,187 \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ a víz fajhője,

$T_{\text{víz,ki}} \quad [\text{K}]$ illetve

$T_{\text{víz,be}} \quad [\text{K}]$ a ki- ill. beáramló hűtővíz hőmérséklete.

Füstgázvesztesség

$$\Phi_{k,13} = V_{\text{füst}} \cdot c_{p,\text{füst}} \cdot T_{\text{füst}} \quad [\text{kJ/h}]$$

A keletkező füstgázmennyiség a tüzelőanyag (földgáz) összetételétől és a levegőtényezőtől függ:

$$\frac{V_{\text{füstgáz}}}{V_{\text{földgáz}}} = \text{CO}'_2 + \text{N}'_2 + 3\text{CH}'_4 + 5\text{C}'_2\text{H}'_6 + 7\text{C}'_3\text{H}'_8 + \\ + (4,762 \cdot n - 1) \cdot \text{O}_{\text{min}}$$

ahol n a tüzelés levegőtényezője.

Recirkuláció révén a kemencéből elvezetett füstgáz entalpiája:

$$\Phi_{k,14} = V_{\text{fsg,rec}} \cdot c_{p,\text{fsg}} \cdot (T_{\text{fsg,rec}} - 273) \quad [\text{kJ/h}]$$

ahol $V_{\text{fsg,rec}}$ [m³/h] a recirkulált füstgáz térfogatárama,
 $c_{p,\text{fsg}}$ [kJ/(m³·K)] a recirkulált füstgáz fajlagos hőkapacitása,
 $T_{\text{fsg,rec}}$ [K] a recirkulált füstgáz hőmérséklete a kemencéből kilépéskor.

Maradékveszteség

A veszteségtételek összefüggéseinek számításánál alkalmazott közelítések, kerekítések, egyszerűsítések következtében keletkező számítási eltérés a maradékveszteség.