



A nedves levegő állapotjelzői

Méréstechnika

Budulski László
PTE-PMMIK
budulskil@pmmik.pte.hu



Levegő alapadatai

A levegő a földet körülvevő gázok keveréke.

Levegő összetétele:

- **Száraz rész** (O_2 , N_2 , egyéb gázok)
- **Víz** (vízgőz, pára, eső, harmat, jég)

Levegő alapadatai

Fajhő (hőkapacitás):

Megadja, hogy mennyi hőenergiát kell közölni a közeggel, hogy a hőmérséklete egy Kelvinnel emelkedjen.

$$c_{\text{lev.}} = 1,0035 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad (101\,325 \text{ Pa nyomáson, } 0 \text{ °C-on})$$

Sűrűség (száraz levegőé):

Egységnyi térfogatú közeg tömege.

$$\rho_{\text{lev.}} = 1,2928 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (101\,325 \text{ Pa nyomáson, } 0 \text{ °C-on})$$

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (\text{adott hőmérsékletre átszámítva})$$

Levegő sűrűsége

Moláris tömeg:

$$M = \frac{m \cdot R \cdot T}{p \cdot V} = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{p} \quad \left[\frac{kg}{mol} \right]$$

Sűrűség:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{M \cdot p}{R \cdot T} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Abszolút hőmérséklet:

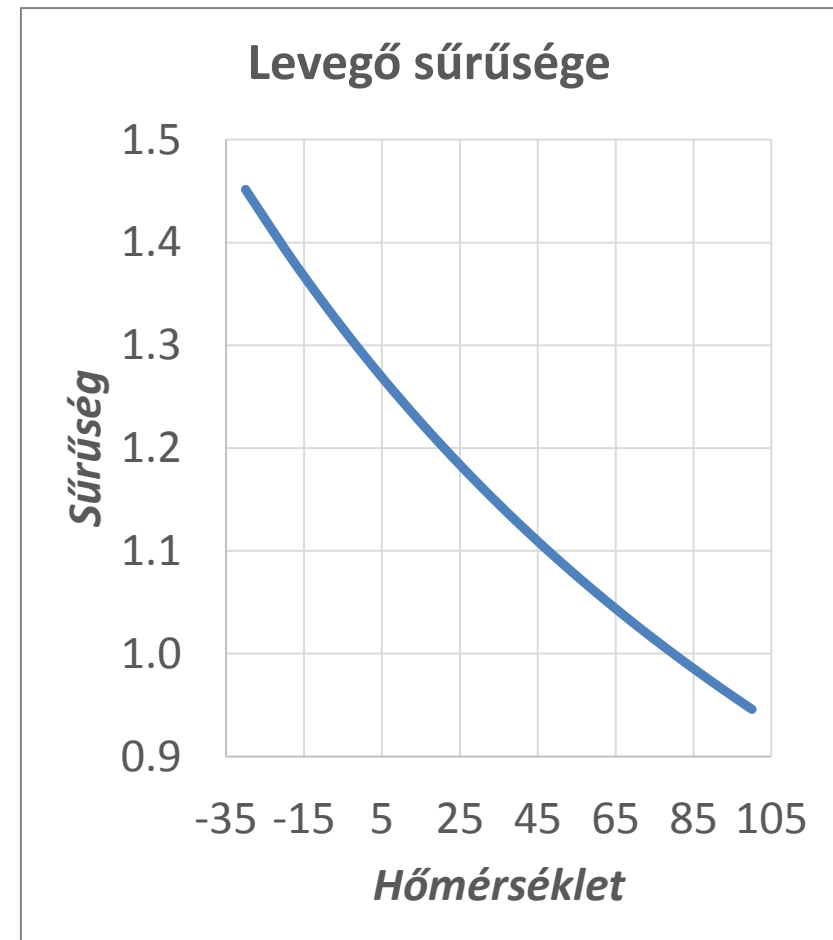
$$T = 273,15 + t \text{ (}^\circ\text{C)} \quad [\text{K}]$$

Levegő moláris tömege:

$$M_{\text{lev.}} = 28,9657 \cong 29 \quad [\text{g/mol}]$$

Légköri nyomás tengerszinten:

$$p_{\text{légköri}} = 101325 \quad [\text{Pa}]$$





Levegő sűrűsége

Avogadro-szám:

$$N_A = 6,02214129 \cdot 10^{23} \quad [1/mol]$$

Boltzmann-állandó:

$$k_B = 1,380648813 \cdot 10^{-23} \quad [J/K]$$

Egyetemes (univerzális) gázállandó

$$R = N_A \cdot k_B = 8,31446 \quad [J/(mol \cdot K)]$$

M	– moláris tömeg	[kg/mol]
ρ	– sűrűség	[kg/m ³]
m	– tömeg	[kg]
V	– térfogat	[m ³]
p	– nyomás	[Pa]
R	– egyetemes (univerzális) gázállandó	[J/(mol · K)]
T	– hőmérséklet	[K]
N_A	– Avogadro-szám	[1/mol]
k_B	– Boltzmann-állandó	[J/K]



Levegő összetevői és moláris tömege

Levegő összetevői:					
Anyag		Térfogat- százalék [%]	Moltört [<i>mol/mol</i>]	Moltömeg [<i>g/mol</i>]	Moltömeg [<i>g/mol</i>]
Nitrogén	N2	78,0840000	0,7808400	28,0137100	21,8742253
Oxigén	O2	20,9460000	0,2094600	31,9988000	6,7024686
Argon	Ar	0,9340000	0,0093400	39,9481000	0,3731153
Szén-dioxid	CO2	0,0350000	0,0003500	44,0094000	0,0154033
Neon	Ne	0,0018180	0,0000182	20,1797600	0,0003669
Hélium	He	0,0005240	0,0000052	4,0026022	0,0000210
Kripton	Kr	0,0001140	0,0000011	83,7982000	0,0000955
Metán	CH4	0,0001745	0,0000017	16,0425000	0,0000280
Hidrogén	H2	0,0000550	0,0000006	2,0159500	0,0000011
				Levegő mol tömege:	28,9657250

