

VÍZ KÖZVETETT PÁROLGÁSÁN ALAPULÓ, LÉGSZÁRÍTÓVAL SZERELT KÍSÉRLETI LEVEGŐHŰTŐ RENDSZER KIALAKÍTÁSA LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATOKHOZ

Szaszák Norbert Tibor

Absztrakt: Jelen tanulmányban egy olyan kísérleti léghűtő- és szárító rendszert mutatunk be, amely az elterjedt kompresszoros klímaberendezéstől várhatóan jóval alacsonyabb villamosenergia-igénnyel rendelkezik azonos hűtési teljesítmény esetén. A levegő hűtését olyan alacsony hőmérsékletű vizes sóoldat biztosítja, amely higroszkópos tulajdonsága révén a hűtéssel együtt a hűtött levegő abszolút páratartalmát is csökkenti. Az alacsony hőmérsékletű hűtő/szárító közeg előállításáért egy hőcserélő felel, amelyben a sóoldat a hőenergiáját hűtött lágyvíznek adja át. A lágyvíz hűtése egy evaporatív hűtőberendezésben, a lágyvíz külső környezetbe történő párologtatásával valósul meg. Így tehát a hűtendő levegőből elvont hő a vízpárában tárolt látens hővel a környezetbe távozik. A dolgozatban bemutatásra kerül a rendszer felépítése, továbbá az egyes rendszerelemek szerepe is. Részletesen kitérünk a hűtött vizet előállító evaporatív hűtőberendezés működésére, s annak fizikai megvalósítására is.

Abstract: In this paper an experimental air conditioning system is presented which has significantly lower expected electrical energy consumption than that of the conventional compressor-operated ones in a basis of same cooling power. The cooling of the air is provided by cool hygroscopic salt solution while it is capable to dry the treated air. The salt solution is re-cooled in a heat exchanger where its heat is transferred to cooled soft water. The cooling of the soft water is provided by its evaporation into the ambient air in an evaporative chiller. Thus, the extracted heat energy of the treated air is transformed to the latent heat of the water vapour which is exhausted to the external environment. In this paper the structure of the system and the function of each part is presented. The operation and the technical implementation of the evaporative chiller is presented in detail.

Kulcsszavak: légkondicionálás, párologtatás, napenergia, megújuló energia, légszárító-sóoldat

Keywords: air conditioning, evaporation, solar energy, renewable energy, desiccant

1. Bevezetés

A lakó- és ipari épületek belső terének léghőmérséklete és páratartalma a nyári időszakokban – az időjárási szélsőségek egyre gyakoribbá válása miatt – az emberi komfortzónán kívül kerülhet (Shaharon–Jalaludin, 2012). A komfortos munka- és lakókörnyezet biztosításához éppen ezért szükséges klimatizálni a levegőt, amely segítségével az emberi komfort számára megfelelő léghőmérsékelt-tartomány és légnedvesség (páratartalom) tartomány állítható be (ANSI/ASHRAE, 1971). Ilyen célból a legtöbb esetben kompresszoros, zárt munkaközegű klímaberendezéseket alkalmaznak, amelyek villamosenergia felhasználásával üzemelnek: a kompresszorral egybeépített villanymotor hajtásához szükséges a felhasznált villamos energia döntő hányada, a fennmaradó részt pedig a kondenzátor- és az elpárologtató egységek ventilátorai és az egység vezérlése igényli. Ezek a berendezések a működésükre jellemző jósági tényezőtől (SEER-szezonális hűtési hatásfok) függően a felvett villamos teljesítmény többszörösének megfelelő hőtjeljesítményt tudnak elszállítani a klimatizált (hűtött) térből a környezet felé.

Mivel azonban a szállítandó hőmennyiség az épület méretéből és energetikai jellemzőiből adódóan jelentős is lehet, így a klímaberendezés működtetéséhez felhasznált villamosenergia is számottevő költséget jelenthet, tekintve az energiaárak folyamatos növekedését. Mindazonáltal a villamosenergia megtermelése és a fogyasztási helyre juttatása is jelentős energiaigénnyel és veszteségekkel bír, amely így a felhasznált energiahordozótól függően környezeti terhelést jelenthet.

