

# NAPENERGIÁT HASZNOSÍTÓ, KÖZVETETT PÁROLOGTATÁSOS ELVEN ÜZEMELŐ LÉGKONDITIONÁLÓ BERENDEZÉS - ELVEK ÉS EGY LEHETSÉGES MEGVALÓSÍTÁS

## INDIRECT EVAPORATIVE AIR CONDITIONING SYSTEM WITH SOLAR ENERGY UTILIZATION – PRINCIPLE OF OPERATION AND A POSSIBLE IMPLEMENTATION

Szaszák Norbert\*

### ABSTRACT

*Both the industrial and the residential air conditioning systems are spreading year after year. The overwhelming majority of these systems uses compressors to produce the suitable pressures which are required for the applied heat-pump cycle. These compressors are driven by electric motors which – despite of the relative high efficiency of the thermal cycle – consume a significant amount of electrical energy. A remarkable portion of this energy required for the condensation of the evaporated cooling agent (compression work required) which circles around in the closed system. An alternative cooling method is that where the evaporation of clean water is applied to extract energy from the treated air which hence cools down. In this case the energy consuming compression along with the condensation of the water vapor is not required. However, the reduction of the humidity of the treated air is necessary by using desiccant in a closed loop. This process requires heat input for regeneration which – in this case – can be originated from solar thermal energy which is supposed to be eco-friendly and is cheaper than electrical energy. This paper shows the basic principles and a possible implementation of this kind of air conditioning system.*

### 1. BEVEZETÉS

A komfortelméleti szempontokat figyelembe véve mind az ipari-, mind pedig a lakóépületekben fontos biztosítani az emberi komfortnak megfelelő levegő-paramétereket [1]. Ez magában foglalja a hideg évszakokban a zárt terek levegőjének fűtését, továbbá a meleg időszakokban a levegő hűtését. Emellett továbbá a kellemes klíma biztosításához még a levegő páratartalmát is megfelelő, az ember számára komfortos szinten szükséges tartani. Ez fűtés esetén jellemzően a

levegő párasítását, míg hűtés esetén annak szárítását jelenti. E dolgozatban a hűtést és az ezzel egyidejű légszárítást megvalósító, közvetett párologtatáson alapuló berendezés lehetséges kialakításával továbbá a működés elméleti hátterével foglalkozunk.

Több irodalmi forrás szerint az emberek számára a legalkalmasabb belső tér hőmérséklet – szellemi munkavégzés esetén – 20-26°C között változik, továbbá az ideális relatív páratartalom 40-60% [2, 3, 4]. Ezek az értékek azonban függenek az emberi tényezőtől (nem, életkor, lakóhely stb.), továbbá az aktivitás típusától is. Egy NASA tanulmány [5] szerint a munkakörnyezet hőmérsékletének növelésével jelentősen megnő a munkahibák előfordulási lehetősége is: 35°C esetén akár a 7-szeresére is nőhet ennek értéke az optimális hőfokon (itt 24°C) mérthez képest. Elmondható, hogy magasabb hőmérsékletek akkor komfortosak, amennyiben alacsonyabb a levegő relatív páratartalma.

Az előzőekben már említett relatív páratartalom jele  $\varphi$ , és értéke megadja a nedves levegőben található vízpára parciális nyomásának ( $p_{p,vizpára}$ ) és az azonos hőmérsékletű ( $T_a$ ) és nyomású ( $p_a$ ), vízpárával telített levegőben lévő pára parciális nyomásának ( $p_{vizpára}^*$ ) arányát:

$$\varphi = \frac{p_{p,vizpára}}{p_{vizpára}^*(T_a, p_a)} \cdot 100\% \quad (1)$$

Teljesen száraz levegő esetén a relatív páratartalom zérus, míg vízgőzzel telített levegő esetén  $\varphi = 100\%$ . Az ilyen levegő az adott hőfokon több párat már nem tud felvenni, viszont hűtés hatására megindul a pára kicsapódás: a levegő hőmérséklete csökken, belőle cseppfolyós (harmat) vagy szilárd halmazállapotú vízjég (dér) válik ki, miközben relatív páratartalma továbbra is 100% marad. Ebből következik, hogy szükséges egy olyan mennyiség bevezetése is, amely együtt változik a páralecsapódással és így megadja azt, hogy a levegő egységnyi tömegében mekkora tömegű vízgőz van