Levegő alapadatai

Abszolút nedvességtartalom:

1 kg tömegű levegőben mennyi vízgőz van. Az 1 kg a száraz levegő tömege, ezért a nedves levegő egységnyi tömege 1 kg-nál több.

$$x = r \cdot \frac{\rho_{\text{parciális}}}{\rho - \rho_{\text{parciális}}} \quad \left[\frac{kg}{kg} \right]$$

Vízgőz keverési aránya: $r = \frac{M_g}{M_l} = 0,622 [-]$

Relatív nedvességtartalom:

A levegőben levő vízgőz parciális nyomása hogyan aránylik a telített levegőhöz képest.

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{parciális}}}{\rho_{\text{telítési}}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Levegő alapadatai

Parciális gőznyomás (résznyomás):

Az egyes alkotógázok résznyomásának az összegét jelenti.

$$p \quad [Pa]$$

Entalpia (hőtartalom):

Egy zárt rendszer összes energiatartalmát jelenti.

Az a hő(energia) mennyiség, amellyel azt 0 °C-ról az adott hőmérsékletre tudjuk állandó nyomáson melegíteni.

(A 0 °C-nál alacsonyabb hőmérsékletű levegő entalpiája negatív)

$$h \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Egységnyi mennyiség, de nem 1 kg tömegre vonatkoztatva, mivel a nedves rész hőtartalma is hozzáadódik!

Hőtartalom 1 kg száraz levegőre vonatkoztatva.

Entalpia

Megállapogás:

- **A szárazrésznek az entalpiája akkor nulla ($h = 0 \text{ [J/kg]}$):**
ha a száraz levegő 0 °C hőmérsékletű (normál állapotú)
- **Víz résznek az entalpiája akkor nulla ($h = 0 \text{ [J/kg]}$):**
ha a víz 0 °C hőmérsékletű, és folyékony halmazállapotú

Entalpia:

$$h = \underbrace{c_{\text{lev.}} \cdot t_{\text{lev.}}}_{\text{Száraz rész hőtartalma}} + x \cdot \underbrace{(r_0 + c_{\text{pg}} \cdot t_{\text{lev.}})}_{\text{Nedves rész hőtartalma}}$$

Száraz rész
hőtartalma

Nedves rész
hőtartalma

$c_{\text{lev.}}$ – levegő fajhője $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$

$t_{\text{lev.}}$ – levegő hőmérséklete $[\text{°C}]$

x – absz. nedv. tart. $[\text{kg}/\text{kg}]$

r_0 – víz párolgáshője $[\text{kJ}/\text{kg}]$

c_{pg} – vízgőz fajhője $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$

Entalpia

Száraz rész hőtartalma:

$$h_{\text{száraz}} = m \cdot c_{\text{lev.}} \cdot (t_{\text{lev.}} - t_0) \quad (m = 1 \text{ egységnyi; } t_0 = 0 \text{ } [^{\circ}\text{C}] \text{ megállapodásból})$$

Nedves rész hőtartalma:

- **Látens (rejtett) hő:** $x \cdot r_0$

Anyag halmazállapot változásakor felszabaduló vagy elnyelődő hőenergia.

- szilárdból cseppfolyós = olvadáshő
- cseppfolyósból légnemű = párolgási hő

- **Vízgőz hőtartalma:** $h_g = x \cdot c_{\text{pg}} \cdot (t_{\text{lev.}} - t_0)$

$c_{\text{lev.}}$	– levegő fajhője	$[kJ/(kg \cdot K)]$
$t_{\text{lev.}}$	– levegő hőmérséklete	$[^{\circ}\text{C}]$
x	– abszolút nedvességtartalom	$[kg/kg]$
r_0	– víz párolgáshője	$[kJ/kg]$
c_{pg}	– vízgőz fajhője	$[kJ/(kg \cdot K)]$
m	– (egységnyi) tömeg	$[kg]$
t_0	– 0 °C hőmérsékletű levegő	$[kg]$

Entalpia

Párolgáshő:

Egységnyi tömegű anyag állandó hőmérsékleten történő elpárologtatásához szükséges energia.

Víz párolgási hője:

$$r_0 = 2488 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (0 \text{ °C-on, folyadék-gőz állapotvált.})$$

Víz olvadáshője:

$$s_0 = 333,7 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (0 \text{ °C-on, szilárd-folyadék állapotvált.})$$

Vízgőz fajhője:

$$c_{pg} = 1,86 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \quad (0 \text{ °C-on})$$

Entalpia

Több esetre értelmezzük, mivel tútelített állapotba is kerülhet a levegő, amikor a többlet nedvességet a levegő nem képes már gőz formájában felvenni (vízcseppek, vagy jégkristályok vannak jelen).