A levegő kondicionálása (itt: hűtése és szárítása) más fizikai elven működő berendezéssel is megvalósítható, például a víz párologtatásának elvén, állandó nyomáson üzemelő hűtőberendezéssel (Guan et al., 2015). Az ilyen elven üzemelő léghűtő berendezés nem igényel nagy teljesítményű kompresszort: helyette kisebb teljesítményű szivattyúk és ventilátorok, továbbá a vezérlés energiaigényét szükséges villamos energiával fedezni. Megkülönböztetünk közvetlen (direkt) párologtatáson alapuló rendszereket, amelyek a hűtött térbe párologtatnak vizet (így jelentősen növelve az abszolút páratartalmat), továbbá közvetett (indirekt) típusokat (Duan et al., 2012), amelyek esetében a párologás a külső környezetben zajlik, s az így előállított alacsony hőmérsékletű folyadékot használják hőelvonásra (a hűtött tér abszolút páratartalma nem nő).

Az indirekt rendszer előnye, hogy nem növeli a hűtött tér abszolút páratartalmát, mivel nem a hűtendő légtérbe párologtat. Azonban hátrányos tulajdonsága, hogy a hűtés miatt a levegő relatív páratartalma nő (Moran et al., 2014), ami miatt az kikerülhet az emberi komforttartományból. Ennek oka az, hogy az ilyen rendszer a termodinamikai paraméterei miatt nem képes megfelelően alacsony hőmérsékletű hűtőközeget előállítani (így nem történik kondenzáció), ami miatt nem alkalmas a hűtött levegő páratartalmának csökkentésére (Bishoyi–Sudhakar, 2017). Ehhez egy kiegészítő légszárító rendszert szükséges beépíteni, amelynek a működéséhez (a regeneráláshoz) azonban jelentős hőenergiaigény társul (Rafique et al., 2015). Ezt az igényt azonban megújuló energiával is biztosíthatjuk, például napkollektorban előállított melegvíz segítségével.

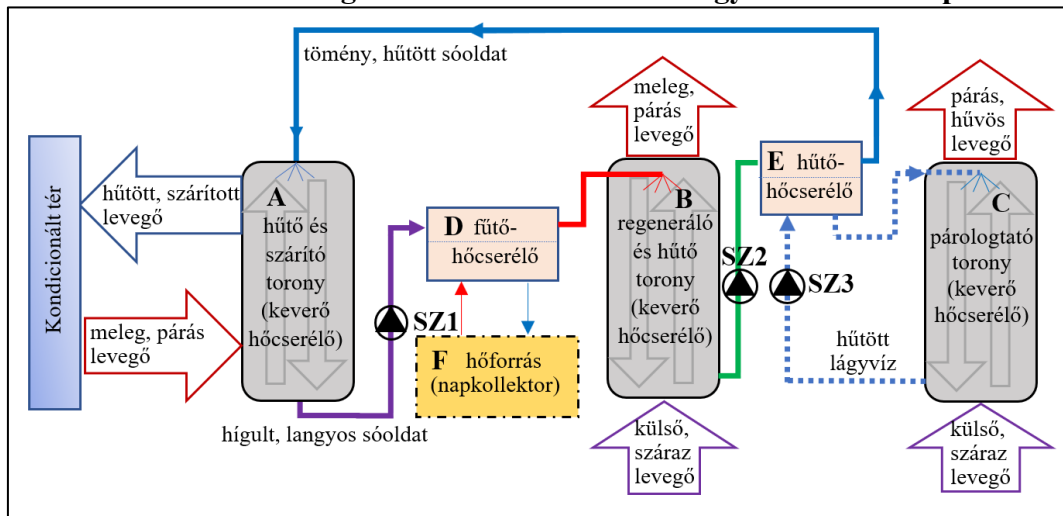
A Miskolci Egyetemen Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszékén egy olyan kísérleti rendszer összeállítását tűztük ki célul, amelyen demonstrálható az ilyen elven üzemelő berendezés működése, s amelyen külön-külön bemutathatók az egyes rendszerelemek és azok felépítése, feladata. Az elkészített rendszer segítségével számos vizsgálat lesz elvégezhető annak érdekében, hogy – a minél hatékonyabb működés céljából – optimalizálni lehessen az egyes komponenseket.