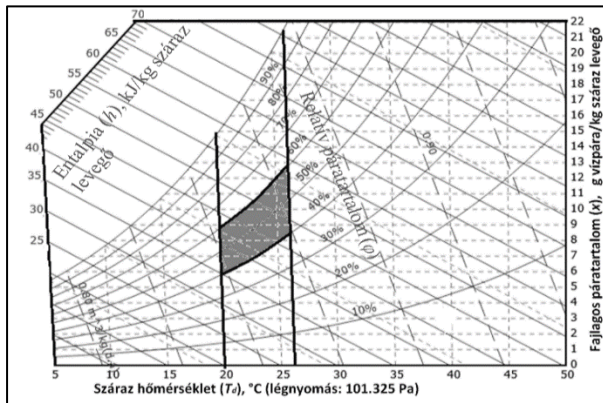
\* egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

jelen. Ezt fajlagos páratartalomnak nevezzük és  $x$ -szel jelöljük (kg vízpára/kg száraz levegő):

$$x = \frac{m_{\text{vízpára}}}{m_{\text{száraz levegő}}} \quad (2)$$

E mennyiségnek a klimatizálásnál fontos szerep jut, hiszen a levegő hűlésekor kialakuló kondenzáció esetén a kicsapódott víz mennyisége egységnyi tömegű száraz levegőre (dry-air; d.a.) vonatkoztatva éppen megegyezik a fajlagos páratartalom csökkenésével.

Az emberek számára komfortos levegő tartománya kijelölhető egy pszichrometriai diagramon, amely a levegő-vízgőz elegy fizikai és termodinamikai tulajdonságai közötti kapcsolatot ábrázolja. Egy ilyen diagram látható az 1. ábrán, amelyen bejelöltük a komfort-tartományt is.



1. ábra A nedves levegő termodinamikai tulajdonságai, továbbá az emberi komfort-zóna (módosított diagram, eredeti [6])

Az előző ábra értő ismerete nélkülözhetetlen a klimatizálás folyamatának megértése szempontjából. Látható a diagramon, hogy az emberi komfortzóna egy szűk tartományt jelöl ki, így az azon kívül eső jellemzőkkel bíró levegőt kezelni szükséges. Ez jelenthet párást vagy szárítást, továbbá hűtést vagy éppen fűtést.

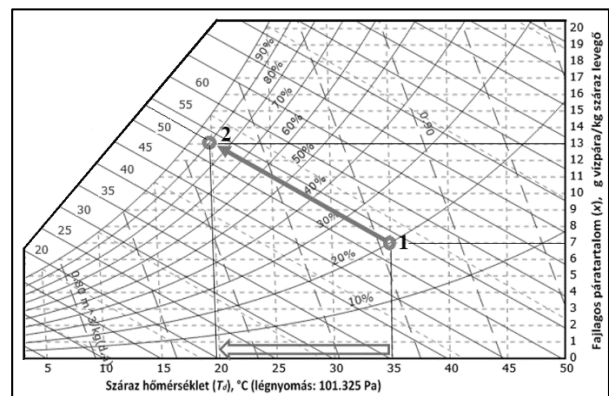
A jelen cikkben bemutatandó klimatizáló egység szempontjából a levegő hűtésének és szárításának folyamata a releváns, így ennek ismertetésére hagyatkozunk. A kompresszoros klímaberendezésektől eltérően a víz párologtatásán alapuló hűtőegységek nem tartalmaznak kompresszort, mivel nem szükséges az elpárolgott vizet újra cseppfolyós állapotba hozni; az pótolható frissvízzel. Ebből következik, hogy az ilyen rendszerek esetében a kompressziómunka megspórolható, azonban hátrányos tulajdonságuk is megemlítendő: az elérhető hűtött-levegő hőmérséklet függ a környezeti paramétereiktől (mindig a környezeti levegő harmatponti-hőmérséklete feletti), ami jóval magasabb érték, mint a kompresszoros klímák esetében (ott a minimális hőfok az alkalmazott hűtőközegnek a

párologtatóban kialakuló nyomásához tartozó forráspontja közelébe esik). Azonban megfelelő környezeti viszonyok mellett ezzel a megoldással is jelentős mértékben csökkenthető a hűtött légtér hőmérséklete, ilyen módon a komfort-tartományba vihető a léghőmérséklet.

## 2. PÁROLOGTATÁS ELVÉN ÜZEMELŐ LÉGHŰTŐ BERENDEZÉSEK

A víz párologtatásának hőelvonó hatása alapján működő berendezések között megkülönböztetünk direkt és indirekt módon üzemelő berendezéseket.

