



SEMMELWEIS EGYETEM

Biofizikai és Sugárbiológiai Intézet,
Nanokémiai Kutatócsoport



TRANSPORTFOLYAMATOK III biológiai rendszerekben

Zrínyi Miklós

egyetemi tanár; az MTA rendes tagja
mikloszrinyi@gmail.com

2020

Konduktív transportfolyamatok egységes leírása

	diffúzió	hővezetés	reológia
ÁRAM:	komponens áram (tömeg áram)	energia áram	impulzus áram
HAJTÓERŐ:	∇c	∇T	∇v
ÁRAMSŰRÜSÉG:	$j_n = -D \nabla c$	$j_Q = -k_T \nabla T$	$j_i = -\eta \nabla v$
VÁLTOZÁS:	$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c$	$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T$	

Fick

Fourier

Newton

Laplace operátor: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

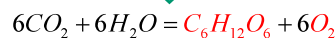
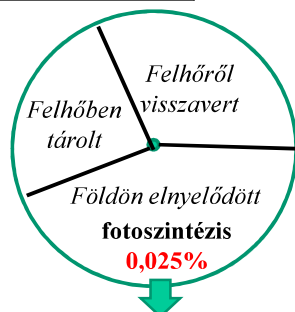
A nap a földi élet energiaforrása



$5 \cdot 10^{18} \text{ MJ / év}$
 $1,7 \cdot 10^{17} \text{ J / s}$



ÉLET



Biológiai makromolekulák



keményítő glikogén cellulóz

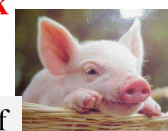


fototróf



élőlények

kemotróf



fény
 H_2O
 CO_2

szénhidrát
növényi
szövet

zsír
állati
szövet

Az élő szervezet sejtjeiben végbemenő folyamatok összessége:
metabolizmus

felépítő folyamatok
anabolizmus

lebontó folyamatok
katabolizmus

rendezetlen + **energia** → **rend**

rend → **rendezetlen** + **energia**

Konduktív hővezetés: **Fourier törvények**

$$j_Q = -k_T \frac{dT}{dx} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad \leftarrow \text{függvény görbülete} \quad \alpha = \frac{k_T}{\rho \cdot c_p}$$

anyag	T/K	$k_T / Wm^{-1}K^{-1}$	$\alpha / m^2 s^{-1}$	$c_p / kJkg^{-1}K^{-1}$
levegő	300	0,025	$2,11 \cdot 10^{-5}$	1,006
víz	300	0,609	$1,5 \cdot 10^{-7}$	4,186
zsír	298	0,21	$0,69 \cdot 10^{-7}$	3,258
vér	298	0,642	$1,76 \cdot 10^{-7}$	3,889
bőr	310	0,442	$1,19 \cdot 10^{-7}$	3,471

$$\frac{dQ_{\text{hővezetés}}}{dt} = -k_T \cdot A_s \cdot \frac{dT}{dx}$$

k_T : Hővezetési tényező [W/mK] α : Hőmérséklet-vezetési tényező [m^2/s] c_p : Fajlagos hőkapacitás [J/kgK]

Termikus szigetelés jellemzője

anyag	$I_T [m^2 C^\circ / W]$
bárány bunda	0,07-0,1
gyapjú	0,29
átlagos ruha	0,25
liba toll	0,38
levegő	0,36-0,39
csont	0,01-0,02
test zsír	0,01-0,05
víz	0,01-0,017
fa	0,01-0,06

Alap – energiaforgalom: **BMR**
Basal metabolic rate

$$BMR = \frac{dQ}{dt} \Big|_{\text{nyugalom}}$$



$$BMR \propto m_b^{3/4}$$

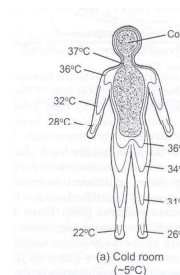
Kleiber törvény

A BMR a korral csökken

$m_b = 70 \text{ kg}$ 7029 kJ/nap 293 kJ/óra 81 W férfi
60 W nő

Energiaforgalom: **(MR)** és oxigén fogyasztás

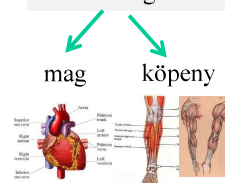
alvás	83 W	O_2 : 0,24 L/perc
séta	265 W	O_2 : 0,76 L/perc
kerékpározás	400 W	O_2 : 1,13 L/perc



Hol keletkezik a nyugalmi metabolikus hő?

agyvelő	25%
szív	15%
vázizom	25%
hasi zsigerek	25%
vese	6%
bőr	4%

A szervezetben belül a hőmérséklet eloszlás nem homogén.