2. A berendezés felépítése és működése

Az összeállítandó kísérleti rendszer egyszerűsített vázlatát az *1. ábrán* látható, amelynek segítségével megérthető annak működése is. A rendszer három keverő hőcserélőt tartalmaz, mindegyikben folyadék és levegő közötti hőcsere történik. Az A hőcserélőben ellenáramban találkozik a hűtendő helyiség levegője a lehűtött, tömény sóoldattal. Miközben a levegő hűl és ezzel párhuzamosan szárad, tehát csökken az abszolút páratartalma (a higroszkopikus, tömény sóoldat hatására), a sóoldat felmelegszik, s hígul (Gao et al., 2013). Az A hőcserélőt így hűtött, s emellett alacsonyabb abszolút páratartalmú levegő hagyja el, ami visszakerül a kondicionált

helyiségbe. Ez a részfolyamat tehát a rendszer működésének célja, azonban a hő- és anyagcsere hatására felmelegedett és hígult oldatot ismét a kezdeti állapotába kell hozni. Ehhez szükséges a rendszer többi eleme, amelyek feladatai a következők.

1. ábra: A kísérleti léghűtő és -szárító rendszer egyszerűsített felépítése



Forrás: a szerző szerkesztése.

Az A tornyot elhagyó, párát felvett, azaz hígult sóoldat regenerálása szükséges ahhoz, hogy az ismét visszanyerje légszárító tulajdonságát. Ehhez az oldatból ki kell űzni az oldószer (víz) egy részét. Ennek céljából az SZ1 szivattyú az oldatot a D felületi hőcserélőn áramoltatja keresztül, ahol az felmelegszik, majd onnan a B jelű keverő hőcserélőbe jut. A sóoldat fűtéséhez szükséges hőteljesítmény függ a sóoldat térfogatáramától, belépő hőmérsékletétől, továbbá a használt só típusától és egyéb paramétereiktől (pl. hígultság mértéke). A kísérleti rendszerben CaCl_2 sóoldatot kívánunk alkalmazni annak előnyös tulajdonságai miatt (nem mérgező, könnyen beszerezhető, higroszkopikus tulajdonság). A légkondicionáló rendszer egyik legkiemelkedőbb előnyös tulajdonsága, hogy villamosenergia helyett bármilyen forrásból származó hőenergia felhasználható a regeneráláshoz. A későbbi kutatásaink során a szükséges hőmennyiséget napenergia segítségével kívánjuk előállítani, amely eredményeképp a rendszer energiafelhasználásának jelentős részét megújuló energiaforrás adhatja.

A felmelegített sóoldat a B keverő hőcserélőben ellenáramban találkozik a külső környezet levegőjével, így egyrészt átadja a hőjének egy részét, továbbá a magas gőznyomása miatt víztartalmának egy része kipárolog az oldatból. A hőcserélőt a környezeti hőfoktól valamivel magasabb hőmérsékletű, de töményebb oldat hagyja el. Ezzel egyidőben a környezeti levegő felmelegszik és abszolút páratartalma – időben állandósult folyamatot feltételezve a kezelt levegő szárítása során felvett vízmennyiséggel – megnő. Mivel e folyamat után ismét magas koncentrációjú oldat áll rendelkezésre, a következő feladat ennek minél alacsonyabb hőmérsékletre történő lehűtése azért, hogy az a hűtési feladatát is elláthassa. Ezért szükséges a rendszert kiegészíteni egy párolgató körrel is (C-SZ3-E), amelynek feladata nem

más, mint a környezet hőmérsékletétől alacsonyabb hőfokú lágyvíz biztosítása, annak közvetlen adiabatikus párologtatása segítségével (Camargo et al., 2003, Kovacevic–Sourbron, 2017). A fizikai folyamat egyik előnye, hogy annál hatékonyabb a párologás, minél magasabb a környezeti hőmérséklet, amellyel együtt teljesül, hogy éppen nagyobb hűtési igények esetén üzemel nagyobb teljesítménnyel a párologtatás.

A C keverő hőcserélőben a keringtetett lágyvíz ellenáramban találkozik a külső környezet levegőjével (párologtató torony). Az intenzív hő- és anyagtranszport érdekében célszerű úgy kialakítani a keverő hőcserélőket, hogy a folyadékok minél nagyobb felületen találkozzanak a levegővel, ezért a torony tetejébe szivattyúzott folyadék egy esőztető fűvóka segítségével apró cseppekre esik szét, továbbá a torony belső felülete is szálas anyagot tartalmaz, amin nagy felületű folyadékfilm keletkezik. A torony aljába gravitációsan érkező folyadék az útja során folyamatosan párolog az ellenáramú levegőben, így a párologás során elvont látens hő miatt hőfoka csökken. A felfelé áramló környezeti levegő páratartalma nő, azonban hőmérséklete folyamatosan csökken. Így egy magas páratartalmú, de a kezdetitől alacsonyabb hőfokú levegő hagyja el a toronyt. A torony alján összegyűlő, a környezeti levegőtől alacsonyabb hőmérsékletű vizet az SZ3 szivattyú juttatja az E hőcserélőbe, ahol az hőt von el a tőle melegebb, tömény sóoldattól. A lágyvíz ezt követően ismét a torony tetejébe kerül, így a párologási folyamat megismétlődik. Az ilyen módon lehűtött tömény sóoldatot az SZ2 szivattyú újra visszajuttatja az A toronyba, így a légszárításra ismét képes, a környezeti levegőtől alacsonyabb hőfokú sóoldattal a kezelendő tér levegőjének kondicionálása folytatódik, a ciklus újraindul.

