

# Technológiai folyamatok vizsgálata energetikai és exergetikai módszerrel

## Analysis of technological process using energetic and exergetic methods

Dr. TIMÁR Imre<sup>1</sup>, Dr. HORVÁTH Pál<sup>2</sup>, Dr. ÁRPÁD István Walter<sup>3</sup>

<sup>1</sup>egyetemi tanár, Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, 8200 Veszprém,  
Egyetem u. 10., timar.imre@mk.uni-pannon.hu

<sup>2</sup>egyetemi docens, Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, 8200 Veszprém,  
Egyetem u. 10., horvath.pal@mk.uni-pannon.hu

<sup>3</sup>adjunktus, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4.;  
arpad.istvan@eng.unideb.hu (ORCID 0000-0002-5052-852X)

### Abstract

*Exergy is the portion of energy that is transformable into any other form of energy. Exergy is the actual work capacity of the system. There are various types of exergie, including potential, kinetic, thermomechanical, concentration, chemical, and nuclear exergy. In this paper, we present the application of the technological process of compressed air both energetic and exergetic approaches.*

### Összefoglaló

*Az exergia az energiának az a része, amelyik átalakítható bármilyen energiaforrássá. Az exergia a rendszer tényleges munkavégző képessége. Az exergiának számos fajtája létezik: potenciális-mozgási-, termomechanikai-, koncentrációs-, kémiai-és magexergia. A dolgozat keretében ismertetjük egy hőcserélő energetikai és exergetikai vizsgálatát.*

**Kulcsszavak:** energia, exergia, hőcserélők

## 1. BEVEZETÉS

Az exergia vizsgálata az energia hatékonyság szempontjából fontos szerepet tölt be. Az exergia segítségével lehet a rendszerből kinyerhető maximális munkát meghatározni [1]. A tématerülettel számos publikáció foglalkozik. Ezzel kapcsolatosan jó összefoglalót olvashatunk az [2]-es irodalomban. A továbbiakban a módszer gyakorlati alkalmazását mutatjuk be.

## 2. A HŐCSERÉLŐK ENERGETIKAI ÉS EXERGETIKAI SZÁMÍTÁSA

### 2.1. Az exergia

Az exergia az energiának az a része, amelyik átalakítható bármilyen energiaforrássá. Az exergia a rendszer tényleges munkavégző képessége. A gyakorlatban a következő exergiafajták fordulnak elő: potenciális, kinetikus-, termikus-, koncentrációs-, kémiai- és magexergia.

### 2.2. Az entalpia és exergiaáram számítása

Az áramló közegek energia és exergiaáramának számítására az alábbiakban ismertetett összefüggéseket használjuk.

A légnemű és a folyékony közeg entalpiaárama

$$H^* = m^* c_p (t - t_u), \quad (1)$$

ahol  $m^*$  a közeg tömegárama [kg/s],  $c_p$  a közeg fajhője [kJ/(kgK)],  $t$  a közeg  $t_u$  pedig a környezet hőmérséklete [°C].

Az ideális gáz exergiaárama [3]

$$E^* = m^* c_p (T - T_u) - m^* T_u \left[ c_p \ln \frac{T}{T_u} - R \ln \frac{p}{p_u} \right], \quad (2)$$

ahol  $T$  a közeg  $T_u$  pedig a környezet hőmérséklete [K], ahol  $p$  a közeg  $p_u$  pedig a környezet nyomása [Pa],  $R$  a gázállandó.

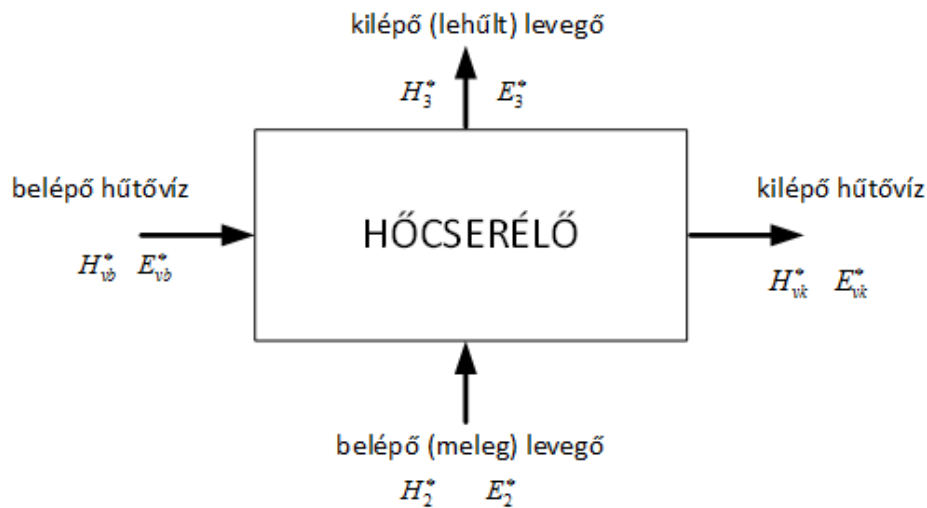
A folyékony közegek exergiaárama [3]

$$E^* = c_p m^* \left[ (T - T_u) - T_u \ln \frac{T}{T_u} \right] + m^* \frac{p - p_u}{\rho}, \quad (3)$$

ahol  $\rho$  a közeg sűrűsége [kg/m<sup>3</sup>].