A direkt, azaz közvetlen párologtatást megvalósító egységek közvetlenül a hűtendő légtérbe párologtatnak, így működésük független a külső környezet paramétereitől. Ennek a gyakorlatban két módja terjedt el: az egyik a porlasztásos párologtatás, a másik pedig a folyadékfilm-párologtatás. A porlasztás esetén a cél minél kisebb méretű vízcseppek létrehozása, így pedig a levegővel érintkező minél nagyobb – a folyadéktömegre vonatkoztatott – folyadékfelület biztosítása az intenzív párologtatás elérése céljából. A másik megoldás olyan anyagok alkalmazása, amelyeknek nagy a fajlagos felületük, s azt folyadékkal nedvesítve egy folyadékfilm alakul ki. A nedves felület felett, vagy porózus anyag esetén az azon keresztül biztosított légáramlás segítségével intenzív párologtatás valósítható meg, azonban ehhez a levegő számára megfelelően átjárható szerkezetű közeg szükséges [7, 8]. Direkt párologtatás esetében a hűtendő légtér hőmérséklete közvetlenül a párologó víz párologtató hője miatt csökken, ennek elvi folyamata tekinthető meg a 2. ábrán, ahol az 1-es állapotú meleg és alacsony páratartalmú levegő a benne történő párologtatás hatására izentalpikus ( $h=áll.$ ) módon a 2-es állapotba jut.



2. ábra Közvetlen párologtatás során végbemenő légállapot-változás (módosított diagram, eredeti [6])

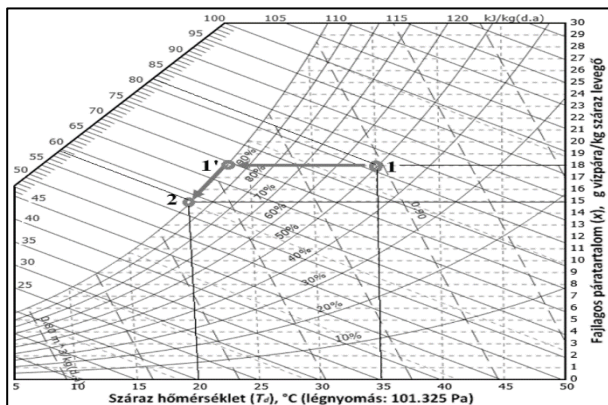
Megfigyelhető, hogy az entalpia állandósága mellett a levegő páratartalma  $\varphi=20\%$ -ról  $\varphi=90\%$ -ra emelkedett, miközben annak fajlagos páratartalma 7-ről 13 g/kg-ra

nőtt (jobb oldali tengely). Tehát száraz-levegő kg-onként 6 g víz elpárolgása történt meg. Egyébként az elméletileg maximálisan elpárolgatható vízmennyiség akkor adódna, ha a páratartalmat 100%-ig növelnénk, hiszen attól nagyobb mennyiségű vízgőz felvételére nem képes a levegő. A víz párolgásának energiaigénye számos tényezőtől függ, de közelítőleg a 3-as, igen egyszerű összefüggéssel adható meg:

$$E = m_{\text{víz}} \cdot r_{\text{víz}} \quad (3)$$

ahol  $r_{\text{víz}} \approx 2436$  kJ/kg a víz párolgáshője 27 °C-on. Ennek alapján a 6 g víz elpárolgása 16,62 kJ hőt von el minden kilogrammnyi száraz levegőből, amely eredményeképpen a kezdetben 35°C-os levegő 20°C-ra hűl le (a 2. ábrán a „száraz hőmérséklet” tengelyén való elmozdulás). Az ilyen elven működő léghűtő berendezések működési elvének matematikai modelljét Camargo et al [9] írták le, majd a vizsgálataikkal [10] igazolták is a modellt. Később a folyamat numerikus modellezését, majd annak validálását Kovacevic és Sourbron [11] végezte el. A közvetlen párologtatás legnagyobb hátránya is látszik az ábrán: a lehűtött levegő relatív páratartalma megnő. Ez a magas érték (a példában 90%) messze az emberi komfortérték felett van: az ilyen levegőben nedvesnek érezzük testünket, ruházatunk a bőrünkhöz tapad. Ebből adódóan nem célszerű az ilyen elven működő berendezések emberi életterekben történő alkalmazása, azonban az ilyen gépek gyártói jellemzően nem hívják fel a vásárlók figyelmét e hátrányos tulajdonságra. Mindazonáltal ezek a berendezések igen jó hatékonysággal alkalmazhatók például üvegházak levegő-jellemzőinek beállítására [12].