Ezek alapján látható, hogy a rendszerrel előállítható legalacsonyabb hőmérséklet nagyban függ a C torony tulajdonságaitól, továbbá a párologás intenzitásától. A párologás mértéke növelhető a levegő-víz felület és a kontaktidő növelésével, továbbá jelentősen függ a környezeti levegő hőmérsékletétől és páratartalmától (Amer et al., 2015).

Az előzőekben bemutatott egyszerű rendszer hatásfoka több módszerrel is jelentősen javítható (Szaszák–Juhász, 2022), amely megoldásokat – a könnyebb érthetőség miatt – nem tartalmazza az 1. ábra. Az egyik módszer a B toronyból kilépő, a környezetitől magasabb hőmérsékletű tömény oldat hűtése közel a környezet hőfokára egy felületi hőcserélő segítségével. Ehhez a kísérleti rendszer esetén egy axiális ventilátorral összeszerelt folyadék-levegő hőcserélőt fogunk alkalmazni, amelyet a B-E szakaszba építünk be. Tovább csökkenthető a sóoldat hőfoka, ha felhasználjuk a C toronyból kilépő hideg levegőt. Amennyiben egy további folyadék-levegő hőcserélőt helyezünk a C torony tetejére, már a környezettől hidegebb sóoldatot kapunk, amelyet ezt követően bevezetünk az E hőcserélőbe. Mindezek eredményeként a két kiegészítő hőcserélővel elérhetjük, hogy alacsonyabb hőmérsékletű sóoldat érkezzen az A toronyba, ami nagyobb hűtési teljesítményt fog eredményezni.

3. A párologtató torony hatékonyságának maximalizálása

Az előzőekben bemutatott rendszer működése és a vele elérhető legalacsonyabb hőmérséklet attól függ, hogy milyen hatékonysággal működik a C torony (amely a külső környezetbe párologtatja a lágyvizet). Az elméletileg elérhető legalacsonyabb hőfok közvetlen párologtatás esetén megegyezik a toronyba belépő környezeti levegő nedves hőmérsékletével (T_w), ami pedig a levegő hőmérsékletének (T_a) és páratartalmának a függvénye: egy száraz, meleg levegő nedves hőmérséklete alacsonyabb lehet, mint egy hűvösebb, de nedves levegőé. Amennyiben a levegő relatív páratartalma 100%-os, úgy már több vízpárát nem tud felvenni: ebben az esetben a hőmérséklete megegyezik a nedves hőmérsékletével, tehát a C torony nem képes párologtatással hűteni.

A T_w hőmérséklet csak ideális esetben érhető el, ettől az alkalmazott technika függvényében magasabb hőfok adódik. A párologtatás ε hatásosságát az (1) összefüggéssel definiálhatjuk, amelyben T_{ki} a toronyból kilépő nedves levegő hőmérséklete:

$$\varepsilon = \frac{T_a - T_{ki}}{T_a - T_w} \quad (1)$$

Camargo et al. (2005) alapján levezethető, hogy egy A nedvesített felületű párologtató hőcserélő esetén annak hatásossága felírható a (2) összefüggéssel is:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\frac{h_c A}{\dot{m}_a c_{p,ha}}} \quad (2)$$

ahol:

h_c a folyadékfelszín-levegő közötti konvektív hőátviteli tényező ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$),

\dot{m}_a a levegő tömegárama (kg/s),

$c_{p,ha}$ a nedves levegő állandó nyomáson vett fajhője ($J/(kg \cdot ^\circ C)$).