### 2.3. A levegő-folyadék hőcserélők energetikai és exergetikai számítása

A továbbiakban az 1. ábrán látható levegő-folyadék hőcserélőt energetikai és exergetikai vizsgálatát mutatjuk be. A hőcserélőbe egy  $P = 25$  kW-os motorral hajtott kompresszor által sűrített levegő áramlik be, ami a kompresszió következtében felmelegszik és ezt a levegőt környezeti hőmérsékletű vízzel hűtjük.



1. ábra

Gáz-folyadék hőcserélő

#### Adatok:

A kompresszorba belépő levegő hőmérséklete  $t_{1b} = 15$  °C, a hőcserélőből (hűtőből) kilépő levegőt  $t_{1k} = 35$  °C-ra hűtjük vissza. A hőcserélőbe belépő hűtővíz hőmérséklete  $t_{vb} = 15$  °C. A belépő levegő tömegárama  $m_{1b}^* = 540$  kg/h = 0,15 kg/s, a hűtővízé  $m_{vb}^* = 3$  t/h = 0,833 kg/s. A belépő levegő fajhője  $c_{p1} = 1,005$  kJ/(kgK)<sup>-1</sup> a hideg vízé  $c_{pv} = 4,187$  kJ/(kgK)<sup>-1</sup>, a gázállandó  $R = 0,2935$  kJ/(kgK)<sup>-1</sup>, a hűtővíz nyomása  $p_v = 1$  bar.

A kompresszorból kilépő felmelegített levegő hőmérséklete az (1)-es egyenletből  $P=H_2^*=25 \text{ kJ/s}$  belépő entalpiaáram és 0 a víz  $H_{vb}^*=0$  entalpiaárama víz esetén

$$t_2 = t_u + \frac{H_2^*}{m_l c_{pl}} = 15^\circ \text{C} + \frac{25 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{0,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 15^\circ \text{C} + 165,84^\circ \text{C} = 180,84^\circ \text{C}.$$

A hűtő után a levegő entalpiaárama

$$H_3^* = m_l c_{pl} (t_3 - t_u) = 0,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (35^\circ \text{C} - 15^\circ \text{C}) = 3,015 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}.$$

A hőcserélő hőmérlege

$$H_2^* + H_{vb}^* = H_{vk}^* + H_3^*,$$

innen

$$H_{vk}^* = H_2^* - H_3^* - H_{vb}^* = 25 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 3,015 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 0 = 21,985 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}.$$

A fenti értékből a víz kilépési hőmérséklete

$$t_{vk} = t_u + \frac{H_{vk}^*}{m_v c_{pv}} = 15^\circ \text{C} + \frac{21,985 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{0,833 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} m_v c_{pv}} = 21,30^\circ \text{C}.$$

A hőcserélőbe belépő levegő exergiaárama a (2)-es egyenlet felhasználásával

$$\begin{aligned} E_2^* &= H_2^* - H_0^* - m_l T_u \left[ c_p \ln \frac{T_2}{T_u} - R \ln \frac{p_l}{p_u} \right] = m_l c_{pl} (t_2 - t_u) - m_l T_u \left[ c_p \ln \frac{T_2}{T_u} - R \ln \frac{p_l}{p_u} \right] = \\ &= 25 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 0,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 288 \text{K} \left[ 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \ln \frac{453,84 \text{K}}{288 \text{K}} - 0,2935 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \ln \frac{4}{1} \right] = 23,142 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}. \end{aligned}$$

A kompresszorra a következő exergiaáram mérleg írható fel

$$E_1^* + P = E_2^* + \Delta E_{vkom}^*,$$

innen a kompresszor exergiavesztése, mivel a belépő környezeti állapotú levegő exergiája nulla ( $E_{l=0}^*$ )

$$\Delta E_{vkom}^* = P - E_2^* - E_1^* = 25 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 23,142 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 0 = 1,858 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}.$$

A hőcserélőből kilépő levegő exergiaárama a (2)-es egyenlet alapján

$$\begin{aligned} E_3^* &= m_l c_{pl} (t_{lk} - t_u) - m_l T_u \left[ c_{pl} \ln \frac{T_3}{T_u} - R \ln \frac{p_3}{p_u} \right] = \\ &= 0,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} (35^\circ \text{C} - 15^\circ \text{C}) - 0,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 288 \text{K} \left[ 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \ln \frac{308 \text{K}}{288 \text{K}} - 0,2935 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \ln \frac{4 \text{bar}}{1 \text{bar}} \right] = \end{aligned}$$

$$= 17,698 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

A hőcserélőből kilépő hűtővíz exergiaárama a víz nyomásesését elhanyagolva a (3)-as egyenlet alapján

$$E_{vk}^* = m_v^* c_{pv} (t_{vk} - t_u) - m_v^* T_u c_{pv} \ln \frac{T_{vk}}{T_u} =$$

$$= 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} 0,833 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (21,30^\circ \text{C} - 15^\circ \text{C}) - 4,187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} 0,833 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 288 \text{K} \ln \frac{294,3 \text{K}}{288 \text{K}} = 0,247 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