1. eset (alapeset): $\varphi < 1$

$$h = c_{lev.} \cdot t_{lev.} + x \cdot (r_0 + c_{pg} \cdot t_{lev.})$$

2. eset: $\varphi > 1$ és $t > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$h = c_{lev.} \cdot t_{lev.} + x_{tel} \cdot (r_0 + c_{pg} \cdot t_{lev.}) + (x - x_{tel}) \cdot (c_{v\acute{I}z} \cdot t_{lev.})$$

3. eset: $\varphi > 1$ és $t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$h = c_{lev.} \cdot t_{lev.} + x_{tel} \cdot (r_0 + c_{pg} \cdot t_{lev.}) + (x - x_{tel}) \cdot (c_{j\acute{e}g} \cdot t_{lev.} - s_0)$$

Mérőeszközök

Hőmérséklet és relatív páratartalom mérés:

KIMO Kistock KH-250 AO mérés adatgyűjtő, külső érzékelőivel együtt

KIMO Kistock KH-250 AO mérés adatgyűjtő és külső érzékelőknek specifikációja			
Belső érzékelők (műszer)		Külső csatlakozási lehetőség	
páratartalom	5...95 % HR	CNT hőérzékelők	-40...+120 °C
hőmérséklet	-20...+70 °C	Távadók jeleinek fogadása	0...20 mA;
fényerősség	0...10000 lux		4...20 mA;
			0...10 V
Egéb tulajdonságok (műszer):			
2 soros LCD kijelzővel rendelkezik (tetszőlegesen állítható)			
2 darab külső érzékelő csatlakoztatási lehetőség (Jack csatlakozóval)			
IP65 védetség (hűtőházi és ipari mérésekre is alkalmas)			
20 000 mérési pont gyűjtési belső memória			
2 konfigurálható riasztási érték			
USB porton keresztül kommunikáció a PC-vel			
Mágneses rögzítési lehetőség			

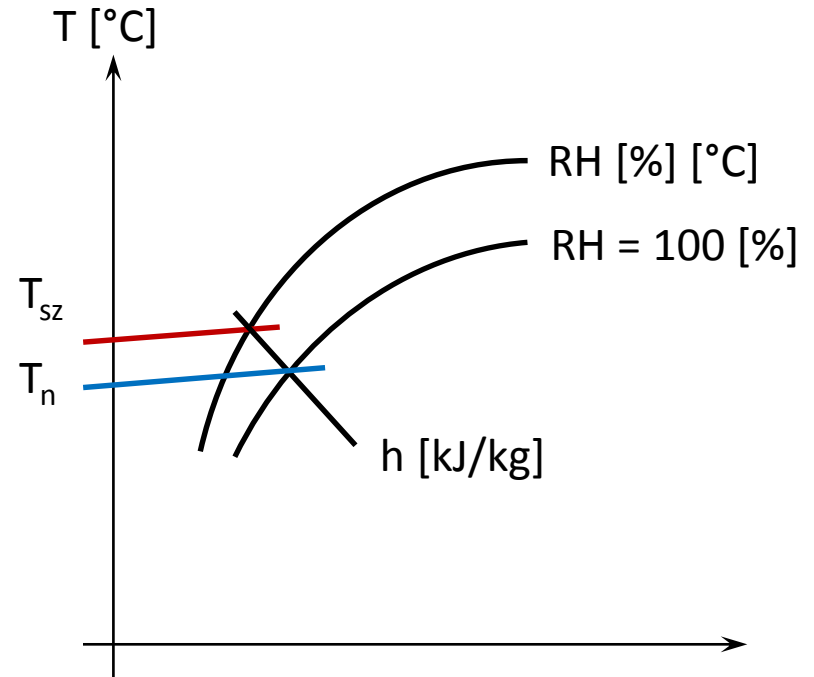


Mérőeszközök

Nedves- és száraz léghőmérséklet meghatározás:

Assmann-féle pszichrométer

Nedves hőmérséklet h-x diagram segítségével is meghatározható, a száraz léghőmérséklet és a relatív páratartalom ismeretében. (h = állandó mentén)



01. Példa

Adatok a légállapotra vonatkozóan:

$$t_{\text{lev.}} = 24 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\varphi = 50 \quad [\%]$$

Kérdés:

Milyen adatokat tudunk leolvasni a h-x diagramról?

Mennyi ezek értéke az adott légállapotra?