Ez alapján a hatásosság maximumához a h_c hőátviteli tényező és/vagy az A felület növelése szükséges, vagy az áramló levegő tömegáramát kell csökkenteni. Mivel azonban a képletben szereplő h_c paraméter is erősen függ a tömegáramtól, így az jelentős hatással van a hatásosságra: a csökkenő tömegáram csökkenő légsebességet eredményez, amely a hőátvitelt csökkenti, továbbá a nedves levegő fajhőjét is befolyásolja. Fontos azonban figyelembe vennünk, hogy az előzőekben definiált összefüggések a párologtatással lehűtött nedves levegőre vonatkoznak. Az előzőekben bemutatott rendszer esetén a lehűtött nedves levegő (C toronyból) egyedül a hűtési teljesítményt növelő folyadék-levegő hőcserélőben történő hőelvonásra lesz alkalmazva, így az (1) szerint definiált hatásosság csak ilyen esetben releváns. A közvetett hűtésen alapuló rendszer tekintetében a lehűtött víz minél alacsonyabb hőmérsékletének elérése a cél.

A kísérleti berendezés esetén egy ellenáramú párologtató tornyot kívánunk összeállítani, amelyben – annak felső részéből – a súlyerő miatt hullanak alá a vízcseppek a felfelé áramló levegőben, miközben a felületükön párolognak. Az

áramló levegő eközben lehűl, továbbá páratartalma megnő. Fontos kérdés, hogy ez az elrendezés-e a legoptimálisabb az adott feladatra. Ugyanis több, egymással ellentétes hatású folyamat játszódik le a hő- és anyagcsere során:

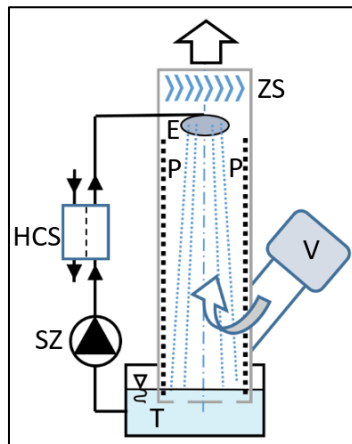
1. A légáramba fentről belépő hűvös folyadékcsepp nedves és hűvös levegővel érintkezik (a torony felső részében), amely esetben mind a hőcsere, mind pedig a párolgás kismértékű, mindkettő folyamat jelentősen függ a torony e szintjén kialakuló termodinamika paramétereitől.

2. A lefelé haladó vízcsepp egyre melegebb, de ezzel együtt szárazabb levegővel találkozik: egyrészt nő a párolgás intenzitása, ami hűti a vízcseppet, azonban ezzel együtt nő a levegő-víz közötti hőfokkülönbség is, ami viszont a vízcsepp felé irányuló hőáramot fog létrehozni.

3. A torony alsó részében lefelé haladó vízcsepp a felületén intenzíven párolog (hűl), mivel a környező levegő meleg és száraz, azonban szintén ekkor a legnagyobb az a konvekciós hőáram is, ami a meleg levegő felől a vízcsepp irányába áramlik.

Mindezek miatt a későbbiekben egy olyan párologtató-tornyot kívánunk összeállítani (2. ábra), amelyet az Intézet laboratóriumában található klímakamrába helyezve, annak különböző paraméter-beállításai mellett tudunk vizsgálatokat végezni.

2. ábra: A hűtőtorony felépítése. T: víztartály, SZ: szivattyú, HCS: hőcsereelő, E: esőztető, P: porózus falborítás, ZS: cseppleválasztó-zsalu, V: ventilátor.



Forrás: a szerző szerkesztése.

A torony maga egy műanyag henger, amelyet külső palástján hőszigeteléssel látunk el a környező levegővel történő hőcsere minimalizálása végett. A torony alján egy Y-elágazás található: itt érkezik a toronyba a V ventilátor által szállított környezeti levegő. A torony alsó vége a T tárolóedényben, a hűtővíz szintje alatt található. A hűtővizet az SZ szivattyú a HCS hőcsereelőn keresztül juttatja fel az E esőztető fejbe. Abból a víz cseppekre szakadva halad lefelé a toronyban, miközben a cseppek egy része nedvesíti a P porózus, a víz által nedvesített falfelületet is. A kisméretű cseppeket – alacsony ülepedési sebességük miatt – a felfelé áramló levegő

magával ragadja, azonban azok a ZS cseppeválasztó-zsaluzatra tapadva, majd nagyobb méretű cseppekké összeállva visszajutnak a toronyba.