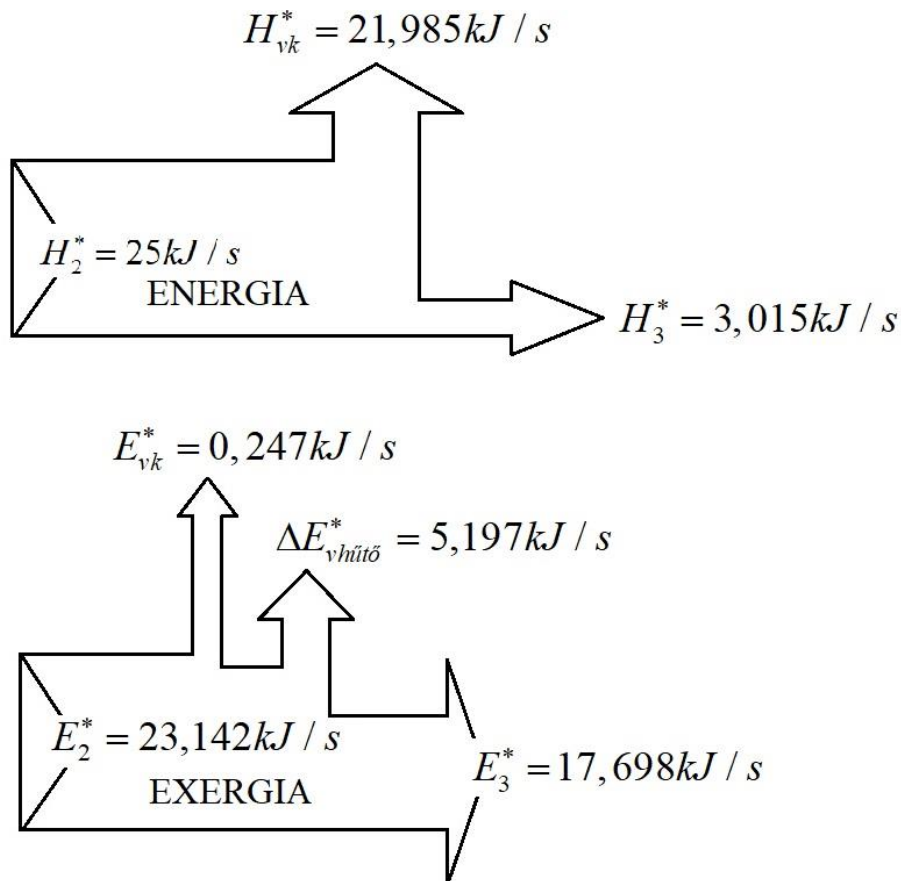
. A hőcserélő exergiaáram mérlege a következő ( $E_{vb}^* = 0$ )

$$E_2^* + E_{vb}^* = E_{vk}^* + E_3^* + \Delta E_{vhűtő}^*,$$

innen a hőcserélő exergiavesztesége

$$\Delta E_{vhűtő}^* = E_2^* + E_{vb}^* - E_{vk}^* - E_3^* = 23,142 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 0 - 0,247 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} - 17,698 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 5,197 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

A 2. ábra a hőcserélő (hűtő) energia és exergiaáram mérlegét mutatja.



2. ábra

A hőcserélő energia és exergiaáram mérlege

A 2. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a sűrített levegő entalpiaárama a visszahűtés miatt kicsi (3,015 kJ/s), viszont az exergiaárama nagy (17,698 kJ/s), mert jelentős a munkavégző képessége, amit az energia módszer nem mutat ki. A kilépő hűtővíz exergiája kicsi (0,247 kJ/s), mert munkavégző képessége kicsi.

## ÖSSZEFOGLALÁS

Az exergetikai vizsgálat lényege olyan hasznosítható energia fajtákat is kimutat, amelyeket az energetikai vizsgálat nem tud figyelembe venni. A teljes körű vizsgálat a költségmódszerrel végezhető el, amikor felírunk egy célfüggvényt és megfogalmazzuk a korlátozási feltételeket. A problémát ezután az optimalást tárgyaló matematikai módszerek segítségével lehet megoldani.

## IRODALOM

- [1] Fratscher, W, Brodrjanskij, V. M., Michalik, K.: Exergie, Theorie und Anwendung. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986.
- [2] Bezzegh, A., et al.: Exergia- és energiahatékonyság. Ipari Ökológia, 2015. p.: 36-54.
- [3] Pleva, L.: Hőenergia-gazdálkodás. Veszprém, 1991.