Átlagos ember átlagos termikus jellemzői:

Fajhő: 3,47 kJ/kgK

70 kg-os személy hőkapacitása: 243 kJ/C°

$$Q = C \cdot m_b \cdot \Delta T \quad \frac{dQ}{dt} = C \cdot m_b \cdot \frac{dT}{dt} \quad \frac{dT}{dt} = \frac{1}{C \cdot m_b} \cdot \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C \cdot m_b} \cdot BMR$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{BMR}{C \cdot m_b} \rightarrow \frac{dT}{dt} = 1,2 \text{ C}^\circ/\text{óra} \quad \text{Ha nem lenne veszteség és fizikai aktivitás!}$$

Hővesztés: sugárzás: 54 – 60 %
Levegő : 25 %
Izzadás : 7 %
Légzés : 14 %

Evés és hőtermelés nyugalomban

	Nagy evő	Kis evő	arány
Test súly (kg)	54,2	52,7	1,03
Kaja energia (kJ/nap)	9916	6485	1,54
Nappali hőtermelés (kJ/nap)	9079	5815	1,55
Éjszakai hőtermelés (kJ/nap)	7196	4602	1,56

de....

$$\frac{dQ}{dt} = f \cdot BMR$$

$0 < f < 20$
Fizikai aktivitás

Fizikai aktivitás esetén

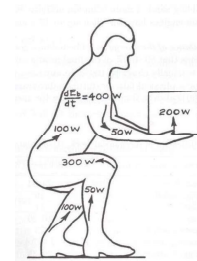
$$\frac{dQ}{dt} = f \cdot BMR$$

$$\frac{dT}{dt} = f \cdot \frac{BMR}{C \cdot m_b} \approx 1,2 f \text{ C}^\circ / \text{óra}$$

$0 < f < 20$
Fizikai aktivitás

aktivitás	f
alvás	1
ülés	1,5
állás	1,7
gyaloglás	4,7

Energiaforgalom és mozgás

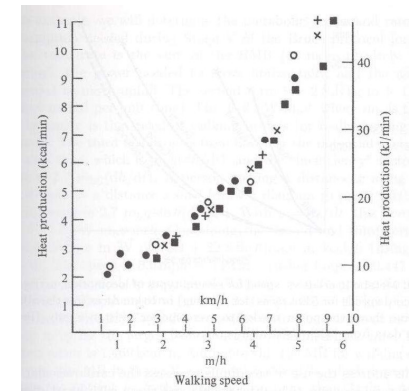


munka(fizika) ≠ munka(biológia)

külső

belső

Gyaloglással felszabadított hő függése a sebességtől.



Biológiai hőforgalom mérése

Direkt kalorimetria

$$\Delta Q = Q_{\text{metabolizmus}} + Q_{\text{vesztesség}}$$

Indirekt kalorimetria

Oxigén fogyasztás és/vagy
CO₂ termelés arányos a
hőtermeléssel

$$Q_{\text{vesztesség}} = Q_{\text{sugárzó}} + Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{konduktív}} + Q_{\text{párolgási}} + Q_{\text{légzés}}$$



Direkt és indirekt kalorimetria

1 mól glükóz oxidációjához 6 mól=134,46 L oxigén kell!