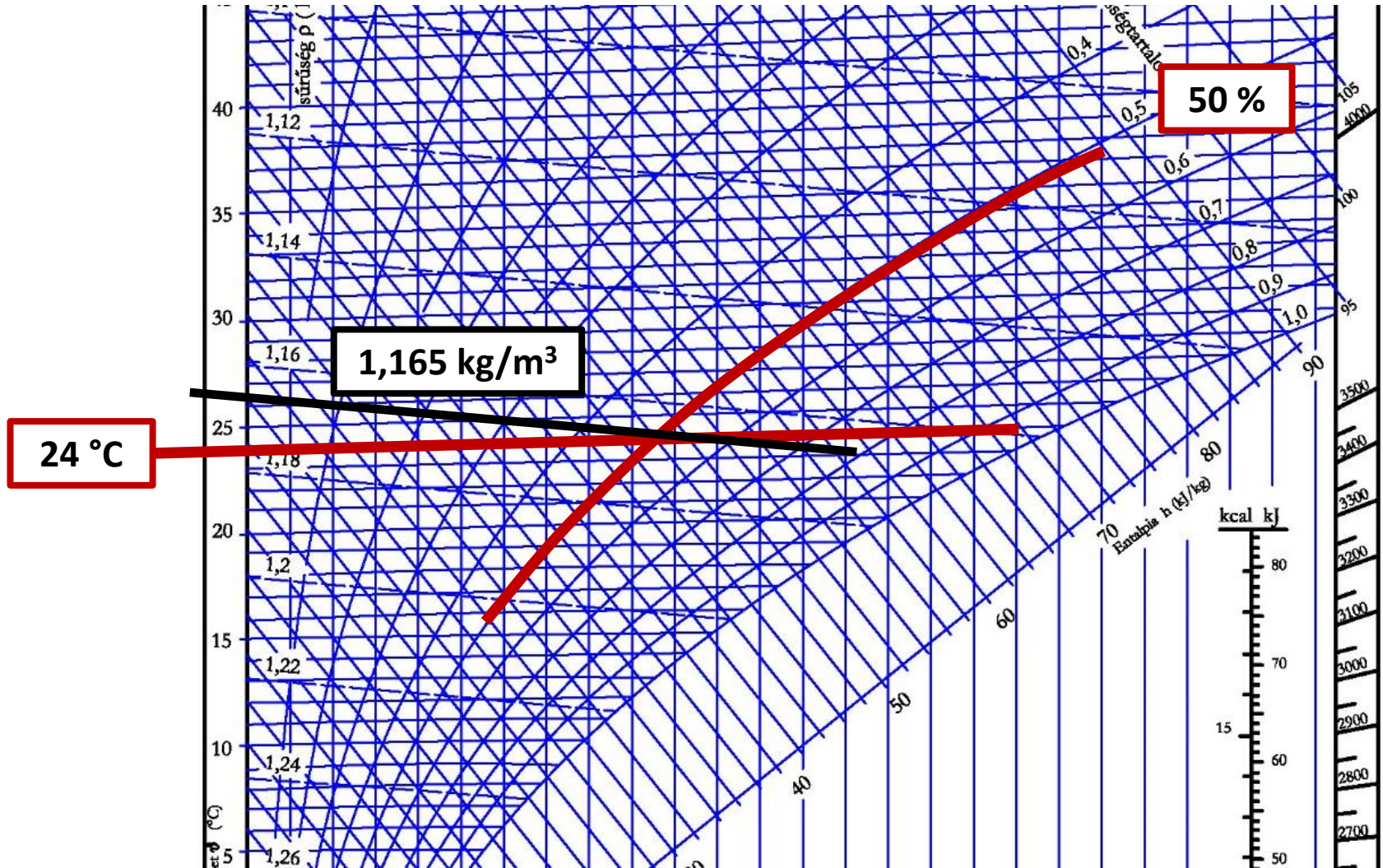
01. Példa

Leolvasható értékek:

t csoport:	száraz hőmérséklet	$t_{lev.}$	$[^{\circ}C]$
	telítési vízgőznyomás	$p_{tel.}$	$[Pa]$
	telítési nedvességtartalom	$x_{tel.}$	$[kg/kg]$
x csoport:	abszolút nedvességtartalom	x	$[kg/kg]$
	parciális vízgőznyomás	p_g	$[Pa]$
	harmatponti hőmérséklet	t_h	$[^{\circ}C]$
i csoport:	entalpia	h	$[kJ/kg]$
	nedves hőmérséklet	t_n	$[^{\circ}C]$
φ csoport:	relatív nedvességtartalom	φ	$[\%]$