A vizsgálatokhoz használt klímakamra segítségével beállítható a kívánt léghőmérséklet és páratartalom, amelyek állandósága mellett mérhető a toronyban keringtetett hűtővíz hűlési sebessége és az adott beállítással elérhető legalacsonyabb hőfok. E kísérletek során a változtatott paraméter a (2) összefüggés alapján az átáramoltatott levegő térfogatárama lesz, amelyet a V ventilátor fordulatszámának állításával szabályozhatunk. A vizsgálataink célja a folyamat hő- és anyagtranszportjának meghatározása azért, hogy optimalizálhassuk a torony kialakítását, továbbá a benne áramló közegek áramlási paramétereit. Ehhez a toronyban – annak különböző szintjein – hőelemeket fogunk elhelyezni olyan módon, hogy egy-egy szinten mind a levegő hőmérsékletét, mind pedig a víz hőfokát lehessen mérni. Ezek mellett a T tartály vizének hőfokát is időben folyamatosan mérjük és naplózzuk, mivel a teljes vízmennyiség ismeretében a hűlés sebességéből számítható a torony hűtési teljesítménye is.

4. Összefoglalás

Az előzőekben bemutatott, víz közvetett párolgásán alapuló hűtő- és légszárító berendezés összeállításával egy olyan, hő- és áramlástan, továbbá klimatechnikai vizsgálatok számára alkalmas berendezést kívánunk létrehozni, amely mind kutatási, mind oktatási célokat is szolgálhat a jövőben.

A berendezés részegységeinek vizsgálata és fejlesztése egy jobb hatásfokú, nagyobb hűtési teljesítményű gépet eredményezhet amellyel, hogy az egyetemi hallgatók gyakorlatban alkalmazhatják a releváns elméleti szaktudásukat. Ezek mellett a jövőben célunk lesz, hogy a berendezés hőenergia-igényét napenergiával állítsuk elő, ehhez azonban meg kell vizsgálni a regeneráló torony optimális működési paramétereit is.

Irodalomjegyzék

- Amer, O., Boukhanouf, R., Ibrahim, H. G. (2015): A Review of Evaporative Cooling Technologies. *Int. J. of Environmental Science and Development*, 6 (2): 111–117. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2015.V6.571>
- ANSI/ASHRAE standard 55–2010 (1971): Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc, Tullie Circle, NE, Atlanta.
- Bishoyi, D., Sudhakar, K. (2017): Experimental performance of a direct evaporative cooler in composite climate of India. *Energy and Buildings*, 153: 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.014>
- Camargo, J. R., Ebinuma, C. D., Cardoso, S., (2003): A mathematical model for direct evaporative cooling air conditioning system. *Engenharia Térmica*, 4: 30–34. <http://dx.doi.org/10.5380/reterm.v2i2.3473>
- Camargo, J. R., Ebinuma, C. D., Silveira, J. L. (2005): Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city. *Int. J. Refriger.*, 28 (7): 1124–1132. <http://www.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.12.011>

- Duan, Z., Zhan, C., Zhang, X., Mustafa, M., Zhao, X., Alimohammadisagvand, B., Hasan, A. (2012): Indirect evaporative cooling: Past, present and future potentials. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16 (9): 6823–6850. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.007>
- Gao, W. Z., Shi, Y. R., Cheng, Y. P., Sun, W. Z. (2013): Experimental study on partially internally cooled dehumidification in liquid desiccant air conditioning system. *Energy and buildings* 61: 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.034>
- Kovacevic, I., Sourbron, M. (2017): The numerical model for direct evaporative cooler. *Appl. Therm. Eng.*, 113 (6): 8–19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.025>
- Guan, L., Bennett, M., Bell, J. (2015): Evaluating the potential use of direct evaporative cooling in Australia. *Energy Build.*, 108: 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.020>
- Moran, J. M., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., Bailey, M. B. (2014): *Fundamentals of Engineering Thermodynamics (8th issue)*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey.
- Rafique, M. M., Gandhidasan, P., Rehman, S. L., Al-Hadhrami, M. A. (2015): Review on desiccant based evaporative cooling systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45: 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.051>
- Shaharon, M. N., Jalaludin, J. (2012): Thermal comfort assessment-A study toward workers' satisfaction in a low energy office building. *American Journal of Applied Sciences*, 9 (7): 1037–1045. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2012.1037.1045>
- Szaszák, N., Juhász, A. (2022): Experimental indirect evaporative air conditioning system - a possible implementation. *MATEC Web of Conferences*, 367: 00021. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236700021>