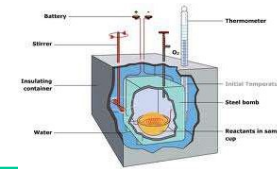
$$\Delta H = +2817 \text{ kJ}$$

Oxigén energia egyenérték

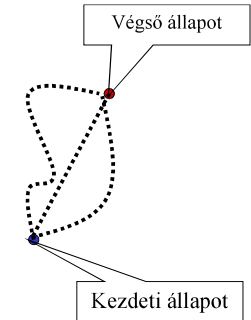
1 L oxigén fogyasztására 21 kJ energiát jelent

komponens	kalorimetrikus energia kJ/g	Oxigén egyenérték kJ/L	Széndioxid egyenérték kJ/L
szénhidrát	17,1	21,1	21,1
fehérje	23,6	18,7	23,3
etanol	29,7	20,3	30,3
zsír	39,6	19,8	27,9

Direkt kalorimetria



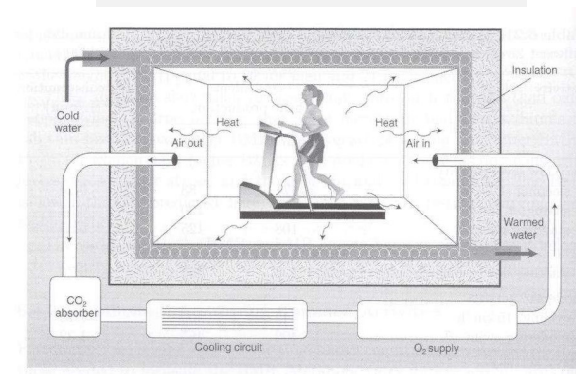
Hess tétele:



anyag	kalorimetrikus energia kJ/g
szénhidrát	17,1
fehérje	23,6
etanol	29,7
zsír	39,6

anyag	energia sűrűség J/Kg
ATP	$1,0 \cdot 10^5$
H ₂	$1,2 \cdot 10^8$
zsír	$3,9 \cdot 10^7$
glükóz	$1,6 \cdot 10^7$

Direkt és indirekt kalorimetria



$$\Delta H = +2817 \text{ kJ}$$

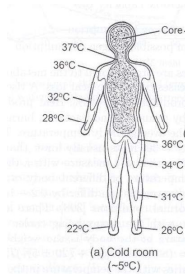


$$\eta = 61-65 \%$$

Kalorimetria > metabolikus
(V=konst.) (p=konst.)

A BELSŐ ENERGIA (HŐ) TRANSZPORTJA

Hol keletkezik a nyugalmi metabolikus hő?



agyvelő	25%
szív	15%
vázizom	25%
hasi zsigerek	25%
vese	6%
bőr	4%

Hol veszik el a metabolikus hő?

$$Q_{\text{vesztés}} = Q_{\text{sugárzó}} + Q_{\text{konvektív}} + Q_{\text{konduktív}} + Q_{\text{párolgási}} + Q_{\text{légzés}}$$

54-60 %

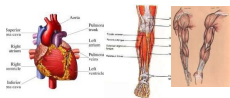
25 %

7 %

14 %

A szervezetben belül a hőmérséklet eloszlás nem homogén.

mag köpeny



Pennes bio-hő egyenlete

$$\rho_t c_t \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_t \nabla T) + c_b w_b (T - T_b) + Q + Q_m$$

Parameter name	Symbol	Tissue	Tumor
Thermal conductivity (W/m)	k	0.42	0.42
Blood perfusion rate (l/s)	ω_b	$18e^{-8}$	$9e^{-6}$
Density (kg/m ³)	ρ_b	920	920
Specific heat of blood (J/kg.K)	c_b	3000	3000
Arterial blood temperature (K)	T_b	310	310
Metabolic heat generation rate(W/ m ³)	Q_{met}	450	29000

Konduktív hővezetés: Fourier törvények

$$j_Q = -k_T \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad \leftarrow \text{függvény görbülete} \quad \alpha = \frac{k_T}{\rho \cdot C_p}$$

anyag	T/K	$k_T / Wm^{-1}K^{-1}$	$\alpha / m^2 s^{-1}$	$c_p / kJkg^{-1}K^{-1}$
levegő	300	0,025	$2,11 \cdot 10^{-5}$	1,006
víz	300	0,609	$1,5 \cdot 10^{-7}$	4,186
zsír	298	0,21	$0,69 \cdot 10^{-7}$	3,258
vér	298	0,642	$1,76 \cdot 10^{-7}$	3,889
bőr	310	0,442	$1,19 \cdot 10^{-7}$	3,471