01. Példa

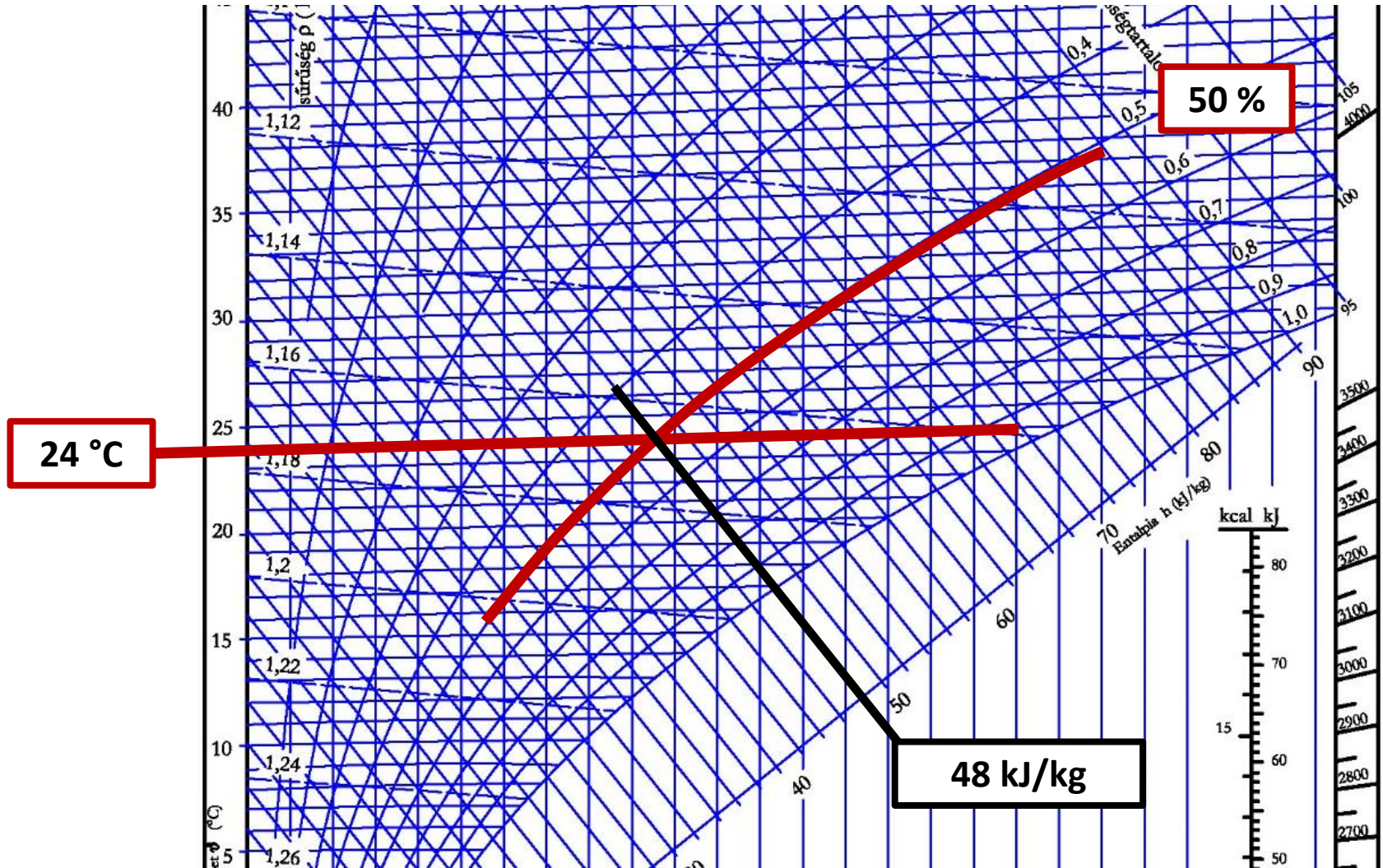
Sűrűség: $\rho = 1.165 \quad [kg/m^3]$



01. Példa

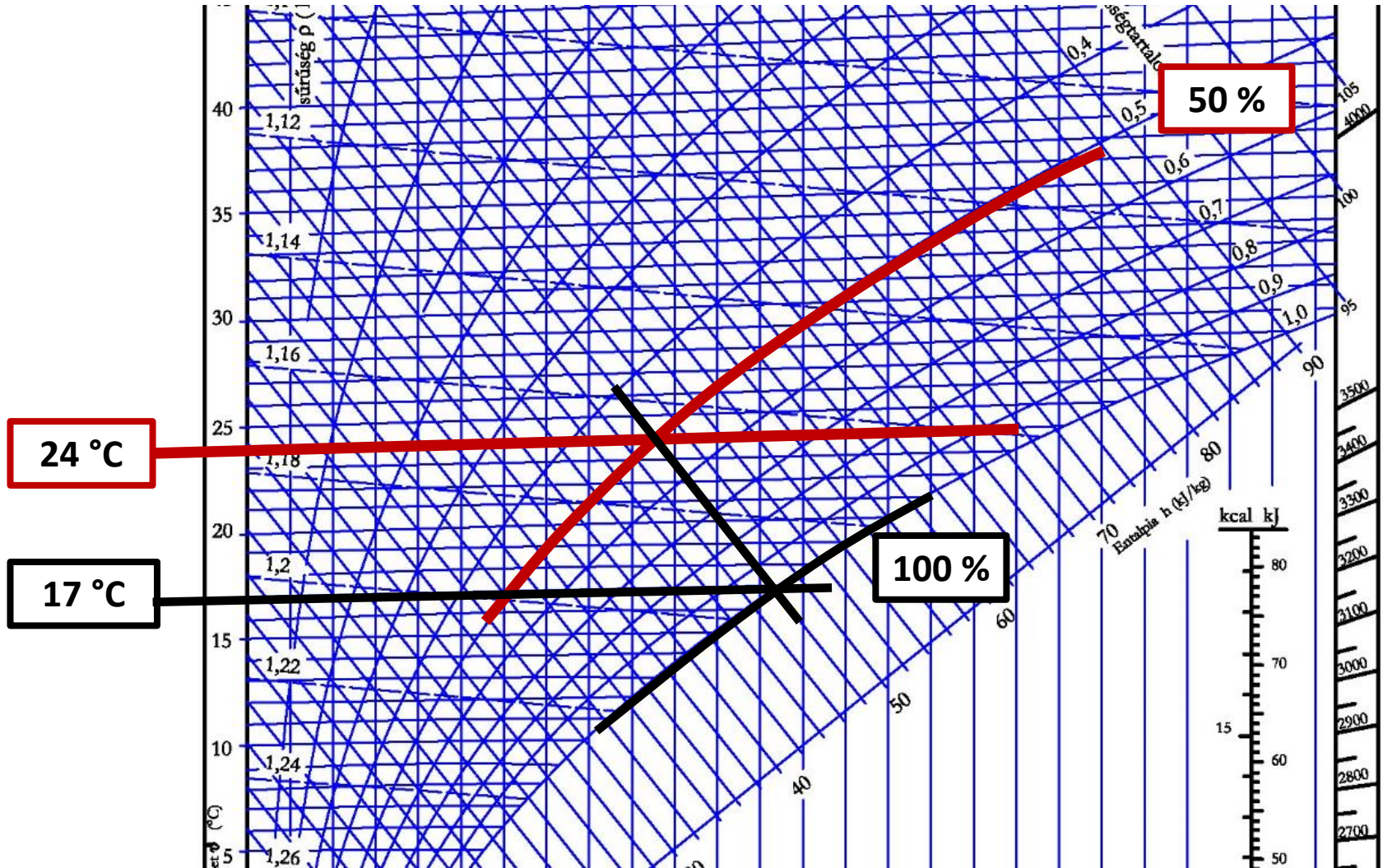
Entalpia:

$$h = 48 \quad [kJ/kg]$$



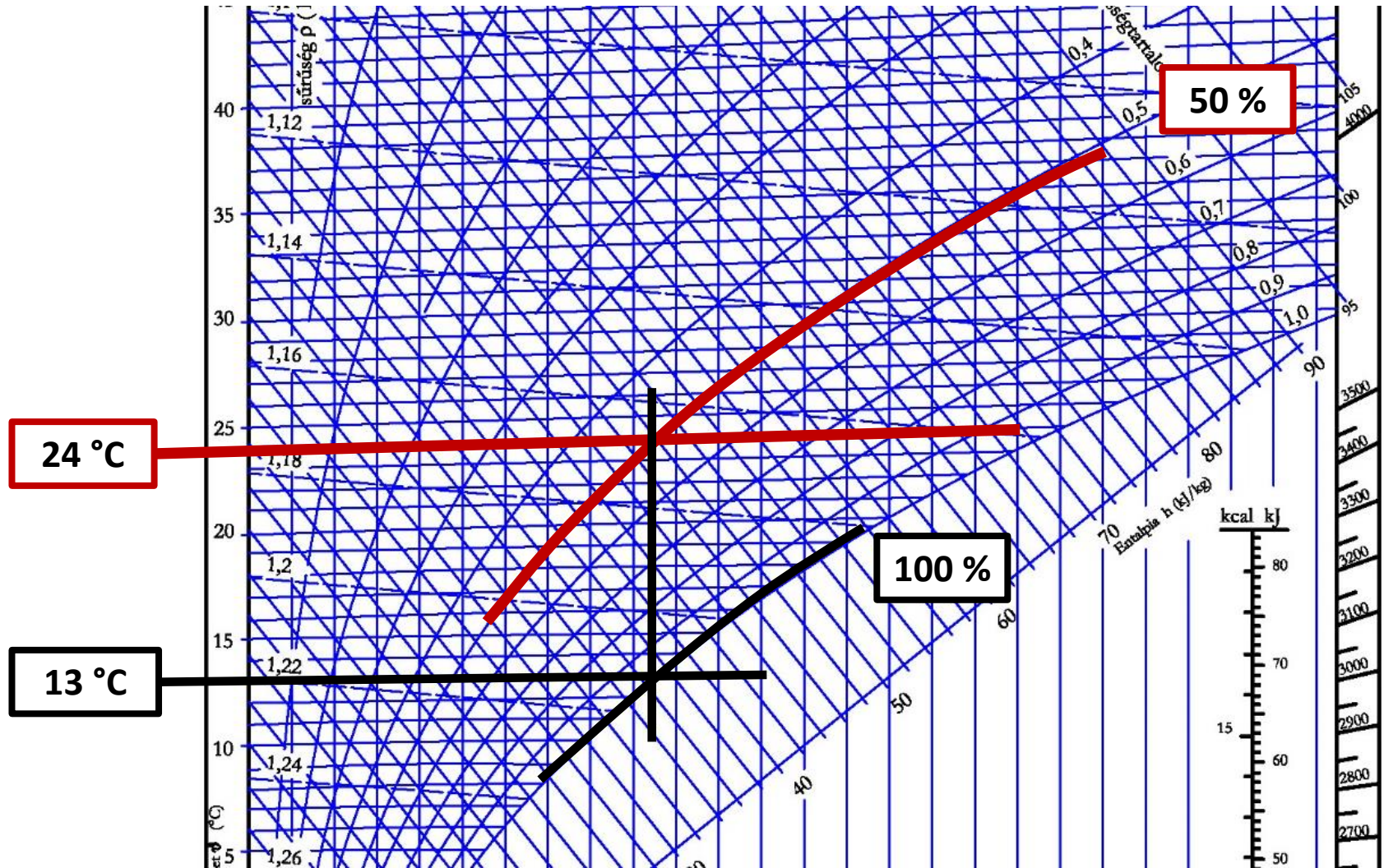
01. Példa

Nedves hőmérséklet: $t_n = 17$ [°C]



01. Példa

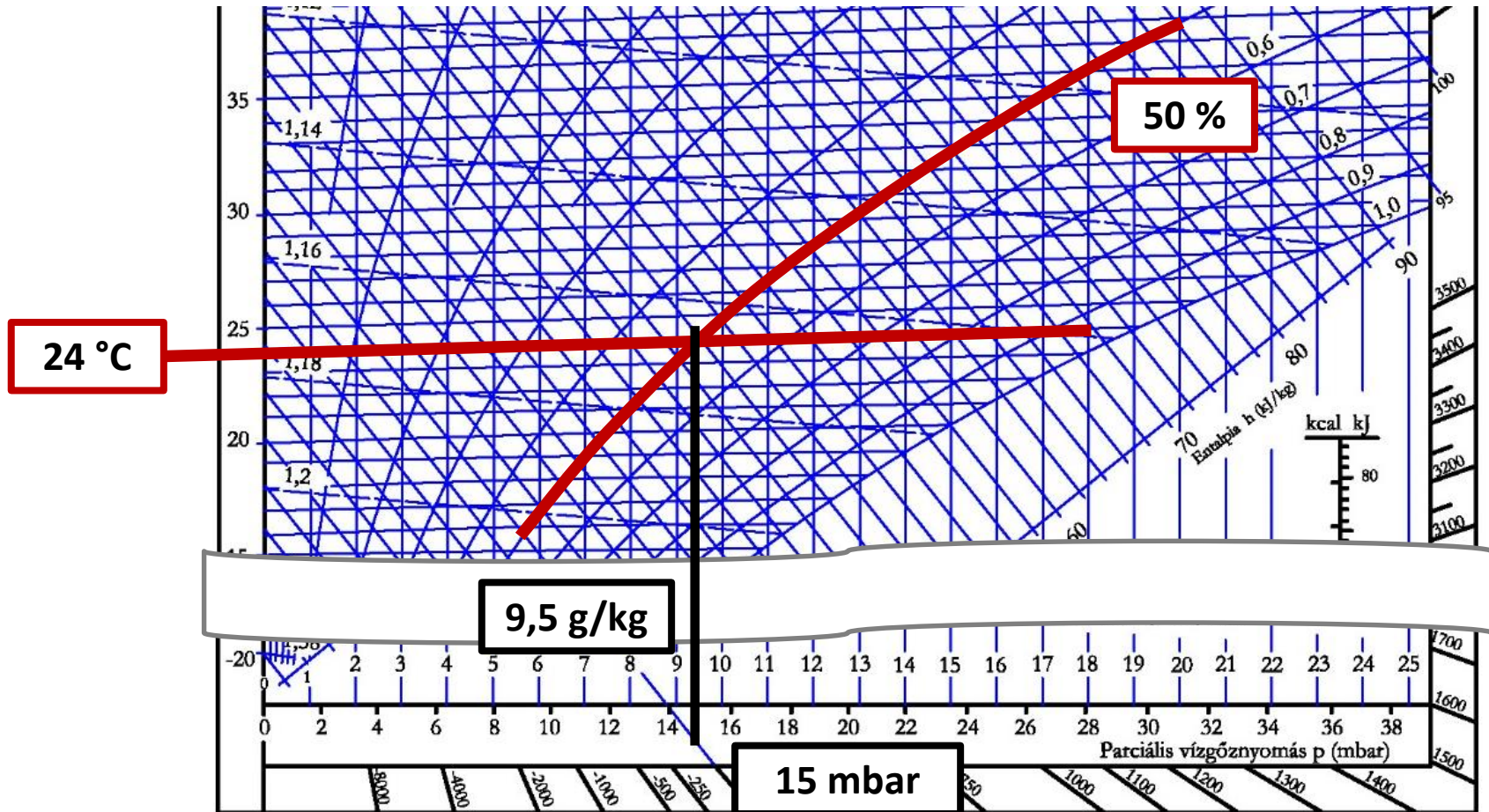
Kondenzációs (harmatponti) hőmérséklet: $t_k = 13$ [°C]