A fajlagos páratartalom növelése nélkül valósítható meg léghűtés a közvetett típusú berendezés segítségével. Ekkor a víz párologtatása nem a hűtendő légtérbe, hanem a külső környezetbe történik. A hűtendő tér hőmérsékletét – a részleges párolgása miatt lehűlt – víz egy folyadék-levegő hőcserélőn keresztül csökkentik. Ezt a folyamatot tekinthetjük meg a 3. ábrán.

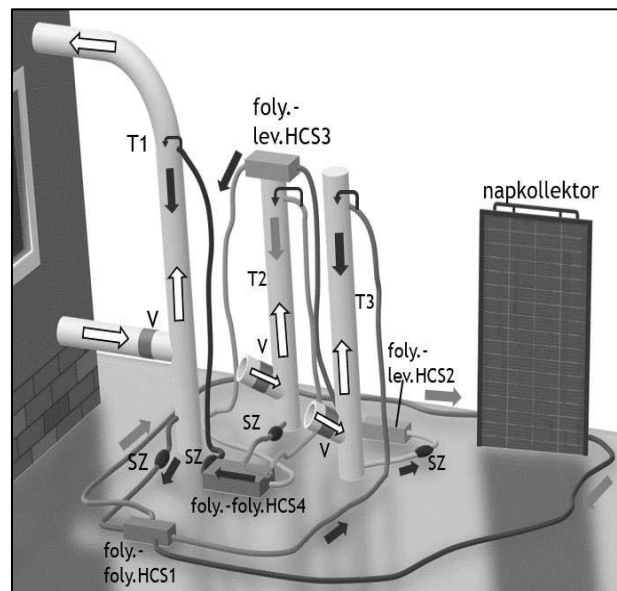


3. ábra Közvetett párologtatás során végbemenő légállapot-változás (módosított diagram, eredeti [6])

A hűlés során a relatív páratartalom a telítésig (1-1') konstans marad:  $x = \text{áll.}$ , azonban további hőelvonás esetén megkezdődik a kicsapódás (1'-2), aminek eredményeként a hűtött levegő fajlagos nedvességtartalma csökken ( $x_2 < x_1$ ), miközben  $\varphi = 100\% = \text{áll.}$  Ezzel a megoldással a kezelt levegő – a belső és külső légparaméterek függvényében – akár alacsonyabb hőfokúra is hűthető, mint direkt párologtatás esetén, azonban itt is párával telített levegőt kapunk.

A magas páratartalom csökkentése tehát elengedhetetlen a komfort-tartomány eléréséhez: e célra higroszkopikus (vízfelvevő) anyagokat alkalmazhatunk. Egy légszárításra alkalmas és könnyen elérhető anyagkeverék például a kalcium-klorid vizes oldata. A tömény oldatot tartalmazó folyadékfilmmel vagy folyadékcseppekkel érintkező levegő páratartalmának egy részét felveszi az oldat, miközben a levegő páratartalma csökken, az oldat pedig hígul. A felhígult oldatot regenerálni szükséges, amely eredményeként ismét tömény oldat jön létre. Ehhez az oldat melegítése szükséges, majd a meleg oldatot tartalmazó nagy felületű folyadékfilm és/vagy folyadékcseppek – a megnövekedett vízgőz-nyomás miatt – a külső környezet levegőjébe adják le víztartalmuk egy részét, miközben töménységük nő. Az indirekt evaporatív léghűtő berendezés előnye éppen abban rejlik, hogy a regenerációhoz szükséges hőigényt a napenergia segítségével napkollektorban előállított meleg hőhordozó közeg segítségével is biztosíthatjuk.

Egy ilyen elven működő léghűtő és -szárító berendezés vázlatát mutatja be a 4. ábra, amely felépítéséhez és a működésének részleteihez Robert Heron videója [13] szolgált hasznos információkkal.



4. ábra Közvetett párologtatást és légszárítást megvalósító berendezés vázlatát. T: torony, V: ventilátor, SZ: szivattyú, HCS: hőcserélő.