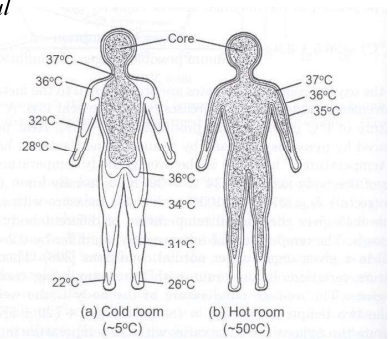
$$\frac{dQ_{\text{hővezetés}}}{dt} = -k_T \cdot A_s \cdot \frac{dT}{dx}$$

Testhőmérséklet szabályzás

metabolizmus \longleftrightarrow hővesztés

T=28 C° ♥ fibrilláció
T=30 C° Hőmérséklet szabályzás felborul
T=33 C° Tudat veszítés
T=37 C°
T=41 C° Központi idegrendszer -
T=42 C° Fehérjék denaturálódnak

testhőmérséklet



egységnyi felület

Hősugárzás



Wien törvény: $R = \varepsilon \sigma T^4$ ε : emisszió

Stefan-Boltzmann konst.: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

$$-\frac{dQ_{\text{sugárzó}}}{dt} = R \cdot A_s = \varepsilon \sigma T^4 \cdot A_s \quad A_s = 1,85 \text{ m}^2 \text{ átlagos felület}$$

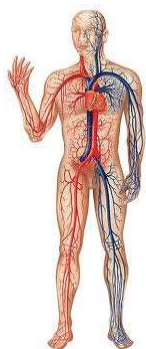
$$\frac{dQ_{\text{sugárzó}}}{dt} = \frac{dQ}{dt} \Big|_{\text{nyereség}} - \frac{dQ}{dt} \Big|_{\text{vesztés}}$$

$\varepsilon \cong 1$ emberi bőr

$$R = \varepsilon \sigma (T_{\text{test}}^4 - T_{\text{környezet}}^4)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$$

anyag	emisszió
emberi bőr	0,95 – 0,99
fa	0,99
beton	0,95
tégla	0,92



Testen belüli hővezetés (2)

(Test és vér közötti hővezetés)

$$-\frac{1}{A_s} \frac{dQ_{\text{véráram}}}{dt} = h_c \cdot (T_{\text{vér}} - T_{\text{testrész}})$$



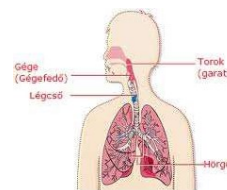
Konvektív hővezetés (1)

$$-\frac{1}{A_s} \frac{dQ_{\text{konvektív}}}{dt} = h_c \cdot (T_{\text{bőr}} - T_{\text{levegő}})$$

h_c : egységnyi felületre vonatkozó konvektív hővezetési tényező $\text{W/m}^2 \text{ C}^\circ$

Szél sebessége [m/s]	$h_c [\text{W/m}^2 \text{ C}^\circ]$
0,1	2,6
0,6	6,4
2,0	11,7
4,0	16,6

Szélben: $h_c = 10,45 - v + 10v^{1/2}$ v : áramló levegő sebesség: m/sec (közelítés)



Hővesztés párolgással (1) légzés

Ki- és belégzés térfogata nyugalomban: 500 ml

Ki- és belégzés frekvenciája nyugalomban: 12 – 14 / perc

$$I_{\text{levegő}} = \frac{dV_l}{dt} \approx 0,1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$-\frac{dQ}{dt} = \rho_l c_{p,l} (T_{ki} - T_{be}) \frac{dV_l}{dt}$$



Hővesztés párolgással (2) *izzadás*

Víz párolgáshője: $\Delta h_{\text{párolgás}} = 2,25 \text{ kJ / g}$

V_{izz}

$$-\frac{dQ}{dt} = \Delta h_{\text{párolgás}} \cdot (\rho_{\text{lev}}^{\text{ki}} - \rho_{\text{lev}}^{\text{be}}) \frac{dV_{\text{izz}}}{dt}$$