01. Példa

Abszolút nedvességtartalom: $x = 9,5 \text{ [g/kg]}$

Parciális vízgőz nyomás: $p = 15 \text{ [mbar]} = 1500 \text{ [Pa]}$



02. Példa

Adatok a külső légállapotra vonatkozóan:

$$t_k = 4 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad - \text{ téli átlaghőmérséklet}$$

$$\varphi_k = 95 \text{ [%]}$$

Adatok a belső légállapotra:

$$t_b = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\varphi_b = 50 \text{ [%]}$$

Az épületbe bepárolgott víz naponta:

$$\dot{m}_{\text{víz}} = 18 \text{ [kg/nap]} \quad - \text{ növények-, emberek által, stb.}$$

Az épület mérete:

$$A = 100 \text{ [m}^2\text{]} \quad - \text{ hasznos alapterület}$$

$$BM = 2,7 \text{ [m]} \quad - \text{ belmagasság}$$

Kérdés:

Mekkora szellőzőlevegőt kell biztosítani a bepárolgott nedvesség elszállítására?

02. Példa

Adatok a külső légállapotra vonatkozóan:

$$\begin{array}{ccc} t_k = 4 \text{ [}^\circ\text{C]} & \begin{array}{c} \text{h-x diagramból} \\ \text{leolvasva} \end{array} & \\ \varphi_k = 95 \text{ [%]} & \xrightarrow{\hspace{1.5cm}} & x_k = 5 \text{ [g/kg]} \end{array}$$

Adatok a belső légállapotra vonatkozóan:

$$\begin{array}{ccc} t_k = 20 \text{ [}^\circ\text{C]} & \begin{array}{c} \text{h-x diagramból} \\ \text{leolvasva} \end{array} & \\ \varphi_k = 50 \text{ [%]} & \xrightarrow{\hspace{1.5cm}} & x_b = 7,5 \text{ [g/kg]} \end{array}$$

02. Példa

Épület térfogata:

$$V = A \cdot BM = 2,7 \cdot 100 = 270 \text{ [m}^3\text{]}$$

Szellőző levegő tömegárama:

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}_{\text{víz}}}{\Delta x} = \frac{\dot{m}_{\text{víz}}}{x_b - x_k} = \frac{18}{0,0075 - 0,0050} = 7200 \left[\frac{\text{kg}}{\text{nap}} \right] = 300 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$$

Szellőző levegő térfogatárama:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{300}{1,20} = 250 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

Szükséges légcserre:

$$h = \frac{\dot{V}}{V} = \frac{250}{270} = 0,9259 \left[\frac{1}{\text{h}} \right]$$

Óránként ennyiszor kell kicserélni a levegőt az épületben, hogy a felszabaduló párát el tudjuk szállítani!

03. Példa

Adatok a külső légállapotra vonatkozóan:

$$t_k = 4 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{- téli átlaghőmérséklet}$$
$$\varphi_k = 95 \text{ [%]}$$

Adatok a belső légállapotra:

$$t_b = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$
$$\varphi_b = 50 \text{ [%]}$$

Szellőző levegő térfogatárama:

$$\dot{V} = 250 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

Fűtési napok száma egy évre nézve:

$$n = 180 \text{ [nap]}$$

03. Példa

Kazánadatok:

Kazán éves hatásfok (alacsonyhőmérsékletű kazán)

$$\eta = 95 \text{ [%]}$$

Tüzelőanyag lakossági ára:

$$\text{földgáz ár} = 120 \left[\frac{\text{Ft}}{\text{m}^3} \right]$$

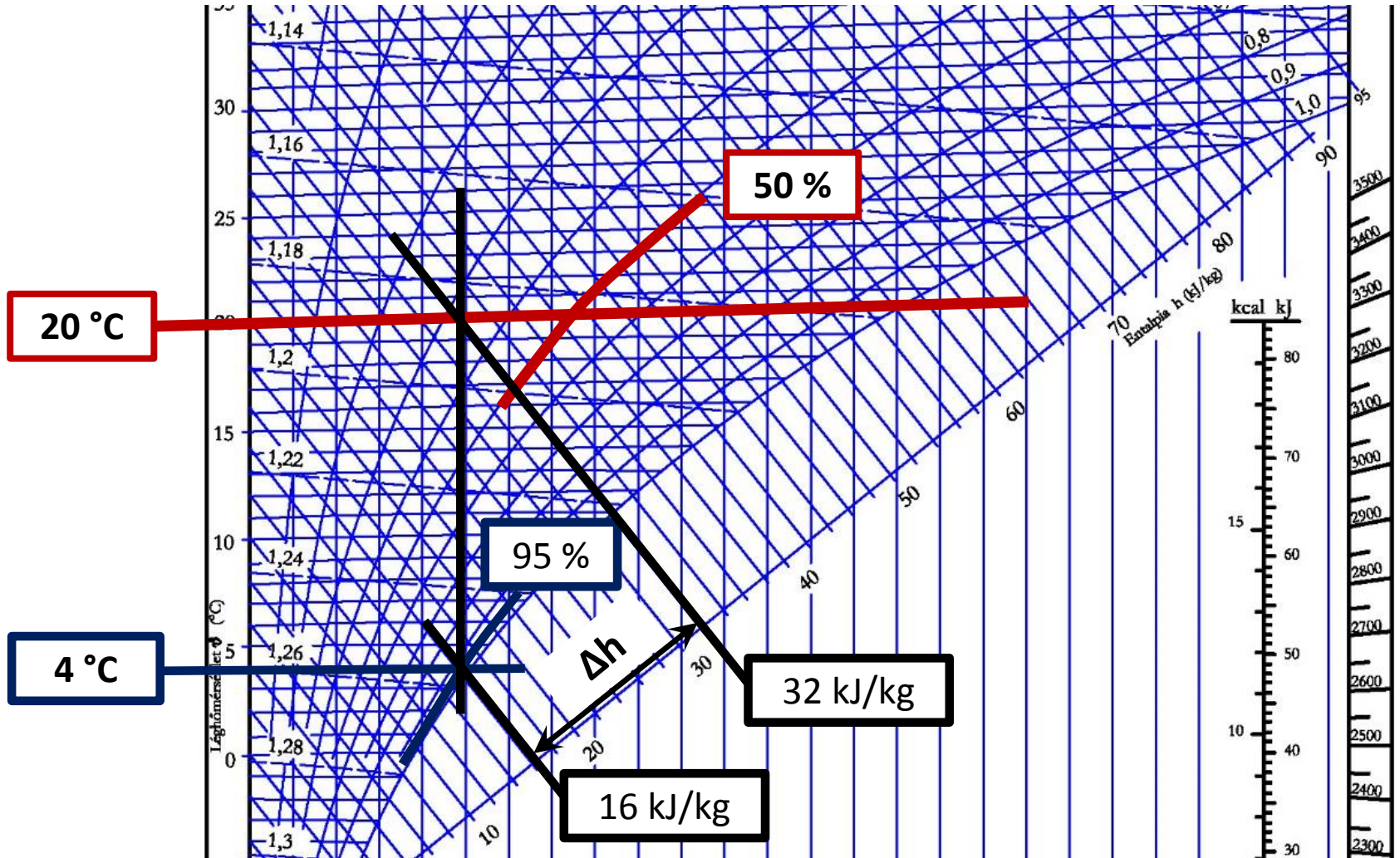
Kérdés:

Mekkora teljesítményű fűtőre van szükségünk, hogy a külső levegőt felfűtsük a belső levegő hőmérsékletére adott térfogatáram mellett?

Mennyi lesz az éves fűtési költség?

01. Példa

Felfűtési hőtartalma: $\Delta h = 16 \text{ [kJ/kg]}$



03. Példa

Szellőző levegő tömegárama:

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = 250 \cdot 1,2 = 300 \left[\frac{kg}{h} \right] = 0,0833 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Felfűtés fajlagos energiaigénye:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 32 - 16 = 16 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Filtráció átlagos teljesítmény igénye:

$$\dot{Q} = c \cdot \dot{m} \cdot (\Delta t) = \dot{m} \cdot (\Delta h) = 0,0833 \cdot (32 - 16) = 1,3333 \left[\frac{kJ}{s}; kW \right]$$

Energiaigény a teljes fűtési időnyre:

$$\begin{aligned} Q_{\text{fűtési}} &= \dot{Q} \cdot \tau = 1,3333 \cdot (180 \cdot 24) = 5760 [kWh] \\ &= 20736000 [kWs; kJ] = 20736 [MJ] \end{aligned}$$

03. Példa

Kazán energiafogyasztása:

$$Q_{\text{kazán}} = \frac{Q_{\text{fűtési}}}{\eta} = \frac{5760}{0,95} = 6063 \text{ [kWh]} = 21827 \text{ [MJ]}$$

Földgáz fűtőértéke:

$$H_{\text{földgáz}} = \sim 34 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{gNm}^3} \right] = \sim 9,4444 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{gNm}^3} \right]$$

Felhasznált gáz mennyiség:

$$V_{\text{földgáz}} = \frac{Q_{\text{kazán}}}{H_{\text{földgáz}}} = \frac{21827}{34} = 642 \text{ [m}^3\text{]}$$

Energiaköltség:

$$\text{ÁR} = 642 \cdot 120 \approx 77\,040 \text{ [Ft]}$$

A szellőztetésre fordított energiaköltség.

Összefoglalás



Amit tudni illik!

Levegő fajhője:

$$c_{\text{lev.}} = 1,0035 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad (101\,325 \text{ Pa nyomáson, } 0 \text{ °C-on})$$

Levegő sűrűsége:

$$\rho_{\text{lev.}} = 1,2928 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (101\,325 \text{ Pa nyomáson, } 0 \text{ °C-on})$$

Víz párolgási hője:

$$r_0 = 2488 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (0 \text{ °C-on, folyadék-gőz állapotvált.})$$

Víz olvadáshője:

$$s_0 = 333,7 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (0 \text{ °C-on, szilárd-folyadék állapotvált.})$$

Vízgőz fajhője:

$$c_{\text{pg}} = 1,86 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad (0 \text{ °C-on})$$