A berendezés működése a következő. A T1 toronyban található a kezelendő levegő a telített és hideg sóoldattal, aminek hatására a levegő hőmérséklete és fajlagos páratartalma is csökken, tehát ez maga a légtisztító rendszer célja. A HCS1-ben a napkollektorból érkező forró közegtől átvett hő miatt a beérkező felmelegedett és hígabb sóoldat felhevül, majd a T3 regeneráló-toronyba kerül. Itt a környezeti levegővel szembe áramoltatva víztartalmának egy része elpárolog miközben hőfoka csökken. A környezettől még melegebb, de már nagyobb koncentrációjú oldat a HCS2 hőcserélőben tovább hűl – közel a környezeti hőfokig –, majd ezt követően a víz párolgása miatt lehűlt levegővel hűtött HCS3 hőcserélőben (T2 tetején) a környezeti hőfok alá hűl. Ezt követi a HCS4 ellenáramú hőcserélőben történő hőelvonás, ahol a tömény oldat jó közelítéssel a hűtővíz hőfokára hűl le. Innen már ismét a T1 toronyba kerül, s a ciklus újraindul. A hűtővíz alacsony hőmérsékletét a T2-es párologtató-toronyban a környezeti levegő által okozott intenzív párolgás biztosítja (lásd a (3) összefüggést). E toronyban a hűtővíz folyamatosan kering a felfelé áramló levegővel szemben (folyadékfilm és folyadékcseppek a nagy párolgási felület céljából), miközben egy része elpárolog (ezt lágyvízzel pótolni szükséges), továbbá a megmaradó rész pedig lehül.

A cikk írásának idején a 4. ábrán vázolthoz hasonló rendszer összeállítása már megkezdődött. A berendezés laboratóriumi vizsgálatát klímakamrában kívánjuk elvégezni, ahol biztosítható a működési jellemzők állandó légparaméterek melletti meghatározása. A vizsgálatokhoz szükséges állandó értékű paraméterek biztosításához egy elektromos folyadékfűtő rendszerrel helyettesítjük a napkollektort, mivel így valósítható meg a konstans hőbevitel. Sikeres vizsgálatok és a rendszer alkalmas továbbfejlesztését követően már napkollektorral kívánjuk azt üzemeltetni, így a villamosenergia-fogyasztása csupán a szivattyúk és a ventilátorok energiafogyasztására fog korlátozódni.

## 6. IRODALOM

- [1] KONG D., LIU H., WU Y., LI, WEI B., YUAN M.: *Effects of indoor humidity on building occupants' thermal comfort and evidence in terms of climate adaptation*, Building and Environment, Vol. 155, (2019), pp. 298-307, doi:10.1016/j.buildenv.2019.02.039.
- [2] ANSI/ASHRAE standard 55–2010: *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc, Tullie Circle, NE, Atlanta, 1791
- [3] ORMANDY, DAVID & EZRATTY, VÉRONIQUE.: *Health and thermal comfort: From WHO guidance to housing strategies*, Energy Policy Vol. 49. doi:10.1016/j.enpol.2011.09.003.(2011)
- [4] LEUSDEN, E, FREYMARK, H. " *Documentation of comfort for practical use*", Gesundheitsingenieur (1951) pp. 271-273 (német nyelven).
- [5] ANSI/ASHRAE standard 55–2010: *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc, Tullie Circle, NE, Atlanta (1791)
- [6] Online Interactive Psychrometric Chart. <http://www.flycarpet.net/en/psyonline>; hozzáférés: 2022.10.10.
- [7] Rafique, M. M., Gandhidasan, P., Rehman, S., Al-Hadhrami, L. M.: *A review on desiccant based evaporative cooling systems*, Renew. Sustain. Energy Rev. Vol. 45, pp. 145–159 (2015)
- [8] Bishoyi, D., Sudhakar, K.: *Experimental performance of a direct evaporative cooler in composite climate of India*, Energy and Buildings Vol. 153, pp. 190-200. (2017)
- [9] Camargo, J.R., Ebinuma, C.D., Cardoso, S.: *A mathematical model for direct evaporative cooling air conditioning system*, Engenharia Térmica Vol. 4, pp. 30–34. (2003)
- [10] Camargo, J. R., Ebinuma, C.D., Silveira, J.L.: *Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city*, Int. J. Refrig. Vol. 28, pp. 1124–1132. (2005)
- [11] Kovacevic, I., Sourbron, M.: *The numerical model for direct evaporative cooler*, Appl. Therm. Eng. Vol. 113, pp. 8–19. (2017)
- [12] Franco, A., Valera, D.L., Pena, A.: *Energy efficiency in greenhouse evaporative cooling techniques: cooling boxes versus cellulose pads*, Energies, Vol. 7, pp. 1427–1447. (2014)
- [13] R. Heron: *Tech Ingredients channel* (<https://www.youtube.com/c/TechIngredients>); hozzáférés: 2022.10.14.